

**Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências**

MIGUEL FERNANDES FELIPPE

**GÊNESE E DINÂMICA DE NASCENTES:
CONTRIBUIÇÕES A PARTIR DA INVESTIGAÇÃO
HIDROGEOMORFOLÓGICA EM REGIÃO TROPICAL**

Belo Horizonte
2013

MIGUEL FERNANDES FELIPPE

**GÊNESE E DINÂMICA DE NASCENTES:
CONTRIBUIÇÕES A PARTIR DA INVESTIGAÇÃO
HIDROGEOMORFOLÓGICA EM REGIÃO TROPICAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Área de concentração: Análise Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Antônio Pereira Magalhães Jr.
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

2013

À minha família, meu maior orgulho.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem a ajuda de inúmeras pessoas que auxiliaram direta ou indiretamente ao longo de toda a pesquisa. Sem dúvida, merece um agradecimento mais que especial a fantástica equipe de campo que me acompanhou, sob sol ou sob chuva, por diversas vezes em cada uma das nascentes. André, Bernardo, Carol, Cristiano, Laila, Larissa, Mayara, e Vinícius, espero que vocês possam ter aprendido comigo tanto quanto eu aprendi com vocês.

Estendo esse agradecimento ao Me. Bruno Debien que acompanhou de perto todas as análises laboratoriais que foram realizadas na tese, auxiliando nos conceitos químicos e na interpretação dos resultados e, também, à Nívia Melo, técnica do Laboratório de Geomorfologia do IGC/UFMG.

Gostaria de agradecer aos laboratórios parceiros que confiaram na pesquisa e auxiliaram tecnicamente nas análises hidrogeoquímicas. Agradeço ao Laboratório de Espectrometria do IGC/UFMG, no nome do Prof. Dr. Adolf Horn e do técnico William Santos; ao Laboratório de Cromatografia Líquida do CDTN/CNEN, no nome da Dra. Lúcia Maria Auler; e ao Laboratório de Trítio Ambiental do CDTN/CNEN, no nome do Me. Zildete Rocha.

Ainda no âmbito acadêmico, agradeço a todos aqueles que colaboraram com críticas e sugestões para o engrandecimento da tese, em especial à Profa. Dra. Cristina Augustin e à Profa. Dra. Vilma Carvalho, pela avaliação no Workshop da Pós-Graduação; ao Prof. Dr. Wellington Assis, à Profa. Dra. Cristiane Oliveira e ao Prof. Dr. Luiz Bacellar pela colaboração no Exame de Qualificação do doutoramento.

Além disso, gostaria de prestar uma homenagem ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Pereira Magalhães Junior, que mesmo com todas as dificuldades referentes ao ineditismo do tema (e à minha megalomania), depositou em mim sua confiança. Esteve sempre presente em todos os momentos de dúvidas e sereno em todos os momentos de desespero. Um grande exemplo de profissional e pessoa, com quem me orgulho de ter convivido nesses últimos anos.

Não posso deixar de citar, adicionalmente, aqueles que abriram as portas de suas propriedades, sem qualquer restrição, para que fosse possível a realização do trabalho. Nesse ponto, faço um agradecimento especial ao Cido, que realizou os primeiros contatos com os proprietários de Lagoa Santa e ainda monitorou diariamente a precipitação (além de estar sempre duvidando de mim, o que me forçou a crescer cada dia mais). Obrigado, também, ao

Sr. Ivan, ao Sr. Antônio e ao Sr. Humberto, por me emprestarem suas nascentes. Agradeço imensamente aos funcionários do Parque Nacional da Serra do Cipó, nominalmente, ao Henri Collet (ex-diretor), à Rossana Santana, ao Edward Elias e ao Ivan Campos que possibilitaram a realização dos trabalhos na unidade de conservação. Um muito obrigado especial ao Canoa, nosso guia nos primeiros passos no parque. Institucionalmente, agradeço ao IBAMA e ao ICMBio por apoiarem o projeto.

Lembro, também, de todos os colegas do Departamento de Geografia da UFJF, no nome do chefe de departamento, Prof. Dr. Ricardo Zaidan, e do coordenador de curso, Prof. Dr. Leonardo Carneiro, que me apoiaram e auxiliaram, solidariamente, nas questões logísticas e burocráticas institucionais do final do doutorado. Ademais, pelo auxílio financeiro, agradeço a CAPES, CNPq e FAPEMIG.

Porém, um cientista não é construído apenas na academia. Por isso, dedico a tese à minha família, os responsáveis por formar meus valores e meu caráter. A ânsia e o ímpeto de descobrir as coisas, de indagar e de criticar é algo que se constrói desde criança.

Agradeço a minha mãe, Shirley, e meu pai, Júlio, por sempre terem acreditado nos meus sonhos; ao Cido, por colocar muitas dúvidas na minha cabeça; aos meus avós, Hinkler e Lourdes, Altemes e Inácia, e aos meus tios Júnior, Patrícia, Maria do Carmo e Marcelo, por estarem sempre presentes, mesmo quando distantes. Agradeço à minha irmã Helena, em quem sempre penso antes de qualquer decisão importante. E, por fim, agradeço a minha musa inspiradora, Bruna, companheira de todos os altos e baixos, minha maior crítica e maior motivação.

Espero, sinceramente, que esta tese esteja digna do apoio de vocês.

É ingraçado a gente vê cumé qui um rio nasce!

Às veiz, eu venho aqui na nascente do rio, im riba do morro, só pra bisservá! É um fiozinho d'água! Tão piquinininho qui inté parece qui carece di proteção! Mais ele vai descendo divagarinho morro abaixo! Inté parece qui um riozinho ansim num vai ganhá força! Crescê e ficá forte!

Mais ele continua! I começa a mudá! I a percebê a vida im vorta! Pruque o riozinho vai ficando maior i mais rápido! Como si ele tivesse aprendendo a vivê! I a dispertá pra tudo o qui acontece im vorta! I dentro dele!

Ele ganha força por ele mermo! I começa a i mais rápido! Cum mais força! Sempre im frente! Aprendendo o mior caminho! A passá pelas dificurdade! I a vencê quarqué obstáculo! Às veiz si infrenta corredera pra chegá à carmaria i incotrá otro riozinho! Qui corre lado a lado! Si aprochegando! Como si quisesse si conhecê! Inté si juntá i si transformá num riozão! Oia só! Parece qui nasceru um pro outro! I inté criam umas nascente como si fosse fiotinho!

I o rio sempre vai im frente! Ligeiro i cheio de vida! Só qui às veiz, dispois di tando corrê parece qui ele fica cansado i perde um tanto daquela rapideiz qui tinha! Mais mermo ansim ele inda tem força! Mermo qui incontre muita pedra no caminho! Num desiste! Mais sabe qui o distino é mais forte!

Mais um rio nunca termina! Ele recomeça! Num si sabe donde! Numa nuvem, num otro rio o inté no oceano! Carmo, grande, i tranquilo! Tar quar é a vida! Num é?

Chico Bento - O rio da vida

Mauricio de Souza Produções

Mauricio de Souza Editora; Panini comics. Chico Bento n. 59. Novembro de 2011.

RESUMO

As nascentes são sistemas ambientais reconhecidamente singulares e frágeis, responsáveis pela passagem da água subterrânea à superfície. Todavia, uma clara lacuna na compreensão desse tema está relacionada a sua gênese e dinâmica: como as nascentes surgem, evoluem e se comportam ao longo do tempo? Essa questão norteia a pesquisa e pontua a hipótese a ser investigada. Há uma grande heterogeneidade fisiográfica das nascentes, que reflete distintas características geomorfológicas, hidrológicas e hidrogeológicas regionais e locais. Desse modo, espera-se que as origens e dinâmicas das nascentes sejam diversas e complexas, porém, podendo ser explicadas por processos hidrogeomorfológicos superficiais e subterrâneos. A partir desta assertiva, traçam-se dois objetivos: compreender os processos hidrogeomorfológicos que levam à gênese das nascentes e interpretar a dinâmica das nascentes em função das suas variações hidrogeomorfológicas sazonais. Buscando traçar linhas gerais a partir de estudos de caso, 24 nascentes na Serra do Cipó (MG) e em Lagoa Santa (MG) foram monitoradas mensalmente durante um ano hidrológico. Além disso, sazonalmente foram coletadas amostras de água para análises laboratoriais (ICP-OES, Cromatógrafo de Íons e Titulação), utilizadas em modelos hidroquímicos e geomorfológicos. De forma complementar, foi realizada a datação das águas das nascentes a partir da concentração de trítio ambiental. Os resultados mostraram a importância das coberturas superficiais para a dinâmica hidrológica das nascentes, incluindo seu comportamento perene/temporário. A assinatura geoquímica da água identificou cinco principais sistemas aquíferos nas áreas estudadas. Além disso, o TDS e perda geoquímica foram calculados levando à conclusão de que o trabalho geomorfológico de nascentes pode ser mais importante do que pesquisas anteriores mostraram. Como esperado, a datação apontou águas modernas na maioria das nascentes estudadas, mas em alguns casos, foi encontrada a água pré-moderna. Todos esses resultados levaram aos condicionantes espaciais da dinâmica e gênese das nascentes, assim, foi possível elaborar cinco modelos teóricos para a origem das nascentes, com base em cinco principais processos hidrogeomorfológicos, numa perspectiva multiescalar: erosão linear; *piping/sapping*; *seepage erosion*; condutos cársticos; cavitação. Por fim, além da importância dos fenômenos hidrogeológicos e hidrológicos, a interpretação dos resultados obtidos reafirma que os processos geomorfológicos controlam a gênese e a dinâmica das nascentes. Espera-se que as reflexões levantadas neste trabalho, possam contribuir para a ampliação dos saberes da hidrogeomorfologia de nascentes, bem como para o gerenciamento e planejamento dos recursos naturais no Brasil.

Palavras-chave: Nascente. Hidrogeomorfologia. Hidrogeoquímica. Formação de canais.

ABSTRACT

The springs are environmental systems with recognized singularity and fragility, responsible for the passage of underground water to the surface. Nevertheless, a pronounced blank in this subject is related to the river springs geneses and dynamics: how do springs arise, evolve and behave through time? This question guides the research and points the hypothesis to be investigated. There is a great physiographic heterogeneity of river springs, due to its geomorphological, hydrological and hydrogeological characteristics. So, it's believed that the origins and the dynamics of springs are diverse and complex, but can be explained by superficial and underground hydrogeomorphological processes. From this affirmative, two main objectives are pointed: to comprehend the hydrogeomorphological processes that leads to the geneses of springs and to interpret the dynamics of springs due to their seasonal hydrogeomorphological variations. Trying to reach general lines from case studies, 24 river springs in Serra do Cipó (MG) and Lagoa Santa (MG) were monthly monitored for one hydrological year, to keep up with their hydrogeomorphological aspects. Besides, water samples were collected to laboratorial analysis (ICP-OES, Ion Chromatography and Titration), used in hydrochemistry and geomorphological models. Further, it was performed the dating of springs' water through the environmental tritium concentration. The results showed the importance of the surface coverage to control the hydrological dynamics of springs, including its perennial/temporary behavior. The geochemistry signature of the springs' water identified five main aquifer systems in the studied areas. Furthermore, the TDS and geochemical denudation of the springs were calculated leading to the conclusion that the geomorphological work of river springs can be more important than previous researches have shown. As expected, the age dating pointed to modern waters in the majority of studied springs, but in a few cases pre-modern water was found. All these results led to the spatial conditions of river springs dynamics and geneses, so, it was possible to develop five theoretical models for the origin of springs, based in five main hydrogeomorphological processes in a multiscale perspective: rill erosion; piping/sapping; seepage erosion; karst conduits; cavitation. Besides the importance of hydrogeological and hydrological phenomena, the interpretation of the results reaffirmed that the geomorphological processes control the geneses and the dynamics of the springs. However, it is expected that the reflections of this work can contribute to the expansion of the knowledge of the hydrogeomorphology of springs, as well as for the planning and management of natural resources in Brazil.

Keywords: Spring. Hydrogeomorphology. Hydrogeochemistry. Channel initiation.

RÉSUMÉ

Les sources sont systèmes environnementaux uniques et fragiles, responsables pour le passage de l'eau souterraine à la surface. Cependant, une lacune évidente dans la compréhension de cet objet d'étude est liée à sa genèse et dynamique: comment les sources émergent, évoluent, et se comportent dans le temps? Il y a une grande hétérogénéité géomorphologique des sources, en reflétant des distinctes caractéristiques géomorphologiques, hydrologiques et hydrogéologiques, régionales et locales. Ainsi, on s'attend à ce que les origines et la dynamique des sources sont variées et complexes, mais peut être expliquée par les processus hydrogéomorphologiques de surface et souterrains. D'après cette affirmation, deux objectifs sont posés: comprendre les processus hydrogéomorphologiques qui conduisent à la genèse de sources; et interpréter la dynamique des sources en fonction de leurs variations hydrogéomorphologiques saisonnières. En cherchant grandes lignes à partir d'études de cas, 24 sources dans la Serra do Cipo (MG) et Lagoa de Santa (MG) ont été suivies mensuellement au cours d'une année hydrologique. En outre, des échantillons d'eau ont été recueillis de façon saisonnière pour des analyses de laboratoire comprises dans les modèles géomorphologiques et hydrochimiques (ICP-OES, titrage et chromatographe ionique). En complément, l'âge apparent de l'eau des sources a été mesuré à partir de la concentration du tritium. La signature géochimique de l'eau a permis l'identification de cinq grands systèmes aquifères dans les zones d'étude. En outre, le TDS et la perte géochimique ont été calculés menant à la conclusion que le travail géomorphologique des sources peut être d'autant plus important que la recherche précédente a montré. Comme prévu, l'âge apparent signale la présence d'eaux modernes dans la plupart des sources étudiées, mais dans certains cas, l'eau prémoderne a été trouvée. Tous ces résultats ont conduit à des conditions spatiales de la dynamique et de la genèse des sources, de sorte qu'il a été possible d'élaborer cinq modèles théoriques d'origine des sources, basé sur cinq principaux processus hydrogéomorphologiques, dans une perspective multi-scalaire: érosion concentrée; piping/sapping; seepage erosion; conduits karstiques; cavitation. Enfin, au-delà de l'importance des phénomènes hydrogéologiques et hydrologiques, l'interprétation des résultats confirme que les processus géomorphologiques contrôlent la genèse et la dynamique des sources. Il est prévu que les discussions soulevées dans ce document, peuvent contribuer à l'expansion de la connaissance de la hydrogéomorphologie des sources, ainsi que pour la planification et la gestion des ressources naturelles au Brésil.

Mots-clés: Source. Hydrogéomorphologie. Hydrogéochimie. Formation des chenaux.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	O sistema ambiental da nascente e suas variáveis internas e externas.	29
Figura 2	Mosaico de fotografias representando a diversidade fisiográfica das nascentes.	32
Figura 3	A tríade geomorfológica: formas, processos e materiais.	35
Figura 4	Desenvolvimento de uma rede de drenagem em uma bacia hidrográfica.	40
Figura 5	Modelo de evolução da drenagem por exfiltração dos fluxos subterrâneos.	41
Figura 6	Tipos de canais fluviais de primeira ordem.	44
Figura 7	Esquema de representação dos tempos de residência em um sistema aquífero.	47
Figura 8	Esquematização dos procedimentos metodológicos adotados.	53
Figura 9	Exemplo de check-list utilizado nos trabalhos de campo exploratórios.	56
Figura 10	Exemplo de check-list de monitoramento realizado nos trabalhos de campo periódicos.	57
Figura 11	Características das nascentes avaliadas em campo.	59
Figura 12	Representação da concentração de trítio nas precipitações desde “bomb tritium” até o ano 2000 (gráfico à esquerda) e os valores calculados para as concentrações de trítio atuais das águas recarregadas neste período (gráfico à direita).	69
Figura 13	Localização das unidades de estudo sobre modelo digital de terreno.	73
Figura 14	Compartimentos do relevo das unidades de estudo.	73
Figura 15	Classes de solo das unidades de estudo.	76
Figura 16	Vegetação das unidades de estudo.	76
Figura 17	Valores médios mensais dos componentes do balanço hídrico (1991-2005) de Lagoa Santa-MG.	78
Figura 18	Modelo Digital de Terreno da Serra do Espinhaço Meridional.	79
Figura 19	Unidades litoestratigráficas sobre MDT na Serra do Cipó, com perfil topográfico E-W.	82
Figura 20	Localização das nascentes estudadas na Serra do Cipó - hipsometria.	84
Figura 21	Geologia das nascentes estudadas na Serra do Cipó.	86
Figura 22	Modelo Digital de Terreno da Depressão do Alto-Médio Rio São Francisco.	88
Figura 23	Estratigrafia da região de Lagoa Santa.	90
Figura 24	Unidades litoestratigráficas sobre MDT na porção sul da Depressão do Alto-Médio São Francisco, com perfil topográfico ESSE-WNW.	91
Figura 25	Localização das nascentes estudadas em Lagoa Santa - hipsometria.	94
Figura 26	Geologia das nascentes estudadas em Lagoa Santa.	95
Figura 27	Contextualização geográfica das nascentes catalogadas em Lagoa Santa, MG.	99

Figura 28	Contextualização geográfica das nascentes catalogadas na Serra do Cipó, MG.	102
Figura 29	Distribuição percentual das características hidrogeomorfológicas nas nascentes estudadas.	106
Figura 30	Características hidrogeomorfológicas das nascentes por unidade de estudo.	107
Figura 31	Vazão das nascentes de Lagoa Santa (fev-11 a fev-12).	110
Figura 32	Vazão das nascentes da Serra do Cipó (fev-11 a fev-12).	110
Figura 33	Percentual de nascentes ajustadas ao modelo de tipologia proposto.	115
Figura 34	Distribuição percentual das nascentes estudadas nos tipos propostos.	119
Figura 35	Inserção percentual das nascentes nos tipos levantados.	122
Figura 36	Tipologia das nascentes estudadas em Lagoa Santa.	123
Figura 37	Tipologia das nascentes estudadas na Serra do Cipó.	125
Figura 38	Precipitação diária e mensal durante o período de monitoramento em Lagoa Santa.	127
Figura 39	Precipitação diária e acumulado mensal durante o período de monitoramento no PNSCi.	128
Figura 40	Hidrograma anual de vazão da nascente LS02.	134
Figura 41	Hidrograma anual de vazão da nascente LS05.	134
Figura 42	Hidrograma anual de vazão da nascente LS06.	134
Figura 43	Hidrograma anual de vazão da nascente LS13.	134
Figura 44	Hidrograma anual de vazão da nascente LS14.	135
Figura 45	Hidrograma anual de vazão da nascente LS15.	135
Figura 46	Hidrograma anual de vazão da nascente PV03.	135
Figura 47	Hidrograma anual de vazão da nascente PV05.	135
Figura 48	Hidrograma anual de vazão da nascente PV07.	136
Figura 49	Hidrograma anual de vazão da nascente PV11.	136
Figura 50	Hidrograma anual de vazão da nascente PV14.	136
Figura 51	Hidrograma anual de vazão da nascente SC01.	137
Figura 52	Hidrograma anual de vazão da nascente SC04.	137
Figura 53	Hidrograma anual de vazão da nascente SC05.	138
Figura 54	Hidrograma anual de vazão da nascente SC10.	138
Figura 55	Hidrograma anual de vazão da nascente SC12.	138
Figura 56	Hidrograma anual de vazão da nascente SC14.	138
Figura 57	Hidrograma anual de vazão da nascente SC18.	139
Figura 58	Hidrograma anual de vazão da nascente SC19.	139
Figura 59	Hidrograma anual de vazão da nascente SC23.	139
Figura 60	Hidrograma anual de vazão da nascente SC24.	139
Figura 61	Hidrograma anual de vazão da nascente SC27.	140
Figura 62	Hidrograma anual de vazão da nascente SC28.	140
Figura 63	Hidrograma anual de vazão da nascente SC29.	140
Figura 64	Variação percentual das vazões mensais em relação à média mensurada das nascentes LS15, PV05, PV11, SC23 e SC24.	143

Figura 65	Variação percentual das vazões mensais em relação à média mensurada das nascentes SC04, SC05, SC10, SC12, SC28 e SC29.	143
Figura 66	Variação percentual das vazões mensais em relação à média mensurada das nascentes LS02, LS05, LS06, PV03, SC18, SC19, e SC24.	144
Figura 67	Variação percentual das vazões mensais em relação à média mensurada das nascentes LS13, LS14, PV07, PV14 e SC27.	144
Figura 68	Esquema representativo de uma nascente móvel e seu canal de primeira ordem em bloco diagrama (A) e perfil longitudinal (B).	152
Figura 69	Frequência de nascentes por classes de mobilidade.	152
Figura 70	Mobilidade mensal das nascentes SC04 e SC24.	154
Figura 71	Mobilidade mensal das nascentes LS05, LS14, SC10, SC12, SC14, SC18, SC19, SC23, SC27, SC28 e SC29.	154
Figura 72	Esquema do processo de erosão concentrada tendo como exemplo LS13.	160
Figura 73	Esquema do processo de cavitação, tendo como exemplo SC04.	161
Figura 74	Esquema de uma concavidade, tendo como exemplo SC20.	162
Figura 75	Esquema de um duto, tendo como exemplo PV05.	163
Figura 76	Comparação da mobilidade das nascentes entre as áreas de estudo.	165
Figura 77	Comparação da tipologia das nascentes entre as áreas de estudo.	166
Figura 78	Gráficos da participação relativa dos principais componentes hidrogeoquímicos da carga fluvial das nascentes no período seco (ago-11).	178
Figura 79	Diagrama de Schoeller das nascentes de Lagoa Santa no período seco (ago-11).	178
Figura 80	Diagrama de Schoeller das nascentes da Serra do Cipó no período seco (ago-11).	178
Figura 81	Gráficos da participação relativa dos principais componentes hidrogeoquímicos da carga fluvial das nascentes no período úmido (fev-12).	180
Figura 82	Diagrama de Schoeller das nascentes LS02, LS13, LS14, LS15, PV03, PV05, PV07 e PV11 no período úmido (fev-12).	181
Figura 83	Diagrama de Schoeller das nascentes SC05, SC10, SC14, SC18, SC19 e SC29 no período úmido (fev-12).	181
Figura 84	Diagrama de Schoeller das nascentes SC04, SC23, SC27, SC28, SC12, SC24, PV14, LS05 e LS06 no período úmido (fev-12).	181
Figura 85	Diagrama de Piper das nascentes drenantes no período seco (ago-11).	184
Figura 86	Diagrama de Piper das nascentes no período úmido (set-12).	184
Figura 87	Diagramas de Stiff das nascentes no período seco (ago-11).	187
Figura 88	Diagramas de Stiff das nascentes no período úmido (parte 1).	188
Figura 89	Diagramas de Stiff das nascentes no período úmido (parte 2).	189
Figura 90	Gráfico da variabilidade sazonal da condutividade elétrica da água das nascentes de Lagoa Santa em função do acumulado pluviométrico de 30 dias.	194

Figura 91	Gráfico da variabilidade sazonal da condutividade elétrica da água das nascentes da Serra do Cipó em função do acumulado pluviométrico de 30 dias.	195
Figura 92	Curva de concentração média anual estimada para precipitações nas áreas de estudo.	201
Figura 93	Curva de concentração média de trítio da mistura homogênea nas nascentes estudadas.	203
Figura 94	Classificação das águas das nascentes de acordo com a concentração mensurada de trítio para as amostras de setembro de 2011.	205
Figura 95	Classificação das águas das nascentes de acordo com a concentração mensurada de trítio para as amostras de março de 2012.	205
Figura 96	Modelo de gênese de nascentes a partir da erosão linear.	215
Figura 97	Modelo de gênese de nascentes a partir da erosão subsuperficial.	218
Figura 98	Modelo de gênese de nascentes a partir de condutos cársticos.	220
Figura 99	Modelo de gênese de nascentes a partir de seepage erosion.	222
Figura 100	Modelo de gênese de nascentes a partir da cavitação.	224

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Tipologia multivariada qualitativa de nascentes	34
Quadro 2	Limites de detecção e métodos de mensuração dos parâmetros hidrogeoquímicos analisados	68
Quadro 3	Descrição geral das nascentes catalogadas	97
Quadro 4	Nascentes selecionadas pra o monitoramento mensal	104
Quadro 5	Características hidrogeomorfológicas dos perfis criados pelo GoM	118
Quadro 6	Sazonalidade das nascentes	130
Quadro 7	Período de seca das nascentes intermitentes	131
Quadro 8	Alterações sazonais da morfologia e do tipo de exfiltração das nascentes	158
Quadro 9	Descrição dos prováveis sistemas aquíferos de origem das nascentes em função de suas características hidrogeoquímicas	190

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Estatística descritiva das vazões mensuradas (L/s)	109
Tabela 2	Estatística descritiva das vazões (L/s) das nascentes em função de suas características hidrogeomorfológicas básicas	111
Tabela 3	Descrição das variáveis e categorias utilizadas na tipologia	114
Tabela 4	Probabilidade associada a cada categoria das variáveis em cada perfil criado pelo modelo - λ_{kji}	116
Tabela 5	Grau de pertencimento das nascentes nos perfis criados (g_{ik})	121
Tabela 6	Correlação entre vazão e precipitação para as nascentes de Lagoa Santa (alfa = 0,05)	146
Tabela 7	Correlação entre vazão e precipitação acumulada nas nascentes da Serra do Cipó (alfa = 0,05)	148
Tabela 8	Mobilidade das nascentes medida a partir do deslocamento da exfiltração (em metros)	153
Tabela 9	Sólidos totais dissolvidos e perda geoquímica sazonal e anual nas nascentes estudadas	169
Tabela 10	Média de TDS e Perda Geoquímica pela localização e geologia das nascentes	172
Tabela 11	Hidrogeoquímica das nascentes no período seco - concentrações em mg/L	175
Tabela 12	Hidrogeoquímica das nascentes no período úmido - concentrações em mg/L	176
Tabela 13	Variação mensal da condutividade elétrica nas águas das nascentes - $\mu\text{S/cm}$	192
Tabela 14	Estatística descritiva da condutividade elétrica nas águas das nascentes - $\mu\text{S/cm}$	197
Tabela 15	Concentrações de trítio utilizadas para modelagem da idade aparente das águas para os dois anos de coleta (modelo de mistura homogênea)	202
Tabela 16	Resultados da idade aparente da água das nascentes a partir da concentração de trítio residual (modelo de mistura homogênea)	204

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1.	A COMPLEXIDADE INERENTE AOS ESTUDOS SOBRE NASCENTES	18
1.2.	ESCALA ESPAÇO-TEMPORAL DE TRABALHO	21
1.3.	HIPÓTESE	23
1.4.	OBJETIVOS	24
1.5.	ÁREAS DE ESTUDO	25
2.	A GEOMORFOLOGIA DAS NASCENTES	26
2.1.	CONCEITOS E ABORDAGENS SOBRE NASCENTES	26
2.2.	A TRÍADE GEOMORFOLÓGICA: FORMAS, PROCESSOS E MATERIAIS	35
2.3.	A ORIGEM DOS CANAIS FLUVIAIS	39
2.4.	O CONTATO ENTRE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS	45
3.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	53
3.1.	SÍNTESE DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS	53
3.2.	TRABALHOS DE CAMPO	55
3.2.1.	<i>CARACTERIZAÇÃO FISIOGRÁFICA</i>	57
3.2.2.	<i>AVALIAÇÃO DA DINÂMICA HIDROLÓGICA</i>	60
3.3.	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	62
3.4.	ANÁLISES HIDROGEOQUÍMICAS	64
3.5.	DATAÇÃO DAS ÁGUAS	68
4.	CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS ÁREAS DE ESTUDO	72
4.1.	CONTEXTO REGIONAL	72
4.2.	SERRA DO CIPÓ	78
4.3.	LAGOA SANTA	87
5.	CARACTERIZAÇÃO DAS NASCENTES ESTUDADAS	97
5.1.	QUADRO GERAL DAS NASCENTES	97
5.2.	ASPECTOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS	104
5.3.	CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS	107
5.4.	TIPOLOGIA DAS NASCENTES	112
5.4.1.	<i>ESPACIALIZAÇÃO DOS TIPOS DE NASCENTE</i>	120
6.	DINÂMICA HIDROLÓGICA SAZONAL	126
6.1.	SAZONALIDADE DAS NASCENTES	126

6.2.	HIDROGRAMAS ANUAIS DAS NASCENTES	132
6.3.	INFLUÊNCIAS DA PRECIPITAÇÃO NA VARIABILIDADE DAS VAZÕES	144
7.	DINÂMICA GEOMORFOLÓGICA	150
7.1.	ALTERAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS SAZONAIS	150
7.1.1.	<i>MOBILIDADE DAS NASCENTES</i>	151
7.1.2.	MORFOLOGIA E TIPO DE EXFILTRAÇÃO	157
7.2.	PROCESSOS GEOMORFOLÓGICOS DE MÉDIO TERMO	159
7.3.	DINÂMICA DE LONGO TERMO: RELAÇÕES MULTIESCALARES	164
7.4.	O TRABALHO GEOMORFOLÓGICO DAS NASCENTES	167
8.	AQUÍFEROS DE ORIGEM	173
8.1.	ASSINATURA GEOQUÍMICA	173
8.2.	TIPOS DE ÁGUA E IDENTIFICAÇÃO DOS AQUÍFEROS	183
8.3.	GRAU DE MINERALIZAÇÃO E MISTURA DE ÁGUA	191
9.	DATAÇÃO DAS ÁGUAS	199
9.1.	MODELO DE MISTURA HOMOGÊNEA	199
9.2.	IDADE APARENTE DAS ÁGUAS DAS NASCENTES	203
9.3.	SUSCEPTIBILIDADE DAS NASCENTES A IMPACTOS AMBIENTAIS EM RELAÇÃO AO SEU TEMPO DE FORMAÇÃO	209
10.	MODELOS TEÓRICOS DE GÊNESE DAS NASCENTES	213
10.1.	O PAPEL DOS COMPONENTES DO HIDROSSISTEMA	213
10.2.	PROCESSOS ENVOLVIDOS NA ORIGEM E EVOLUÇÃO DAS NASCENTES	214
10.2.1.	<i>MODELO 1: EROÇÃO LINEAR (EM SULCO)</i>	214
10.2.2.	<i>MODELO 2: PIPING/SAPPING</i>	216
10.2.3.	<i>MODELO 3: CONDUTOS CÁRSTICOS</i>	219
10.2.4.	<i>MODELO 4: SEEPAGE EROSION</i>	221
10.2.5.	<i>MODELO 5: CAVITAÇÃO</i>	223
11.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	226
	REFERÊNCIAS	233
	APÊNDICES	248

1. INTRODUÇÃO

1.1. A COMPLEXIDADE INERENTE AOS ESTUDOS SOBRE NASCENTES

Nascentes são ambientes singulares e heterogêneos dotados de uma notável importância geomorfológica, hidrológica, ecológica e social. Caracterizam-se pela passagem da água do meio subterrâneo para o superficial, definindo a espacialização da rede hidrográfica e configurando ecossistemas específicos de importância primeira para o equilíbrio dinâmico do sistema ambiental em escala regional.

Devido a esses predicados, as nascentes são objetos de estudos eminentemente multidisciplinares. Historicamente, os principais estudos relacionados à compreensão das nascentes e suas águas residem na hidrologia e na geologia (mais especificamente, na hidrogeologia), 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.

As ciências biológicas também contribuem para o estudo das nascentes, enquanto ecossistemas raros e particulares, viabilizando estudos de endemismos e biodiversidade, como demonstram van der Kamp (1995), Ward *et al.* (1998) e Stevens e Meretsky (2008) em estudos revisionais. Mais recentemente, as engenharias florestal e ambiental assumiram as nascentes como *loci* preferenciais para planos de manejo e restauração, denotando a importância desses sistemas como mananciais de água para a sociedade. Os trabalhos de Cardoso e Morais (2004), Pinto *et al.* (2005), Valente e Gomes (2005) e Alvarenga *et al.* (2006) ilustram casos brasileiros.

A ciência geográfica, porém, pouco se tem preocupado com as nascentes, abnegando esse objeto. No que tange à geomorfologia, as nascentes normalmente são vistas como os pontos iniciais de drenagem dos canais superficiais, ficando, muitas vezes, ocultas em trabalhos que investigam as cabeceiras de drenagem. Notadamente, os trabalhos de Montgomery e Dietrich (1988; 1989) evidenciam a contribuição das nascentes na gênese e dinâmica dos canais, sem,

contudo, enveredarem-se pela busca da compreensão desses sistemas, ainda que sua importância geomorfológica seja evidente.

Knighton (1984) admite que a origem dos canais fluviais, e analogamente das nascentes, é variada e parcialmente explicada pela história do relevo. Porém, o autor reconhece dois problemas nessa perspectiva: determinar os processos que concentram água no meio subterrâneo para exfiltração e determinar as condições ambientais para que o fluxo se torne permanente.

Desse modo, também para a geomorfologia, as nascentes foram historicamente tratadas muito mais como locais de estudo do que como objetos de investigação. Como herança, há uma grande dificuldade de compreensão sobre o tema, que chega a uma constante confusão conceitual entre cabeceira e nascente, refletida em Guerra (1993). Associa-se a isso, o fato das nascentes serem costumeiramente referidas no senso comum (tanto no cotidiano das pessoas, como em textos científicos) com uma simplicidade reducionista.

Paradoxalmente, esse cenário de multidisciplinaridade, associado ao coloquialismo do termo e uma falta de preocupação epistemológica, tem como consequência uma escassez de material científico sobre nascentes. Excetuando-se trabalhos nos quais esses sistemas foram meros *loci* de estudo, poucos são aqueles que, de fato, contribuem para o conhecimento e comportamento das nascentes.

Essa restrição da literatura só aumenta a complexidade dos estudos sobre nascentes. A ausência de uma base conceitual sólida é a primeira dificuldade. Parte-se de uma concepção errônea de que o conceito de nascente é algo posto e conhecido pela comunidade acadêmica. Por conseguinte, há uma grande dificuldade de comparação entre trabalhos de diferentes autores, que não possuem uma base teórico-conceitual sólida para fundamentar a identificação dessas surgências. Sem isso, torna-se inviável a adoção de um banco de dados mundial sobre as nascentes, conforme sugerem Springer e Stevens (2009), que vise superar as limitações de estudos locais e avançar no conhecimento desses sistemas.

Outro fator que torna complexo o estudo de nascentes é a acessibilidade aos locais onde se iniciam os cursos d'água. No contexto brasileiro, em diversos casos, elas localizam-se em terrenos declivosos, muitas vezes com presença de afloramentos rochosos, em meio à vegetação de alta densidade. O acesso é muito restrito, sendo normalmente necessárias extenuantes horas de campo até a localização precisa de uma nascente. Porém, sem esse

controle de campo, estudos geomorfológicos ficam comprometidos, uma vez que as características morfológicas locais podem variar significativamente em poucos metros.

Desse modo, as pesquisas tendem a priorizar as nascentes de mais fácil acesso, ignorando a existência das demais. Como exemplo, citam-se os trabalhos de Bertachini (s.d.) e Felipe *et al.* (2009). Ambos foram realizados na mesma área de estudo, porém, o primeiro localizou apenas 21 nascentes, enquanto no segundo trabalho, 59 nascentes foram mapeadas. Apesar de terem sido realizados em momentos distintos, nota-se nos produtos finais, que o trabalho de Felipe *et al.* (2009) despendeu maior esforço para alcançar locais de difícil acesso.

Além da exigência física e logística aos pesquisadores, o estudo de nascentes impõe a necessidade de estudo de diversos campos da ciência. A multidisciplinaridade intrínseca desse objeto exige conhecimentos de geomorfologia, hidrologia, hidrogeologia, pedologia, biogeografia e climatologia, entre outros. Raros são os trabalhos que ousam enveredar-se por essa trama de disciplinas. Como resultado, a maioria das pesquisas apreende apenas um ou outro aspecto das nascentes, notadamente, condicionados pela formação do cientista. O esforço de síntese do funcionamento desses sistemas fica em segundo plano, ante as propostas analíticas.

Não bastassem esses fatores de ordem acadêmica que tornam abstrusas as pesquisas de nascentes, fatores de ordem social também afetam o desenvolvimento dos trabalhos. Reconhecidamente locais de grande importância, muitos proprietários rurais impedem a realização de pesquisas em suas nascentes. Os principais argumentos para a recusa referem-se a uma preocupação com a saúde ambiental desses sistemas. Porém, acredita-se que o real motivo seja o receio de denúncias de contravenções legais no uso de seu entorno. Sendo assim, priorizam-se trabalhos em Unidades de Conservação.

Toda essa problemática está intimamente ligada à fundamental importância ambiental (natural e social) das nascentes. O Código Florestal Brasileiro de 1965 já apontava para a necessidade de proteção das nascentes, ao considerar o seu entorno como área de preservação permanente (BRASIL, 1965). A Resolução CONAMA 303/2002 regulamentou essa definição (BRASIL, 2002).

Mais recentemente, o novo Código Florestal (Lei 12.651/2012) redefiniu conceitualmente as nascentes e estabeleceu como área de preservação permanente “as áreas no entorno das nascentes e dos olhos d’água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica, no raio mínimo de 50 (cinquenta) metros” (BRASIL, 2012. Art. 4, IV).

Os marcos legais vem referendar uma importância já reconhecida pela comunidade científica e pela sociedade civil. As nascentes, em termos hidrológicos, são sistemas responsáveis pela exfiltração da água subterrânea e sua transformação em fluxos superficiais. Por esse motivo, cumprem um papel fundamental na dinâmica hidrológica. Além disso, são os mais importantes mananciais de água, já que os recursos hídricos superficiais são mais facilmente acessados para os múltiplos usos da população.

Por fim, as nascentes são sistemas ambientais muito heterogêneos. Sua importância para o equilíbrio hidrológico e ambiental é referendada pelos cientistas e também pela legislação ambiental brasileira. Contudo, para uma efetiva proteção das nascentes é necessário conhecê-las; entender suas características, seu comportamento (sazonal e em longo prazo) e sua gênese. Isso demanda investigações que são, por princípio, multidisciplinares. Ademais, a definição do conceito de nascente é ainda dúbia, já que não há consonância entre as diversas ciências que tem esses sistemas como objeto de pesquisa. Por isso, os estudos sobre nascentes são complexos, mas acima de tudo, de grande importância para a ciência e também para a sociedade.

1.2. ESCALA ESPAÇO-TEMPORAL DE TRABALHO

As pesquisas geomorfológicas devem ter uma clara delimitação da escala espaço-temporal dos fenômenos investigados para não incorrerem em erros metodológicos e de interpretação. Espaço e tempo devem ser vistos de forma integrada, em uma perspectiva tetradimensional, em que as três dimensões do espaço são dinamizadas pela sucessão do tempo (KOHLENER, 2002). Nesse sentido, “a escala de estudo de um relevo irá determinar as estratégias e técnicas de abordagem da análise geomorfológica” (KOHLENER, 2002, p. 22).

De um modo geral, há uma clara relação entre a variabilidade dos fenômenos espaciais e o tempo. Investigações de fenômenos de pequena escala espacial, que refletem grandes áreas do globo terrestre, envolvem um período de tempo muito longo, onde são maiores as influências dos processos endógenos. Por outro lado, a uma escala espacial grande (pequenas áreas), normalmente estão associados períodos de tempo mais curtos, com os processos exógenos sendo preferenciais (CHORLEY *et al.*, 1985).

Cailleux e Tricart (1956, *apud* KOHLENER, 2002) sintetizaram os fatores geomorfológicos a partir de suas respectivas escalas espaciais e temporais. Segundo os autores, fenômenos de primeira ordem (G-I) referem-se a unidades de superfície de 10^7 km², com grandeza temporal

de 10^9 anos. Essa classificação varia até fenômenos referentes a unidades de superfície de 10^{-8} km² (G-VIII) e período de tempo inferior a 10^2 anos. No campo da geomorfologia aplicada, raramente a grandeza dos fenômenos é maior do que G-V, que se relaciona a uma área de 10 km² e um período de tempo de 10^7 anos.

Baseado na concepção de geossistema proposta por Sotchava, herdada da Teoria Geral dos Sistemas de Von Bertalanffy, Bertrand (2004) apresenta uma classificação de unidades de paisagem diretamente relacionada àquela proposta por Cailleux e Tricart (1956, *apud* KOHLER, 2002). Uma vez que “a definição da paisagem é função da escala” (BERTRAND, 2004, p. 144), podem-se diferenciar unidades superiores, nas quais os elementos climáticos e estruturais predominam, e unidades inferiores, onde os elementos biogeográficos e antrópicos são mais relevantes.

Hierarquicamente, as unidades de paisagem são classificadas em zona, domínio, região natural, geossistema, geofácies e geótopo (BERTRAND, 2004). As três unidades superiores correspondem às ordens de grandeza G-I a G-IV. O geossistema relaciona-se às grandezas G-IV e G-V; o geofácies, G-VI; e o geótopo possui escala compatível à ordem G-VII de Cailleux e Tricart (BERTRAND, 2004).

Contudo, não se pode negar a influência da sociedade nas escalas temporais dos fenômenos geomorfológicos. O ser humano, então, deve ser incluído nos estudos geomorfológicos como “gerador, transformador e acelerador dos processos naturais” (PEREZ-FILHO e QUARESMA, 2011, p. 84). Evidentemente, essa influência possui uma abrangência temporal restrita ao Tecnógeno.

A definição de uma escala espaço-temporal para o estudo de nascentes depende, sobretudo, da abordagem conceitual do trabalho. É de amplo conhecimento que os fatores ambientais de grandezas distintas se relacionam dialeticamente sob mútua influência. Como exemplo, da mesma forma que as nascentes contribuem para a conformação geomorfológica regional a partir da evolução dos canais de drenagem (MONTGOMERY e DIETRICH, 1989), as características do relevo regional influenciam a distribuição e a tipologia das nascentes (FELIPPE, 2009).

As nascentes e seu entorno, enquanto unidades de paisagem são consideradas geótopos (BERTRAND, 2004), por possuírem características específicas que as distinguem do conjunto da paisagem na qual estão inseridas. Esses elementos de diferenciação associam-se a maior

disponibilidade hídrica subsuperficial (água no solo) e/ou superficial, que promove a colonização por espécies vegetais distintas, muitas vezes higrófitas ou mesmo hidrófilas.

Entretanto, em termos morfológicos, as nascentes podem se localizar em feições de magnitudes distintas. Reconhecem-se nascentes em grandes cabeceiras de drenagem, na forma de anfiteatros, que podem ocupar de alguns km² a poucos m²; nascentes em sulcos erosivos, ravinas ou voçorocas, que se estendem até dezenas de m²; nascentes em afloramentos rochosos, que ocupam poucos m²; e nascentes em dutos, que não alcançam mais do que alguns cm². Essas magnitudes referem-se às ordens de grandeza G-VI, G-VII e G-VIII. As escalas temporais correspondentes inserem-se, mormente, no tempo histórico e raramente ultrapassam a magnitude de 10⁴ anos (BERTRAND, 2004). Além disso, essas feições normalmente relacionam-se apenas ao local de exfiltração da água subterrânea, não abrangendo a totalidade do sistema ambiental que configura a nascente.

Na perspectiva de Piégay e Schumm (2007), o trabalho busca abranger uma análise de conectividade, a partir da compreensão de inter-relações entre os componentes que integram o sistema nascente. Assim, os fatores causais do encadeamento dos processos que levam à gênese e condicionam a dinâmica das nascentes poderão ser elucidados.

Para tanto, as nascentes serão abordadas como hidrossistemas. Os três vetores de troca de matéria e energia (longitudinal, lateral e vertical) serão tratados com o apoio metodológico de técnicas geomorfológicas, hidrológicas e hidrogeológicas. A dinâmica temporal complementar a tetradsimensionalidade da investigação das nascentes. Não obstante a importância os fatores geomorfológicos de ordens de grandeza superior, o trabalho será balizado nas magnitudes G-VI, G-VII e G-VIII, correspondentes à concepção escalar dos geótopos. De forma alguma, a ação humana como agente geomorfológico e acelerador dos processos naturais pode ser negligenciada. Os procedimentos metodológicos adotados, bem como as interpretações das informações resultantes respeitarão essa abrangência espaço-temporal.

1.3. HIPÓTESE

As gêneses e as dinâmicas das nascentes estão diretamente relacionadas entre si e são condicionadas por processos hidrogeomorfológicos superficiais e subterrâneos, os quais deixam registros nas características fisiográficas das nascentes que podem ser apreendidos por sua tipologia.

1.4. OBJETIVOS

A tese possui dois objetivos gerais claramente interligados, que serão desenvolvidos em concomitância. Primeiramente, visa-se compreender os processos hidrogeomorfológicos que levam à gênese das nascentes, interpretando, quando houver, as generalidades existentes e buscando identificar se há alguma concordância entre a gênese de nascentes do mesmo tipo. Ao fim, possibilitar-se-ia o levantamento de modelos teóricos explicativos que respondam pela origem das nascentes.

Paralelamente, interpretar-se-á a dinâmica das nascentes em função de suas variações sazonais. A partir do monitoramento das vazões e da precipitação, pode-se traçar o comportamento sazonal das nascentes e compará-lo com as condições climáticas. Assim, é possível entender a resposta hidrológica dos diversos tipos de nascentes aos eventos chuvosos e à recarga dos aquíferos.

Complementarmente, postam-se alguns objetivos específicos que auxiliarão na compreensão da gênese e dinâmica das nascentes:

- Caracterizar fisiograficamente as nascentes identificadas nas áreas de estudo e enquadrá-las tipologicamente.
- Interpretar a resposta hidrogeomorfológica das nascentes em relação à irregularidade das precipitações. .
- Caracterizar geoquimicamente a água das nascentes estudadas como forma de determinar seus aquíferos de origem.
- Realizar a datação relativa das águas das nascentes, indicando o tempo percorrido desde o momento em que ocorreu a infiltração e a recarga dos aquíferos, até o retorno da água à superfície.
- Identificar condicionantes para a existência de nascentes e apontar processos e elementos do meio que contribuam para sua gênese, atentando para fatores – naturais ou sociais – que alterem sua dinâmica hidrológica e para o modo com que essas alterações se expressam.
- Comparar a gênese e dinâmica das nascentes com a sua tipologia, avaliando se nascentes enquadradas nos mesmos tipos possuem comportamento semelhante.
- Propor modelos explicativos teóricos de gênese de nascentes a partir da evolução de processos geomorfológicos.

1.5. ÁREAS DE ESTUDO

Para que fossem cumpridos os objetivos propostos, as áreas de estudo selecionadas deveriam representar uma diversidade fisiográfica de nascentes que refletisse múltiplas possibilidades de gênese e dinâmica. Nesse sentido, em termos geológico-geomorfológicos, o contato de grandes planaltos e depressões cumpriria tal requisito. Notadamente, esses compartimentos do relevo distinguem-se quanto à energia dos processos superficiais e sub-superficiais, traduzidos pelo gradiente topográfico, densidade de drenagem, profundidade dos mantos de intemperismo, entre outros. Além disso, tendem a apresentar significativa distinção geológica e hidrogeológica, promovendo sistemas aquíferos de características diversas.

Porém, em termos logísticos, as áreas selecionadas deveriam possibilitar o monitoramento mensal de todas as nascentes em um curto período de tempo. Por esse motivo, deveriam ser próximas e de fácil acesso. Além do mais, seria necessário que os responsáveis pelas propriedades estivessem de acordo com as premissas do projeto, autorizando regularmente a entrada da equipe e auxiliando na coleta dos dados diários de precipitação.

Nesse sentido, selecionou-se inicialmente a porção ocidental do Parque Nacional da Serra do Cipó. Por ser uma unidade de conservação com clara finalidade científica, o projeto foi muito bem aceito pelos seus responsáveis. Ademais, já existia instalada no parque uma estação meteorológica que poderia fornecer os dados pluviométricos necessários ao monitoramento. Com as devidas autorizações do IBAMA e ICMBio concedidas, o Parque Nacional da Serra do Cipó foi selecionado para o estudo.

Uma segunda área de conhecimento prévio do autor foi selecionada, distando pouco mais de 60 km da Serra do Cipó. Constitui-se em um conjunto de propriedades privadas com usos rurais onde já se sabia da existência de algumas nascentes. Considerando suas características ambientais e a disponibilidade dos proprietários em colaborar com a pesquisa (inclusive no monitoramento pluviométrico), tais fazendas do extremo leste do município de Lagoa Santa foram incluídas no estudo.

2. A GEOMORFOLOGIA DAS NASCENTES

2.1. CONCEITOS E ABORDAGENS SOBRE NASCENTES

Há diversas abordagens conceituais sobre as nascentes, porém, poucos esforços foram realizados no intuito de uniformizar os discursos. Com isso, cada trabalho define esse termo da forma mais conveniente, normalmente condicionada pela formação acadêmica do pesquisador, produzindo uma confusão conceitual na literatura nacional e internacional. A consequência é que dificilmente consegue-se avançar nas generalidades dos estudos sobre nascentes, já que as possibilidades de comparação entre diferentes trabalhos (em diferentes contextos geomorfológicos mundiais) são comprometidas por esse contexto. Tem-se, então, a priorização de estudos espacialmente restritos o que impossibilita a formação de um banco de dados mundial sobre nascentes, conforme vislumbram Springer e Stevens (2009).

Dois fatores dificultam a adoção de um conceito universal para os diversos estudos sobre nascentes: elas são reconhecidas pela sociedade civil na lógica do senso comum, fazendo com que haja uma falsa impressão de clareza em sua concepção; além disso, são objetos de estudo de pesquisadores de diversas ciências, que deixam em seus trabalhos a herança teórico-metodológica de suas formações, enviesando as discussões.

Adicionalmente, a literatura brasileira tem como hábito a apropriação conceitual da literatura estrangeira. Na língua inglesa, o termo correspondente à nascente é *spring*, em francês, *source d'eau*, já na língua espanhola o termo é *fuelle* (é também utilizado *manantial*), na alemã utiliza-se o termo *quelle*, e no italiano, *fonte*. Literalmente, todos esses termos podem ser traduzidos como “fonte” em português e são apropriados sob a concepção de nascente. Porém, somente na língua portuguesa há um termo que possui a conotação de nascimento, aparecimento, surgimento.

A apreensão acrítica dos conceitos estrangeiros pela literatura brasileira leva a uma confusão entre os termos fonte, surgência e nascente. De um modo geral, pode-se afirmar que fonte e surgência referem-se a qualquer processo de exfiltração da água subterrânea. Porém, o termo nascente resguarda além da exfiltração o aparecimento (nascimento, surgimento) de um canal de drenagem de primeira ordem, conforme a origem etimológica da palavra. Assim, dentre esses idiomas, somente na língua portuguesa é possível fazer a diferenciação dos termos fonte e nascente (FELIPPE, 2009).

Na abordagem popular (senso comum), o verbete nascente refere-se ao início de um curso de água superficial, conforme apontam os dicionários Michaelis (2008) e Priberam (2009) e a Wikipedia (2009). Porém, não há preocupação em espacializar esse elemento e defini-lo criteriosamente.

Segundo a Lei Federal 12.651/2012, o novo Código Florestal Brasileiro, nascente é o “afloramento natural do lençol freático que apresenta perenidade e dá início a um curso d’água” (BRASIL, 2012, Art. 3º, XVII). Essa lei apresenta também a definição de olho d’água como “afloramento natural do lençol freático, mesmo que intermitente” (BRASIL, 2012, Art. 3º, XVIII). Esses conceitos serão aplicados na *práxis* ambiental brasileira, como em projetos de licenciamento e estudos de impacto ambiental. Isso implica na inexistência de nascentes intermitentes ou efêmeras, discordando da literatura científica e tornando ainda mais complexa a proteção ambiental em ambientes semiáridos, onde os fluxos (subterrâneos e superficiais) são comumente temporários.

As abordagens hidrológicas e hidrogeológicas sobre nascentes, de uma forma geral, podem ser sintetizadas pelo conceito apresentado por Davis (1966, p. 63): “toda descarga superficial natural da água grande o suficiente para formar um pequeno riacho pode ser chamada de nascente”. Respaldam essa concepção os importantes trabalhos posteriores de Allaby e Allaby (1991) e Todd e Mays (2005).

Todavia, ao considerarem as nascentes como uma “descarga de água” esse conceito remete a um fenômeno, um processo. Isso implica em um problema teórico para a hidrogeomorfologia, onde as feições (expressas espacialmente na superfície da Terra) possuem um papel de primeira importância. Além disso, o processo de exfiltração se confunde com essa visão do termo nascente.

A necessidade de relacionar a nascente e o relevo levou a uma arbitrariedade nos conceitos propostos no âmbito da geomorfologia. Goudie (2004, p. 994) afirma que “nascentes são pontos onde a água subterrânea, recarregada nas mais altas elevações, emerge à superfície”. Naturalmente, considerar as nascentes como “pontos” é um reducionismo da complexidade desses elementos. Por outro lado, De Blij *et al.* (2004, p. 499) conceituam nascente como “um canal superficial de água corrente que emerge do solo”. De cunho notadamente fluvial, essa concepção, apesar de espacialmente bem definida, ignora a possibilidade de existência de nascentes nas quais seu fluxo superficial não ocorre na forma de um canal de drenagem tradicional.

Contudo, apesar da imensa importância das nascentes, seu conceito carece de uma melhor apreciação pela comunidade acadêmica. É necessário evitar simplificações que distorçam a concepção original do termo na língua portuguesa e, simultaneamente, possibilitar a aplicação prática (no meio técnico, jurídico e acadêmico) de sua definição. Nesse sentido, Felipe (2009) realizou uma consulta a um painel de especialistas no intuito de avançar no conceito acadêmico de nascente. Assim, 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 na fase superficial são integrados à rede de drenagem” (FELIPPE, 2009, p. 99).

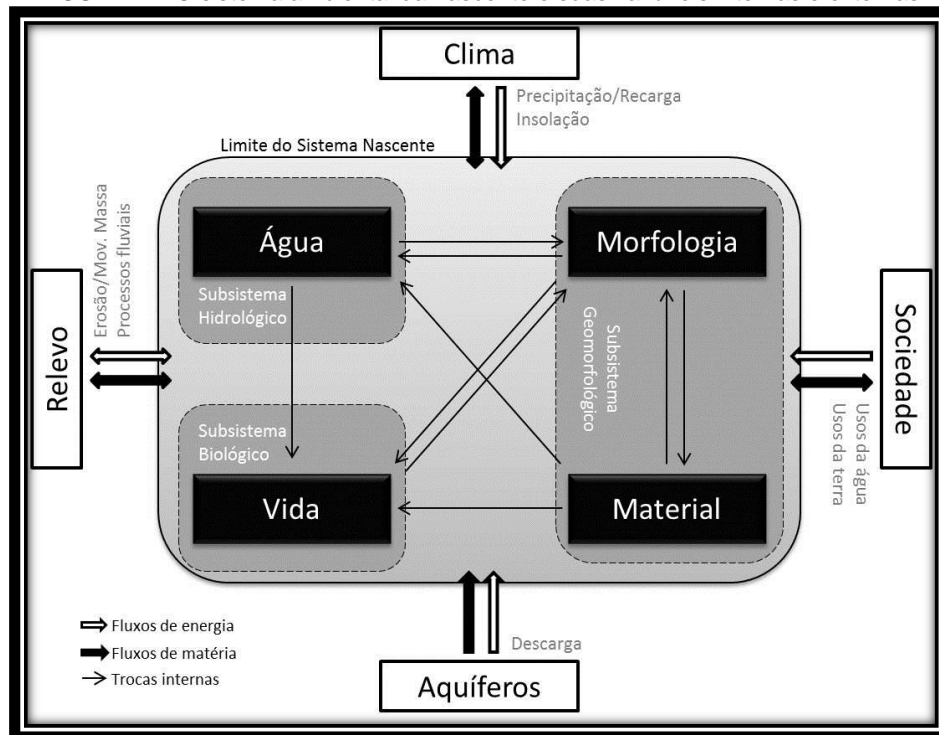
Essa concepção engloba as diversas abordagens teóricas sobre nascente sem desconsiderar a sua diversidade fisiográfica. Com isso, as mais variadas características e tipologias são incluídas no conceito que parte de dois elementos essenciais: a exfiltração natural; e a formação de um canal de drenagem a jusante.

Isso é fundamental devido à reconhecida heterogeneidade das nascentes. De acordo com as características geológico-geomorfológicas locais, as nascentes podem possuir diversas morfologias. Além disso, componentes vegetacionais e sociais contribuem para a constituição do geótopo relacionado às nascentes. O resultado do cruzamento de tais elementos é uma diversidade fisiográfica representada por uma tipologia complexa.

Com isso, as nascentes enquanto sistemas ambientais (FIG. 1) configuram-se como subsistemas abertos do geossistema no qual se inserem. Diversas variáveis externas condicionam a gênese e dinâmica das nascentes. O *clima* é responsável pelo fornecimento de água pela precipitação e pelo controle do regime das nascentes intermitentes; os *aquíferos* (considerados aqui como qualquer material geológico, consolidado ou não, capaz de armazenar e distribuir água) garantem a existência da exfiltração e determinam, em partes, as características das águas; o *relevo* é uma variável definidora da localização das nascentes; enquanto a *sociedade* possui relação de uso e ao mesmo tempo de agente de transformação das nascentes.

Por outro lado, as nascentes são estruturadas por suas variáveis internas (ou estruturantes). Basicamente, elas correspondem à *água* que exfiltra; à *morfologia* que determina os locais de baixo potencial nos quais se localizarão as surgências; o *material* pelo qual a água exfiltra e que recobre a morfologia da nascente; e o *ecossistema* que se desenvolve em função das condições ambientais locais. Essas variáveis estruturantes (FIG. 1) serão definidoras das características fisiográficas das nascentes.

FIGURA 1 – O sistema ambiental da nascente e suas variáveis internas e externas.



Fonte: elaborado pelo autor.

A literatura nacional e internacional enumera uma série de características básicas das nascentes. No campo da hidrogeologia, a vazão é um parâmetro fundamental, assim como sua variação sazonal. Além disso, há uma grande preocupação com o modo de exfiltração e com as características físico-químicas da água das nascentes (TODD, 1959). A geomorfologia tradicionalmente aborda as nascentes em função da estruturação da rede de drenagem, na sua mobilidade na vertente, na forma do relevo na qual se encontram e, também, no modo como ocorre a exfiltração (FARIA, 1997; FELIPPE, 2009).

A vazão retrata o volume de água exfiltrado pela nascente por unidade de tempo. É o parâmetro hidrológico mais corriqueiro na literatura. Meinzer (1927) sistematizou uma hierarquia de vazões de nascentes a partir de dados coletados nos Estados Unidos. Na proposta do autor, as nascentes variam de 1ª magnitude (com vazão superior a 2.800 L/s) até a 8ª magnitude (com vazão inferior a 8 mL/s). Além disso, o autor propõe a existência de nascentes de magnitude 0, as quais correspondem a locais de fluxos passados, sem vazão atualmente. Apesar de eficiente na caracterização de nascentes em locais tectonicamente ativos com influência de aquíferos confinados e geotermia, como demonstram diversos trabalhos nos Estados Unidos (WHITING e STAMM, 1995; DONOVAN *et al.*, 2007; HILL *et al.*, 2008), no contexto brasileiro essa hierarquia apresenta-se distorcida. Não há registros de trabalhos acadêmicos que tenham descrito, no Brasil, nascentes de magnitude maior que a 4ª (que corresponde a vazões entre 6,3 e 28 L/s), sendo a maioria dos casos enquadrada na

5ª, 6ª ou 7ª magnitudes (FARIA, 1997; FARIA, 2000; PINTO *et al.*, 2004; PANE; PEREIRA, 2005; FELIPPE, 2009).

Porém, existe um sério problema metodológico na aferição das vazões em nascentes. As técnicas convencionais aplicadas na hidrologia não são capazes de detectar as pequenas vazões. Isso leva a adoção de procedimentos duvidosos, como a medição a jusante da nascente, quando já há volume suficiente de água para registrar pelos equipamentos (normalmente micromolinetes ou fluxímetros). A adoção de procedimentos mais refinados esbarra na existência de sedimentos que danificam os equipamentos (como as microturbinas). Tem-se, desse modo, uma grande dificuldade de comparação dos dados, uma vez que se alteram as técnicas entre os trabalhos. Todavia, minimizam-se os erros quando as aferições são realizadas imediatamente após o local de exfiltração.

Quanto ao modo como ocorre a exfiltração, as nascentes são tradicionalmente agrupadas em pontuais e difusas (FARIA, 1997). As nascentes pontuais são as convencionalmente apresentadas em livros didáticos, em que a exfiltração ocorre de forma concentrada em um único local muito bem definido. Porém, há nascentes com exfiltração difusa, ou seja, onde a água aflora em uma área indefinida, promovendo o encharcamento do solo na forma de brejos (VALENTE e GOMES, 2005). Felipe (2009) propõe também a existência de nascentes com exfiltração múltipla, que se referem a um mesmo sistema com dois ou mais pontos e/ou áreas de exfiltração.

O contexto morfológico no qual ocorrem as nascentes é, também, um elemento fundamental na sua caracterização (FARIA, 1997; VALENTE e GOMES, 2005; FELIPPE, 2009). Isso ocorre, pois a exfiltração está intimamente relacionada ao relevo, já que ocorre quando o nível da água no aquífero toca a superfície topográfica. Sendo assim, é muito comum ocorrerem nascentes relacionadas a feições desnudacionais, como canais de drenagem, dutos, cicatrizes de movimentos de massa e micro-depressões (MONTGOMERY e DIETRICH, 1989). Além disso, afloramentos rochosos também possuem um papel fundamental, bem como estruturas tectogênicas.

A sazonalidade é outro elemento fundamental na hidrologia das nascentes. Assim como os canais fluviais, as nascentes podem ser consideradas perenes, intermitentes ou efêmeras (VALENTE e GOMES, 2005). A perenidade é garantida pela manutenção do fluxo de base (*baseflow*) durante todo o ano hidrológico. Por outro lado, as nascentes intermitentes (relacionadas ao *throughflow*) deixam de exfiltrar no período de escassez hídrica, sendo comuns em climas com dupla estacionalidade. Há ainda nascentes em que a exfiltração limita-

se ao momento do evento chuvoso, consideradas, então, efêmeras (oriunda do *saturation overland flow*).

Outro fator sazonal de grande importância é a mobilidade das nascentes. Com a variação do nível freático entre as estações do ano hidrológico, pode haver a migração do local de exfiltração de uma mesma nascente. Assim as nascentes podem “descer” a vertente no período de seca. Normalmente esse fenômeno ocorre em nascentes que ocorrem em canais de drenagem que se estendem a montante do local de exfiltração na forma de ravinas ou sulcos erosivos. Sob essa ótica, as nascentes podem ser móveis ou fixas (FARIA, 1997).

Todas essas características demonstram a diversidade fisiográfica das nascentes havendo diversas possibilidades de combinação, o que gera, inclusive, dificuldades metodológicas nas abordagens acadêmicas. A FIG. 2 apresenta cinco nascentes distintas, com seus principais parâmetros de caracterização descritos.

Além desses parâmetros fisiográficos, a hidrogeologia trabalha com outros relacionados às características dos aquíferos e à hidrogeoquímica. Nesse contexto, destaca-se a tipologia proposta por Bryan (1919 *apud* TODD, 1959). Na primeira chave de classificação, as nascentes são divididas de acordo com as forças existentes no processo de exfiltração entre gravitacionais e não gravitacionais. As nascentes gravitacionais, de acordo com o local da exfiltração podem ser subdivididas em nascentes de depressão, nascentes de contato, nascentes artesianas e nascentes de fratura. Por sua vez, as nascentes não gravitacionais podem ser termiais ou não termiais (TODD, 1959).

Essa classificação denota uma clara preocupação com os processos hidrogeológicos que levam à emergência da água subterrânea à superfície. De grande respaldo, é ainda hoje utilizada com adaptações para uma primeira apreensão em diversos estudos. Porém, não há uma preocupação com a dinâmica das nascentes, tampouco com suas características geográficas e ecológicas.

Nesse sentido, Valente e Gomes (2005) propuseram uma classificação que envolvesse critérios geológicos e morfológicos. Segundo esta proposta, existe nascente de encosta, de depressão, difusas, de lençóis artesianos, de falhas geológicas, de rochas cársticas. Entretanto, há um grave problema prático nessa classificação, já que há uma série de intercessões entre os tipos, sem o respaldo de um critério metodológico claro de classificação. Por esse motivo, a proposta apresenta severas limitações.

FIGURA 2 – Mosaico de fotografias representando a diversidade fisiográfica das nascentes.



A) nascente de 3ª magnitude, perene, fixa, difusa em concavidade; B) nascente móvel, intermitente, de 5ª magnitude, pontual e em canal; C) nascente em afloramento rochoso, pontual, efêmera, fixa e de 8ª magnitude; D) nascente em duto, com exfiltração pontual, perene, fixa e de 4ª magnitude; E) nascente com exfiltração múltipla, em concavidade, intermitente, fixa e de 7ª magnitude. Fonte: acervo do autor.

Buscando estabelecer critérios estatísticos na elaboração de uma tipologia multivariada para nascentes, Felipe (2009) trabalhou com um algoritmo de máxima verossimilhança e parâmetros qualitativos. A partir de nove variáveis (morfologia, tipo de exfiltração, mobilidade, posição de afloramentos rochosos, profundidade das coberturas superficiais, vazão, razão de vazão, sazonalidade e contatos estratigráficos) selecionadas pela sua significância no modelo, o autor estabeleceu seis tipos de nascentes: freática, dinâmica, flutuante, sazonal

erosiva, sazonal de encosta e antropogênica (FELIPPE, 2009). As principais características de cada tipo proposto são apresentadas no QUADRO 1.

Enquanto as nascentes dinâmicas representam sistemas de alta energia, capazes de promover erosão subsuperficial para que ocorra a exfiltração, as nascentes flutuantes e freáticas são sistemas de mais baixa energia, que oscilam (a primeira sua posição na vertente e a segunda sua vazão) sazonalmente (FELIPPE, 2009).

Por outro lado, foram verificados dois tipos de nascentes intermitentes. As sazonais erosivas estão relacionadas a feições desnudacionais que interceptam o nível freático no período úmido. Já as sazonais de encosta, caracterizadas por uma intensa variação do nível freático em mantos de intemperismo espessos e sem ocorrência de sulcos erosivos ou ravinas (FELIPPE, 2009).

Além desses cinco tipos estabelecidos pelo algoritmo de máxima verossimilhança, Felipe (2009) identificou que as nascentes que possuíam baixo ajuste ao modelo correspondiam a sistemas criados pela ação do homem como agente geomorfológico. Esse tipo de nascente foi chamado de antropogênico e apresenta características as mais variáveis, típicas de um sistema em desequilíbrio.

Outro avanço na proposta de Felipe (2009) refere-se ao fato da possibilidade de ocorrência de nascentes híbridas. Esses sistemas apresentam características de dois ou mais tipos, sem que haja o predomínio de algum. O significado destas nascentes ainda não foi completamente interpretado e merece estudos futuros. Acredita-se que estejam relacionadas ao estágio de evolução das nascentes a partir de sua origem.

Por fim, as várias características apresentadas, bem como as tipologias relatadas refletem a diversidade fisiográfica das nascentes. É de primeira importância assumir a heterogeneidade desses sistemas e reconhecer o seus comportamentos caso a caso. Somente assim pode-se avançar nos estudos que visem compreender as gêneses e as dinâmicas das nascentes.

QUADRO 1
Tipologia multivariada qualitativa de nascentes

Tipo	Morfologia da nascente	Tipo de exfiltração	Existência de contato estratigráfico	Vazão média anual	Razão de vazão	Migração	Manto de intemperismo	Posição dos afloramentos	Sazonalidade	TIPOLOGIA
k1	Concavidade	Difusa	Sem contato	Baixa	Diminuem sua vazão no inverno	Indiferente	Profundo	Ausente	Perene	FREÁTICA
k2	Afloramento ou duto	Múltipla ou pontual	Com contato	Indiferente	Aumentam sua vazão no inverno	Fixa	Raso	Na nascente	Perene	DINÂMICA
k3	Talvegue	Pontual	Indiferente	Baixa	No inverno a vazão é muito baixa ou nula, impossível de mensurar	Não mensurável	Médio	Existente	Intermitente	SAZONAL EROSIVA
k4	Concavidade	Difusa	Com contato	Baixa à média	Prioritariamente estável, tendendo a diminuir sua vazão no inverno	Móvel	Médio	Ausente ou arredores	Perene	FLUTUANTE
k5	Duto ou olho	Pontual	Sem contato	Média à baixa	No inverno a vazão é muito baixa ou nula, impossível de mensurar	Não mensurável	Profundo	Ausente	Intermitente	SAZONAL DE ENCOSTA
k6	As nascentes antropogênicas não possuem caracterização padrão para quaisquer variáveis, pois são determinadas exclusivamente pela existência de antropogenia, podendo apresentar diversos contextos fisiográficos.									ANTROPOGÊNICA

Fonte: adaptado de Felipe (2009, p. 248).

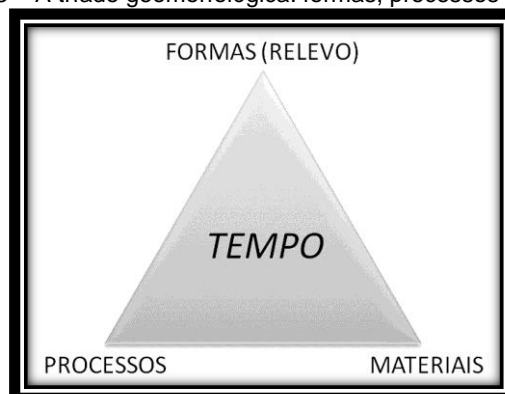
Nota-se, então, que, dada a complexidade do sistema ambiental que representa a nascente, deve-se evitar abordagens minimalistas e restritivas. Uma nascente não é apenas a água que exfiltra, ou a forma na qual essa exfiltração ocorre. Tampouco é um habitat de endemismos ou manancial hídrico, tão somente. Desse modo, caracterizar morfometricamente uma nascente, analisar geoquimicamente as suas águas, mensurar as vazões ou identificar as espécies que a tem como habitat são estudos parciais, que não abrangem sua totalidade. Esses fragmentos, porém, são as principais fontes de informações na literatura acadêmica, constituindo elementos importantes em uma compreensão sintética sobre as nascentes.

2.2. A TRIÁDE GEOMORFOLÓGICA: FORMAS, PROCESSOS E MATERIAIS

“Geomorfologia é a ciência interessada nas formas da superfície da Terra e nos processos que as criaram” (SUMMERFIELD, 1991, p. 3). O relevo é, então, o grande foco das preocupações geomorfológicas, não apenas sua descrição, mas também, a compreensão de sua evolução. A intrínseca relação tempo-espaço promove a análise geomorfológica um caráter eminentemente tetradimensional (KOHLENER, 2002).

De um modo geral, considera-se que as formas do relevo são geradas a partir da ação de determinados processos que agem sobre os materiais que constituem a crosta terrestre, ao longo do tempo. Esses três elementos (formas, processos e materiais), entendidos sob uma perspectiva temporal, constituem a chamada tríade geomorfológica (FIG. 3).

FIGURA 3 – A tríade geomorfológica: formas, processos e materiais.



Fonte: organizado pelo autor.

As feições geomorfológicas derivam da escala espacial de análise (desde microformas, com área inferior a 0,25 km², até megaformas, superiores a 10⁶ km²) e são os estruturadores da tríade geomorfológica. Assim, podem ser consideradas como produtos finais da ação dos processos sobre os materiais, com uma clara conotação espacial (SUMMERFIELD, 1991).

Os processos por sua vez derivam das forças (energia) de transformação do sistema. Podem ser naturais ou antropogênicos e promovem a transformação das formas ao longo do tempo. Por isso, precisam ser compreendidos quanto à magnitude e frequência de sua ocorrência (SUMMERFIELD, 1991).

Dentre os materiais de interesse da geomorfologia estão as chamadas coberturas superficiais. Nestas, inserem-se as formações inconsolidadas sedimentares coluviais e aluviais (alóctones) e as formações eluviais e saprolíticas (autóctones). Além de serem constituintes das formas, os materiais representam distintos níveis de resistência aos processos geomorfológicos. Sendo assim, afetam a escala espaço-temporal de evolução do relevo.

É elementar concluir que uma mesma forma pode ser criada por diferentes processos em diferentes materiais ao longo de distintos intervalos de tempo. Em contrapartida, um mesmo processo (em termos de agente e magnitude) atuando sobre um mesmo material ao longo de um determinado tempo, levará a formação de formas similares. Assim, a compreensão geomorfológica só é completa, quando todos os elementos da tríade são concatenados sob uma lógica temporal e, portanto, evolutiva.

Sob esse enfoque, a geomorfologia, em seus primórdios, preocupou-se unicamente com a descrição das formas e com a distinção destas ao longo do Globo. Como arcabouço teórico, modelos gerais de evolução do relevo foram propostos e replicados indiscriminadamente (VITTE, 2008). A partir da insuficiência da apreensão da paisagem para a interpretação geomorfológica, novas perspectivas metodológicas surgiram, sobretudo após a incorporação de conceitos da Teoria Geral dos Sistemas na geomorfologia (CHORLEY, 1972). Instaura-se, assim, o que Summerfield (1991) chamou de a Era Moderna da ciência geomorfológica. A morfometria passa a ser uma importante ferramenta no auxílio às medições de campo, possibilitando a elaboração de modelos preditivos básicos para a evolução do relevo. As direções futuras da geomorfologia apontam para a adoção de novas técnicas baseadas nos conhecimentos de outras ciências (sobretudo da química) aplicadas em microescalas e para a interpretação da influência de mudanças climáticas no relevo atual (SUMMERFIELD, 1991).

Nesse contexto, novos campos de conhecimento emergem da geomorfologia. Como ponto central, prezam pelo uso de tecnologia de ponta e o emprego da computação gráfica, fundamentados nas demandas ambientais (sociais e naturais) do mundo contemporâneo. As eventuais mudanças ambientais locais e globais, a questão dos recursos hídricos e minerais e as desigualdades sócio-espaciais fazem emergir novas reflexões (VITTE, 2008).

Os rios sempre foram importantes objetos de estudo da geomorfologia. Desde a construção do Ciclo Geográfico de Davis, no final do século XIX, eles possuem um papel de agentes de modelagem do relevo. Sob esse enfoque, a geomorfologia fluvial desenvolveu métodos e concepções próprias que tem como base a interpretação da evolução dos sistemas fluviais e, conseqüentemente, do modelado da superfície originado a partir do trabalho geomorfológico dos rios (CHARLTON, 2008).

“A geomorfologia fluvial é o estudo das interações entre formas e processos dos canais fluviais em uma série de escalas espaciais e temporais” (CHARLTON, 2008, p. 1). De um modo geral, seus estudos envolvem uma grande variedade de interesses, como o controle de enchentes, navegação, qualidade de água, utilização de balneários, produção hidrelétrica, irrigação, recuperação ambiental de rios, entre outros. Notadamente, esses estudos apresentam relevância política, social, econômica e física (KNIGHTON, 1984).

Mais recentemente, as preocupações relacionadas estritamente à água, seja ela subterrânea, atmosférica ou superficial, ganharam força entre os geomorfólogos. A chamada hidrogeomorfologia constitui um novo campo de conhecimento, essencialmente interdisciplinar, que abrange os vínculos entre processos hidrológicos e geomórficos. Esse tipo de abordagem não é necessariamente original, uma vez que sintetiza diversos estudos que, desde a década de 1960, são realizados como uma geomorfologia notadamente influenciada por conhecimentos hidrológicos e fluviais (SIDLE e ONDA, 2004).

O termo hidrogeomorfologia pode ser dividido em três termos: hidro significa água, abrangendo tanto a superficial quanto a subterrânea; geo significa a terra; e morfologia é a expressão superficial das feições, na forma do relevo. Isso significa que a hidrogeomorfologia trata de aspectos da água, das rochas e das feições morfológicas da Terra (BABAR, 2005, p. 1).

Os principais assuntos concernentes à hidrogeomorfologia incluem a relação entre processos erosivos e movimentos de massa com os canais fluviais, a influência da litologia e morfologia nos recursos hídricos, a modelagem hidrológica associada a variáveis geomorfológicas e pedológicas, e a interação da precipitação com o sistema ambiental (SIDLE e ONDA, 2004). Além dos aspectos quantitativos, fundamentos qualitativos também são importantes como a influência de parâmetros geomorfológicos nos processos hidrológicos e hidrogeológicos (BABAR, 2005).

Como afirmado, os diversos objetos de estudo da hidrogeomorfologia envolvem aspectos hidrológicos e geomorfológicos do ambiente. Nesse enfoque, um conceito de primeira

importância é o de hidrossistema, que cerceia as abordagens interpretativas da hidrogeomorfologia.

Um hidrossistema é uma totalidade tridimensional que abrange as trocas de matéria (água, sedimentos e biota) e energia (PIÉGAY e SCHUMM, 2007; CHARLTON, 2008) espacialmente definido por corpos d'água. Pode ser apresentado na forma de uma bacia hidrográfica, uma rede hidrográfica, um rio, um lago ou um trecho de um rio (BRIDGE, 2003). As principais trocas de matéria em um hidrossistema relacionam-se aos processos hidrológicos (escoamento, precipitação, infiltração, exfiltração, evaporação). O relevo define a espacialidade do hidrossistema.

Três vetores de troca de matéria e energia estruturam um hidrossistema: longitudinal, lateral e vertical (PIÉGAY e SCHUMM, 2007; CHARLTON, 2008). As transferências longitudinais ocorrem ao longo do canal de drenagem. A movimentação da água ocorre de forma concentrada controlada pela gravidade e pelo regime fluvial. Nesse vetor incluem-se também a matéria viva (biota) e os sedimentos. Por outro lado, as transferências laterais ocorrem pelos processos de vertente. Incluem-se, nessa lógica, o escoamento superficial não-concentrado e concentrado, movimentos de massa, inundações e seu correspondente transporte de sedimentos. Por fim, as trocas verticais envolvem os meios atmosférico, superficial e subterrâneo. Dentre os processos desse vetor destacam-se: infiltração, exfiltração, percolação, precipitação e evapotranspiração (PIÉGAY e SCHUMM, 2007).

A nascente se insere nesse contexto como objeto de estudo da hidrogeomorfologia. Nessa perspectiva, busca-se compreender o comportamento desse sistema a partir dos processos hidrológicos e geomorfológicos que o engendram.

Retomando a tríade geomorfológica, as formas do relevo nas quais os estudos das nascentes se debruçam envolvem tanto a bacia de contribuição das nascentes, quando as microformas que estruturam a nascente localmente (concavidades, dutos, sulcos erosivos, canais fluviais, etc.). Assim, há uma clara necessidade de uma perspectiva espacialmente multiescalar, ora trabalhando com micro e até mesoformas, ora focando nas nanoformas que abrigam as surgências. Além disso, estudos preliminares (FELIPPE, 2009) já demonstraram haver uma correspondência entre as grandes unidades do relevo brasileiro, equivalentes ao 2º táxon de Ross (1992) e a tipologia das nascentes.

Os processos geomorfológicos a serem analisados envolvem tanto a erosão, quanto os movimentos de massa e a desnudação geoquímica. A escala temporal de interpretação

desses fenômenos deverá ser interpretada em correspondência à escala espacial das formas originadas. Ademais, de modo algum se pode negligenciar a participação dos processos hidrológicos e hidrogeológicos. Sendo assim, os três vetores de troca de matéria e energia em um hidrossistema serão abarcados.

A interpretação dos materiais que estruturam as nascentes é outro ponto ímpar. De uma forma geral, são afloramentos rochosos ou coberturas colúvio-eluviais que ocorrem nos locais de surgência, contribuindo para o conhecimento do processo de exfiltração.

2.3. A ORIGEM DOS CANAIS FLUVIAIS

Os canais fluviais são feições geomorfológicas facilmente reconhecidas na paisagem. Apresentam-se como formações longilíneas, côncavas, delimitadas por margens normalmente na forma de taludes, mas também como rampas suavizadas, que podem variar de alguns centímetros até centenas de metros de profundidade. Por serem formas erosivas, sua dinâmica está associada à retirada, transporte e deposição de sedimentos.

A origem dos canais fluviais é variada e parcialmente explicada pela história do relevo, porém, a ciência ainda apresenta lacunas em sua concepção (KNIGHTON, 1984). Contribui para isso, o fato de estarem envolvidos complexos fenômenos geomorfológicos, hidrológicos e hidrogeológicos. Sendo assim, há dois principais desafios na compreensão da origem dos rios: i) a determinação dos processos que concentram a água para exfiltração e iniciam a drenagem superficial; ii) a definição das condições para que a exfiltração se torne permanente e possua energia para escavar o canal (KNIGHTON, 1984).

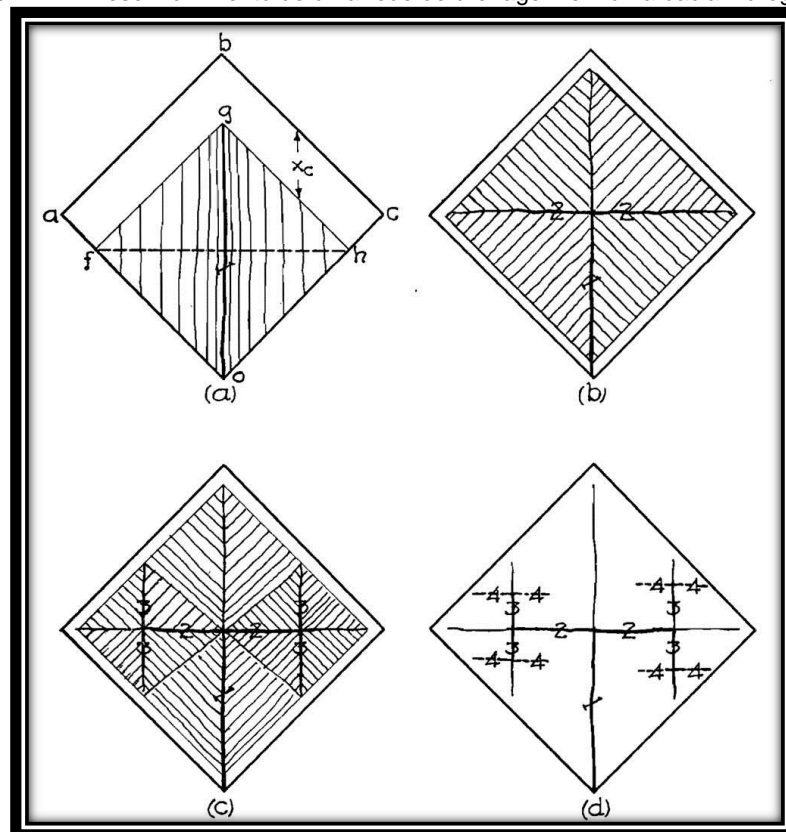
Segundo Montgomery e Dietrich (1989), a gênese dos canais de drenagem está associada a três principais grupos de processos: i) incisão por fluxo superficial de saturação; ii) *seepage erosion*; iii) escorregamentos rasos. Considerando-se que as nascentes estão associadas ao início dos canais fluviais, pode-se utilizar analogamente este modelo na interpretação da gênese das nascentes, guardadas as especificidades conceituais que diferenciam cabeceiras de drenagem e nascentes.

A evolução da rede de drenagem sempre foi um importante objeto de estudo da geomorfologia. Porém, a gênese de um canal de drenagem, individualmente, não tem sido preconizada. Assim, a maioria dos modelos teóricos de evolução da rede de drenagem baseia-se em processos investigados de jusante para montante e partem da existência de

pelo menos um curso d'água anterior (KNIGHTON, 1984; STRAHLER; STRALER, 1992). Nestas concepções, o processo síntese é, portanto, a erosão remontante.

O modelo de evolução da drenagem de Horton (1945) é provavelmente o mais citado na literatura (FIG. 4). Em um contexto temporal, este autor relacionou os processos teóricos superficiais de escoamento com parâmetros morfométricos observados na composição de redes de drenagem padrões.

FIGURA 4 – Desenvolvimento de uma rede de drenagem em uma bacia hidrográfica.



Fonte: HORTON, 1945, p. 340.

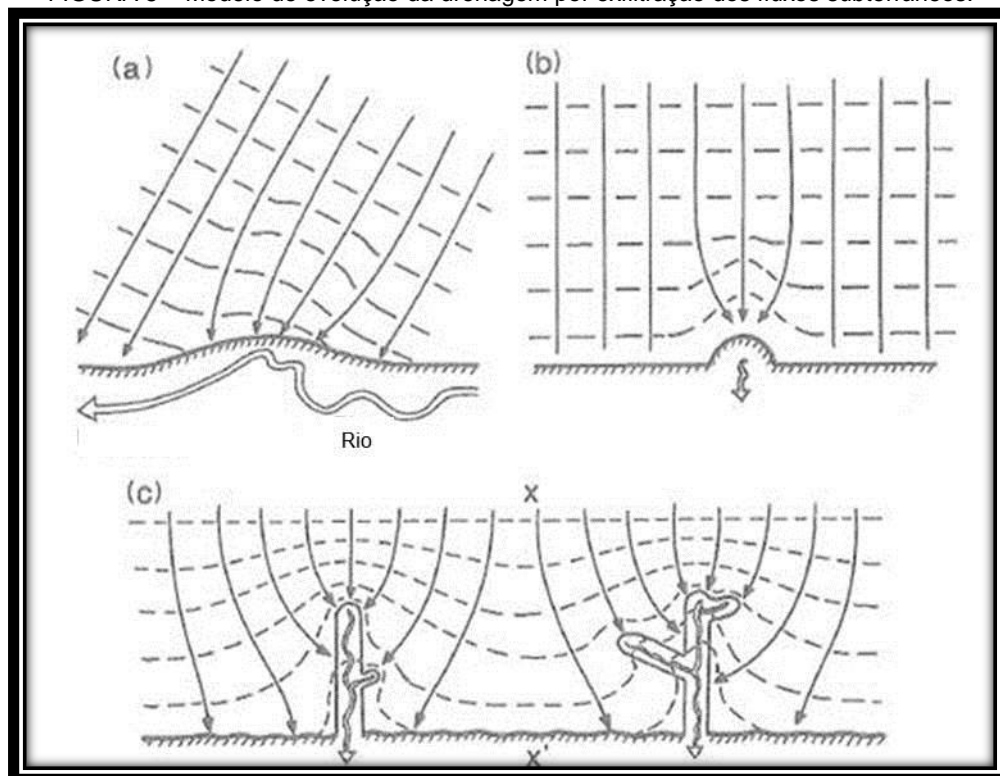
Assim, o primeiro estágio de desenvolvimento seria a formação, a partir do fluxo hortoniano (*hortonian flow*), de um canal principal perpendicular à inclinação principal da bacia (FIG. 4a). Nesse momento, fluxos de menor intensidade formariam uma rede efêmera paralela ao riacho formado. Com a ampliação do canal principal, altera-se o gradiente topográfico das vertentes e as linhas de fluxo gradativamente passam a se direcionar para o riacho, formando um novo canal afluente em cada margem do curso principal (FIG. 4b). O terceiro estágio seria o desenvolvimento dos tributários dos afluentes (FIG. 4c) de modo similar ao ocorrido com o principal, porém, com uma menor área para concentração do fluxo hortoniano. Por fim, o processo seria repassado gradativamente aos canais recém-formados (FIG. 4d), até que se forme uma bacia mínima em que não haja condições de concentração de energia para a

erosão de um novo canal a partir do escoamento concentrado, predominando fluxos laminares (HORTON, 1945).

Este modelo, todavia, possui uma série de limitações. Os parâmetros apresentados por Horton (1945) são bem definidos em uma bacia em formato de losango (*diamond-shape*); sem essa forma, os cálculos se perdem e não há possibilidade de definir qual o principal canal em cada estágio (KNIGHTON, 1984). Além disso, ele parte da formação da rede de drenagem exclusivamente por processos superficiais, desconsiderando os fluxos subterrâneos. Por isso, o modelo hortoniano é mais bem aplicado em pequenas bacias com superfície desnuda de vegetação e com baixa capacidade de infiltração (SCHUMM, 2003).

Dunne (1980) propõe um modelo de evolução da rede de drenagem baseado nos processos de exfiltração e de retração de cabeceiras (FIG. 5). Os fluxos subterrâneos possuem um papel crucial nessa concepção teórica.

FIGURA 5 – Modelo de evolução da drenagem por exfiltração dos fluxos subterrâneos.



Fonte: adaptado de DUNNE (1980).

O estágio inicial (FIG. 5a) da evolução parte de uma superfície suavemente inclinada com uma sucessão de linhas preferencialmente paralelas de fluxo subterrâneo na direção da vertente. O segundo estágio (FIG. 5b) começa com uma perturbação nas curvas equipotenciais (que pode ser ocasionada, por exemplo, por erosão em duto) gerando uma

nascente. Inicia-se o fluxo superficial concentrado com intemperismo químico e erosão subterrânea concomitantemente. No terceiro estágio (FIG. 5c), a nascente retrai aumentando a concentração dos fluxos, promovendo novos locais de exfiltração. Os fluxos concentrados criam zonas suscetíveis à formação de canais tributários que crescem a montante a partir da retração da cabeceira.

A repetição dos processos (erosão superficial, subterrânea e exfiltração) leva ao surgimento de novos vales e à ramificação da rede de drenagem. No estágio final ocorre a estabilização do padrão, já que a energia existente em cada nascente não é grande o suficiente para continuar o processo de erosão em duto e de turbulência nos fluxos subterrâneos (DUNNE, 1980).

Notadamente, esse modelo “prevê a exfiltração nas nascentes como o mecanismo dominante” (KNIGHTON, 1984, p. 28). Desde que haja área de contribuição suficiente para acumular água, o *piping* promoverá a retração das cabeceiras, convergência dos fluxos e aumento da taxa de intemperismo químico (KNIGHTON, 1984). Esse ciclo promove a ramificação e extensão para montante da rede de drenagem até que a área de contribuição das nascentes seja um fator limitante para a concentração dos fluxos.

Isso implica que quanto maior a proximidade do divisor de drenagem, maior o número de canais por área e maior a dissecação da paisagem, o que mostra uma clara relação entre as áreas fontes, as cabeceiras e a evolução da drenagem (MONTGOMERY e DIETRICH, 1988; MONTGOMERY e DIETRICH, 1989). Assim, pode-se afirmar que “os canais iniciam-se no primeiro ponto da encosta a partir do divisor de drenagem no qual há área suficiente para suportar um canal” (MONTGOMERY e DIETRICH, 1988, p. 234).

Observações de campo também sugerem que, em geral, a localização do início dos canais possa ser controlada por escorregamentos nas vertentes mais íngremes e por *seepage erosion* e escoamento superficial de saturação nas mais suaves (MONTGOMERY e DIETRICH, 1989, p. 1917).

O escoamento superficial de saturação ocorre quando a precipitação apresenta magnitude e intensidade suficientes para saturar camadas das coberturas superficiais. Com isso, a superfície freática é deslocada verticalmente para cima até que atinge a superfície topográfica, promovendo a exfiltração. A concentração desse fluxo que pode emergir de forma difusa cria condições para erosão das coberturas superficiais, formando pequenos riachos (KNIGHTON, 1984).

lida (1984 *apud* MONTGOMERY e DIETRICH, 1989) elaborou um modelo teórico de evolução dos canais a partir da convergência dos fluxos sub-superficiais. Nessa concepção, é imprescindível certa uniformidade da cobertura superficial, para permitir o livre deslocamento da água em seus poros, e uma camada impermeável constituída pela rocha sã, para forçar o movimento lateral da água. Desse modo, a descarga das nascentes seria proporcional à área de contribuição à montante.

Knighton (1984) apontou que os locais mais prováveis para a ocorrência do escoamento de saturação, e, portanto, mais propícios para o desenvolvimento de canais de drenagem, eram as baixas vertentes e concavidades. Isso porque, a topografia local promoveria uma concentração dos fluxos superficiais. Além disso, essas zonas tendem a possuir mantos de intemperismo menos espessos e menos permeáveis, tornando-se mais úmidos por períodos mais longos e, conseqüentemente, permanecendo constantemente mais próximos ao nível de saturação.

A partir de observações de campo, Dietrich *et al.* (1986) propõem uma teoria geral para gênese de canais por escorregamentos. Verificando que em encostas mais íngremes, os movimentos de massa são processos recorrentes, os autores se basearam em parâmetros morfométricos para traduzir a evolução dos canais de drenagem. Resumidamente, o gradiente do local onde se inicia o canal possui relação inversa com o tamanho da área de contribuição e com o comprimento da vertente à montante do início do canal (MONTGOMERY e DIETRICH, 1988).

Os escorregamentos seriam responsáveis pela retirada de material e criação de feições côncavas. Com a convergência da água, os processos erosivos e desnudacionais se sucederiam, formando anfiteatros ou cabeceiras de drenagem. A dissecação vertical do relevo pela incisão do fluxo responderia pela formação de um sulco erosivo que originaria um canal de primeira ordem (MONTGOMERY e DIETRICH, 1989).

A gênese dos canais de drenagem por erosão subsuperficial não é bem explicada pelos modelos presentes na literatura, conforme afirmam Montgomery e Dietrich (1989). Sabe-se que a erosão em dutos (*piping*) é um dos processos geomorfológicos subterrâneos de maior energia (alta velocidade do fluxo), contribuindo com retirada significativa de material. Porém, um pré-requisito para a iniciação do *piping* é a presença de superfícies de permeabilidade limitada no interior do manto de alteração, podendo ser uma camada argilosa, o saprolito ou mesmo a rocha sã. De todo modo, essa mudança na permeabilidade em perfil, promove o

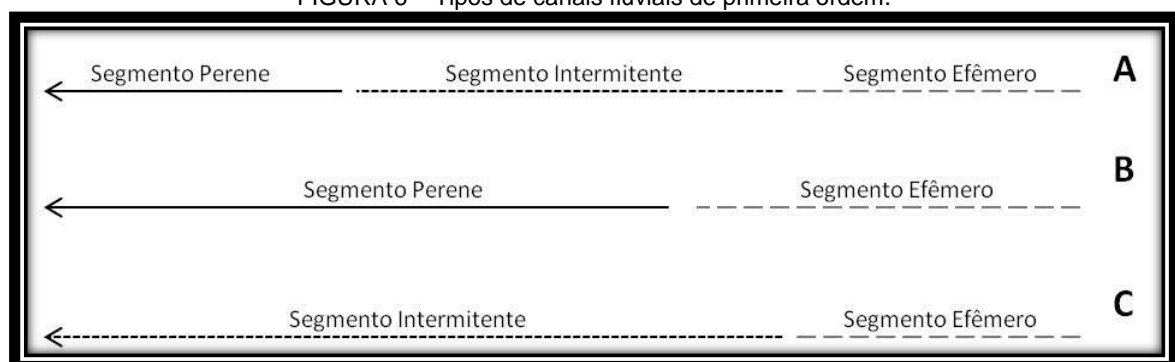
fluxo lateral da água com a remoção seletiva de sedimentos e a abertura gradual dos poros, formando dutos (KNIGHTON, 1984).

Além do *piping*, outros processos ainda pouco conhecidos podem levar à formação de um canal a partir dos fluxos subterrâneos. Apesar das lacunas do conhecimento científico sobre esses fenômenos, “em vertentes de baixo gradiente em regiões úmidas, a erosão pelo escoamento de saturação e por exfiltração são os mecanismos mais comuns de inicialização dos canais” (MONTGOMERY e DIETRICH, 1989, p. 1914). Grande parte do Brasil se insere nesse contexto.

Contudo, não se pode afirmar que a gênese das nascentes resume-se aos processos de formação dos canais fluviais ou à evolução da rede de drenagem. Porém, muitos mecanismos são comuns a esses processos. Ainda que as nascentes não sejam responsáveis pela gênese dos canais de drenagem *stricto sensu*, são elas que determinarão a extensão do fluxo superficial permanente da água nos canais de primeira ordem.

Normalmente, os canais de primeira ordem podem ser divididos em segmentos perenes, intermitentes e efêmeros (FARIA, 1997) (FIG. 6). A drenagem perene se inicia em uma nascente, por mais que possa haver a ocorrência de fluxos temporários à montante, como no caso de ravinas e fluxos não concentrados. A variação sazonal do nível freático pode, também, fazer flutuar as nascentes deslocando-as através do segmento intermitente do canal. Por fim, os segmentos efêmeros só possuem atividade nos eventos chuvosos, já que a exfiltração não se sustenta nesses trechos.

FIGURA 6 – Tipos de canais fluviais de primeira ordem.



A) canal com nascente móvel que varia sua posição sazonalmente ao longo do segmento intermitente, mantendo um segmento perene no seu local de exfiltração mais baixo; B) canal com nascente perene e fixa, onde há a continuação do canal à montante na forma de uma ravina ou sulco erosivo com fluxo efêmero; C) canal com nascente temporária, formando um segmento intermitente, delimitado pelo ponto mais alto de exfiltração da nascente e com um segmento efêmero a montante. Fonte: adaptado de FARIA (1997).

2.4. O CONTATO ENTRE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS

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

Entretanto, o contato entre a água subterrânea e a superfície não ocorre apenas em nascentes. Em qualquer situação em que o nível da água de um aquífero toca o nível da topografia pode ocorrer a descarga da água subterrânea (TODD e MAYS, 2005). Assim, a exfiltração pode ocorrer em rios, mares, lagos, gêiseres, brejos, poços escavados ou em surgências em geral (FETTER, 1994).

Para tanto, é necessário que a água armazenada nos aquíferos flua em direção à superfície. Nas coberturas superficiais, o maior acúmulo de água ocorre na zona de saturação, formada no contato entre a base do material inconsolidado e alguma superfície de menor permeabilidade, normalmente a rocha sã (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000). Além disso, o processo de exfiltração pode ocorrer diretamente a partir da água armazenada em aquíferos fissurais (confinados ou não), em afloramentos rochosos (TODD e MAYS, 2005).

Além disso, não se pode negar a importância de aquíferos suspensos relacionados a camadas de menor permeabilidade no interior das coberturas superficiais (SCANLON *et al.*, 2000). A ascensão capilar da água, imediatamente acima do nível freático, também promove a saída da água do meio subterrâneo (MORAES, 1982), porém, a magnitude do processo é, de um modo geral, muito pequena, inibindo a formação de corpos d'água superficiais.

A água nos aquíferos está em lento movimento. O meio subterrâneo, então, possui um papel fundamental no ciclo hidrológico. Resumidamente, pode-se afirmar que:

A água penetra nessas formações [aquíferos] através da superfície do terreno ou dos corpos de água superficiais, após o que caminha lentamente distâncias variáveis até o seu retorno à superfície por ação do fluxo natural, das plantas ou do homem (TODD, 1959, p. 5).

Assim, as águas se movimentam das zonas de recarga (maior potencial hidráulico) para as zonas de descarga (menor potencial hidráulico). Enquanto a recarga ocorre normalmente em áreas topograficamente mais elevadas, a descarga vai ocorrer em locais onde há

convergência dos fluxos subterrâneos, promovendo exfiltração e manifestando-se na forma de uma nascente, lago ou riacho (FETTER, 1994).

A compreensão dos fluxos subterrâneos é um dos grandes objetivos da hidrogeologia. Como todo movimento, eles são definidos pelas condições de energia (potencial) do sistema, o que é representado pelo potencial hidráulico do aquífero. Desse modo, há uma “tendência para o deslocamento do elemento na direção do mais rápido decréscimo de potencial” (MORAES, 1982).

O potencial hidráulico pode ser sintetizado a partir do nível hidrodinâmico de um aquífero; ou seja, o nível topográfico abstrato da água armazenada sem que houvesse anteparos (camadas de confinamento) no sistema aquífero (MORAES, 1982). O nível hidrodinâmico é definido pela localização da água armazenada no perfil, e pela pressão natural da água, esta determinada pela pressão atmosférica e pela pressão de confinamento (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000). Portanto, é a partir do gradiente potenciométrico que ocorre o movimento da água subterrânea.

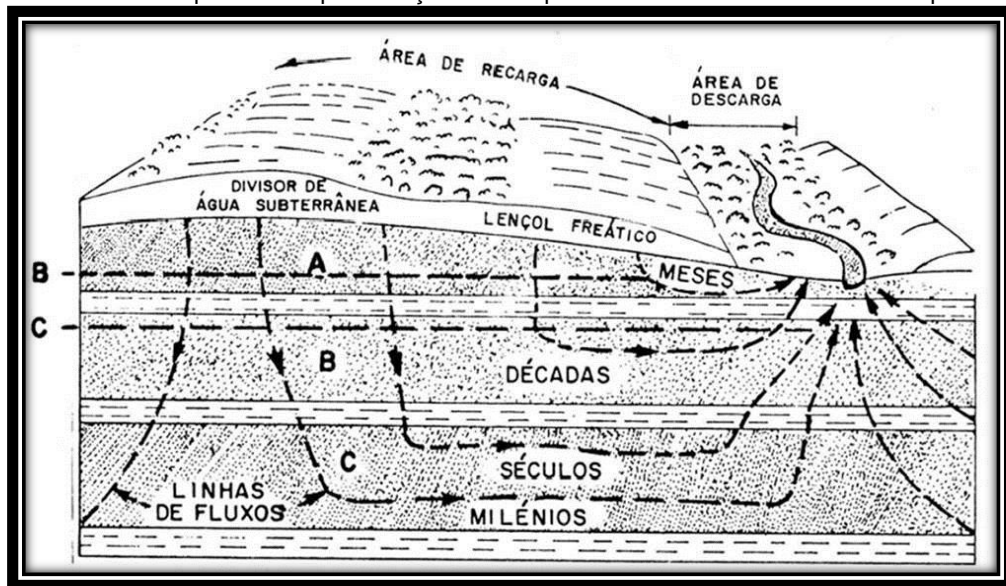
A união dos níveis potenciais da água de mesma magnitude forma um plano contínuo e variável (visão de topo), denominado superfície potenciométrica (CLEARY, 1989). Sua forma depende essencialmente das características geológicas do aquífero (litologia, estrutura, estratigrafia, condutividade hidráulica) e da dinâmica entre recarga e descarga. Em aquíferos livres, a superfície potenciométrica corresponde exatamente ao contorno físico do nível da água; porém, em aquíferos confinados, ocorre como um contorno imaginário (abstrato) acima do nível da água (CLEARY, 1989).

Os fluxos subterrâneos são interpretados, também, em função de sua variabilidade no tempo e no espaço. Um fluxo uniforme representa certa homogeneidade da velocidade da água no espaço; o que não ocorre em um fluxo não uniforme. Por outro lado, a variação da velocidade em função do tempo define os fluxos permanentes (sem variação) e não permanentes (MORAES, 1982).

O movimento horizontal da água nos aquíferos é normalmente muito mais lento que o das águas superficiais. Entre a recarga e a descarga há um intervalo temporal que pode durar meses ou mesmo milênios. A duração desse processo é o tempo de residência da água no aquífero e depende, fundamentalmente, da distância entre as zonas de recarga e descarga, da profundidade do aquífero e da velocidade do fluxo subterrâneo (CLEARY, 1989).

Quanto mais distantes as zonas de recarga e descarga, normalmente, mais longo é o tempo de residência (FIG. 7). O mesmo ocorre quanto mais profundo for o aquífero. Por outro lado, um elevado gradiente potenciométrico associado a altas taxas de condutividade hidráulica aumentam a velocidade do fluxo subterrâneo e diminui o tempo de residência. Definem-se, assim, fluxos locais ou regionais relacionados respectivamente a tempos de residência curtos ou longos.

FIGURA 7 – Esquema de representação dos tempos de residência em um sistema aquífero.



Fonte: CLEARY, 1989, p. 18.

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 mais 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, ainda que em climas com dupla estacionalidade (FETTER, 1994).

O tempo de residência da água no aquífero possui relação direta com seu grau de mineralização.

Em aquíferos compostos por materiais rochosos solúveis, o grau de mineralização é uma função da química inicial da água e do período de tempo que ela está em contato com o aquífero (FETTER, 1994, p. 281).

Resumidamente, fluxos regionais, que permanecem mais tempo em contato com o aquífero, tendem a ter maior grau de mineralização do que os fluxos locais. Assim, o grau de mineralização é uma medida indireta do tempo de residência da água no aquífero.

A incorporação de elementos na água pode ocorrer na forma molecular ou iônica, sendo resultado do intemperismo e lixiviação das rochas (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000). Com isso, é esperado que as águas guardem características químicas que remetam aos aquíferos de origem, o que é chamado na literatura de assinatura geoquímica.

As interpretações hidrogeoquímicas partem de análises laboratoriais que identificam o tipo e a quantidade dos elementos que estão incorporados à água. Nesse sentido, apresentam um conjunto de métodos de grande utilização na hidrogeologia, uma vez que remetem à espaço-temporalidade do ciclo da água no meio subterrâneo.

A maior parte das substâncias que compõe a mineralização da água ocorre na forma iônica. “Alguns desses constituintes iônicos, os principais, estão presentes em quase todas as águas subterrâneas e sua soma representa quase a totalidade dos íons presentes” (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000). Dentre esses componentes majoritários destacam-se o sódio, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato, bicarbonato e sílica (BABAR, 2005). Ressalta-se na literatura brasileira a importância de alguns constituintes secundários, como o ferro, alumínio, potássio, carbonato e nitrato (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000).

Assim, qualquer análise hidrogeoquímica será incompleta, caso não envolva, ao menos, esses componentes principais. Porém, outro parâmetro físico-químico é muito utilizado na literatura como suporte para a interpretação do grau de mineralização da água: a condutividade elétrica. Este parâmetro é a medida da facilidade da água em conduzir eletricidade, o que está diretamente relacionado aos íons dissolvidos (BABAR, 2005). Sendo assim, diversos trabalhos demonstram a relação existente entre a condutividade elétrica, os sólidos totais dissolvidos e a soma de íons presentes na água (GURGEL, 1982; ATEKWANA *et al.*, 2004; SAMPAIO *et al.*, 2007).

A principal vantagem da utilização da condutividade elétrica está no fato de ser um método simples e de baixo custo. Além disso, sua leitura direta permite a comparação entre o tempo de residência de águas que exfiltram do mesmo sistema aquífero. De uma forma geral, quanto maior a condutividade, maior o grau de mineralização e maior o tempo de residência.

Mais recentemente, modernas análises químicas possibilitaram o desenvolvimento de novas formas de mensuração do tempo de residência da água nos aquíferos. De uma forma geral, esses novos métodos baseiam-se na identificação e contagem de elementos presentes na água utilizados como traçadores. Segundo Bedmar (1972, p. 37), um traçador é “qualquer

produto que, incorporado à massa de uma substância, permite investigar o comportamento desta em um determinado processo físico ou químico”.

Existem basicamente dois tipos de traçadores: não-isotópicos e isotópicos. Os primeiros são elementos em solução ou suspensão na água que podem servir de parâmetro para a identificação de sua origem. Para o estudo de águas subterrâneas, os traçadores não-isotópicos apresentam uma série de inconvenientes, devido à grande possibilidade de mistura de águas de diversas origens no sistema aquífero (BEDMAR, 1972).

Por outro lado, os traçadores isotópicos são mais eficientes ao permitirem identificar a taxa de mistura da água e a sua idade aparente (CHRISTENSON *et al.*, 2006). Dois grupos de traçadores isotópicos são mais utilizados na ciência atual: os isótopos estáveis e os radioisótopos naturais.

Normalmente, a molécula de água é formada por hidrogênio com massa atômica de 1 g/mol e oxigênio com massa atômica de 16 g/mol, na forma H_2O . Porém, os átomos de oxigênio e hidrogênio possuem isótopos que podem ser utilizados como traçadores isotópicos estáveis. Em 0,2% dos casos, o hidrogênio pode estar associado ao isótopo do oxigênio com 18 g/mol de massa, formando $H_2^{18}O$ (comumente denominada “água pesada”). Há ainda a possibilidade, em 0,03% dos casos, do oxigênio-16 se ligar com o deutério, isótopo do hidrogênio com massa atômica de 2 g/mol, formando uma molécula DHO (BEDMAR, 1972).

Alguns ambientes facilitam a incorporação de oxigênio-18 e deutério na molécula de água. Pode-se afirmar que “as concentrações de D e ^{18}O em uma amostra de água dependem da história anterior, desde a saída dessa amostra do oceano” (BEDMAR, 1972, p. 62).

Os modelos interpretativos partem da premissa de que a composição isotópica da precipitação de uma determinada região é constante no tempo (ainda que haja variações, inclusive sazonais). Nesse sentido, algumas condições ambientais reconhecidas pela literatura especializada podem alterar a concentração dos isótopos estáveis na água (BEDMAR, 1972; CLARK e FRITZ, 1997): i) distância do oceano – já que a água dos oceanos apresentam desvios negativos para esses isótopos; ii) temperatura – as concentrações de oxigênio-18 e deutério tendem a aumentar com o aumento da temperatura; iii) evaporação – há trocas com a atmosfera fazendo com que a concentração dos isótopos estáveis diminua em ambientes de alta evaporação.

Assim, a avaliação da composição isotópica da água a partir de sua massa molecular auxilia na compreensão de sua origem. Com isso, podem-se inferir de maneira correlata as taxas de mistura de água com origens diferentes, o que torna o método de grande interesse em estudos hidrogeológicos de sistema aquíferos heterogêneos.

Os isótopos estáveis, porém, não conseguem indicar o tempo associado aos processos hidrogeológicos, pois suas taxas são constantes no tempo. Porém, a utilização de radioisótopos naturais e artificiais preenche essa lacuna metodológica. Devido ao decaimento radioativo desses elementos, é possível datar a chamada idade aparente da água, ou seja, o tempo determinado pelo traçador que a água teve o último contato com a atmosfera (CHRISTENSON *et al.*, 2006). “A idade da água subterrânea é definida como o tempo de percurso de uma parcela de água do aquífero para um ponto de medição de menor gradiente” (HINKLE, 1997).

Os principais traçadores utilizados para esse fim são: ^{14}C , T, ^3He , ^{85}Kr , ^{222}Ra , CFCs, SF_6 (BEDMAR, 1972; CLARK e FRITZ, 1997; CHRISTENSON *et al.*, 2006; ZUBER e ROZANSKI, 2007). Dentre esses, a literatura prioriza a utilização do carbono-14 (^{14}C) e do trítio (^3H ou T), como métodos de maior abrangência e eficácia (BEDMAR, 1972; CLARK e FRITZ, 1997).

O carbono-14 é um radioisótopo com meia vida de 5.730 anos, tendo sido o traçador mais utilizado para a datação de águas antigas, entre 200 e 50.000 anos (BEDMAR, 1972). Sua produção ocorre nas altas camadas da atmosfera a partir da ação de raios cósmicos. Porém, devido aos testes de armas nucleares a partir da década de 1950, é necessária a utilização de modelos geoquímicos para corrigir os efeitos de diluição e melhorar as estimativas (CHRISTENSON *et al.*, 2006).

Entretanto, para a datação de águas modernas e aquíferos superficiais, o elemento mais utilizado atualmente é o trítio, sobretudo em associação ao seu isótopo-filho, o hélio tritiogênico (CLARK e FRITZ, 1997). O trítio é um isótopo radioativo do hidrogênio, produzido naturalmente pela interação da radiação cósmica com o nitrogênio e oxigênio, sobretudo na alta atmosfera. Após a oxidação da água – H_2O – em HTO, ele entra no ciclo hidrológico (STUTE *et al.*, 1997). Por ser um isótopo radiogênico e instável, o trítio decai para ^3He segundo uma meia-vida de 12,33 anos (HAHM e KIM, 2008).

Apesar de ser um radioisótopo natural, sua pequena meia-vida e sua baixa taxa de produção fazem com que todo o trítio produzido nas altas atmosferas se dissipe rapidamente. Porém, os testes nucleares produziram grandes quantidades de trítio artificialmente, os chamados

“*bomb tritium*”, possibilitando a utilização desse elemento na datação das águas posteriores às explosões termonucleares (STUTE *et al.*, 1997). Assim, enquanto a água precipitada antes de 1952 já não possui registros detectáveis de trítio, as mais recentes respeitam a taxa de decaimento relacionada à meia-vida do elemento (BEDMAR, 1972).

A formação de trítio na alta atmosfera varia segundo cinco principais fatores: i) frequência e intensidade dos testes nucleares (com o máximo registrado em 1964); ii) variação sazonal, normalmente com máximo no verão; iii) latitude (concentrações no hemisfério norte são maiores); iv) condições meteorológicas locais; v) altitude (quanto maior a altitude, maior a concentração de trítio). A interpretação dessas variáveis é essencial para compreender o significado da concentração do isótopo na água (BEDMAR, 1972).

Com isso, diferenciam-se as águas chamadas modernas, as quais apresentam valores de trítio superiores ao calculado pelo decaimento pós-1952, de águas pré-modernas, consideradas como aquelas em que não há registro de trítio devido a sua total transformação em hélio. Assim, a utilização da contagem do trítio na água é uma datação relativa, uma vez que é possível conhecer a concentração de trítio atual e sua taxa de decaimento, mas não se sabe a concentração inicial do elemento; parâmetro essencial para o cálculo da idade aparente.

Alguns modelos globais apresentam a variação de trítio na precipitação em uma série temporal (CLARK e FRITZ, 1997). Porém, dificilmente consegue-se utilizar esses dados como fontes de informação para o trítio inicial, uma vez que existe uma grande variabilidade espacial de sua concentração (BEDMAR, 1972). Além disso, o trítio medido refere-se à parcela mais jovem da água, de modo que, conforme aumenta a taxa de mistura, diminui-se a concentração de trítio (MORAN *et al.*, 2003).

Dulinski *et al.* (2003) afirmam que o método de contagem de trítio foi, por algumas décadas, o mais simples e conveniente para datar a água subterrânea. Porém, seus resultados relativos permitem apenas a comparação de dados de um mesmo local, com as características da água de precipitação similares. Por isso, novas técnicas foram desenvolvidas visando a datação absoluta. As novas propostas, de um modo geral, envolvem a concentração do trítio e, ao mesmo tempo, de seu isótopo-filho.

Com a quantificação do hélio tritiogênico, pode-se reconstruir a concentração original do trítio (no momento da precipitação). Assim, a partir da meia-vida, fica possível calcular com precisão o tempo que o trítio original demorou em decair até o trítio medido (HINKLE, 1997).

Dois modelos principais são utilizados. A soma das concentrações de trítio e hélio ($T+^3\text{He}$) é mais adequada para níveis freáticos rasos com baixa taxa de mistura de água. Já a relação entre as concentrações dos isótopos ($T/^3\text{He}$) é utilizada para variações de idade dentro do perfil vertical do sistema aquífero (ZUBER e ROZANSKI, 2007).

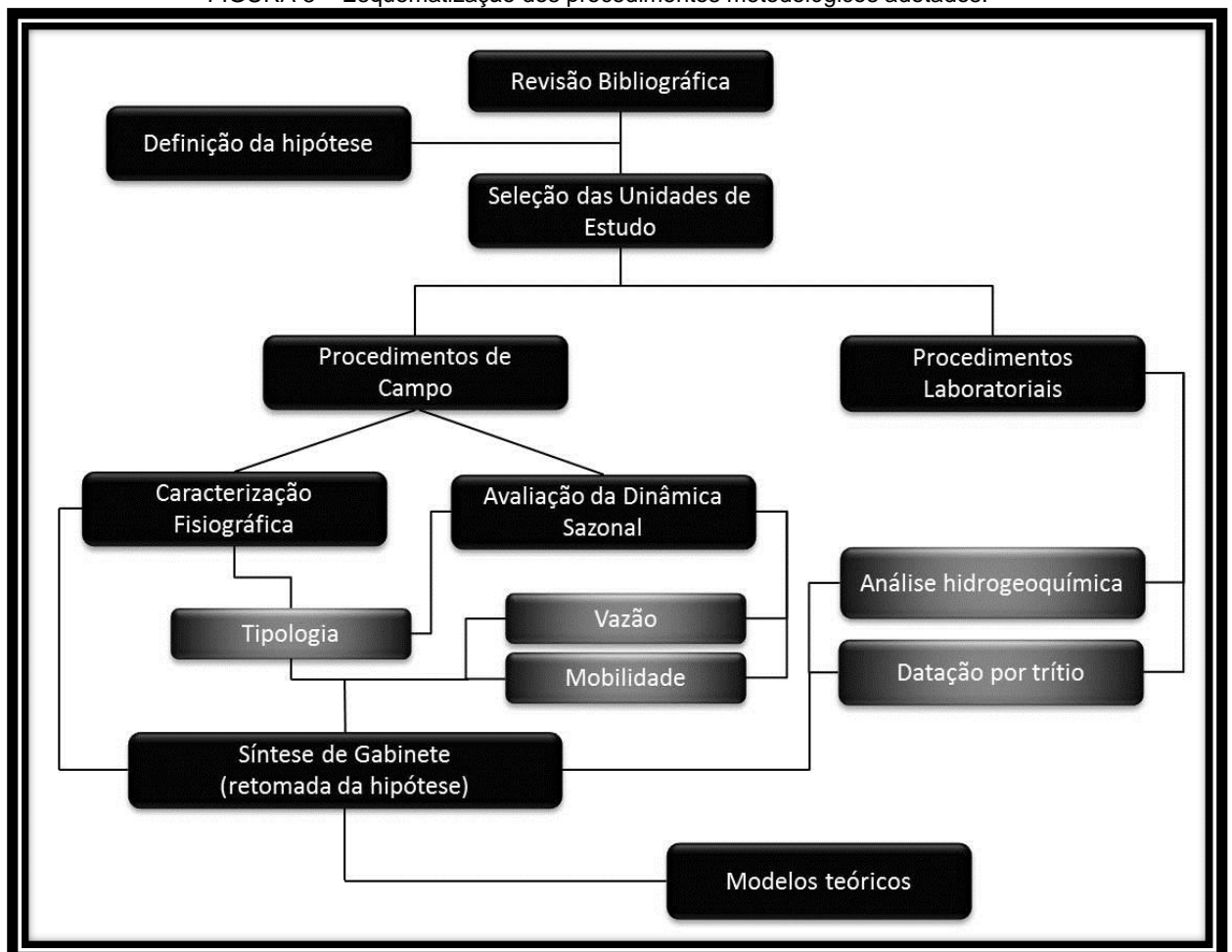
Nesse sentido, a utilização de métodos hidrogeoquímicos comumente utilizados na hidrogeologia é de grande valia no estudo das nascentes. Além da definição do aquífero de origem, pode-se também estabelecer relações temporais entre a recarga e a descarga dos aquíferos. Portanto, a interpretação da vulnerabilidade a impactos das nascentes, bem como a definição de suas possibilidades de gênese e dinâmica, passam por essas técnicas.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1. SÍNTESE DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS

Um objeto de estudo interdisciplinar e complexo como a nascente demanda um conjunto de técnicas e métodos para sua interpretação (FIG. 8). Assim, a parte analítica do trabalho envolveu procedimentos geográficos, geomorfológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, na busca pela interpretação das variáveis internas e externas do sistema. Posteriormente, um trabalho sintético foi proposto no intuito de interpretar de forma abrangente a lógica estruturante das nascentes e compreender a gênese e a dinâmica desses sistemas.

FIGURA 8 – Esquematização dos procedimentos metodológicos adotados.



Fonte: organizado pelo autor.

A revisão bibliográfica foi realizada durante todo o tempo de elaboração do projeto para construção do embasamento teórico-conceitual da tese, bem como para facilitar o diálogo entre os resultados encontrados neste e em outros trabalhos correlatos. Além de bibliografias

estritamente sobre nascentes, buscaram-se informações, sobretudo, nas áreas de geomorfologia fluvial, hidrogeomorfologia, hidrogeologia, geoquímica e radioisótopos.

No âmbito da geomorfologia fluvial e hidrogeomorfologia, foi necessário conhecer os processos formadores de canais de drenagem, dinâmica de canais de primeira ordem e processos desnudacionais superficiais e sub-superficiais. Esses tópicos foram aproximados da hidrologia a partir do estudo de hidrogramas de vazão e das relações entre precipitação, vazão e exfiltração. A hidrogeologia e a geoquímica contribuíram para o entendimento da lógica espacial e dinâmica temporal dos fluxos subterrâneos, da disponibilidade hídrica subterrânea e das características geoquímicas dos aquíferos. Por fim, na vanguarda das técnicas de datação, buscou-se o entendimento da utilização de radioisótopos na acepção da idade aparente das águas, com interesse especial na aplicação do trítio.

O primeiro desafio para efetivação do projeto foi a escolha das unidades de estudo. Devido aos objetivos traçados, era necessário escolher áreas geomorfologicamente distintas e que abrigassem nascentes fisiograficamente heterogêneas, de acessibilidade relativamente fácil e com facilidade de aplicação das técnicas de mensuração dos parâmetros quantitativos. Além disso, havia a necessidade de abordar distintos contextos geológico-geomorfológicos em escala regional para ampliar as possibilidades de generalizações. Assim, as investigações ocorreram em duas unidades do relevo distintas: Depressão do Alto-Médio São Francisco e a Serra do Espinhaço Meridional (IBGE, 2006).

Foram realizados trabalhos de campo exploratórios nesses compartimentos com a finalidade de identificar as bacias mais propícias a serem estudadas. Durante o período de julho de 2010 a fevereiro de 2011, foi mapeado e descrito um total de 61 nascentes nas duas unidades (APÊNDICE A). A partir de critérios técnicos e logísticos 24 nascentes foram selecionadas para a continuação do trabalho, sendo 11 destas no município de Lagoa Santa (Depressão do Alto-Médio São Francisco) e 13 no Parque Nacional da Serra do Cipó e seu entorno (Serra do Espinhaço Meridional), ambas as localidades na região central do estado de Minas Gerais.

Em termos técnicos, foram selecionadas as nascentes que representassem o máximo de heterogeneidade fisiográfica do rol, buscando, sobretudo, a maior diversidade de morfologias e tipos de exfiltração. Ao mesmo tempo, essas nascentes deveriam permitir, ao menos em parte do ano hidrológico, a aplicação dos procedimentos técnicos adotados, como as mensurações de campo. Na questão logística, foi verificada a facilidade de acesso às nascentes e a distância entre elas. Devido a esses critérios, não é possível generalizar os resultados da amostra para todo o universo de nascentes das áreas de estudo. Isso, contudo,

não conflita com os objetivos do trabalho, uma vez que a heterogeneidade dos aspectos físico-geográficos e ambientais dos casos selecionados foi garantida.

Depois de selecionadas as unidades de estudo, iniciou-se a coleta de dados. A maioria das informações sobre as nascentes foi obtida em trabalhos de campo periódicos durante um ano hidrológico. Entre março de 2011 e março de 2012, foi realizado um acompanhamento mensal das nascentes. Foram coletados dados qualitativos para possibilitar a caracterização fisiográfica e quantitativos que contribuiriam para a avaliação da dinâmica sazonal das nascentes. Do mesmo modo, realizaram-se amostragens de água para análises laboratoriais.

Por fim, a intercessão desses procedimentos possibilitou uma síntese de gabinete. A tipologia de nascentes proposta por Felipe (2009) balizou as comparações. Enquanto a dinâmica foi interpretada a partir do cruzamento das variáveis hidrogeomorfológicas, meteorológicas e hidrogeológicas, os modelos teóricos de gênese das nascentes foram baseados nas análises hidrogeoquímicas, na datação relativa das águas e nas informações geomorfológicas.

3.2. TRABALHOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo tiveram como objetivo principal a identificação e caracterização das nascentes. Além da descrição fisiográfica, foram mensurados alguns parâmetros morfométricos e hidrológicos. Ademais, foi dada uma importância primeira na identificação de feições e processos geomorfológicos que condicionassem a gênese e dinâmica das nascentes.

As campanhas exploratórias foram realizadas de forma esporádica no período entre julho de 2010 e fevereiro de 2011. As nascentes identificadas foram caracterizadas a partir de um check-list básico (FIG. 9) que possui as informações necessárias para a posterior definição das nascentes a serem trabalhadas periodicamente.

Após a seleção das nascentes que incorporariam o estudo, criou-se um novo check-list (FIG. 10) para ser utilizado durante todo o monitoramento. Essa segunda etapa dos trabalhos de campo se configurou como visitas mensais as 24 nascentes selecionadas, no período de março de 2011 a março de 2012. As campanhas foram realizadas sempre na última semana de cada mês de referência ou na primeira semana do mês subsequente, para possibilitar comparações entre as variáveis hidrológicas e meteorológicas.

FIGURA 9 – Exemplo de check-list utilizado nos trabalhos de campo exploratórios.

CHECK-LIST DE CAMPO – CARACTERIZAÇÃO DE NASCENTES					
Local: Fazenda José Raimundo - LS			Data: 12/02/2011		
Estação: Verão			Condições Meteorológicas: sem chuva		
NASCENTE:			LS13		
PONTO GPS: LS13			FOTOS: 41-43		
Caracterização Ambiental					
COMP. DO RELEVO: (x) Calha () Baixa-Vertente () Média-Vertente () Cabeceira () Topo					
VEGETAÇÃO: (x) Lenhosa () Sub-Lenhosa () Herbácea () Ausente					
DOSSEL: () Fechado (x) Semi-Aberto () Aberto			ANTROPOGÊNESE: () Sim (x) Não		
LITOLOGIA: xisto / filito			AFLORAMENTOS: na nascente		
FORMAÇÃO DE CANAL: (x) Sim () Não			LARGURA X PROF: 86 x 53 cm		
CONTATOS: rocha/sedimentos			PROFUNDIDADE DO MANTO: 15 cm		
MORFOLOGIA: talvegue			EXFILTRAÇÃO: difusa		
Gênese					
CONDUTIVIDADE: ----			FEIÇÕES EROSIVAS: ravina		
HIPÓTESE: escoamento pluvial gerou ravinamento que iniciou verticalmente até tocar o nível freático.					
Vazão					
	Tempo (s)	Volume (L)	Vazão (L/s)		
	16,81	0,5	0,0297442		
	20,1	0,5	0,024875622		
	25,27	0,6	0,023743569		
	Média		0,02612113		
IIAN					
COR: m	ODOR: r	LIXO: b	USOS: b	FLUTUANTES:b	EQUIP. m
ESPUMAS: r	ÓLEOS: b	ESGOTO: b	ACESSO: m	VEGETAÇÃO:b	TOTAL: 26
Observações:					
Nascente fixa (visita no inverno ocorreu no mesmo lugar)					
Verificado barata d'água e peixe.					
O talvegue do canal é rochoso (afloramentos e blocos caídos), com margens com altura de aproximadamente dois metros no local da exfiltração					
Manto de intemperismo só ocorre nas margens do canal					
LS13 surge em afloramento rochoso após pequena ruptura de declive – exfiltração ocorre vertical e no fundo da calha.					

Fonte: organizado pelo autor.

FIGURA 10 – Exemplo de check-list de monitoramento realizado nos trabalhos de campo periódicos.

CHECK-LIST DE CAMPO – MONITORAMENTO DE NASCENTES		Data: 01/04/11
NASCENTE: SC23		Mês Referência: Março
MORFOLOGIA: Concavidade		EXFILTRAÇÃO: Difusa
MIGRAÇÃO	Estaca: OK	Distância do ponto de referência: 0 cm
VAZÃO		NÍVEL FREÁTICO (30 cm)
T1: 24,73s	V1: 1,084L	Esquerda: 51 cm
T2: 43,56s	V2: 2,605L	Direita: 42 cm
T3: 10,58s	V3: 0,600L	Montante: 44 cm
T4: 9,85s	V4: 0,456L	CONDUTIVIDADE: 14,1 μ S
T5: 28,02s	V5: 1,461L	TEMPERATURA (água): 23°
UMIDADE DO SOLO (%)		
Esquerda	Montante	Direita
100 cm (sup) 42%	100 cm (sup) 51%	100 cm (sup) 38%
100 cm (prof) 57%	100 cm (prof) 112%	100 cm (prof) 82%
30 cm (sup) 46%	30 cm (sup) 61%	30 cm (sup) 45%
30 cm (prof) 107%	30 cm (prof) 108%	30 cm (prof) 108%

Fonte: organizado pelo autor.

Em cada unidade de estudo o monitoramento foi realizado em dois dias seguidos para minimizar possíveis efeitos da precipitação instantânea, totalizando campanhas de quatro dias. Excepcionalmente em alguns casos, foi possível realizar o monitoramento de todas as nascentes em apenas três dias.

3.2.1. CARACTERIZAÇÃO FISIOGRÁFICA

A caracterização fisiográfica envolveu a descrição de parâmetros qualitativos do sistema ambiental (APÊNDICE A), os quais contribuíram para a definição da tipologia das nascentes. Nesse sentido, combina-se a observação *in loco* em escala 1:1 com dados secundários em escala regional (1:25.000 e 1:50.000).

O primeiro passo foi a identificação das nascentes nos trabalhos de campo exploratórios. Com o auxílio de moradores locais conhecedores das áreas de estudo, os pontos de checagem marcados em gabinete via sensoriamento remoto (início dos cursos de água, cabeceiras de drenagem e áreas de vegetação hidrófita ou higrófita) foram visitados. Além disso, os cursos d'água drenantes foram acompanhados de jusante para montante. Estes procedimentos foram adotados para localizar as nascentes, identificadas em campo como locais de

exfiltração natural que iniciam um fluxo superficial conectado à rede de drenagem principal, conforme conceito adotado (FELIPPE, 2009).

As nascentes foram então localizadas via receptor GPS portátil modelo Garmim 76CSx. Para reduzir o erro da marcação, estabeleceu-se como critério a retirada de uma média de no mínimo 20 pontos para o mesmo local, calculada automaticamente no aparelho. Com isso, o raio de erro de cada ponto médio adotado ficou entre três e seis metros, considerado satisfatório para os propósitos do trabalho.

Adicionalmente, estacas de madeira foram colocadas com o respectivo código creditado à nascente para facilitar sua busca em visitas posteriores e para balizar as medições de mobilidade. Além disso, uma série de fotografias (FIG. 11) foi tirada para ilustrar cada uma das nascentes e viabilizar sua interpretação em gabinete.

A vegetação local foi descrita em termos de porte e cobertura do dossel. Assim, diferenciou-se locais com predomínio de espécies lenhosas, sub-lenhosas ou herbáceas (IBGE, 1992). As plantas lenhosas correspondem a espécies que possuem o caule constituído de madeira, incluindo-se aí essencialmente as fanerófitas, xeromórfitas e alguns tipos de lianas. Já as sub-lenhosas tem caule do tipo haste e, quanto a forma de vida, são organismos caméfitos ou lianas. Por fim, as plantas herbáceas (FIG. 11a) constituem espécies hemicriptófitas, geófitas, terófitas, lianas ou xeromórfitas (IBGE, 1992). Houve ainda a preocupação de diferenciar em campo, nascentes que possuíam solo exposto em seu entorno, com vegetação ausente.

A geologia local foi caracterizada a partir da litologia dos afloramentos rochosos existentes (FIG. 11b) e da identificação de contatos estratigráficos que pudessem corresponder à descontinuidade na condutividade hidráulica. A posição dos afloramentos rochosos próximos às nascentes foi igualmente importante, uma vez que eles influenciam diretamente os fluxos subterrâneos rasos contribuindo para a exfiltração.

Entretanto, as características hidrogeomorfológicas das nascentes foram priorizadas. Primeiramente identificou-se o compartimento da vertente no qual a exfiltração ocorre: calha fluvial, baixa-vertente, média-vertente, cabeceira e topo (CHRISTOFOLETTI, 1981). Além disso, a partir de tradagem, foi medida a profundidade das coberturas superficiais¹ (FIG. 11c) nas proximidades das nascentes até um máximo de 50 cm.

¹ Para os fins deste trabalho, o termo “coberturas superficiais” refere-se ao conjunto de materiais geológicos que engloba coberturas eluviais, coluviais e aluviais, com ou sem influência pedogenética.

FIGURA 11 – Características das nascentes avaliadas em campo.



A) vegetação predominantemente herbácea nos arredores de nascente difusa; B) afloramento de quartzo localizado à jusante da exfiltração; C) nascente com coberturas superficiais profundas sobre local de exfiltração; D) nascente com fluxo concentrado onde se identifica um canal erosivo; E) morfologia de uma nascente em canal; F) exfiltração do tipo difusa.

Fonte: acervo do autor.

Descreveu-se, também, a existência ou não de um canal de drenagem que concentre a água exfiltrada (FIG. 11d). Esse parâmetro possibilita a compreensão do tipo de fluxo superficial originado: concentrado ou laminar. Nos casos em que o canal era pronunciado, foram realizadas as medições de sua profundidade (média da altura das margens) e largura.

A morfologia foi classificada de acordo com Felipe (2009). Assim, as nascentes podem ser em duto, olho, concavidade, cavidade, canal (FIG. 11e), afloramento ou intervenção antrópica. Nesse parâmetro, observa-se a feição do relevo mais evidente somente no local de exfiltração, optando-se, sempre, pela mais restrita espacialmente. O tipo de exfiltração também foi objeto

de apreciação. Assim, as nascentes foram classificadas em múltiplas, pontuais ou difusas (FIG. 11f).

Por fim, registros de antropogenia nas nascentes também foram verificados. Esse é um parâmetro fundamental para o enquadramento na tipologia proposta por Felipe (2009). Sendo assim, em casos de nascentes antropogênicas, buscou-se explicar as possíveis ações humanas que atuaram nesse processo.

A caracterização fisiográfica em campo foi complementada por dados secundários em escala regional. Para tanto, foram adquiridas bases cartográficas de geologia (CPRM), vegetação (IEF), topografia e hidrografia (IBGE). Adicionalmente, obtiveram-se imagens SRTM para elaboração de modelos tridimensionais do relevo e imagens de alta resolução do banco de dados ESRI (*basemap*). Foi utilizado o software ArcGIS 10.0 para o tratamento digital da informação espacial, tendo como resultado, uma série de mapas ilustrativos das áreas de estudo, dentre os quais se destacam mapas de localização das áreas de estudo em escala 1:250.000 e das nascentes em escala 1:25.000; mapas de unidades geológicas; mapas hipsométricos e modelos tridimensionais do relevo.

3.2.2. AVALIAÇÃO DA DINÂMICA HIDROLÓGICA

A dinâmica sazonal das nascentes foi interpretada a partir da medição dos seguintes parâmetros: mobilidade do local de exfiltração; vazão; umidade do solo nas imediações da nascente; profundidade do nível freático; e precipitação. Todos esses parâmetros foram medidos mensalmente, exceto a precipitação que foi lida diariamente e acumulada considerando a periodicidade dos trabalhos de campo.

A mobilidade das nascentes (também chamada na literatura de migração) é uma importante propriedade de adaptação desses sistemas à sazonalidade climática. Segundo Faria (1997), de acordo com a oscilação do nível hidrodinâmico dos aquíferos, algumas nascentes podem se movimentar na vertente acompanhando essa dinâmica da água subterrânea. Assim, as nascentes podem ser móveis ou fixas.

As nascentes móveis geralmente estão associadas a talwegues de canais erosivos, onde há a interceptação do nível hidrostático pela superfície topográfica. Há registros na literatura nacional de deslocamentos superiores a três quilômetros (FARIA, 1997). Por isso, a

mobilidade foi mensurada a partir da medição direta da distância entre o local de exfiltração no momento da visita e a estaca de localização das nascentes.

As estacas foram colocadas em atividades pré-monitoramento, durante o período de máximo armazenamento segundo o balanço hídrico regional. Desse modo, foram tomadas como ponto zero da migração. As situações em que as nascentes migraram rumo à base da vertente marcam deslocamentos negativos, por outro lado, nos casos de movimento contrário, o deslocamento registrado é positivo. As medições foram realizadas com trenas métricas de cinco ou vinte metros de extensão. Em um caso particular em que o deslocamento foi muito pronunciado e a medição em campo foi dificultada, a mobilidade foi calculada via cartografia digital a partir dos pontos coletados em receptor GPS. Nota-se que o deslocamento foi medido no canal de drenagem e não em linha reta.

A vazão é a principal variável hidrológica em estudos que visem retratar a dinâmica sazonal de hidrossistemas. De certa forma, o débito resume os demais processos do ciclo hidrológico. No caso de nascentes, ele possui íntima relação com a precipitação e os fluxos subterrâneos, sendo a referência para a determinação do tempo de retorno das águas meteóricas (TODD e MAYS, 2005).

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 sacolas plásticas, 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 a cinco 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. As vazões específicas não puderam ser calculadas devido à ausência de bases cartográficas em escala adequada para a delimitação das bacias de contribuição das nascentes e o cálculo de suas respectivas áreas.

Em algumas nascentes a vazão não pôde ser mensurada por limitações técnicas. Quando a velocidade do fluxo era muito baixa (seja pela baixa vazão ou baixa declividade) a água não podia ser coletada, pois gerava um refluxo na sacola que gerava erros de medição. Além disso, casos com exfiltração difusa que não apresentavam convergência dos fluxos nas proximidades das nascentes (ainda que com vazões acima do limite de mensuração) também não puderam ter suas vazões medidas. 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.

É essencial que a vazão seja medida o mais próximo possível do local de início da exfiltração. Isso ocorre devido à influência ou efluência do canal à jusante, o que mascara o resultado real da vazão. É muito comum que as vazões de nascentes sejam mensuradas mais a jusante do fluxo em local de maior acessibilidade, mas esse tipo de procedimento não é adequado. Além disso, é importante que em todas as visitas a vazão seja mensurada no mesmo ponto para possibilitar a comparação. Evidentemente, nos casos de nascentes móveis, esse procedimento não é possível.

No intuito de equacionar os parâmetros hidrológicos mensurados, foi realizado o acompanhamento da precipitação em cada uma das unidades de estudo. O Parque Nacional da Serra do Cipó possui uma estação meteorológica em sua sede administrativa, com pluviômetro do tipo “Ville de Paris”. As leituras referentes ao período de monitoramento, realizadas três vezes ao dia por técnicos do ICMBio, foram repassadas para serem utilizadas neste trabalho. Na ausência de uma estação meteorológica nas proximidades das nascentes estudadas em Lagoa Santa, optou-se pela instalação de um pluviômetro tipo “Ville de Paris”, respeitando os critérios técnicos indicados pelo INMET. Os dados foram recolhidos diariamente.

Em ambos os casos, os registros de pluviosidade foram acumulados para representar a periodicidade do monitoramento. Assim, somou-se o total de chuva diária do primeiro dia imediatamente após uma visita de campo até o último dia das atividades da campanha seguinte. Desse modo, os acumulados referidos no texto como mensais correspondem não exatamente à chuva do mês, mas a chuva do período entre as campanhas de campo.

3.3. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas são importantes ferramentas que auxiliam na interpretação qualitativa e quantitativa de fenômenos naturais, a partir de sua parametrização em variáveis que os descrevem. Nesse sentido, buscar respostas em meio a processos complexos demanda a utilização de métodos estatísticos reconhecidos.

O método da regressão linear foi utilizado para a avaliação da dinâmica hidrológica das nascentes, interpretando a influência dos eventos chuvosos na variação do débito das nascentes. A regressão é um procedimento matemático que relaciona o comportamento de uma variável y com outra x , estimando sua condicional em uma dada função $f(x)$ (WILLIAMS, 1984). Com isso, a partir da definição do valor esperado para uma variável, pode-se calcular o coeficiente de correlação r que indica o quanto o par ordenado está relacionado (WILLIAMS, 1984).

Optou-se pelo modelo de regressão linear de Pearson, uma vez que se desconhecia o comportamento inicial das variáveis. Porém, a partir da elaboração dos diagramas de dispersão, a linearidade da função pode ser posteriormente confirmada. Foram criados acumulados de precipitação de diversos intervalos e, para cada um, realizada a regressão em relação aos dados de vazão. Utilizou-se o software estatístico GraphPadPrism 5 em associação ao Microsoft Excel 2010.

Após a interpretação da regressão e dos coeficientes de correlação, foi realizado o teste de hipótese. Este procedimento estatístico permite confirmar ou refutar a partir de cálculos probabilísticos o pertencimento a uma população de determinados parâmetros reconhecidos em uma amostra (WILLIAMS, 1984). A hipótese em questão era se havia ou não a influência de determinado acumulado de chuva na curva de vazão, a despeito do coeficiente de correlação. Optou-se por um intervalo de confiança de 95% para dar maior rigor as análises.

Porém, a interpretação da tipologia das nascentes exige um método estatístico diferente uma vez que se baseia em variáveis de caráter qualitativo. Seguindo a proposta de Felipe (2009), foi utilizado o método *Grade of Membership* (GoM), desenvolvido por Manton et al. (1994). O GoM é um método de estimação estatística de máxima verossimilhança (CERQUEIRA, 2004; GARCIA *et al.*, 2004). Seu princípio fundamental é o agrupamento dos elementos analisados em um número específico de conjuntos. Por estar fundamentado na Teoria dos Conjuntos Nebulosos, ele avança em relação à análise de *cluster* ao permitir que um mesmo elemento seja inserido, simultaneamente, em diversos grupos (MANTON *et al.*, 1994). A função multinomial de máxima verossimilhança do método *Grade of Membership* é apresentada na Equação 1.

$$L(y) = \prod_i \prod_j \prod_l \left(\sum_{g_{ik}} \lambda_{kjl} \right) \quad (1)$$

A partir dessa função, a cada elemento analisado é atribuído um escore de pertencimento (g_{ik}) definido por um parâmetro de associação e que o relaciona a um determinado perfil (conjunto).

Os parâmetros de máxima verossimilhança garantem que os elementos com características próximas sejam agrupados nos mesmos perfis, porém, com distintos g_{ik} . Isso implica que qualquer elemento que possuir grau de pertinência superior a zero em relação a algum perfil, pertence (ao menos parcialmente) a este perfil (MANTON *et al.*, 1994).

Segundo Garcia *et al.* (2004, p. 4)

A técnica GoM estima, com base em um modelo de probabilidade multinomial, dois tipos de parâmetros: um de associação, g_{ik} , e outro de estrutura, λ_{kjl} , ou seja, os graus de pertinência (g) de cada elemento (i) a cada subconjunto, ou perfil, ou tipo (k); e as probabilidades de cada categoria (l) de cada variável (j) em cada perfil (k) que, por sua vez, define esse perfil.

Por ter sido desenvolvido recentemente, o GoM ainda não é de conhecimento geral no meio acadêmico. Suas primeiras aplicações foram no campo das ciências médicas, para auxiliar na definição de grupos de riscos a determinadas doenças (MANTON, 1994; CERQUEIRA, 2004). No Brasil, ele já tem sido utilizado com sucesso em estudos da área médica, mas também da economia, demografia e arquitetura (CERQUEIRA, 2004; GARCIA *et al.*, 2004). Porém, nas geociências, os primeiros usos conhecidos do GoM foram realizados por Felipe (2009), Felipe *et al.* (2009) e Felipe *et al.* (2013).

3.4. ANÁLISES HIDROGEOQUÍMICAS

“O estudo hidrogeoquímico tem por finalidade identificar e quantificar as principais propriedades e constituintes químicos das águas subterrâneas, procurando estabelecer uma relação com o meio físico” (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000, p. 81). No que tange aos objetivos desse estudo, as análises hidrogeoquímicas são procedimentos fundamentais na reconstrução da gênese de nascentes, uma vez que possibilitam a definição do aquífero de origem das águas.

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).

O Laboratório de Cromatografia Líquida do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear realizou ensaios de determinação da concentração de fluoreto, cloreto, brometo, nitrito, nitrato, sulfato, sódio, potássio e amônio nas amostras de água das nascentes. O método

utilizado foi a 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 HNO₃ 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. Duas campanhas sazonais foram realizadas: agosto de 2011 e fevereiro de 2012. A preparação das amostras para as análises de ânions por cromatografia foi similar à dos cátions, porém sem acidificação das mesmas.

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 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, sólidos totais dissolvidos e condutividade elétrica. O preparo das amostras envolveu a filtração (filtros de 0,45 µm) e armazenamento sob refrigeração em recipientes plásticos de 200 mL, porém, 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, não sendo possível separar as concentrações de cada um dos ânions.

A determinação da concentração de sílica nas amostras de água foi realizada pelo método de fotolorimetria no Fotolorímetro AT 100PB (Alfakit). Uma curva de calibração ($R^2 = 0,9996$) foi construída a partir da leitura da absorvância de soluções-padrão de SiO₂ 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.

A condutividade elétrica (EC) foi lida em condutivímetro de bancada, calibrado com soluções-padrão de 1.413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou 14 $\mu\text{S}/\text{cm}$, de acordo com a necessidade da alíquota. As amostras coletadas foram analisadas *in natura*, sem filtragem ou acidificação. A condutividade foi utilizada para interpretação do grau de mineralização das águas (GRANJEIRO *et al.*, 2007).

A literatura apresenta três principais métodos para a determinação dos sólidos totais dissolvidos (TDS). A análise gravimétrica representa o método imediato para definição da concentração do resíduo seco em função do volume de água. Este método é recomendado pelo “*Standard methods for the examination of water and wastewater*”.

Todavia, o método mais utilizado nas pesquisas nacionais é o cálculo de TDS em função da Condutividade Elétrica. Segundo trabalhos empíricos, verificou-se que há uma relação (Equação 2) direta entre esses dois parâmetros com fator de multiplicação variando entre 0,6 e 0,9 (ATEKWANA *et al.*, 2004), comumente sendo utilizado acriticamente o fator 0,7 (WALTON, 1989). Esse procedimento, porém, implica em uma série de imprecisões, já que o fator pode variar em função da constituição química das águas. Neste sentido, Sampaio *et al.* (2007) não identificaram relação linear entre a EC e TDS para águas residuárias.

$$\text{TDS} = k \cdot \text{EC} \quad (2)$$

Para pesquisas que se utilizam de análises hidrogeoquímicas, o TDS é comumente calculado em função da soma de cátions, ânions e coloides (Equação 3) (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000), conforme apresentam Salgado e Valadão (2003), Salgado *et al.* (2004), Sardinha *et al.* (2012), entre outros. Porém, é comum a existência de erros metodológicos para esse tipo de procedimento, uma vez que a concentração de determinados ânions é calculada em função dos cátions (por exemplo, os íons carbonato e bicarbonato são mensurados em função do cálcio), ou mesmo pela inexistência da determinação dos coloides.

$$\sum_{\text{cátions}} + \sum_{\text{ânions}} + \sum_{\text{coloides}} \approx \text{TDS} \quad (3)$$

Sendo assim, neste trabalho, a análise de sólidos totais dissolvidos (TDS) foi realizada pelo método da somatória de cátions e ânions. Ciente das eventuais imprecisões do método foi realizada a mensuração de íons secundários e traços além dos tradicionais íons prioritários retratados na literatura. Com isso há uma diminuição no risco de subestimação dos resultados. Ademais, os carbonatos foram corrigidos pela massa molecular para retirar a duplicidade da contabilização do cálcio. Portanto, com as devidas precauções metodológicas, acredita-se

que este método, replicado constantemente nos últimos anos, produzirá resultados profícuos para a interpretação hidrogeomorfológica das nascentes.

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 4 para o cálculo da perda geoquímica sazonal (instantânea). Posteriormente, a Equação 5 leva à perda geoquímica anual (total).

$$PG_{inst} = TDS_{inst} \cdot Q_{inst} \quad (4)$$

$$PG_{total} = (\sum(TDS_{inst})n) \cdot Q_m \cdot d \quad (5)$$

Em que 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)².

A interpretação gráfica dos dados hidrogeoquímicos foi realizada no software gratuito QualiGraf, desenvolvido pela FUNCEME. Foram utilizados os diagramas de Piper, Schoeller e Stiff como modelos analíticos.

O Diagrama de Piper é uma variação do Diagrama Triangular simples, uma composição de três gráficos (dois triangulares e um losangonal) que permite a representação das concentrações de ânions e cátions simultaneamente. Ele é composto por um gráfico triangular de cátions majoritários (Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+K^+); outro gráfico triangular de ânions majoritários (Cl^- , SO_4^{2-} e $CO_3^{2-}+HCO_3^-$); e um diagrama losangonal integrador que representa a soma de cátions e ânions. Ele é utilizado para definir distintos grupos de água em relação a sua composição química (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000).

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 principal vantagem deste diagrama é a possibilidade de alteração dos íons analisados, de acordo com as necessidades de cada trabalho, podendo-se aumentar ou diminuir o número

² Não foi utilizado o modelo de cálculo de desnudação geoquímica de Thomas (1994), pelo fato de não ser possível mensurar a área de contribuição das nascentes. Por este motivo, preferiu-se o termo “perda” ao “desnudação” neste trabalho, evitando confusões conceituais.

de parâmetros. A interpretação é feita a partir da sobreposição das linhas formadas por diferentes amostras, avaliando a proximidade entre elas (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000).

Por fim, o diagrama de Stiff representa a concentração de cátions (no eixo da direita) e ânions (no eixo da esquerda), em semirretas paralelas unidas em seus extremos para formar um polígono. A figura geométrica resultante indica a categoria hidrogeoquímica da água, possibilitando a comparação entre as amostras (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000).

Os limites de detecção associados a cada parâmetro hidrogeoquímico analisado são apresentados no QUADRO 2.

QUADRO 2
Limites de detecção e métodos de mensuração dos parâmetros hidrogeoquímicos analisados

Parâmetro	Limite de detecção	Unidade	Método	Parâmetro	Limite de detecção	Unidade	Método
Al ³⁺	0,2618	ppm	Espectometria	K ⁺	0,1	µg/mL	Cromatografia
Ba ²⁺	0,0549	ppm	Espectometria	Mg ²⁺	0,0338	ppm	Espectometria
Br	0,1	µg/mL	Cromatografia	Mn ²⁺	0,0316	ppm	Espectometria
Ca ²⁺	0,213	ppm	Espectometria	Na ⁺	0,1	µg/mL	Cromatografia
CaCO ₃	1,0	mg/L	Titulação	NH ₄ ⁺	0,1	µg/mL	Cromatografia
Cd ²⁺	0,0062	ppm	Espectometria	Ni ²⁺	0,1903	ppm	Espectometria
Cl ⁻	0,1	µg/mL	Cromatografia	NO ₂ ⁻	0,1	µg/mL	Cromatografia
CO ₃ ²⁻	0,0082	ppm	Espectometria	NO ₃ ⁻	0,1	µg/mL	Cromatografia
CO ₃ ²⁻ /HCO ₃ ⁻	0,6	mg/L	Titulação	Pb ²⁺	0,0138	ppm	Espectometria
Cr ³⁺	0,0404	ppm	Espectometria	SiO ₂	0,5	mg/L	Fotocolorimetria
Cu ⁺	0,0207	ppm	Espectometria	SO ₄ ⁻	0,1	µg/mL	Cromatografia
EC	1,0	µS/cm	Condutímetro	Ti ⁴⁺	0,0154	ppm	Espectometria
F ⁻	0,1	µg/mL	Cromatografia	Zn ⁴⁺	0,0098	ppm	Espectometria
Fe ³⁺	0,0179	ppm	Espectometria				

Fonte: dados laboratoriais

3.5. DATAÇÃO DAS ÁGUAS

O conhecimento do tempo de retorno da água à superfície após sua infiltração é uma condição fundamental para a avaliação da vulnerabilidade e gênese das nascentes. Além de ser uma ferramenta relevante na compreensão da dinâmica hidrológica subterrânea, a datação das águas modernas pelos métodos derivados das medições de trítio fornece importantes dados para estudos de contaminação e vulnerabilidade dos aquíferos (CHRISTENSON *et al.*, 2006; MORAN *et al.*, 2007). Poder afirmar a duração média do percurso da água em meio

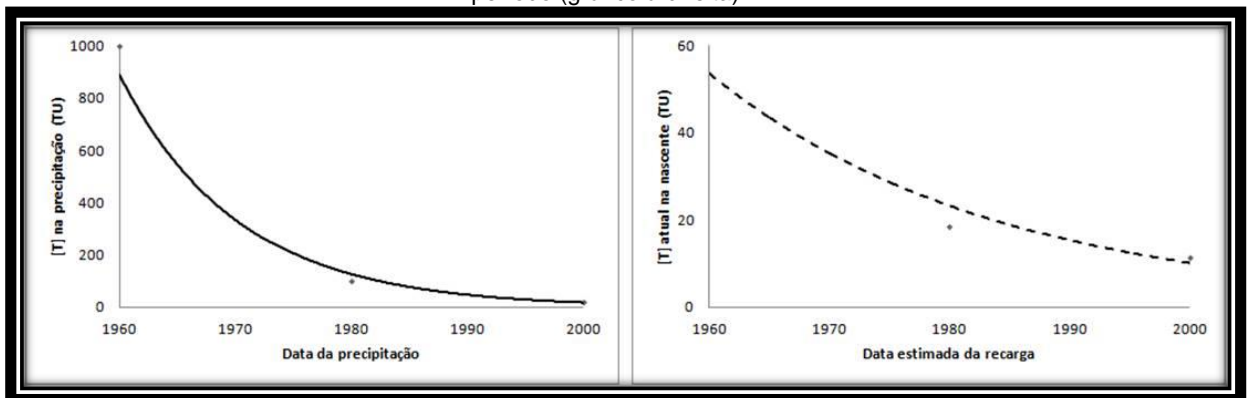
subterrâneo possibilita a previsão do tempo necessário para que uma intervenção humana afete quantitativamente a exfiltração.

Apesar do uso corriqueiro desse método para datação de águas subterrâneas, via amostragem de poços tubulares, são escassos os registros na literatura acadêmica nacional e internacional de sua aplicação para o estudo de nascentes. Para as nascentes, a datação indicará não somente o tempo que a água levou entre a infiltração e a exfiltração, mas também o grau de vulnerabilidade a impactos e a fonte das águas da nascente. Por exemplo, nascentes com período de recessão curto podem indicar extrema sensibilidade ambiental, vulnerável a desaparecer em pouco tempo ante os impactos promovidos em sua área de recarga.

A medição de trítio na água das nascentes possibilita uma datação relativa de sua idade aparente e foi a técnica utilizada neste trabalho. Tendo por base a taxa de decaimento do trítio e a sua concentração nas precipitações desde os testes atômicos das décadas de 1950 e 1960, o valor de trítio nas amostras atuais pode ser utilizado para modelagem do tempo de retorno das águas.

Dados da literatura mostram que a concentração de trítio na precipitação sobre as áreas de recarga do rio Danúbio (FIG. 12) caiu de 1.000 TU em 1965 (próximo ao máximo do “*bomb tritium*”), para aproximadamente 100 TU em 1980 e 10 TU no ano 2000 (ZIMNOCH *et al.*, 2003). Bedmar (1972) afirma que a máxima concentração de trítio foi registrada em 1952, com valores próximos a 10.000 TU. Segundo Varlam *et al.* (2003), a concentração de trítio na precipitação no ano de 2001 variou entre 10 e 30 TU ao redor do globo.

FIGURA 12 – Representação da concentração de trítio nas precipitações desde “*bomb tritium*” até o ano 2000 (gráfico à esquerda) e os valores calculados para as concentrações de trítio atuais das águas recarregadas neste período (gráfico à direita).



Fonte: adaptado de ZIMNOCH *et al.* (2003). Os dados ilustram o caso da bacia do rio Danúbio.

Segundo Szabo *et al.* (1996) e Shapiro *et al.* (1998), o trítio é formado somente nas altas camadas da atmosfera, a partir da radiação cósmica. Conforme a água infiltra no solo, cessa-se a formação de trítio e a radioatividade decai – meia-vida de 12,33 anos (HAHM e KIM, 2008). Assim, considerando a taxa de decaimento do trítio em hélio tritiogênico, sabe-se que águas com baixa concentração de trítio indicam longos períodos de recarga, porém, águas com altas concentrações indicam curto período. Assim, admite-se que em escala global concentrações abaixo de 5 TU indicam águas “pré-modernas” com idade aparente de, no mínimo, 50 anos. Por outro lado, concentrações maiores ou iguais a 5 TU indicam águas “modernas”, com menos de 50 anos de idade aparente (BEDMAR, 1973). Para casos brasileiros, a literatura tem apresentado valores mais baixos, sendo aceito que concentrações abaixo de 1,5 TU estão relacionadas a águas anteriores ao *bomb tritium* (MOURÃO, 2007).

As análises foram realizadas no Laboratório de Trítio Ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). As amostras para cada nascente foram coletadas em setembro de 2011 e março de 2012, filtradas em filtros de 0,45 µm e armazenadas em recipientes de 1,5 L sem a presença de ar. No Laboratório de Trítio Ambiental foram analisadas quantitativamente pela técnica de espectrometria de cintilação em meio líquido com enriquecimento eletrolítico, com limite de detecção de 0,5 TU. Os resultados foram expressos em unidades de trítio (TU) e interpretados comparativamente.

Para ampliar as possibilidades de interpretação dos resultados, foi calculada a concentração atual de trítio restante (residual) a partir dos dados da série histórica de trítio nas precipitações, segundo sua taxa natural de decaimento dada pela Equação 6; em que P é a concentração final de trítio, P_0 é a concentração inicial, λ é a constante de decaimento radioativo do trítio, e t é o tempo

$$P = P_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (6)$$

Com isso, criou-se uma curva-padrão de concentração de trítio nas nascentes em função do ano prioritário de recarga subterrânea. Assim, o valor de trítio encontrado atualmente identificado na curva-padrão indica o período preferencial de recarga. Por sua vez, essa data refere-se à idade aparente máxima da água (FIG. 12). Na ausência de uma série histórica para os locais estudados, utilizaram-se os dados de Mourão (2007) para modelagem do decaimento do trítio na precipitação. A idade aparente foi calculada pelo modelo de mistura homogênea (modelo de pistão), que se baseia na média aritmética do trítio residual nas precipitações desde o *bomb tritium*.

Porém, para que seja válida tal assertiva, três premissas são colocadas: i) a taxa de mistura da água é constante no tempo e no espaço; ii) a variação espacial da concentração de trítio nas precipitações entre as áreas de recarga é desprezível; iii) as taxas de recarga em cada nascente são constantes no tempo.

Esse artifício não cria a possibilidade de uma datação absoluta, uma vez que suas premissas só permitem análises comparativas, dentro de um mesmo contexto. Isto, porém, é um avanço em relação à mera utilização das concentrações de trítio e suas relações com as explosões atômicas, classificando as águas como “modernas” e “pré-modernas”, conforme propõem Christenson *et al.* (2006). Com isso, pode-se comparar no interior desta pesquisa a idade aparente das águas e como é a dinâmica dessas nascentes.

4. CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DAS ÁREAS DE ESTUDO

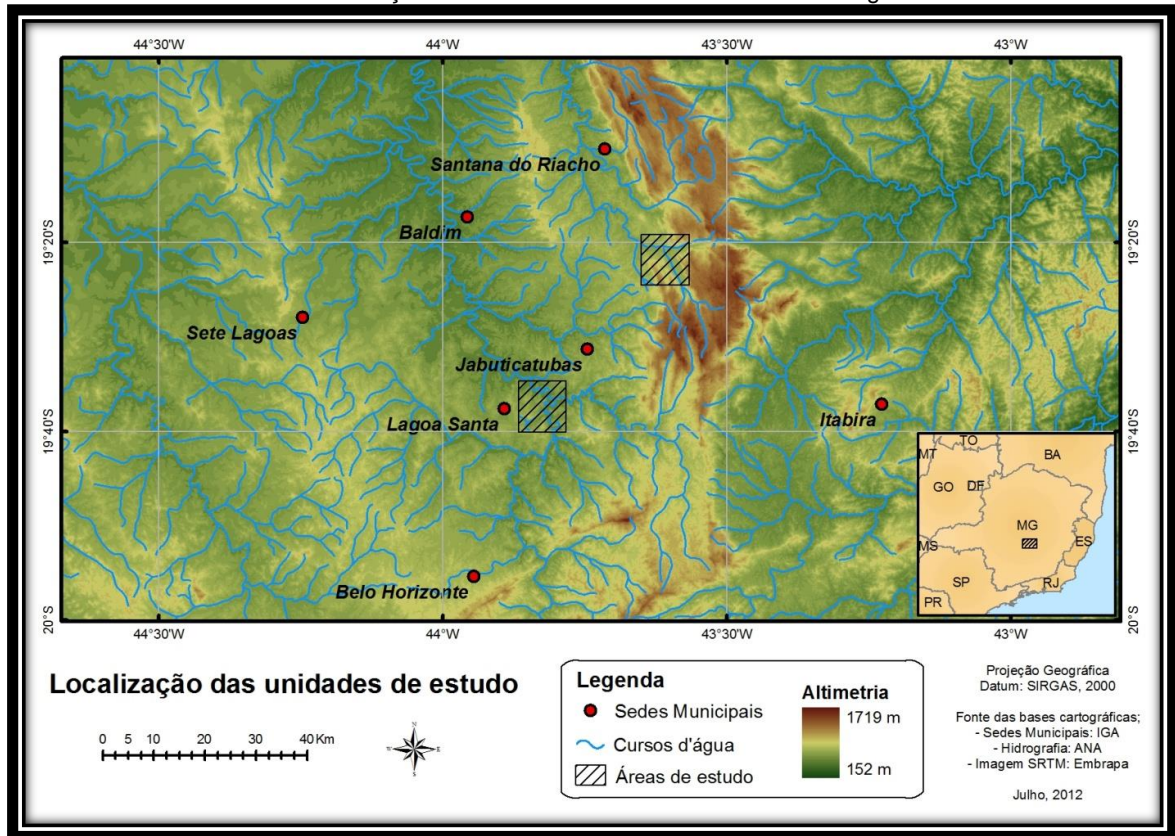
4.1. CONTEXTO REGIONAL

De acordo com os objetivos propostos no projeto, foi necessária a seleção de duas áreas de estudo que representassem a diversidade fisiográfica regional das nascentes. Isso possibilitou a ampliação dos resultados e tornou o trabalho mais abrangente. Porém, devido à logística proposta para atividades de campo, havia uma limitação de distância a ser percorrida para garantir a fluidez do monitoramento mensal. Com isso, buscaram-se unidades geológico-geomorfológicas consideravelmente distintas, porém, que estivessem geograficamente próximas.

Assim, foram realizados trabalhos de campo exploratórios que definiram como unidades de estudo a porção leste do município de Lagoa Santa e a borda oeste da Serra do Cipó (FIG. 13). Lagoa Santa localiza-se a aproximadamente 40 km ao norte de Belo Horizonte, possuindo um sítio marcado por relevo suave a suave ondulado e altitudes que variam entre 950 m e 650 m na área de estudo. Por sua vez, a Serra do Cipó configura-se como um conjunto de cristas da porção sul da Serra do Espinhaço Meridional (FIG. 14), distante aproximadamente 100 km da capital mineira.

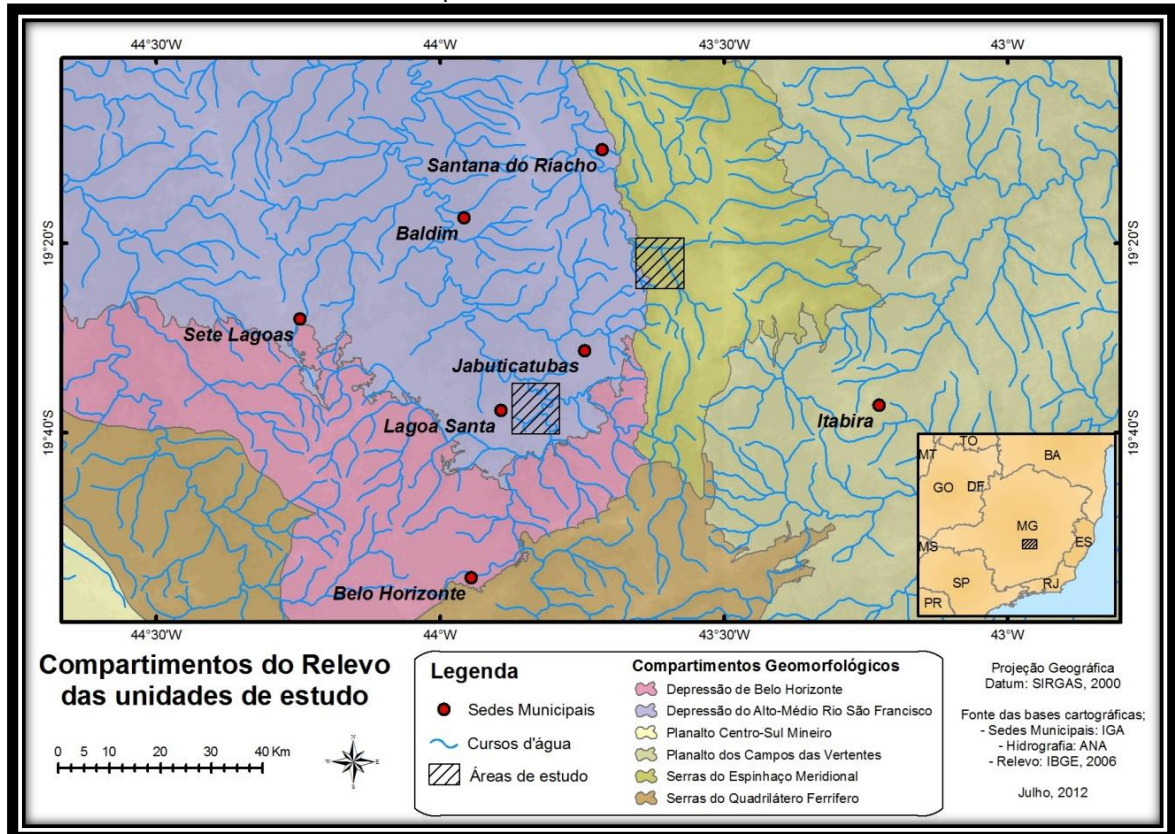
Ambas as localidades encontram-se na bacia do rio das Velhas, afluente do rio São Francisco. A área estudada em Lagoa Santa possui aproximadamente 16 km², abrangendo partes das bacias do córrego Antônio Pereira, do Córrego da Penha, do córrego Olhos d'água e de outros pequenos cursos d'água sem toponímia. Na Serra do Cipó, foi investigada uma área de aproximadamente 12 km² nas bacias do córrego da Serra, do rio Mascote e em pequenas bacias que drenam diretamente para o rio Cipó. Enquanto a drenagem da Serra do Cipó apresenta nítido condicionamento estrutural, marcado por anomalias morfométricas e padrão, muitas vezes, retangular, Lagoa Santa apresenta uma típica drenagem dendrítica em sua porção não-cárstica, evoluindo para um padrão multibasinal onde o relevo cárstico predomina.

FIGURA 13 – Localização das unidades de estudo sobre modelo digital de terreno.



Fonte: organizado pelo autor.

FIGURA 14 – Compartimentos do relevo das unidades de estudo.



Fonte: organizado pelo autor.

Lagoa Santa está inserida na borda norte da Depressão do Alto-Médio rio São Francisco (IBGE, 2006), embasada por rochas neoproterozóicas clasto-químicas do Grupo Bambuí (CPRM, 2004). Segundo IBGE (2006), a Depressão do Alto-Médio rio São Francisco (FIG. 14) configura-se como uma individualização da macrodepressão do rio São Francisco que se estende desde o contato com a Depressão de Belo Horizonte (ao sul), onde possui relevo mais ondulado que se suaviza gradativamente até a região cárstica de Sete Lagoas. A depressão alcança os vales dos principais afluentes do rio São Francisco até o contato com a Depressão Sertaneja, na porção central do estado da Bahia. No eixo central da depressão aparecem planícies aluviais do rio São Francisco.

A Serra do Cipó pode ser considerada uma das subunidades da Serra do Espinhaço Meridional (IBGE, 2006), que se estende até o norte do estado 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). Funciona como um divisor hidrográfico, em nível continental, das bacias do rio São Francisco e do rio Doce. Esta última drena a borda leste da Serra do Cipó em direção ao Planalto dos Campos das Vertentes (IBGE, 2006). A área de estudo está inserida na borda 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 dentre as unidades de estudo. Esse ponto é essencial para a proposta, uma vez que a dinâmica da água subterrânea é um condicionante fundamental das nascentes. O município de Lagoa Santa está inserido em dois domínios hidrogeológicos: Domínio Cárstico da Formação Sete Lagoas e Domínio Carbonático Não-cárstico do Grupo Bambuí (MAGALHÃES JR *et al.*, 2007). Ambos caracterizam-se por baixa permeabilidade primária e associação com espessos mantos de intemperismo que funcionam como aquíferos granulares. Porém, as regiões cársticas possuem maior capacidade de armazenamento subterrâneo em função da existência de cavidades. Por outro lado, o domínio não-cárstico depende de lineamentos estruturais para transmissão da água subterrânea (TODD e MAYS, 2005).

Hidrogeologicamente, a Serra do Cipó encontra-se no Domínio do Espinhaço. Seu sistema aquífero caracteriza-se por uma cobertura superficial arenosa pouco espessa, com alta condutividade hidráulica e baixa capacidade de armazenamento. Sotoposto, encontra-se um aquífero metassedimentar espesso e muito fraturado, o que promove uma elevada permeabilidade estrutural, que se configura em eficiente capacidade de armazenamento e transmissão subterrânea (MAGALHÃES JR *et al.*, 2007).

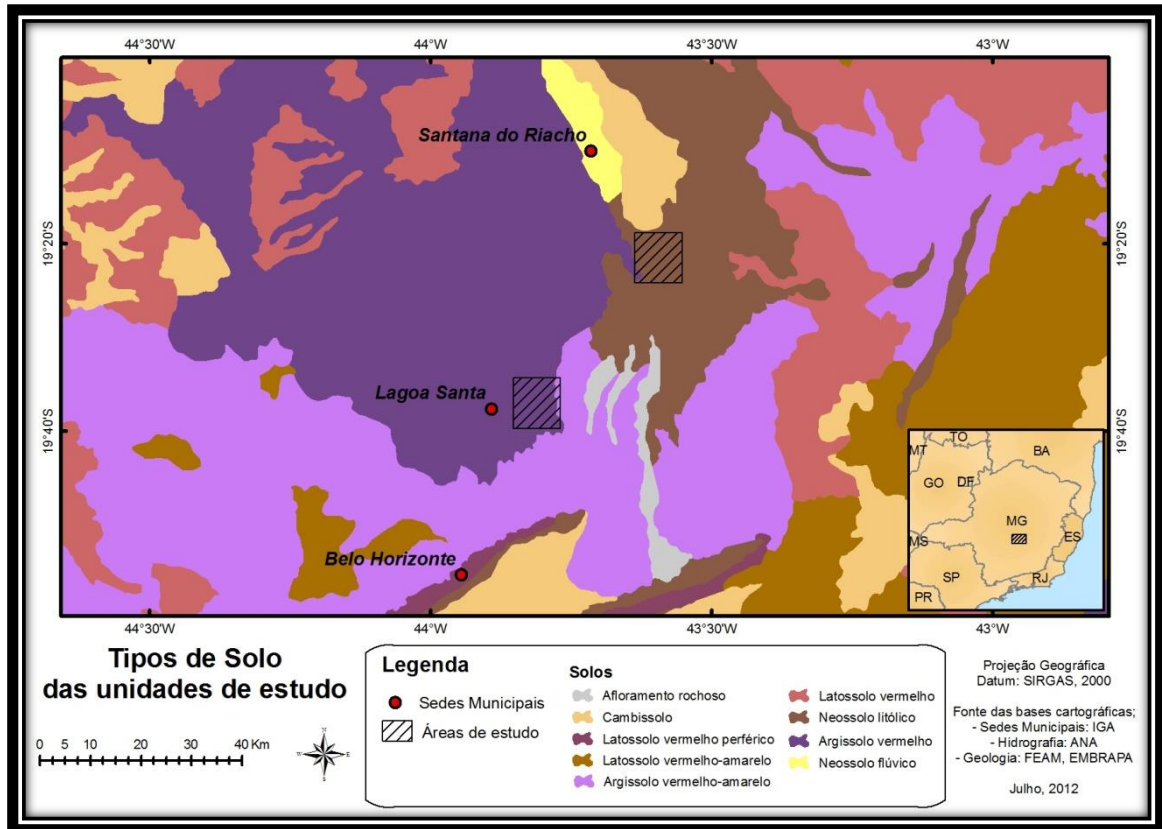
As classes de solo das áreas de estudo (FIG. 15) estão diretamente relacionadas aos compartimentos geológico-geomorfológicos nos quais se inserem (FIG. 14). Na Depressão, predominam solos evoluídos e espessos, caracterizados pela intensa pedogênese sobre as rochas cristalinas do complexo basal e clasto-químicas do Grupo Bambuí. Nesse sentido, predominam Argissolos Vermelhos com associação de Argissolos Vermelho-Amarelos (FEAM, s.d.). Localmente, identificam-se Latossolos em áreas mais suaves, Cambissolos nas médias-vertentes de maior declividade, característicos do rejuvenescimento erosivo de solos mais evoluídos, e Neossolos Flúvicos às margens do rio das Velhas. Além disso, em algumas nascentes difusas, o acúmulo de água configura pequenas áreas de hidromorfismo.

A vegetação de Lagoa Santa (FIG. 16) configura-se como uma área de tensão ecológica entre a Floresta Estacional Semidecidual e a Savana (IBGE, 2004). As formações florestais predominam nas baixas vertentes, normalmente associadas aos cursos fluviais. Na porção leste do município, onde se encontra a área de estudo, essas formações predominam na paisagem, sobretudo associadas às nascentes. As fitofisionomias campestres e savânicas ocorrem nas médias e altas vertentes, além da ocorrência de capoeiras (em distintos estágios sucessionais) em locais de reconstituição vegetacional após antigas intervenções. Todavia, uma parte considerável da área de estudo encontra-se recoberta por pastagens em substituição da vegetação original.

Na Serra do Cipó, a relação entre as classes de solo e a geologia é ainda mais nítida. Nas áreas recobertas por quartzitos e metadiamicritos, ocorrem Neossolos Litólicos, Neossolos Quartzarênicos e Espodossolos (FIG. 15). Essa característica se altera somente nas concavidades do relevo (como em cabeceiras de drenagem), em que foi possível a formação de solos um pouco mais espessos, configurando Cambissolos. Por outro lado, nas áreas da borda da Serra, no contato com a Depressão, onde ocorrem rochas carbonáticas, predominam Cambissolos (FEAM, s.d.). A textura dos solos na Serra do Cipó é predominantemente arenosa, salvo especificidades locais.

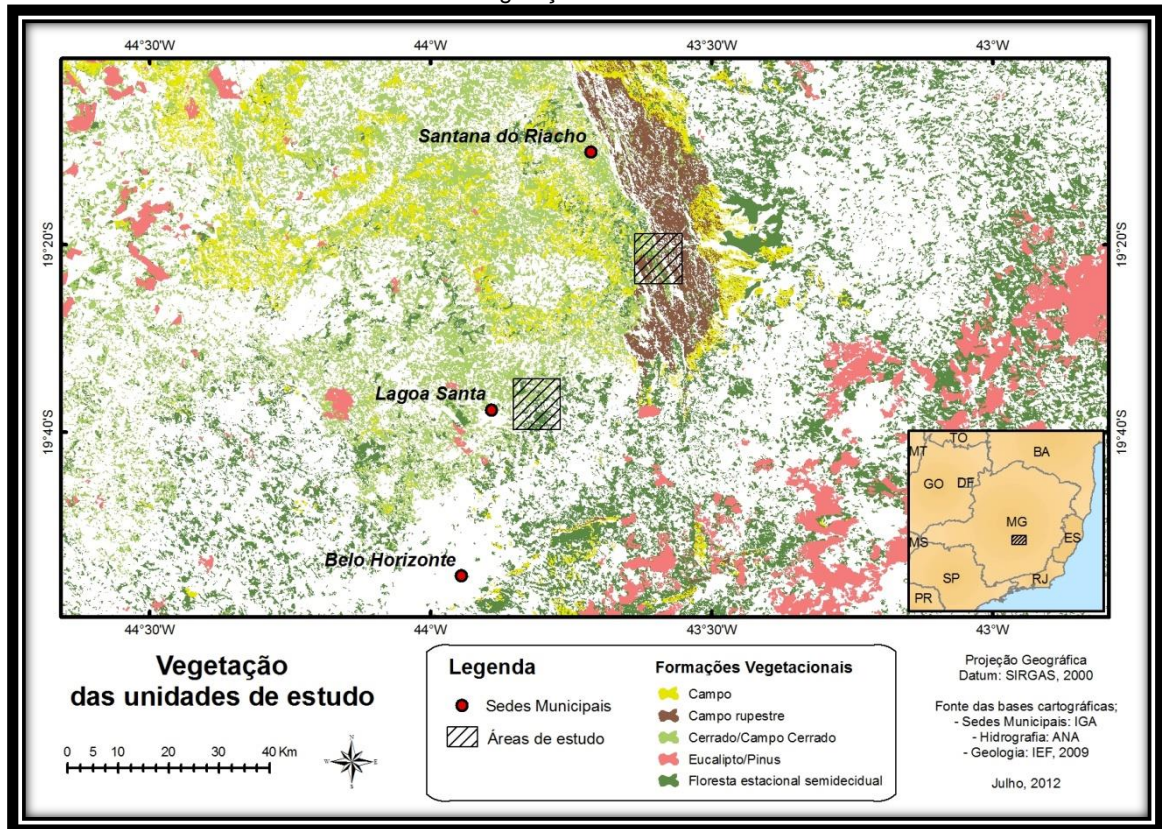
Sua vegetação acompanha essa variação pedológica (FIG. 16). Os compartimentos serranos de maior declividade apresentam solos rasos e afloramentos rochosos e, por conseguinte, são recobertos pela vegetação de campos rupestres. Nas baixas vertentes, onde os solos são mais espessos, ocorrem formações savânicas. Localmente, também são verificadas formações florestais em algumas cabeceiras de drenagem (IEF, 2009).

FIGURA 15 – Classes de solo das unidades de estudo.



Fonte: organizado pelo autor.

FIGURA 16 – Vegetação das unidades de estudo.



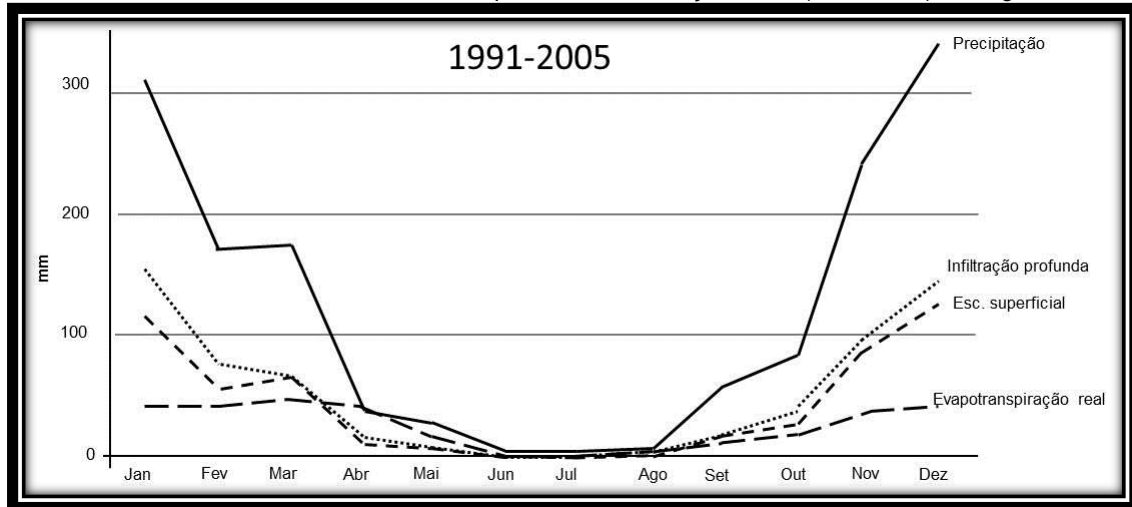
Fonte: organizado pelo autor.

A unidade de estudo na Serra do Cipó está inserida na Área de Proteção Ambiental do Morro da Pedreira e no Parque Nacional da Serra do Cipó. Esse cenário promove uma maior proteção ambiental às nascentes inseridas nessa área. Porém, há focos de capim braquiária competindo com as espécies campestres nativas, devido à anterior ocupação do parque por pastagens plantadas.

Segundo IBGE (2002), ambas as áreas de estudo encontram-se dentro da mesma região climática, classificada como sub-quentes semiúmida, com médias térmicas entre 15 e 18°C em pelo menos um mês e 4 a 5 meses secos. As curvas de precipitação e temperatura possuem comportamento similar, apresentando os maiores valores no trimestre janeiro-março e os menores entre julho-setembro. Sendo assim, o período de excedente hídrico se estende de novembro a março, passando a um período de déficit até setembro. A reposição hídrica ocorre entre novembro e dezembro, enquanto o período de retirada da água do aquífero é de abril a agosto. Sendo assim, a dupla estacionalidade climática é notável (IBGE, 2002).

Utilizando os dados do balanço hídrico de Lagoa Santa (FIG. 17) realizado por Camargo *et al.* (2011) para ambas as áreas (uma vez que não foi encontrado na literatura o balanço hídrico da Serra do Cipó), confirma-se a intensa queda nas taxas de precipitação a partir de março. Entretanto, a evapotranspiração real tende a acompanhar essa queda a partir de abril. Isso implica em taxas de escoamento superficial e infiltração profunda com comportamento similar: valores máximos em dezembro e janeiro e um período entre junho e agosto de taxas próximas a zero (CAMARGO *et al.*, 2005).

FIGURA 17 – Valores médios mensais dos componentes do balanço hídrico (1991-2005) de Lagoa Santa-MG.



Fonte: Adaptado de Camargo *et al.* (2005).

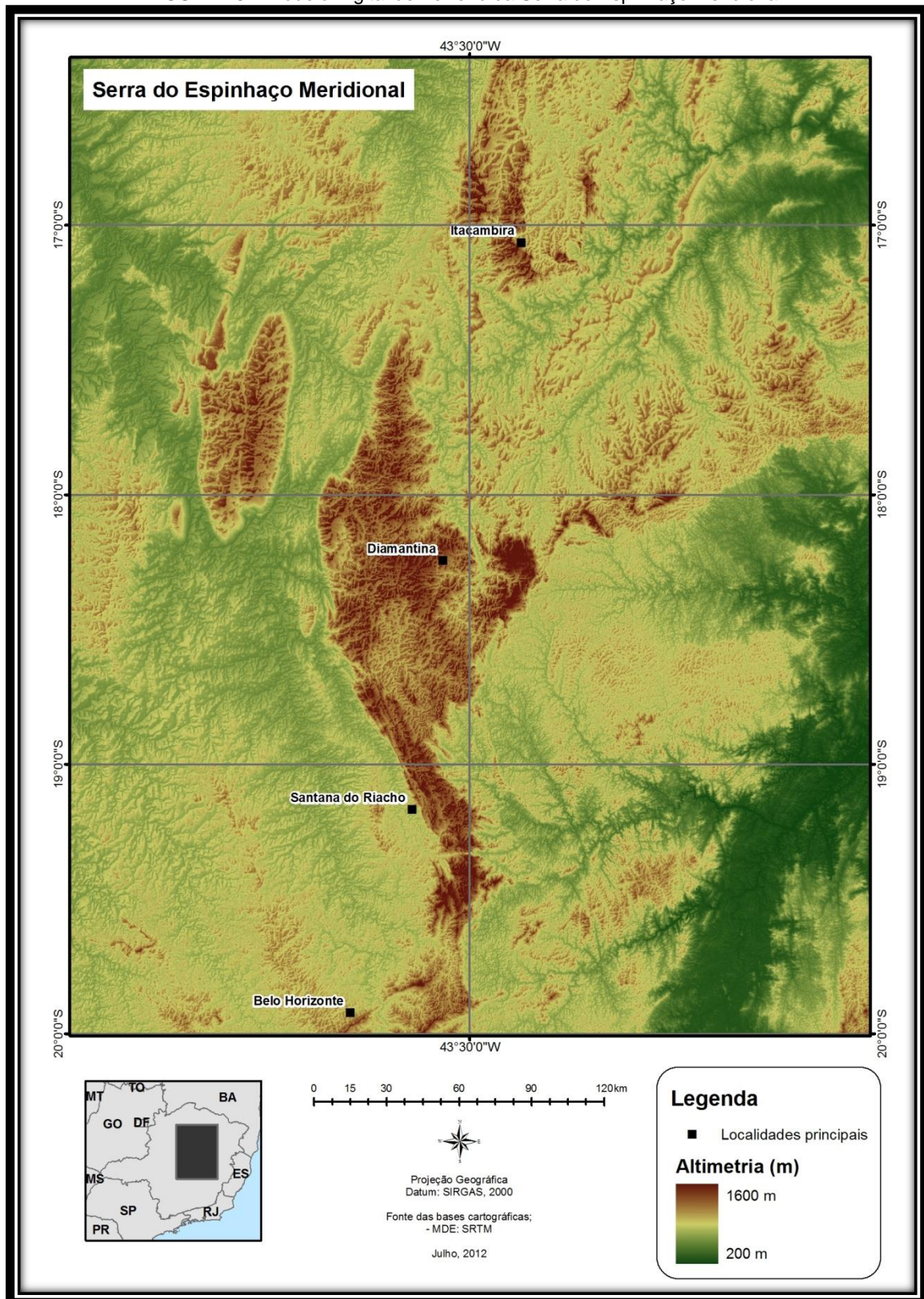
4.2. SERRA DO CIPÓ

A Serra do Cipó configura-se como uma sequência de cristas prioritariamente alinhadas NNW-SSE no extremo sul da Serra do Espinhaço. No entanto, sua evolução geomorfológica não pode ser dissociada desta megaunidade de escala continental.

A Serra do Espinhaço é um extenso maciço que recobre a porção oriental da Plataforma Sul-Americana. Estende-se desde o paralelo 20°S, nas proximidades da Serra do Cipó, até as o paralelo 12°S, já no estado da Bahia (IBGE, 2006). Alonga-se no sentido N-S, por mais de 800 km, configurando-se como o divisor de drenagem entre as bacias hidrográficas do Leste e a bacia do rio São Francisco (FIG. 18).

Sua constituição fisiográfica configura um planalto irregular de primeira magnitude no relevo brasileiro, esculpido pela ação fluvial em rochas metassedimentares meso e paleoproterozóicas, com uma importante distinção morfotectônica entre sua porção meridional e setentrional (SAADI, 1995). Com heranças distintas do Evento Brasileiro, pode-se diferenciar a Serra do Espinhaço Meridional (SdEM) como um cinturão móvel neoproterozóico que abrange toda a porção sul do maciço do Espinhaço até a divisa estadual entre Minas Gerais e Bahia (nas proximidades de Itacambira, paralelo 15°S), e a Serra do Espinhaço Setentrional (SdES), considerada um cráton neoproterozóico (IBGE, 2006).

FIGURA 18 – Modelo Digital de Terreno da Serra do Espinhaço Meridional.



Fonte: organizado pelo autor.

A SdEM, a qual possui em seu extremo sul a Serra do Cipó, é uma faixa orogênica pré-cambriana que limita a sudeste o cráton do São Francisco. Constitui-se na paisagem como uma sequência de cristas com destaque orográfico preferencialmente orientada na direção SSE-NNW em sua porção sul e SSW-NNE em sua porção norte (SAADI, 1995; ABREU, 1995; ALMEIDA-ABREU e RENGER, 2002).

Limita-se com a depressão intracratônica do São Francisco em sua borda oeste através de uma falha de empurrão E-W, típica de um *front* de cavalgamento (SAADI, 1995). Todavia, sua borda leste apresenta-se como uma sucessão de escarpas erosivas, condicionadas por falhamentos indiscriminados, que a individualiza ao sul do Planalto dos Campos das Vertentes e ao norte do Planalto dos rios Jequitinhonha/Mucuri (SAADI, 1995; IBGE, 2006).

As heranças estratigráficas, estruturais e litológicas atuais correspondem a uma complexa evolução geológico-geomorfológica da SdEM. Três grandes eventos tectônicos respondem pela gênese da Serra do Espinhaço: o rifteamento paleoproterozóico; o orógeno mesoproterozóico; reativações neoproterozóicas (SAADI, 1995).

O modelado atual da SdEM reflete um longo período de dissecação associado a desnudação geoquímica diferencial proporcionada pelas diferentes resistências impostas pelas litologias que sustentam o planalto (RESENDE *et al.*, 2010). Esse fator levou a formação de subunidades morfológicas (ora erosivas ora deposicionais) distintas, denotando um importante trabalho geomorfológico da drenagem fluvial. No extremo sul da asa meridional do “bumerangue” descrito por Saadi (1995) encontra-se individualizada do contexto geral da SdEM, a Serra do Cipó.

A Serra do Cipó configura-se como um maciço planáltico orientado vulgarmente no sentido NW-SE, esculpido sobre rochas metassedimentares meso e paleoproterozoicas. Possui uma extensão E-W média de 20 km, abrangendo 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.

Sua morfologia configura-se como uma sequência de cristas orientadas preferencialmente NNW-SSE 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 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.

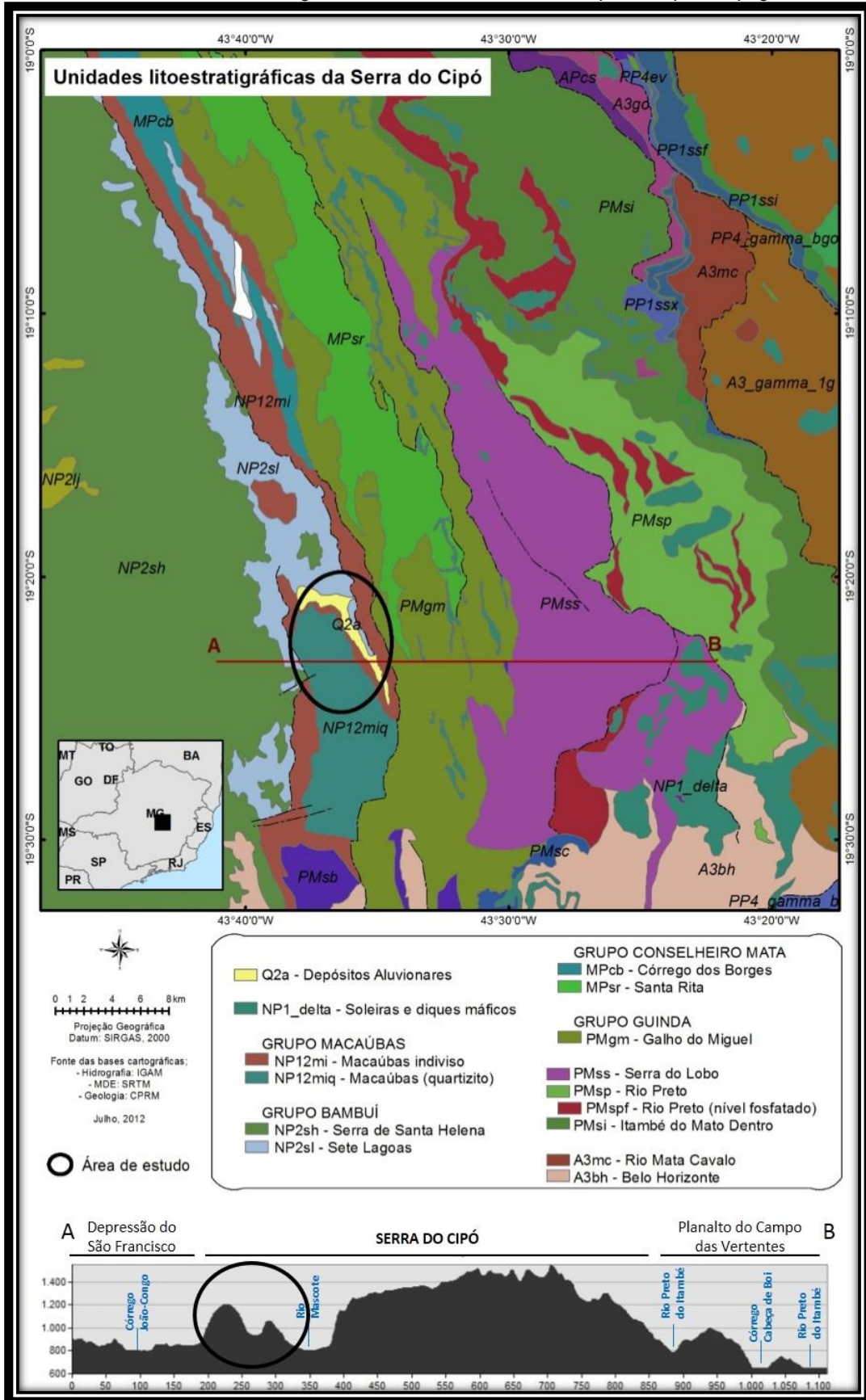
Na Serra do Cipó, King (1956) identificou registros das sucessivas superfícies de aplainamento que, em sua visão, fizeram parte da evolução do relevo do Brasil oriental. As cristas orientais que funcionam como teto orográfico corresponderiam aos remanescentes da superfície Gondwana, do cretáceo médio-inferior. Os patamares centrais do planalto, mais facilmente visualizáveis em sua porção sul, corresponderiam a heranças da superfície paleocênica-cretácea pós-Gondwana. A superfície Sul-americana (oligoceno-eoceno) estaria associada aos divisores das bacias locais, muitas vezes representados por alinhamentos de cristas. Já na borda cratônica, identificou também as superfícies Velhas (plioceno) e Paraguaçu (pleistoceno) (SAADI, 1995).

As coberturas superficiais compõem-se, basicamente, de material eluvial arenoso de pouca espessura. As coberturas elúvio-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 sul da Serra do Cipó, em contato com da Depressão do São Francisco, vislumbrando um evento deposicional típico da ocorrência de soleiras geomórficas.

A litoestratigrafia da Serra do Cipó apresenta sequências metassedimentares relacionadas à deposição Macaúbas e à bacia sedimentar do Espinhaço (FIG. 19), bordejada por clasto-químicas do Grupo Bambuí e granitoides arqueanos, ao oeste e leste, respectivamente. Toda a borda oeste da Serra é recoberta por depósitos glaciogênicos neoproterozóicos do Grupo Macaúbas (ALMEIDA-ABREU e RENGER, 2002). Nessa unidade litoestratigráfica predominam metadiamicritos, quartzitos e metassiltitos.

Em contato com os depósitos Macaúbas, ocorre o Grupo Conselheiro Mata, no topo da estratigrafia 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 (ABREU, 1995). Na Serra do Cipó, o Grupo Conselheiro Mata aparece nas formações Córrego dos Borges e Santa Rita. A primeira é constituída de metarenitos e localmente brechas/conglomerados quartzíticos; enquanto na segunda predominam metapelitos (ALMEIDA-ABREU e RENGER, 2002).

FIGURA 19 – Unidades litoestratigráficas sobre MDT na Serra do Cipó, com perfil topográfico E-W.



Fonte: organizado pelo autor.

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 (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).

Na borda leste da Serra, ocorrem as unidades paleoproterozóicas Serra do Lobo, caracterizada por metaconglomerados, e Rio Preto, predominantemente xistos. Indiscriminadamente, em diversas unidades litoestratigráficas, ocorrem intrusões magmáticas na forma de diques e soleiras de rochas máficas (CPRM, 2004).

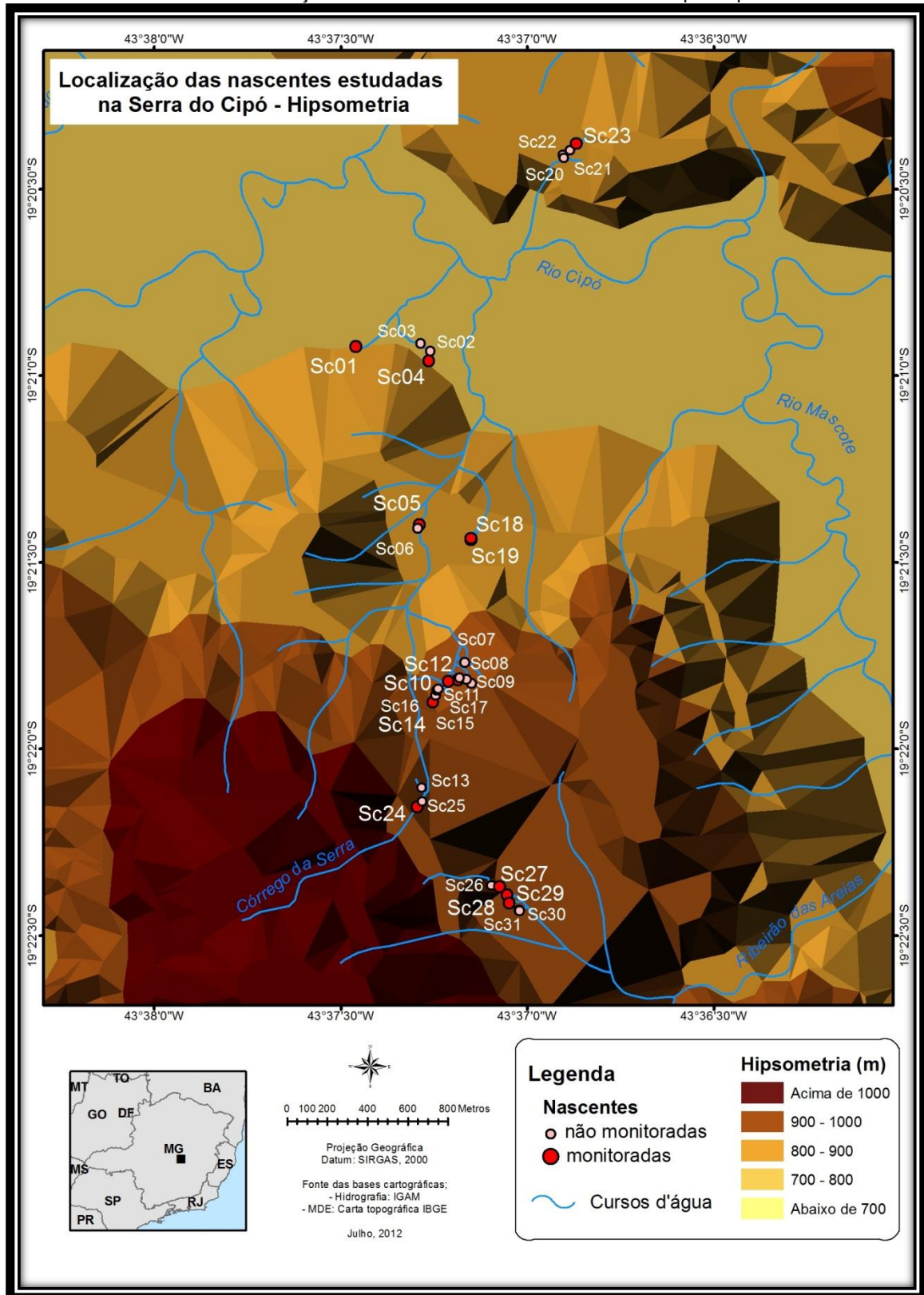
A configuração morfológica da Serra do Cipó responde a essas variações litológicas. Assim, predominam vertentes com declividade média a alta, topos em crista e patamares indiscriminados. As altitudes variam entre aproximadamente 800 metros na calha do rio Cipó, até valores superiores a 1600 metros no divisor regional entre as bacias do São Francisco e Doce.

A ocorrência de grandes estruturas geológicas condiciona a drenagem fluvial. Os cursos principais (rio Bocaina e rio do Peixe) correm em um cânion esculpido em uma falha transcorrente E-W (SAADI, 1995). As drenagens secundárias possuem preferencialmente a direção das falhas de cavalgamento (NNW-SSE) que condiciona os interflúvios. Diversas anomalias de drenagem são visíveis, como cotovelos e mudanças bruscas de direções, denotando intenso processo de captura fluvial.

A área de estudo do trabalho (FIG. 20), corresponde a parte da borda 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 (FIG. 20). 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.

FIGURA 20 – Localização das nascentes estudadas na Serra do Cipó - hipsimetria.



Fonte: organizado pelo autor.

Os cursos d'água correm em leito rochoso e apresentam poucos depósitos aluviais, exceção feita à extensa planície do rio Cipó, após a confluência do rio Mascote e Bocaina. De um modo geral, os divisores de drenagem ocorrem na forma de crista, sustentados por litologias quartzíticas. Os canais de drenagem comumente se iniciam na forma de ravinas e/ou sulcos erosivos, mas em casos específicos (como no afluente do ribeirão das Areias e no afluente direto da margem direita do rio Cipó), ocorrem cabeceiras de drenagem típicas. A tipologia de canal fluvial mais corriqueira é retilínea, típica de rios de regiões montanhosas; os meandramentos ficam restritos ao baixo curso do rio Mascote e ao rio Cipó.

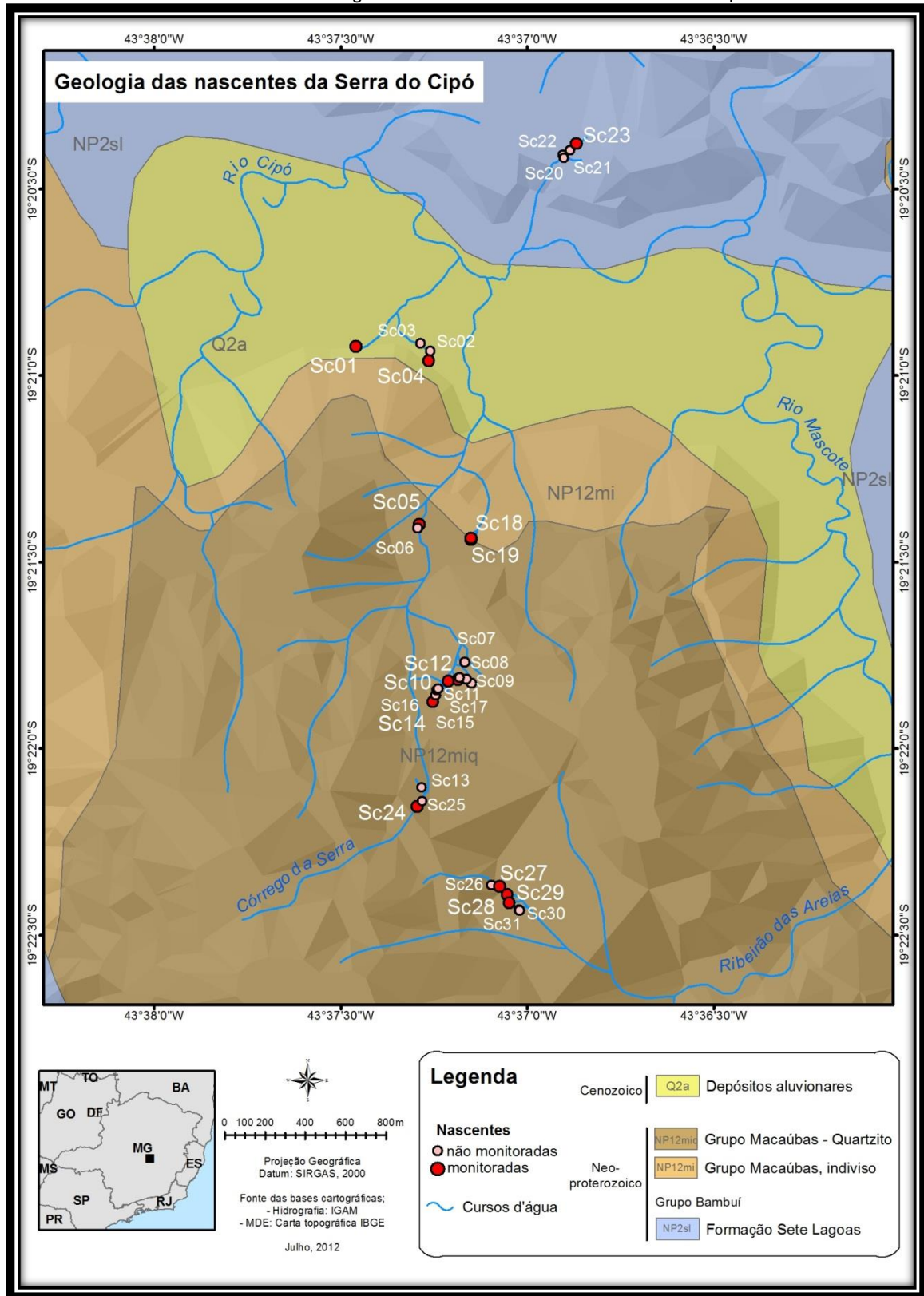
Há um nítido controle estrutural da drenagem, que pode ser verificado pela geometria da rede de canais. O ribeirão das Areias e o rio Mascote possuem direção SSE-NNW, bem como o único afluente da margem direita do córrego da Serra. A drenagem afluente, por sua vez, é preferencialmente perpendicular à drenagem principal, alinhada a WSW-ENE.

Por localizar-se na borda oeste da Serra do Cipó, a unidade litoestratigráfica predominante na área de estudo é o Grupo Macaúbas (FIG. 21), com rochas de elevada resistência aos processos intempéricos e desnudacionais. Os quartzitos recobrem toda a porção mais elevada das bacias do córrego da Serra e ribeirão das Areias; já na baixa vertente, ocorrem metadiamicritos.

A porção norte da área de estudo, na margem direita do rio Cipó, é embasada pela Formação Sete Lagoas do Grupo Bambuí. Nessa área, os litotipos preferenciais são metapelíticos, apresentando calcários e dolomitos com distintos graus de pureza. Devido à proximidade com a faixa de dobramento, essas rochas apresentam diferenciados graus de metamorfismo.

Complementa a descrição da geologia local, a ocorrência de coberturas quaternárias aluviais, associadas às planícies dos rios Cipó, Mascote e Bocaina. Sotoposto a esses sedimentos ocorre o contato estratigráfico entre o Grupo Macaúbas e o Grupo Bambuí.

FIGURA 21 – Geologia das nascentes estudadas na Serra do Cipó.



Fonte: organizado pelo autor.

4.3. LAGOA SANTA

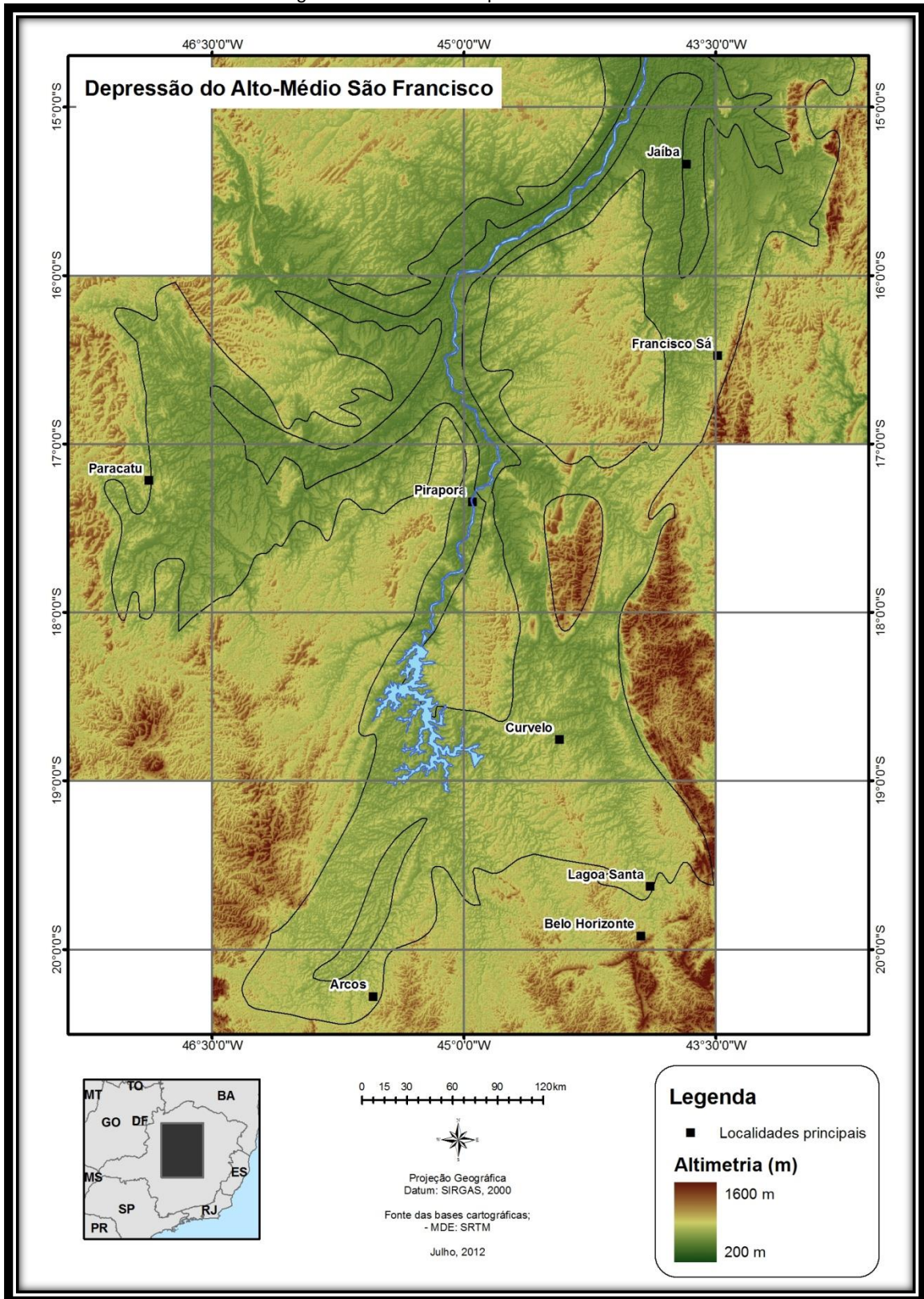
O município de Lagoa Santa se insere na porção sudeste da Depressão do Alto-Médio São Francisco (FIG. 22), que abrange grande parte do Brasil central, desde a Depressão de Belo Horizonte, ao norte do Quadrilátero Ferrífero, até a Depressão Sertaneja, já próximo ao contato noroeste da Serra do Espinhaço Setentrional (IBGE, 2006). O eixo principal da depressão coincide com a calha do rio São Francisco em direção vulgarmente N-S, abrindo-se ortogonalmente nos vales dos principais afluentes deste rio.

Em toda sua extensão, relevos orograficamente mais elevados recortam a depressão formando patamares residuais na forma de alinhamentos serranos em terrenos cristalinos e chapadas em coberturas sedimentares fanerozóicas. Na margem esquerda do rio São Francisco, essas elevações ocorrem como invaginações que configuram interflúvios da drenagem afluente, como a Serra Geral do Rio Preto, a Serra dos Tropeiros e a Serra do Ramalho. Porém, em sua margem direita, as elevações formam relevos residuais isolados, que também funcionam como divisores da drenagem afluente, como a Serra do Repartimento, a Serra da Tiririca, a Serra dos Fonseca e a Serra do Cabral, esta última, um compartimento isolado da Serra do Espinhaço (FIG. 22).

O contato com as unidades deprimidas ao norte e ao sul ocorre de forma gradual, marcado por variações litológicas significativas; porém, ocorrem escarpas erosivas na transição para os patamares e chapadas em sua borda ocidental. Sua borda oriental é determinada pela Serra do Espinhaço, na forma de escarpas erosivas na sua porção setentrional e de escarpas de falha na sua porção meridional (IBGE, 2006).

As altitudes são baixas variando de aproximadamente 700 m próximo à cidade de Arcos, no extremo sul da depressão, a 400 m ao norte de Jaíba, formando uma rampa irregular e suave com mais de 700 km de extensão. Suas bordas são mais elevadas, devido ao contato com as unidades de relevo que a circunda.

FIGURA 22 – Modelo Digital de Terreno da Depressão do Alto-Médio Rio São Francisco



Fonte: organizado pelo autor.

Em termos morfotectônicos, a Depressão do Alto-Médio São Francisco está inserida na porção central do Cráton do São Francisco. Segundo Alkimim (2004), o que define uma área cratônica é a presença de antigas e espessas raízes mantélicas e não apenas uma longa estabilidade tectônica resultante da não ocorrência de grandes deformações recentes (fanerozóico). Isso implica que essas unidades configuram grandes baixos continentais, apesar de isostaticamente positivos (ALKIMIM, 2004).

Delimitado pela orogênese brasileira (~600 Ma), o Cráton do São Francisco limita-se a sul e oeste pela faixa Brasília, a noroeste pela faixa Rio Preto e a leste pela faixa Araçuaí (TROMPETTE *et al.*, 1992). Porém, seu prolongamento nordeste em direção a atual costa atlântica é motivo de discussão. O prolongamento da Serra do Espinhaço no interior do cráton pela Província Paramirim é considerado como registro de um evento Brasileiro por estudos recentes. Segundo Trompette *et al.* (1992), as faixas Sergipe e Araçuaí foram unidas, promovendo a separação entre o cráton do São Francisco e o do Congo.

O Cráton do São Francisco é constituído estratigraficamente por três grandes compartimentos: i) o embasamento arqueano gnáissico-migmatítico, aflorante na Depressão de Belo Horizonte, extremo sul do cráton; ii) o Supergrupo Espinhaço, que ocorre na borda oriental, inclusive na Serra do Cabral; iii) o Supergrupo São Francisco, que recobre a maior parte do cráton, sendo aflorante em seu eixo central (UHLEIN *et al.*, 1995). A Depressão do Alto-Médio São Francisco coincide com a área de ocorrência do Supergrupo São Francisco, mais especificamente, do Grupo Bambuí.

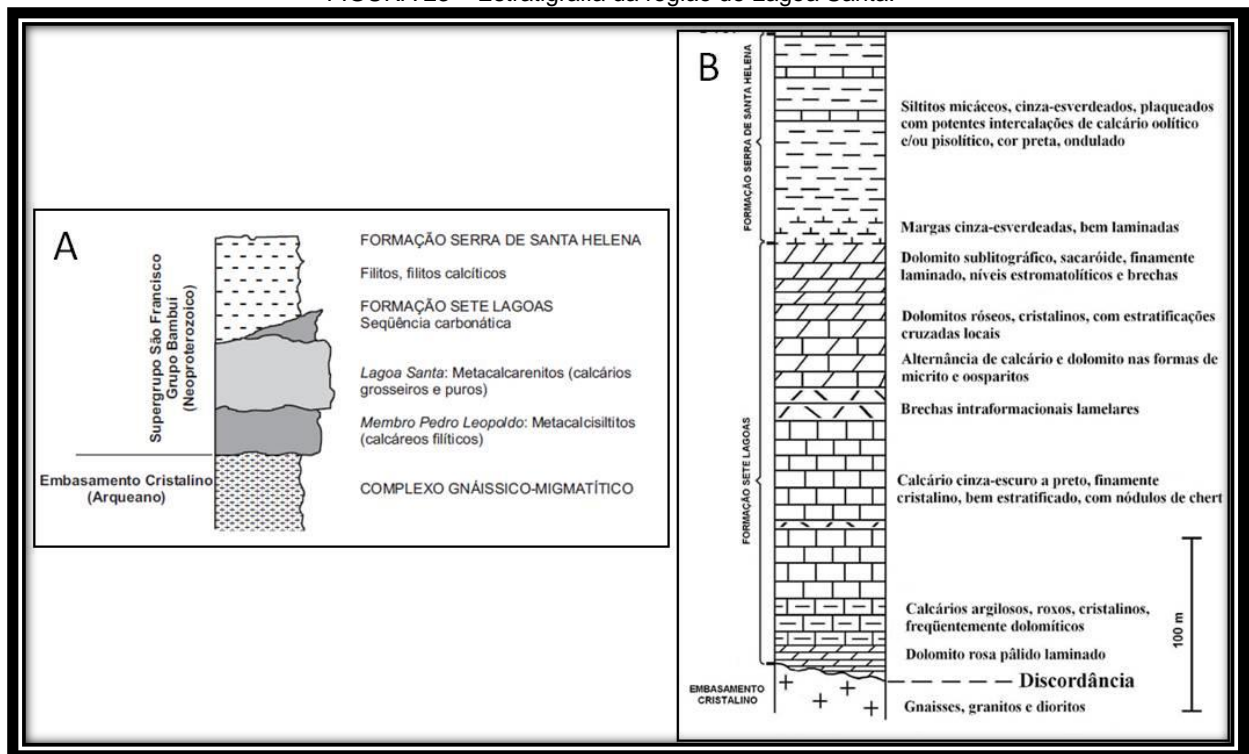
O Supergrupo São Francisco apresenta rochas sedimentares neoproterozoicas que sofreram anquimetamorfismo durante a estruturação da cadeia do Espinhaço, com aumento progressivo da influência tectônica (dobras) para leste (UHLEIN *et al.*, 1995). Constitui-se a partir de uma bacia sedimentar do tipo de margem passiva, sobreposta à bacia do Espinhaço, no neoproterozoico (SILVA, 1998).

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). Iglesias e Uhlein (2009) descrevem dois tipos de ambientes deposicionais principais no Grupo Bambuí. O primeiro relaciona-se a contextos marinhos correspondendo aos carbonatos da Formação Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré, às rochas pelito-carbonáticas da Formação Serra de Santa Helena e aos pelitos da Formação Serra da Saudade. O segundo (sequência de topo) é marinho-continental, constituindo a Formação Três Marias, predominantemente psamítica (IGLESIAS e UHLEIN, 2009).

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 (FIG. 23 e 24). 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)”.

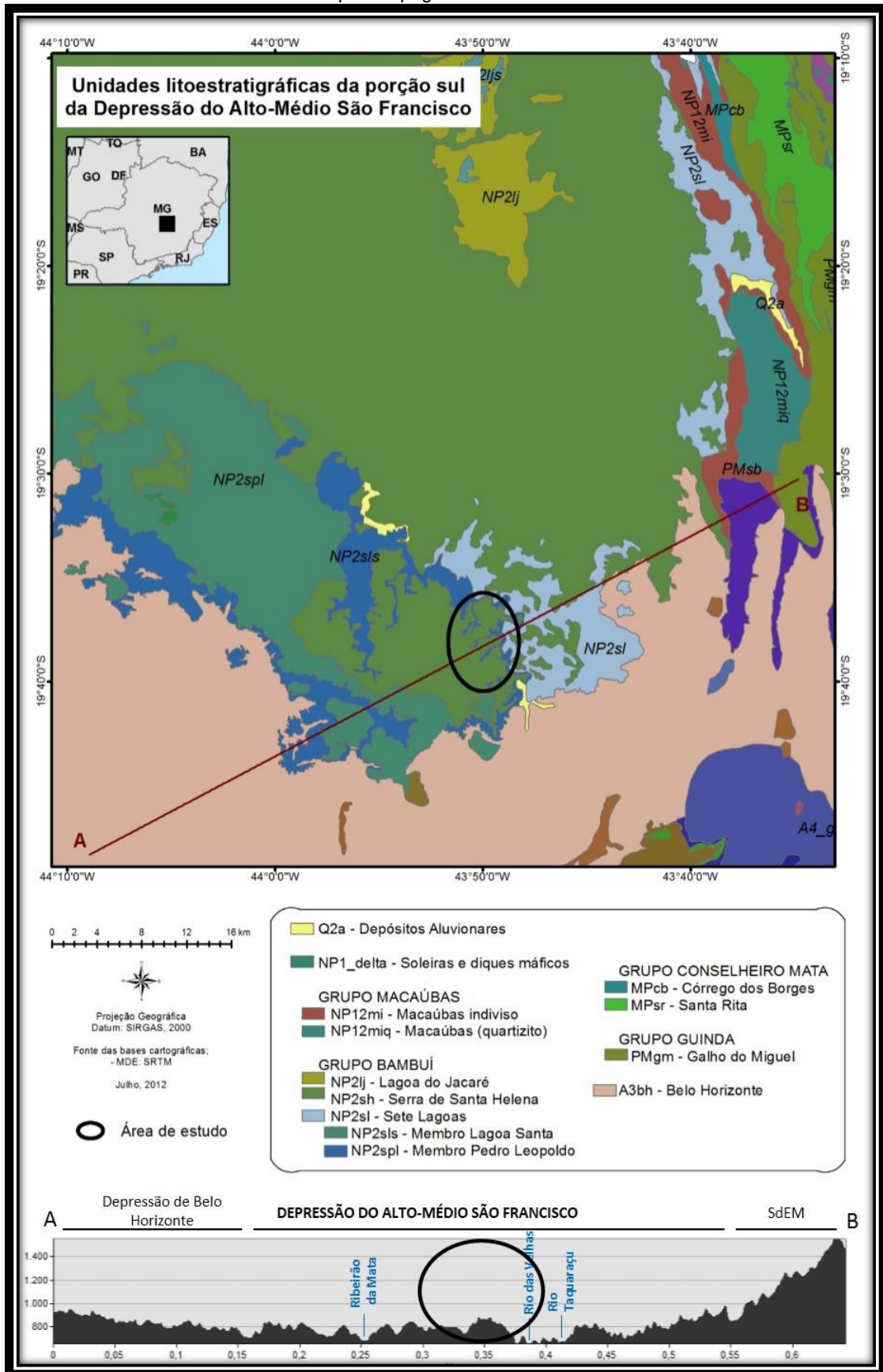
Iglesias e Uhlein (2009) afirmam que a Formação Serra de Santa Helena representa o afogamento gradual da plataforma carbonática da Formação Sete Lagoas com uma deposição típica de ambiente marinho plataformar. Constitui-se prioritariamente de pelitos (metapelitos), representados por metassiltitos e metargilitos com estratificação plano-paralela, por vezes, calcíticos (SHINZATO, 1998). É a unidade de mais ampla extensão na área de estudo, perfazendo as porções mais elevadas do relevo local, com uma espessura máxima de 135 m (IGLESIAS e UHLEIN, 2009). Ao norte, a Formação Serra de Santa Helena abrange uma vasta área contínua, que alcança a divisa com o estado da Bahia, por vezes recoberta pela Formação Lagoa do Jacaré ou sedimentos fanerozóicos.

FIGURA 23 – Estratigrafia da região de Lagoa Santa.



A: unidades geológicas básicas segundo Berbert-Born (2002); B: litofácies identificadas por Iglesias e Uhlein (2009). Fonte: Uhlein, 2009 e Berbert-Born, 2002.

FIGURA 24 – Unidades litoestratigráficas sobre MDT na porção sul da Depressão do Alto-Médio São Francisco, com perfil topográfico ESSE-WNW.



Fonte: organizado pelo autor.

Do topo para a base, a formação 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).

A Formação Sete Lagoas 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 do Membro Pedro Leopoldo. Predominam calcissiltitos e calcilitos finamente laminados, com teor de carbonatos inferior a 90% (SHINZATO, 1998; BERBERT-BORN, 2002).

Em contato gradacional ou até indefinido, ocorrem sobre o Membro Pedro Leopoldo pacotes de até 200 m de calcarenitos muito homogêneos do Membro Lagoa Santa. Os calcários dessa unidade possuem reconhecido grau de pureza, com concentração de carbonato de cálcio superior a 94%. Por esse motivo, esta é a unidade mais sujeita à carstificação (BERBERT-BORN, 2002).

As litologias da Formação Sete Lagoas apresentam anquimetamorfismo. Os calcários impuros da unidade basal apresentam estrutura associada a uma tectônica dúctil. Já os calcarenitos homogêneos do Membro Lagoa Santa apresentam estruturas herdadas de uma tectônica rúptil, com fraturamentos de grande influência na morfologia atual (BERBERT-BORN, 2002). Além disso, espessas coberturas elúvio-coluviais, com profundidades que podem atingir 80 m, recobrem indiscriminadamente a superfície.

O relevo atual reflete diretamente a estratigrafia do Grupo Bambuí. Apresenta um comportamento regional similar, denotando uma depressão periférica à Serra do Cipó, em contato gradual com a depressão adjacente de Belo Horizonte, como se observa no perfil topográfico da FIG. 24. Porém, sub-regionalmente, a carstificação é um fator preponderante na compartimentação geomorfológica. Destacam-se, nessa escala, *planaltos cársticos* com topografia extremamente irregular, *superfícies cársticas encobertas* com carstificação em profundidade, *depressões cársticas*, entendidas como *poljés* cobertos por mantos de intemperismo argilosos, além de superfícies não-cársticas irrestritas (AULER, 1994).

De uma forma geral, os terrenos mais elevados representados por topos residuais ou interflúvios secundários estão embasados 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 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.

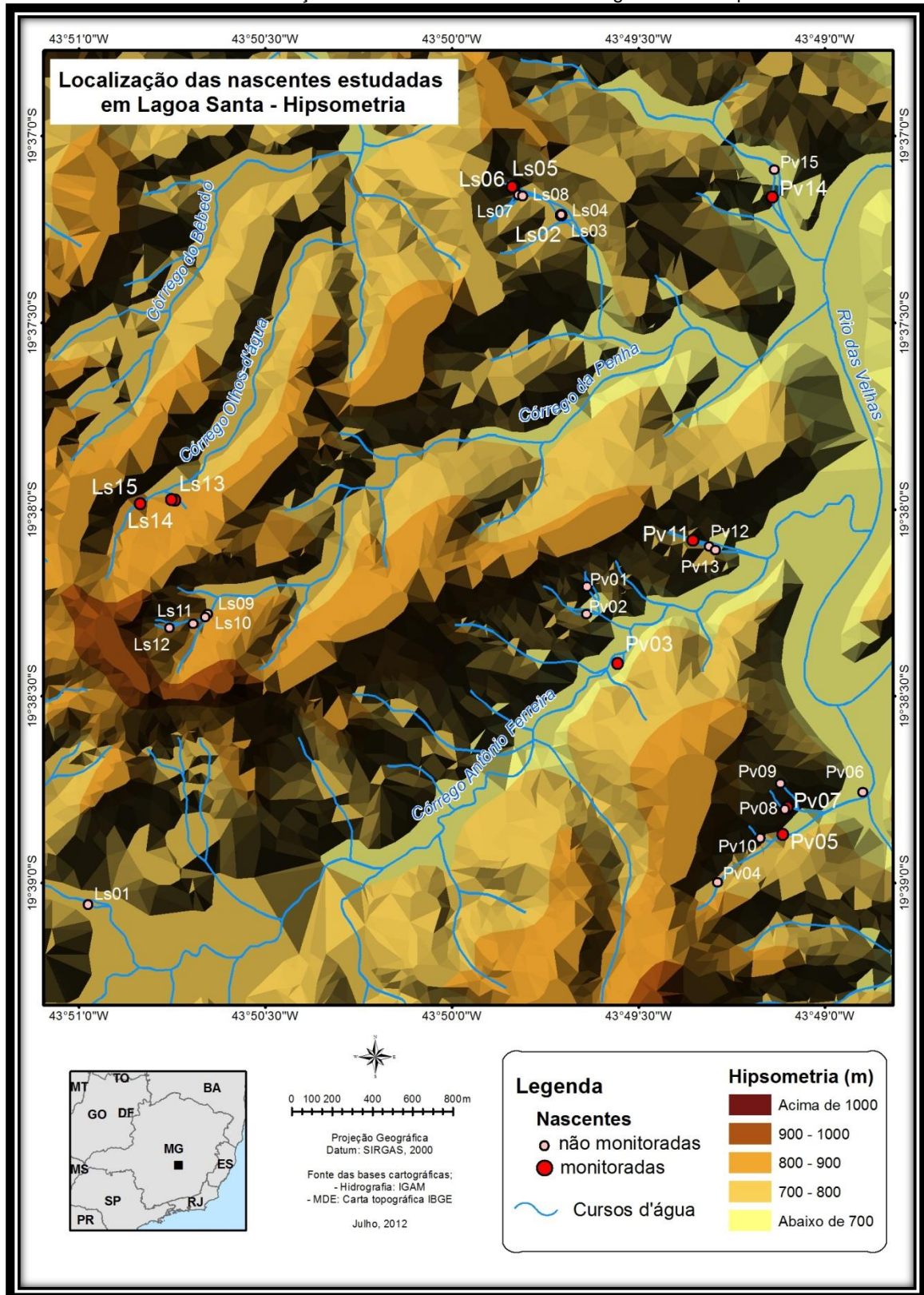
O quadrante definido como área de estudo em Lagoa Santa (4,1 km x 3,8 km) localiza-se no extremo oeste do município, nas proximidades do rio das Velhas. Possui uma morfologia típica de fundo de depressão, com relevo suave-ondulado entrecortado por uma drenagem dendrítica individualizando colinas e morros com topos arredondados (FIG. 25). A proximidade com o nível de base regional (rio das Velhas) promove bacias de configuração alongada, normalmente de segunda ou terceira ordem. Os afluentes diretos do rio das Velhas são perenes, porém, a drenagem tributária é majoritariamente temporária e, por vezes, efêmera, ocorrendo em ravinas e sulcos erosivos.

A altitude é majoritariamente baixa, superando os 900 m apenas nas elevações mais acentuadas, estando, regularmente, abaixo da cota de 800 m. A dissecação fluvial é nítida, com perfis longitudinais acentuados, promovendo vertentes que podem possuir elevado grau de inclinação em rampas retilíneas. Todavia, a declividade média é baixa, com gradiente topográfico máximo de 0,07 m/m entre a maior elevação e a calha do rio das Velhas.

Os afloramentos rochosos, porém, restringem-se às calhas fluviais ou localizam-se pontualmente na média e baixa vertente. As coberturas eluviais que recobrem as formações clasto-químicas são argilo-arenosas e espessas. Feições exocársticas não são comuns, tendo sido identificados pontualmente lapiás ao longo da foliação e caneluras verticais em paredões rochosos, além de cânions tipicamente cársticos nos fundos de vale.

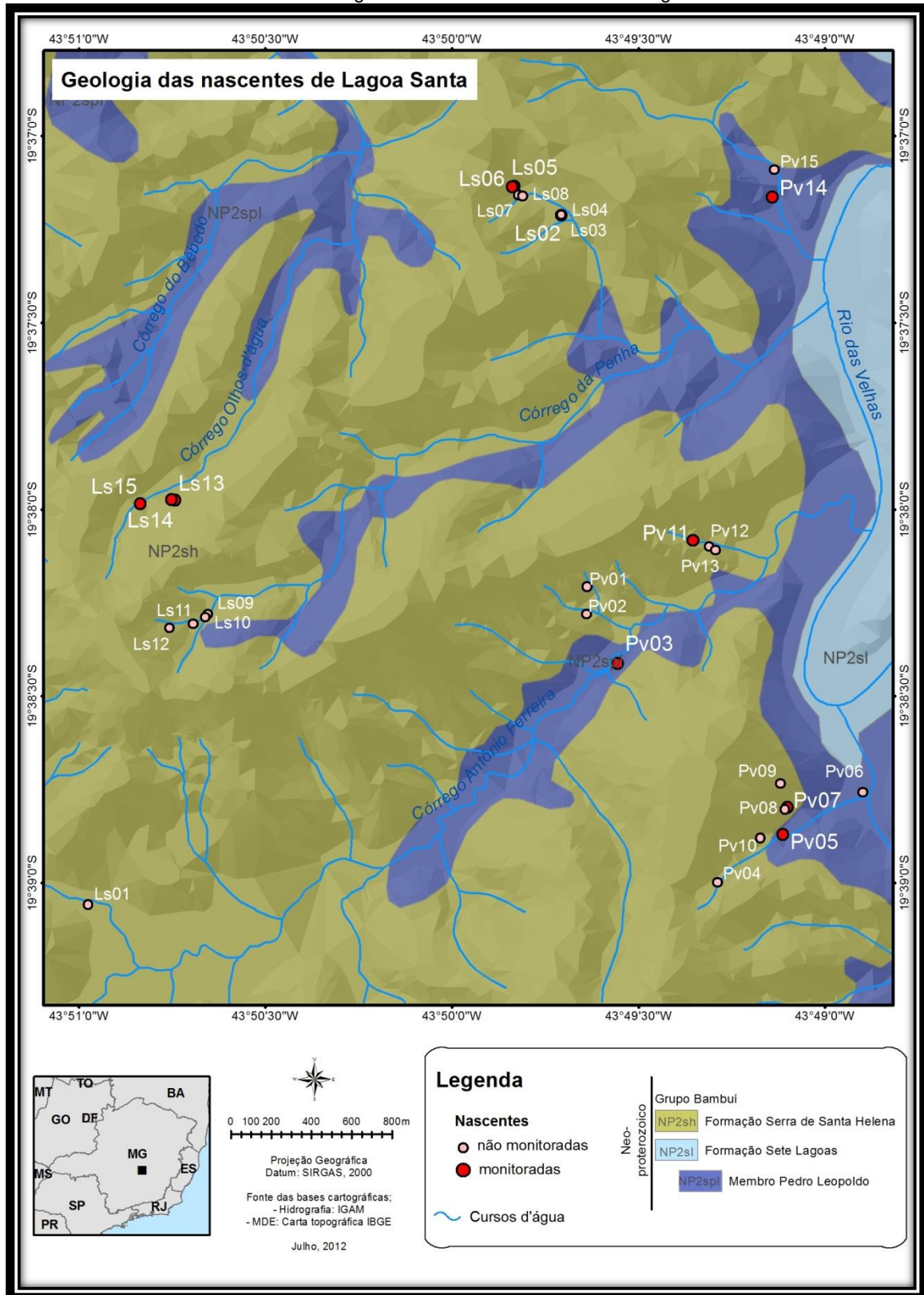
A relação entre o relevo da depressão e a estratigrafia do Grupo Bambuí, referida por Berbert-Born (2002), Shinzato (1998) e Auler (1994) é perfeitamente nítida na área das nascentes estudadas, como se observa na FIG. 26. A estratigrafia local é composta pela Formação Serra de Santa Helena, no topo, pelo Membro Pedro Leopoldo da Formação Sete Lagoas e pelo complexo gnáissico-migmatítico. Não são registradas ocorrências do Membro Lagoa Santa, estando os pelitos assentados sobre os calcissiltitos.

FIGURA 25 – Localização das nascentes estudadas em Lagoa Santa – hipsometria.



Fonte: elaborado pelo autor.

FIGURA 26 – Geologia das nascentes estudadas em Lagoa Santa.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os pelitos recobrem a maior parte da área, estando relacionados às porções mais elevadas do relevo. Conforme se aproxima do rio das Velhas, os carbonatos tornam-se mais presentes. Eles afloram no terço inferior das vertentes, próximo às calhas fluviais. Quando o perfil longitudinal dos cursos d'água atinge o Membro Pedro Leopoldo, é comum ocorrerem severas rupturas de declividade, muitas vezes, condicionadas pela existência de cânions. Isso demonstra a importância da drenagem na esculturação do relevo local, promovendo a retirada da cobertura pelítica e aflorando os calcissiltitos sotopostos.

5. CARACTERIZAÇÃO DAS NASCENTES ESTUDADAS

5.1. QUADRO GERAL DAS NASCENTES

Os trabalhos de campo exploratórios, realizados entre dezembro de 2010 e fevereiro de 2011, permitiram a identificação de 61 nascentes. Foi realizada uma caracterização básica com base nos principais parâmetros descritivos de todas essas fontes, bem como sua localização via receptor GPS. No QUADRO 3 são sintetizadas as informações essenciais sobre as nascentes identificadas.

QUADRO 3
Descrição geral das nascentes catalogadas

(continua)

Nascente	Morfologia	Exfiltração	Relevo	Contatos	Prof. coberturas superficiais (cm)	Antrop.	Vazão (L/s)
LS01	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Sim	--
LS02	Concavidade	Difusa	Calha	Solo/Rocha	5	Não	0,007
LS03	Concavidade	Difusa	Calha	Solo/Rocha	18	Não	--
LS04	Concavidade	Múltipla	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	--
LS05	Canal	Pontual	Calha	Rocha	19	Não	0,032
LS06	Canal	Pontual	Calha	Rocha	< 5	Não	0,062
LS07	Canal	Difusa	Calha	Rocha	20	Não	--
LS08	Afloramento	Difusa	Calha	Rocha	< 5	Não	--
LS09	Afloramento	Múltipla	Calha	Rocha	< 5	Não	--
LS10	Afloramento	Múltipla	Calha	Estratificação	< 5	Não	--
LS11	Afloramento	Múltipla	Calha	Estratificação	< 5	Não	--
LS12	Canal	Difusa	Calha	Rocha	35	Não	0,018
LS13	Canal	Pontual	Calha	Rocha	15	Não	0,026
LS14	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	0,01
LS15	Canal	Difusa	Calha	Rocha	< 5	Não	0,036
PV01	Afloramento	Múltipla	Cabeceira	Estratificação	< 5	Não	0,028
PV02	Afloramento	Múltipla	Cabeceira	Estratificação	< 5	Não	0,018
PV03	Cavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	3,55
PV04	Duto	Pontual	Média-vertente	Não	> 50	Não	0,072
PV05	Duto	Pontual	Calha	Rocha	< 5	Não	0,032
PV06	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Sim	--
PV07	Duto	Múltipla	Calha	Rocha	< 5	Não	0,062
PV08	Canal	Difusa	Calha	Rocha	< 5	Não	--
PV09	Canal	Múltipla	Calha	Hz B/Hz C	> 50	Não	--
PV10	Afloramento	Pontual	Cabeceira	Rocha	< 5	Não	0,051
PV11	Afloramento	Múltipla	Cabeceira	Rocha	< 5	Não	0,026
PV12	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	--
PV13	Afloramento	Difusa	Calha	Rocha	< 5	Não	--
PV14	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	0,002
PV15	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	--
SC01	Cavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	67,728
SC02	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	--
SC03	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	0,288
SC04	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Sim	0,013
SC05	Afloramento	Múltipla	Calha	Solo/Rocha	< 5	Não	0,038

QUADRO 3
Descrição geral das nascentes catalogadas

(conclusão)

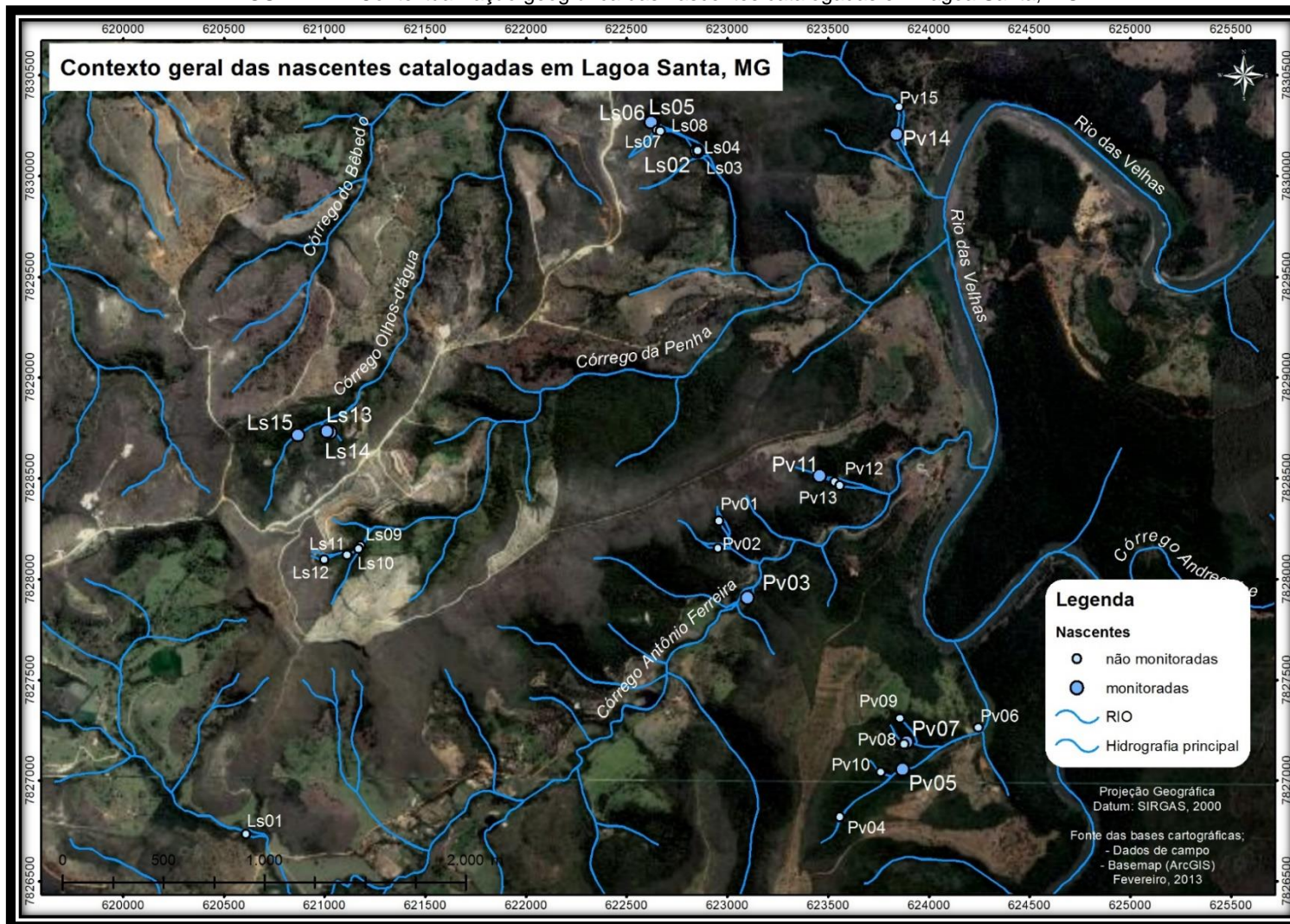
Nascente	Morfologia	Exfiltração	Relevo	Contatos	Prof. coberturas superficiais (cm)	Antrop.	Vazão (L/s)
SC06	Afloramento	Múltipla	Calha	Solo/Rocha	< 5	Não	--
SC07	Canal	Difusa	Topo	Rocha	< 5	Não	--
SC08	Canal	Difusa	Topo	Rocha	< 5	Não	0,004
SC09	Canal	Difusa	Topo	Rocha	< 5	Não	0,022
SC10	Concavidade	Difusa	Topo	Rocha	< 5	Não	0,011
SC11	Afloramento	Múltipla	Topo	Rocha	< 5	Não	0,006
SC12	Concavidade	Pontual	Média-vertente	Solo/Rocha	17	Não	0,004
SC13	Concavidade	Difusa	Topo	Solo/Rocha	< 5	Não	0,073
SC14	Canal	Pontual	Média-vertente	Sedimento/Rocha	14	Sim	0,03
SC15	Concavidade	Múltipla	Média-vertente	Não	< 5	Não	--
SC16	Concavidade	Difusa	Média-vertente	Solo/Rocha	7	Não	0,052
SC17	Afloramento	Múltipla	Média-vertente	Rocha	< 5	Não	--
SC18	Concavidade	Difusa	Média-vertente	Rocha	< 5	Não	0,01
SC19	Concavidade	Múltipla	Média-vertente	Solo/Rocha	< 5	Não	0,019
SC20	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	--
SC21	Concavidade	Múltipla	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	0,002
SC22	Concavidade	Múltipla	Baixa-vertente	Estratificação	< 5	Não	0,003
SC23	Concavidade	Difusa	Cabeceira	Não	> 50	Não	0,084
SC24	Canal	Difusa	Calha	Rocha	< 5	Não	0,082
SC25	Concavidade	Difusa	Calha	Rocha	12	Não	0,013
SC26	Canal	Difusa	Calha	Estratificação	< 5	Não	0,003
SC27	Duto	Múltipla	Calha	Rocha	> 50	Não	0,036
SC28	Afloramento	Difusa	Baixa-vertente	Estratificação	< 5	Não	0,007
SC29	Concavidade	Múltipla	Média-vertente	Não	> 50	Não	0,136
SC30	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	--
SC31	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	> 50	Não	--

OBS: Vazão não mensurável representada por "--".
Fonte: dados de campo (janeiro-fevereiro 2011).

As 30 nascentes identificadas em Lagoa Santa (FIG. 27) foram codificadas a partir das iniciais "LS" para aquelas localizadas em fazendas indiscriminadas e "PV" para as surgências na área do hotel-fazenda Poço Verde, nas proximidades do rio das Velhas.

A nascente LS01 foi a única encontrada no trecho superior da bacia do córrego Antônio Ferreira (FIG. 27). Apesar de uma grande densidade de canais nessa área, todos são efêmeros. LS01 ocorre como um lago represado por uma estrada vicinal. Apesar disso, várias surgências desconexas foram identificadas nessa porção da bacia, não configurando, porém, nascentes na concepção desta pesquisa. Devido à impossibilidade de mensuração da vazão e da distância destas para outras nascentes (em termos logísticos), LS01 não foi selecionada para estudos verticalizados.

FIGURA 27 – Contextualização geográfica das nascentes catalogadas em Lagoa Santa, MG.



Fonte: Basemap (ArcGIS).

Quatro nascentes foram localizadas nas cabeceiras do Córrego da Penha (FIG. 27), em uma área de acesso extremamente difícil (LS09, LS10, LS11 e LS12). Encontram-se em uma fazenda com uso de pastagem e pequenos cultivos agrícolas. De um modo geral, são nascentes em afloramento de exfiltração múltipla na calha fluvial. Também por motivos logísticos, essas nascentes não foram selecionadas para os estudos de detalhe.

As nascentes LS02, LS03, LS04, LS05, LS06, LS07 e LS08 localizam-se em uma fazenda de gado leiteiro, em uma sub-bacia do córrego Antônio Ferreira (FIG. 27). As três primeiras estão muito próximas entre si, na média porção da bacia; já as quatro últimas encontram-se mais próximas à cabeceira de drenagem. O vale possui relevo suave até as proximidades de LS02; a jusante desse ponto, a declividade do canal principal aumenta substancialmente, promovendo vertentes íngremes relacionadas, provavelmente, ao contato entre as rochas pelíticas e carbonáticas.

Essas nascentes ocorrem normalmente na calha fluvial ou em ravinamentos, onde o nível freático é interceptado pela superfície topográfica. Formam-se em pequenas concavidades, ou mesmo diretamente no talvegue dos canais, com exfiltração difusa ou múltipla em mantos de intemperismo de profundidade variada. Dentre essas, LS02, LS05 e LS06 foram selecionadas para os estudos verticalizados, por representarem características fisiográficas distintas e estarem espacialmente próximas.

LS13, LS14 e LS15 ocorrem na alta porção da bacia do córrego Olhos d'Água (FIG. 27). São nascentes em talvegues ou concavidades de exfiltração múltipla ou difusa, sempre com presença de afloramentos rochosos nas proximidades. Devido à proximidade entre elas e a diferença de características hidrológicas e fisiográficas, todas estas foram selecionadas para os estudos de maior profundidade.

As nascentes PV01, PV02, PV03, PV11, PV12 e PV13 localizam-se em pequenas bacias afluentes do córrego Antônio Ferreira, já nas proximidades de sua confluência com o rio das Velhas (FIG. 32). PV01 e PV02 são fisiograficamente muito semelhantes, enquanto PV11 é muito peculiar, ocorrendo em um paredão rochoso de mais de 15 m de altura. A existência de afloramentos rochosos é comum nesse grupo de nascentes, que ocorrem sob condições de exfiltração múltipla ou difusa. Dentre essas, PV03 e PV11 foram selecionadas para os estudos verticalizados devido às suas peculiaridades.

PV04, PV05, PV06, PV07, PV08, PV09 e PV10 ocorrem em uma pequena bacia afluente direta do rio das Velhas (FIG. 27). Possui morfologia prioritariamente em afloramento ou

talvegue na calha fluvial, com exfiltração que varia desde pontual até difusa. PV05 e PV07 foram selecionadas para os estudos em detalhe, a primeira por representar o conjunto de nascentes dessa bacia e a segunda pela especificidade de ocorrer em duto.

As nascentes PV14 e PV15 encontram-se isoladas das demais em uma bacia afluente direta do rio das Velhas (FIG. 27). Esta bacia possui a peculiaridade de apresentar um vale em “U” típico de ambientes de agradação. As surgências só ocorrem no terço final do vale, já sob influência das coberturas quaternárias do rio das Velhas.

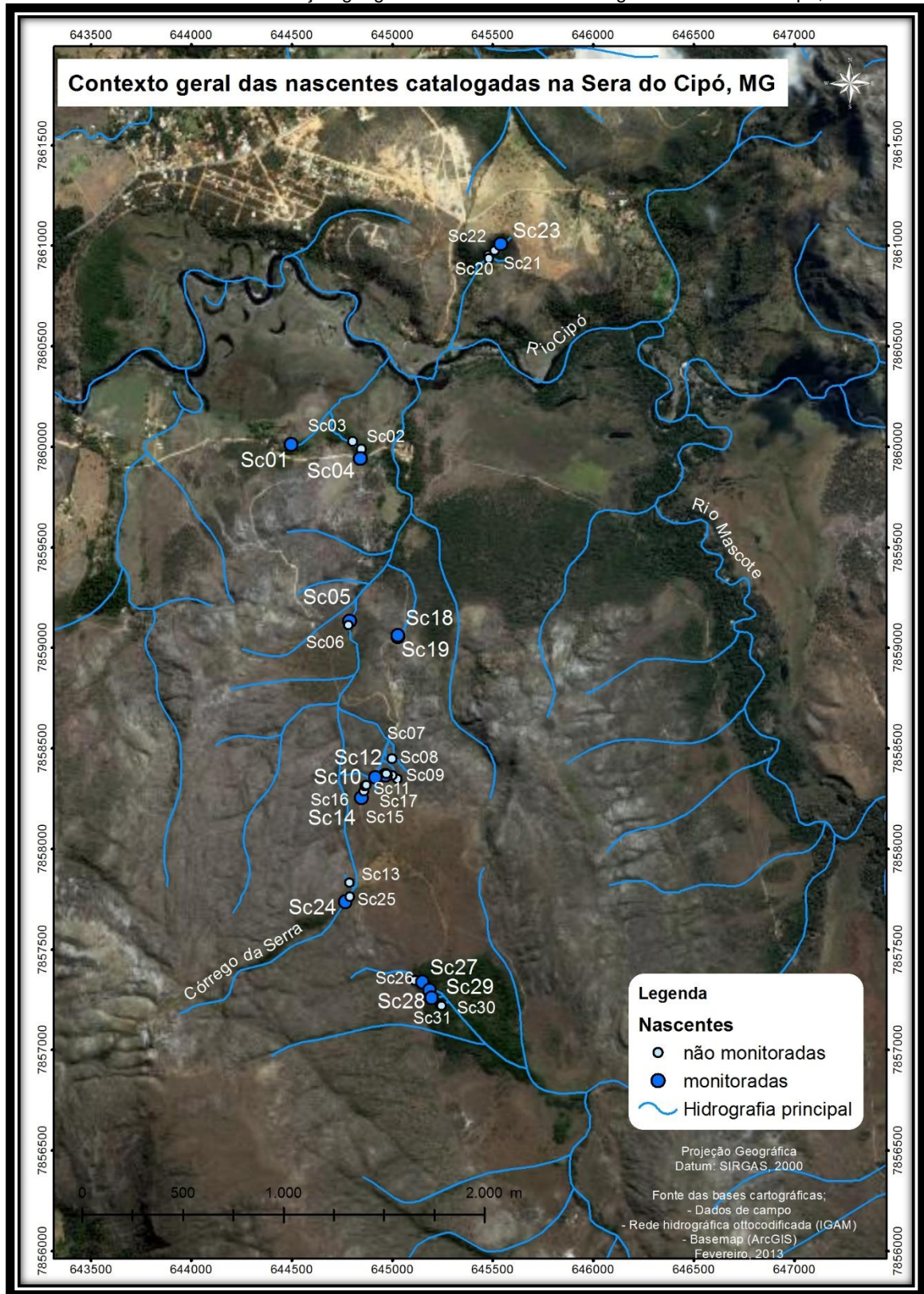
As nascentes identificadas na Serra do Cipó localizam-se no Parque Nacional da Serra do Cipó ou em sua área de amortização, a Área de Proteção Ambiental do Morro da Pedreira. Foi mapeado um total de 31 nascentes, das quais 23 estão no PARNA e oito na APA, estas últimas, em locais de usos do solo variados (FIG. 28).

SC01, SC02, SC03 e SC04 localizam-se fora do parque às margens da estrada que leva à administração da unidade de conservação. O local onde ocorrem essas surgências marca o contato entre a baixa-vertente e uma extensa planície construída pelo rio Cipó (FIG. 31). Em teoria, essa não é a configuração ambiental propícia para a formação de nascentes, o que desmistifica certas assertivas da literatura que ligam a ocorrência de nascentes às cabeceiras de drenagem.

Esse grupo de nascentes possui grandes similaridades, por ocorrerem todas sobre sedimentos quaternários, na baixa-vertente, com exfiltração difusa em mantos de intemperismo espessos. Duas destas nascentes foram selecionadas para os estudos detalhados: SC01, devido a sua elevada vazão, e SC04 devido à antropogenia. Porém, após alguns meses de monitoramento, os proprietários da área onde se localiza SC01 proibiram a continuação dos trabalhos, interrompendo a coleta de dados.

Quatro nascentes localizam-se em área embasada pela Formação Sete Lagoas, na margem direita do rio Cipó: SC20, SC21, SC22 e SC23 (FIG. 28). Todas ocorrem em concavidades com exfiltração múltipla ou difusa. Os mantos de intemperismo possuem mais de 50 cm de profundidade e não há ocorrência de afloramentos rochosos, exceto em SC22. O contexto ambiental no qual se inserem aproxima essas nascentes daquelas da área de estudos de Lagoa Santa. Dentre essas nascentes, SC23, que ocorre na cabeceira da bacia, foi escolhida para a continuidade dos estudos de monitoramento mensal.

FIGURA 28 – Contextualização geográfica das nascentes catalogadas na Serra do Cipó, MG.



Fonte: Basemap (ArcGIS).

A bacia do córrego da Serra abriga 16 nascentes estudadas (FIG. 28). Uma diferenciação fisiográfica considerável ocorre entre aquelas que se encontram na calha fluvial daquelas que ocorrem na média-vertente ou nos topos. SC05 e SC06, por exemplo, são muito similares. Ambas possuem exfiltração em afloramento rochoso na calha fluvial em mantos de intemperismo rasos, nas proximidades do Poço Azul (localidade turística do parque). SC05 foi selecionada para os estudos verticalizados.

As nascentes SC18 e SC19 estão em uma mesma vertente, a poucos metros de distância uma da outra (FIG. 28). Ambas ocorrem em concavidade com exfiltração difusa, diferenciando-se quanto à posição dos afloramentos rochosos. Pelo fácil acesso e pela representatividade que ambas representam no contexto geomorfológico regional, as duas foram selecionadas para os estudos de detalhe.

SC13, SC25 e SC24 são as nascentes de maior altimetria na bacia (FIG. 28). Todas ocorrem na calha fluvial com exfiltração múltipla ou difusa e mantos de intemperismo rasos. Somente SC24 está em talvegue, configurando-a como a nascente principal do córrego da Serra. Por esse motivo, SC24 foi selecionada para o monitoramento durante um ano hidrológico.

Um único morro na porção leste da bacia do córrego da Serra abriga 10 nascentes: SC07, SC08, SC09, SC10, SC11, SC12, SC14, SC15, SC16 e SC17 (FIG. 28). As cinco primeiras localizam-se no topo do morro, prioritariamente com mantos de intemperismo rasos e afloramentos nas nascentes. As cinco últimas estão em um contexto de média-vertente, mas também possuem solos rasos e afloramentos rochosos nas proximidades. Nesse conjunto de nascentes, SC10 e SC12 foram selecionadas para os estudos verticalizados por representarem o contexto regional. Além disso, SC14 também foi selecionada por ser uma nascente antropogênica às margens da trilha do Capão.

As nascentes SC26, SC27, SC28, SC29, SC30 e SC31 estão nas cabeceiras de uma bacia afluente do ribeirão das Areias (FIG. 28). Ocorrem preferencialmente em concavidades com exfiltração múltipla ou difusa, na baixa-vertente ou na calha fluvial. SC29, SC30 e SC31 possuem mantos de intemperismo muito espessos, enquanto as três primeiras são influenciadas por afloramentos rochosos. Dentre esse grupo de nascentes, foram selecionadas para o monitoramento mensal as nascentes SC27, por ser a única em duto nesse contexto; SC28, por ser influenciada pelas raízes de uma árvore sobre um afloramento rochoso; e SC29, por representar a realidade mais comum das nascentes locais.

O QUADRO 4 apresenta de forma sintética as nascentes selecionadas para o monitoramento mensal e as unidades geomorfológicas, geológicas e pedológicas regionais nas quais se localizam.

QUADRO 4
Nascentes selecionadas pra o monitoramento mensal

Nascente	Unidade de Relevô (IBGE, 2006)	Unidade Geológica (CPRM, 2004)	Classe do Solo (FEAM, s.d.)
LS02	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo
LS05	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo
LS06	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo
LS13	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo
LS14	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo
LS15	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo
PV03	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Membro Pedro Leopoldo	Argissolo
PV05	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Membro Pedro Leopoldo	Argissolo
PV07	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo
PV11	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo
PV14	Depressão do Alto-Médio São Francisco	Membro Pedro Leopoldo	Argissolo
SC01	Serra do Espinhaço Meridional	Sedimentos quaternários	Latossolo
SC04	Serra do Espinhaço Meridional	Sedimentos quaternários	Latossolo
SC05	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo
SC10	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo
SC12	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo
SC14	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo
SC18	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (indiviso)	Neossolo
SC19	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (indiviso)	Neossolo
SC23	Serra do Espinhaço Meridional	Fm. Sete Lagoas	Latossolo
SC24	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo
SC27	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo
SC28	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo
SC29	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo

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

5.2. ASPECTOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS

A hidrogeomorfologia é um campo do conhecimento relativamente novo nas ciências ambientais e fundamenta-se, sobretudo, na inter-relação entre processos hidrológicos e geomorfológicos na modificação da paisagem (SIDLE e ONDA, 2004; GOERL *et al.*, 2012). Nesse sentido, os aspectos hidrogeomorfológicos dos sistemas fluviais são sobremaneira importantes na compreensão de seu funcionamento (SIDLE e ONDA, 2004). Considerando

as nascentes como hidrossistemas (CHARLTON, 2008), afirmação semelhante pode ser feita das mesmas.

Dado o grande número de variáveis coletadas em campo, os aspectos hidrogeomorfológicos foram priorizados na interpretação fisiográfica, bem como na amostragem das nascentes para o monitoramento. Dentre estes, quatro características sintéticas são preconizadas, de acordo com Felipe e Magalhães Jr (2009): i) a morfologia da nascente, que se relaciona diretamente à feição geomorfológica que realiza a passagem da água subterrânea para o meio superficial; ii) o tipo de exfiltração, que representa o modo com a água aflora, denotando clara relação entre a energia dos fluxos subterrâneos e o material geológico no qual a nascente se situa; iii) a posição da nascente na vertente, que indica sua localização no relevo local; iv) a profundidade das coberturas superficiais, que está diretamente relacionada à capacidade de armazenamento de água do aquífero granular.

A FIG. 29 apresenta a frequência de ocorrência dos principais aspectos hidrogeomorfológicos das 61 nascentes catalogadas em Lagoa Santa e na Serra do Cipó. A morfologia mais comum é a concavidade (44%), em que as nascentes se localizam em elementos suavemente côncavos da vertente, seguida por nascentes em canais erosivos (como sulcos e ravinas) e afloramentos rochosos.

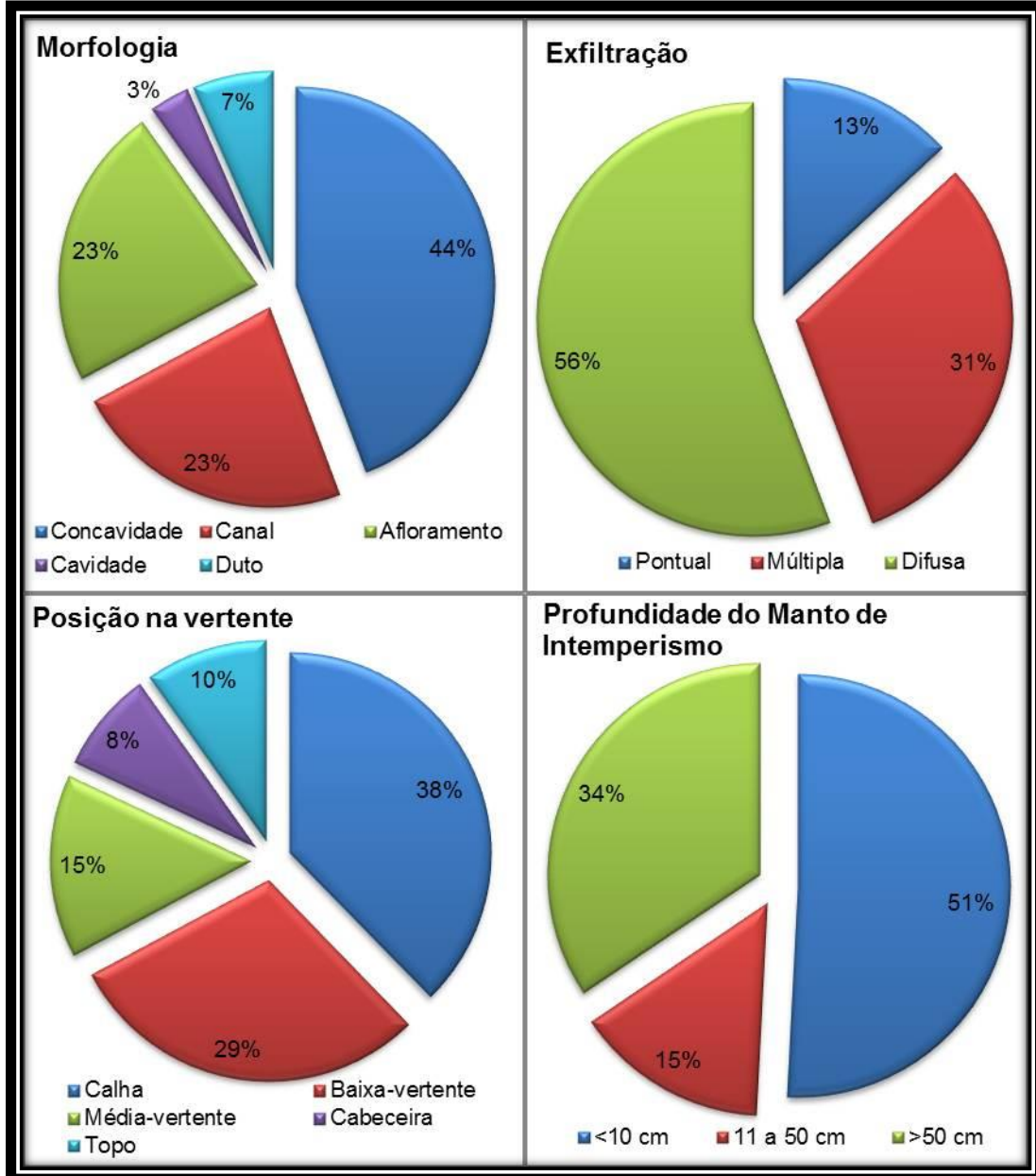
No que tange ao tipo de exfiltração, a maioria absoluta das nascentes é difusa (56%). Esse resultado possui íntima relação com a morfologia predominante, uma vez que a baixa declividade proporcionada pelas concavidades tende a conferir menor gradiente aos fluxos subterrâneos, promovendo a exfiltração de modo difuso. As nascentes múltiplas representam 31% do rol, enquanto aquelas com exfiltração pontual somam apenas 13%.

Há, nitidamente, um maior número de nascentes nos segmentos mais baixos da vertente, predominando nas calhas (38%) e na baixa-vertente (29%). Nesses trechos, a água infiltrada nas porções mais elevadas (maior potencial hidrostático) se acumula e eleva o nível freático que toca a superfície na forma de nascentes.

Seguindo a tendência orientada pelos demais parâmetros hidrogeomorfológicos, a profundidade das coberturas superficiais é comumente rasa nas nascentes estudadas (51%). Desse modo, um pequeno acúmulo dos fluxos subterrâneos já é o suficiente para promover a exfiltração, uma vez que o pacote granular é pouco espesso. Por outro lado, a efemeridade desses fluxos é latente, já que não há grande capacidade de armazenamento. O oposto pode-

se dizer dos 34% das nascentes em que as coberturas superficiais possuem mais de 50 cm. Profundidades intermediárias são menos comuns.

FIGURA 29 – Distribuição percentual das características hidrogeomorfológicas nas nascentes estudadas.

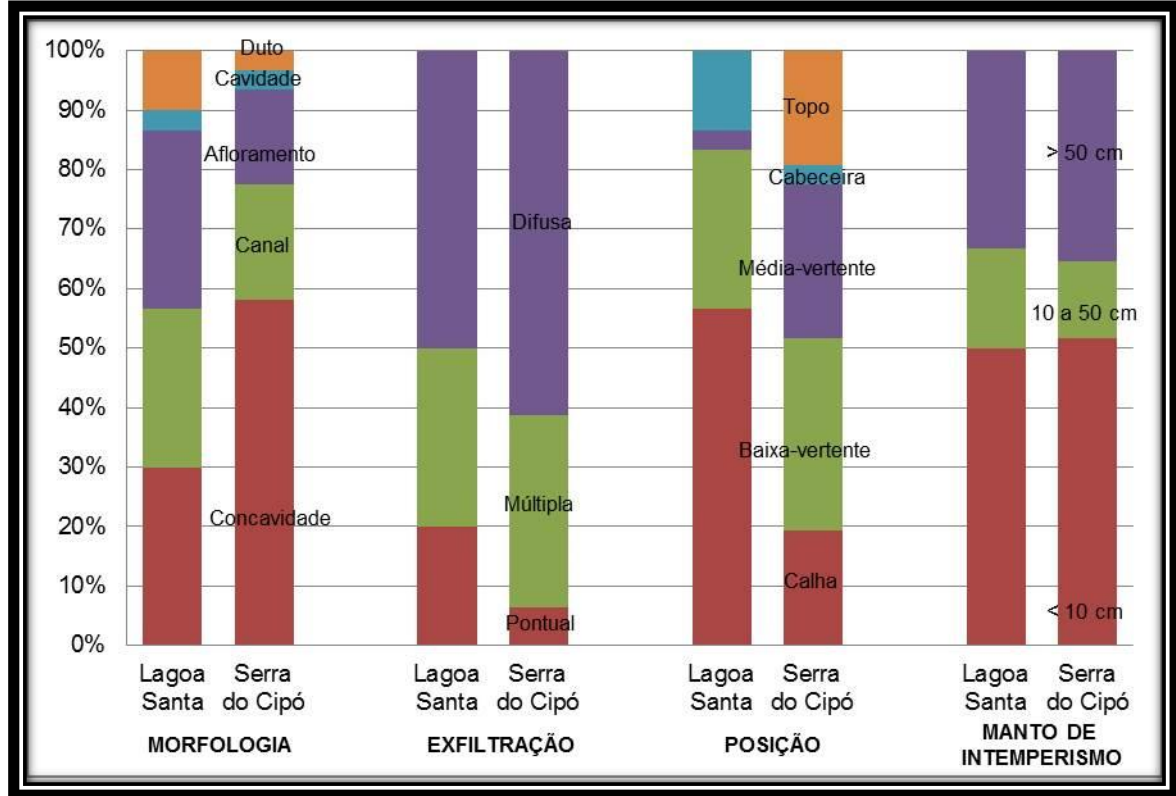


Fonte: Dados de campo (verão).

Dadas as características locais, espacializando os resultados nas áreas de estudo, pode-se observar a influência do contexto geológico-geomorfológico regional na hidrogeomorfologia das nascentes (FIG. 30). A área de estudo da Serra do Cipó possui, percentualmente, mais nascentes em concavidade do que a de Lagoa Santa. Por outro lado, a representatividade de nascentes em afloramentos em Lagoa Santa é maior. Isso, porém, não está relacionado à profundidade das coberturas superficiais (que é muito similar nas áreas de estudo), mas sim

à posição das nascentes nas vertentes. Em Lagoa Santa, há um maior percentual de nascentes em calha, sendo que o assoalho dos canais é, em sua maior parte, rochoso.

FIGURA 30 – Características hidrogeomorfológicas das nascentes por unidade de estudo.



Fonte: Dados de campo.

A amostragem das nascentes para o monitoramento buscou a heterogeneidade das características encontradas sem, contudo, perder a representatividade espacial daquelas mais recorrentes. Nesse sentido, os aspectos hidrogeomorfológicos são retomados, por serem capazes de sintetizar complexas informações acerca das nascentes.

5.3. CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS

A vazão é um dos elementos prioritários na caracterização e interpretação dos hidrossistemas. Não apenas em termos quantitativos, mas também na sua variabilidade têmporo-espacial, esse parâmetro reflete de forma fidedigna a dinâmica hidrológica (DAVIS, 1966; TODD e MAYS, 2005; CHARLTON, 2008). No caso das nascentes, o débito corresponde à parte do vetor longitudinal de troca de matéria e energia (BRIDGE, 2003), sendo responsável pela saída da água do meio subterrâneo que contribui para o escoamento superficial concentrado ou difuso e é incorporado à rede de drenagem.

A vazão das nascentes foi mensurada em campo pela coleta de água em medidores graduados (PINTO *et al.*, 2004; FELIPPE *et al.*, 2009). Nos campos exploratórios, todas as nascentes identificadas tiveram suas vazões aferidas, exceto aquelas em que as características do fluxo impediam a utilização do método. Assim, as vazões apontadas como não mensuráveis estão relacionadas a fluxos com ordem de grandeza inferior a 0,001 L/s ou casos onde o escoamento superficial concentrado atingiu a nascente no momento da medição, impedindo a mensuração de seu débito.

As nascentes estudadas apresentaram vazões consideravelmente baixas (TAB. 1), em sua maioria. As vazões médias anuais, calculadas a partir da média aritmética de todas as medições durante o ano hidrológico de março de 2011 a fevereiro de 2012, foram utilizadas para determinar a magnitude das nascentes de acordo com a classificação de Meinzer (1927). LS02, LS14 e PV14 foram consideradas de 8ª magnitude, caracterizando as menores vazões médias encontradas; doze outras nascentes são de 7ª magnitude; e sete nascentes são de 6ª magnitude. A PV03 é a nascente de maior vazão dentre as estudadas em Lagoa Santa, sendo de 4ª magnitude, enquanto a SC01 é a nascente de maior vazão relatada na literatura brasileira consultada, sendo considerada de 3ª magnitude.

Apesar das baixas vazões, os valores encontrados estão em concordância com a maioria dos trabalhos realizados no país (FARIA, 1997; PINTO *et al.*, 2004; FELIPPE *et al.*, 2009; FELIPPE e MAGALHÃES JR., 2009; MENEZES *et al.*, 2009). Faz-se importante ressaltar a necessidade de se distinguir as concepções de nascente nas pesquisas para possibilitar essa comparação. Além disso, nota-se, nos resultados apontados na TAB. 1, um acúmulo de nascentes de baixa vazão, o que não é relatado na literatura, que tende a se preocupar com as nascentes de magnitudes superiores.

As nascentes de maior magnitude do estudo possuem características hidrogeomorfológicas completamente distintas do contexto geral que as abriga. Tanto SC01 quanto PV03 ocorrem na forma de pequenos lagos com exfiltração difusa no fundo da concavidade. São necessários estudos verticalizados para buscar explicações para tamanhas vazões nessas nascentes, porém, especula-se que esse fenômeno possa relacionar-se à existência de dutos cársticos conduzindo a água subterrânea em PV03 e à ocorrência de uma trama de fraturas com terminação nas proximidades de SC01.

De uma forma geral, as vazões registradas em Lagoa Santa são menores do que aquelas encontradas nas nascentes da Serra do Cipó. Dentre as dez nascentes de maior vazão, apenas duas estão em Lagoa Santa. Adicionalmente, esta área abriga as cinco nascentes de

menor vazão. Provavelmente, as características hidrogeológicas locais respondem por esse cenário.

TABELA 1
Estatística descritiva das vazões mensuradas (L/s)

Nascente	Média	Medições	Mediana	Mínimo	Máximo	Verão/ Inverno	Desvio Padrão	Desvio/ Média
LS02	0,003	4	0,002	0,001	0,006	5,44	0,002	0,75
LS05	0,050	9	0,000	0,000	0,198	-	0,073	1,46
LS06	0,012	10	0,000	0,000	0,070	-	0,023	1,81
LS13	0,010	12	0,007	0,001	0,029	2,01	0,008	0,84
LS14	0,005	11	0,005	0,004	0,006	1,62	0,001	0,18
LS15	0,026	6	0,016	0,005	0,084	18,05	0,029	1,10
PV03	7,366	11	4,372	2,449	24,400	2,14	7,884	1,07
PV05	0,026	11	0,017	0,006	0,106	4,32	0,029	1,13
PV07	0,048	12	0,049	0,032	0,085	1,63	0,015	0,31
PV11	0,041	12	0,020	0,005	0,240	2,16	0,065	1,57
PV14	0,003	10	0,000	0,000	0,014	-	0,005	2,12
SC01	54,095	3	35,091	17,058	110,136	1,93	49,364	0,91
SC04	0,023	6	0,016	0,004	0,063	1,18	0,022	0,97
SC05	0,041	10	0,029	0,000	0,107	5,96	0,041	1,00
SC10	0,103	12	0,010	0,000	0,894	-	0,253	2,46
SC12	0,029	11	0,009	0,000	0,169	-	0,051	1,75
SC14	0,065	11	0,005	0,000	0,408	-	0,124	1,90
SC18	0,018	11	0,018	0,000	0,071	-	0,021	1,15
SC19	0,078	9	0,033	0,000	0,313	-	0,115	1,48
SC23	0,111	11	0,050	0,024	0,749	2,01	0,212	1,91
SC24	0,126	8	0,024	0,000	0,684	-	0,235	1,86
SC27	0,034	7	0,029	0,004	0,083	20,44	0,025	0,73
SC28	0,128	8	0,024	0,000	0,599	-	0,220	1,72
SC29	0,434	12	0,209	0,091	2,446	1,44	0,650	1,50

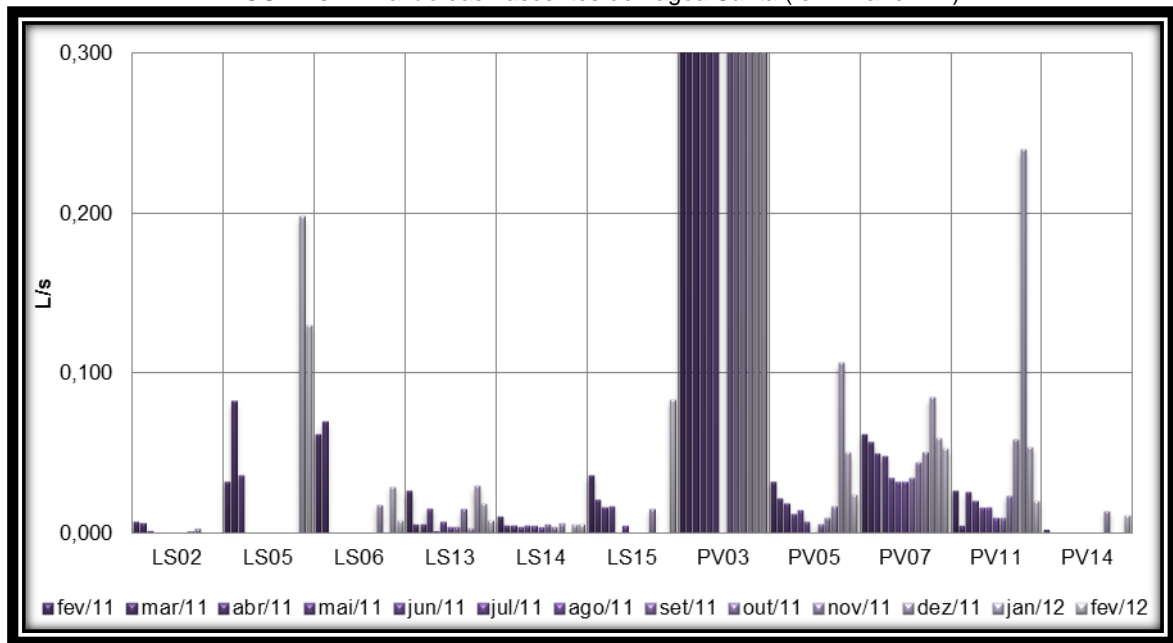
Obs.: "Verão/Inverno" indica a razão entre as vazões de fev-12 e ago-11 (preferencialmente); - sem informação.

Fonte: dados de campo (mar-11 a fev-12).

Porém, nota-se que a vazão das nascentes não está ligada a fatores meramente de posicionamento. As características geomorfológicas e hidrogeológicas superam a localização das surgências no controle de suas vazões. Vários pares de exemplos podem ser levantados no rol estudado, denotando nascentes muito próximas umas das outras, porém com substanciais diferenças de débito: LS05 e LS06; LS14 e LS15; SC10 e SC12; SC18 e SC19.

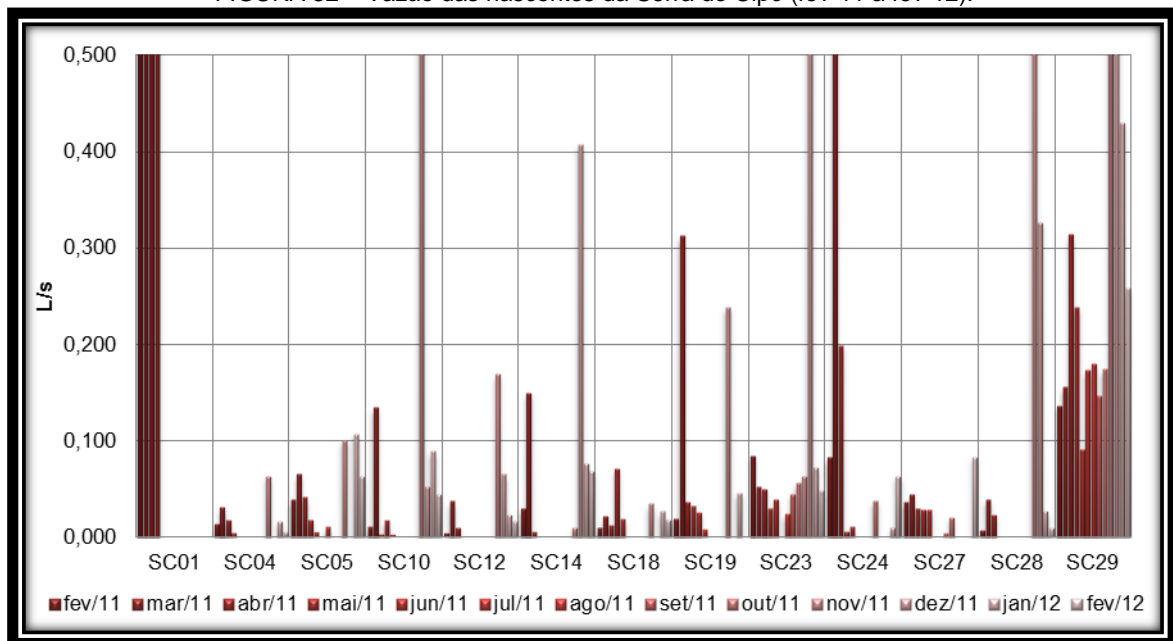
A variabilidade sazonal das vazões das nascentes também pode ser verificada na TAB.1. De um modo geral, as maiores vazões são registradas entre dezembro e fevereiro, enquanto nos meses de agosto e setembro, são verificadas as menores vazões. Assim, o gráfico de variabilidade das vazões das nascentes, guardados os valores absolutos, apresentam comportamentos semelhantes (FIG. 31 e 32).

FIGURA 31 – Vazão das nascentes de Lagoa Santa (fev-11 a fev-12).



Fonte: dados de campo.

FIGURA 32 – Vazão das nascentes da Serra do Cipó (fev-11 a fev-12).



Fonte: dados de campo.

A partir de fevereiro ou março de 2011, as vazões iniciam um processo gradativo de recessão, podendo alcançar os valores mínimos nos meses de junho, julho, agosto ou setembro, dependendo da nascente. Com as primeiras chuvas da estação, as vazões começam a elevar-se novamente, voltando a patamares próximos as do início do ano hidrológico. Como se vê nas FIG. 31 e 32, essa assertiva vale tanto para Lagoa Santa, quanto para Serra do Cipó.

Entretanto, os dados obtidos não reiteram as afirmações de Felipe e Magalhães Jr. (2009), que apontam a morfologia da nascente, a posição dos afloramentos rochosos e o tipo de exfiltração como principais fatores relacionados à variabilidade das vazões no Quadrilátero Ferrífero. Diferentemente do atestado pelos referidos autores, as nascentes em duto apresentaram as vazões mais baixas em média; por outro lado, as nascentes em concavidade e cavidade (ainda que excluídas SC01 e PV03 dos cálculos) apresentam as maiores vazões (TAB. 2).

TABELA 2
Estadística descritiva das vazões (L/s) das nascentes em função de suas características hidrogeomorfológicas básicas

Característica		Frequência	Média	Desvio Padrão	Desvio/Média	Distorção
Morfologia	Afloramento	3	0,070	0,041	0,583	1,732
	Canal	6	0,048	0,040	0,830	1,301
	Concavidade	10	0,081	0,124	1,541	2,618
	Duto	3	0,036	0,009	0,255	0,818
Exfiltração	Difusa	10	0,055	0,052	0,953	0,465
	Múltipla	6	0,113	0,145	1,282	2,400
	Pontual	6	0,032	0,020	0,616	0,691
Relevo	Baixa-vertente	4	0,039	0,052	1,308	1,869
	Cabeceira	2	0,076	0,035	0,458	-
	Calha	10	0,038	0,033	0,882	2,000
	Média-vertente	5	0,125	0,156	1,252	2,127
	Topo	1	0,103	0,000	0,000	-
Profundidade das coberturas superficiais	> 10	12	0,051	0,038	0,734	0,947
	10 a 50	4	0,033	0,021	0,644	0,462
	<50	6	0,105	0,142	1,352	2,110
Contatos estratigráficos	Não	5	0,115	0,165	1,429	1,940
	Sim	17	0,049	0,037	0,760	1,030
Total		22	0,064	0,089	1,392	3,415

Obs.: PV03 e SC01 foram retiradas dos cálculos. – sem informação.

Fonte: dados de campo

Quanto ao tipo de exfiltração, as nascentes múltiplas representaram maiores vazões médias, ainda que com elevada distorção. Esse fato pode ser explicado pela existência de diversos pontos de exfiltração nessas nascentes, os quais, somados, configuram um significativo débito. Por outro lado, a diferença é pequena entre a média das vazões de nascentes difusas e pontuais, diferenciando-se novamente do trabalho de Felipe e Magalhães (2009) que identificou as nascentes pontuais como as de maior vazão.

Pode-se afirmar, em relação à posição da nascente no relevo, que as maiores vazões foram encontradas na média-vertente e nos topos, porém, com elevada distorção dos dados. Se por

um lado esses compartimentos apresentam um número absoluto de nascentes menor, por outro, os fluxos subterrâneos possuem menor divergência, aumentando o débito desses sistemas. Nesse sentido, nota-se que há um aumento das vazões médias dos segmentos mais baixos das vertentes para os mais altos (TAB. 2).

Destaca-se ainda na TAB. 2 a importância das características das coberturas superficiais para a vazão das nascentes. Os mantos de intemperismo espessos apresentam nascentes com valores de débito consideravelmente superiores (quase o dobro da média geral do rol). Nesses casos, o contato lítico está mais afastado da superfície, o que promove, por conseguinte, maior capacidade de armazenamento de água. Com isso, a vazão média das nascentes em que os mantos de intemperismo superam 50 cm de espessura (e, por conseguinte, não apresentam contato estratigráfico próximo à superfície do relevo) é substancialmente maior.

5.4. TIPOLOGIA DAS NASCENTES

A tipologia das nascentes é tratada na literatura especializada em avaliações monovariadas ou, no máximo, bivariadas, como demonstram os trabalhos de Bryan (1919 *apud* TODD, 1959), Meinzer (1927), Faria (1997), Valente e Gomes (2005). Algumas pesquisas, porém, buscam compreender as nascentes a partir de uma caracterização multivariada, como o trabalho de Springer e Stevens (2009), que descreve subjetivamente classes de nascentes em função dos seus ciclos hidrológicos, e o de Felipe (2009), que propõe tipos distintos de nascentes em função de nove variáveis hidrogeomorfológicas integradas em um modelo qualitativo.

Após a descrição fisiográfica das nascentes, passo inicial do conhecimento sobre esses sistemas, a tipologia permite agrupá-los a partir de suas similaridades. Esse artifício é essencial para a proteção das nascentes, uma vez que com uma classificação eficiente, podem ser traçadas estratégias de manejo que garanta a proteção ambiental. Como cada nascente possui uma dinâmica distinta, estratégias de conservação individuais são laboriosas, por esse motivo, agrupá-las em conjuntos mais homogêneos viabiliza propostas mais eficazes que não ignorem suas idiossincrasias.

Partindo desse princípio, a tipologia de Felipe (2009) está baseada em uma metodologia estatística multivariada qualitativa denominada *Grade of Membership* (GoM), desenvolvida por Manton *et al.* (1994). Fundamentada na Teoria dos Conjuntos Nebulosos, o GoM estabelece graus de pertencimento dos elementos estudados a perfis distintos criados,

possibilitando a elaboração de tipologias em que um mesmo elemento possa se inserir, simultaneamente, em mais de um perfil (MANTON *et al.*, 1994).

Reproduziram-se, neste trabalho, os procedimentos metodológicos propostos por Felipe (2009). Nove variáveis hidrogeomorfológicas foram sistematizadas e categorizadas para montagem da matriz de entrada do modelo. Tais parâmetros foram definidos por Felipe (2009), a partir de testes sucessivos realizados no modelo proposto, iniciado com mais de 50 variáveis. Sendo assim, a matriz de caracterização das nascentes (APÊNDICE B) que funciona como o *input* do GoM é definida por:

- Id: números sequenciais (1 a 24) que identificam as nascentes estudadas;
- Morfologia da nascente: que caracteriza a forma do relevo onde ocorre a exfiltração;
- Tipo de exfiltração: modo como a água emerge do meio subterrâneo;
- Contato lítico: influência do contato entre diferentes materiais geológicos no processo de exfiltração da água subterrânea;
- Vazão média: média aritmética das medições de vazão realizadas durante o período de monitoramento;
- Razão de vazão: relação entre a vazão do máximo e do mínimo pluviométrico;
- Mobilidade: deslocamento no terreno dos pontos/áreas de exfiltração ao longo do ano hidrológico;
- Profundidade das coberturas superficiais: média da profundidade das coberturas superficiais inconsolidadas até o contato lítico ao longo do ano hidrológico nas proximidades das nascentes;
- Existência de afloramentos rochosos: ocorrência de afloramentos rochosos nas proximidades dos pontos/áreas de exfiltração;
- Sazonalidade: definição da interrupção ou não da drenança das nascentes ao longo do ano hidrológico.

Para verificar o melhor ajuste do modelo para as nascentes estudadas, foram realizados diversos testes com as nove variáveis categorizadas de diferentes formas. Além disso, executou-se o modelo para cinco perfis (conforme Felipe (2009)) e também, seis e quatro perfis. Por fim, realizaram-se testes com a retirada e/ou substituição de variáveis, além da inserção de outros parâmetros. O melhor ajuste do modelo foi obtido para quatro perfis, com as mesmas variáveis propostas por Felipe (2009), categorizadas conforme a TAB. 3, que mostra, adicionalmente, a frequência de cada categoria no rol de nascentes estudadas.

TABELA 3
Descrição das variáveis e categorias utilizadas na tipologia

Variáveis	Categorias	Freq.	Freq. %
Morfologia da nascente	1 : Afloramento	3	12,5%
	2 : Canal	6	25,0%
	3 : Cavidade	2	8,3%
	4 : Concavidade	10	41,7%
	5 : Duto	3	12,5%
Tipo de Exfiltração	1 : Difusa	13	54,2%
	2 : Múltipla	5	20,8%
	3 : Pontual	6	25,0%
Contato lítico	1 : Existente	15	62,5%
	2 : Ausente	9	37,5%
Vazão média(L/s)	1 : Menor que 0,010	4	16,7%
	2 : 0,010 - 0,099	13	54,2%
	3 : 0,100 - 0,999	5	20,8%
	4 : Acima 1,000	2	8,3%
Razão de vazão (verão/inverno)	1 : Menor que 3,0	9	37,5%
	2 : 3,0 - 9,9	3	12,5%
	3 : Acima de 10,0	2	8,3%
	4 : Indeterminado	10	41,7%
Mobilidade	1 : Fixa	10	41,7%
	2 : Móvel	14	58,3%
Profundidade das coberturas superficiais (cm)	1 : Menor que 5,0	12	50,0%
	2 : 6,0 - 49,0	4	16,7%
	3 : Acima de 50,0	8	33,3%
Afloramentos rochosos	1 : Existentes	15	62,5%
	2 : Ausente	9	37,5%
Sazonalidade	1 : Perene	14	58,3%
	2 : Intermitente	10	41,7%

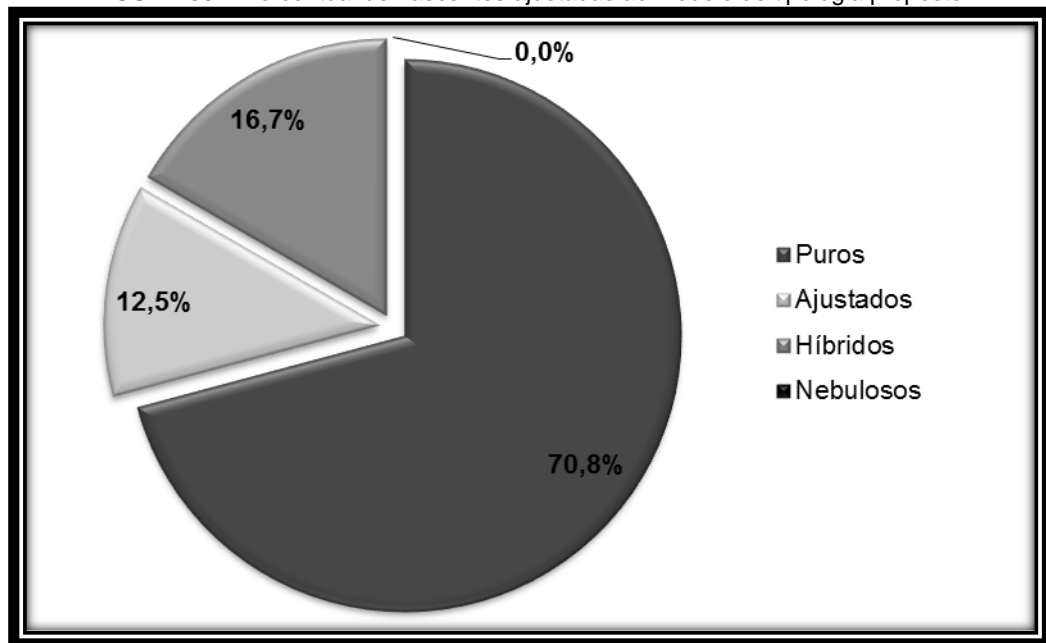
Fonte: *Output* do programa GoM 3.4

A categorização das variáveis qualitativas buscou reproduzir as características identificadas em campo. Assim ocorreu com a morfologia da nascente e o tipo de exfiltração. O contato lítico e os afloramentos rochosos foram traduzidos em função da existência ou não destas características nas nascentes, reduzindo a duas categorias cada uma dessas variáveis. As variáveis quantitativas foram categorizadas a partir da quebra natural e posteriormente ajustadas para uma melhor distribuição da frequência, exceção feita à mobilidade, que foi traduzida em uma bivalência.

Com a matriz elaborada em função dessas categorias, o modelo apresentou seus melhores resultados quando executado para quatro perfis. Nesse contexto, todas as nascentes

apresentaram explicação satisfatória (FIG. 33). Dentre as 24 nascentes estudadas, 17 apresentaram g_{ik} igual a um em algum dos perfis criados, enquadrando-se como casos puros; três nascentes tiveram um dos g_{ik} superior a 0,7, sendo considerados casos ajustados; somente quatro nascentes não apresentaram boa inserção em algum perfil, sendo necessária a soma de dois g_{ik} para possuírem pertinência superior a 0,7, casos considerados híbridos; e não houve nascentes nebulosas, nas quais há uma dispersão dos g_{ik} entre três ou mais perfis criados, dificultando a explicação de sua pertinência.

FIGURA 33 – Percentual de nascentes ajustadas ao modelo de tipologia proposto.



Fonte: GoM 3.4.

Os quatro perfis criados pelo modelo correspondem a quatro tipos de nascentes encontrados na área de estudo. A interpretação do λ_{kjl} de cada categoria aos perfis criados permite a compreensão de suas características principais, conforme demonstrado na TAB. 4. Ressalta-se que dentro de cada perfil a soma dos λ_{kjl} de cada categoria de uma mesma variável é sempre igual a um, uma vez que responde às equações probabilísticas.

O perfil k1 foi aquele que apresentou maior clareza nas suas características, uma vez que em cada variável, apenas uma categoria ocorre. Sendo assim, ele apresenta morfologia em cavidade e exfiltração difusa, com ausência de contato lítico e afloramentos rochosos, e coberturas superficiais profundas. Essas quatro variáveis possuem íntima relação hidrogeomorfológica, uma vez que a erosão por cavitação demanda coberturas superficiais espessas para sua continuidade, o que implica em menor influência da rocha sã. Por sua vez, a cavidade erosiva determina a exfiltração ao promover o contato do nível freático com a superfície em sua base, por esse motivo, esse perfil abriga apenas nascentes fixas. Em temos

hidrológicos, o perfil é caracterizado pelas vazões mais elevadas encontradas no rol e uma grande estabilidade sazonal das mesmas.

TABELA 4
Probabilidade associada a cada categoria das variáveis em cada perfil criado pelo modelo - λ_{kjl}^*

Variáveis	Categorias	k1	k2	k3	k4
Morfologia da nascente	1 : Afloramento	0,00	0,11	0,00	0,31
	2 : Canal	0,00	0,47	0,00	0,23
	3 : Cavidade	1,00	0,00	0,00	0,00
	4 : Concavidade	0,00	0,43	1,00	0,00
	5 : Duto	0,00	0,00	0,00	0,47
Tipo de Exfiltração	1 : Difusa	1,00	0,62	0,79	0,00
	2 : Múltipla	0,00	0,00	0,21	0,64
	3 : Pontual	0,00	0,38	0,00	0,36
Contato lítico	1 : Existente	0,00	0,85	0,00	1,00
	2 : Ausente	1,00	0,15	1,00	0,00
Vazão média(L/s)	1 : Menor que 0,010	0,00	0,00	0,45	0,19
	2 : 0,010 : 0,099	0,00	0,67	0,20	0,81
	3 : 0,100 : 0,999	0,00	0,33	0,35	0,00
	4 : Acima 1,000	1,00	0,00	0,00	0,00
Razão de vazão (verão/inverno)	1 : Menor que 3,0	1,00	0,00	1,00	0,37
	2 : 3,0 : 9,9	0,00	0,00	0,00	0,37
	3 : Acima de 10,0	0,00	0,00	0,00	0,26
	4 : Indeterminado	0,00	1,00	0,00	0,00
Mobilidade	1 : Fixa	1,00	0,00	0,00	1,00
	2 : Móvel	0,00	1,00	1,00	0,00
Prof. coberturas superficiais (cm)	1 : Menor que 5,0	0,00	0,67	0,00	0,86
	2 : 6,0 - 49	0,00	0,33	0,00	0,14
	3 : Acima de 50,0	1,00	0,00	1,00	0,00
Afloramentos rochosos	1 : Existentes	0,00	0,79	0,20	1,00
	2 : Ausente	1,00	0,21	0,80	0,00
Sazonalidade	1 : Perene	1,00	0,00	1,00	1,00
	2 : Intermitente	0,00	1,00	0,00	0,00

Fonte: Output do programa GoM 3.4

* Valores mais elevados de λ_{kjl} foram destacados.

O perfil k2 tem como principal característica a sazonalidade de suas nascentes, sendo o único, dentre os quatro criados, que comporta as nascentes intermitentes. A proposta original de Felipe (2009) definiu dois perfis para nascentes sazonais, porém, os resultados atuais enquadraram todas as nascentes intermitentes em apenas um perfil, simplificando sua explicação. Nesse grupo, a maioria dos casos possui contato lítico e afloramentos rochosos nos arredores, resultando em mantos de intemperismo pouco espessos. Por outro lado, a morfologia e tipo de exfiltração possuem respostas diversas dentro desse perfil. Com uma

cobertura sedimentar pouco espessa, o que traz consigo o contato lítico e os afloramentos rochosos, há pouca capacidade de estocagem da água infiltrada no período das chuvas. Como consequência, o nível freático é rebaixado e as nascentes tendem a se movimentar para cotas altimétricas menores ou, em casos extremos, secam.

Também caracterizado por casos com mantos de intemperismo profundos, o perfil k3 possui nascentes exclusivamente móveis e perenes. Esse tipo representa uma resposta hidrogeomorfológica à sazonalidade climática distinta da intermitência. Com o rebaixamento do nível freático ao longo do período de recessão, a exfiltração dessas nascentes se movimenta para altimetrias mais baixas, garantindo sua perenidade; diferentemente do que ocorre no perfil k2. Com isso, independentemente da vazão média dessas nascentes, a mobilidade garante que, no inverno, não haja grande diminuição do débito. Todas as suas nascentes são em concavidade e, a maioria, com exfiltração difusa.

O perfil k4 é aquele considerado o residual do modelo, onde são encaixados os casos mais comuns do rol. Por este motivo, possui um menor número de categorias com λ_{kji} igual a um. As características principais deste perfil perpassam mantos de intemperismo mais espessos (podendo ocorrer profundidades intermediárias) e a ausência de contato lítico e afloramento rochosos. São nascentes fixas e perenes com vazão prioritariamente baixa e exfiltração múltipla. Não há uma morfologia preferencial definida para esse perfil.

A interpretação desses perfis a luz de suas características hidrogeomorfológicas permite traçar em linhas gerais suas descrições. Uma tradução textual dos resultados matemáticos do GoM é apresentada no QUADRO 5, bem como a nomenclatura atribuída a cada perfil. A terminologia utilizada seguiu a metodologia de Felipe (2009), permitindo a comparação dos resultados. Os mesmos tipos foram obtidos, exceção feita às nascentes sazonais que no trabalho original foram divididas em duas classes distintas (erosivas e de encosta).

QUADRO 5
Características hidrogeomorfológicas dos perfis criados pelo GoM

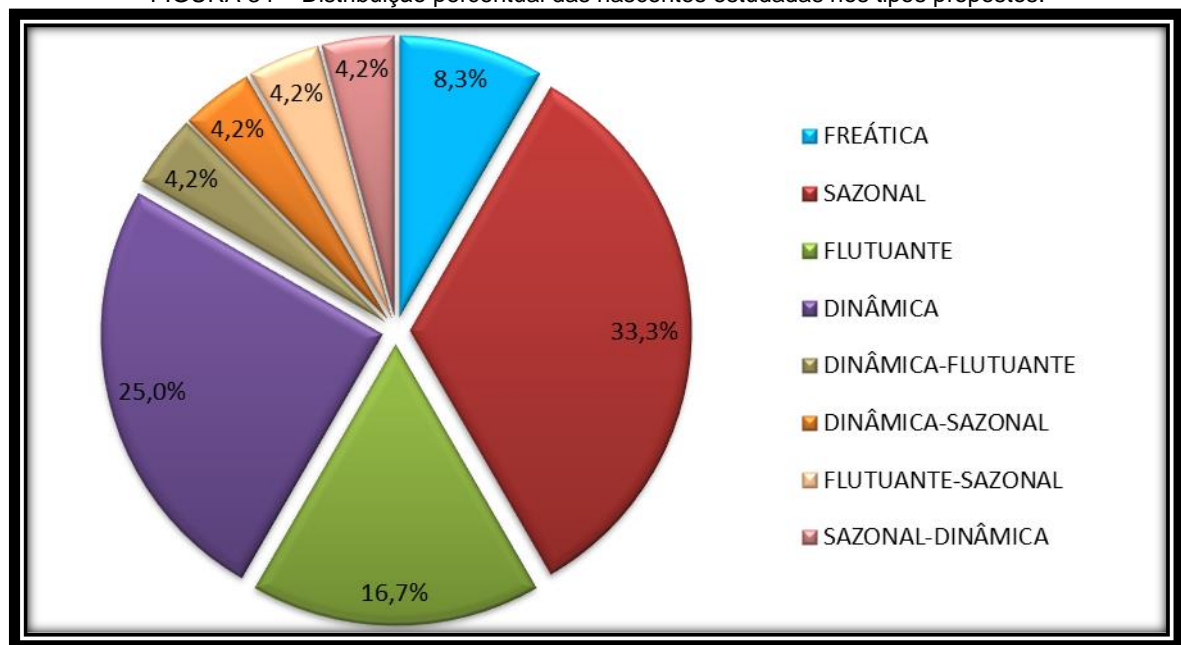
Perfis/ Variáveis	Morfologia da nascente	Tipo de exfiltração	Contato lítico	Vazão média	Razão de vazão	Mobilidade	Prof. Coberturas superficiais	Afloramentos rochosos	Sazonalidade	TIPO
k1	Exclusivamente em cavidade	Exclusivamente difusa	Exclusivamente sem contato	Exclusivamente alta	Exclusivamente baixa (estável)	Exclusivamente fixa	Exclusivamente profundo	Exclusivamente ausentes	Exclusivamente perene	FREÁTICA
k2	Prioritariamente em canal e concavidade	Prioritariamente difusa , ocorrendo pontual	Exclusivamente com contato	Prioritariamente baixa , ocorrendo média	Indeterminada (vazão de inverno nula)	Exclusivamente móvel	Prioritariamente raso , ocorrendo profundidades médias	Exclusivamente existentes	Exclusivamente intermitente	SAZONAL
k3	Exclusivamente em concavidade	Exclusivamente difusa	Exclusivamente sem contato	Prioritariamente muito baixa e média	Exclusivamente baixa (estável)	Exclusivamente móvel	Exclusivamente profundo	Exclusivamente ausentes	Exclusivamente perene	FLUTUANTE
k4	Prioritariamente em duto e afloramento	Prioritariamente múltipla , ocorrendo pontual	Exclusivamente com contato	Prioritariamente baixa , ocorrendo muito baixa	Indiferente	Exclusivamente fixa	Prioritariamente raso , ocorrendo profundidades médias	Exclusivamente existentes	Exclusivamente perene	DINÂMICA

Fonte: interpretação dos resultados do GoM.

Sinteticamente, as *nascentes freáticas* são aquelas em que o efeito da sazonalidade se dá na diminuição da vazão e não na mobilidade ou intermitência, como resposta a uma morfologia local bem definida, responsável pela exfiltração. Por sua vez, as *nascentes sazonais* possuem modificações severas devido à recessão hidrológica, alterando suas características hidrogeomorfológicas sazonalmente, ocasionando sua intermitência. Nos casos em que a morfologia permite a mobilidade da exfiltração ao longo das variações meteorológicas e a drenança é mantida, configuram-se as *nascentes flutuantes*. Por fim, as *nascentes dinâmicas* possuem alto poder erosivo, denotado por sua morfologia e seu tipo de exfiltração, o que garante o contato entre o nível freático e a superfície durante todo o ano hidrológico.

A inserção das 24 nascentes estudadas nos quatro perfis criados permite compreender melhor a tipologia proposta. A FIG. 34 mostra a frequência das nascentes nos tipos puros, ajustados ou híbridos.

FIGURA 34 – Distribuição percentual das nascentes estudadas nos tipos propostos.



Fonte: GoM 3.4.

Mais de 83% dos casos foram bem explicados por apenas um tipo ($g_{ik} \geq 0,7$). As nascentes sazonais foram as mais comuns, com 33,3% dos casos, seguidas pelas nascentes dinâmicas (25%). Isso pode ser explicado pelo elevado grau de intermitência das nascentes selecionadas para o estudo. As nascentes flutuantes também apresentaram um percentual significativo (16,7%), o dobro daquele verificado para nascentes freáticas (8,3%).

As demais nascentes (16,8%) foram consideradas híbridas, uma vez que foi necessária a soma dos g_{ik} de dois tipos para que se alcançasse o grau de pertinência de 0,7. Sendo assim,

quatro tipos híbridos foram identificados, cada um com apenas um caso representando-o. Assim, tem-se uma nascente dinâmica-flutuante, uma flutuante-sazonal, uma dinâmica-sazonal e outra sazonal-dinâmica. Os dois últimos tipos híbridos são diferenciados pelo grau de pertinência maior a k_4 e k_2 , respectivamente.

5.4.1. ESPACIALIZAÇÃO DOS TIPOS DE NASCENTE

Encaixar cada uma das nascentes estudadas nos perfis criados é o primeiro passo para uma investigação sobre as relações espaciais entre as tipologias existentes. Não obstante, as relações causa-consequência traçadas perpassam processos locais, mas também, regionais, denotando clara influência de distintas escalas geomorfológicas na formação desses tipos.

A TAB. 5 apresenta o grau de pertencimento das nascentes estudadas aos perfis estabelecidos. Inicialmente, nota-se que para a grande maioria das nascentes os valores de g_{ik} são próximos a um para algum perfil, conforme afirmado anteriormente. Por outro lado, poucos são os casos em que não há g_{ik} superior a 0,7 em algum perfil.

As nascentes PV03 e SC01 encontram-se perfeitamente inseridas no conjunto das freáticas. Ambas possuem vazões extremamente elevadas (em comparação às demais) e características hidrogeomorfológicas idênticas. Além dessas duas, somente PV14 possui g_{ik} diferente de zero para esse perfil, ainda que muito baixo, impossibilitando sua inserção na classe das freáticas.

Já no grupo das nascentes sazonais, encontram-se LS05, SC10, SC12, SC18, SC24 e SC28 com grau de pertinência igual a um. LS06, LS15, PV14, SC14 e SC19 também possuem algum percentual de inserção nesse grupo, apesar de somente as duas últimas poderem ser classificadas como sazonais, além daquelas com pertinência pura.

A classe das nascentes flutuantes tem com grau de pertinência igual a um, as nascentes LS14, SC04, SC23 e SC29. Outras cinco nascentes possuem algum percentual de enquadramento na classe das flutuantes (LS02, PV14, SC14, SC19 e SC27), porém, nenhuma com valor de g_{ik} elevado o suficiente para serem definidas por esse tipo.

TABELA 5
Grau de pertencimento das nascentes nos perfis criados
(g_{ik})*

Nascente	Freática	Sazonal	Flutuante	Dinâmica
LS02	0,00	0,00	0,46	0,54
LS05	0,00	1,00	0,00	0,00
LS06	0,00	0,65	0,00	0,35
LS13	0,00	0,00	0,00	1,00
LS14	0,00	0,00	1,00	0,00
LS15	0,00	0,49	0,00	0,51
PV03	1,00	0,00	0,00	0,00
PV05	0,00	0,00	0,00	1,00
PV07	0,00	0,00	0,00	1,00
PV11	0,00	0,00	0,00	1,00
PV14	0,28	0,29	0,43	0,00
SC01	1,00	0,00	0,00	0,00
SC04	0,00	0,00	1,00	0,00
SC05	0,00	0,00	0,00	1,00
SC10	0,00	1,00	0,00	0,00
SC12	0,00	1,00	0,00	0,00
SC14	0,00	0,92	0,08	0,00
SC18	0,00	1,00	0,00	0,00
SC19	0,00	0,89	0,11	0,00
SC23	0,00	0,00	1,00	0,00
SC24	0,00	1,00	0,00	0,00
SC27	0,00	0,00	0,28	0,72
SC28	0,00	1,00	0,00	0,00
SC29	0,00	0,00	1,00	0,00

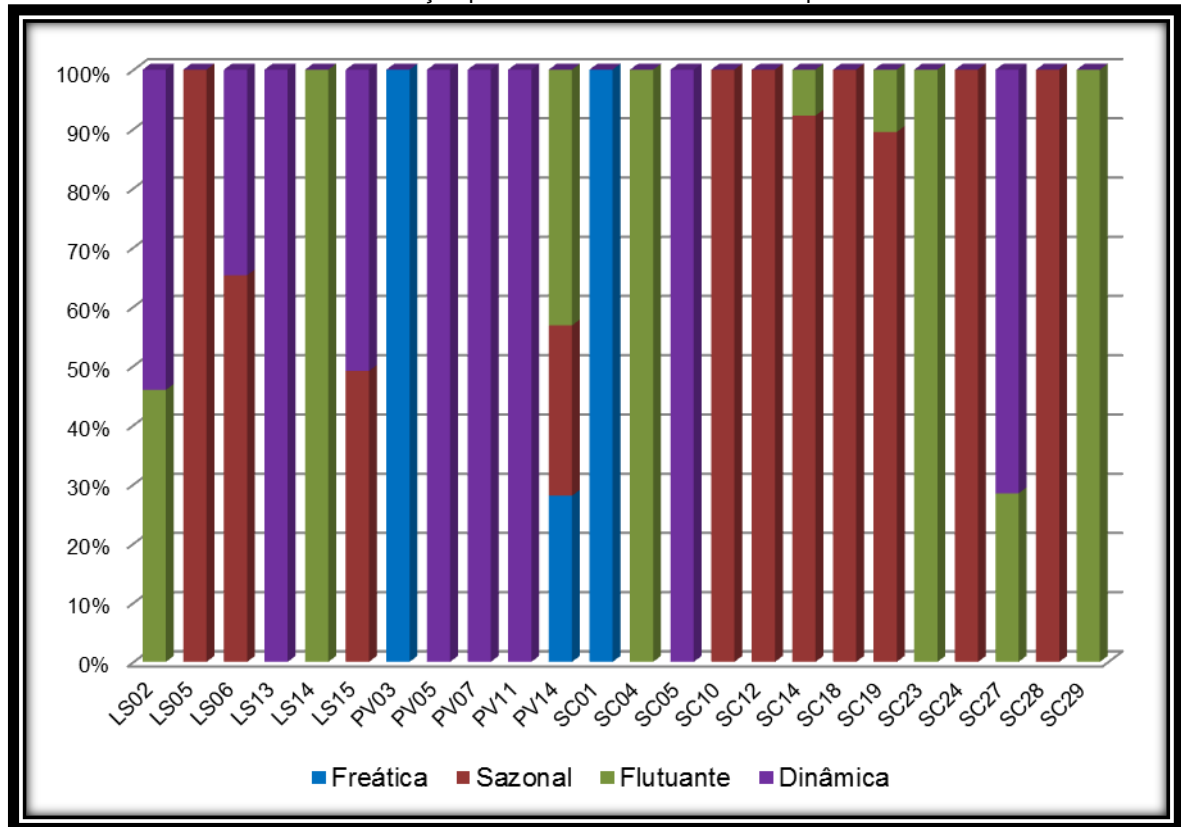
Fonte: Output do programa GoM 3.4

* Valores elevados destacados.

Por fim, enquadram-se como nascentes dinâmicas LS13, PV05, PV07, PV11 e SC05, todas com g_{ik} igual a um. Além disso, SC27 também pode ser rotulada como dinâmica ao registrar grau de pertencimento a este grupo superior a 0,7. Ademais, LS02, LS06 e LS15 registram algum percentual de inserção nessa classe, ainda que pequeno.

A FIG. 35 apresenta a inserção percentual de cada nascente estudada em cada grupo criado, trazendo de forma visual os resultados expressos na TAB. 5. Nele é facilitada a visualização dos tipos puros, ajustados e híbridos encontrados, bem como a distinção entre os tipos predominantes em cada uma das duas áreas de estudo (Lagoa Santa e Serra do Cipó).

FIGURA 35 – Inserção percentual das nascentes nos tipos levantados.

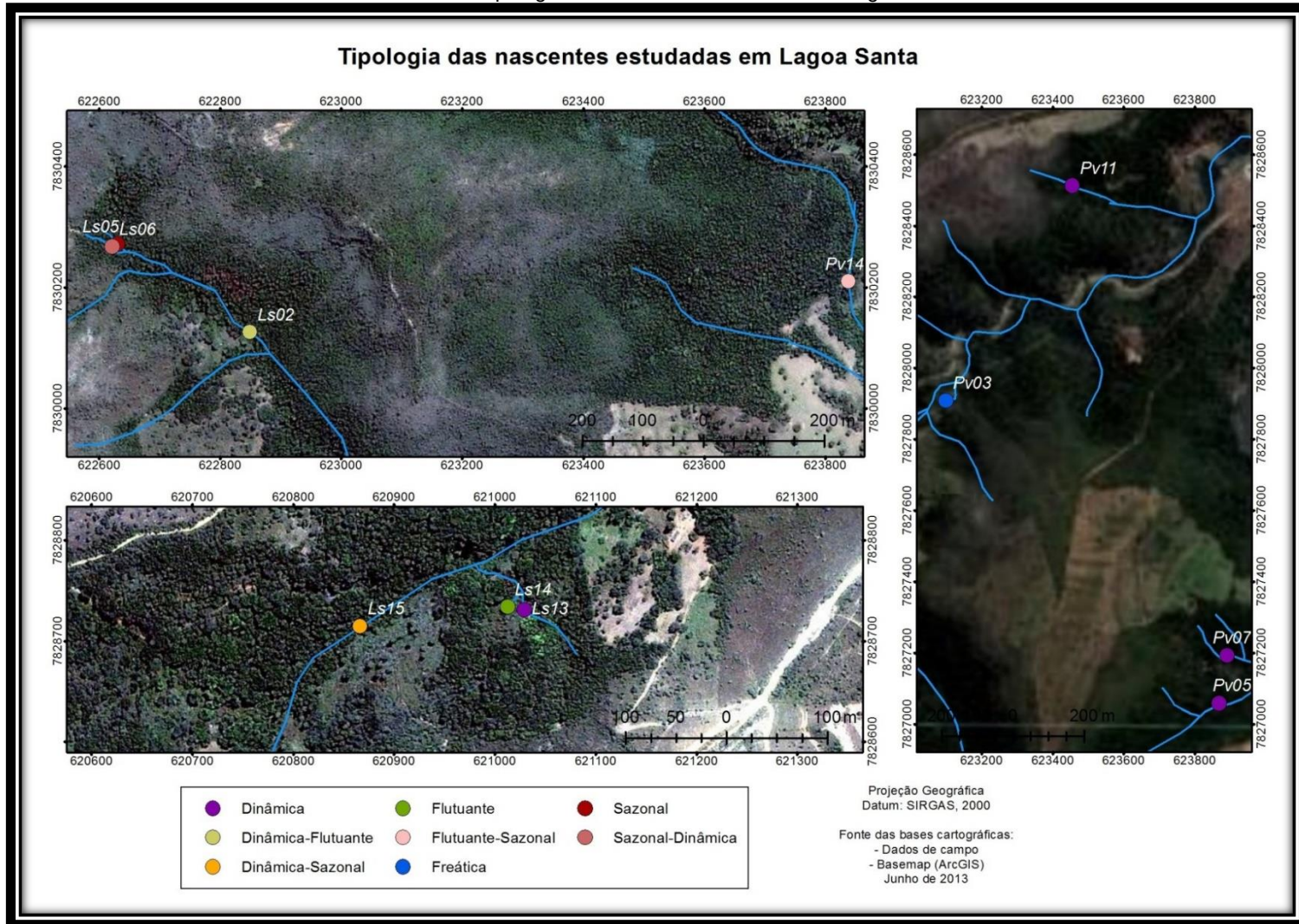


É nítida a predominância, nas nascentes de Lagoa Santa, do tipo dinâmica (FIG. 35), abrigoando quatro dos cinco casos puros dessa classe. Além disso, esse tipo aparece de forma menos expressivas em três outras nascentes da área de estudo. As nascentes sazonais também aparecem em Lagoa Santa, na forma de um caso puro e três híbridos. Em menor expressão, ocorrem os tipos flutuante e freático.

A tipologia das nascentes da Serra do Cipó é substancialmente distinta daquela verificada em Lagoa Santa (FIG. 35). Há predominância absoluta do tipo sazonal, com cinco casos puros e dois ajustados. Destaca-se também a classe das flutuantes, que abrigam três nascentes puras e alguma pertinência em três outros casos. Registram-se, também, na Serra do cipó duas nascentes dinâmicas (uma pura e uma ajustada) e uma nascente integralmente freática.

Apesar dessa nítida distinção entre as duas áreas de estudo, a proximidade espacial de nascentes do mesmo tipo é dúbia. Em Lagoa Santa, só é possível perceber certa proximidade espacial entre as nascentes dinâmicas (PV05, PV07 e PV11), como pode ser visualizado na FIG. 36. Mesmo entre casos localizados em bacias de pequena dimensão, como LS05, LS06 e LS02 e LS13, LS14 e LS15, não há clara correspondência entre as classes; ainda que no primeiro trio aja certa relação entre as nascentes híbridas.

FIGURA 36 – Tipologia das nascentes estudadas em Lagoa Santa.



Fonte: elaborado pelo autor.

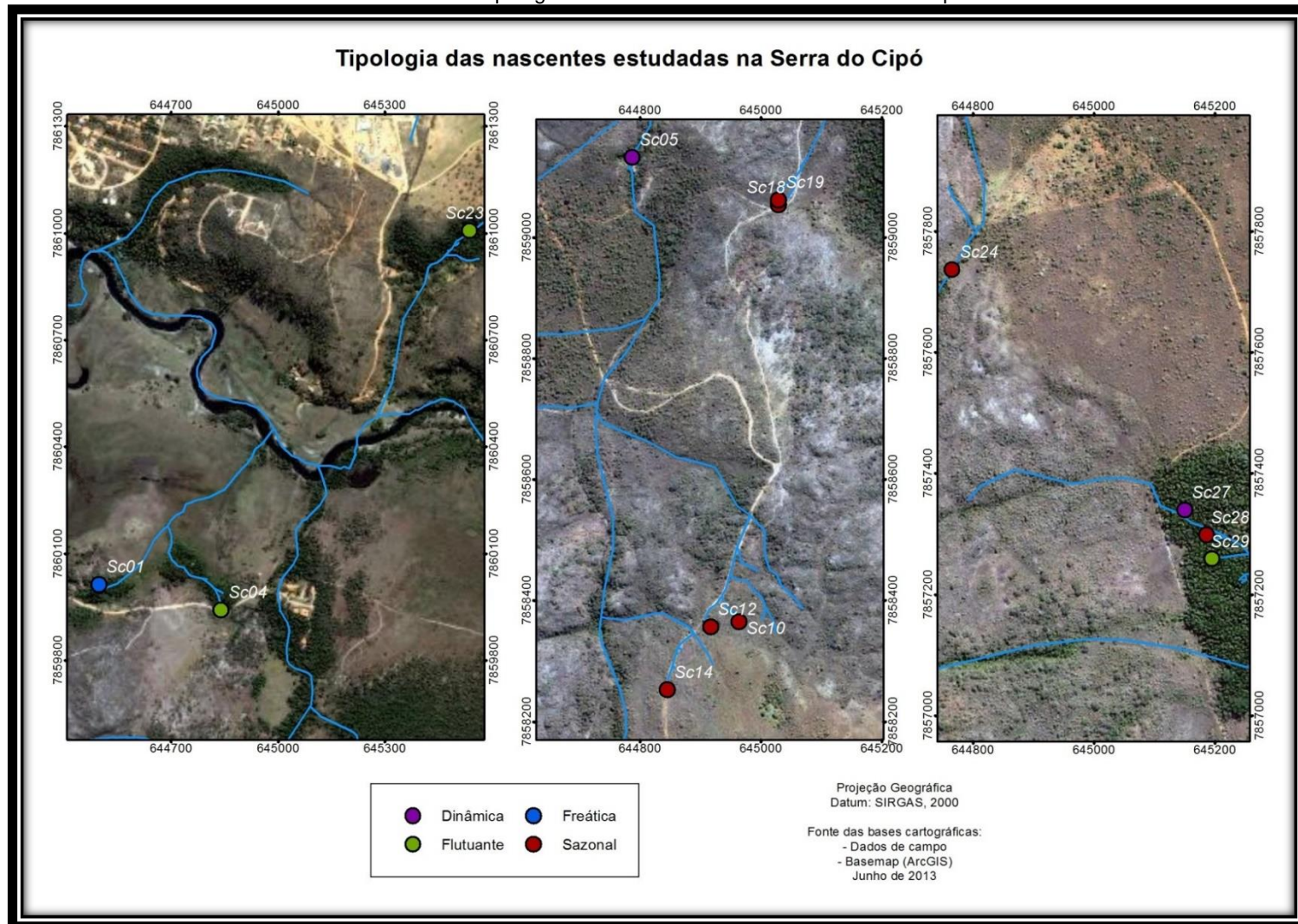
Por outro lado, as nascentes estudadas na Serra do Cipó (FIG. 37) mostram uma menor diversidade de tipologias. Talvez por este motivo possa-se visualizar uma maior correspondência espacial entre nascentes do mesmo tipo. Esse é o caso das nascentes SC10, SC12, SC14, SC18 e SC19, todas sazonais. Por outro lado, nascentes muito próximas como SC27, SC28 e SC29, possuem, cada uma, um tipo distinto.

Essas constatações reafirmam a influência dos processos e feições geomorfológicas em duas escalas distintas: a regional e a local. Na escala regional (G-III e G-IV da escala de Cailleux e Tricart), a formação dos grandes compartimentos do relevo leva a diferentes características do manto de intemperismo, que foi demonstrado como um fator definidor nas tipologias encontradas. Assim, as nascentes na Depressão do Alto-Médio São Francisco tendem a se inserir na classe dinâmica, onde a ação pedogenética mais intensa do que a morfogenética permite a formação de coberturas superficiais espessas que funcionam como aquíferos granulares. Por outro lado, na Serra do Cipó, os processos morfogenéticos são mais intensos, reduzindo a espessura do manto de intemperismo e, por conseguinte, a capacidade de armazenamento e distribuição gradativa da água ao longo do período de estiagem. Desse modo, predominam nascentes sazonais.

A escala local (G-VII e G-VIII) também é essencial na compreensão da tipologia das nascentes. Os processos erosivos e desnudacionais que geram as pequenas formas do relevo, também definem a exfiltração da água do meio subterrâneo ao promoverem o contato entre o nível freático e o nível topográfico. Assim, a erosão concentrada, a erosão subsuperficial em duto, a cavitação, entre tantos outros processos, criam as formas nas quais as nascentes estarão localizadas.

Por fim, pouco se pode afirmar sobre a influência de uma escala geomorfológica intermediária (G-V) na tipologia das nascentes. Diversos casos que compartilham a mesma vertente, ou a mesma bacia de cabeceira, não apresentaram correspondência tipológica. Nessa escala espacial, são necessários estudos mais aprofundados para compreender a influência dos processos dessa grandeza nas nascentes.

FIGURA 37 – Tipologia das nascentes estudadas na Serra do Cipó.



Fonte: elaborado pelo autor.

6. DINÂMICA HIDROLÓGICA SAZONAL

6.1. SAZONALIDADE DAS NASCENTES

As nascentes possuem variações sazonais diretamente relacionadas ao comportamento climático regional, o que se reflete em oscilações na vazão ao longo do ano hidrológico. Por serem zonas de descarga dos aquíferos (DAVIS, 1966), possuem dinâmica dependente da recarga da água subterrânea e dos processos hidrológicos que a movimentam até sua exfiltração. Sendo assim, não se pode ignorar a importância de outros fatores ambientais, além do clima, na dinâmica dos hidrossistemas (CHORLEY, 1980), entre eles, as nascentes.

O clima é um fator preponderante para a dinâmica hidrológica das nascentes, uma vez que, o balanço entre a precipitação, infiltração/percolação e a evapotranspiração é o responsável pelo armazenamento subterrâneo e o escoamento dos hidrossistemas (CUSTODIO e LLAMAS, 1976; SILVEIRA et al., 2002). Porém, nascentes localizadas em uma mesma região climática, sob um mesmo regime pluviométrico, podem possuir diferentes respostas hidrológicas.

Chorley (1980) aponta a geologia, a geomorfologia, a vegetação e o uso e ocupação do solo como os elementos definidores dessa variabilidade no tempo de resposta entre a precipitação e a vazão. A interação de todos esses fatores definirá o tipo e a energia dos fluxos subterrâneos, interferindo no período de tempo desde a infiltração da água da chuva nas zonas de recarga dos aquíferos, até sua exfiltração nas zonas de descarga.

Como as nascentes são ambientes da grandeza escalar de um geótopo (BERTRAND, 2004), variações locais em quaisquer desses fatores podem motivar diferentes comportamentos sazonais. Como demonstrado por Felipe e Magalhães Jr (2009), fraturas nas rochas, pequenas rupturas de declive no terreno, microfeições erosivas ou mesmo a posição das raízes das plantas, podem definir a variabilidade da vazão das nascentes.

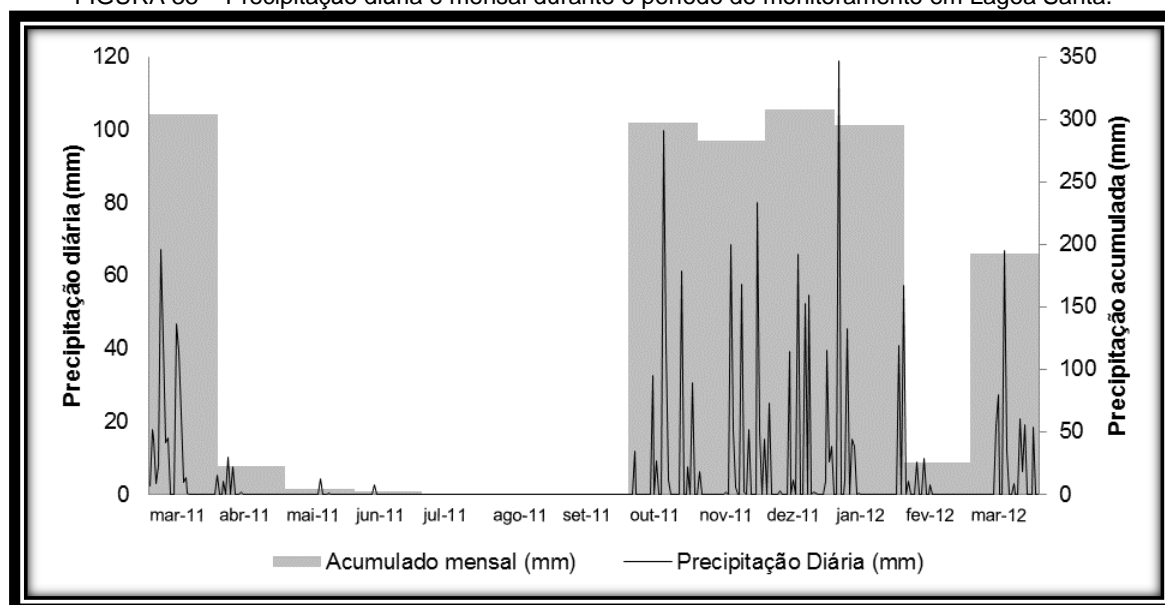
A sazonalidade das nascentes é definida pela dinâmica dos fluxos hidrológicos ao longo do ano. Nascentes efêmeras, excetuando-se casos muito específicos, tendem a ser alimentadas pelo escoamento superficial de saturação (*saturation overland flow*) ou ainda pelo escoamento hortoniano (*hortonian flow*) (KNIGHTON, 1984), por este motivo, estão diretamente relacionadas aos eventos chuvosos. Por sua vez, as nascentes intermitentes ou perenes

relacionam-se ao escoamento subsuperficial (*throughflow*) e ao escoamento de base (*baseflow*) (CUSTODIO e LLAMAS, 1976; WARD; TRIMBLE, 2004). Durante o período chuvoso, o escoamento subsuperficial possui importante papel na vazão das nascentes, porém, com o prolongamento do período de seca, a drenagem passa a responder exclusivamente pelo escoamento de base. Assim, enquanto nas nascentes intermitentes a oscilação do nível freático interrompe o escoamento de base em parte do ano cessando a exfiltração, nas nascentes perenes, mesmo no período seco, o escoamento de base persiste.

A pluviometria das áreas de estudo emerge como importante variável nessa contextualização. Conforme descrito anteriormente, ambas possuem dupla estacionalidade climática refletida em um período seco e outro úmido. Porém, a distribuição diária das chuvas também é importante, uma vez que as nascentes podem ter respostas rápidas à recarga, minimizando a influência da sazonalidade. Por esse motivo, a precipitação foi monitorada diariamente em Lagoa Santa e no Parque Nacional da Serra do Cipó (PNSCi).

A precipitação mensurada em Lagoa Santa durante o período de monitoramento atingiu um acumulado anual de 1.545 mm, comportando-se de forma similar à tendência climática regional (FIG. 38). O mês de março de 2011 apresentou um acumulado pluviométrico elevado (304 mm) que caiu bruscamente nos meses de abril e maio. Enquanto o mês de abril foi marcado por um período de aproximadamente dez dias de eventos chuvosos de pequena magnitude, maio e junho tiveram apenas eventos esporádicos, resultando em acumulados mensais muito baixos (4 e 2 mm, respectivamente).

FIGURA 38 – Precipitação diária e mensal durante o período de monitoramento em Lagoa Santa.



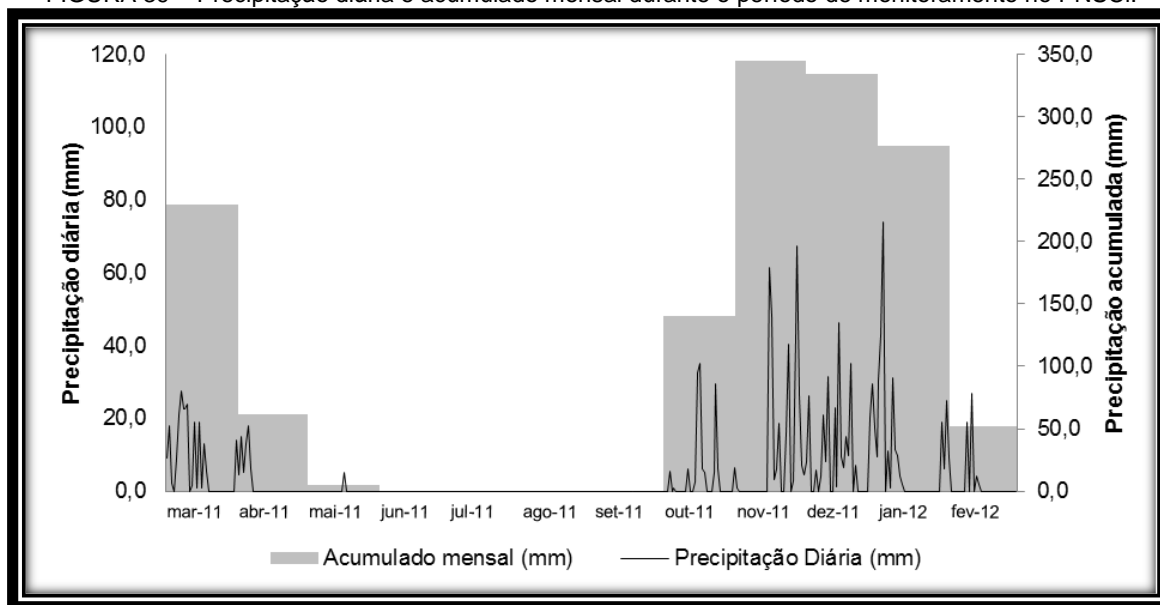
Fonte: Dados de campo.

A partir desse momento, iniciou-se um período que se estendeu até o início de outubro com precipitação nula. Porém, a partir da segunda semana de outubro eventos significativos marcaram a precipitação diária, resultando em um acumulado mensal de 297 mm e iniciando o período úmido. Os meses de novembro e dezembro de 2011 e janeiro de 2012 mantiveram a tendência de acumulados elevados, com o máximo mensal registrado em dezembro (308 mm).

Porém, os meses de janeiro e fevereiro de 2012 apresentaram precipitação atípica, marcada por veranico (CARVALHO *et al.*, 2000). Apesar de sucessivos eventos chuvosos nas duas primeiras semanas, verificou-se um período de 29 dias com precipitação nula, que se estendeu até meados de março. Como resultante, o acumulado mensal de fevereiro foi consideravelmente inferior às médias históricas (25 mm).

Apesar de um comportamento sazonal similar, a precipitação na Serra do Cipó (FIG. 39) apresenta características ligeiramente distintas dessas apresentadas para Lagoa Santa. O total pluviométrico no período de monitoramento (mar-11 a fev-12) foi de 1.445 mm mensurados no pluviômetro instalado na sede administrativa do Parque Nacional da Serra do Cipó, 100 mm a menos do que o acumulado anual de Lagoa Santa para o mesmo período.

FIGURA 39 – Precipitação diária e acumulado mensal durante o período de monitoramento no PNSCi.



Fonte: Dados de campo.

Os meses de março e abril foram marcados por sucessivos eventos de precipitação que superaram os 15 mm diários. Porém, após meados de abril esses eventos cessaram, configurando um primeiro bimestre com acumulados mensais de 230 mm e 62 mm,

respectivamente. No mês de maio, por sua vez, foi registrado apenas um evento de precipitação de 5 mm, representando o acumulado mensal.

A partir de junho, iniciou-se um período de estiagem completa que perdurou até o final de setembro. A partir do início de outubro, eventos chuvosos ocorreram esporadicamente, ultrapassando os 30 mm diários em duas ocasiões, promovendo um acumulado mensal de 141 mm. A frequência e intensidade das chuvas aumentaram gradativamente nos meses subsequentes. Novembro apresentou o maior acumulado mensal do período, com 346 mm, e acumulados diários que ultrapassaram 40 mm em três ocasiões.

Até meados de janeiro essa configuração se manteve, quando ocorreu um período de estiagem de 12 dias, diminuindo o acumulado mensal. Fato semelhante ocorreu em fevereiro, quando foram verificados apenas quatro dias de precipitação, fazendo um acumulado mensal de 52 mm. Esses dois períodos de veranico coincidiram com aqueles registrados em Lagoa Santa (FIG. 38).

Comparando as duas áreas de estudo, além do menor total pluviométrico, a Serra do Cipó apresenta um maior período de estiagem, além de um mês de outubro (início do período úmido) menos chuvoso (FIG. 38 e 39).

Por outro lado, os meses de abril e fevereiro, que registram totais pluviométricos baixos em Lagoa Santa, somam acumulados consideravelmente mais elevados na Serra do Cipó. Além disso, ressalta-se que em Lagoa Santa os eventos chuvosos ocorreram em menor número (87 dias com precipitação superior a zero) e maior intensidade do que na Serra do Cipó, onde eles são mais bem distribuídos em 97 dias de chuva.

A complexidade da interação dos fatores ambientais (geologia, geomorfologia, clima, vegetação e sociedade) que controlam o regime hidrológico reflete nos resultados deste trabalho. As duas áreas de estudo (Lagoa Santa e Serra do Cipó) apresentam um regime pluviométrico similar, com dupla estacionalidade climática bem definida. Todavia, o comportamento sazonal das nascentes estudadas é consideravelmente distinto entre essas áreas (QUADRO 6).

QUADRO 6
Sazonalidade das nascentes



Nascente	Intermitência	Número de meses de seca	Mês de início da seca	Mês de término da seca
LS02	Perene	0	-	-
LS05	Intermitente	5	Jul	Dez
LS06	Intermitente	6	Abr	Nov
LS13	Perene	0	-	-
LS14	Perene	0	-	-
LS15	Perene	0	-	-
PV03	Perene	0	-	-
PV05	Perene	0	-	-
PV07	Perene	0	-	-
PV11	Perene	0	-	-
PV14	Intermitente	8	Mar	Nov
SC01	Perene	0	-	-
SC04	Perene	0	-	-
SC05	Intermitente	2	Set	Nov
SC10	Intermitente	4	Jul	Nov
SC12	Intermitente	5	Jun	Nov
SC14	Intermitente	5	Jun	Nov
SC18	Intermitente	4	Jul	Nov
SC19	Intermitente	2	Ago	Out
SC23	Perene	0	-	-
SC24	Intermitente	1	Set	Out
SC27	Perene	0	-	-
SC28	Intermitente	2	Ago	Out
SC29	Perene	0	-	-

Fonte: dados de campo.

Dentre as 24 nascentes estudadas, 11 são intermitentes, apresentando, em média, quatro meses de seca durante o ano. Setembro apresenta-se como o mês mais crítico para a exfiltração (QUADRO 7), já que todas as nascentes intermitentes encontravam-se secas no monitoramento referente a este mês. Além disso, nota-se que a maioria das nascentes intermitentes volta a apresentar drenança no mês de novembro. Apesar de não haver uma tendência clara quanto ao início do período de seca, pode-se afirmar que os meses de junho e julho são, prioritariamente, este marco (QUADRO 7).

QUADRO 7
Período de seca das nascentes intermitentes

Nascente	fev-11	mar-11	abr-11	mai-11	jun-11	jul-11	ago-11	set-11	out-11	nov-11	dez-11	jan-12	fev-12
LS05													
LS06													
PV14													
SC05													
SC10													
SC12													
SC14													
SC18													
SC19													
SC24													
SC28													

Legenda:  seca
 drenante

Fonte: dados de campo

Em Lagoa Santa, as nascentes LS05 e LS06 possuem cinco e sete meses de seca, respectivamente, mesmo estando localizadas muito próximas. O período de intermitência de LS05 é posterior à LS06, denotando uma distribuição mais rápida da água recarregada nesta nascente. A ocorrência de afloramentos rochosos em LS06 contribui para a elevação local no nível freático, todavia, não há manutenção desse nível suspenso durante longo período. A outra nascente de Lagoa Santa que apresenta intermitência é a PV14, sendo, inclusive, a que apresenta maior período de seca de todo o rol: oito meses (março a novembro).

Diferenças geomorfológicas locais significativas podem auxiliar na compreensão dessa distinção entre nascentes de uma mesma unidade geológico-geomorfológica regional. As nascentes LS05 e LS06 encontram-se em uma área de média-alta vertente em material eluvial argiloso com recorrentes afloramentos rochosos nas imediações. Por outro lado, PV14 ocorre na baixa-vertente de um vale entulhado em material colúvio-eluvial com baixo gradiente topográfico.

Na Serra do Cipó, SC24 apresentou-se seca apenas em setembro, sendo o único caso deste tipo verificado. Esta especificidade muito provavelmente está relacionada à mobilidade dessa nascente, que registrou o maior deslocamento sazonal em todo rol. Já SC19, SC28 e SC25 tiveram dois meses de seca, as duas primeiras entre agosto e outubro e a última entre setembro e novembro. Porém, a maioria das nascentes intermitentes dessa área de estudo possui quatro ou cinco meses de seca, ocorrendo entre junho ou julho e novembro.

Nitidamente, há uma diferença entre o comportamento das nascentes de Lagoa Santa e da Serra do Cipó. Em Lagoa Santa, apenas três de suas 11 nascentes são intermitentes (27%), enquanto a intermitência é muito superior entre as nascentes da Serra do Cipó onde oito dentre 14 nascentes são temporárias (57%). Ademais, as nascentes intermitentes de Lagoa Santa apresentam períodos de seca mais prolongados.

Esses resultados estão relacionados à espessura das coberturas superficiais. Mais espessos na Depressão do Alto-Médio São Francisco do que na Serra do Espinhaço Meridional, os solos permitem uma distribuição mais gradual das águas ao longo do ano, prolongando o período de atuação do escoamento subsuperficial. Além disso, a textura mais argilosa das coberturas superficiais das rochas carbonáticas, quando comparadas às metassedimentares do Espinhaço, contribui para uma melhor retenção da água no perfil do solo (LEPSCH, 2011).

A interpretação desses dados deixa nítido que a partir de outubro, o retorno da exfiltração das nascentes intermitentes começa a ocorrer. Novembro é o mês mais significativo nesse sentido, quando apenas uma nascente (LS05) permanecia seca. A partir de dezembro, porém, todas as nascentes passaram a ser drenantes. Por outro lado, o início do período seco foi dúbio. A maior parte das nascentes intermitentes secou em junho ou julho, todavia, há registros dessa ocorrência também em março, abril, agosto e até mesmo setembro.

6.2. HIDROGRAMAS ANUAIS DAS NASCENTES

Os hidrogramas são gráficos que representam a variação da vazão de um determinado hidrossistema em um intervalo de tempo. Nesse sentido, ele apresenta a dinâmica entre precipitação e vazão (entrada e saída) associadas à contribuição dos aquíferos. Quando esses gráficos representam um intervalo de tempo correspondente a um ano hidrológico, são chamados de hidrogramas anuais e podem ser importantes ferramentas na análise da sazonalidade dos hidrossistemas (PINTO, 1986).

A interpretação qualitativa dos hidrogramas leva em consideração três principais pontos de inflexão da curva de vazão. O primeiro marca o início do período de acumulação hídrica, em que o gráfico se torna ascendente devido à influência dos eventos meteorológicos na vazão. Após o período de concentração tem-se o pico de vazão do hidrossistema (valor máximo no período analisado) representado por um ponto de inflexão entre o período de acumulação e o de decaimento (curva descendente). O terceiro ponto localiza-se na mudança no ângulo da

curva de decaimento, quando todo escoamento é resultado dos fluxos de base (CUSTODIO e LLAMAS, 1976; PINTO, 1986).

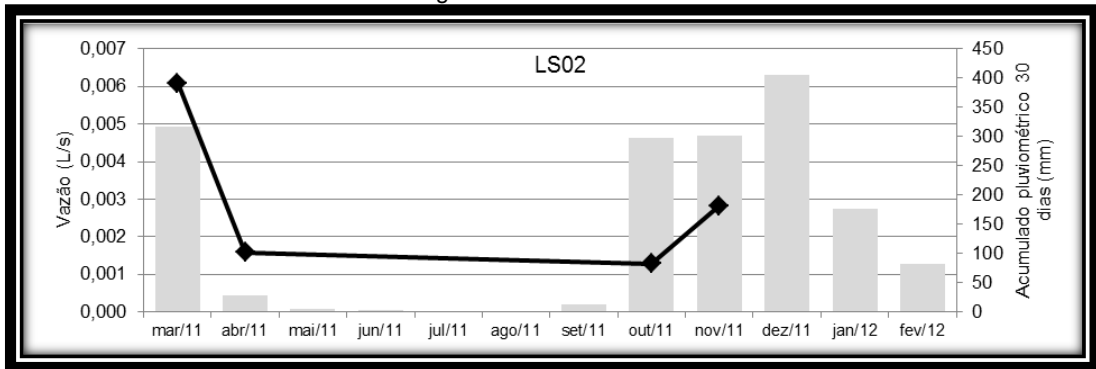
A interpretação desses três pontos (início da acumulação, pico e início da recessão) possibilita a definição do tipo de fluxo responsável pelo escoamento. Todavia, os diversos modelos matemáticos capazes de realizar a separação dos fluxos em hidrogramas anuais exigem a assiduidade dos dados. No caso deste estudo, as limitações tácitas das técnicas de mensuração da vazão das nascentes promoveram uma série de lacunas nos dados. Por esse motivo, optou-se por uma interpretação qualitativa dos hidrogramas das nascentes, uma vez que não há a intenção de utilização desses dados para fins de modelagem. No tratamento gráfico dos dados os valores vazios foram ignorados para facilitar a compreensão da dinâmica hidrológica. Contudo, no tratamento estatístico, as lacunas foram devidamente computadas.

A partir dos hidrogramas anuais³ das nascentes de Lagoa Santa (FIG. 40 a 50), fica evidenciado que o pico de vazão ocorre preferencialmente no mês de dezembro. Esses dados refletem diretamente a influência da precipitação, uma vez que dezembro de 2011 apresentou o maior acumulado de 30 dias durante o período monitorado. Em alguns casos, porém, não foi possível realizar a mensuração da vazão neste mês (sobretudo devido à influência do escoamento superficial concentrado), o que motivou a formação do pico de cheia do hidrograma nos primeiros meses de 2011 (março ou abril).

O ponto de maior vazão do hidrograma anual registra o início do período de decaimento hidrológico. As nascentes de Lagoa Santa apresentam um período de decaimento muito rápido, com moda de um mês e média inferior a três meses. Apenas duas nascentes possuem período de decaimento superior a três meses (LS13 e LS14). Esses resultados apontam para uma ligeira resposta hidrológica das nascentes em relação à precipitação.

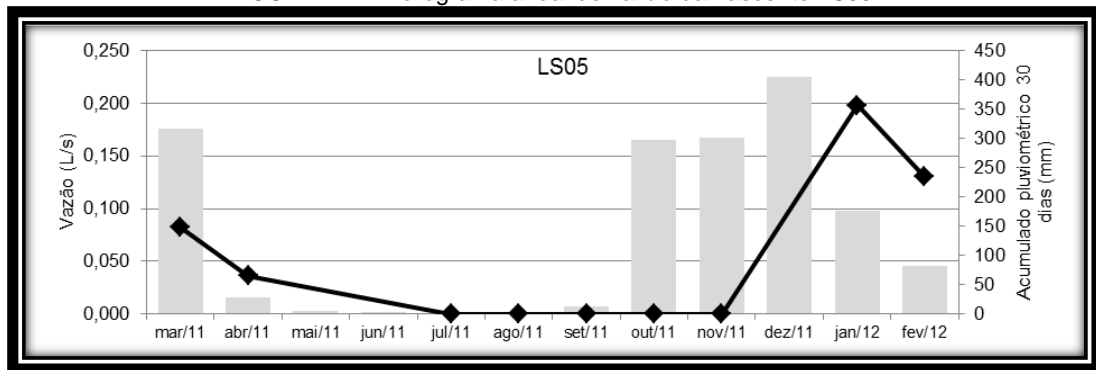
³ Os hidrogramas anuais foram construídos com acumulados pluviométricos de 30 dias a contar a partir da visita às nascentes. Por isso, esses dados não coincidem com o acumulado mensal, já que por vezes o monitoramento das nascentes foi feito nos dias finais do mês de referência e, por vezes, nos dias iniciais do mês subsequente. Em todos os hidrogramas, as vazões mensuradas são apresentadas em pontos e as não mensuradas foram ocultadas. Para fins exclusivamente gráficos, os pontos subsequentes de vazões mensuradas foram ligados ainda que haja meses de vazões não mensuradas entre estes.

FIGURA 40 – Hidrograma anual de vazão da nascente LS02.



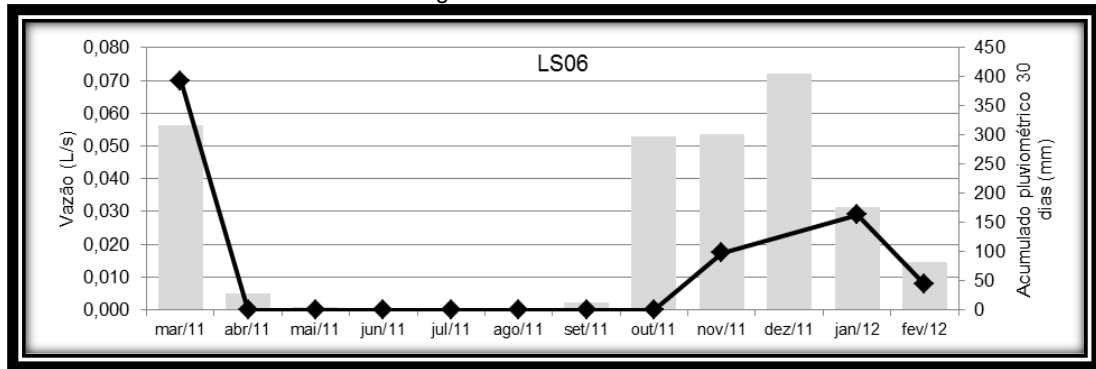
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 41 – Hidrograma anual de vazão da nascente LS05.



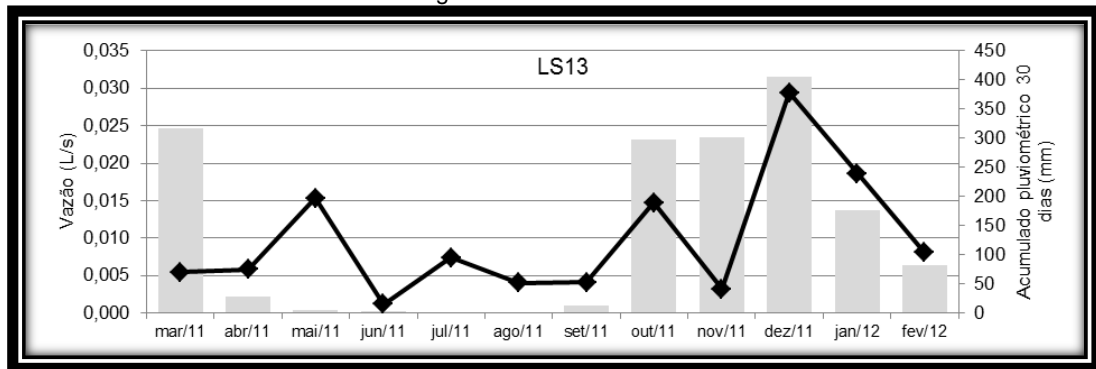
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 42 – Hidrograma anual de vazão da nascente LS06.



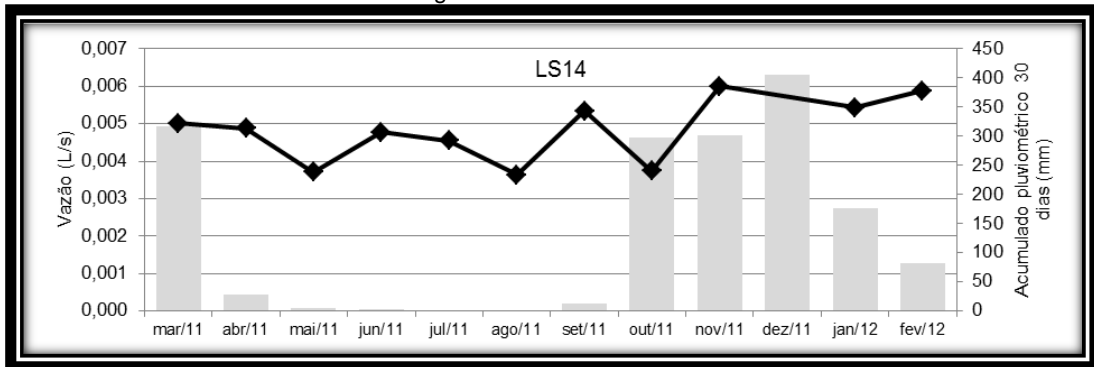
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 43 – Hidrograma anual de vazão da nascente LS13.



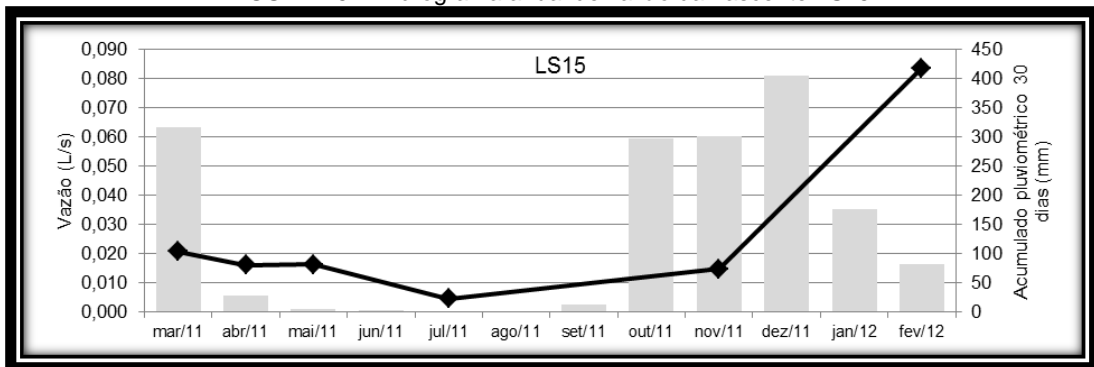
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 44 – Hidrograma anual de vazão da nascente LS14.



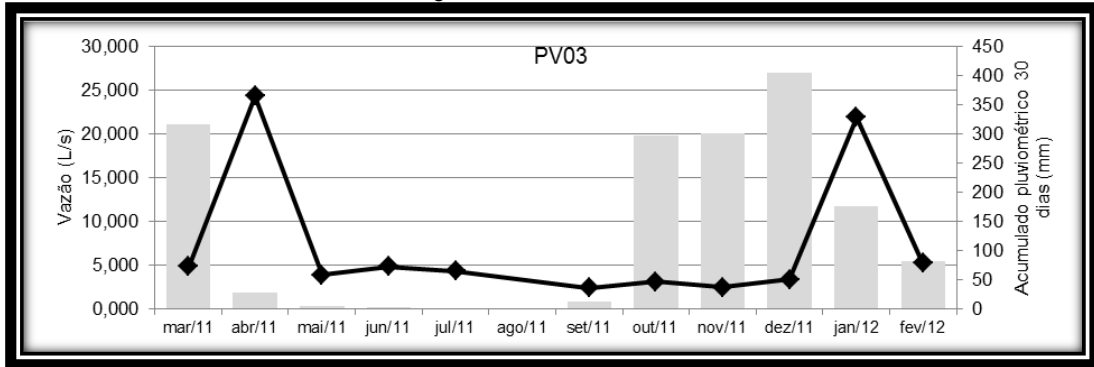
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 45 – Hidrograma anual de vazão da nascente LS15.



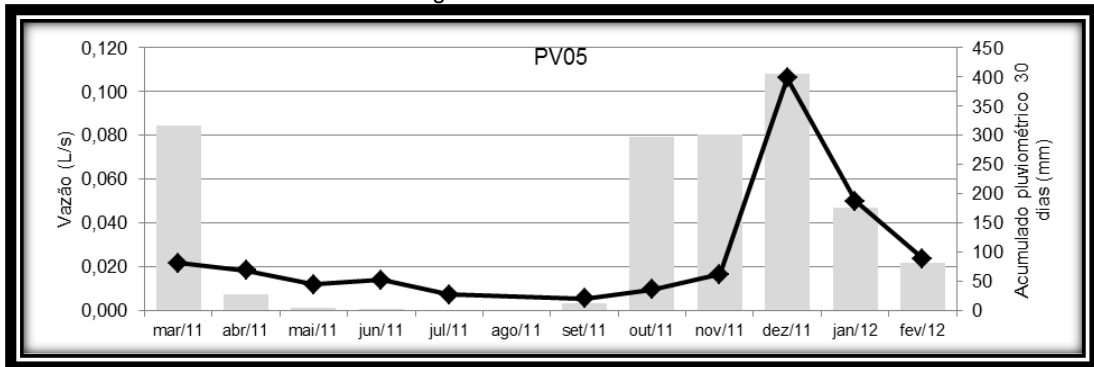
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 46 – Hidrograma anual de vazão da nascente PV03.



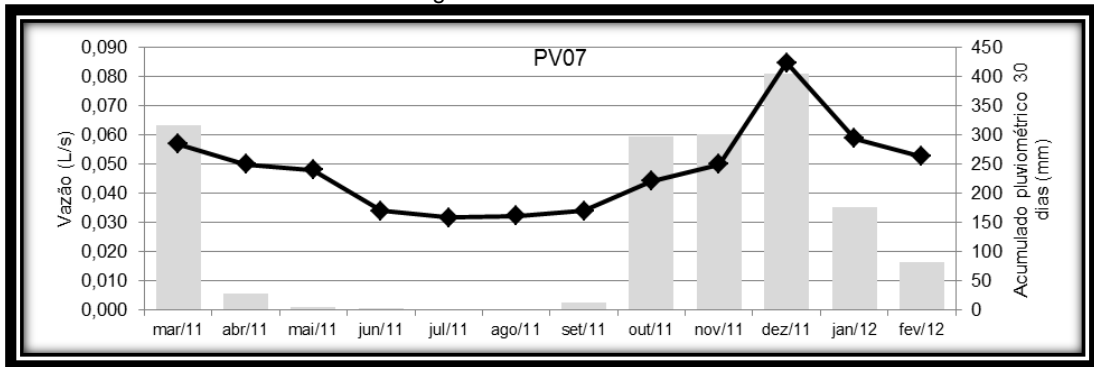
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 47 – Hidrograma anual de vazão da nascente PV05.



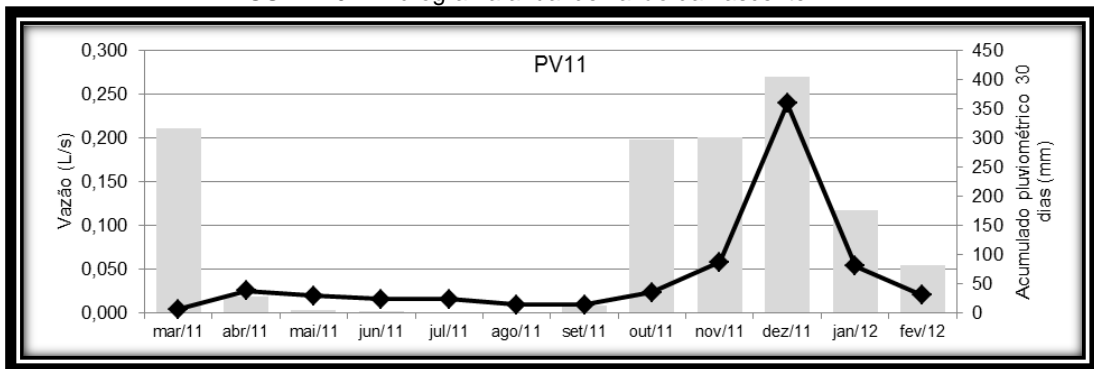
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 48 – Hidrograma anual de vazão da nascente PV07.



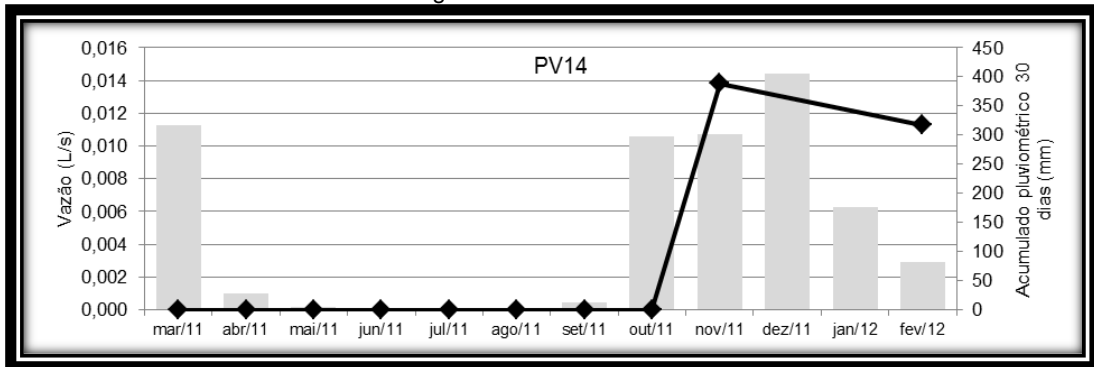
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 49 – Hidrograma anual de vazão da nascente PV11.



Fonte: Dados de campo.

FIGURA 50 – Hidrograma anual de vazão da nascente PV14.



Fonte: Dados de campo.

Por outro lado, o período de recessão é o que apresenta a maior duração dentro do ano hidrológico, seja para as nascentes perenes, seja para as intermitentes. A recessão tende a começar entre março e abril, acompanhando a queda acentuada do acumulado de chuvas. Em alguns casos específicos, o período de recessão inicia-se tardiamente em maio e, em outros, é antecipado para fevereiro, ainda que os 30 dias anteriores ao monitoramento de março de 2011 tenham apresentado o segundo maior acumulado pluviométrico do período.

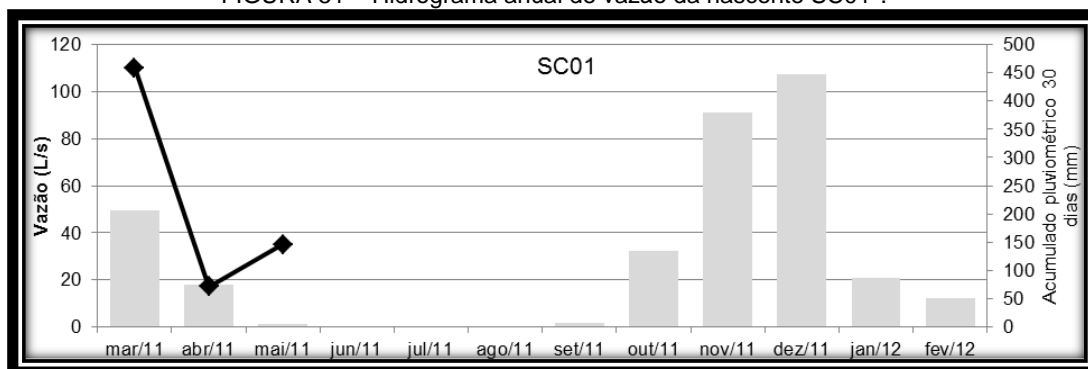
O menor período de recessão registrado é de quatro meses em três nascentes (LS13, LS14 e PV03) e está relacionado a uma antecipação do período de concentração. Todavia, a

duração mais recorrente é de sete meses, tendo, inclusive, uma nascente (PV14) com período de recessão de oito meses. Nota-se que as nascentes intermitentes (LS05, LS06 e PV14) apresentam longos períodos de recessão e curtos períodos de decaimento.

O período com maior regularidade entre as nascentes (demonstrado por seu menor desvio padrão e menor relação entre o desvio padrão e a média) é o de concentração hidrológica. Ele possui em média quatro meses de duração e inicia-se, preferencialmente, em setembro. Nota-se que justamente no início de outubro (dias relacionados ao monitoramento de setembro) foram registradas as primeiras chuvas após 113 dias de estiagem completa.

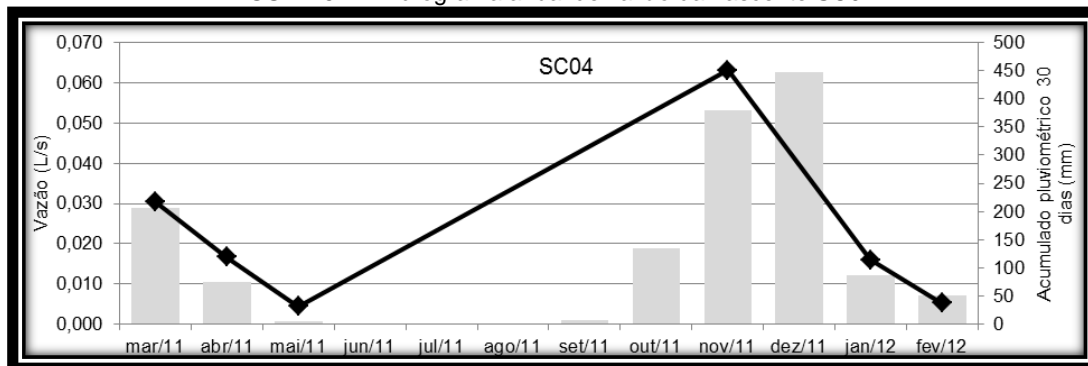
Os hidrogramas anuais das nascentes do PNSCi possuem comportamento similar aos de Lagoa Santa, porém, com especificidades notáveis (FIG. 51 a 63). Os picos de vazão ocorrem entre novembro e dezembro, exclusivamente. Algumas nascentes apresentam um segundo pico preferencialmente no mês de março, quando os valores pluviométricos são mais elevados.

FIGURA 51 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC01⁴.



Fonte: Dados de campo.

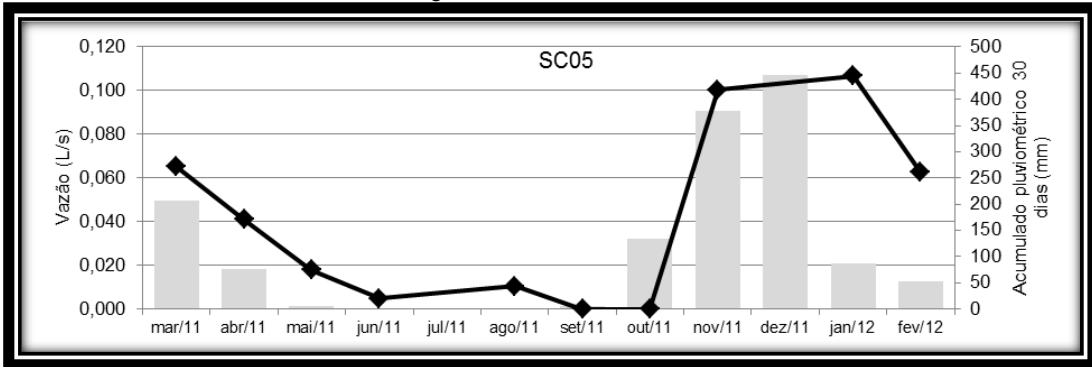
FIGURA 52 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC04.



Fonte: Dados de campo.

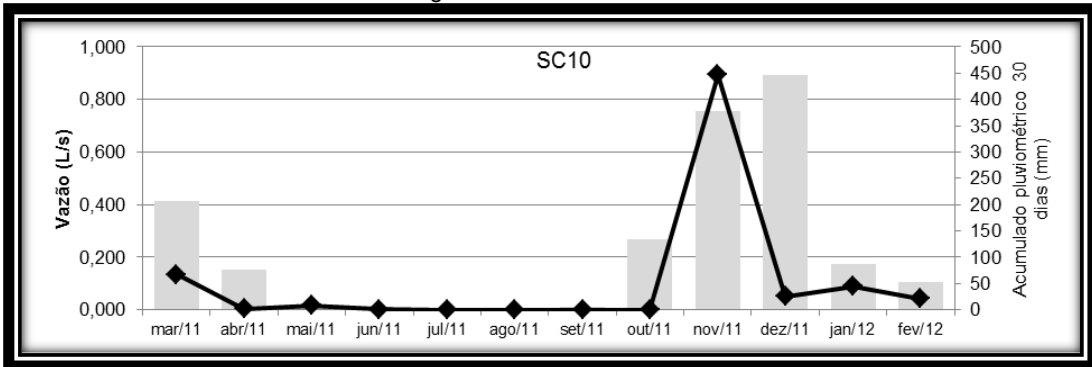
⁴ Como já foi dito anteriormente, a nascente SC01 teve seu monitoramento interrompido uma vez que o proprietário do terreno onde ela se encontra não mais permitiu a entrada da equipe de pesquisa.

FIGURA 53 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC05.



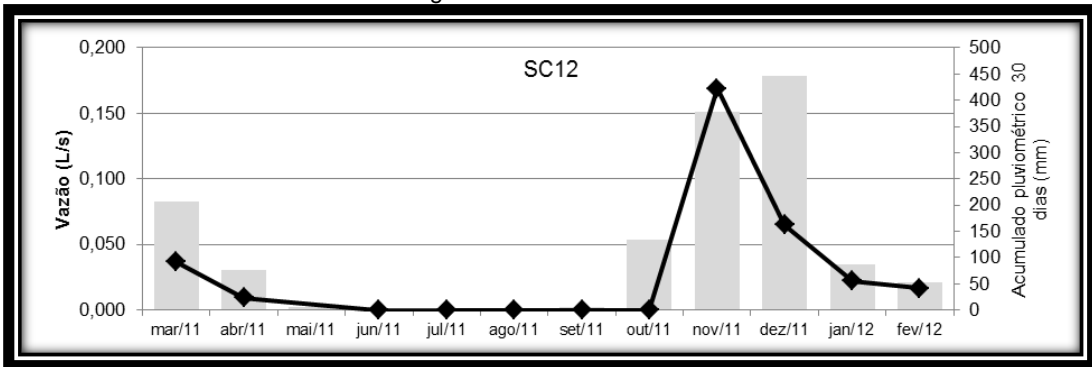
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 54 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC10.



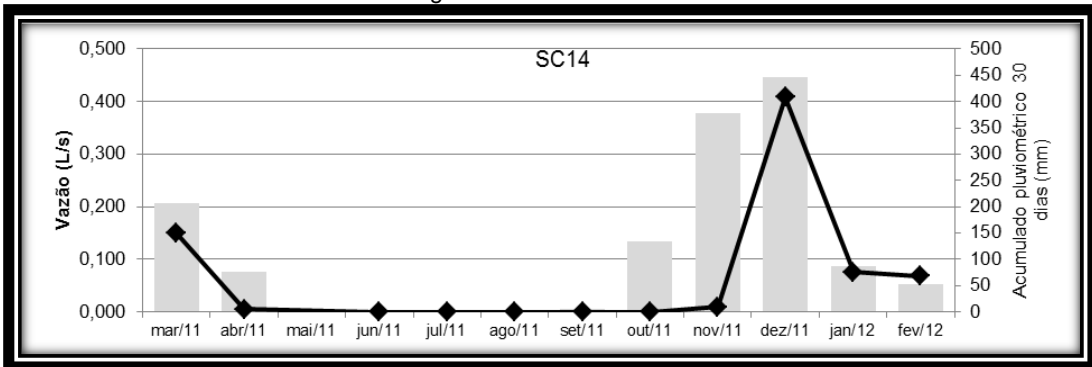
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 55 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC12.



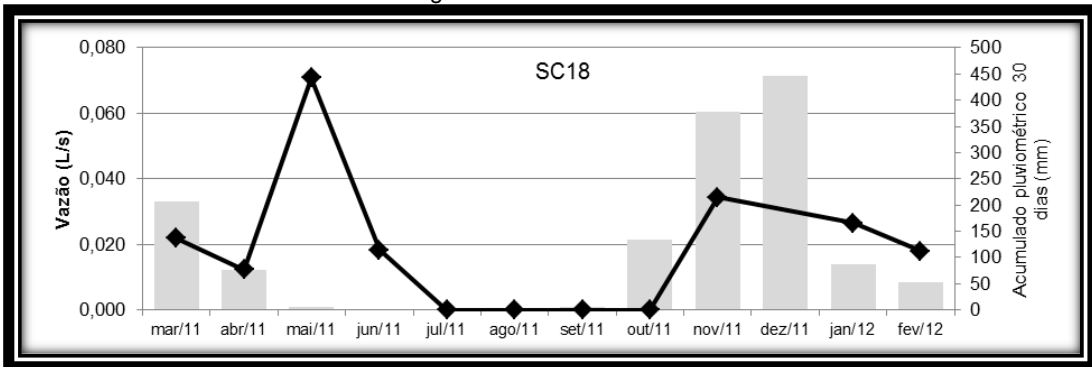
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 56 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC14.



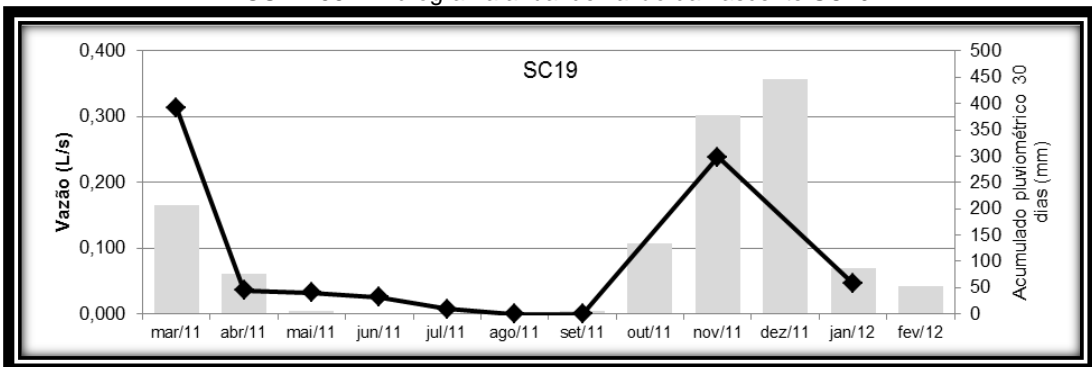
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 57 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC18.



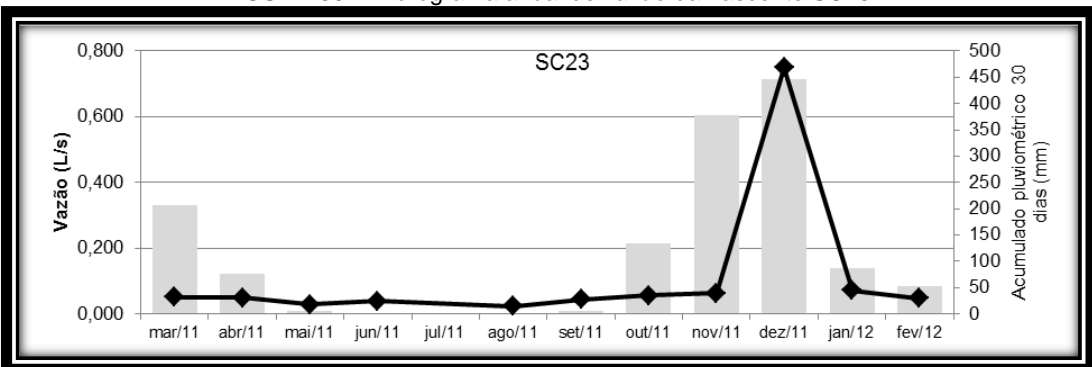
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 58 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC19.



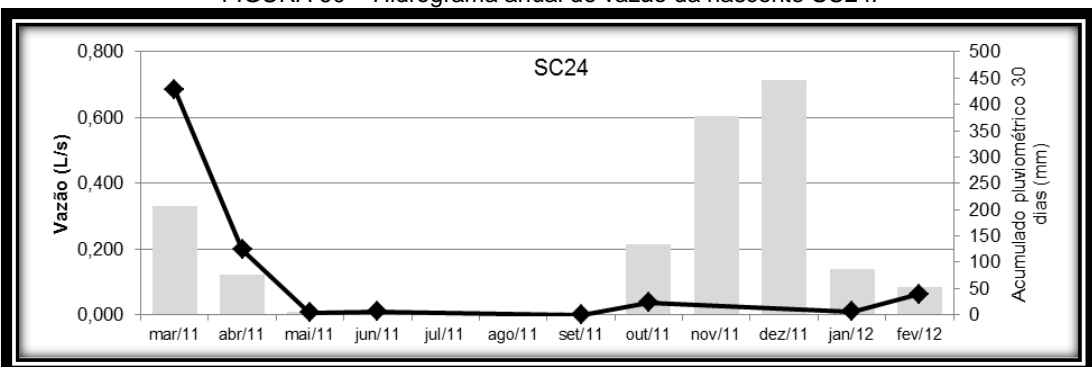
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 59 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC23.



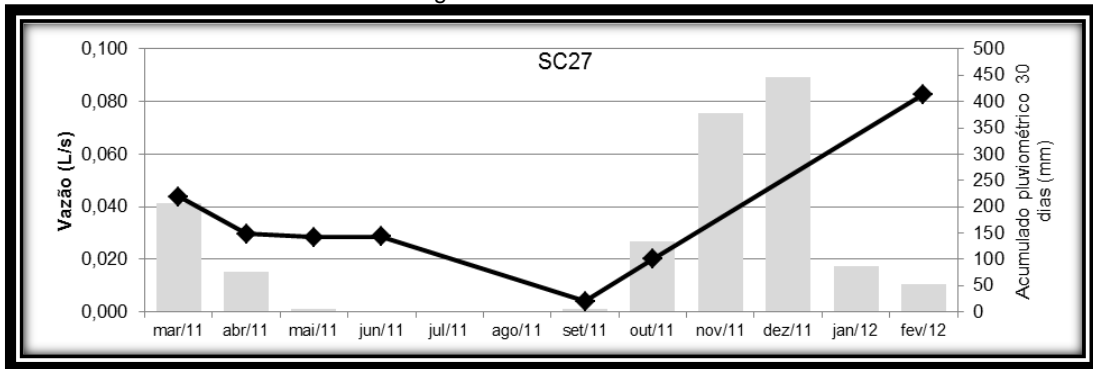
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 60 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC24.



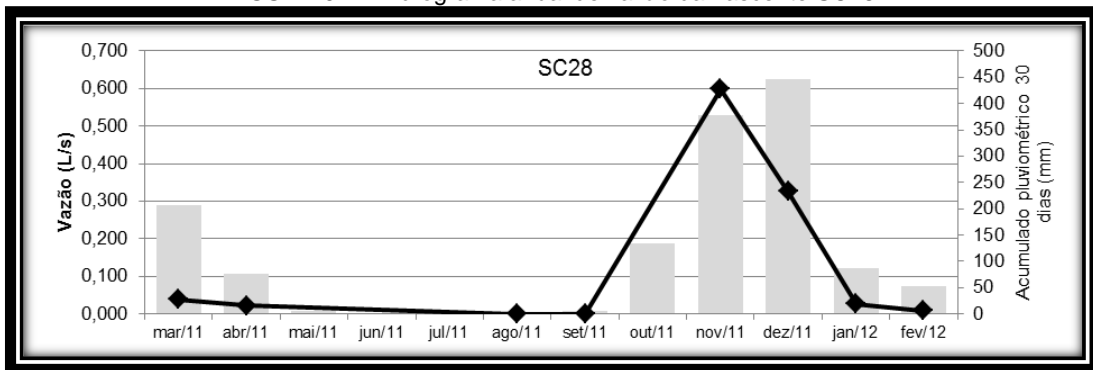
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 61 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC27.



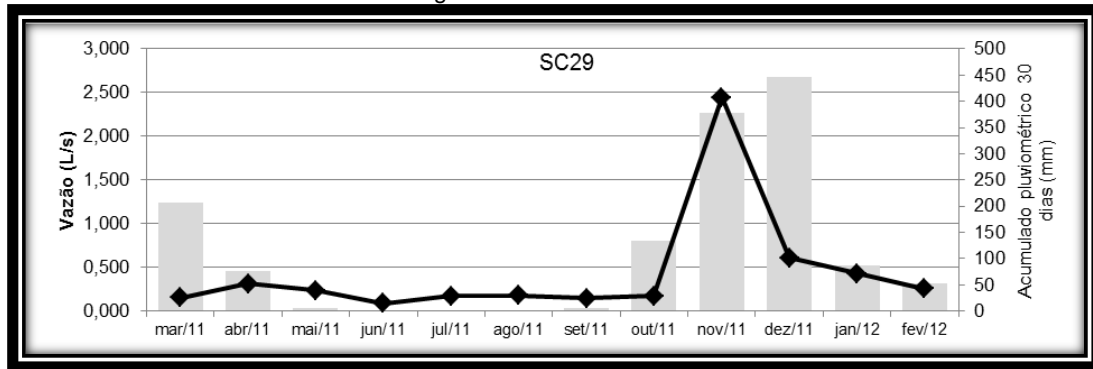
Fonte: Dados de campo.

FIGURA 62 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC28.



Fonte: Dados de campo.

FIGURA 63 – Hidrograma anual de vazão da nascente SC29.



Fonte: Dados de campo.

Essa característica faz com que o período de decaimento seja mais longo do que em Lagoa Santa, durando em média quatro meses. Normalmente, esse período se estende até março-abril ou maio-junho. Especificamente em maio, foi registrada uma severa queda no acumulado mensal de precipitação, que se refletiu diretamente na vazão das nascentes. Em três nascentes (SC04, SC18 e SC27), o decaimento hidrográfico perdura por metade do ano hidrológico (novembro a maio ou dezembro a junho).

Duas nascentes, todavia, apresentam o decaimento muito rápido (SC28 e SC29). Em ambos os casos, o pico de vazão ocorre em novembro e o ponto de inflexão do decaimento em

janeiro. Notadamente, o motivo desse período de decaimento de apenas dois meses associa-se a não ocorrência de um segundo pico de vazão, como ocorreu na maioria das nascentes. Isso indica uma rápida resposta hidrológica dessas nascentes às chuvas. Porém, como SC29 possui um espesso manto de intemperismo, ela permanece drenante durante todo o ano. SC28, todavia, é intermitente, pois o fluxo de base não consegue sustentar a exfiltração por muito tempo devido ao fato da exfiltração ocorrer diretamente na rocha matriz.

Se o decaimento é mais lento do que nas nascentes de Lagoa Santa, o mesmo ocorre com a recessão. O período de recessão dura, em média, seis meses. Nesse ínterim, a alimentação das nascentes é realizada pelo fluxo de base que, devido à longa recessão, promove um elevado percentual de nascentes intermitentes. Entretanto, em Lagoa Santa, os períodos de recessão não são muito diferentes dos registrados no PNSCi, mas o percentual de intermitência é bem menor. Esse fator leva a crer em um escoamento de base mais eficiente nas nascentes de Lagoa Santa, o que permite a ocorrência de um maior período de estiagem sem a interrupção da exfiltração. Muito provavelmente, isso está associado à existência de mantos de intemperismo mais espessos (funcionando como aquíferos granulares), capazes de distribuir de forma mais gradual a água recarregada. Observando-se os dados das nascentes do PNSCi, pode-se comprovar essa hipótese, uma vez que todas suas nascentes perenes possuem coberturas superficiais com profundidade superior a 50cm.

Tal assertiva fica ainda mais clara quando observados os comportamentos hidrológicos das nascentes SC28 e SC29, já referidas anteriormente. Ambas possuem longos períodos de recessão (oito e nove meses, respectivamente) e localizam-se espacialmente muito próximas, mas suas características geomorfológicas são muito distintas. Enquanto SC28 é uma nascente de exfiltração múltipla ocorrendo em contatos estratigráficos do afloramento rochoso (sem cobertura regolítica), SC29 é uma nascente em concavidade, sem afloramentos rochosos próximos, com coberturas superficiais com mais de 50 cm de profundidade. Essas características definem a assiduidade do escoamento de base, fazendo com que SC28 seja intermitente e SC29 seja perene.

As primeiras chuvas da estação não interferem significativamente na vazão das nascentes. Com isso, o período de recessão é prolongado, em detrimento do período de concentração. Provavelmente, esses eventos de precipitação possuem uma influência diária nas vazões, o que não se sustenta por muitos dias a ponto de ser registrado em um monitoramento mensal, como foi feito neste trabalho. Porém, com o aumento do acumulado mensal de chuvas, inicia-se o período de concentração hidrológica.

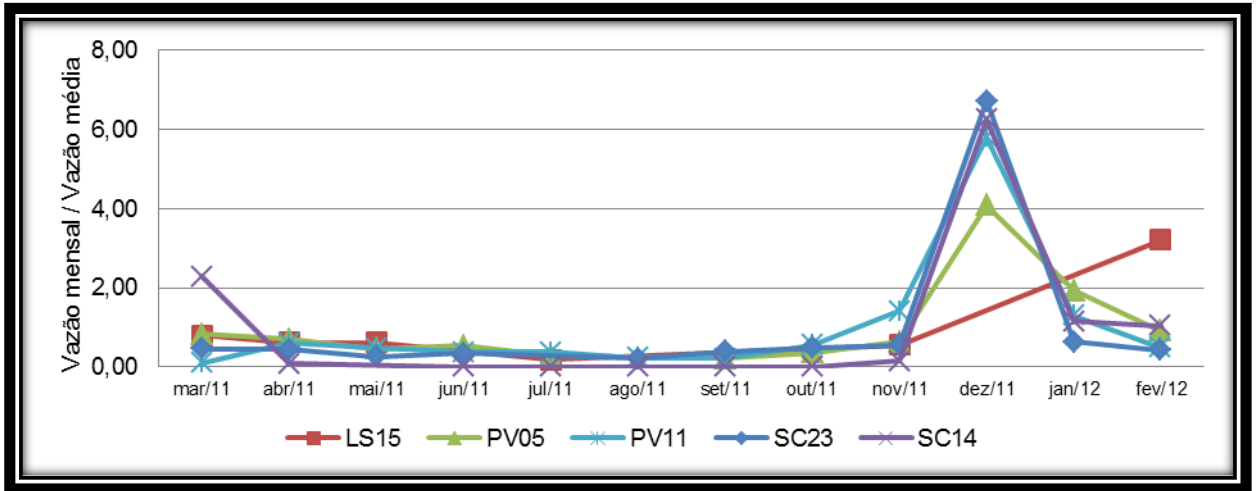
O período de concentração ocorre entre setembro-outubro a novembro-dezembro para quase todas as nascentes estudadas no PNSCi. Como os primeiros picos de vazão ocorrem prioritariamente em dezembro, a concentração é muito curta, denotando uma rápida resposta hidrológica desses sistemas. Em média, as nascentes possuem um período de concentração de dois meses, mas em três casos (SC10, SC12 e SC28) este tempo é de apenas um mês. Com isso, há um extenso período de recessão e um elevado percentual de nascentes intermitentes, explicados pela ausência de material intemperizado formando um aquífero granular superficial que alimentaria o escoamento de base.

Avaliando as similaridades no comportamento hidrológico entre as nascentes estudadas, independentemente da localização das mesmas, pode-se verificar que alguns hidrogramas possuem curvas bastante semelhantes. Assim, as nascentes podem ser agrupadas em três grupos distintos.

O primeiro grupo representa o maior número de nascentes, sendo composto por LS15, PV05, PV11, SC23, SC24 (FIG. 64), SC04, SC05, SC10, SC12, SC28 e SC29 (FIG. 65). Todas essas nascentes apresentam um pico de vazão nítido no seu máximo hidrológico, antecedido por um período longo de baixas vazões, podendo, inclusive, ocorrer intermitência. Entretanto, enquanto nas cinco primeiras o pico de vazão ocorre em dezembro, nas seguintes, ele é verificado em novembro. Em ambos os casos, a vazão máxima é muito pronunciada, superando a média das mensurações em mais de 500% em diversas nascentes. Diversas morfologias e tipos de exfiltração são encontrados, bem como profundidades variadas das coberturas superficiais.

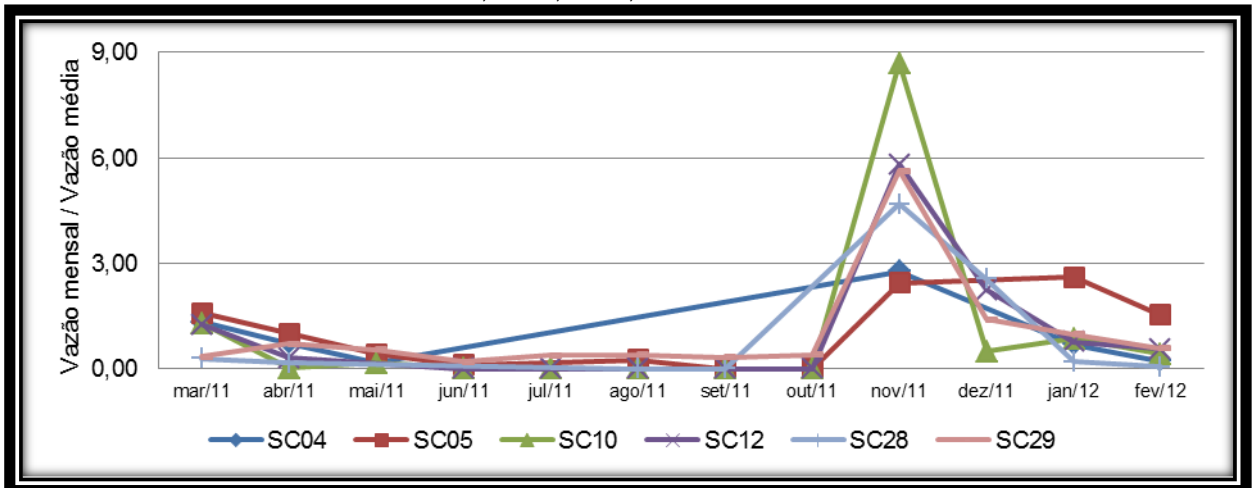
No segundo grupo encontram-se as nascentes LS02, LS05, LS06, PV03, SC18, SC19, e SC24 (FIG. 66). O comportamento hidrológico desse grupo é marcado pela ocorrência de dois picos de vazão ao longo do ano hidrológico de monitoramento. O primeiro ocorre no final do período úmido, entre março a maio, variando entre 300% e 600% em relação à média mensurada. O segundo ocorre após um período curto de baixas vazões (em relação à média), com picos entre novembro e janeiro, de valores percentuais mais baixos em relação ao primeiro pico (200% a 400%). A maioria dessas nascentes encontra-se em locais com coberturas superficiais pouco espessas, associadas a feições geomorfológicas de alta energia, como canais erosivos. Tais características auxiliam na compreensão desse comportamento hidrológico.

FIGURA 64 – Variação percentual das vazões mensais em relação à média mensurada das nascentes LS15, PV05, PV11, SC23 e SC24.



Fonte: Dados de campo.

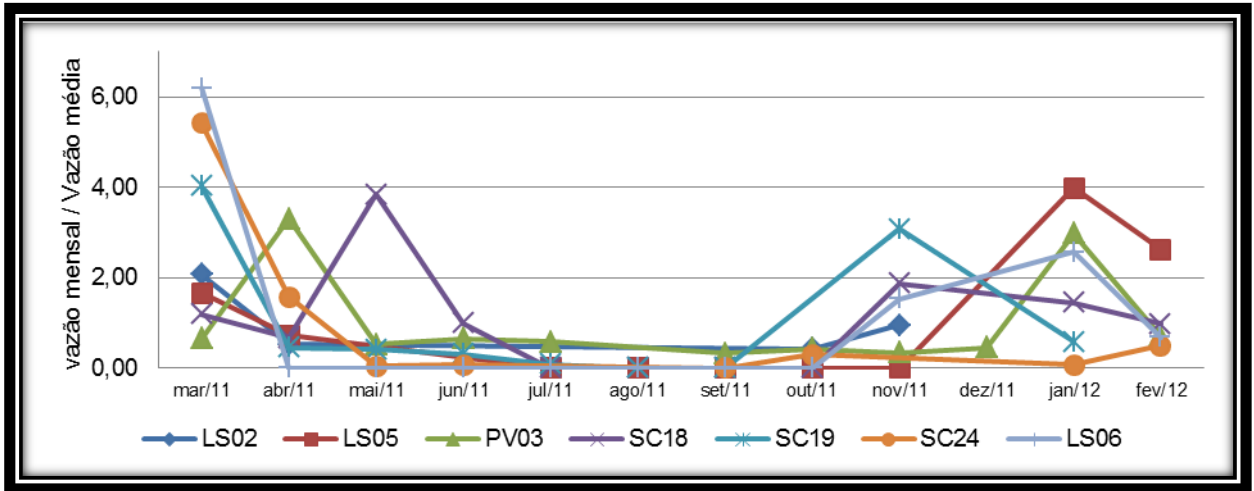
FIGURA 65 – Variação percentual das vazões mensais em relação à média mensurada das nascentes SC04, SC05, SC10, SC12, SC28 e SC29.



Fonte: Dados de campo.

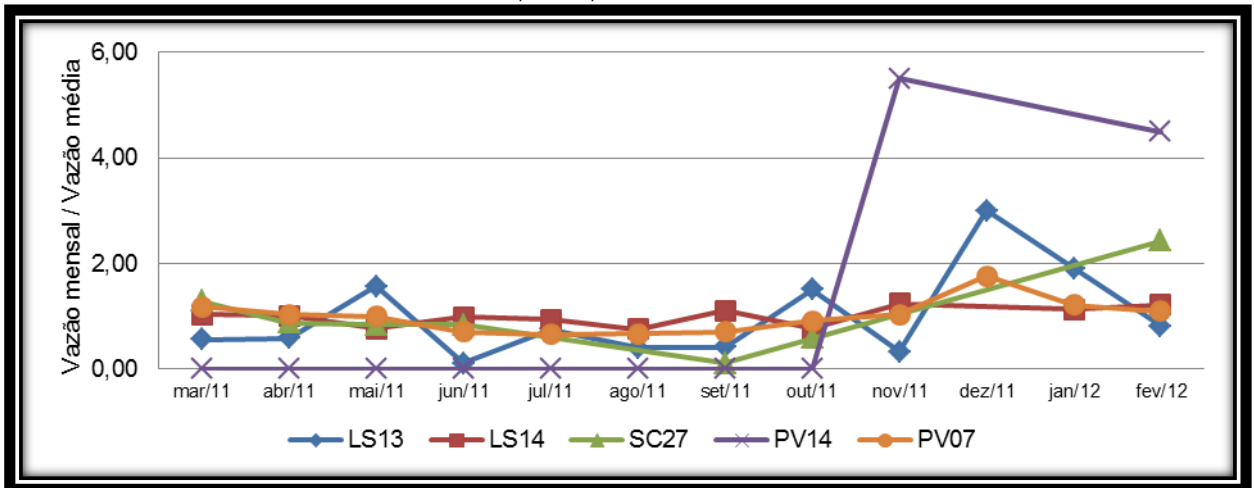
O terceiro grupo é formado pelas LS13, LS14, PV07, PV14 e SC27 (FIG. 67). Essas nascentes não possuem picos de vazão muito pronunciados ao longo do ano, ou apresentam um comportamento hidrológico oscilatório. A maioria mantém sua vazão mensal próxima à média ao longo de todo ano. Neste grupo ocorrem as duas únicas nascentes em duto que foram monitoradas. As demais nascentes do grupo apresentam coberturas superficiais com espessura média à profunda. Além disso, as vazões médias anuais dessas nascentes são muito baixas. O comportamento hidrológico desse grupo, então, mostra certa estabilidade do fluxo de base, associada a pequenas variações percentuais na vazão mês a mês.

FIGURA 66 – Variação percentual das vazões mensais em relação à média mensurada das nascentes LS02, LS05, LS06, PV03, SC18, SC19, e SC24.



Fonte: Dados de campo.

FIGURA 67 – Variação percentual das vazões mensais em relação à média mensurada das nascentes LS13, LS14, PV07, PV14 e SC27.



Fonte: Dados de campo.

6.3. INFLUÊNCIAS DA PRECIPITAÇÃO NA VARIABILIDADE DAS VAZÕES

A relação entre a precipitação e a vazão de canais fluviais já é muito bem compreendida pela hidrologia há décadas (MENDIONDO e TUCCI, 1997), tendo sido abordada de modo cada vez mais eficiente por metodologias que envolvem modelagem matemática em Sistemas de Informação Geográfica (SANTOS e ZEILHOFER, 2005). A partir da década de 1980, com a implantação de bacias hidrográficas experimentais, os modelos ficaram cada vez mais precisos, possibilitando interpretar quantitativamente cada etapa do ciclo hidrológico (MENDIONDO e TUCCI, 1997).

Porém, como elemento adicional ao desafio do estudo das nascentes, os modelos hidrológicos tradicionais, usados em grandes rios e bacias hidrográficas, não podem ser aplicados nesses ambientes. Essa impossibilidade se deve ao fato de haver uma complexa mistura de água subterrânea e superficial nas nascentes. Além disso, o comportamento hidrológico de cada nascente é ímpar, dificultando generalizações.

Para avaliar a influência da precipitação na vazão das nascentes, foi realizado o tratamento estatístico dos dados coletados nos softwares Microsoft Excel 2010 e GraphPad Prism 5. Os registros de pluviometria foram acumulados para representar a periodicidade do monitoramento. Assim, somou-se o total de chuva diária do primeiro dia de campo, retrocedendo até número de dias necessário para compor o acumulado. Nessa lógica, calculou-se o acumulado de precipitação de 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45 e 60 dias⁵, para cada uma das campanhas de campo.

Em um terceiro momento, foi realizado o cruzamento dos dados dos acumulados de precipitação e vazão das nascentes estudadas para cada um dos meses de monitoramento do ano hidrológico. Utilizou-se o método de correlação linear para o cálculo do coeficiente de Pearson. Realizou-se o teste de significância com intervalo de confiança de 95%. Os dados foram, então, tabulados, para a interpretação do coeficiente de Pearson, do R^2 e da significância da correlação.

A análise de correlação entre vazão e precipitação proporcionou uma eficiente interpretação dos resultados. Dentre as 11 nascentes estudadas em Lagoa Santa (TAB. 6), seis obtiveram correlação significativa entre vazão e pelo menos um dos acumulados de precipitação. As cinco outras, porém, não tiveram correlação confirmada pelo teste de hipótese, apesar de em alguns casos apresentarem R^2 elevado, possibilitando interpretações neste sentido. Além disso, em três destes casos (LS02, LS05 e LS15), os resultados negativos podem estar relacionados à insuficiência dos dados de vazão, já que houve muitas lacunas em suas medições.

As nascentes PV07 e PV11 tiveram correlação significativa entre a vazão e os acumulados P60, P45, P30, P25, P20, P10 e P5. Já LS13 registrou correlação significativa com acumulados de 45, 15, 10 e 5 dias, de modo semelhante a PV05, que teve sua razão relacionada com os acumulados de 60, 45, 10 e 5 dias. LS06 apresentou correlação

⁵ Chamados de P1, P2, P5, etc., respectivamente.

significativa com acumulados de chuva de 60 e 30 dias; já para PV14 somente foi confirmada a correlação com acumulado de chuva de 60 dias.

TABELA 6
Correlação entre vazão e precipitação para as nascentes de Lagoa Santa (alfa = 0,05)

Nascente / Estatística		P60	P45	P30	P25	P20	P15	P10	P05	P02	P01
PV07	Nº pares XY	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	Pearson r	0,857	0,843	0,745	0,674	0,614	0,505	0,685	0,786	-0,099	-0,038
	Correlação significativa?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não
	R ²	0,735	0,711	0,556	0,455	0,377	0,255	0,470	0,617	0,010	0,001
LS13	Nº pares XY	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	Pearson r	0,592	0,599	0,519	0,469	0,560	0,585	0,680	0,858	0,209	0,029
	Correlação significativa?	Não	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não
	R ²	0,350	0,359	0,270	0,220	0,314	0,342	0,462	0,736	0,044	0,001
LS02	Nº pares XY	3	4	4	4	4	4	4	4	4	-
	Pearson r	0,946	0,379	0,363	0,228	-0,288	-0,542	-0,437	-0,619	-0,617	-
	Correlação significativa?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	-
	R ²	0,895	0,143	0,132	0,052	0,083	0,294	0,191	0,383	0,381	-
LS05	Nº pares XY	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Pearson r	0,542	0,390	0,154	-0,059	-0,114	-0,083	0,087	0,417	-0,348	-0,258
	Correlação significativa?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	R ²	0,293	0,152	0,024	0,004	0,013	0,007	0,007	0,174	0,121	0,067
LS06	Nº pares XY	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Pearson r	0,804	0,625	0,645	0,539	0,260	0,053	0,081	0,117	-0,261	-0,193
	Correlação significativa?	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	R ²	0,647	0,391	0,416	0,290	0,068	0,003	0,007	0,014	0,068	0,037
LS14	Nº pares XY	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Pearson r	0,502	0,329	0,204	0,142	0,021	-0,074	0,178	-0,005	-0,398	0,046
	Correlação significativa?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	R ²	0,252	0,108	0,042	0,020	0,000	0,005	0,032	0,000	0,158	0,002
LS15	Nº pares XY	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Pearson r	0,207	-0,028	-0,026	-0,186	-0,230	-0,217	-0,196	-0,190	-0,190	-0,190
	Correlação significativa?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	R ²	0,043	0,001	0,001	0,034	0,053	0,047	0,038	0,036	0,036	0,036
PV03	Nº pares XY	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Pearson r	0,296	0,069	-0,193	-0,266	-0,241	-0,170	-0,078	0,018	-0,273	-0,258
	Correlação significativa?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	R ²	0,088	0,005	0,037	0,071	0,058	0,029	0,006	0,000	0,075	0,066
PV05	Nº pares XY	10	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	Pearson r	0,733	0,732	0,600	0,536	0,530	0,450	0,713	0,907	-0,152	0,064
	Correlação significativa?	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não
	R ²	0,537	0,536	0,360	0,287	0,281	0,203	0,509	0,822	0,023	0,004
PV11	Nº pares XY	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	Pearson r	0,709	0,710	0,621	0,614	0,641	0,564	0,805	0,919	-0,027	0,152
	Correlação significativa?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Não
	R ²	0,503	0,504	0,385	0,377	0,410	0,318	0,649	0,844	0,001	0,023
PV14	Nº pares XY	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Pearson r	0,755	0,490	0,374	0,342	0,314	0,262	0,538	0,250	-0,221	-0,161
	Correlação significativa?	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	R ²	0,570	0,241	0,140	0,117	0,099	0,069	0,290	0,062	0,049	0,026

Observações: P60: Precipitação acumulada em 60 dias. Igualmente, os outros números referem-se aos demais períodos, em dias.
Fonte: output GraphPad Prism 5.

Avaliando em conjunto o teste de hipótese e o R^2 , percebe-se que enquanto algumas nascentes apresentaram relação mais íntima com chuvas de longa duração, outras respondem mais diretamente a eventos curtos. As vazões de LS13, PV05 e PV11 registraram maior R^2 para P5, denotando uma rápida resposta hidrológica. A explicação para esses fenômenos está, provavelmente, na pequena espessura das coberturas superficiais nessas nascentes associada à ocorrência de afloramentos rochosos que condicionam a ocorrência de fluxos subterrâneos rasos. Mais uma vez, demonstra-se a importância dos mantos de intemperismo para a distribuição da água subterrânea nas nascentes estudadas.

Por outro lado, a maioria das nascentes de Lagoa Santa apresentou maior R^2 para acumulados de chuva mais longos, especificamente P60. Esse foi o caso de PV07, LS02, LS06, PV14, LS05, LS14 e PV03, as quais tiveram o maior R^2 da relação vazão-precipitação para P60, ainda que nas três últimas esse valor seja abaixo de 0,300. A nascente LS15 foi anômala em relação às demais, com baixos valores de R^2 para todos os acumulados de chuva, sendo P20 o mais significativo.

Novamente, esses resultados confirmam a maior influência de acumulados de precipitação de maiores intervalos de tempo na vazão das nascentes. LS02, inclusive, apresenta valores extremamente altos para o coeficiente de Pearson e R^2 (superando diversos casos em que a significância da correlação foi confirmada) para P60, o que induz a crer que foi a insuficiência dos dados que não permitiu a confirmação dessa correlação.

Dentre as 13 nascentes monitoradas na Serra do Cipó, foi possível realizar a correlação e o teste de hipótese em 12, uma vez que não houve dados suficientes para a análise estatística de SC01. Os testes de significância da correlação entre os acumulados de chuva e a vazão das nascentes da Serra do Cipó (TAB. 7) mostram que em 10 casos os resultados foram positivos para pelo menos um acumulado. Apenas SC18 e SC27 não tiveram bem definida a relação entre chuva e vazão. Esse menor percentual de resultados inconclusivos, em comparação com as nascentes de Lagoa Santa, pode estar relacionado à maior regularidade dos eventos chuvosos na Serra do Cipó.

Em diversos casos, a significância da correlação foi positiva para diversos acumulados pluviométricos. Mais uma vez, a maior regularidade das chuvas (um maior número e uma menor intensidade dos eventos) possibilita essas respostas. A nascente SC23 apresentou correlação significativa com todos os acumulados (P60, P45, P30, P25, P20, P15, P10, P5, P2 e P1). Todavia, os maiores R^2 estão relacionados aos menores períodos de acumulação, com destaque para o P2.

TABELA 7
Correlação entre vazão e precipitação acumulada nas nascentes da Serra do Cipó* (alfa = 0,05)

Nascente / Estatística		P60	P45	P30	P25	P20	P15	P10	P05	P02	P01
SC04	Nº pares XY	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6
	Pearson r	0,629	0,797	0,988	0,976	0,954	0,917	0,907	0,963	0,957	0,950
	Correlação significativa?	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	R ²	0,396	0,636	0,976	0,952	0,911	0,842	0,823	0,928	0,916	0,902
SC05	Nº pares XY	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10
	Pearson r	0,963	0,891	0,639	0,589	0,521	0,469	0,609	0,507	0,565	0,535
	Correlação significativa?	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	R ²	0,927	0,794	0,408	0,347	0,272	0,220	0,371	0,257	0,319	0,286
SC10	Nº pares XY	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
	Pearson r	0,401	0,448	0,602	0,648	0,702	0,648	0,688	0,330	0,229	0,281
	Correlação significativa?	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
	R ²	0,161	0,201	0,362	0,420	0,493	0,420	0,473	0,109	0,052	0,079
SC12	Nº pares XY	10	10	11	11	11	11	11	11	11	11
	Pearson r	0,622	0,678	0,805	0,838	0,861	0,806	0,857	0,593	0,508	0,551
	Correlação significativa?	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
	R ²	0,387	0,459	0,649	0,701	0,742	0,650	0,734	0,351	0,259	0,304
SC14	Nº pares XY	10	10	11	11	11	11	11	11	11	11
	Pearson r	0,779	0,814	0,710	0,660	0,562	0,546	0,587	0,849	0,907	0,863
	Correlação significativa?	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
	R ²	0,607	0,662	0,504	0,436	0,316	0,299	0,345	0,722	0,823	0,745
SC18	Nº pares XY	10	10	11	11	11	11	11	11	11	11
	Pearson r	0,307	0,227	0,184	0,187	0,187	0,152	0,247	0,211	0,246	0,245
	Correlação significativa?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	R ²	0,094	0,051	0,034	0,035	0,035	0,023	0,061	0,045	0,061	0,060
SC19	Nº pares XY	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9
	Pearson r	0,700	0,810	0,862	0,795	0,674	0,574	0,560	0,706	0,871	0,655
	Correlação significativa?	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Não
	R ²	0,489	0,656	0,743	0,632	0,454	0,330	0,314	0,498	0,758	0,429
SC23	Nº pares XY	10	10	11	11	11	11	11	11	11	11
	Pearson r	0,731	0,798	0,710	0,692	0,638	0,655	0,677	0,926	0,956	0,946
	Correlação significativa?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
	R ²	0,535	0,637	0,504	0,478	0,407	0,429	0,459	0,858	0,914	0,895
SC24	Nº pares XY	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8
	Pearson r	0,294	0,084	0,794	0,670	0,293	-0,080	-0,043	0,833	0,955	0,919
	Correlação significativa?	Não	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
	R ²	0,086	0,007	0,630	0,449	0,086	0,006	0,002	0,694	0,911	0,844
SC27	Nº pares XY	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
	Pearson r	0,693	0,414	0,192	0,205	-0,126	-0,255	-0,274	-0,092	0,150	0,060
	Correlação significativa?	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	R ²	0,481	0,172	0,037	0,042	0,016	0,065	0,075	0,008	0,023	0,004
SC28	Nº pares XY	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8
	Pearson r	0,601	0,708	0,855	0,904	0,949	0,934	0,931	0,697	0,603	0,661
	Correlação significativa?	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
	R ²	0,362	0,501	0,730	0,817	0,900	0,873	0,867	0,486	0,364	0,438
SC29	Nº pares XY	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
	Pearson r	0,513	0,560	0,662	0,716	0,778	0,744	0,785	0,452	0,345	0,412
	Correlação significativa?	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
	R ²	0,263	0,313	0,439	0,512	0,605	0,553	0,617	0,204	0,119	0,170

* A nascente SC01 foi retirada da análise devido à carência de dados de vazão.

Observações: P60: Precipitação acumulada em 60 dias. Igualmente, os outros números referem-se aos demais períodos, em dias.

Fonte: output GraphPad Prism 5.

De modo similar, SC14, SC19 e SC24 obtiveram significância para sete e oito acumulados, respectivamente, tanto os de poucos dias, quanto os mais prolongados. Os três, assim como SC23, apresentaram o maior R^2 para P2. Isso mostra uma rápida dinâmica hidrológica dessas nascentes, que respondem de forma quase imediata aos eventos meteorológicos. Por esse motivo, as duas primeiras são intermitentes e as duas últimas são móveis.

As nascentes SC12, SC10, SC28 e SC29 apresentaram correlação significativa para P30, P25, P20, P15 e P10 (a primeira, também para P45). Porém, o R^2 mais elevado para essas três primeiras nascentes foi o relacionado ao acumulado de precipitação de 20 dias. No caso de SC29, o R^2 mais elevado foi de P10, muito próximo ao de P20. Dentre essas quatro nascentes, esta última é a única perene.

A nascente SC04 apresentou correlação significativa para oito acumulados de chuva (P30, P25, P20, P15, P10, P5, P2 e P1). Apesar dessa influência comprovada dos eventos de curta duração, o maior R^2 foi relacionado ao P30. Por outro lado, a nascente intermitente SC05 apresentou correlação significativa apenas com os acumulados mais longos (P60, P45 e P30), sendo o maior R^2 relacionado ao P60.

Contudo, apesar da proximidade espacial e da relativa uniformidade climática entre as áreas de estudo, as nascentes apresentam distintos comportamentos hidrológicos sazonais, fato que deve estar associado às particularidades geológicas e geomorfológicas. As coberturas superficiais ganham importância nesse cenário, uma vez que a sua profundidade pode definir a velocidade dos fluxos subterrâneos. Evidentemente, distinções granulométricas, mineralógicas e estruturais dos solos também podem influenciar esse processo.

Essas características podem influenciar, inclusive, na extensão dos períodos de recessão, que tendem a ser os mais expressivos em termos temporais dentro do hidrograma anual das nascentes, muito provavelmente, ligado ao extenso período de estiagem registrado durante o período de monitoramento, em ambas as áreas de estudo.

Por fim, pode-se concluir que os acumulados de chuva de menor duração são mais importantes para a explicação da dinâmica sazonal das nascentes da Serra do Cipó, enquanto as nascentes estudadas em Lagoa Santa sofrem maior influência de acumulado de chuvas mais prolongadas e não de eventos esparsos.

7. DINÂMICA GEOMORFOLÓGICA

7.1. ALTERAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS SAZONAIS

Enquanto sistema ambiental, uma nascente possui um subsistema morfológico que controla e é controlado por processos hidrogeomorfológicos. A ação desses processos influencia na fisiografia da nascente e lhe confere uma dinâmica geomorfológica que pode ser interpretada em distintas escalas temporais. Nesse sentido, duas principais perguntas emergem: i) como as nascentes modificam suas características morfológicas sazonalmente? ii) como os processos geomorfológicos de médio e longo termo influenciam as nascentes?

Na perspectiva de Summerfield (1991), a noção de equilíbrio geomorfológico está atrelada às transformações do sistema morfológico. Desse modo, para um mesmo fenômeno, a escala temporal de análise definirá o tipo de equilíbrio em que se encontra o sistema. Essa perspectiva é fundamental para responder aos questionamentos apontados. A metodologia proposta neste trabalho de monitoramento mensal das nascentes ao longo de um ano hidrológico permite enquadrar as transformações geomorfológicas sofridas sob a égide de um equilíbrio estacionário (*steady-state equilibrium*), onde as observações comprovam oscilações no comportamento da nascente ao longo do tempo, porém, sem que haja uma nítida tendência à transformação do sistema (CHARLTON, 2008).

Por outro lado, para entender os processos que levaram ao surgimento das nascentes, é necessário balizar-se em períodos de tempo mais longos, que não podem ser abarcados pela observação direta em campo. Nesse sentido, devem-se compreender as “cicatrices” deixadas no relevo. A perspectiva muda, então, de um equilíbrio estacionário para um equilíbrio dinâmico ou mesmo metaestável, à medida que se amplia a escala temporal (CHARLTON, 2008). Sob essa lógica, processos de longo termo paulatinos ou catastróficos podem ser interpretados quanto à gênese das nascentes.

No escopo deste trabalho, a dinâmica morfológica de curto prazo é traduzida nas alterações oscilatórias sazonais dos aspectos morfológicos das nascentes sob a influência das condições meteorológicas. Essa escala foi trabalhada diretamente na metodologia do trabalho, permitindo conclusões embasadas nas mensurações de campo. A dinâmica geomorfológica de médio termo está associada ao surgimento e desenvolvimento das feições nas quais ocorre a exfiltração – com escala espacial da ordem de décadas. Os dados referem-se à ocorrência

dessas feições em cada uma das nascentes. Por fim, a dinâmica de longo termo envolve as relações entre as macrofeições do relevo e o comportamento das nascentes. Essa perspectiva somente pode ser alcançada a partir da comparação entre as nascentes das duas áreas de estudo.

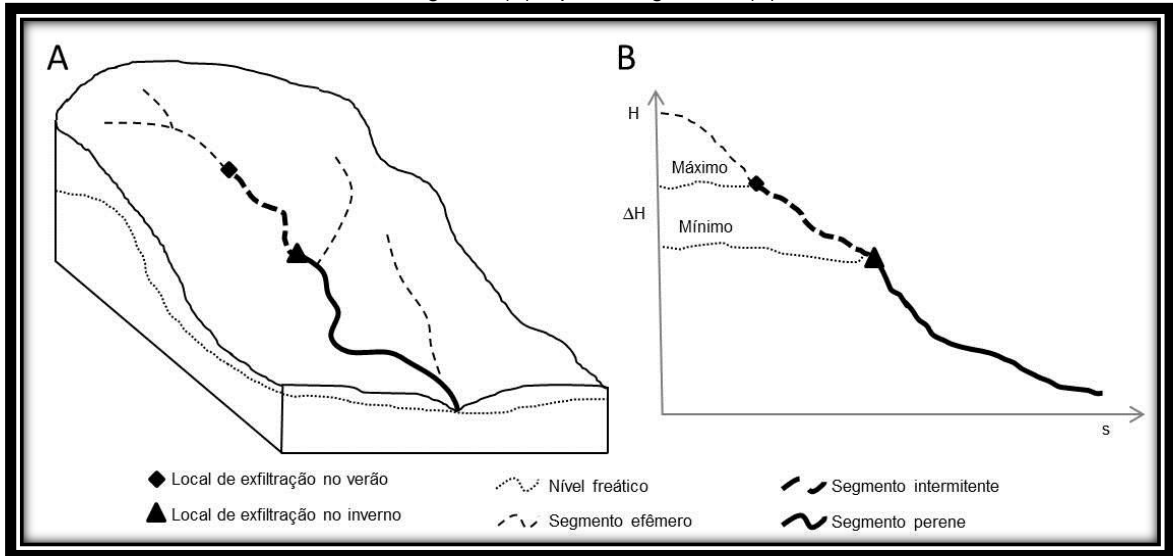
7.1.1. MOBILIDADE DAS NASCENTES

A mobilidade das nascentes está diretamente relacionada com as oscilações do nível freático ao longo do ano hidrológico (FARIA, 1997; FARIA, 2000; FELIPPE, 2009). Em um contexto tropical sazonal com dupla estacionalidade climática, as nascentes alimentadas por aquíferos livres tendem a sofrer influência do rebaixamento do nível freático no período de estiagem. Em parte dos casos, esse processo leva à interrupção do contato entre a superfície topográfica e o nível freático, promovendo a intermitência da exfiltração. Em outros contextos, porém, o rebaixamento gradual pode levar à alteração do local onde esse contato ocorre, fazendo com que o processo de exfiltração se altere de acordo com a dinâmica do nível freático. Nesses casos, têm-se nascentes móveis.

Faria (1997) aponta trabalhos na literatura nacional e internacional que relataram mobilidade de nascentes em uma distância superior a 7 km. Notadamente, as nascentes que ocorrem em canais erosivos são mais comumente suscetíveis à mobilidade, uma vez que estas feições configuram-se como extensos eixos de contato com o nível freático ao longo da vertente. Nesse sentido, quando há ocorrência de uma nascente móvel, seu canal de primeira ordem possui um segmento intermitente a montante do segmento perene, de modo que este último inicia-se a partir do ponto imediatamente à jusante da exfiltração (FIG. 68).

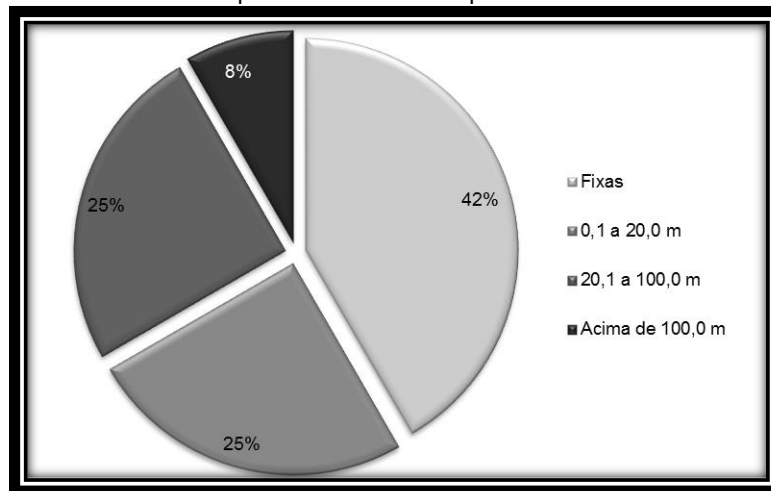
Dentre as 24 nascentes monitoradas nas Serra do Cipó e em Lagoa Santa, 10 foram consideradas fixas, pelo fato de não alterarem seu local de exfiltração. Isso implica em uma taxa de mobilidade de 58% em todo o rol estudado (FIG. 69). Porém, há uma grande variabilidade quanto à distância de migração dessas nascentes móveis ao longo do ano hidrológico: enquanto em dois casos esse deslocamento foi centimétrico (desconsiderados para fins de análise, uma vez que representam um deslocamento inexpressivo), o caso mais extremo alcançou 1,6 Km.

FIGURA 68 – Esquema representativo de uma nascente móvel e seu canal de primeira ordem em bloco diagrama (A) e perfil longitudinal (B).



Fonte: elaborado pelo autor.

FIGURA 69 – Frequência de nascentes por classes de mobilidade.



Fonte: dados de campo.

De uma forma geral, as nascentes iniciam o processo de deslocamento na vertente, no começo do período de decaimento hidrológico. Assim, os meses de março e abril registraram o início da mobilidade para a maioria absoluta das nascentes móveis (TAB. 8). Essas nascentes permanecem com o deslocamento negativo (à jusante) durante todo o período de recessão, até o início da acumulação hídrica. Porém, nos casos de nascentes móveis e intermitentes que secam em certos períodos do ano, a mensuração de sua mobilidade nesses períodos não é possível, promovendo lacunas na TAB. 8.

A partir de novembro ou dezembro, o reinício das chuvas marca o período de acumulação hídrica, invertendo a direção do processo de mobilidade. Isso implica em um retorno da exfiltração a sua posição original (marcada pela estaca) ou mesmo um deslocamento à montante desta (considerado positivo). Com isso, a variação (Δs) que representa a mobilidade

total das nascentes é a diferença entre o máximo e mínimo deslocamento, o valor médio encontrado para as nascentes móveis foi de 177,2 m (desconsiderando-se aquelas de deslocamento centimétrico, conforme explicado anteriormente). O mínimo deslocamento anual registrado foi de 3,1 m para a nascente LS14 e o máximo de 1.625,3 m para SC24.

TABELA 8
Mobilidade das nascentes medida a partir do deslocamento da exfiltração (em metros)

Nascente / Mês	mar/11	abr/11	mai/11	jun/11	jul/11	ago/11	set/11	out/11	nov/11	dez/11	jan/12	fev/12	Δs
LS02	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LS05	0,0	4,1	4,1	4,1	*	*	*	*	*	0,0	0,0	7,1	7,1
LS06	0,0	*	*	*	*	*	*	*	0,0	**	0,0	0,0	0,0
LS13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LS14	0,0	-0,9	-0,9	-1,3	-1,4	**	-1,4	-1,4	0,0	1,7	0,0	0,0	3,1
LS15	0,0	-27,3	-27,3	-27,3	-27,3	**	-27,3	-27,3	0,0	0,0	4,2	4,2	31,5
PV03	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PV05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PV07	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PV11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PV14	*	*	*	*	*	*	*	*	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SC01	0,0	0,0	0,0	**	**	**	**	**	**	**	**	**	0,0
SC04	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	242,4	0,0	0,0	0,0	242,4
SC05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	*	*	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SC10	-18,7	0,0	0,0	-23,7	*	*	*	*	37,4	18,6	0,0	0,0	61,1
SC12	0,0	0,0	0,0	*	*	*	*	*	4,9	0,0	0,0	0,0	4,9
SC14	-11,7	-28,3	-28,7	*	*	*	*	*	53,0	48,4	30,3	7,5	81,7
SC18	-3,7	-7,9	-8,6	-6,0	*	*	*	*	8,9	7,5	9,9	0,0	18,5
SC19	0,0	-2,2	-3,4	-2,7	0,0	*	*	**	-6,9	5,5	-8,0	0,0	13,5
SC23	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	**	0,7	0,7	0,7	8,2	0,0	0,8	8,5
SC24	-44,8	-14,4	-345,0	-544,0	-1.488,3	**	*	-245,2	-305,1	**	137,0	26,2	1.625,3
SC27	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1***
SC28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	*	*	0,0	0,0	29,4	0,0	0,0	29,4
SC29	0,0	0,0	0,0	-0,2	0,0	**	0,0	0,0	0,0	**	0,0	0,0	0,2***

Fonte: dados de campo.

* nascente seca.

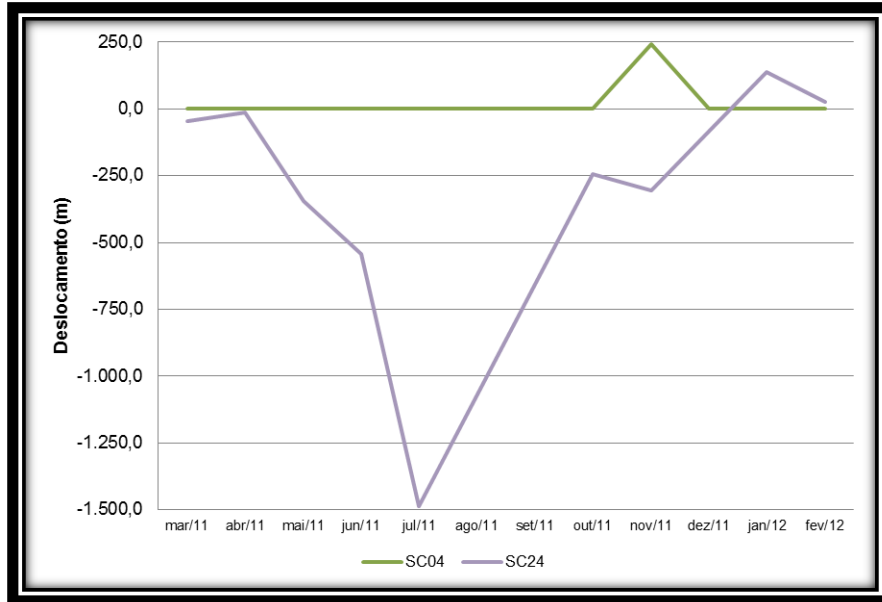
** mobilidade não mensurada.

*** deslocamento insignificante, consideradas fixas para fins de análise.

A dinâmica desse processo, entretanto, é variável. Enquanto algumas nascentes móveis mantêm-se durante todo o ano hidrológico em apenas dois locais de exfiltração, outras oscilam mês a mês durante, principalmente, o período de recessão. A FIG. 70 apresenta a variação do deslocamento das duas nascentes com maior Δs (SC04 e SC24). Nota-se que enquanto SC04 não apresentou qualquer variação durante o período seco, ainda que seja perene, em novembro houve um significativo deslocamento para montante de 242,4 m (máximo deslocamento positivo registrado). Por sua vez, SC24 registrou um comportamento ímpar, com um gradativo deslocamento para jusante até o máximo de 1,4 Km em julho. Em setembro, esta nascente cessou sua drenança, o que a configura como intermitente, mas logo em outubro retomou a exfiltração ainda a jusante do marco zero. Somente em dezembro, a nascente SC24 alcançou seu local original de exfiltração, registrando, ainda, um deslocamento positivo de 137 m em janeiro. Com isso, seu deslocamento total registrado ultrapassou 1,6 Km.

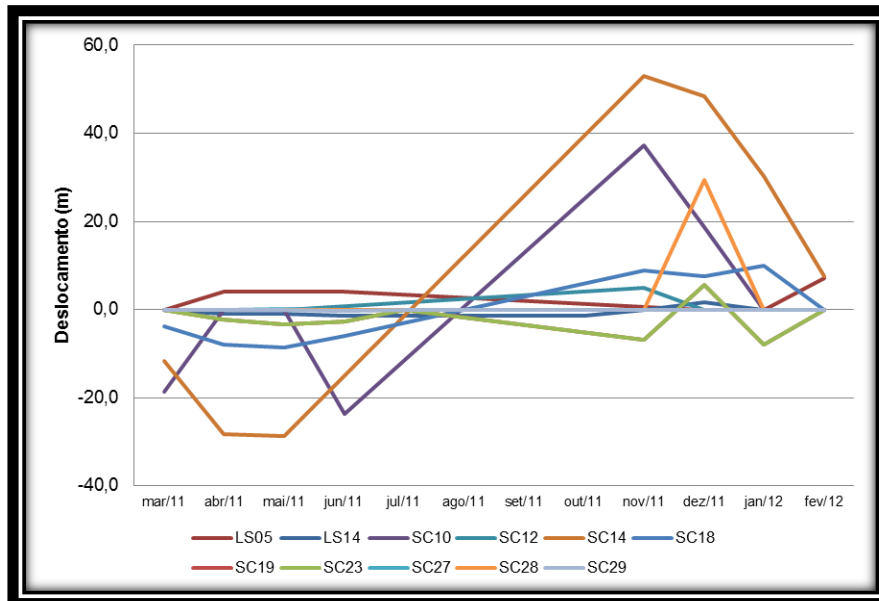
As demais nascentes não possuem deslocamentos dessa magnitude (FIG. 71), mas apresentam comportamento sazonal similar. As nascentes SC10, SC14 e SC18 apresentam deslocamentos negativos a partir de março/abril até secarem no mínimo hidrológico. Após esse período, retomam a drenança com deslocamentos positivos em novembro.

FIGURA 70 – Mobilidade mensal das nascentes SC04 e SC24.



Fonte: dados de campo.

FIGURA 71 – Mobilidade mensal das nascentes LS05, LS14, SC10, SC12, SC14, SC18, SC19, SC23, SC27, SC28 e SC29.



Fonte: dados de campo.

A nascente SC19 apresenta deslocamentos negativos entre abril e junho. Todavia, após seu período de intermitência, retoma sua drenança ainda a jusante de seu marco zero, atingindo deslocamentos positivos apenas em dezembro. De modo semelhante, as nascentes LS14 e

LS15 apresentam longos períodos de deslocamentos negativos, sem, contudo, interromperem a exfiltração. Com a retomada das chuvas, retornam gradativamente aos seus marcos zeros para posteriormente, registrarem deslocamentos positivos.

As nascentes SC23, SC12, LS05 e SC28 não apresentam tal comportamento. A primeira, somente apresenta um ligeiro deslocamento negativo em julho, mas já em setembro registra um deslocamento para montante que perdura até dezembro. Já as três seguintes, não apresentam qualquer deslocamento negativo. Intermitentes, enquanto LS05 já registra deslocamento positivo antes do período de seca, SC12 e SC28 mantêm-se estáveis até que sua exfiltração seja interrompida. Após a intermitência, essas três nascentes voltam a apresentar deslocamentos para montante do marco zero, com destaque para o expressivo deslocamento de SC28 em dezembro de 29,4 m.

Essas interpretações evidenciam que a mobilidade das nascentes não depende apenas da sazonalidade climática. Obviamente, a dupla estacionalidade do clima contribui para oscilações no nível freático, porém, isso não resulta no deslocamento de todas as nascentes. Para entender como essa mobilidade ocorre, é preciso interpretar a geomorfologia e a hidrogeologia desses sistemas.

Verificando as características hidrogeomorfológicas locais das nascentes, pode-se compreender a variabilidade das suas condições de mobilidade dentro de cada uma das áreas de estudo. Nesse sentido, a morfologia, o tipo de exfiltração, a profundidade das coberturas superficiais e a sazonalidade das nascentes móveis fornecem informações esclarecedoras acerca dessa dinâmica hidrogeomorfológica.

Quanto à morfologia das nascentes móveis, 58% encontram-se em concavidade e 33% em canais erosivos. Apenas em um caso (8%), a nascente ocorre em afloramentos rochosos. Assim, fica evidente que a representatividade das nascentes em concavidades ou em canal no subgrupo das nascentes móveis é maior do que o percentual que essas morfologias representam em todo o rol. Por outro lado, nascentes em duto (vertical ou horizontal) e em cavidade tendem a não migrar ou, quando há o deslocamento, ele é insignificante.

Esse fenômeno pode ser explicado pelas características da própria feição morfológica na qual as nascentes se inserem. Dutos e cavidades são formas mais bem definidas, criadas ao longo de um período relativamente longo de atuação dos processos de *piping* e cavitação, respectivamente. Isso gera um contato pontual entre a superfície e o nível freático, restrito à

própria forma. Assim, quando há o rebaixamento do nível freático, nascentes localizadas nessas feições tendem a secar.

Entretanto, concavidades e, principalmente, canais erosivos são feições longitudinais e de maior abrangência areal. Por conseguinte, tendem a tocar o nível freático em uma vasta área que se prolonga em direção ao sopé da vertente. Por esse motivo, quando há o rebaixamento do nível freático, a porção mais elevada dessas feições não mais promove a exfiltração, que, todavia, é mantida nas porções mais baixas, levando ao fenômeno da mobilidade das nascentes. Comparando a mobilidade em nascentes que possuem essas morfologias (canal erosivo ou concavidade), justamente devido à geometria dessas feições, as nascentes móveis em canais erosivos tendem a gerar deslocamentos sazonais maiores, uma vez que as concavidades são longitudinalmente mais restritas.

No caso específico da nascente SC28, que ocorre em afloramento rochoso e ainda assim é móvel, a explicação está no fato de ocorrerem inúmeros afloramentos rochosos na bacia de contribuição da nascente. Com isso, quando houve o deslocamento a montante no período das chuvas, a exfiltração passou a ocorrer em outro afloramento rochoso e não no original (marco zero). Um processo semelhante pode promover a migração de nascentes em duto ou em cavidade, porém, acredita-se que tal possibilidade seria uma exceção à regra geral.

O modo como ocorre a exfiltração das nascentes móveis parece não interferir no processo de deslocamento sazonal. Há apenas uma ligeira diferença percentual na frequência de cada modo de exfiltração dentro do grupo das nascentes móveis e no universo das nascentes estudadas. Porém, quando a interpretação é conjunta entre morfologia e tipo de exfiltração, sabe-se que as nascentes pontuais tendem a ser originadas a partir de dutos, cavidades ou afloramentos. Nesse sentido, haveria uma menor probabilidade de migração.

Avaliando-se a relação da profundidade do manto de alteração com a mobilidade das nascentes, percebe-se que 50% das nascentes móveis possuem regolito com profundidade inferior a 10 cm, enquanto os demais 50% são igualmente distribuídos entre nascentes com mantos de intemperismo de profundidade intermediária (11 a 50 cm) e espessos (acima de 50 cm). Esses percentuais, entretanto, não são significativamente distintos daqueles para todo o rol estudado.

Os maiores deslocamentos estão regularmente relacionados a mantos de alteração de menores profundidades. A explicação para tal processo está na menor capacidade de retenção de água nesses mantos de intemperismo rasos, os quais liberariam a água mais

rapidamente e não teriam a capacidade de gerar pontos de exfiltração mais estáveis (pontuais). Em oposição, nascentes móveis com regolito profundo (superior a 50 cm) normalmente tem deslocamento inferior a 10 m.

A única exceção a todas essas assertivas é SC04, que apesar de possuir mais de 50 cm de profundidade do manto de alteração, sofreu um deslocamento de 242 m a montante. Porém, isso pode indicar, justamente, que seu segmento intermitente está associado à baixa capacidade de fornecimento de água de seu regolito no período úmido e que seu local de exfiltração mais estável se encontra justamente onde seu manto de alteração atinge uma profundidade mínima que garanta sua alimentação na estiagem.

Contudo, percebe-se uma nítida relação entre a sazonalidade e a mobilidade das nascentes, uma vez que ambas as características dependem fundamentalmente do mesmo processo: oscilação do nível freático. Assim, pode-se afirmar que as nascentes intermitentes são mais propensas a serem móveis; sendo, a recíproca, verdadeira. Os dados encontrados mostram que 73% das nascentes intermitentes são móveis e que 67% das nascentes móveis são intermitentes. Nesse sentido, a tendência de uma nascente móvel e intermitente é que seu deslocamento durante o início do período seco compense o rebaixamento do nível freático e garanta sua drenança. Porém, há um limiar em que mesmo a mobilidade não consegue mais garantir a exfiltração. Isso permite afirmar que, caso a mobilidade não ocorresse, essas nascentes teriam um maior período de intermitência.

7.1.2. MORFOLOGIA E TIPO DE EXFILTRAÇÃO

A alteração na morfologia e no tipo de exfiltração das nascentes de modo sazonal é outra faceta de uma dinâmica oscilatória de frequência sazonal. Devido às características meteorológicas, pode haver entre uma estação e outra, a mudança na fisiografia das nascentes. Todavia, esse processo é restrito a poucas nascentes, como apontado no QUADRO 8.

Dentre as nascentes estudadas, cinco apresentaram alteração na morfologia e/ou na exfiltração entre o verão e o inverno. Duas mudam a morfologia, duas mudam o tipo de exfiltração e uma altera ambas as características. Notadamente, os padrões que ocorrem no período chuvoso são mais persistentes ao longo do ano.

A única nascente em Lagoa Santa que apresentou tal dinâmica foi PV07. Durante todo o período de monitoramento, essa nascente possuiu morfologia em duto, não apresentando mobilidade. Porém, no verão, com o nível freático mais elevado, a exfiltração ocorria em até três dutos escavados no contato do regolito com a rocha. Com a diminuição das chuvas, o nível freático foi rebaixado e os dutos que estavam alguns centímetros mais elevados cessaram a drenagem de água, mantendo a exfiltração apenas naquele mais baixo (ainda em contato com o nível freático). Por esse motivo, essa nascente tem seu modo de exfiltração alterado, mesmo sem a mobilidade ou sem a mudança na morfologia.

QUADRO 8
Alterações sazonais da morfologia e do tipo de exfiltração das nascentes

Nascente	Morfologia predominante		Exfiltração predominante		Mobilidade (m)
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	
LS02	Concavidade	Concavidade	Difusa	Difusa	0,0
LS05	Canal	Canal	Pontual	Pontual	7,1
LS06	Canal	Canal	Pontual	Pontual	0,0
LS13	Canal	Canal	Pontual	Pontual	0,0
LS14	Concavidade	Concavidade	Difusa	Difusa	3,1
LS15	Canal	Canal	Difusa	Difusa	31,5
PV03	Cavidade	Cavidade	Difusa	Difusa	0,0
PV05	Duto	Duto	Pontual	Pontual	0,0
PV07	Duto	Duto	Múltipla	Pontual	0,0
PV11	Afloramento	Afloramento	Múltipla	Múltipla	0,0
PV14	Concavidade	Concavidade	Difusa	Difusa	0,0
SC01	Cavidade	Cavidade	Difusa	Difusa	0,0
SC04	Concavidade	Cavidade	Difusa	Múltipla	242,4
SC05	Afloramento	Afloramento	Múltipla	Múltipla	0,0
SC10	Concavidade	Afloramento	Difusa	Difusa	61,1
SC12	Concavidade	Concavidade	Pontual	Pontual	4,9
SC14	Canal	Cavidade	Pontual	Pontual	81,7
SC18	Concavidade	Concavidade	Difusa	Difusa	18,5
SC19	Concavidade	Concavidade	Múltipla	Difusa	13,5
SC23	Concavidade	Concavidade	Difusa	Difusa	8,5
SC24	Canal	Canal	Difusa	Difusa	1625,3
SC27	Duto	Duto	Múltipla	Múltipla	0,1
SC28	Afloramento	Afloramento	Difusa	Difusa	29,4
SC29	Concavidade	Concavidade	Múltipla	Múltipla	0,2

Fonte: dados de campo

A nascente SC19 também possuiu seu tipo de exfiltração alterado durante o período de monitoramento, sem alteração da morfologia. Essa nascente ocorre em uma vertente suave coberta por vegetação campestre, formando um canal de drenagem apenas alguns metros abaixo da exfiltração. No verão, à montante deste canal, a nascente drena a partir de um fluxo laminar originado de dois locais de exfiltração distintos: um areal e outro pontual. Porém, com a redução do nível freático no inverno o local de exfiltração pontual seca, fazendo com que a nascente seja alimentada exclusivamente pela exfiltração areal. Essa dinâmica caracteriza a mudança de uma exfiltração múltipla no verão, para difusa no inverno.

As nascentes SC10 e SC14 apresentaram mudança sazonal em sua morfologia durante o período de monitoramento. Ambas continuaram com o mesmo padrão de exfiltração em todo o ano hidrológico e apresentaram deslocamento de 61 m e 81 m, respectivamente. Essa mobilidade foi a responsável pela mudança na morfologia. Com o deslocamento da nascente entre o verão e o inverno, pode ocorrer de o local de exfiltração fixar-se em feições distintas daquela inicial. SC10 muda da morfologia em concavidade para afloramento rochoso após o início do período seco. Por sua vez, SC14 possui o início da exfiltração em um canal erosivo no verão, passando a uma cavidade alveolar no inverno.

Por fim, a nascente SC04 apresentou uma dinâmica geomorfológica sazonal bastante diversa, ao alterar sua morfologia e seu tipo de exfiltração ao longo do ano hidrológico de monitoramento. Devido ao seu expressivo deslocamento (superior a 240 m), ela parte no verão de uma morfologia em concavidade e uma exfiltração difusa, para uma morfologia em cavidade e uma exfiltração múltipla no inverno. Essa última configuração persistiu na maior parte do período de monitoramento. Porém, com a redução do nível freático, houve a mudança para exfiltração difusa, ainda na mesma cavidade erosiva. Em novembro, após o deslocamento para montante, a exfiltração difusa se estabeleceu em uma concavidade.

Com esses dados, percebe-se que a dinâmica geomorfológica sazonal está intimamente ligada à dinâmica hidrológica. A alteração do nível freático associada à mobilidade da exfiltração é o principal fator responsável pelas alterações morfológicas. Contudo, ressalta-se que há uma tendência oscilatória nessa dinâmica, de modo que a situação verificada no início do período de monitoramento é a mesma verificada no final.

7.2. PROCESSOS GEOMORFOLÓGICOS DE MÉDIO TERMO

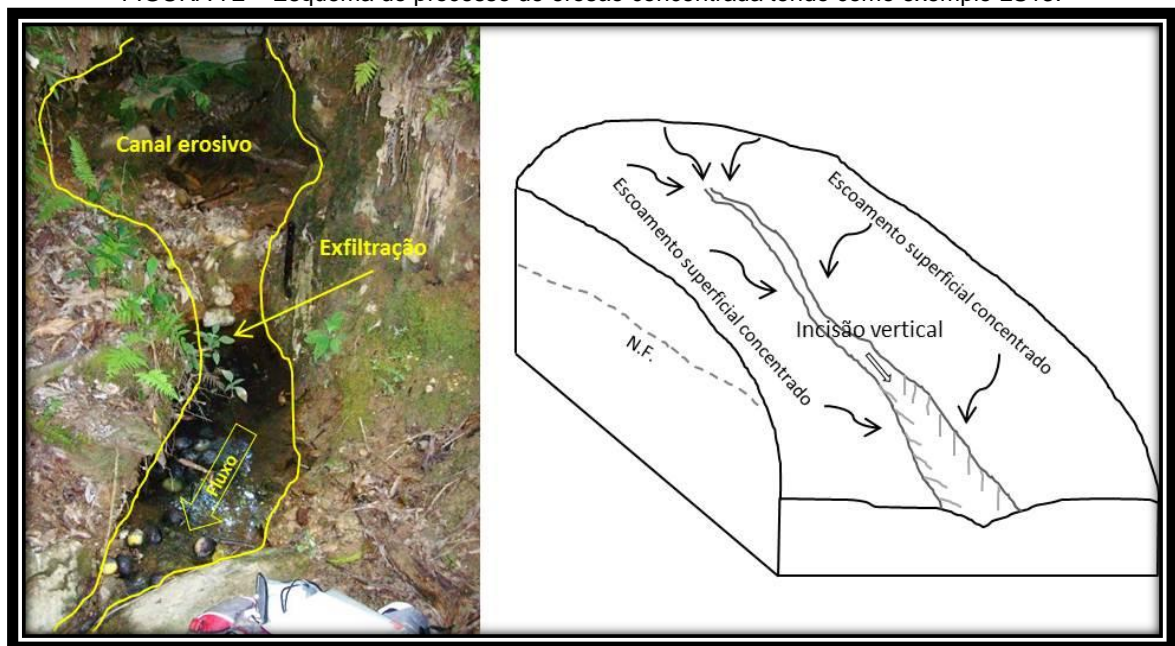
A exfiltração das nascentes ocorre no local onde o nível freático é interceptado pela superfície topográfica. Desse modo, os processos que modelam o relevo criam feições morfológicas que abrigam as nascentes. Notadamente, esses processos ocorrem gradativamente ao longo de décadas culminando na origem de feições que podem possuir desde alguns poucos centímetros quadrados até dezenas de metros quadrados.

O processo mais comumente associado à formação de canais de primeira ordem e, conseqüentemente, de nascentes é a erosão hídrica em sulco associada ao escoamento superficial concentrado (KNIGHTON, 1984; MONTGOMERY e DIETRICH, 1988). Esse processo é capaz de retirar materiais grossos da superfície, criando feições alongadas

longitudinalmente, normalmente estreitas e com profundidade de alguns centímetros (SUMMERFIELD, 1991). Quando a incisão vertical do talvegue de ravinas ou sulcos erosivos criados por esse processo atinge o nível freático, dá-se início a exfiltração.

A nascente LS13 é um típico exemplo de morfologia em canal (FIG. 72), originada pela erosão concentrada. A exfiltração ocorre em uma ruptura de declive no interior de uma ravina que se estende à montante do local de exfiltração como um segmento efêmero e que constitui morfologicamente o canal de primeira ordem à jusante da nascente.

FIGURA 72 – Esquema do processo de erosão concentrada tendo como exemplo LS13.



Fonte: Elaborado pelo autor.

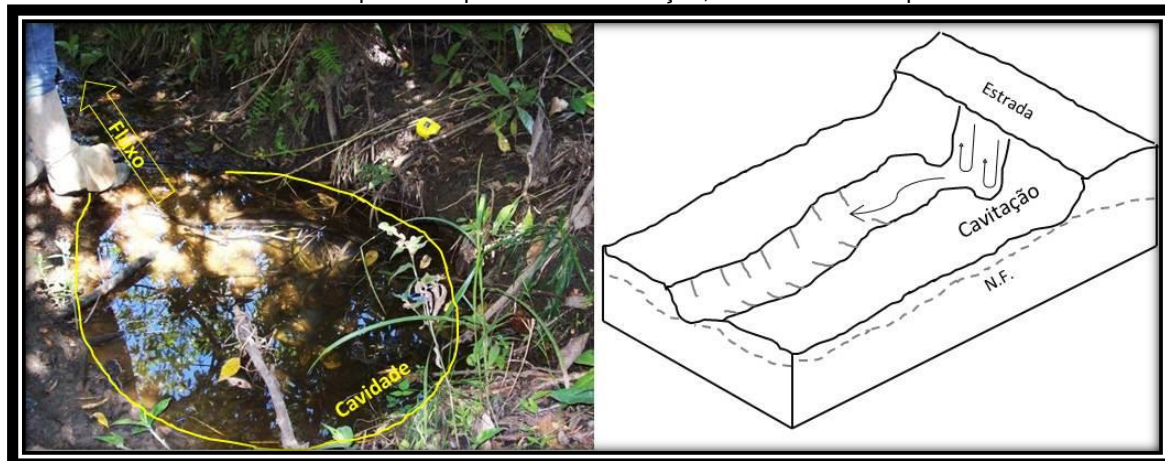
Outro processo associado ao escoamento superficial concentrado que está relacionado à formação de feições que abrigam nascentes é a cavitação⁶ (FIG. 73). Conceitualmente, é um processo tipicamente fluvial originado por fluxos de grande energia quando ocorrem pressão e atrito nas paredes e base do canal facilitando a remoção do material (CHRISTOFOLETTI, 1981).

A consequência morfológica é uma feição vulgarmente cilíndrica, em que a profundidade é superior à largura e ao comprimento, com um suave declive na direção do canal. No caso das nascentes, o processo de cavitação não é fluvial, mas pluvial. Origina-se pela ação do escoamento concentrado em canais erosivos acidentados, com degraus que possibilitam a cavitação. Na literatura brasileira, quando a amplitude altimétrica é mais significativa (dezenas

⁶ Reconhecido na literatura de língua inglesa como “*cavitation*”, conforme Knighton (1984).

de metros), esse processo tem sido referido como “efeito cachoeira”, conforme Santos e Baccaro (2004) e Drumond e Bacellar (2006).

FIGURA 73 – Esquema do processo de cavitação, tendo como exemplo SC04.



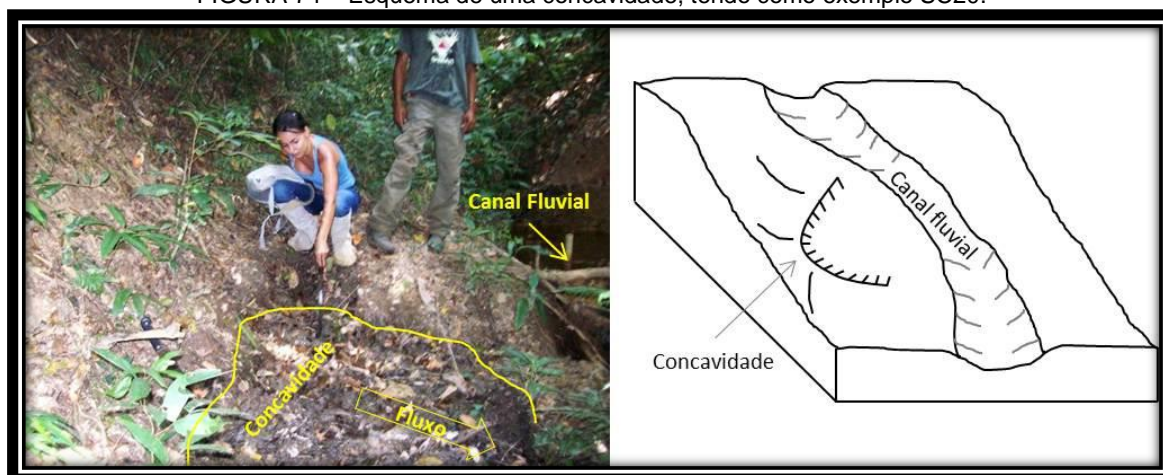
Fonte: elaborado pelo autor.

A nascente SC04 ocorre em uma cavidade erosiva. Dois sulcos convergem para uma ruptura de declive associada à criação de uma estrada vicinal. Com isso, há energia suficiente para a erosão hídrica escavar uma feição profunda. A base da cavidade atingiu o nível freático e possibilitou a ocorrência da exfiltração. A água se acumula na cavidade, formando um pequeno poço, até que atinja sua borda inferior e forme um canal a jusante.

Porém, a erosão hídrica nem sempre está associada ao escoamento concentrado. O escoamento difuso, controlado pela micromorfologia da vertente, também atua na remoção de materiais finos. Nesses casos, não há a formação de feições abruptas, mas um remodelamento da superfície de modo gradual, porém, contínuo. É comum originarem-se suaves feições côncavas (FIG. 74) em meio a segmentos da vertente de distintas geometrias, onde é retirada maior quantidade de material.

Processos subterrâneos também contribuem para a formação de concavidades suaves no terreno. O processo de *seepage erosion*, que ocorre pela exfiltração difusa da água subterrânea nos poros do solo, promove a remoção do material desagregado e faz com que as áreas onde ocorre sejam gradativamente escavadas. Onda (1994) relatou a evolução de anfiteatros em cabeceiras pelo processo de *seepage erosion* no Japão, demonstrando sua importância na evolução da drenagem fluvial.

FIGURA 74 – Esquema de uma concavidade, tendo como exemplo SC20.



Fonte: elaborado pelo autor.

Diversas nascentes ocorrem em concavidade, sendo SC20, um dos exemplos. Nascentes com essa natureza, normalmente possuem exfiltração difusa, uma vez que as concavidades são feições suaves, cujas bases atingem o nível freático. Essas nascentes, porém, iniciam-se com um fluxo laminar, passando para o concentrado somente à jusante da concavidade, onde há o início da formação de um canal.

Em vertentes íngremes e margens de canais erosivos, processos sub-superficiais são responsáveis pela criação de feições que abrigam nascentes. Os dutos (*pipes*) são considerados como passagens tubulares esculpidas no interior do solo, decorrentes do carreamento de material fino e coloides associado a um elevado gradiente hidráulico (AUGUSTIN e ARANHA, 2006). O processo erosivo que leva à formação dos dutos é chamado *piping*.

A importância hidrológica e geomorfológica dos dutos é amplamente discutida na literatura acadêmica. Assume-se que os dutos promovem uma rápida drenagem da água, ao concentrar diversos fluxos subterrâneos para um local específico, contribuindo para o aumento do escoamento superficial (JONES, 1994). Suas origens estão associadas ao crescimento de raízes, ação da fauna e baixo poder de agregação do solo (PIERSON, 1983 *apud* AUGUSTIN e ARANHA, 2006). Também deve ser considerada a variabilidade de condutividade hidráulica no perfil do solo, que pode criar superfícies de acúmulo dos fluxos sub-superficiais.

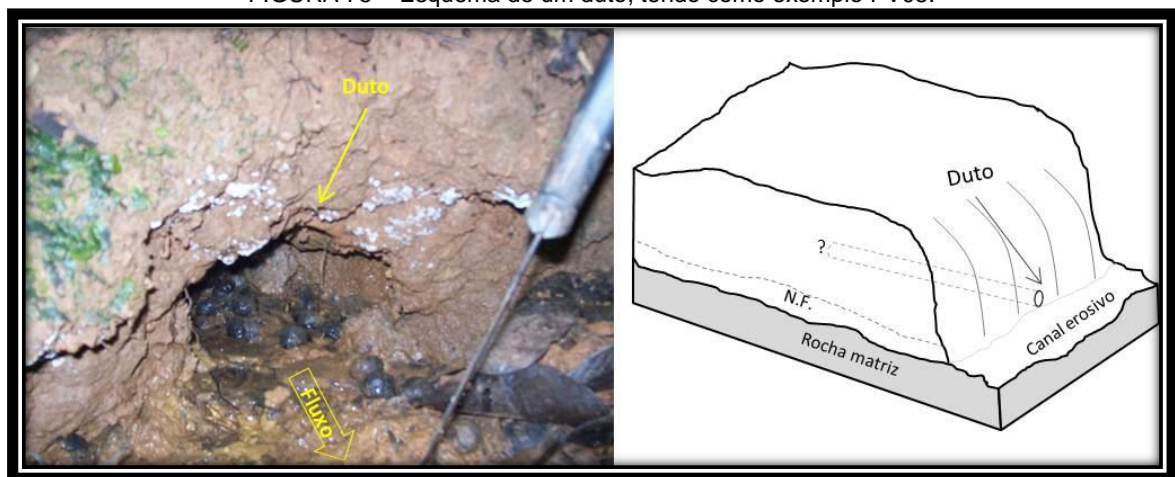
A partir do momento que constitui vias de afloramento da água subsuperficial à superfície, o *piping* deve ser considerado como um importante mecanismo de formação de nascentes, como já pautado por Jones (1981). Nesses casos, a exfiltração é pontualmente localizada na abertura do duto e a escavação do canal ocorre pela erosão à jusante, dada à elevada energia

da água proveniente dos dutos. O gradiente topográfico será determinante no direcionamento do canal de primeira ordem e em seu processo de incisão. Nesse contexto, encaixam-se os mais diversos tipos de dutos, incluindo os verticais e horizontais.

Por outro lado, não se pode ignorar o processo de *sapping* (ou *groudwater-sapping*). A erosão por *sapping* ocorre quando o fluxo subterrâneo aflora no sopé de vertentes íngremes, promovendo a instabilidade do material e a criação de voçorocas, anfiteatros e cabeceiras de drenagem (SHUMM *et al.*, 1995; FERNANDEZ *et al.*, 2008). Diferentemente do *piping*, o *sapping* não forma os dutos, uma vez que a exfiltração da água ocorre em uma faixa (e não pontualmente). O processo de evolução de drenagem baseado no escoamento subterrâneo concentrado proposto por Dunne (1980) perpassa a erosão por *sapping*. Diversos trabalhos posteriores demonstraram a formação da rede de drenagem por esse processo (SHUMM *et al.*, 1995; FERNANDEZ *et al.*, 2008; LUO, 2000), comprovando sua importância.

A nascente PV05 representa o processo de *piping* (FIG. 75). Sua exfiltração ocorre pontualmente na abertura de um duto horizontal. Neste caso específico, o duto foi interceptado por um sulco erosivo que o expôs à superfície, gerando a exfiltração. Assim, imediatamente após a saída da água pelo duto, o canal erosivo drena a nascente em direção a um curso receptor à jusante. Por sua vez, PV07, que ocorre em múltiplos pequenos dutos na margem de um canal fluvial, representa o processo de *sapping*.

FIGURA 75 – Esquema de um duto, tendo como exemplo PV05.



Fonte: elaborado pelo autor.

Além dos processos erosivos, sabe-se que os movimentos de massa também podem ocasionar a interceptação do nível freático e a formação de nascentes, sobretudo quando são originados a partir de *piping* ou *sapping* (LUO, 2000). Todavia, não foi encontrada nascente com essa peculiaridade nas áreas de estudo. Ainda que escorregamentos possam ser

importantes na formação de cabeceiras de drenagem (MOLINARI, 2012), nas nascentes estudadas, os processos erosivos são condicionantes mais diretos da exfiltração. Todavia, a representatividade desses processos gravitacionais na gênese de nascentes deve ser mais significativa em áreas onde a morfogênese atual reflita maior influência dos movimentos de massa.

7.3. DINÂMICA DE LONGO TERMO: RELAÇÕES MULTIESCALARES

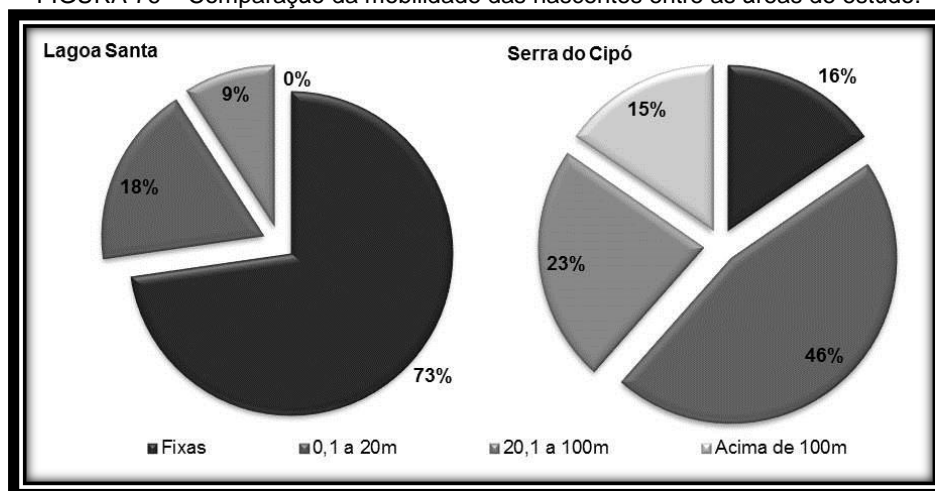
Os processos geomorfológicos de longo termo permeiam indiretamente todo o trabalho. Por esse motivo, duas áreas de estudo consideravelmente distintas foram escolhidas, uma vez que, na impossibilidade de acompanhar eventos dessa escala temporal, pode-se apenas, basear-se nos resultados que estes produziram na paisagem. Sendo assim, relações multiescalares são imprescindíveis, na busca por compreender como os grandes compartimentos do relevo (e seus processos associados) influenciam as nascentes.

É possível afirmar que os macroprocessos que geram as grandes feições do relevo terrestre acabam por influenciar sobremaneira os processos em escalas espaciais menores. Não obstante, relevos serranos estão geralmente associados a elevadas taxas de erosão e elevada velocidade dos fluxos hidrológicos, quando comparados a terrenos mais suavizados. Nesse sentido, os condicionantes dos processos de médio e curto termo são definidos, muitas vezes, por processos de longo termo. Por isso, a comparação dos resultados da dinâmica geomorfológica das nascentes entre as duas áreas de estudo, por um ponto de vista multiescalar, possibilita a discussão dessa questão.

Ainda que a amostragem estudada não represente de forma fidedigna o universo de nascentes existentes na Serra do Espinhaço Meridional ou na Depressão do Alto-Médio São Francisco, ela permite uma aproximação com os processos fundamentais que controlam a dinâmica hidrogeomorfológica das nascentes dentro desses compartimentos.

A mobilidade ficou evidenciada como um dos principais elementos da dinâmica hidrogeomorfológica sazonal das nascentes e pode ser utilizada para interpretar essas relações multiescalares. Em uma rápida visualização dos dados, é notória a diferença entre a mobilidade das nascentes de Lagoa Santa e da Serra do Cipó. Na primeira área de estudo, apenas três das onze nascentes monitoradas são móveis (27%); na Serra do Cipó, incluindo como móveis aquelas nascentes com deslocamentos centimétricos, tem-se um percentual de nascentes móveis de 85%, com apenas duas nascentes fixas (FIG. 76).

FIGURA 76 – Comparação da mobilidade das nascentes entre as áreas de estudo.



Fonte: dados de campo.

Os sistemas aquíferos que alimentam as nascentes de Lagoa Santa caracterizam-se de modo geral, por rochas clastoquímicas sotopostas a um espesso manto de alteração. Isso implica em uma boa capacidade de armazenamento e distribuição da água subterrânea, principalmente em locais de maior permeabilidade secundária das rochas devido à carstificação. Ademais, o espesso regolito funciona como um aquífero granular que garante a alimentação das nascentes no período de estiagem.

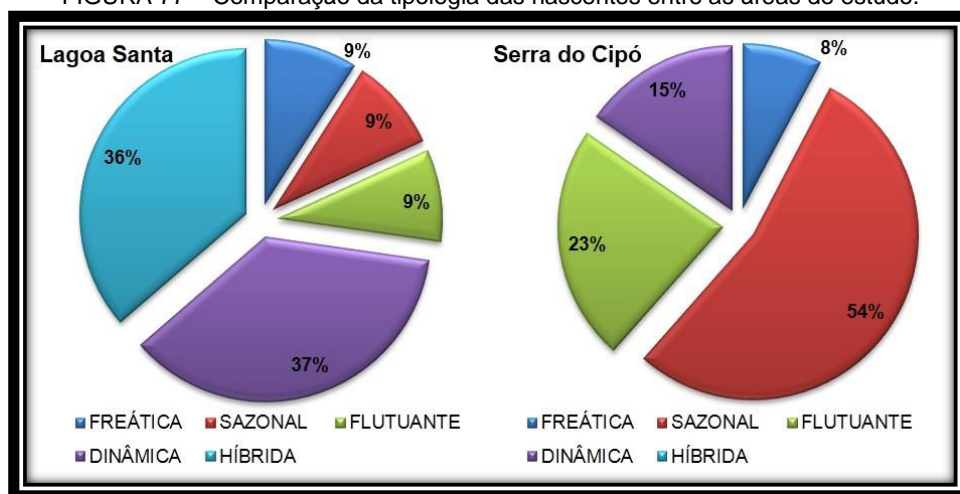
Por sua vez, os sistemas aquíferos na Serra do Cipó possuem menor capacidade de armazenamento de água, uma vez que predominam neossolos sobre o aquífero fissural. Isso implica em uma distribuição da água mais rápida, de modo que a participação do manto de intemperismo na alimentação das nascentes é diminuída. Nota-se, que os percentuais de mobilidade e de intermitência são muito similares (ver capítulo 6). Essa íntima relação é promovida pelos mesmos fatores ambientais de escala regional, uma vez que quando não há boa capacidade de armazenamento e distribuição da água subterrânea, tem-se o rebaixamento do nível freático. Por conseguinte, dois processos podem ocorrer: o deslocamento da exfiltração para jusante, ou, em casos mais extremos, sua interrupção promovendo a intermitência.

Nesse sentido, percebe-se que, além do fator geológico, a geomorfologia regional contribui para essa configuração. O maciço do Espinhaço é reconhecidamente uma área de intensa atividade dos processos desnudacionais. Associado à resistência dos metassedimentos ao intemperismo, esse fator condiciona um manto de alteração pouco espesso. Já na Depressão do Alto-Médio São Francisco, em termos pedológicos, o rejuvenescimento dos solos tende a ser menor, promovendo coberturas pedológicas mais profundas. Como já foi dito, a espessura e a natureza do manto de alteração são fundamentais para os fluxos sub-superficiais que

alimentam as nascentes. Por esse motivo, os dois diferentes compartimentos regionais do relevo, promovem distintas dinâmicas hidrogeomorfológicas sazonais das nascentes que abrigam.

A síntese dessas relações multiescalares pode ser baseada na tipologia das nascentes, uma vez que esta se relaciona metodologicamente a variáveis exclusivamente locais, mas que, ainda assim, guardam comportamentos regionais distintos. A FIG. 77 mostra a comparação da distribuição da frequência de cada tipo de nascente nas áreas de estudo.

FIGURA 77 – Comparação da tipologia das nascentes entre as áreas de estudo.



Fonte: dados de campo.

Enquanto as nascentes dinâmicas predominam em Lagoa Santa, ocupam um percentual de apenas 15% na Serra do Cipó. Por outro lado, nesta última área, há uma participação muito superior de nascentes sazonais. Além disso, o modelo proposto não apresentou nenhuma nascente híbrida na Serra do Cipó (ainda que ocorram dois casos ajustados), enquanto 36% das nascentes da Lagoa Santa foram consideradas híbridas.

Dentre as variáveis que entram no modelo de tipologia destacam-se na explicação das classes a morfologia, o tipo de exfiltração, a sazonalidade e a mobilidade. Como já foi apresentado, a morfologia das nascentes está intimamente ligada aos processos geomorfológicos de médio termo, sobretudo erosivos, que esculpem as vertentes criando condições para a exfiltração. Nesse sentido, condicionantes regionais controlam esses fenômenos, promovendo maior ou menor energia ao sistema a partir do gradiente topográfico.

O tipo de exfiltração acompanha essa lógica, uma vez que determinadas morfologias estão diretamente associadas ao modo como a água emerge à superfície. Além disso, é provável

que também o tipo de exfiltração esteja relacionado ao gradiente topográfico, uma vez que a energia dos fluxos sub-superficiais em aquíferos livres é predominantemente gravitacional.

Quanto às variáveis sazonalidade e mobilidade, retoma-se a discussão anterior. Ambas estão intimamente ligadas entre si e à profundidade das coberturas superficiais. Assim, compartimentos do relevo mais suavizados, em que os processos erosivos são menos agressivos, tendem a possuir mantos de alteração mais espessos, o que leva a nascentes fixas e perenes, sobretudo do tipo freática e dinâmica. Por outro lado, relevos fortemente ondulados e com processos erosivos intensos, tendem a possuir mantos de intemperismo mais rasos, condicionando nascentes móveis e intermitentes. Esse é o caso de nascentes sazonais e freáticas.

7.4. O TRABALHO GEOMORFOLÓGICO DAS NASCENTES

Além da influência dos processos geomorfológicos na dinâmica das nascentes, estas também devem ser entendidas enquanto elementos ativos na evolução geomorfológica da paisagem. Através da nascente, uma grande quantidade de matéria dissolvida é retirada do meio subterrâneo e colocada nos cursos fluviais contribuindo com a desnudação geoquímica de sua bacia hidrográfica. Entretanto, a contribuição efetiva das nascentes na perda de massa continental é ainda obscura.

Summerfield (1991) afirma que aproximadamente um terço da desnudação total (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 (THOMAS, 1994). Considerando-se que as águas subterrâneas possuem notadamente grau de mineralização superior às águas fluviais e meteóricas e que isso implica em grande carga em solução, fica evidenciada a importância do trabalho geomorfológico das nascentes. Valadão (1998) aponta nesse sentido, quando 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. Para as nascentes, não há possibilidade de calcular taxas de desnudação geoquímica devido ao fato da imprecisão relacionada ao volume da bacia subterrânea que a alimenta, mas ao se relacionar o TDS e a vazão pode-se calcular, ao menos, a quantidade de matéria perdida por unidade de tempo no processo de exfiltração.

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 (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.

A TAB. 9 apresenta os resultados sazonais e anuais de TDS⁷ e perda geoquímica nas nascentes, calculados a partir da soma dos elementos encontrados em solução na água. Para as concentrações abaixo do limite de detecção (LD) dos métodos, poder-se-ia assumir seus valores como zero (mínimo possível) ou como o valor absoluto dos limites de detecção apresentado no QUADRO 2 (máximo possível). Entretanto, como esses casos se resumiram, na maioria das vezes, a elementos traços, essa diferença raramente ultrapassou os 10%. Optou-se por utilizar o valor absoluto do LD (máximo possível) para o cálculo do TDS.

Os valores de TDS sazonais foram calculados a partir da soma dos parâmetros hidrogeoquímicos mensurados. Para as nascentes perenes, o TDS anual representa a média aritmética dos TDS sazonais; entretanto, para as nascentes intermitentes, na impossibilidade de coletar amostras para o período seco, o TDS anual corresponde ao TDS no período úmido (única medida). A perda geoquímica sazonal foi calculada pelo TDS sazonal e a vazão mensurada no momento da coleta. Já a perda total (anual) foi mensurada a partir do TDS médio anual e da vazão média das nascentes.

Os valores anuais de TDS apresentaram grande variação. Enquanto os menores valores foram da ordem de 4 mg/L, os maiores superaram os 200 mg/L. No total, cinco nascentes apresentaram TDS inferior a 10 mg/L, por outro lado, seis outras nascentes tiveram TDS superior a 100 mg/L, sendo que quatro destas superaram 180 mg/L de média anual (TAB. 9).

⁷ O TDS anual foi calculado pela média aritmética do TDS mensurado em agosto de 2011 e fevereiro de 2012.

TABELA 9
Sólidos totais dissolvidos e perda geoquímica sazonal e anual nas nascentes estudadas

Nascente	Período Seco								Período Úmido								Anual	
	Ânions (mg/L)	Cátions (mg/L)	Sílica (mg/L)	Metais (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	TDS (mg/L)	Vazão (L/s)	Perda geoquímica (mg/s)	Ânions (mg/L)	Cátions (mg/L)	Sílica (mg/L)	Metais (mg/L)	Carbonatos (mg/L)	TDS (mg/L)	Vazão (L/s)	Perda geoquímica (mg/s)	TDS (mg/L)	Perda geoquímica (kg/y)
LS02	-	-	-	-	-	-	0,002	-	1,01	2,63	12,37	43,12	53,20	112,33	0,003	0,32	112,33	10,44
LS05	-	-	-	-	-	-	0,000	-	0,60	0,48	6,76	0,48	0,60	8,92	0,130	1,16	8,92	13,97
LS06	-	-	-	-	-	-	0,000	-	0,82	0,65	6,59	1,71	0,70	10,47	0,008	0,08	10,47	3,73
LS13	0,53	2,57	17,65	70,36	116,51	207,62	0,004	0,83	1,05	2,58	14,36	84,01	121,72	223,72	0,008	1,80	215,67	66,58
LS14	0,72	2,56	15,50	69,10	122,61	210,49	0,004	0,76	0,64	2,41	13,60	86,27	116,42	219,34	0,006	1,29	214,92	32,65
LS15	0,75	3,58	18,97	40,25	75,03	138,58	0,005	0,64	0,81	4,98	13,83	82,96	121,24	223,83	0,084	18,74	181,20	149,03
PV03	2,82	3,05	17,37	66,25	117,73	207,22	4,372	906,02	2,90	2,89	16,01	58,67	102,42	182,89	5,250	960,17	195,05	45.342,40
PV05	-	-	-	-	-	-	0,007	-	0,68	2,59	16,67	48,87	66,48	135,30	0,024	3,22	135,30	110,92
PV07	0,73	1,82	15,01	16,34	46,36	80,26	0,032	2,59	1,03	2,69	13,39	24,01	33,58	74,70	0,053	3,94	77,48	117,77
PV11	2,05	2,34	13,83	14,93	39,04	72,19	0,009	0,68	1,89	3,01	11,38	20,25	45,98	82,51	0,020	1,67	77,35	100,93
PV14	-	-	-	-	-	-	0,000	-	1,02	4,17	12,67	45,38	26,27	89,50	0,011	1,01	89,50	7,09
SC04	1,59	3,32	15,10	8,71	22,57	51,29	0,004	0,23	0,97	1,84	13,42	11,86	11,33	39,42	0,005	0,21	45,35	32,45
SC05	1,42	0,88	9,31	0,31	3,05	14,97	0,011	0,16	1,03	0,73	8,09	2,12	0,85	12,82	0,063	0,80	13,89	17,94
SC10	-	-	-	-	-	-	0,000	-	0,61	0,60	3,24	2,29	1,35	8,09	0,043	0,35	8,09	26,28
SC12	-	-	-	-	-	-	0,000	-	0,60	0,51	1,40	1,01	0,60	4,12	0,016	0,07	4,12	3,76
SC14	-	-	-	-	-	-	0,000	-	0,74	0,61	3,52	3,56	3,57	12,00	0,068	0,82	12,00	24,66
SC18	-	-	-	-	-	-	0,000	-	1,00	0,97	8,63	2,46	0,60	13,66	0,018	0,25	13,66	7,93
SC19	-	-	-	-	-	-	0,000	-	1,16	1,09	8,39	2,50	0,60	13,74	0,046	0,63	13,74	33,65
SC23	1,31	0,84	12,90	3,47	3,05	21,57	0,024	0,51	0,63	0,79	11,39	5,34	2,84	20,99	0,048	1,00	21,28	74,71
SC24	1,44	0,92	6,60	0,30	6,10	15,36	0,010	0,16	0,98	0,69	5,08	0,88	0,60	8,23	0,063	0,52	11,80	46,97
SC27	-	-	-	-	-	-	0,029	-	1,13	1,10	4,86	1,05	0,60	8,74	0,083	0,72	8,74	9,35
SC28	-	-	-	-	-	-	0,000	-	0,77	0,47	4,26	0,31	0,60	6,41	0,009	0,06	6,41	25,86
SC29	0,82	0,59	9,68	0,35	0,60	12,04	0,179	2,16	0,90	0,61	7,17	2,11	0,60	11,39	0,258	2,94	11,71	160,61

Obs.: 1 - Vazões mensuradas em ago-11 (inverno) e fev-12 (verão). Na impossibilidade de mensuração nestes meses, utilizou-se a medição anterior mais próxima. 2 - Métodos laboratoriais de mensuração: ânions e cátions - IC; sílica - colorimetria; carbonatos - titulação; metais - ICP. 3 - Carbonatos referem-se ao total de CO₃⁻ e HCO₃⁻. 4 - 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.

Esses valores estão, em média, acima dos relatados na literatura para bacias hidrográficas com características geológicas e geomorfológicas similares às encontradas nas nascentes. Para bacias hidrográficas no Quadrilátero Ferrífero, Salgado *et al.* (2004) registraram valores de TDS entre 3 e 63 mg/L, denotando clara influência litológica nesses resultados. Já para áreas predominantemente quartzíticas, na Serra do Espinhaço Meridional, Rezende *et al.* (2010) observaram valores mais baixos de TDS, entre 3 e 24 mg/L. Relacionando a desnudação geoquímica aos compartimentos morfológicos e não diretamente à litologia, Salgado e Valadão (2003) encontraram TDS entre 19 e 35 mg/L, também no Espinhaço Meridional.

Esses resultados já eram esperados, uma vez que a taxa de mistura das águas das nascentes é inferior a das águas superficiais, fazendo com que os valores de TDS estejam principalmente relacionados à água subterrânea. De modo similar, o trabalho de Fagundo-Castillo *et al.* (2008) encontrou valores de TDS que variaram entre 24 e 622 mg/L para nascentes e cursos d'água oriundos de rochas carbonáticas, sendo os maiores valores relacionados ao calcário. Por sua vez, Costa *et al.* (2009) registraram valores consideravelmente mais baixos (10 a 28 mg/L) no que chamaram de "área das nascentes" da bacia do lago Maracanã, no estado do Pará, em coberturas sedimentares. Jang *et al.* (2012) trabalharam estatisticamente uma série de dados levantados acerca da hidrogeoquímica de nascentes em função do litotipo e afirmam que em rochas ígneas, o grau de mineralização das águas de nascentes é, em média, menor. Os maiores valores foram obtidos para rochas sedimentares, com destaque para as concentrações de HCO_3^- .

Os valores totais de perda geoquímica (Equação 5), entretanto, foram baixos. Oito nascentes apresentaram taxa inferior a 20 kg/y, sendo que duas destas registraram perda inferior a 3,8 kg/y, o que pode ser considerado um valor extremamente baixo. Por outro lado, a nascente PV03 apresentou perda geoquímica de 45.342kg/y, sem comparações dentro do rol estudado. A maior parte das nascentes, contudo, possui taxas de perda geoquímica entre 40 e 150 kg/y.

A magnitude dos resultados é explicada pelas baixas vazões das nascentes, quando comparadas a cursos fluviais. Apesar de elevados TDS, o esvaziamento geoquímico do meio subterrâneo depende da saída desse material nas nascentes através da exfiltração. Por esse motivo, mesmo nascentes com baixo TDS, caso possuam alta vazão, podem possuir perdas geoquímicas significativas ao longo do ano. É por esse motivo que PV03 apresenta essas taxas tão elevadas, já que além de possuir um dos TDS mais altos do rol, sua vazão é 25 vezes maior do que qualquer outra estudada (excetuando-se SC01, em que não foi possível persistir no estudo).

Justamente por essa influência da vazão, a sazonalidade é muito importante na compreensão do esvaziamento geoquímico por parte das nascentes. Devido à menor participação da água meteórica na exfiltração, no período seco (inverno), as concentrações dos parâmetros geoquímicos são maiores na média e na grande maioria dos casos. Por conseguinte, a média dos TDS do período seco é cerca de 70% superior a do período úmido.

Era esperado que a perda geoquímica instantânea, medida em cada uma das estações, seguisse um padrão inverso, devido ao aumento das vazões no verão. Porém, a sensível queda no TDS não foi compensada matematicamente pelo aumento da vazão, que variou aproximadamente 35%. Este fato está relacionado às nascentes intermitentes, que abaixaram a média de vazão no período seco e tendem a possuir baixas vazões no período úmido. Além disso, a influência dos eventos de precipitação na vazão das nascentes é complexa, de modo que o escoamento pluvial não atua nas nascentes, como nos cursos fluviais.

O detalhamento da hidrogeoquímica das nascentes será realizado no Capítulo 8. Todavia, somente pelos resultados de TDS já é possível fazer a distinção entre as nascentes de Lagoa Santa, no Grupo Bambuí, e as nascentes da Serra do Cipó, prioritariamente nos quartzitos do Grupo Macaúbas (TAB. 10). Notadamente, as nascentes de Lagoa Santa apresentam valores médios consideravelmente elevados de TDS, com média anual aproximadamente 842% maior do que na Serra do Cipó. Além disso, a nascente de maior vazão do rol está localizada em Lagoa Santa, o que faz com que as taxas de perda geoquímica das nascentes dessa área sejam expressivamente superiores às ocorridas na Serra do Cipó (108 vezes maior em termos anuais).

Entretanto, o fator locacional está relacionado à unidade geológica que funciona como aquífero, uma vez que duas nascentes localizadas no sopé da Serra do Cipó encontram-se no Grupo Bambuí. Avaliando os dados médios em função da geologia, reitera-se o descrito na literatura que as rochas clastoquímicas do Grupo Bambuí promovem TDS mais elevados nas águas (SALGADO e VALADÃO, 2003; REZENDE *et al.*, 2010). Comparando com os quartzitos do Grupo Macaúbas, a média anual de TDS nas nascentes do Bambuí é 1023% maior. Por outro lado, a perda geoquímica anual média das nascentes do Grupo Bambuí é 99 vezes maior do que aquela encontrada nas nascentes do Macaúbas.

TABELA 10
Média de TDS e Perda Geoquímica pela localização e geologia das nascentes

Período	Parâmetros	Rol completo	Área de estudo		Geologia	
			Lagoa Santa	Serra do Cipó	Grupo Bambuí	Grupo Macaúbas
Período Seco	Ânions (mg/L)	1,29	1,27	1,32	1,31	1,23
	Cátions (mg/L)	2,04	2,65	1,31	2,51	0,80
	Sílica (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 (mg/s)	83,16	151,92	0,64	114,03	0,83
Período Úmido	Ânions (mg/L)	1,00	1,13	0,88	1,08	0,89
	Cátions (mg/L)	1,70	2,64	0,83	2,44	0,74
	Sílica (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 (mg/s)	43,56	90,31	0,70	76,51	0,72
Anual	TDS (mg/L)	64,74	119,84	14,23	106,52	10,42
	Perda geoquímica (kg/y)	2.018,25	4.177,77	38,68	3.543,28	35,70

Ainda que PV03 fosse retirada dos cálculos (considerada *outlier*) esses resultados seriam mantidos, ainda que com magnitudes diferentes. Todavia, duas outras nascentes chamam atenção: LS05 e LS06. Apesar de localizarem-se em rochas do Grupo Bambuí, os resultados de TDS distam consideravelmente das suas circunvizinhas, possuindo resultados mais próximos às nascentes do Grupo Macaúbas. Os dados hidrogeoquímicos apresentados no capítulo 8, fornecerão argumentos para retomar essa discussão.

Por fim, pode-se afirmar que os resultados de TDS e perda geoquímica demonstram a importância do trabalho geomorfológico das nascentes. Estudos futuros são necessários para quantificar sua representatividade na desnudação geoquímica, porém, os dados apresentados já indicam que não pode ser negligenciada a relevância das nascentes, enquanto elementos de esculturação do relevo.

Percebe-se que o aquífero de origem é definidor do TDS das águas das nascentes. Porém, compreender sua dinâmica hidrológica e a magnitude de sua vazão possibilita a apreensão das perdas geoquímicas. Os resultados apresentados mostram que ainda que possuam valores de TDS baixos, vazões elevadas acabam por promover grandes taxas de perda geoquímica.

8. AQUÍFEROS DE ORIGEM

8.1. ASSINATURA GEOQUÍMICA

A água que emerge nas nascentes possui uma longa história de interação com a atmosfera, os solos e as rochas. Por ser uma substância quimicamente muito ativa, em cada uma dessas etapas, processos como a dissolução, a hidratação e a hidrólise, incorporam e retiram da água uma variedade de substâncias (moleculares e, principalmente, iônicas) que modificam sua composição química (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000). Contudo, 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 provem de sua fase subterrânea, exceto em casos de contaminação antrópica. A água atmosférica pode solubilizar somente alguns poucos gases e a água superficial tem pouco contato com o substrato para ser mineralizada. Por outro lado, no meio subterrâneo a velocidade dos escoamentos é mais lenta, permitindo um maior contato da água com os solos e as rochas. 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).

Apesar das variadas taxas de mistura prováveis, sabe-se que a parcela de água subterrânea nas nascentes é a mais representativa, sobretudo no período seco, onde o fluxo de base sustenta a exfiltração. Por esse motivo, os métodos de análise da hidrogeoquímica das nascentes fundamentam-se na hidrogeologia.

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 com traços 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).

A partir de análises laboratoriais de amostras coletadas em agosto de 2011 e fevereiro de 2012 (ver capítulo 3), a concentração de todos esses elementos primários e secundários, bem como de alguns outros considerados traços foi mensurada. Um panorama hidrogeoquímico das nascentes estudadas pode ser visto nas TAB. 11 e 12, respectivamente referentes ao período seco e úmido do monitoramento.

Como já foi demonstrado para o TDS (capítulo 7), há uma sensível diferença entre o grau de mineralização das nascentes. Dois grupos podem ser identificados: i) nascentes com alto grau de mineralização e TDS, referentes aos terrenos carbonáticos; ii) nascentes com baixas concentrações de praticamente todos os elementos mensurados, referentes aos metassedimentos siliciclásticos.

Durante o período seco, a soma das concentrações médias de todos os elementos mensurados (exceto o CaCO_3 , derivado em CO_3^- , HCO_3^{2-} 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, carbonato/bicarbonato, cálcio e sílica. Secundariamente, verifica-se a importância do magnésio e sódio na hidrogeoquímica dessas nascentes (TAB. 11). Somente os íons carbonato/bicarbonato perfizeram em média 51% de toda a carga em solução nas nascentes. Por outro lado, em todas as nascentes estudadas, as concentrações de cromo, cobalto, cobre, cádmio, níquel, zinco, chumbo, brometo e nitrito, no período seco, ficaram abaixo do limite de detecção. Além disso, apenas uma nascente (LS15) apresentou leitura de manganês, bário e amônio nessa amostragem.

Os íons de maior concentração média apresentam esse comportamento em quaisquer dos contextos hidrogeológicos. Mesmo em nascentes de baixo grau de mineralização, os carbonatos/bicarbonatos, o cálcio e a sílica, apresentaram-se como os principais componentes da água.

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 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.

TABELA 11
Hidrogeoquímica das nascentes no período seco - concentrações em mg/L

Nascente	Mg	Al	Ca	Cr	Fe	Co	Cu	Cd	Ti	Mn	Ni	Zn	Ba	Pb	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	CaCO ₃	CO ₃ ⁻² + HCO ₃ ⁻	Sílica	
LS02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
LS05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LS06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LS13	6,060	0,073	64,000	LD	LD	LD	LD	LD	0,006	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	0,23	1,83	0,64	LD	191,0	116,5	17,7	
LS14	5,900	0,075	62,900	LD	0,001	LD	LD	LD	0,009	LD	LD	LD	LD	LD	LD	0,22	LD	LD	0,20	0,20	1,83	0,63	LD	201,0	122,6	15,5	
LS15	4,048	0,034	35,590	LD	0,195	LD	LD	LD	0,008	0,154	LD	LD	0,019	LD	LD	0,25	LD	LD	0,20	0,20	2,79	0,66	0,13	123,0	75,0	19,0	
PV03	3,042	0,080	62,900	LD	0,001	LD	LD	LD	0,007	LD	LD	LD	LD	LD	LD	0,52	LD	LD	0,91	1,29	2,21	0,74	LD	193,0	117,7	17,4	
PV05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PV07	2,890	LD	13,180	LD	0,001	LD	LD	LD	0,007	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	0,20	0,33	1,39	0,33	LD	76,0	46,4	15,0	
PV11	2,918	LD	11,750	LD	0,001	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	0,47	1,38	1,27	0,97	LD	64,0	39,0	13,8	
PV14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC04	2,103	LD	6,330	LD	0,016	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	0,88	LD	LD	0,41	0,20	0,63	2,59	LD	37,0	22,6	15,1	
SC05	0,034	LD	LD	LD	0,001	LD	LD	LD	0,003	LD	LD	LD	LD	LD	0,27	0,52	LD	LD	0,43	0,20	0,26	0,52	LD	5,0	3,1	9,3	
SC10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC23	0,603	0,048	1,127	LD	1,475	LD	LD	LD	0,002	LD	LD	LD	LD	LD	0,22	0,79	LD	LD	LD	0,20	0,59	0,15	LD	5,0	3,1	12,9	
SC24	0,026	LD	LD	LD	0,001	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	0,34	0,80	LD	LD	LD	0,20	0,29	0,53	LD	10,0	6,1	6,6	
SC27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC29	0,071	LD	LD	LD	0,001	LD	LD	LD	0,003	LD	LD	LD	LD	LD	LD	0,52	LD	LD	LD	LD	0,21	0,28	LD	LD	LD	LD	9,7

Fonte: concentrações de magnésio, alumínio, cálcio, cromo, ferro total, 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; LD = Limite de detecção; "-" = nascente seca.

TABELA 12
Hidrogeoquímica das nascentes no período úmido - concentrações em mg/L

Nascente	Mg	Al	Ca	Cr	Fe	Co	Cu	Cd	Ti	Mn	Ni	Zn	Ba	Pb	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	CaCO ₃	CO ₃ ⁻² + HCO ₃ ⁻	Silíc a
LS02	8,620	0,833	28,670	LD	4,133	0,056	LD	0,014	0,041	0,477	LD	LD	0,086	LD	0,23	0,10	LD	LD	LD	0,38	2,23	0,30	LD	87,2	53,2	12,4
LS05	LD	LD	LD	LD	LD	0,019	0,040	LD	LD	0,083	LD	LD	0,079	LD	LD	0,10	LD	LD	0,10	LD	0,21	0,17	LD	LD	LD	6,8
LS06	LD	0,455	0,610	0,091	LD	0,064	LD	0,024	0,043	0,147	LD	0,009	0,078	LD	LD	0,32	LD	LD	LD	0,37	0,18	0,10	1,2	0,7	6,6	
LS13	7,140	0,288	75,800	LD	LD	0,015	0,032	LD	LD	0,418	LD	LD	0,117	LD	0,10	0,52	LD	LD	LD	0,13	2,02	0,46	0,10	199,5	121,7	14,4
LS14	11,060	0,882	73,600	0,116	0,091	0,080	0,023	0,034	0,062	0,017	LD	LD	0,091	0,106	0,10	0,11	LD	LD	LD	0,13	1,91	0,40	0,10	190,9	116,4	13,6
LS15	8,220	0,693	72,500	0,060	0,027	0,065	LD	0,022	0,052	0,975	LD	LD	0,169	0,068	0,13	0,28	LD	LD	LD	LD	3,54	1,31	0,13	198,8	121,2	13,8
PV03	5,480	0,669	52,000	0,080	LD	0,079	0,008	0,033	0,052	0,013	LD	LD	0,081	LD	0,15	0,44	LD	LD	0,86	1,25	2,17	0,62	LD	167,9	102,4	16,0
PV05	8,040	0,599	39,780	LD	0,091	0,050	LD	0,014	0,045	0,014	LD	LD	0,050	LD	0,10	0,12	LD	LD	LD	0,16	2,37	0,12	LD	109,0	66,5	16,7
PV07	5,440	0,612	17,510	LD	0,083	0,015	0,037	LD	LD	LD	LD	LD	0,111	LD	LD	0,47	LD	LD	0,10	0,16	1,81	0,78	LD	55,1	33,6	13,4
PV11	4,561	0,562	14,610	0,081	0,077	0,063	LD	0,023	0,041	LD	LD	LD	0,048	LD	LD	0,12	LD	LD	0,15	1,32	2,00	0,88	0,13	75,4	46,0	11,4
PV14	11,780	LD	19,250	LD	6,900	0,039	0,028	LD	LD	7,030	LD	LD	0,116	LD	0,15	0,23	LD	LD	LD	0,34	2,92	0,95	0,30	43,1	26,3	12,7
SC04	2,453	0,315	8,600	LD	0,111	0,010	0,028	LD	LD	0,086	LD	LD	0,059	LD	LD	0,47	LD	LD	LD	LD	0,49	1,25	0,10	18,6	11,3	13,4
SC05	0,055	0,844	0,601	0,044	0,165	0,054	LD	0,015	0,045	0,063	LD	LD	0,055	LD	LD	0,33	LD	LD	0,30	LD	0,22	0,41	LD	1,4	0,8	8,1
SC10	0,103	0,604	0,950	0,067	0,163	0,060	LD	0,020	0,045	0,041	LD	LD	0,060	0,067	LD	0,11	LD	LD	LD	LD	0,26	0,12	0,22	2,2	1,4	3,2
SC12	LD	LD	0,706	LD	LD	0,012	0,029	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	LD	0,10	LD	LD	LD	LD	0,29	0,12	0,10	LD	LD	1,4
SC14	0,139	0,998	1,089	0,083	0,765	0,067	0,025	0,022	0,043	0,096	LD	0,007	0,052	LD	LD	0,24	LD	LD	LD	LD	0,30	0,19	0,12	5,9	3,6	3,5
SC18	0,102	0,731	0,810	0,098	0,186	0,076	0,065	0,031	0,042	0,058	LD	0,012	0,082	LD	LD	0,50	LD	LD	LD	LD	0,34	0,49	0,14	LD	LD	8,6
SC19	0,116	0,710	1,004	0,105	0,145	0,062	0,020	0,021	0,045	0,024	LD	0,003	0,079	LD	0,10	0,66	LD	LD	LD	LD	0,32	0,60	0,17	LD	LD	8,4
SC23	0,864	0,477	2,361	0,058	1,063	0,064	LD	0,019	0,045	0,132	LD	0,021	0,059	LD	LD	0,13	LD	LD	LD	LD	0,50	0,19	0,10	4,7	2,8	11,4
SC24	0,217	LD	LD	LD	0,243	0,018	0,037	LD	LD	0,045	LD	LD	0,074	LD	LD	0,48	LD	LD	LD	LD	0,36	0,23	LD	LD	LD	5,1
SC27	LD	LD	0,473	LD	0,053	0,018	0,052	LD	LD	0,125	LD	LD	0,092	LD	0,10	0,63	LD	LD	0,10	LD	0,55	0,45	0,10	LD	LD	4,9
SC28	LD	LD	LD	LD	0,045	0,012	0,034	LD	LD	LD	LD	LD	LD	0,021	LD	0,27	LD	LD	LD	LD	0,23	0,14	0,10	LD	LD	4,3
SC29	0,132	0,491	0,930	0,068	0,049	0,063	0,047	0,026	0,043	0,045	LD	LD	0,046	LD	LD	0,40	LD	LD	LD	LD	0,24	0,27	0,10	LD	LD	7,2

Fonte: amostragens realizadas em fev/12; concentrações de magnésio, alumínio, cálcio, cromo, ferro total, 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; LD = Limite de detecção; "-" = nascente seca.

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).

Segundo Albarède (2011), devido à ocorrência de diversos íons cíclicos, que permanecem por pouco tempo na água, as características químicas das águas fluviais podem ser sintetizadas pelos parâmetros: alcalinidade, sulfatos, cloretos e sílica. A composição resultante desses elementos é controlada pela natureza do substrato e permite diferenciar a dinâmica geomorfológica subterrânea das águas.

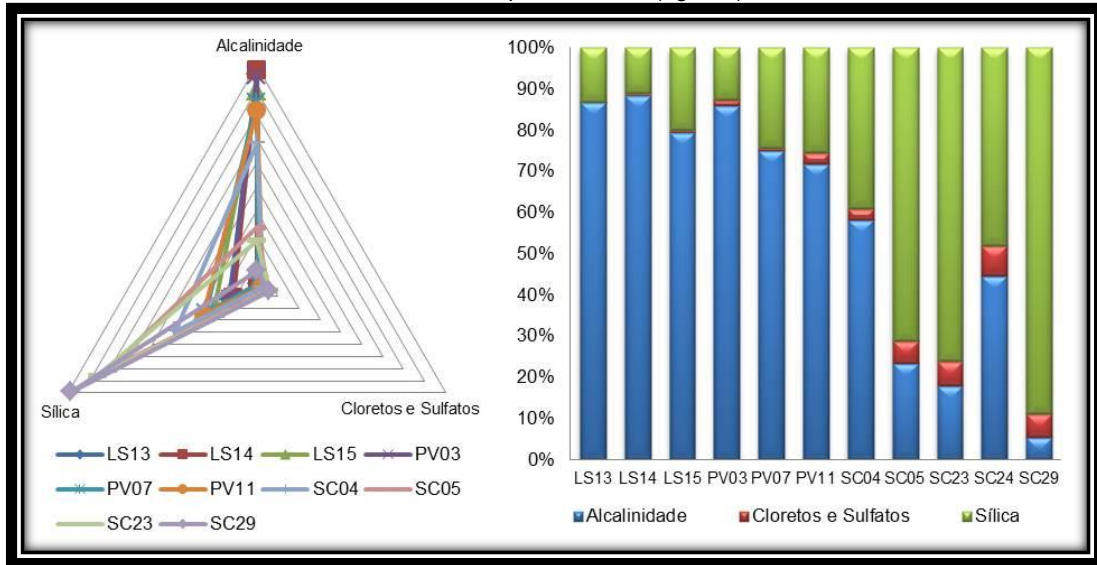
A FIG. 78 apresenta a participação relativa dos principais componentes iônicos⁸ da carga fluvial no período seco, conforme apresenta Albarède (2011). O gráfico triangular mostra que a alcalinidade possui maior presença na hidrogeoquímica das nascentes, tendo a sílica, na maioria dos casos, participação 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 (FIG. 78), 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.

Essa interpretação pode ser ampliada pelos Diagramas de Schoeller (FIG. 79 e 80) das águas das nascentes estudadas. Fica evidenciado pela geometria do diagrama que as nascentes de Lagoa Santa possuem assinatura geoquímica muito semelhante (FIG. 79). As nascentes SC23 e SC04 podem ser separadas pelo diagrama, evidenciando comportamento similar (FIG. 80), porém, com diferenças em termos absolutos nas concentrações registradas. Em termos da geometria de seus diagramas, as nascentes SC23 SC04 apresentam assinatura geoquímica comum às nascentes encontradas em Lagoa Santa.

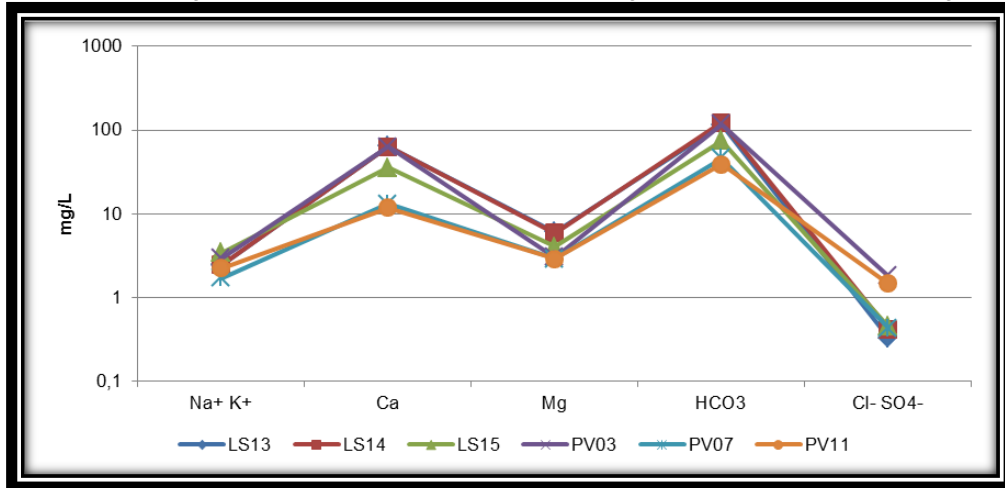
⁸ Para a construção dos Diagramas de Carga e de Schoeller, os parâmetros com leitura inferior ao LD foram considerados como possuindo concentrações iguais aos respectivos valores de LD, evitando assim, a ocorrência de zeros.

FIGURA 78 – Gráficos da participação relativa dos principais componentes hidrogeoquímicos da carga fluvial das nascentes no período seco (ago-11).



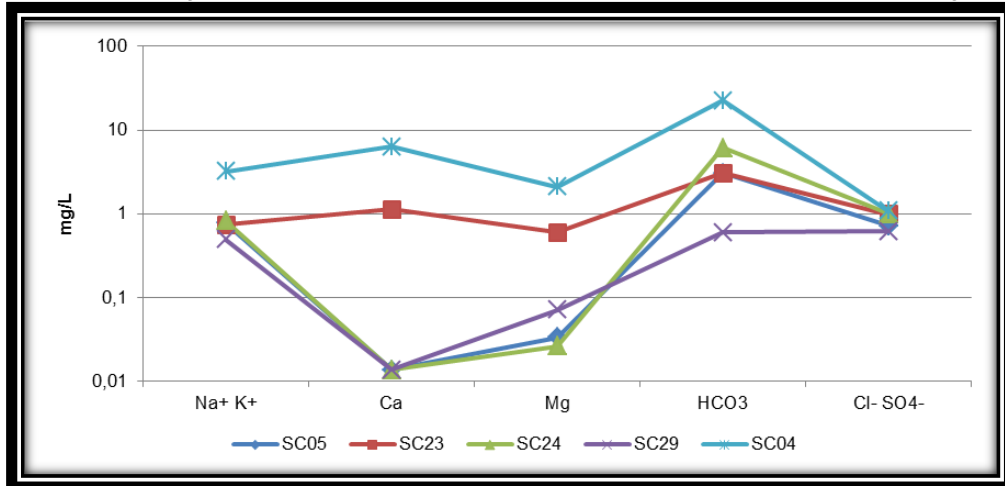
Fonte: dados laboratoriais.

FIGURA 79 – Diagrama de Schoeller das nascentes de Lagoa Santa no período seco (ago-11).



Fonte: dados laboratoriais.

FIGURA 80 – Diagrama de Schoeller das nascentes da Serra do Cipó no período seco (ago-11).



Fonte: dados laboratoriais.

Assim, as nascentes da Serra do Cipó não apresentam um comportamento homogêneo. Além de SC23 e SC04 que se aproximam da hidrogeoquímica de Lagoa Santa, o trio SC05, SC24 e SC29 registram outro tipo de comportamento. Com assinaturas geoquímicas muito próximas, essas nascentes apresentam baixas concentrações de todos os elementos, com destaque em suas composições para os carbonatos/bicarbonatos.

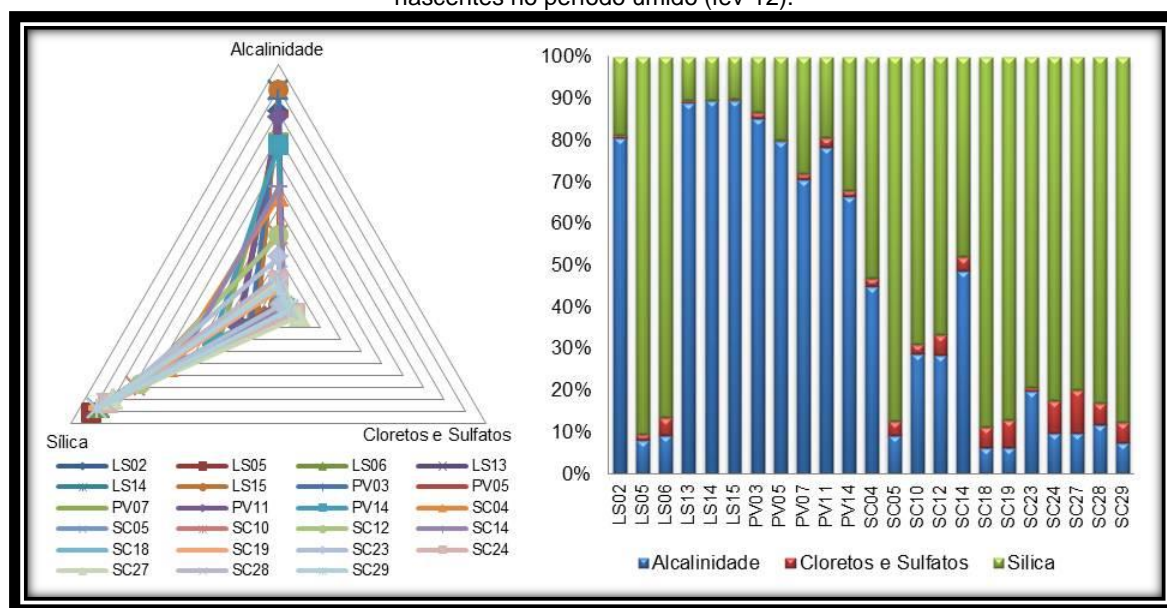
No período úmido, quando a participação da água meteórica, menos mineralizada, na água das nascentes é maior, os resultados principais do período seco são mantidos; porém, as concentrações absolutas são distintas. A literatura aponta para uma relação inversa entre a vazão e a concentração dos íons prioritários 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 apenas em fevereiro de 2012, mais de três meses após o início das chuvas, minimizando o “efeito pistão” nos resultados. Não se pode ignorar, todavia, a influência de possíveis eventos chuvosos poucos dias antes da coleta.

A soma das concentrações média dos íons mensurados na água das nascentes no período úmido (excetuando-se o CaCO_3 , derivado em CO_3^- , HCO_3^{2-} e Ca^+) foi de 86,6 mg/L, registrando uma queda de 20% em relação ao período seco. Os elementos mais representativos nessa soma, porém, mantiveram-se: carbonatos/bicarbonatos, cálcio e sílica (TAB. 12). Todavia, enquanto os dois últimos diminuíram sua participação percentual, os carbonatos/bicarbonatos foram ampliados para 54% de toda a carga química média (ainda que sua concentração absoluta média tenha diminuído).

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 (TAB. 12). Além disso, alguns elementos-traço que praticamente inexisteriam no período seco, foram registrados em diversas nascentes no período úmido, sobretudo: cromo, cobalto, cobre, cádmio, zinco e amônio. Acredita-se que esses resultados sejam decorrentes do carreamento desses elementos do meio superficial para o subsuperficial (raso) pelos eventos de precipitação. Por outro lado, novamente não foi registrada a presença de brometo e nitrito em nenhuma amostra.

Contudo, avaliando-se os principais componentes da carga fluvial (FIG. 81), os resultados são similares aos encontrados no período seco, reiterando a importância dos fluxos de base nas nascentes. O gráfico triangular novamente apresenta tendência para a esquerda, devido às maiores concentrações de carbonatos/bicarbonatos e sílica, em detrimento dos cloretos e sulfatos. O comportamento desses elementos em cada nascente (FIG. 81) 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 a 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.

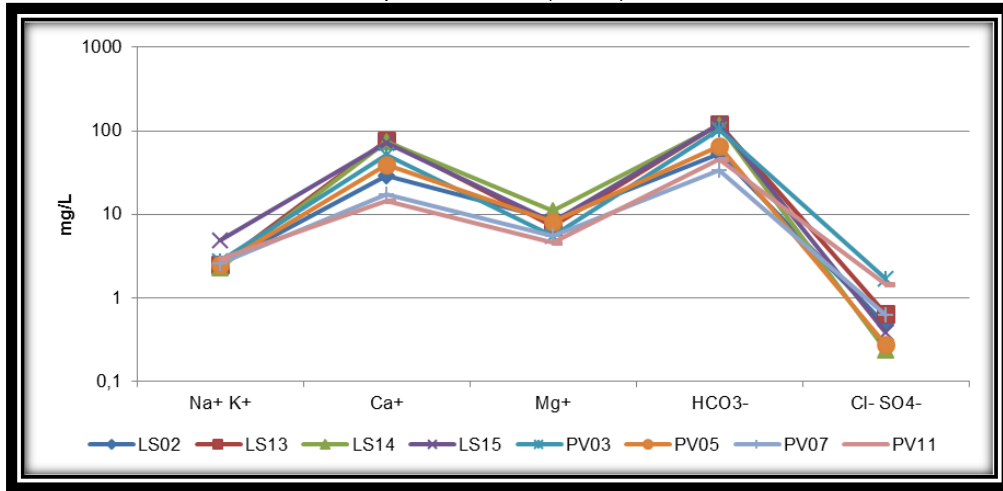
FIGURA 81 – Gráficos da participação relativa dos principais componentes hidrogeoquímicos da carga fluvial das nascentes no período úmido (fev-12).



Fonte: dados laboratoriais.

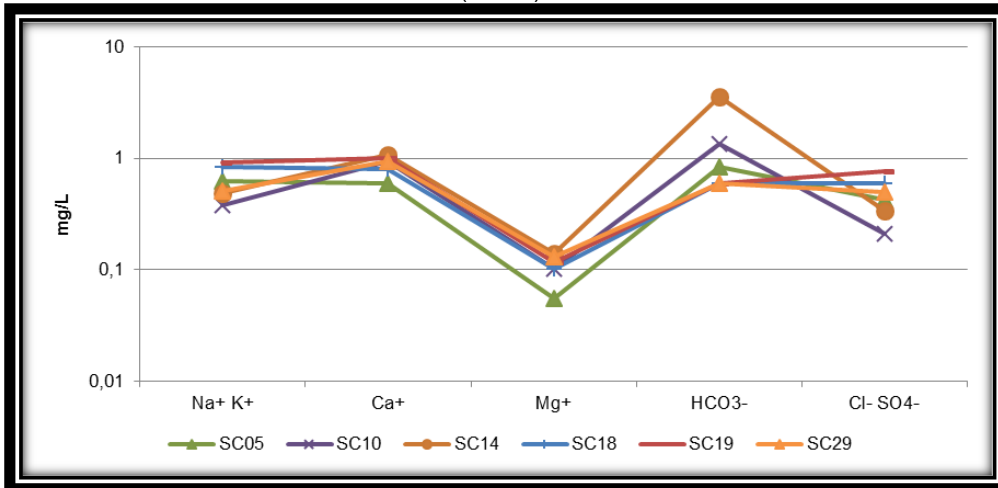
Os Diagramas de Schoeller (FIG. 82, 83 e 84) ampliam as possibilidades de interpretação dessas anomalias. As nascentes LS02, LS13, LS14, LS15, PV03, PV05, PV07 e PV11 apresentam assinaturas geoquímicas muito próximas (FIG. 82), semelhantes, inclusive, às apresentadas no período seco.

FIGURA 82 – Diagrama de Schoeller das nascentes LS02, LS13, LS14, LS15, PV03, PV05, PV07 e PV11 no período úmido (fev-12).



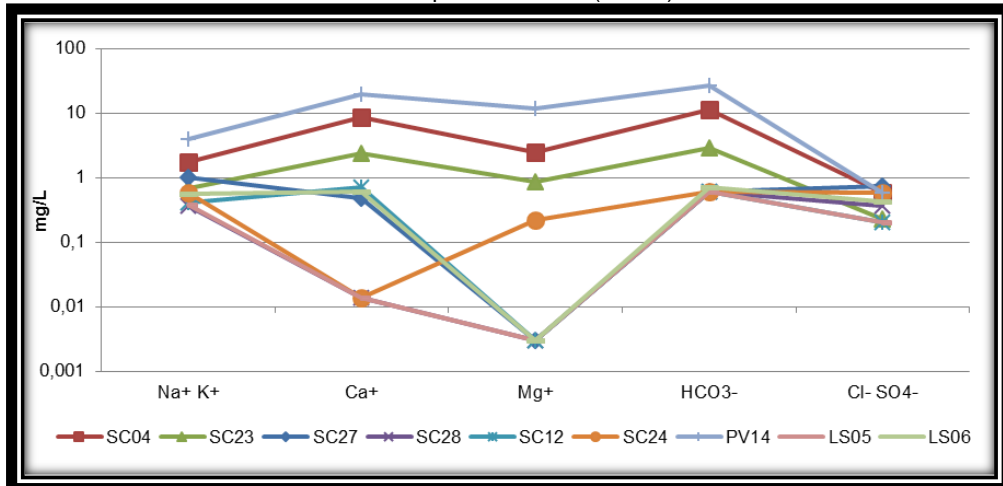
Fonte: dados laboratoriais.

FIGURA 83 – Diagrama de Schoeller das nascentes SC05, SC10, SC14, SC18, SC19 e SC29 no período úmido (fev-12).



Fonte: dados laboratoriais.

FIGURA 84 – Diagrama de Schoeller das nascentes SC04, SC23, SC27, SC28, SC12, SC24, PV14, LS05 e LS06 no período úmido (fev-12).



Fonte: dados laboratoriais.

Na FIG. 83, podem-se perceber dois grupos de comportamento hidrogeoquímico. As nascentes SC05, SC10 e SC14 tem assinatura geoquímica semelhante, com baixos valores de magnésio e valores maiores para carbonatos/bicarbonatos e cálcio. Entretanto, SC18, SC19 e SC29 se agrupam por possuírem concentração mais baixa de carbonatos/bicarbonatos e o cálcio como seu principal constituinte, promovendo geometria semelhante de seus diagramas. Nos demais íons, todavia, ambos os grupos possuem características semelhantes.

Por sua vez, a FIG. 84 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 carbonatos/bicarbonatos 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 do Grupo Bambuí. Sendo assim, esperava-se uma assinatura geoquímica similar à das nascentes que ocorrem nas proximidades. Acredita-se, então, que essa baixa mineralização possa estar associada a um aquífero suspenso no manto de intemperismo que recobre o Bambuí, 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. Contudo, esses casos merecem estudos específicos no futuro, na busca de explicações mais precisas.

8.2. TIPOS DE ÁGUA E IDENTIFICAÇÃO DOS AQUÍFEROS

O aquífero de origem das águas das nascentes pode ser apreendido a partir de suas características físico-químicas, uma vez que diferentes tipos de rocha, sob diferentes condições ambientais, resultam em diferentes interações 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 quanto maior o tempo de contato da água com os materiais geológicos, maior sua mineralização.

Dois modelos hidrogeológicos são recorrentemente utilizados para agrupar as águas subterrâneas de acordo com suas características químicas e separar os aquíferos de origem das águas. O Diagrama de Piper permite trabalhar com um grande número de amostras, classificando-as de acordo com os íons prioritários. Nesse modelo, o valor absoluto de cada íon não é preponderante, mas sim, o percentual de participação de cada um na carga dissolvida, permitindo a comparação de águas com distintos graus de mineralização. Por sua vez, o Diagrama de Stiff preconiza os valores absolutos dos principais cátions e ânions presentes na água⁹. Amostras com desenhos gráficos semelhantes, resultantes do diagrama, tendem a ser provenientes do mesmo sistema aquífero (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000).

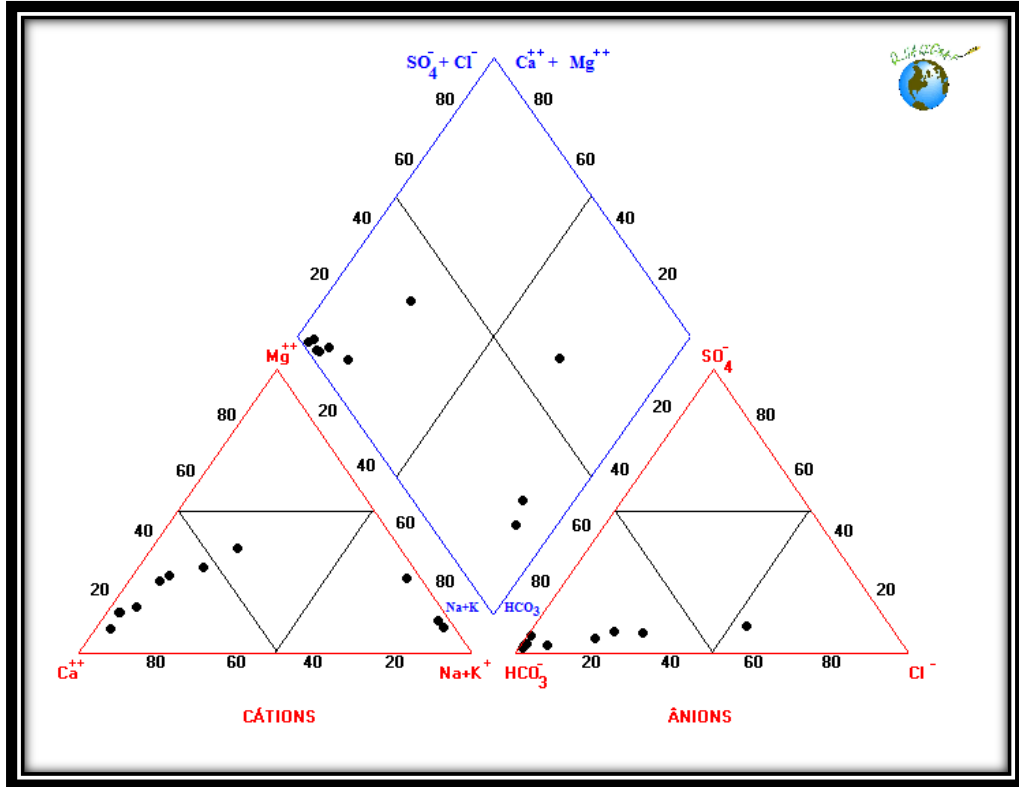
O Diagrama de Piper das onze nascentes drenantes durante a amostragem do período seco (ago/11) é apresentado no FIG. 85. Três classes de água foram identificadas:

- *Águas bicarbonatadas cálcicas*: nascentes LS13, LS14, LS15, PV03, PV07, PV11, SC04 e SC23, correspondendo a 73% das amostras, incluindo todas as de Lagoa Santa e as duas da Serra do Cipó que se encontram sobre rochas carbonáticas.
- *Águas bicarbonatadas sódicas*: nascentes SC05 e SC24, totalizando 18% das amostras.
- *Águas cloretadas sódicas*: apenas na nascente SC29.

Por se tratar do período de estiagem, acredita-se que essas amostras coletadas nas nascentes correspondam de forma fidedigna aos aquíferos os quais as alimentam. Porém, parte significativa das nascentes estudadas é intermitente. Com isso, foi necessário plotar os resultados hidrogeoquímicos do período úmido no Diagrama de Piper, assumindo a possibilidade de mistura com a água meteórica (FIG. 86).

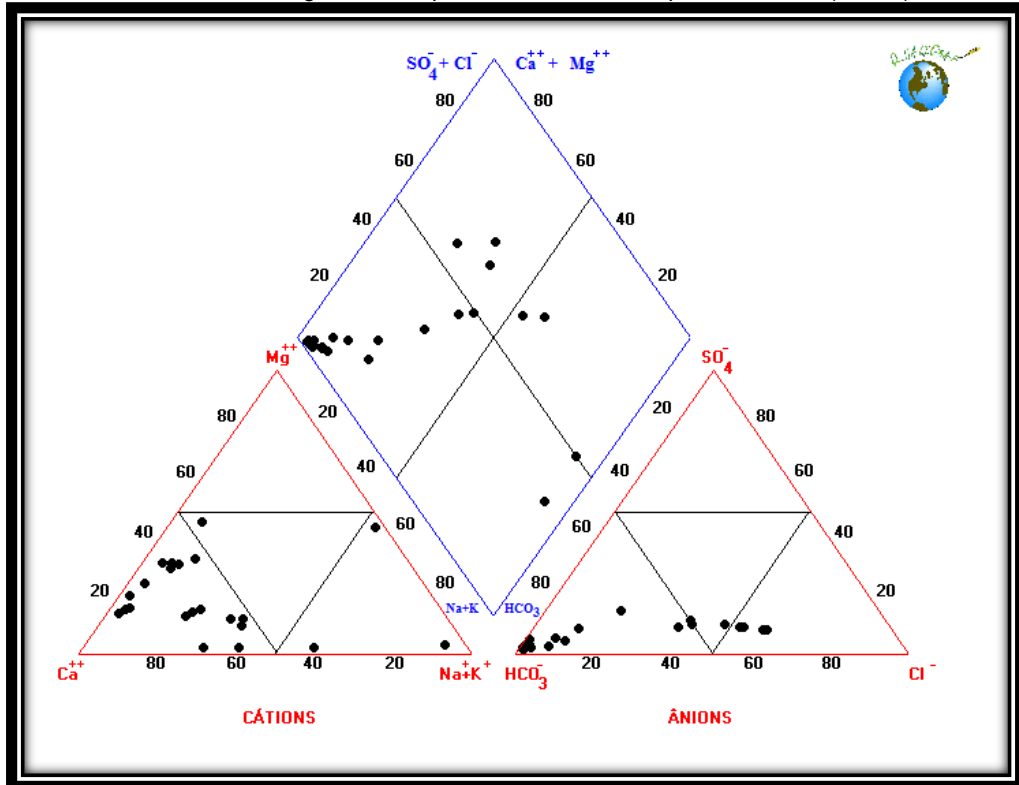
⁹ Assim como nos demais modelos hidrogeológicos, para a construção dos diagramas de Piper e de Stiff, foi utilizado o valor absoluto do LD para as análises que ficaram abaixo do LD, evitando a plotagem de zeros.

FIGURA 85 – Diagrama de Piper das nascentes drenantes no período seco (ago-11).



Fonte: dados laboratoriais.

FIGURA 86 – Diagrama de Piper das nascentes no período úmido (set-12).



Fonte: dados laboratoriais.

No período úmido, as quatro classes de água foram encontradas:

- *Águas bicarbonatadas cálcicas*: nascentes LS02, LS06, LS13, LS14, LS15, PV03, PV05, PV07, PV11, PV14, SC04, SC05, SC10, SC12, SC14 e SC23. Correspondem a 65% das amostras, sendo que SC05 e LS06 enquadram-se em um subgrupo distinto com maior proximidade do centro do gráfico.
- *Águas cloretadas sódicas*: nascentes SC27 e SC24, totalizando 8,7% das amostras.
- *Águas bicarbonatadas sódicas*: ocorrem apenas nas nascentes LS05 e SC28, também com 8,7% das amostras.
- *Águas cloretadas cálcicas*: nascentes SC29, SC18 e SC19, contando com 13% dos casos.

Comparando os Diagramas de Piper para os dois períodos analisados, três nascentes apresentaram mudança na classe de suas águas: SC05, SC24 e SC29. A primeira, classificada como bicarbonatada sódica no período seco, passou a bicarbonatada cálcica no úmido, devido à diminuição da concentração de sódio e aumento da de cálcio com o início das chuvas. Já SC24, passou de bicarbonatada sódica para cloretada sódica, já que mesmo considerando os limites de detecção houve uma queda geral nas concentrações dos íons, aumentando a participação relativa do cloreto e sódio. SC29 classificou-se em cloretada cálcica no inverno e cloretada sódica no verão, devido ao aumento da concentração de sódio, mesmo no período úmido.

Essas três nascentes tem em comum o fato de estarem localizadas em um mesmo contexto geológico-geomorfológico. SC24 marca o início do segmento perene de um canal fluvial e SC05 ocorre justamente no talude rochoso formado pela incisão do canal de SC24. Além disso, ambas possuem dinâmica hidrológica semelhante, com rápida resposta aos eventos chuvosos. Esses elementos podem auxiliar na compreensão desta mudança sazonal do tipo de água, já que indicam uma maior presença da água meteórica na exfiltração das nascentes. Por outro lado, SC29 está situada em local com cobertura eluvial profunda e relativa estabilidade sazonal. Provavelmente por esse motivo, seu TDS teve uma pequena oscilação do período seco para o úmido (muito baixo em ambas as estações), fazendo com que a troca de sua classe de água esteja relacionada a mudanças hidrogeoquímicas muito sutis em termos absolutos.

O Diagrama de Piper, por si só, já fornece importantes informações sobre a origem da água das nascentes. Todavia, essas análises podem ser refinadas pela interpretação do Diagrama de Stiff, pois este último possibilita uma análise quantitativa que indica o material de origem da água e ainda permite uma aproximação sobre seu tempo de residência.

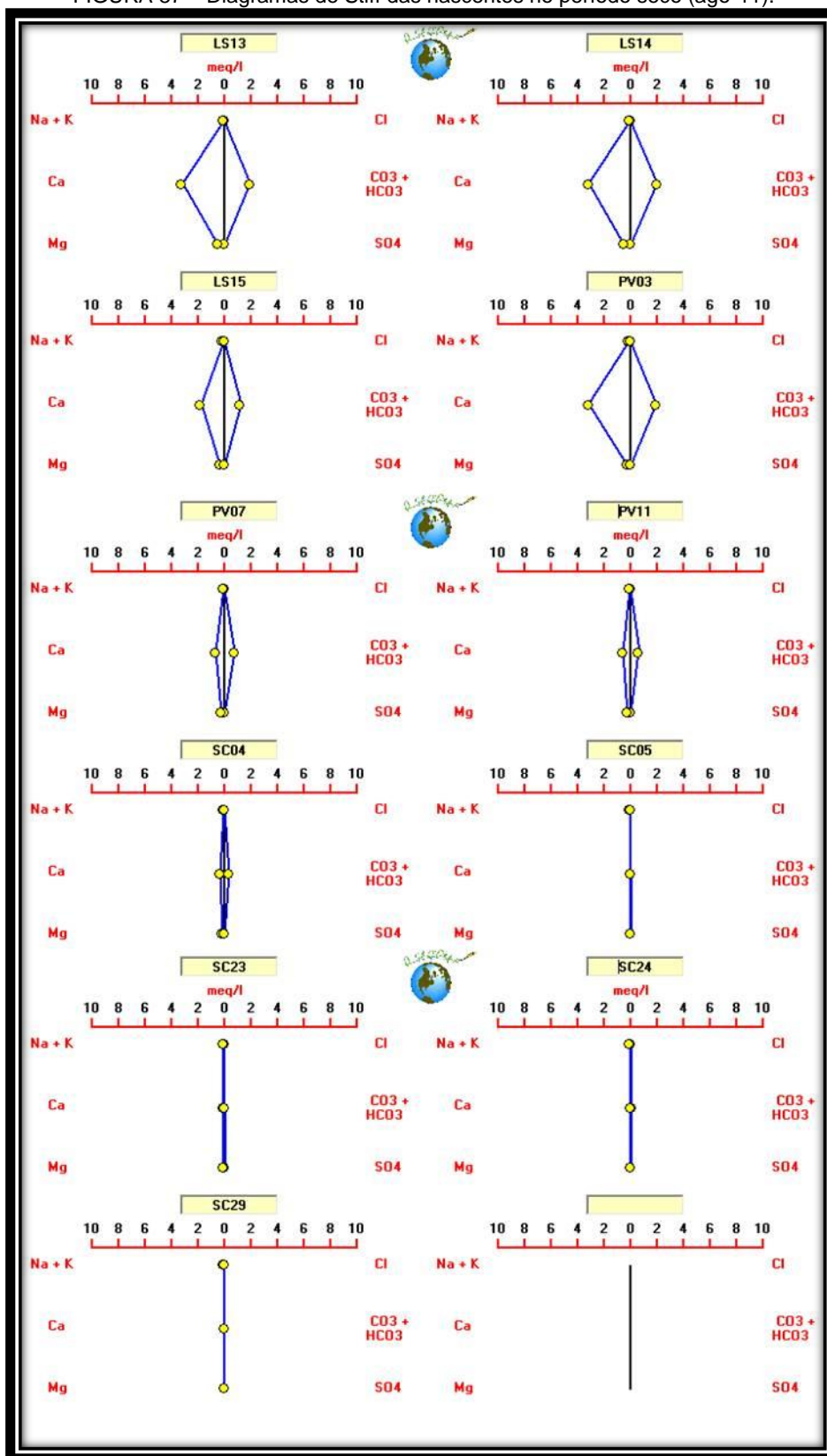
A FIG. 87 apresenta o mosaico dos Diagramas de Stiff para as nascentes estudadas no período seco. Fica evidenciada a existência de pelo menos três sistemas aquíferos distintos. O primeiro agrupa as nascentes LS13, LS14, LS15 e PV03, cujos diagramas formam uma espécie de losango aberto, denotando expressivas 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, porém, mais estreito em seu eixo horizontal. 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, denotando baixa concentração de todos os íons analisados.

Os Diagramas de Stiff construídos com os dados do período úmido (FIG. 88 e 89) reiteram esses grupos e apresentam algumas variações intermediárias a eles. Mesmo com a mistura da água meteórica sendo distinta em cada amostra, podem-se identificar nascentes com água oriunda do mesmo sistema aquífero.

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, que apesar de concentrações de carbonatos/bicarbonatos e cálcio ligeiramente inferiores as primeiras, mantêm o desenho losangonal no diagrama (FIG. 88). 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.

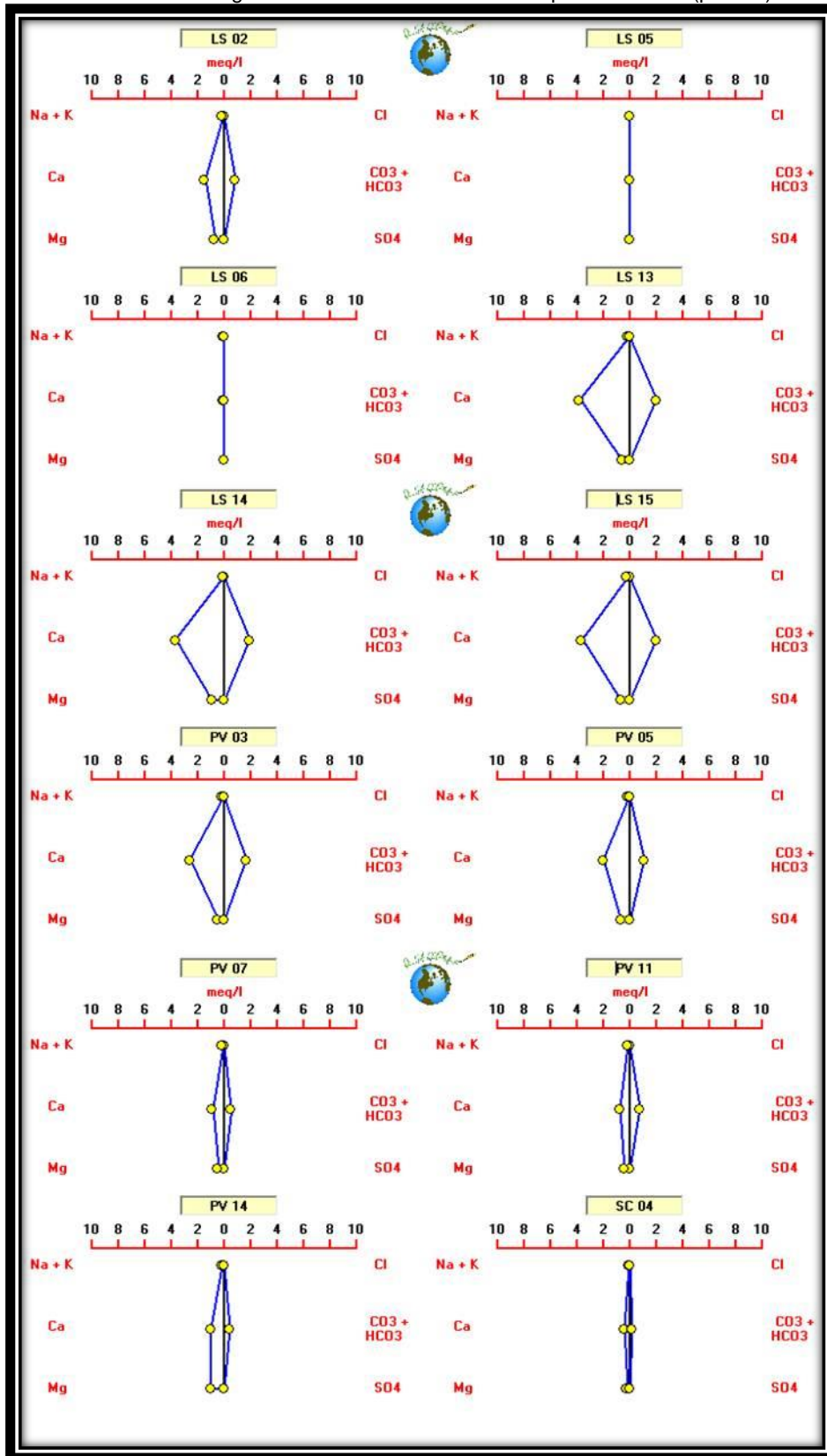
Podem ser inseridas em um segundo grupo as nascentes PV07, PV11, PV14 e SC04 (FIG. 88). Elas possuem diagramas com geometria losangonal, porém com menor extensão do eixo horizontal. Esse grupo também tem os carbonatos/bicarbonatos como importantes elementos em sua composição iônica, porém, os teores são menores do que no primeiro. 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.

FIGURA 87 – Diagramas de Stiff das nascentes no período seco (ago-11).



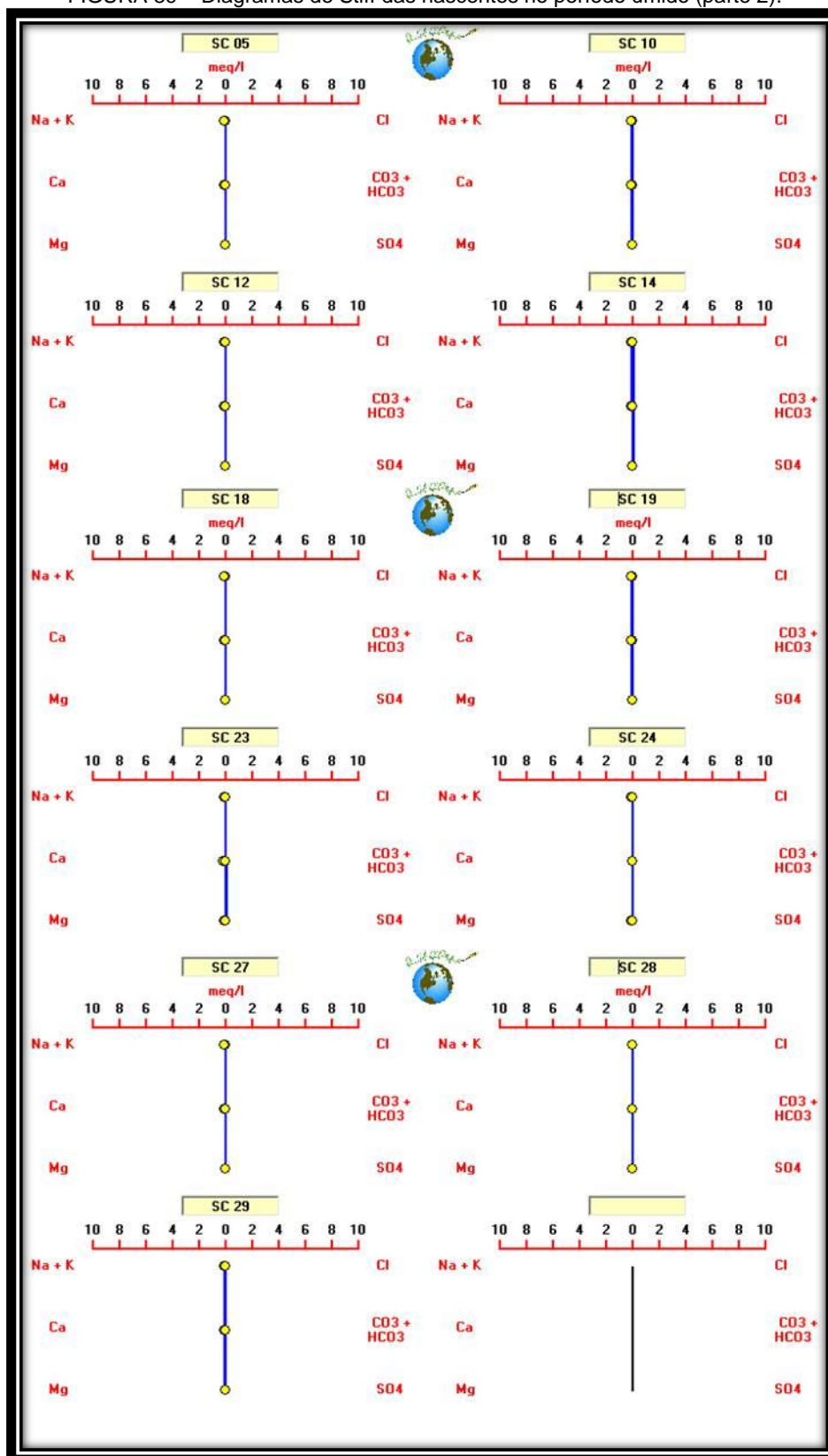
Fonte: dados laboratoriais.

FIGURA 88 – Diagramas de Stiff das nascentes no período úmido (parte 1).



Fonte: dados laboratoriais.

FIGURA 89 – Diagramas de Stiff das nascentes no período úmido (parte 2).



Fonte: dados laboratoriais.

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.

Associando-se os resultados dos Diagramas de Piper, Stiff e Schoeller, é possível identificar cinco sistemas aquíferos que alimentariam as nascentes estudadas, em função de suas características hidrogeoquímicas (QUADRO 9). Apesar de localizadas sobre 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 o Bambuí. Além disso, há a possibilidade de ocorrência de aquíferos suspensos, diminuindo a influência da rocha mãe na química das águas.

QUADRO 9
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 Alto teor de CO_3^- e HCO_3^{2-} 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 CO_3^- e HCO_3^{2-}
		SC12, SC27, SC28	Muito baixo grau de mineralização CO_3^- e HCO_3^{2-} 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 CO_3^- e HCO_3^{2-} 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 CO_3^- e HCO_3^{2-} Maior influência água meteórica

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 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.

8.3. GRAU DE MINERALIZAÇÃO E MISTURA DE ÁGUA

A condutividade elétrica é “a medida da facilidade de uma água conduzir corrente elétrica” (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000, p.88). A água ultra pura não é um bom meio para propagação de corrente elétrica, por isso, sua condutividade é muito baixa. Porém, os íons eventualmente nela solubilizados funcionam como meios para a transferência da energia. Os cátions de maior condutância molecular são H^+ , K^+ e Na^+ , e os ânions, OH^- , Cl^- e HCO_3^- , esses elementos são os principais responsáveis pela condutividade hidráulica da água (WALTON, 1989). Assim, quanto maior a quantidade de material solubilizado na água, maior será sua condutividade elétrica (EC).

Por esse motivo, a condutividade elétrica é um parâmetro de grande importância para a hidrogeomorfologia e a hidrogeologia. Ela permite uma aproximação ao grau de mineralização da água de forma prática e com baixo custo, uma vez que, as medidas de condutividade são menos onerosas e mais simples do que avaliações hidrogeoquímicas. Neste trabalho, a EC das nascentes foi mensurada mensalmente, complementando as informações sobre o grau de mineralização e a taxa de mistura das águas.

A literatura científica apresenta valores de EC para água de nascentes, muito próximos aos encontrados em águas subterrâneas amostradas de poços. Sendo assim, a influência litológica é sobremaneira importante para esses dados. Em nascentes de aquíferos cristalinos, os valores de EC apresentados na literatura, normalmente oscilam entre 30 e 300 $\mu S/cm$ (RADEMACHER *et al.*, 2001; COSTA *et al.*, 2009), com alguns casos relatados superiores a 450 $\mu S/cm$ em aquíferos confinados de circulação lenta (YEHDENGHO e REICHL, 2002). Já para aquíferos carbonáticos, os valores superam constantemente os 250 $\mu S/cm$, podendo chegar a 500 $\mu S/cm$ (YEHDENGHO e REICHL, 2002) Em águas de nascentes termais em rochas vulcânicas, Marques *et al.* (2003) registraram EC entre 330 e 450 $\mu S/cm$.

Os resultados de EC para as nascentes estudadas oscilaram espacial e sazonalmente entre 3,2 e 425 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (TAB. 13), sendo que a condutividade mensurada para a água das chuvas esteve entre 8,9 e 28,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Notadamente, esses resultados tiveram relação direta com os sistemas aquíferos dos quais as águas das nascentes emergem: enquanto as nascentes associadas ao Grupo Bambuí frequentemente registravam EC acima de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$; aquelas do Grupo Macaúbas raramente ultrapassavam 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (TAB. 13).

TABELA 13
Varição mensal da condutividade elétrica nas águas das nascentes - $\mu\text{S}/\text{cm}$

Nascente	mar/11	abr/11	mai/11	jun/11	jul/11	ago/11	set/11	out/11	nov/11	dez/11	jan/12	fev/12	MÉDIA
LS02	134,7	214,0	*	160,3	*	*	177,7	141,5	170,9	110,2	130,2	126,0	151,7
LS05	6,6	5,5	4,5	7,7	-	-	-	-	-	*	6,2	6,7	6,2
LS06	7,8	-	-	-	-	-	-	-	11,2	*	5,6	6,4	7,7
LS13	388	363	339	339	363	351	329	357	433	309	339	275	348,8
LS14	336	338	350	326	363	331	316	316	336	305	249	265	319,3
LS15	425	266	242	232	258	217	231	235	265	*	239	281	262,8
PV03	324	331	322	319	341	326	311	325	331	320	248	250	312,3
PV05	186	208	211	208	229	*	212	221	213	156	143	159	195,1
PV07	78,5	103,0	102,3	124,9	110,4	101,8	99,1	100,2	102,7	101,6	81,8	75,5	98,5
PV11	35,7	45,3	72,7	57,6	150,3	105,2	189,3	188,7	16,4	101,0	19,7	98,5	90,0
PV14	-	-	-	-	-	-	-	-	71,9	*	81,7	109,6	87,7
SC01	35,5	33,4	36,5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	35,1
SC04	53,3	36,7	41,3	39,0	42,5	56,9	83,4	74,1	6,4	*	30,5	30,2	44,9
SC05	19,8	5,9	9,7	4,2	11,6	6,4	-	-	4,6	10,6	6,8	6,3	8,6
SC10	4,4	8,4	3,7	6,3	-	-	-	-	4,8	4,0	3,4	3,5	4,8
SC12	4,6	3,5	4,6	-	-	-	-	-	5,6	4,6	3,2	5,2	4,5
SC14	4,8	3,7	4,5	-	-	-	-	-	6,2	5,4	2,6	5,9	4,7
SC18	6,4	3,6	5,2	5,7	-	-	-	-	6,3	7,9	5,7	5,9	5,8
SC19	6,1	3,6	5,9	4,7	6,0	-	-	10,9	7,4	4,9	3,4	4,6	5,7
SC23	14,1	12,1	17,8	13,3	14,2	14,8	12,7	12,2	19,9	10,9	9,4	8,8	13,3
SC24	8,1	7,7	5,8	5,1	8,3	7,9	-	20,4	6,9	*	8,6	7,0	8,6
SC27	7,9	4,8	4,7	2,3	6,0	*	3,9	5,7	*	8,6	3,7	5,7	5,3
SC28	6,1	4,0	5,6	7,6	7,7	-	-	7,1	9,6	6,4	4,3	3,7	6,2
SC29	8,2	8,8	5,6	3,7	4,6	13,2	4,8	6,5	9,7	8,6	5,9	5,9	7,1

Fonte: análises laboratoriais.

* amostra não coletada.

- nascente seca.

A nascente com maior média mensurada¹⁰ de EC foi a LS13, seguida por LS14, PV03 e LS15, todas acima de 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Essas quatro nascentes já haviam sido identificadas como originadas de um mesmo sistema aquífero (SA1), onde são mineralizadas pela dissolução das rochas carbonáticas provavelmente sob circulação lenta. As demais nascentes desse sistema aquífero (LS02, PV05, PV07 e PV11) também registram médias anuais relativamente

¹⁰ A média da EC foi calculada a partir da média aritmética de todas as mensurações possíveis de EC realizadas durante o ano hidrológico de monitoramento.

altas de EC. Porém, não tão elevadas quanto as primeiras, o que pode estar associado a maior velocidade de circulação da água subterrânea, ou ao maior percentual de mistura da água meteórica (como será discutido adiante).

Por outro lado, as nascentes associadas a rochas siliciclásticas e seus mantos de alteração (SA3) apresentaram valores extremamente baixos de EC, menores, inclusive, do que os registrados na água das chuvas. As menores médias anuais de EC foram encontradas nas nascentes SC12, SC14 e SC10; todas localizadas em uma mesma vertente, com circulação subterrânea muito rápida e manto de alteração arenosos e raso. Destaca-se, contudo, que a nascente deste sistema aquífero com maior EC foi a SC05, que registrou uma média de 8,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (TAB.13).

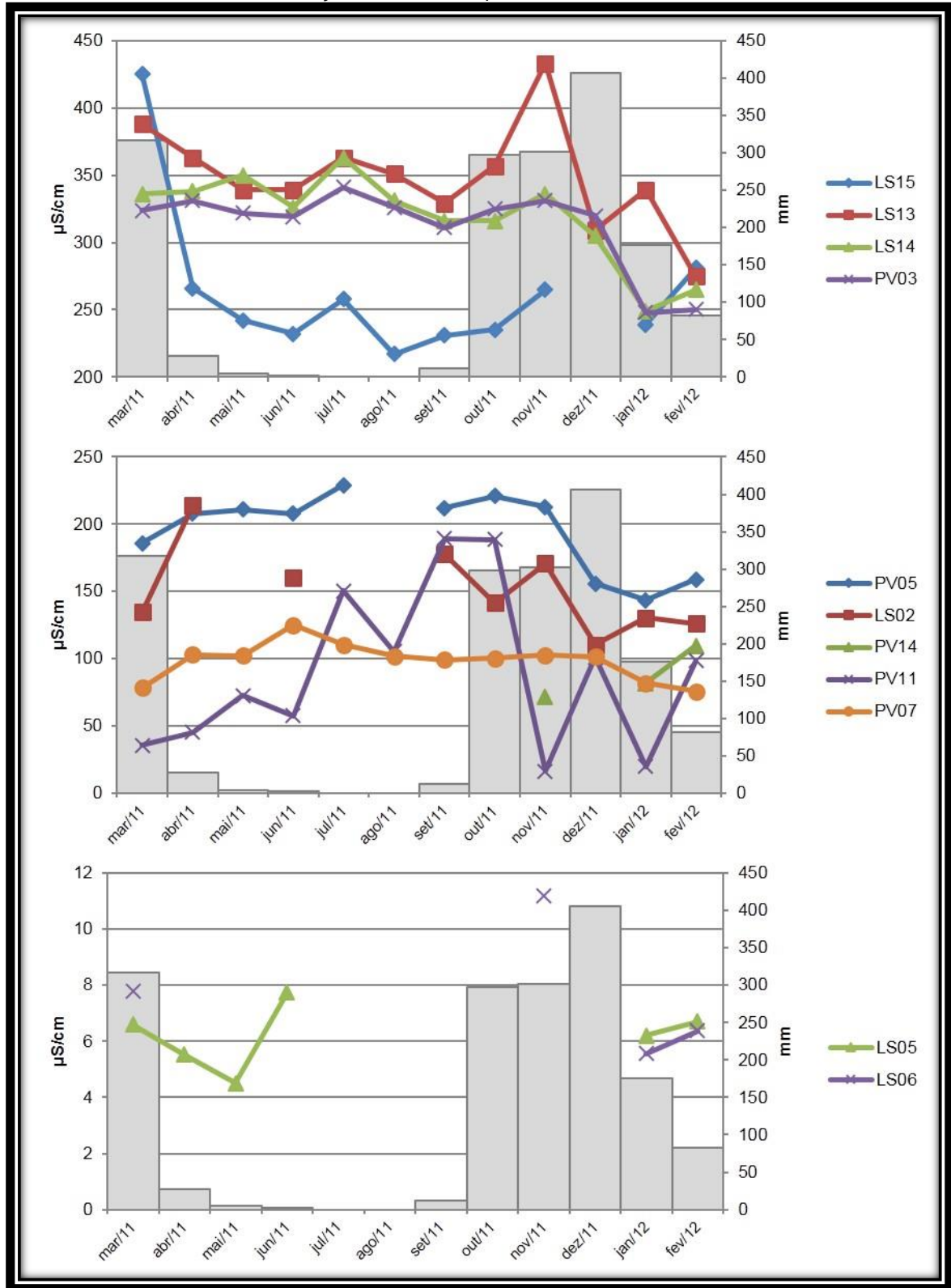
Porém, há certa variabilidade sazonal na condutividade elétrica da água das nascentes devido, sobretudo, a influência da água das chuvas. Isso pode ser apreendido pelas FIG. 90 e 91. Os gráficos foram agrupados por localidade devido ao monitoramento pluviométrico.

Em todas as nascentes de Lagoa Santa (exceto LS05 e LS06), a água das chuvas possui uma tendência de diminuir a EC. Desse modo, há uma tendência de aumento da EC nos períodos secos, onde o fluxo de base mantém a exfiltração nas nascentes (FIG. 90). Isso pode ser verificado nitidamente nos gráficos de LS15, LS13, LS14, PV03, PV05 e PV11.

Em todos esses casos, houve um aumento da EC em julho, primeiro mês com ausência completa de chuvas. Além disso, houve também uma tendência ao aumento da EC a partir de março, quando ocorreram os últimos eventos chuvosos da estação, exceto em LS13 e LS15, onde o início da estação seca mostrou uma queda na EC. Para PV05, LS02, PV11 e PV07 os valores mais elevados do gráfico perduram até outubro/novembro, quando se inicia uma tendência de queda. Novembro, inclusive, registrou picos de EC para LS13 e LS15, além de valores altos para LS14 e PV03. A partir de novembro/dezembro, há uma nítida queda na condutividade de todas as nascentes de Lagoa Santa, resultado do aumento do percentual de água meteórica na exfiltração das nascentes.

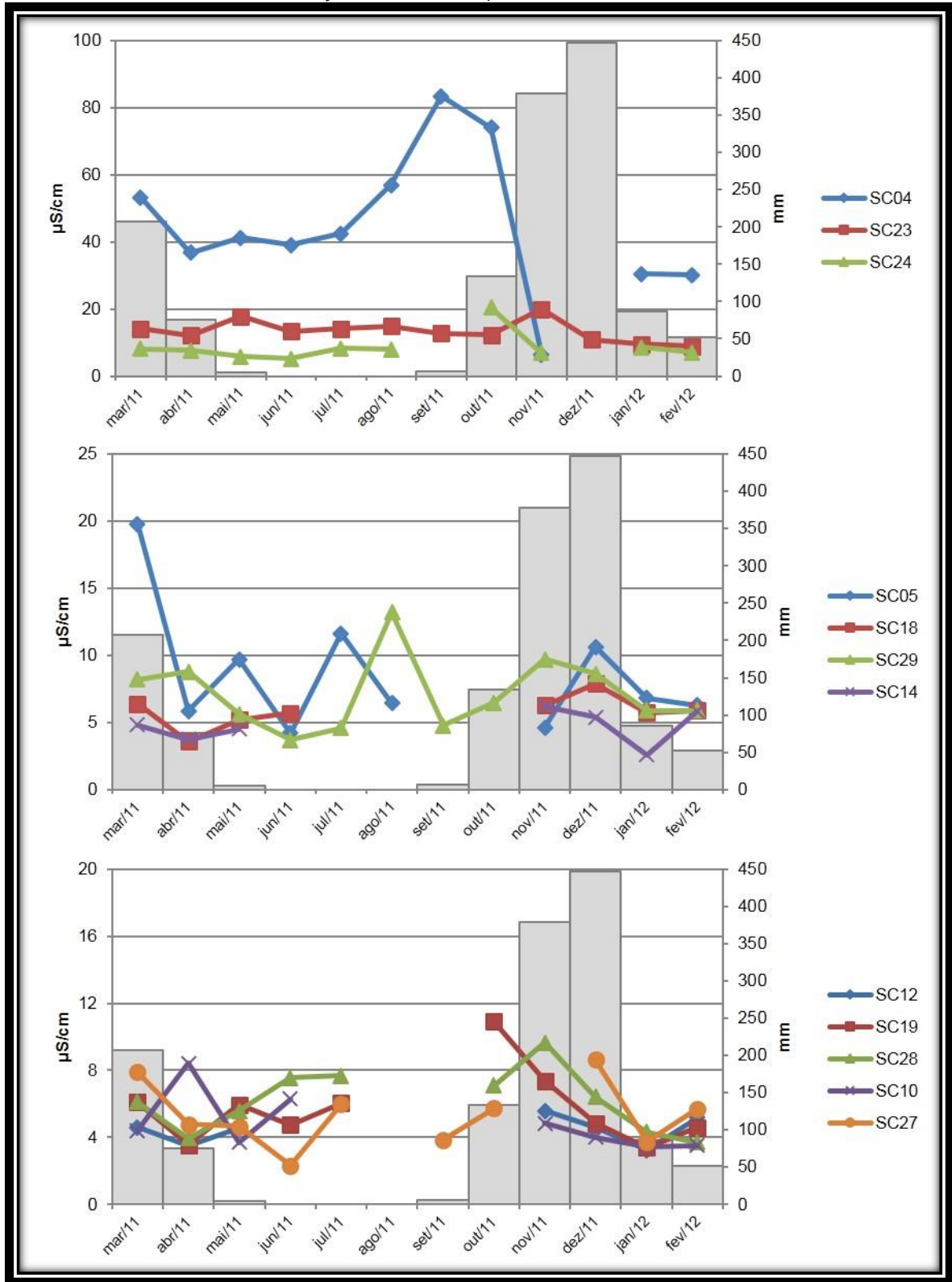
As nascentes LS05 e LS06 possuem características distintas de suas circunvizinhas. Por estarem provavelmente associadas a um aquífero suspenso no manto de alteração, tem EC muito baixa. Assim, o efeito da água meteórica tende a ser o de aumento da sua EC, uma vez que as medições nas amostras de chuva tiveram valores maiores do que os encontrados nas águas exfiltradas dessas nascentes.

FIGURA 90 – Gráfico da variabilidade sazonal da condutividade elétrica da água das nascentes de Lagoa Santa em função do acumulado pluviométrico de 30 dias.



Fonte: dados laboratoriais e de campo.

FIGURA 91 – Gráfico da variabilidade sazonal da condutividade elétrica da água das nascentes da Serra do Cipó em função do acumulado pluviométrico de 30 dias



. Fonte: dados laboratoriais e de campo.

Apesar dos poucos dados, LS05 diminui sua EC no início do período seco, até junho, quando há um pico. Após um período de cinco meses sem drenagem, ela retoma sua exfiltração com tendência ao aumento da EC após janeiro. Possíveis interpretações para LS06 ficaram comprometidas pela falta de dados. Além de um nítido pico em novembro, comum a praticamente todas as nascentes de Lagoa Santa, ela também denota uma tendência ao aumento da EC após janeiro, durante o período úmido.

Se para a maioria das nascentes de Lagoa Santa (com alto grau de mineralização) a chuva possui uma tendência de diminuição na EC, na Serra do Cipó ocorre o oposto, uma vez que os gases atmosféricos dissolvidos na água da chuva já são capazes de torna-la mais condutiva do que as águas mineralizadas nas rochas siliciclásticas. Excetuando-se SC04 e SC23 que possuem substratos diferenciados, há uma tendência geral de aumento da EC, sobretudo no início do período chuvoso (FIG. 91). Outra possibilidade de explicação é que a água meteórica infiltrada pode disponibilizar no ciclo hidrológico uma parcela de água mais antiga que estava estacionada no aquífero, solubilizando o material geológico.

Apesar dos picos de EC registrados para SC05 e SC29 em julho e agosto, respectivamente, os valores de EC das demais nascentes são menores no período seco do que em março, quando foi registrada uma precipitação acumulada superior a 200 mm. Isso ocorre nitidamente em SC29, SC27, SC10, SC24. Com o início do período chuvoso, a EC aumentou até um pico que ocorreu em novembro/dezembro, mantendo valores relativamente elevados até fevereiro. Contudo, as oscilações apresentadas na EC das nascentes da Serra do Cipó dificultam generalizações, uma vez que para valores absolutos tão baixos, quaisquer alterações podem significar um crescimento ou decaimento significativo.

A nascente SC23 possui um comportamento relativamente estável quanto à EC. Há pouca oscilação em seu gráfico, mas é possível verificar um pico em novembro e uma tendência à diminuição da EC no final do período úmido. Por outro lado, SC04 possui um gráfico padrão para o esperado, com aumento gradativo da EC no período seco devido à diminuição da influência das chuvas. Após novembro, entretanto, há uma queda significativa nos valores de EC para essa nascente.

Contudo, a interpretação da sazonalidade da EC nas águas das nascentes fornece mais argumentos para discutir a mistura de água meteórica e subterrânea na exfiltração. De um modo geral, nascentes que mantem os níveis de EC equilibrados independentemente do período sazonal possuem menor influência da água meteórica e, portanto, menor taxa de

mistura. Por outro lado, caso a EC oscile com os eventos chuvosos, significa que o fluxo de base da nascente recebe a contribuição da água meteórica.

As nascentes de Lagoa Santa apresentaram uma estabilidade da EC maior do que as da Serra do Cipó. Esse fator já podia ser observado pelos dados hidrométricos (capítulo 6), mas pode ser comprovado pela estatística descritiva da condutividade (TAB. 14). Apesar de desvios padrões maiores, a ponderação dos mesmos pela média indica oscilações menores, o que é ratificado pela distorção. Sendo assim, LS02, LS06, LS15, PV11 e PV14 são aquelas que tendem a apresentar menor taxa de mistura da água meteórica com a subterrânea. Entretanto, faz-se um adendo em relação a LS06 devido aos poucos dados disponíveis para realização dos cálculos.

TABELA 14
Estatística descritiva da condutividade elétrica nas águas das nascentes - $\mu\text{S/cm}$

Nascente	Média	Máximo	Mínimo	Mediana	Desvio Padrão	Desv. / Média	Distorção
LS02	151,7	214,0	110,2	141,5	32,090	0,212	0,789
LS05	6,2	7,7	4,5	6,4	1,108	0,178	-0,351
LS06	7,7	11,2	5,6	7,1	2,479	0,321	1,242
LS13	348,8	433,0	275,0	345,0	39,095	0,112	0,348
LS14	319,3	363,0	249,0	328,5	33,109	0,104	-1,138
LS15	262,8	425,0	217,0	242,0	57,015	0,217	2,684
PV03	312,3	341,0	248,0	323,0	30,484	0,098	-1,786
PV05	195,1	229,0	143,4	208,0	29,351	0,150	-0,830
PV07	98,5	124,9	75,5	101,7	13,891	0,141	-0,177
PV11	90,0	189,3	16,4	85,6	60,548	0,673	0,553
PV14	87,7	109,6	71,9	81,7	19,561	0,223	1,256
SC01	35,1	36,5	33,4	35,5	1,582	0,045	-0,987
SC04	44,9	83,4	6,4	41,3	21,390	0,476	0,247
SC05	8,6	19,8	4,2	6,6	4,668	0,543	1,705
SC10	4,8	8,4	3,4	4,2	1,723	0,357	1,570
SC12	4,5	5,6	3,2	4,6	0,833	0,186	-0,416
SC14	4,7	6,2	2,6	4,8	1,261	0,267	-0,689
SC18	5,8	7,9	3,6	5,8	1,207	0,207	-0,314
SC19	5,7	10,9	3,4	5,4	2,184	0,380	1,523
SC23	13,3	19,9	8,8	13,0	3,184	0,238	0,678
SC24	8,6	20,4	5,1	7,8	4,303	0,502	2,755
SC27	5,3	8,6	2,3	5,2	1,907	0,358	0,374
SC28	6,2	9,6	3,7	6,3	1,884	0,304	0,269
SC29	7,1	13,2	3,7	6,2	2,682	0,377	0,988

Fonte: análises laboratoriais.

Por outro lado, na Serra do Cipó, praticamente todas as nascentes apresentaram o desvio padrão superior a 30% da média, indicando uma maior dispersão dos dados. Esse foi o caso de SC04, SC05, SC10, SC19, SC24, SC27, SC28 e SC29, nascentes que provavelmente possuem maior influência das chuvas em sua exfiltração.

Esses resultados confirmam a tese de que nascentes situadas em mantos de alteração mais espessos tendem a estar associadas a uma circulação subterrânea mais lenta. Isso implica em uma menor taxa de intermitência, mas também em uma menor mistura da água subterrânea com a meteórica. Em termos regionais, a dicotomia apresentada entre os dados de Lagoa Santa e da Serra do Cipó vão nessa direção.

9. DATAÇÃO DAS ÁGUAS

9.1. MODELO DE MISTURA HOMOGÊNEA

O ciclo da água, simplificado em modelizações hidrológicas, é um complexo emaranhado de processos sucessivos e simultâneos de difícil apreensão prática. O que é generalizado nos principais fluxos da água é, na verdade, uma mistura de moléculas com origens, histórias e percursos distintos que em um determinado contexto tempo-espacial comportam-se de maneira semelhante. Não obstante, discutir a idade da água perpassa essa complexidade.

A expressão idade aparente da água refere-se a essa impossibilidade prática e é utilizada como eufemismo para os resultados de métodos que generalizam para um determinado conjunto de águas (em um aquífero, por exemplo) uma “data de nascimento” média. Desse modo, “a idade da água subterrânea é definida como o tempo de deslocamento de uma parcela de água do nível freático para um ponto de mensuração de menor gradiente” (HINKLE, 1997-98). Especificamente no que tange às nascentes, essa idade refere-se ao tempo decorrido desde a precipitação de uma parcela de água, até sua exfiltração (BEDMAR, 1972).

Os métodos radioisotópicos tem sido os mais utilizados atualmente para datação de águas (BEDMAR, 1972; CHRISTENSON et al., 2006; ZUBER e ROZANSKI, 2007), destacando-se para águas jovens os modelos derivados do decaimento radioativo do trítio. Como já mencionado (ver capítulo 3), o trítio é considerado um traçador natural originado pela ação de raios cósmicos. Porém, com as explosões nucleares da década de 1950 (*bomb tritium*), suas concentrações foram artificialmente elevadas (BEDMAR, 1972). Com isso, a partir do seu decaimento radioativo em ^3He , pode-se inferir o período médio de recarga das águas.

Como a meia vida do trítio é baixa (12,33 anos), passados aproximadamente 60 anos das explosões, as concentrações originadas pelos testes nucleares já foram significativamente diminuídas. Estima-se que praticamente 94% da massa do isótopo radioativo já sofreu decaimento nesse intervalo de tempo, o que significa que as taxas atuais de trítio nas precipitações já estão muito próximas às originais (anteriores a 1950's).

Os modelos mais avançados de datação de água utilizam mensurações de concentração de trítio residual ($[T]$) e hélio tritiogênico nas águas para definição do tempo decorrido pelo decaimento radioativo. Para tanto, a Equação 6 é balanceada pela concentração dos isótopos

pai e filho medidos em um determinado momento (ALBARÈDE, 2011). O tempo decorrido (t) é dado pela Equação 7, em que λ é a constante de decaimento radioativo do trítio, P_0 é a concentração inicial do isótopo pai (dado pelo balanço com a concentração do isótopo filho) e P é sua concentração mensurada (final).

$$t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{P_0}{P} \quad (7)$$

Todavia, para essa datação absoluta é necessário que sejam mensuradas as concentrações de trítio e hélio na água, sendo que, esta última, está restrita a poucos laboratórios em todo o mundo, limitando as possibilidades de sua efetivação. Entretanto, modelos têm sido desenvolvidos para interpretação da idade aparente da água em função da comparação da concentração de trítio na água subterrânea e na série histórica de precipitação (BEDMAR, 1972; STUTE *et al.*, 1997; MORAN, 2003; MOURA, 2007; YUM, 2007).

De uma forma geral, parte-se do pressuposto que concentrações de trítio ([T]) muito baixas nas águas subterrâneas atuais, estejam relacionadas a intervalos de renovação superiores ao tempo decorrido desde o *bomb tritium*. Desse modo, pode-se realizar uma datação relativa da água, classificando-a em moderna (pós-1950's) e pré-moderna (anterior a 1950's). Christenson *et al.* (2006) considerou águas com valores de trítio abaixo de 0,4 TU como pré-modernas na região de Oklahoma (EUA); por sua vez, Guero *et al.* (2003), em estudo na Nigéria, consideraram pré-modernas apenas as águas com [T] acima de 2 TU; Bedmar (1972) sugere o valor de 5 TU como média mundial; e Mourão (2007) encontrou como [T] mínima para definição de água moderna, 1,5 TU, na região do Quadrilátero Ferrífero.

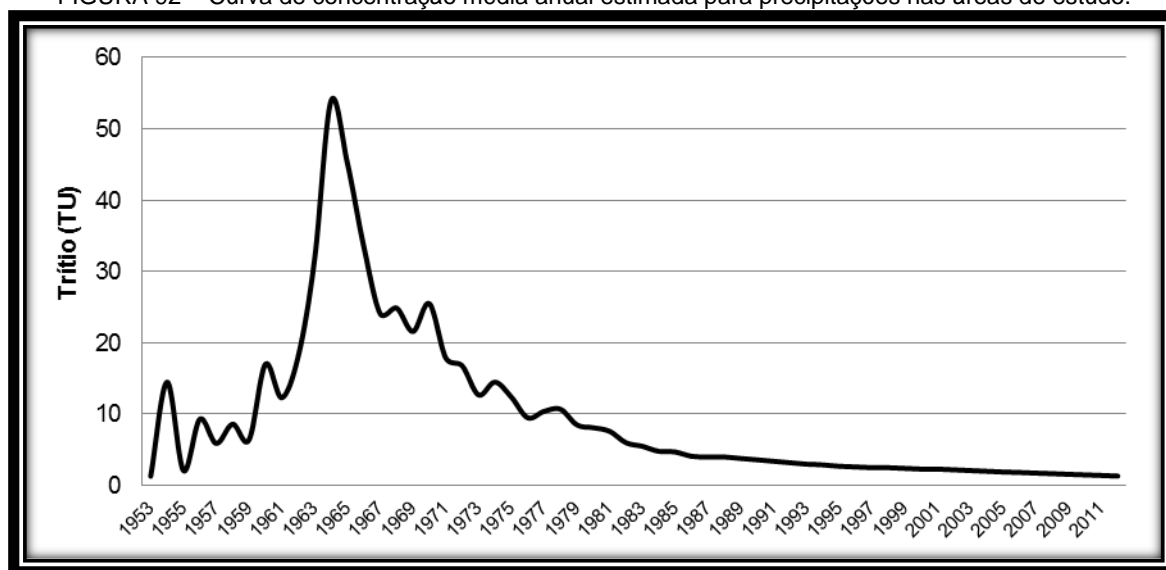
Essa falta de consenso nos valores de corte para a datação relativa da água via concentração de trítio resulta de três fatores: i) meia-vida do trítio: há algumas divergências na literatura e os dados variam, geralmente, entre 12,44 e 12,30 anos; ii) o momento quando foram realizados os cálculos, uma vez que quanto mais antigo o estudo, maior tende a ser a concentração residual de trítio devido ao seu decaimento radioativo; iii) o local da amostragem, pois a contaminação dos testes nucleares não ocorreu de forma uniforme em toda a atmosfera.

É justamente no sentido de tentar extrapolar essa datação relativa que a comparação com a série histórica de precipitação torna-se relevante. Para tanto, é necessário assumir que as taxas de recarga das águas subterrâneas mantiveram-se homogêneas ao longo das últimas décadas e, assim, essas águas foram enriquecidas de trítio na mesma proporção entre um ano e outro (MOURÃO, 2007; BEDMAR, 1972).

Como não há uma série histórica de medições de trítio nas precipitações das áreas de estudo deste trabalho, assumiu-se a estimativa realizada por Mourão (2007), a partir de dados das estações de Brasília e Rio de Janeiro. Entretanto, o referido trabalho apresenta os dados estimados apenas até 2005, assim, os valores médios de trítio nas precipitações dos anos posteriores foram extrapolados utilizando-se o mesmo modelo. Segundo a autora, “como as concentrações em trítio evoluem de forma similar para as distintas estações, as aproximações feitas para a estimativa dos valores de trítio (...) não devem alterar de forma significativa o resultado final” (MOURÃO, 2007, p. 224).

Os dados estimados para as concentrações médias anuais de trítio nas precipitações são apresentados na FIG. 92. Note-se que apesar do registro histórico apresentar o ano de 1953 como o início dos testes nucleares, o pico de concentração de trítio aparece nas precipitações de 1964 (53,9 TU). Após 1979, os valores diminuem significativamente, não mais ultrapassando a barreira de 10 TU. A partir de 2004, os valores já são inferiores a 2,0 TU. Para a década atual, os valores estimados sugerem concentrações inferiores a 1,5 TU, alcançando 1,3 TU para o ano de 2012.

FIGURA 92 – Curva de concentração média anual estimada para precipitações nas áreas de estudo.



Fonte: elaborado pelos autores a partir dos dados de Mourão (2007).

Após assumir as concentrações estimadas de trítio nas precipitações para as áreas de estudo, foi necessário realizar a modelagem do trítio residual referente a cada ano de recarga (Equação 6). Considerando que neste trabalho foram realizadas amostragens no período seco de 2011 e no período úmido de 2012, tornou-se imprescindível produzir dois cálculos diferentes para cada campanha (TAB. 15). A meia-vida considerada foi de 12,33 anos, conforme sugerem os recentes estudos de Hahm e Kim (2008).

TABELA 15
Concentrações de trítio utilizadas para modelagem da idade aparente das águas para os dois anos de coleta (modelo de mistura homogênea)

Ano	Trítio na precipitação da área (TU) *	Ano de referência: 2011		Ano de referência: 2012	
		Trítio residual modelado (TU)	Trítio médio da mistura homogênea (TU)	Trítio residual modelado (TU)	Trítio médio da mistura homogênea (TU)
1953	1,3	0,05	1,30	0,04	1,21
1954	14,5	0,57	1,32	0,53	1,23
1955	2,1	0,09	1,33	0,08	1,24
1956	9,3	0,41	1,35	0,38	1,26
1957	5,9	0,27	1,37	0,25	1,28
1958	8,6	0,42	1,39	0,39	1,30
1959	6,4	0,33	1,41	0,31	1,31
1960	17	0,94	1,43	0,86	1,33
1961	12,3	0,72	1,44	0,66	1,34
1962	18,1	1,11	1,45	1,03	1,35
1963	31,7	2,06	1,46	1,91	1,36
1964	53,9	3,71	1,45	3,43	1,35
1965	45,2	3,29	1,40	3,04	1,31
1966	33,5	2,58	1,36	2,39	1,27
1967	24,1	1,96	1,33	1,82	1,24
1968	24,9	2,14	1,32	1,98	1,23
1969	21,6	1,96	1,30	1,82	1,21
1970	25,5	2,45	1,28	2,27	1,20
1971	17,9	1,82	1,25	1,69	1,17
1972	16,8	1,81	1,24	1,68	1,16
1973	12,7	1,44	1,22	1,34	1,15
1974	14,5	1,74	1,22	1,62	1,14
1975	12,4	1,58	1,20	1,46	1,13
1976	9,5	1,28	1,19	1,19	1,12
1977	10,4	1,48	1,19	1,37	1,12
1978	10,7	1,61	1,18	1,50	1,11
1979	8,5	1,35	1,17	1,26	1,10
1980	8,1	1,36	1,16	1,27	1,10
1981	7,6	1,35	1,16	1,26	1,09
1982	6	1,13	1,15	1,05	1,09
1983	5,5	1,09	1,15	1,02	1,09
1984	4,8	1,01	1,16	0,94	1,09
1985	4,7	1,04	1,16	0,97	1,10
1986	4,1	0,96	1,17	0,90	1,10
1987	4	0,99	1,17	0,93	1,11
1988	4	1,05	1,18	0,98	1,12
1989	3,8	1,05	1,19	0,99	1,12
1990	3,6	1,06	1,19	0,99	1,13
1991	3,4	1,05	1,20	0,99	1,13
1992	3,2	1,05	1,21	0,98	1,14
1993	3	1,04	1,21	0,97	1,15
1994	2,9	1,06	1,22	1,00	1,16
1995	2,7	1,05	1,23	0,98	1,17
1996	2,6	1,07	1,25	1,00	1,18
1997	2,5	1,08	1,26	1,02	1,19
1998	2,5	1,15	1,27	1,08	1,20
1999	2,4	1,16	1,28	1,09	1,21
2000	2,3	1,18	1,29	1,11	1,22
2001	2,3	1,25	1,30	1,17	1,23
2002	2,2	1,26	1,30	1,19	1,23
2003	2,1	1,27	1,31	1,20	1,24
2004	2	1,28	1,31	1,21	1,24
2005	1,9	1,29	1,32	1,21	1,25
2006	1,8	1,31	1,32	1,23	1,25
2007	1,7	1,32	1,33	1,24	1,25
2008	1,7	1,33	1,33	1,25	1,26
2009	1,6	1,33	1,33	1,26	1,26
2010	1,5	1,33	1,33	1,26	1,26
2011	1,4	1,33	1,33	1,26	1,25
2012	1,3			1,25	1,25

* conforme modelo proposto por MOURÃO (2007); dados sublinhados foram extrapolados do modelo original.

Porém, a água que exfiltra em uma nascente não é originada na recarga de apenas um ano hidrológico. Isso implica que as amostras coletadas em um momento qualquer podem apresentar misturas de águas de diferentes concentrações de trítio (vários anos) de modo que

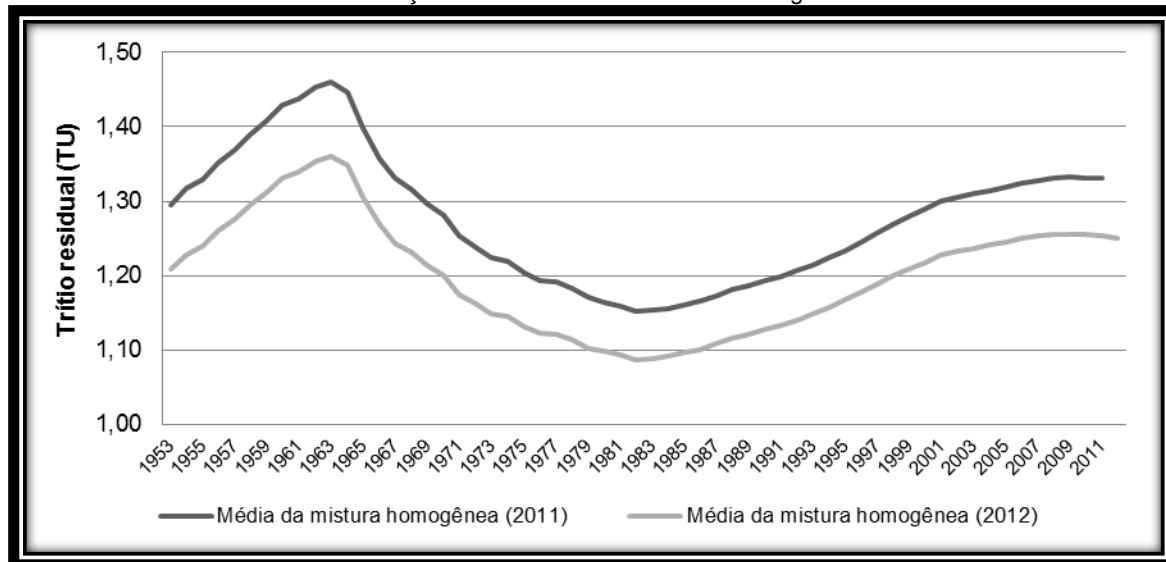
sua concentração residual reflete uma média de toda sua recarga. Esse valor está diretamente relacionado ao tempo de residência e à taxa de mistura.

Assumindo a mistura homogênea (mesmas taxas de recarga em cada ano) para o modelo, a concentração média residual de trítio das águas (TAB. 15) é dada pela Equação 8, em que C é a concentração média residual de trítio no ano final n , i representa os anos sucessivos até o ano base da recarga e a_i é o valor ajustado para o trítio residual nas precipitações de cada ano do modelo.

$$c_n = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n a_i \quad (8)$$

Após a definição da concentração média de trítio para a mistura homogênea, a intercessão do valor mensurado nas nascentes com a curva da mistura (FIG. 93) define o ano base da recarga. Os valores abaixo do mínimo da curva indicam águas pré-modernas, nas quais não se vê o registro do *bomb tritium*. Já os valores acima do máximo da curva evidenciam uma taxa de mistura não homogênea, o que impede sua explicação pelo modelo utilizado.

FIGURA 93 – Curva de concentração média de trítio da mistura homogênea nas nascentes estudadas.



Fonte: elaborado pelo autor.

9.2. IDADE APARENTE DAS ÁGUAS DAS NASCENTES

Os resultados da idade aparente das águas das nascentes estudadas são apresentados na TAB. 16. Nos casos em que os pontos da curva de concentração média são comuns a mais

de um ano-base, a idade aparente é representada por uma faixa de tempo entre os anos-base encontrados. Nota-se, também, que devido ao intervalo de amostragem, resultados de um mesmo ano-base para 2011 e 2012 são ligeiramente distintos devido ao decaimento radioativo do trítio nesse período.

TABELA 16
Resultados da idade aparente da água das nascentes a partir da concentração de trítio residual (modelo de mistura homogênea)

Nascente	Amostras de setembro/2011			Amostras de março/2012		
	[T] - Trítio residual (TU)	Ano-base	Idade aparente (anos)	[T] - Trítio residual (TU)	Ano-base	Idade aparente (anos)
LS02	-	-	-	0,62 ± 0,13	< 1953	> 60
LS05	-	-	-	1,51 ± 0,15	1963	50
LS06	-	-	-	1,65 ± 0,16	*	*
LS13	1,98 ± 0,28	*	*	0,93 ± 0,13	< 1953	> 60
LS14	1,24 ± 0,21	1972 - 1995	40 - 17	1,05 ± 0,12	1981 - 1984	32 - 29
LS15	2,23 ± 0,22	*	*	1,71 ± 0,15	*	*
PV03	0,89 ± 0,11	< 1953	> 59	0,92 ± 0,13	< 1953	> 60
PV05	-	-	-	0,89 ± 0,13	< 1953	> 60
PV07	1,56 ± 0,18	1963	49	1,01 ± 0,13	1981 - 1984	32 - 29
PV11	1,58 ± 0,26	1963	49	0,87 ± 0,12	< 1953	> 60
PV14	-	-	-	1,58 ± 0,14	*	*
SC04	1,47 ± 0,26	1963	49	0,63 ± 0,13	< 1953	> 60
SC05	1,81 ± 0,17	*	*	1,44 ± 0,17	1963	50
SC10	-	-	-	1,79 ± 0,12	*	*
SC12	-	-	-	1,55 ± 0,14	*	*
SC14	-	-	-	1,75 ± 0,12	*	*
SC18	-	-	-	1,32 ± 0,11	1959 - 1965	54 - 48
SC19	-	-	-	1,51 ± 0,15	1963	50
SC23	1,29 ± 0,21	1970 - 2000	42 - 12	0,76 ± 0,13	< 1953	> 60
SC24	1,48 ± 0,16	1963	49	1,78 ± 0,13	*	*
SC27	-	-	-	1,76 ± 0,16	*	*
SC28	-	-	-	1,80 ± 0,13	*	*
SC29	2,23 ± 0,26	*	*	1,60 ± 0,13	*	*

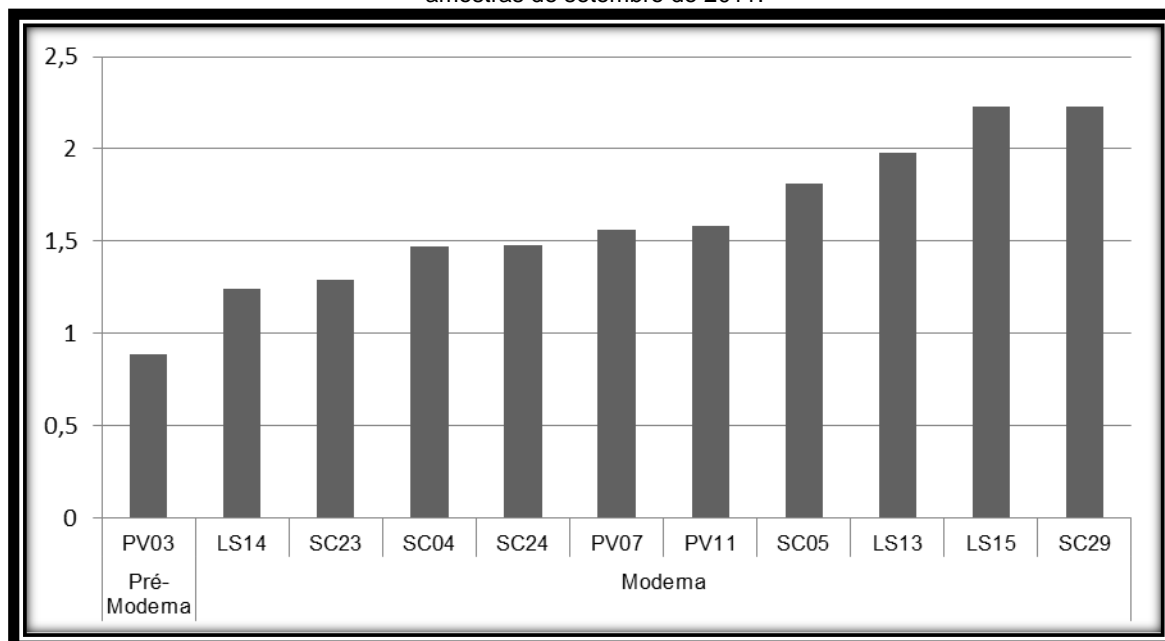
- sem informação

* extrapola o modelo

Fonte: Análises laboratoriais

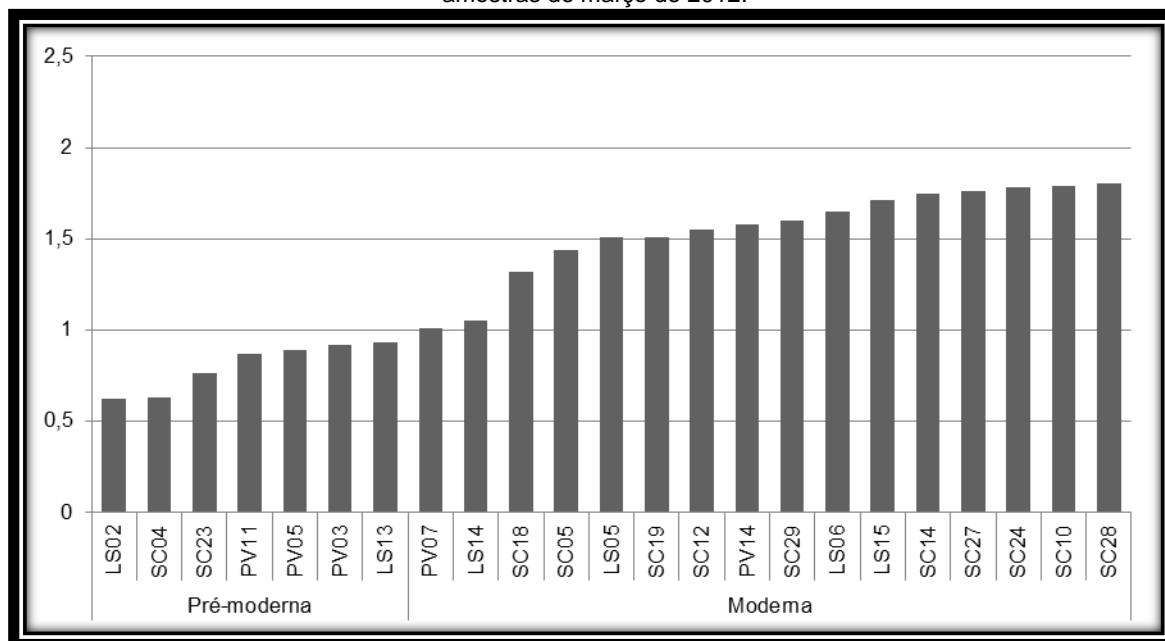
Analisando os dados sob o ponto de corte de influência do *bomb tritium* (1,15 TU, para o ano de 2011 e 1,09 para o ano de 2012), pode-se realizar a classificação bivalente das águas em modernas e pré-modernas, conforme indicam Bedmar (1972), Christenson *et al.* (2006) e Yum *et al.* (2007). Os resultados são apresentados nas FIG. 94 e 95.

FIGURA 94 – Classificação das águas das nascentes de acordo com a concentração mensurada de trítio para as amostras de setembro de 2011.



FONTE: dados laboratoriais.

FIGURA 95 – Classificação das águas das nascentes de acordo com a concentração mensurada de trítio para as amostras de março de 2012.



Fonte: dados laboratoriais.

A ampla maioria das nascentes apresentou águas modernas, conforme esperado. No período seco, somente a nascente PV03 foi datada como anterior ao *bomb tritium*, com todas as demais (que estavam drenantes no período) acima do ponto de corte. Já no período úmido (quando todas as nascentes estudadas estavam drenantes), além de PV03, também tiveram águas classificadas como pré-modernas LS02, SC04, SC23, PV11, PV05 e LS13.

Dentre as 11 amostras coletadas em setembro de 2011 (nascentes que eram drenantes no período), quatro extrapolaram o modelo, indicando taxas de mistura que não permitem ser arbitrariamente consideradas homogêneas (LS13, LS15, SC05 e SC29). Além dessas, somente PV03 apresentou [T] inferior ao modelado para o *bomb tritium*, indicando água pré-moderna. As demais seis nascentes apresentaram águas modernas que oscilaram entre 49 e 12 anos. Para as nascentes PV07, PV11, SC04 e SC24, os valores de [T] foram acima do máximo para o modelo de mistura homogênea de 2011 (1,46 TU). Todavia, com o intervalo de confiança da análise, assumiu-se este valor máximo para os quatro casos (TAB. 16).

Todas as nascentes do sistema aquífero SA3 (ver capítulo 8) tiveram valores elevados de [T], sendo que duas extrapolaram o modelo. Isso indica uma maior participação da recarga dos períodos diretamente relacionados ao *bomb tritium* e, conseqüentemente, tempo de renovação da água mais longos. A nascente SC04 apresentou idade aparente correlacionada a esse grupo. Três nascentes do SA1 apresentaram comportamento semelhante (LS15, PV07 e PV11). As duas outras, porém, tiveram respostas melhores do modelo, sendo identificado um tempo de renovação entre 40 e 17 anos para LS14 (similarmente a SC23 que obteve 42 a 12 anos) e acima de 60 anos para PV03, considerada pré-moderna.

A importância das análises das amostras de 2011 é que elas possuem pouca ou nenhuma influência da água meteórica. Sendo assim, representam a real configuração de mistura da água subterrânea, uma vez que os eventos chuvosos não estavam ocorrendo. Porém, o baixo número de nascentes drenantes nesse período, devido à elevada taxa de intermitência, sobretudo, na Serra do Cipó, levou à necessidade de mensuração de [T] no período chuvoso.

Os dados para 2012 refletem uma maior influência da água meteórica nas nascentes e, por conseguinte, no [T]. Em geral, a idade aparente tende a ser reduzida pela entrada de água recarregada localmente no período das chuvas (STUTE *et al.*, 1997). Apesar disso, a amostragem realizada para o período úmido ocorreu imediatamente após um período de estiagem de 20 dias para as nascentes de Lagoa Santa, e 19 dias para as nascentes da Serra do Cipó. Esse intervalo minimiza (mas não impede) a influência da água meteórica na água subterrânea no momento da amostragem.

Em 2012, todas as 24 nascentes foram amostradas. Dez extrapolaram o modelo e não puderam ter sua idade aparente definida, sete delas, relacionadas ao SA3. Outras sete apresentaram valores abaixo do limite inferior da curva, indicando águas pré-modernas. Seis tiveram [T] dentro da curva, sendo suas idades aparentes entre 54 e 29 anos (TAB. 16).

As nascentes do SA3 apresentaram águas modernas, porém, de maior tempo de renovação. A idade aparente de 50 anos foi encontrada para SC05 e SC29; para SC18, encontrou-se a faixa entre 54 e 48 anos. Além dessas três, todas as outras apresentaram [T] acima do máximo da curva modelada, indicando taxas de mistura heterogênea. Contudo, parece ser uma constante o fato das nascentes da Serra do Cipó possuírem [T] elevada, o que foi verificado em ambas as estações climáticas.

As nascentes de coberturas colúvio-eluviais (SA5) também apresentaram [T] elevada. Tal fato resultou no não enquadramento dentro da curva do modelo para LS06. Para LS05, utilizou-se o intervalo de confiança da análise laboratorial para enquadrá-la no pico do modelo, com idade aparente de 50 anos. Por estarem supostamente relacionadas a um aquífero suspenso, esperavam-se idades aparentes consideravelmente baixas para ambas, o que não foi verificado. De fato, estão relacionadas a águas modernas, mas o modelo de mistura homogênea não permitiu a apreensão precisa da idade para LS06, enquanto para LS05 houve a necessidade de extrapolação dentro do intervalo de confiança da análise laboratorial.

Já as nascentes do SA2 (SC04 e PV14) apresentaram comportamentos distintos da [T] no período úmido. Enquanto PV14, que é intermitente, registrou valores de [T] acima da curva do modelo, impedindo a definição de uma idade aparente, SC04 registrou valores muito baixos, enquadrando-a como água pré-moderna.

O grupo de nascentes originadas no sistema aquífero SA1 apresentou, em sua maioria, águas pré-modernas. LS02, LS13, PV03, PV05 e PV11 registraram [T] abaixo da curva de modelagem, indicando anos-base anteriores ao *bomb tritium*. A [T] na nascente LS15 ficou acima do máximo da curva, impedindo a definição de sua idade aparente. As nascentes LS14 e PV07 também apresentaram baixas [T], porém no limite inferior da curva ao observar o intervalo de confiança, indicando os anos-base de 1981 a 1984 e a idade aparente de 32 a 29 anos.

Avaliando os dados sazonalmente, confirma-se a assertiva de Stute *et al.* (1997) sobre a diminuição da [T] com a recarga local de águas recentes. Todavia, os reflexos que isso gera na resposta do modelo, nem sempre são óbvios.

De fato, dentre as 11 nascentes com análises nas duas estações, apenas duas apresentaram aumento na [T] no verão. Na nascente PV03, houve um aumento de 0,03 TU, dentro do intervalo de confiança. Isso permite afirmar que as [T] são mais estáveis sazonalmente. Os dados hidrológicos já indicavam esse maior tempo de residência das águas dessa nascente.

Unindo estes resultados com sua composição hidrogeoquímica, reafirma-se a hipótese de sua formação a partir de dutos cársticos com fluxos de longo termo. Por outro lado, SC24 teve uma variação ligeiramente acima do limite de confiança, com um aumento de 0,30 TU no período úmido. Essa nascente, porém, apresenta um comportamento migratório singular, o que reitera a possibilidade de distintas misturas entre os fluxos subterrâneos locais e regionais ao longo do ano.

As outras nove nascentes apresentaram diminuição da [T] no verão. Em duas delas (LS14 e LS15), essa variação ficou dentro da margem de erro do método, entretanto, as demais apresentaram uma diminuição considerada significativa. Para PV07, a mudança na [T] representou uma diminuição na idade aparente das águas de 49 anos para 32-29 anos. As nascentes LS13, SC05 e SC29 também apresentaram queda significativa na [T] no verão, porém, devido provavelmente à heterogeneidade da recarga, seus resultados ficaram acima da curva em alguma estação, impossibilitando interpretações mais apuradas.

Por outro lado, três nascentes apresentaram resultados anômalos na comparação sazonal. As [T] nas águas de PV11, SC04 e SC23 diminuíram no verão, conforme esperado. Entretanto, a diminuição foi tamanha que os resultados ficaram abaixo da curva do modelo de mistura homogênea no verão. Com isso, houve um aumento na idade aparente entre o período seco e o período úmido. Considerando o intervalo entre as amostragens (seis meses), somado ao decaimento radioativo do trítio, isso não era esperado.

Avaliando a dinâmica hidrológica dessas nascentes, todas apresentam correlação significativa com a precipitação de curto prazo (menos de 10 dias – TAB. 6 e 7). Porém, não houve registro de eventos chuvosos nos 15 dias anteriores às coletas. Por esse motivo, quando se observa os hidrogramas anuais dessas três nascentes (FIG. 49, 52 e 59), o mês de fevereiro registra vazão consideravelmente baixa, similar aos níveis do período seco. Sendo assim, acredita-se que a rápida resposta dessas nascentes à precipitação associada ao período de estiagem antes da amostragem, faça com que a [T] no verão não represente uma mistura significativa com a água meteórica, evidenciando fluxos de longo termo (águas pré-modernas).

Contudo, apesar de expostas as limitações do modelo de mistura homogênea para o cálculo da idade aparente das águas via concentração de trítio, os resultados obtidos para as nascentes estudadas guardam uma lógica acerca de sua dinâmica e gênese muito similar àquela encontrada pelos métodos hidrológicos, hidrogeoquímicos e geomorfológicos. Isso pode ser comprovado pela análise transversal dos dados especializados.

Os dados da TAB. 16 mostram uma clara diferença entre as nascentes de distintos contextos hidrogeológicos. As nascentes do SA1 (rochas carbonáticas) apresentaram os mais baixos valores de [T], indicando, em sua maioria, águas pré-modernas. No lado oposto, as nascentes do SA3 (rochas siliciclásticas) tiveram os maiores valores de [T], muitas vezes extrapolando o modelo, indicando águas modernas com mistura heterogênea, inclusive nas nascentes intermitentes.

As nascentes de coberturas colúvio-eluviais (SA5) registraram um comportamento complexo. LS05 e LS06 são intermitentes, não havendo amostras para [T] no inverno. No verão, porém, suas [T] foram muito elevadas, distintas daquelas apresentadas pelas nascentes de Lagoa Santa, reiterando sua especificidade hidrogeológica.

No que tange ao SA2 (com influência aluvial), PV14 é intermitente e, por isso, teve sua [T] amostrada somente no verão, apresentando resultados acima da curva do modelo. Já SC04 foi uma das que aumentou sua idade aparente no verão, quando sua água foi considerada pré-moderna, o que corroborou a ideia de que está associada a rochas carbonáticas. De modo similar, apesar da proximidade espacial com a Serra do Cipó, a nascente SC23 (SA4) teve o comportamento de sua [T] similar àquelas do SA1. Apesar de sua água, no período seco, ter sido considerada moderna, a diminuição significativa da [T] no verão colocou-a como pré-moderna.

9.3. SUSCEPTIBILIDADE DAS NASCENTES A IMPACTOS AMBIENTAIS EM RELAÇÃO AO SEU TEMPO DE FORMAÇÃO

É recorrente afirmar que nas últimas décadas se intensificaram os processos de alteração do espaço pelos seres humanos. Invariavelmente, essas intervenções afetam o ciclo hidrológico em termos qualitativos e quantitativos, influenciando a recarga subterrânea. Um dos primeiros subsistemas ambientais afetados pelas ações humanas é a vegetação, fundamental para a infiltração da água no solo. Em casos extremos, como nas áreas urbanas, a superfície topográfica encontra-se parcial ou totalmente impermeabilizada, diminuindo de forma severa as taxas anuais de recarga dos aquíferos. Assumindo essa premissa como verdadeira, pode-se afirmar que os aquíferos são renovados em uma taxa mais lenta e os níveis hidrostáticos tendem a ser gradativamente reduzidos. Evidentemente, esse processo interfere na dinâmica das nascentes.

Além da datação em si, o trítio, juntamente com outros radioisótopos, vem sendo utilizado em investigações sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas. Moran *et al.* (2007) utilizaram a comparação de [T] em aquíferos para determinar a probabilidade de mananciais potáveis serem contaminados por poluentes antropogênicos, chegando à conclusão que os poços com águas mais jovens, de fato, eram os mais afetados por contaminantes. Em trabalho semelhante, Moran *et al.* (2003), associando o trítio com isótopos estáveis, concluíram que “poços que receberam água que foi recarregada no passado recente são mais suscetíveis a interceptarem contaminantes transportados por advecção” (MORAN *et al.*, 2003, p. 46). Yum *et al.* (2007) chegaram a conclusões parecidas para a ilha de Jeju (Coreia do Sul), indicando que os fluxos subterrâneos mais rápidos são justamente os mais vulneráveis à contaminação.

Além da vulnerabilidade qualitativa das águas subterrâneas, em modelos mais complexos, é possível inclusive discutir a velocidade da recarga em si, a partir da [T] nas águas. Christenson *et al.* (2006), verificando a [T] em diferentes profundidades de um aquífero determinou a evolução temporal das taxas de recarga subterrânea na região de Oklahoma (EUA). Parte-se do princípio que há uma variação diretamente proporcional à profundidade na idade aparente das águas subterrâneas. Conhecendo a razão da [T] em amostras de diferentes profundidades, podem-se conhecer as taxas de recarga relacionadas a cada ano-base encontrado.

Com os dados obtidos neste estudo, é possível iniciar a discussão acerca da vulnerabilidade à contaminação das águas nascentes. Parte-se da assertiva já referenciada pela literatura científica de que águas com idade aparente maiores são menos suscetíveis à contaminação. Porém, para o caso das nascentes, diferentemente do que ocorre em estudos de aquíferos, a influência de fluxos locais deve ser considerada.

Inicialmente, pode-se afirmar que as nascentes de águas modernas, por terem uma maior taxa de renovação, são aquelas mais afetadas pelas ações antrópicas. Nesses casos, reflexos da diminuição das taxas de recarga ou mesmo da poluição serão verificados em menor tempo. O caso mais evidente apresentado pelas medições de trítio é o de SC23, pela sua pequena idade aparente de inverno (42 a 12 anos). Essa nascente, em pouco mais de uma década já pode refletir as intervenções humanas durante seu período seco. Considerando a expansão urbana que ocorre em sua zona de recarga atualmente, é possível que nos próximos anos SC23 se torne intermitente. Os dados hidrológicos corroboram essa assertiva.

As demais nascentes de águas modernas têm idade aparente girando em torno de 50 a 30 anos. Nesses casos, as intervenções humanas precisam ser mantidas ou intensificadas por

algumas décadas para que afetem de forma significativa a qualidade e quantidade de suas águas. Porém, considerando os casos de Lagoa Santa, em que não há uma Unidade de Conservação inibindo os impactos ambientais, a vegetação já vem sendo substituída por cultivos e pastagens há mais de um século. Provavelmente, suas nascentes, hoje, já demonstrem algum reflexo desse processo.

Devido a sua taxa de mistura representar uma maior importância de fluxos subterrâneos regionais, as nascentes de águas pré-modernas são menos suscetíveis às intervenções humanas. Em outras palavras, os impactos na recarga ou na qualidade das águas deveriam permanecer por um longo período de tempo (no mínimo, 60 anos) para serem refletivos de forma significativa nas nascentes. Isso as coloca, em uma primeira observação, como aquelas de menor vulnerabilidade.

Por outro lado, existe outro fator que deve ser considerado no caso de águas pré-modernas. Devido a sua baixa taxa de renovação (muito lenta), uma vez que os impactos humanos sejam significativos em suas águas, seus reflexos permanecerão por décadas, ainda que as intervenções cessem. Nesse contexto se encontram as nascentes LS02, PV03 e PV05; além de LS13, PV11, SC04 e SC23, que aparecem com idade aparente elevada no verão.

Entretanto, não se pode negar a influência de fluxos locais nas águas das nascentes. Por esse motivo, a dinâmica hidrológica deve ser avaliada para complementar a interpretação da vulnerabilidade dada pelos dados de trítio. Nesse sentido, nascentes com reflexos rápidos da precipitação tendem a ser mais facilmente afetadas pelas ações humanas.

Enquadram-se nesse contexto as nascentes PV07, LS13, PV05, PV11 (TAB. 6), SC04, SC12, SC14, SC19, SC23, SC24, SC28 e SC29 (TAB. 7), todas com correlação estatisticamente significativa com acumulados de precipitação inferiores a 15 dias. Dentre essas, destacam-se PV05 e PV11, em Lagoa Santa, e SC04, SC23 e SC24, na Serra do Cipó, por apresentarem os maiores coeficientes de correlação com acumulados de precipitação menores.

Contudo, cruzando-se as informações de médio prazo (trítio) e curto prazo (hidrógrafas), pode-se concluir que as nascentes mais vulneráveis à degradação dentro do rol estudado são SC23 e SC24. Ambas, além de águas modernas, apresentam resposta rápida aos eventos chuvosos. Em situações como essas, tanto os fluxos subterrâneos locais quanto os regionais são vulneráveis. Tais nascentes merecem atenção dos gestores ambientais.

Por outro lado, as nascentes mais estáveis em termos hidrológicos seriam as mais aptas à utilização para atividades humanas, sobretudo a dessedentação. Todavia, os padrões de qualidade das águas devem estar em conformidade com a legislação vigente para tal. As nascentes com água pré-moderna se enquadram no primeiro critério, porém, nem todas teriam magnitude suficiente para servir aos usos humanos.

PV05, PV11 e LS02 apresentam características similares, com águas pré-modernas no verão e médio grau de mineralização. Porém, a vazão média é baixa, limitando suas possibilidades de uso, sobretudo para LS02. Sendo assim, dentre as nascentes de Lagoa Santa, a mais recomendada para utilização seria PV03, que não apresenta qualquer impedimento quanto à magnitude e possui águas pré-modernas. Seu único limitante seria seu alto grau de mineralização.

Na Serra do Cipó, não houve nascentes pré-modernas no SA3. Sendo assim, as únicas recomendadas ao uso pelo critério da idade aparente das águas seriam SC04 (SA2) e SC23 (SA4). Porém, apesar de perenes e com magnitude razoável, ambas respondem muito rápido às chuvas. Além disso, SC23 é considerada uma das mais vulneráveis à contaminação.

Por fim, deve-se afirmar que os resultados obtidos acerca da vulnerabilidade das águas das nascentes devem ser avaliados com ponderação e precaução. Estudos mais detalhados sobre as pressões e impactos (efetivos e potenciais) que esses sistemas sofrem são necessários para complementar o raciocínio. Ainda assim, com base na literatura referenciada, parece correto apreender o conceito de vulnerabilidade a partir da taxa de renovação da água subterrânea, o que faz com que nascentes modernas sejam mais suscetíveis à alteração.

10. MODELOS TEÓRICOS DE GÊNESE DAS NASCENTES

10.1. O PAPEL DOS COMPONENTES DO HIDROSSISTEMA

Compreender como surge e evolui uma nascente exige um amplo conhecimento de seu funcionamento. Os registros morfológicos existentes são a chave para compreensão dos processos que levaram à configuração fisiográfica atual. Nesse sentido, é necessário entender a funcionalidade do sistema nascente, buscando desvendar o engendramento dos elementos que o constitui.

As nascentes são aqui entendidas como sistemas ambientais estruturados por variáveis internas e condicionados por variáveis externas bem definidas (FIG. 1). Na perspectiva de Shumm (2003), endossada por Charlton (2008), podem ser consideradas hidrossistemas, com trocas tridimensionais de água, sedimentos e vida orientadas em uma configuração geomorfológica própria. Desse modo, o comportamento das nascentes é condicionado pelo clima, relevo regional, aquíferos e sociedade (variáveis externas).

Todavia, seu comportamento é estruturado por dois subsistemas internos: morfológico e hidrológico (CHARLTON, 2008). O subsistema morfológico engloba, sobretudo, as trocas laterais (canal-vertente) e longitudinais (montante-jusante) de sedimentos; enquanto o subsistema hidrológico, além das trocas laterais e longitudinais, perpassa as trocas verticais (aquífero-canal-atmosfera) de água. A evolução de uma nascente é traduzida pelo rearranjo de matéria e energia nesses subsistemas que a compõe.

Considerando as variáveis estruturantes da nascente (FIG. 1), enquanto o subsistema hidrológico preconiza a água e o ecossistema, o subsistema morfológico é definido pela morfologia e pelo material geológico. Porém, em uma perspectiva sintética, a história de uma nascente deve ser contada a partir da interação entre todos estes elementos. Nesse sentido, os modelos aqui propostos são abstrações derivadas da observação e interpretação dos processos identificados a partir desses elementos.

Ao longo de toda a pesquisa, buscou-se evidenciar as principais características hidrogeomorfológicas das nascentes, no intuito de desvendar os processos que as originaram. A hipótese inicial de trabalho, de que as nascentes são originadas pela ação de processos geomorfológicos, é pautada na concepção de que o subsistema morfológico, apesar de trocas

mútuas com o subsistema hidrológico, engatilha o processo de exfiltração que define uma nascente. Por esse motivo, quando se busca traduzir (ainda que de forma simplista) a gênese das nascentes em modelos teóricos qualitativos, sobressaem-se os aspectos geomorfológicos.

Contudo, as observações deste trabalho não exaurem todas as possibilidades de gênese de nascentes, uma vez que não foram investigadas nascentes em contextos ambientais distintos. Por outro lado, não se pode limitar a síntese proposta apenas às nascentes de Lagoa Santa e da Serra do Cipó, posto que as realidades fisiográficas das nascentes estudadas refletem boa parte do contexto tropical brasileiro.

10.2. PROCESSOS ENVOLVIDOS NA ORIGEM E EVOLUÇÃO DAS NASCENTES

10.2.1. MODELO 1: EROÇÃO LINEAR (EM SULCO)

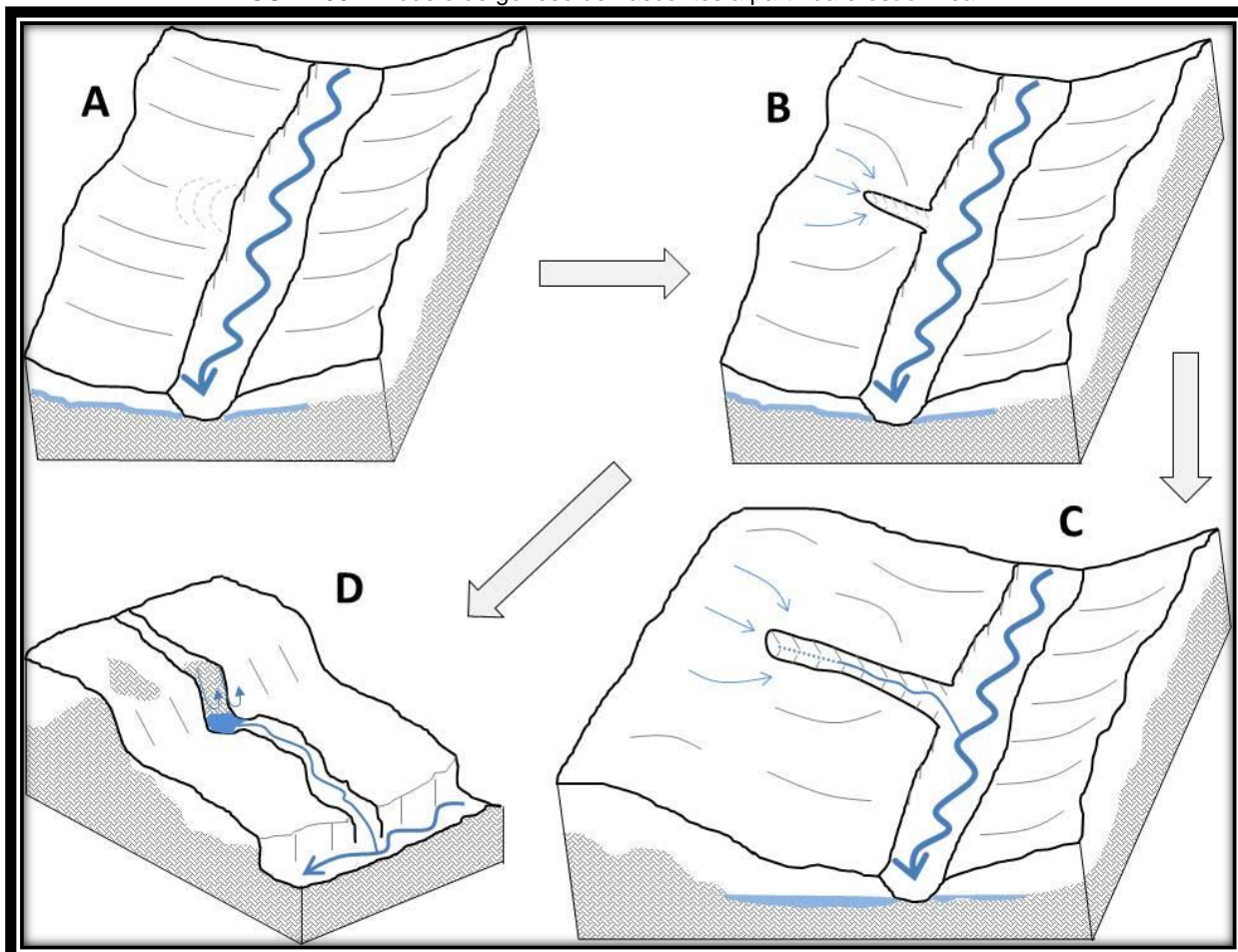
Diversas nascentes estudadas encontram-se em canais erosivos, com exfiltração no talvegue dessas feições. Isso ocorre, pois a erosão linear promove a incisão vertical do terreno até que promova o contato do nível freático com a superfície. Por esse motivo, essas nascentes possuem morfologia em canal, normalmente associada a mantos de intemperismo rasos e até afloramentos rochosos. A exfiltração é normalmente pontual, podendo ser múltipla ou difusa em casos específicos, como em calhas muito largas e/ou leitos rochosos.

Essa configuração leva a uma rápida resposta hidrológica aos eventos pluviométricos, uma vez que há pouca capacidade de armazenamento de água no regolito que sustenta a nascente. Como consequência, nascentes com essas características são muito suscetíveis a variações sazonais. As águas tendem a ser modernas e a taxa de intermitência entre essas nascentes é elevada. Ademais, é corriqueira a mobilidade a jusante da exfiltração acompanhando o rebaixamento periódico do nível freático. Portanto, na tipologia proposta, essas nascentes tendem a se enquadrar como sazonais (k2) ou dinâmicas (k4).

Estando em canais erosivos, essas nascentes são originadas pelos processos de erosão linear e incisão vertical (FIG. 96). De acordo com a proposta original de Horton (1945), o estabelecimento de um canal de drenagem em uma bacia altera as condições de escoamento pluvial, concentrando os fluxos em direção a esse eixo de drenagem. Esses fluxos, que na opinião de Horton são originados do excedente da capacidade de infiltração da água no solo

(*hortonian flow*), tendem a se concentrar gradativamente em segmentos convergentes (ainda que na escala micromorfológica). Aos poucos, cria-se um eixo temporário de drenagem pluvial a partir da erosão de materiais mais frágeis da vertente. A continuidade desse processo de erosão linear, leva à formação de sulcos erosivos.

FIGURA 96 – Modelo de gênese de nascentes a partir da erosão linear.



A) momento inicial de formação do sulco; B) formação do sulco erosivo e concentração do escoamento pluvial. C) formação da nascente pela incisão vertical no canal erosivo. D) formação da nascente pela cavitação no interior do sulco. Fonte: elaborado pelo autor.

Independentemente das especificidades da proposta de Horton (relacionadas à geração do fluxo hortoniano e aos padrões matemáticos de formação dos canais fluviais), a erosão em sulcos e ravinas é um elemento importante na formação das redes de drenagem (SUMMERFIELD, 1991). A partir do momento em que o sulco é formado, dois processos correlatos são iniciados: erosão remontante e incisão vertical. Tais processos são responsáveis pela exfiltração da água e formação da nascente.

A FIG. 96A representa o primeiro momento dessa evolução, quando apenas um eixo central de drenagem controla todo o escoamento superficial. A erosão de suas margens, porém, pode

iniciar a formação de uma feição côncava para qual converge o escoamento pluvial. Tem-se, então, o processo de formação de um sulco por erosão linear (FIG. 96B). Inicialmente, esses sulcos erosivos são muito suaves e rasos, todavia, com a sucessão de eventos chuvosos, dependendo das características da cobertura vegetal, eles podem ser aprofundados pela incisão vertical no leito do canal recém formado. Ao mesmo tempo, os fluxos superficiais a montante do sulco redirecionam-se para este, promovendo o recuo de sua cabeceira, gradativamente.

Dependendo da intensidade dos processos erosivos e da profundidade do nível freático, o leito desses canais erosivos pode atingir o nível freático, promovendo a exfiltração (FIG. 96C). Em um primeiro momento, esse contato pode ser sazonal, porém, com uma nítida tendência a se perenizar, caso a incisão vertical continue atuando. A nascente formada tem como característica a sua localização dentro do canal erosivo, com exfiltração em seu leito. Como a erosão remontante continua atuando, forma-se, invariavelmente, um segmento efêmero a montante da nascente. Em todo o sulco erosivo, o nível freático tende a estar muito próximo à superfície, o que induz à mobilidade da exfiltração, no período de escassez hídrica.

Em alguns casos específicos, em que o canal erosivo apresenta diversas rupturas de declive em sua extensão, o processo de cavitação pode auxiliar a exfiltração (FIG. 96D). Nesses casos, a cavidade erosiva formada está no leito do canal de modo que o sulco se estende a montante da cavidade (diferentemente de nascentes formadas essencialmente por cavitação – item 10.2.5).

Dentre as nascentes estudadas, algumas podem ser explicadas por esse modelo teórico. As nascentes SC24, LS13 e LS15 são muito semelhantes ao ilustrado na FIG. 96C, por ocorrerem em canais erosivos, diretamente sobre a rocha, sem grandes rupturas de declive. Por outro lado, as nascentes LS05, LS06 e a antropogênica SC14 também ocorrem em canais erosivos, porém, tem a exfiltração condicionada por cavidades erosivas no interior dos sulcos (FIG. 96D).

10.2.2. MODELO 2: PIPING/SAPPING

Além dos processos superficiais, fenômenos que ocorrem em subsuperfície também podem originar nascentes. Dunne (1980) propôs um modelo de evolução de drenagem em que os canais fluviais são gerados a partir da convergência de fluxos subterrâneos associados a processos como o *piping* e o *sapping*. A partir de uma perturbação na morfologia das margens

de um canal principal, as linhas equipotenciais são alteradas, promovendo a concentração do fluxo subsuperficial. Como consequência, há um aumento da energia e do poder erosivo da água subterrânea que, ao aflorar na margem do canal, erode os focos de exfiltração na vertente. Em função da forte concentração de energia nas cavidades de exfiltração, estas podem migrar por recuo erosivo interno associado a quedas dos materiais superficiais das vertentes.

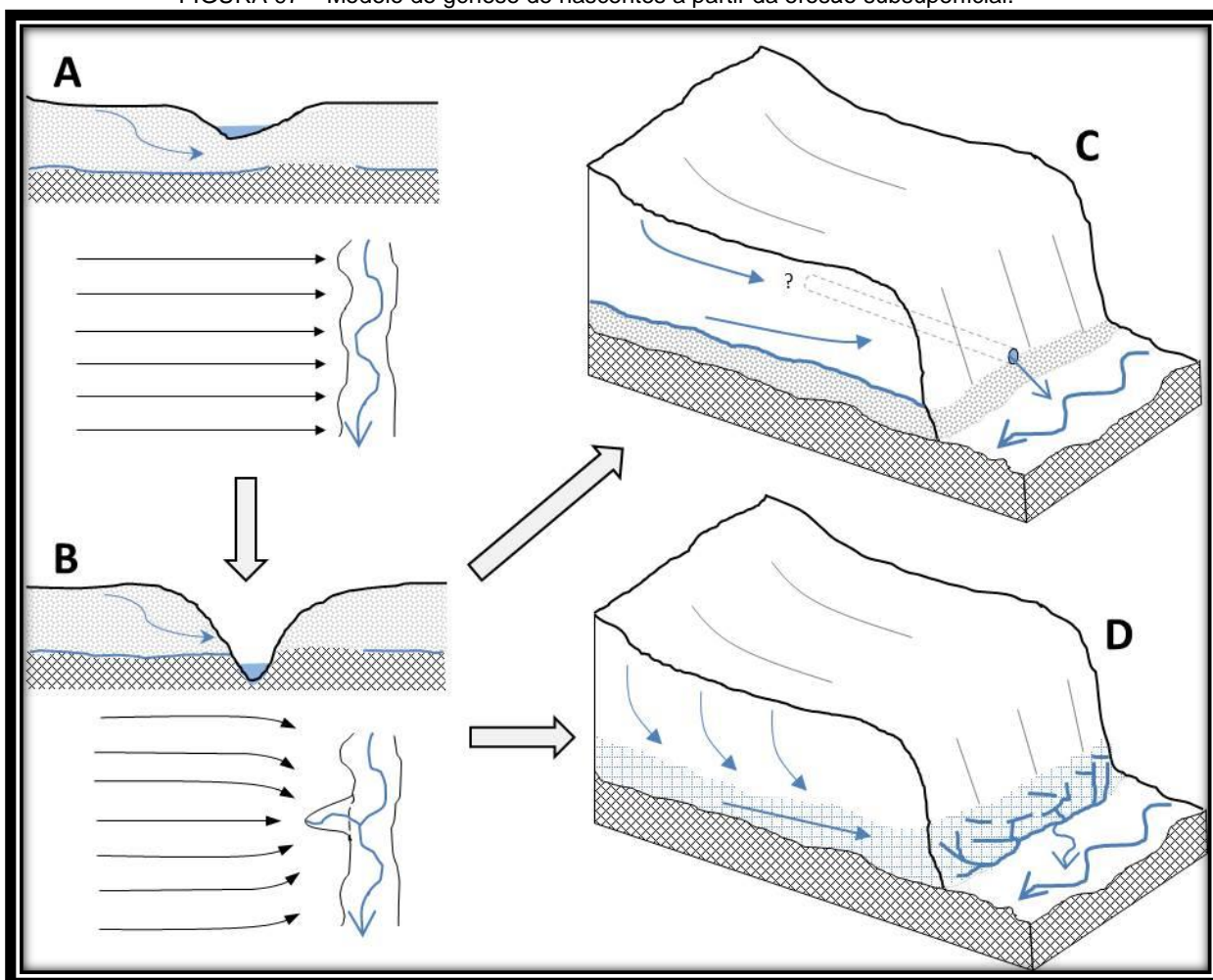
No modelo de Dunne (1980), a partir do momento em que há a exfiltração, dá-se início à erosão remontante e formação de um canal secundário. Movimentos de massa também podem estar associados a esse processo, a partir da desestabilização da margem promovida pela água subterrânea.

Em algumas nascentes estudadas, ficou nítida a participação de processos como o *piping* e o *sapping* em sua origem (FIG. 97). Assim como afirma o modelo de Dunne (1980), partindo-se de um manto de intemperismo homogêneo de mesma permeabilidade, os fluxos subsuperficiais se direcionam ao canal principal de forma paralela (FIG. 97A), uma vez que as linhas equipotenciais são determinadas preferencialmente pela gravidade (aquífero granular livre).

Porém, conforme avança a erosão fluvial com o encaixamento da calha, o próprio canal fluvial intercepta, em sua margem, o nível freático (FIG. 97B). Quando isso ocorre, há a tendência de exfiltração nas margens do canal, contribuindo diretamente para o débito fluvial. Nesse momento, cria-se uma zona de menor potencial onde a água consegue alcançar a superfície, redirecionando os fluxos sub-superficiais.

Caso esse redirecionamento alcance uma zona de fraqueza no manto de intemperismo (normalmente relacionadas a superfícies de menor permeabilidade, como o contato entre o horizonte B e C, ou macroporos alinhados por bioturbação), tende a haver uma concentração desses fluxos. Aumenta-se, então, a velocidade e o poder erosivo da água subsuperficial, escavando dutos (FIG. 97C).

FIGURA 97 – Modelo de gênese de nascentes a partir da erosão subsuperficial.



A) momento inicial com linhas de fluxos sub-superficiais paralelas; B) incisão vertical do canal principal e interceptação do nível freático pela margem. C) formação do duto erosivo (*piping*) e geração de uma nascente. D) formação da nascente pela exfiltração difusa na margem (*sapping*). Fonte: elaborado pelo autor.

As nascentes originadas nesse contexto apresentam o duto como morfologia primária, com as águas exfiltrando de modo pontual. Em alguns casos, pode haver mais de um duto relacionado a uma mesma nascente, promovendo uma exfiltração múltipla. Os dutos que promovem a existência dessas nascentes são formados, preferencialmente, no contato entre o manto de alteração e a rocha ou entre o *solum* e o saprolito. Como se originam de um fluxo subsuperficial concentrado, elas tendem a ser mais estáveis sazonalmente, mantendo-se perenes e sem mobilidade.

Porém, nem sempre os fluxos sub-superficiais se concentram em dutos. Em alguns casos, a exfiltração pode ocorrer de forma difusa ou múltipla no sopé da vertente, normalmente, no contato com uma superfície de menor permeabilidade (como o saprolito ou mesmo a rocha sã). Essa configuração hidrogeomorfológica se aproxima mais do processo de *sapping* (FIG. 97D).

Quando essas nascentes são geradas, caracterizam-se por exfiltração difusa ou múltipla, normalmente relacionadas a afloramentos rochosos e, portanto, com mantos de intemperismo mais rasos. Diferentemente das geradas por *piping*, não necessariamente serão perenes, mas pelo contexto morfológico em que ocorrem, tendem a ser fixas.

Relacionando a gênese à tipologia das nascentes, percebe-se, no rol estudado, uma tendência desse modelo se enquadrar melhor nas nascentes dinâmicas (k4). As nascentes PV05, PV07 e SC27, todas dinâmicas, apresentam as características fisiográficas típicas de uma evolução por *piping*. Por outro lado, são exemplos de gênese por *sapping*, dentro das nascentes estudadas, SC05, PV11 (dinâmicas) e LS02 (dinâmico-flutuante). Esta última, inclusive, registra a cicatriz de um pequeno movimento coletivo, provavelmente gerado a partir da desestabilização da vertente; típico do *sapping*.

10.2.3. MODELO 3: CONDUTOS CÁRSTICOS

O comportamento hidrogeológico de sistemas aquíferos com influência cárstica é sensivelmente distinto. Nesses contextos, além da energia de elevação e da energia de pressão, o gradiente potenciométrico é definido também pela energia de velocidade (WARD; TRIMBLE, 2004). Como a dinâmica das partículas de água no sistema de condutos e cavidades cársticas é maior, não se pode ignorar esse terceiro vetor de movimento. Por esse motivo, os aquíferos cársticos tendem a promover fluxos de maior magnitude com águas de alto grau de mineralização, resultado da dissolução de rochas carbonáticas (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000).

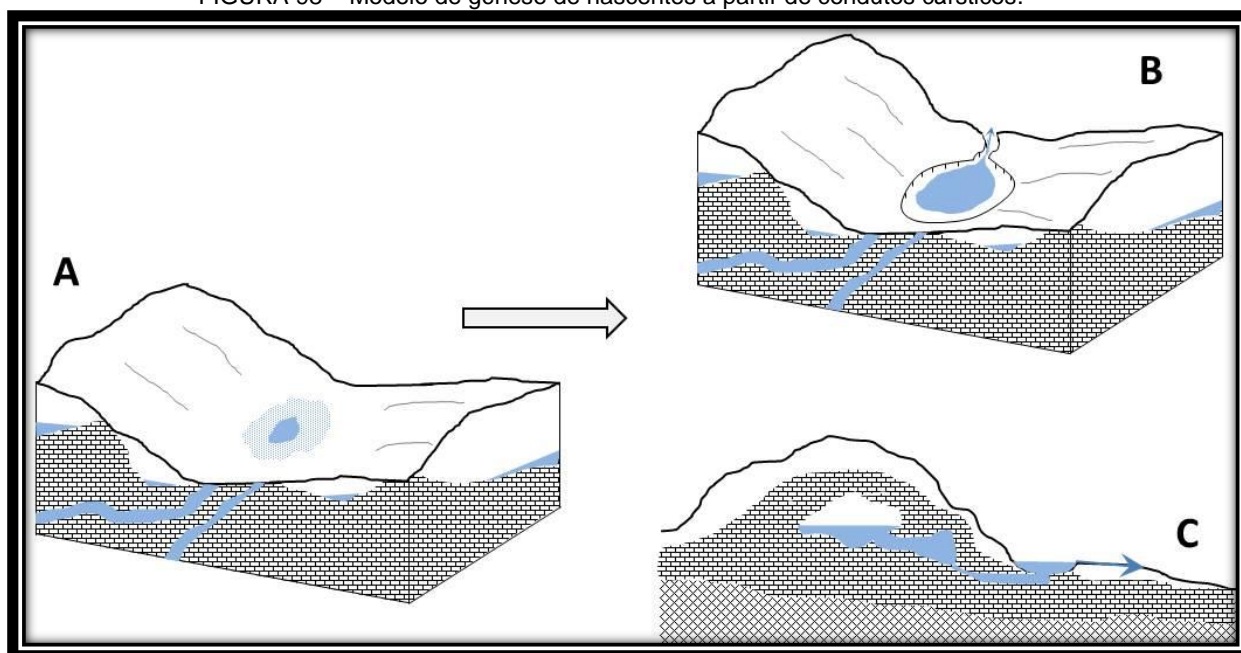
O contato desse sistema de canais de dissolução subterrâneos com a superfície, normalmente ocorre em concavidades suaves no terreno, onde a profundidade do manto de alteração é menor. Em terrenos de relevo tipicamente cársticos (nem sempre as rochas carbonáticas estão relacionadas a um exocarste típico, como no caso da área de estudo e Lagoa Santa), isso normalmente ocorre em dolinas de abatimento ou de subsidência lenta. A surgência da água subterrânea no leito de dolinas promove a ocorrência de lagos e lagoas que, não necessariamente, são nascentes de cursos d'água. Porém, caso haja a formação de um canal de drenagem a jusante da fonte, tem-se conceitualmente uma nascente.

A FIG. 98 exemplifica a formação de nascentes a partir de surgências de condutos cársticos. Inicialmente, o trabalho geomorfológico da água subterrânea abre cavidades de dissolução nas rochas que possuem alto poder de armazenamento de água. Isso, porém, não significa

transmissividade, uma vez que tais cavidades podem estar desconexas e as rochas carbonáticas tendem a uma permeabilidade primária muito baixa. A ampliação gradativa dessas cavidades pode levar à conexão desses vazios, normalmente em condutos preferencialmente lineares, que evoluem a partir de discontinuidades físicas da rocha.

Quando esses condutos encontram a superfície topográfica, ocorre a exfiltração da água. Em afloramentos rochosos, isso significará a formação de lâminas d'água pouco espessas que podem escoar gradativamente na forma de um fluxo superficial disperso, dependendo da declividade e da micromorfologia do terreno. Todavia, em áreas com presença do manto de alteração, ainda que raso, essa água tende a ser retida nos poros desse material permanecendo acumulada localmente (FIG. 98A).

FIGURA 98 – Modelo de gênese de nascentes a partir de condutos cársticos.



A) elevação do nível freático e início da acumulação de água superficial; B) formação do lago e início da drenagem em canal. C) esquema em corte do sistema aquífero que alimenta o lago da nascente. Fonte: elaborado pelo autor.

Dessa forma, há uma elevação do nível freático que pode chegar à superfície, criando áreas brejosas, com pequenos acúmulos superficiais. A água armazenada no solo intensifica os processos geoquímicos típicos de rochas carbonáticas, rebaixando gradativamente o relevo local, até a formação de pequenos lagos. Se a energia da água for suficiente para erodir a jusante, forma-se um canal de drenagem que, aproveita-se da declividade do terreno, para drenar a água acumulada superficialmente até um canal fluvial (FIG. 98B). Forma-se, assim, uma nascente em um pequeno lago, alimentada por condutos cársticos (FIG. 98C).

Nascentes geradas por esses processos tendem a ser muito particulares em comparação com as demais de uma mesma área. Além da morfologia típica, em uma cavidade preenchida por água, na forma de um lago, são extremamente estáveis sazonalmente, por relacionarem-se a fluxos regionais e águas, inclusive, pré-modernas. Em termos hidrológicos, a consequência dessa configuração é que tais nascentes possuem grandes vazões, chegando a algumas dezenas de litros por segundo.

Suas características hidrogeoquímicas corroboram a existência de rochas carbonáticas, devido ao alto grau de mineralização das águas (sobretudo associado a elevadas concentrações de carbonatos e bicarbonatos). São nascentes normalmente do tipo freática (k1), constituindo um subgrupo desse perfil marcado por características peculiares, como a elevada vazão.

Apenas duas nascentes estudadas foram enquadradas nesse modelo de gênese: PV03 e SC01. Ambas apresentaram as maiores vazões encontradas, com relativa estabilidade sazonal e alto grau de mineralização das águas. A nascente PV03 encontra-se em um sistema aquífero de rochas carbonáticas sotopostas a coberturas superficiais de alteração. Atualmente, seu lago encontra-se estabilizado por intervenção antrópica. Por sua vez, SC01 ainda possui morfologia natural, em um lago mais raso. Sua vazão foi a mais elevada de todo o rol, porém, não foi possível realizar seu monitoramento em um ano hidrológico completo, por questões logísticas. Os dados coletados, porém, corroboram as características preconizadas nesse modelo.

10.2.4. MODELO 4: SEEPAGE EROSION

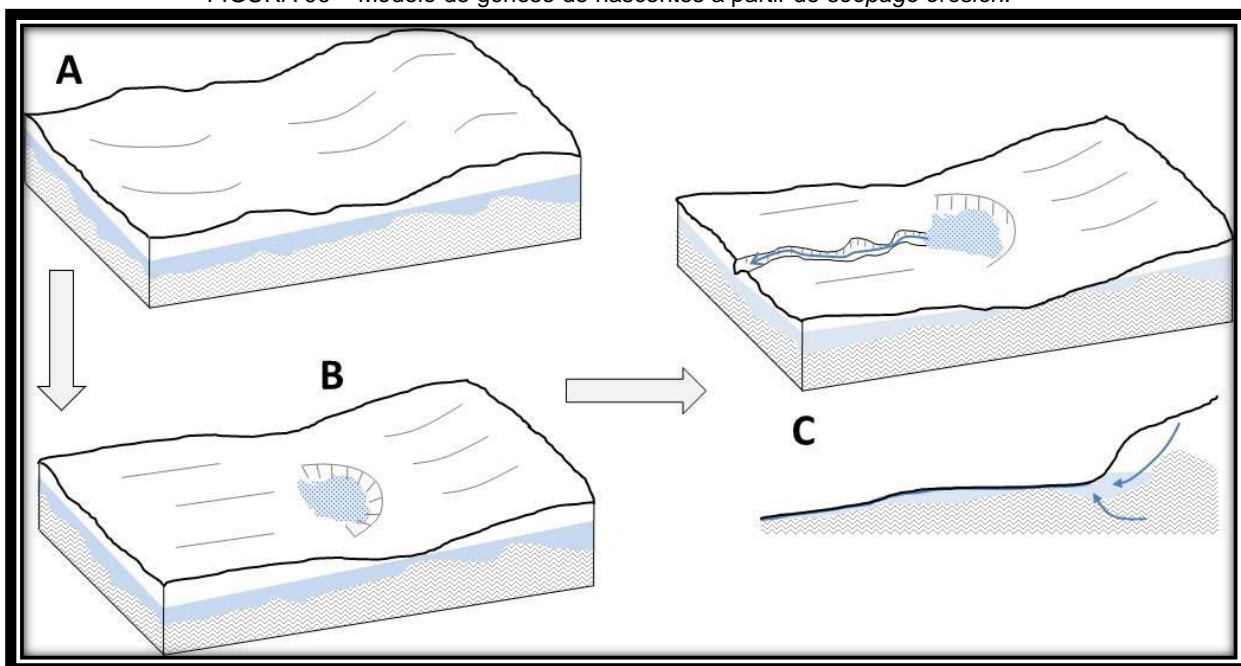
Quando a água subterrânea aflora na superfície, mesmo com baixa energia, ela é capaz de carrear sedimentos químicos e pequenas partículas físicas desagregadas do solo. Esse processo lento e gradual, considerado o responsável pela formação de anfiteatros, concavidades suaves, é chamado de *seepage erosion* (ONDA, 1994). Apesar de sua pequena magnitude, não se pode desconsiderar sua ação morfogenética em cabeceiras de drenagem e margens fluviais, uma vez que os sedimentos retirados em liquefação podem desestabilizar a vertente, induzindo outros processos geomorfológicos como movimentos de massa ou a erosão linear (FOX *et al.*, 2007).

O processo de *seepage erosion* ocorre quando o nível freático está em contato com a superfície topográfica. Por esse motivo, ele tende a ser mais notório em margens fluviais,

associado ou não ao *sapping* (FOX *et al.*, 2006). Entretanto, em segmentos menos íngremes da vertente, desde que ocorra a exfiltração, o *seepage erosion* pode atuar na formação de concavidades suaves que concentram os fluxos superficiais e sub-superficiais de água. Por conseguinte, esse processo pode ser o responsável pela formação de nascentes (FIG. 99).

A gênese de nascentes a partir do processo de *seepage erosion* pressupõe a existência de uma vertente com gradiente suave e manto de alteração que funciona como um aquífero granular livre (FIG. 99A). A oscilação sazonal do nível freático pode promover a exfiltração temporária da água em locais mais propícios, como em microdepressões ou áreas com maior condutividade hidráulica no solo. A ação de raízes e afloramentos rochosos no sentido da acumulação da água no regolito também deve ser considerada. Isso gera uma área brejosa, marcada pela elevação da zona de saturação do solo (FIG. 99B).

FIGURA 99 – Modelo de gênese de nascentes a partir de *seepage erosion*.



A) terreno pouco íngreme com nível freático próximo à superfície; B) início da exfiltração e formação da concavidade. C) ampliação da concavidade e formação do canal de drenagem a jusante. Fonte: elaborado pelo autor.

Em um primeiro momento, esse fenômeno pode ser temporário, relacionado a períodos de maior recarga dentro do ano hidrológico. Porém, conforme ocorre a exfiltração, o processo de *seepage erosion* consegue liquefazer partículas do solo e retirá-las do sistema, ampliando a capacidade de exfiltração. Essa retroalimentação positiva promove gradativamente a intensificação da erosão e, por conseguinte, um aumento da quantidade de água na superfície, criando uma concavidade suave no terreno.

A zona encharcada do solo, quando ganha magnitude, começa a drenar para jusante a água superficial, na forma de um escoamento difuso, controlado pela micromorfologia do solo e pela ação das raízes das plantas. O escoamento superficial gradativamente retira material da superfície, criando microcanais preferenciais para drenagem da água, até que esta se concentre em um único canal (FIG. 99C). Nesse momento, a erosão pluvial tende a ampliar cada vez mais a concavidade e erodir, juntamente com a água exfiltrada, o canal recém formado. Evidentemente, essa drenagem pode se interligar, mais abaixo, a sulcos erosivos ou ravinhas, estabelecendo um canal bem definido para drenagem da zona encharcada. Pela configuração do nível freático, é comum que a exfiltração ocorra não apenas na concavidade iniciada pelo *seepage erosion*, mas também no leito do canal erosivo. A partir do estabelecimento do canal fluvial, a erosão remontante atua no sentido de remodelar a concavidade e retrainir a cabeceira de drenagem.

Esse processo de formação foi relativamente comum nas nascentes estudadas, seja em áreas de coberturas superficiais espessas ou rasas, com destaque para esses últimos. As nascentes relacionadas a esse modelo de gênese, dentro da tipologia proposta, são flutuantes (k3) ou sazonais (k2).

Essas nascentes possuem morfologia em concavidade, que remete ao processo de *seepage erosion*, associada à exfiltração difusa ou múltipla. Com mantos de intemperismo preferencialmente rasos, há baixa capacidade de armazenamento de água no aquífero, portanto, tendem a promover nascentes móveis ou mesmo intermitentes, em resposta ao rebaixamento sazonal do nível freático. Como consequência, as águas exfiltradas são modernas, com influência direta dos eventos de precipitação e taxa de renovação relativamente rápida.

Relacionam-se a esse contexto genético as nascentes SC10, SC12, SC18 e SC19, todas fisiograficamente muito semelhantes, sendo do tipo sazonal, móveis e intermitentes. Além disso, as nascentes flutuantes SC23 e SC29, localizadas em áreas de manto de alteração mais profundo, também são enquadradas nesse modelo.

10.2.5. MODELO 5: CAVITAÇÃO

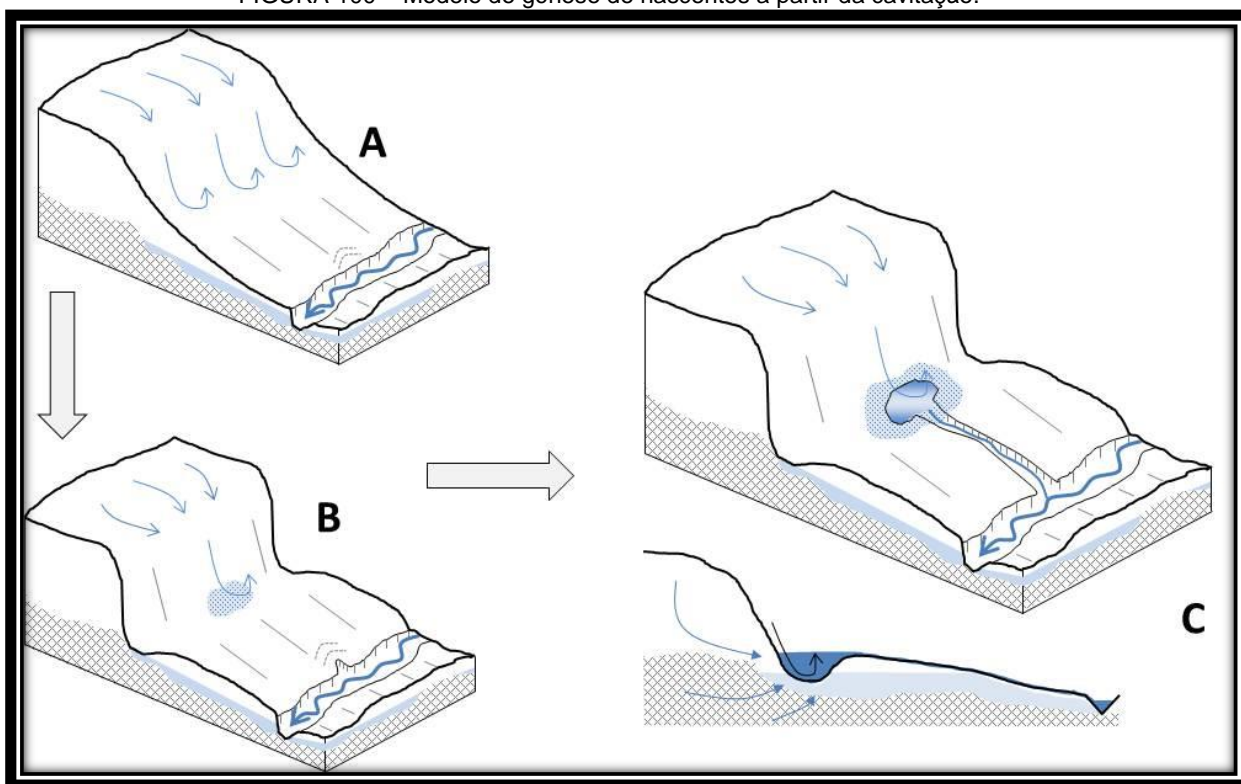
Dentre os principais processos erosivos fluviais, Christofolletti (1981) inclui a cavitação, relacionada à ação vertical da água e respectivos sedimentos mobilizados na escavação de feições mais profundas do que largas e aproximadamente circulares no leito de rios.

Conceitualmente, a cavitação ocorre em fluxos de grande velocidade com mudanças abruptas no gradiente do canal (corredeiras, degraus, cascatas), que geram pressão nas paredes do canal. A ação do atrito dos sedimentos com a calha, em linhas de fluxos turbulentos, promove a erosão circular, formando cavidades.

Todavia, esse processo não pode ser limitado aos leitos fluviais. Em vertentes com topografia irregular, onde ocorrem rupturas de declive, o escoamento pluvial pode gerar a cavitação do material intemperizado no sopé desses desníveis. A ação contínua desse processo ao longo do tempo pode originar uma cavidade alveolar similar àquelas que ocorrem nos rios.

A FIG. 100 ilustra como esse processo atua na formação de nascentes. Inicialmente, pressupõe-se a existência de um relevo com declividade descontínua, promovendo rupturas de declive que aceleram o escoamento superficial difuso, iniciando o processo de cavitação (FIG. 100A). A primeira implicação morfológica é o aumento do gradiente topográfico do segmento da vertente, além disso, inicia-se a formação de uma concavidade, resultante da retirada de material pelo escoamento pluvial.

FIGURA 100 – Modelo de gênese de nascentes a partir da cavitação.



A) ruptura de declive no terreno iniciando o processo de cavitação; B) início da exfiltração e formação da cavidade. C) estabelecimento de um pequeno lago na cavidade e formação do canal de drenagem a jusante.
Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme a cavitação atua erodindo localmente, o escoamento superficial difuso começa a convergir em direção à nova feição. Isso gera o aumento da energia da água, intensificando o processo de retirada de material. Em certo momento, o aprofundamento da cavidade gerada promove o contato do nível freático com a superfície, iniciando a exfiltração (FIG. 100B).

O avanço da cavidade altera também os fluxos subterrâneos, que convergem na sua direção. Assim, eleva-se localmente o nível freático formando um pequeno brejo coincidente com a cavidade. Em concomitância, pode ocorrer a erosão remontante a partir da margem do canal, originando um sulco erosivo.

Quando a cavidade está bem formada, com sua circularidade definida e com profundidade superior ao seu diâmetro, a água exfiltrada acumula em um pequeno poço, ainda sem conexão com a rede de drenagem. No período chuvoso, entretanto, a água acumulada na cavidade transborda, iniciando o escoamento (ainda difuso) para jusante. A ação combinada da erosão linear com a incisão vertical conecta a nascente iniciada na cavidade ao canal erosivo, constituindo um afluente da drenagem principal (FIG. 100C).

Nota-se que tais nascentes não possuem sulco erosivo a montante, diferindo nesses termos do modelo de erosão linear. Com isso, a cavidade é a principal expressão morfológica dessas nascentes. Esse é o caso de PV14 e SC04, dentre as nascentes estudadas (inseridas no tipo flutuante – k3). Em ambos os casos, a exfiltração difusa ocorre em cavidades erosivas sobre mantos de intemperismo espessos. No primeiro caso, a cavidade está tendo suas bordas gradativamente erodidas e transformando-se em uma concavidade mais suave. Por outro lado, o material retirado entulha seu canal, produzindo diversas interrupções no seu fluxo superficial.

Já a nascente SC04, é uma nascente antropogênica, formada às margens de uma estrada de rodagem. Apesar de ainda não haver um sulco a montante da exfiltração, o escoamento pluvial concentrado é significativo (pela própria ação da estrada), estando o nível freático muito próximo à superfície. Por conseguinte, ocorre a migração da exfiltração para montante no período de chuvas. Ressalta-se que a cavitação foi vista como um dos processos preferenciais de geração de nascentes antropogênicas em áreas urbanas, associada a canaletas de drenagem pluvial que concentram o escoamento superficial.

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação das nascentes de cursos d'água contribui para o preenchimento de uma importante lacuna da hidrogeomorfologia no que tange à formação dos canais de drenagem e à interação entre águas superficiais e subterrâneas. Porém, poucos esforços estão sendo feitos nesse sentido, seja pelas dificuldades logísticas e metodológicas (envolve grande empenho de campo, uma vez que o acesso às nascentes é normalmente difícil) seja pela necessidade de compreensão de complexos conceitos e processos abordados por diversas ciências. Apesar dessas dificuldades, a importância de se conhecer melhor as nascentes é um fator que não pode ser negligenciado, já que esses sistemas são extremamente sensíveis à ação antrópica e de suma importância para o equilíbrio ambiental. Não por acaso, o entorno das nascentes é reconhecido legalmente como Área de Preservação Permanente.

O estímulo para a realização desta pesquisa veio dos questionamentos levantados em estudos prévios. Apesar de uma significativa diversidade fisiográfica, esses sistemas são tratados tanto pela literatura científica, quanto pelos documentos legais, com uma uniformidade errônea. Ao buscar explicações para essas múltiplas facetas das nascentes, cada resposta levou a uma nova pergunta, culminando na questão que norteia este trabalho: como surgem, evoluem e se comportam as nascentes?

Nesse sentido, dois pressupostos foram postados: i) devido à tácita diversidade das características das nascentes, uma classificação (tipologia) desses sistemas permite agrupar perfis semelhantes que tendem a possuir gênese e dinâmica similares; ii) os processos geomorfológicos (mais especificamente, os hidrogeomorfológicos) são os responsáveis por explicar como as nascentes são formadas e como elas evoluem. Ambas as assertivas foram confirmadas no decorrer do trabalho.

A ideia da pesquisa foi de compreender linhas gerais sobre a dinâmica e a gênese das nascentes a partir de estudos de caso localizados em compartimentos ambientais consideravelmente distintos. Dessa maneira, a escolha das áreas de estudo foi uma etapa essencial para o bom desenvolvimento do trabalho. Lagoa Santa e Serra do Cipó apresentam as diferenças físico-geográficas necessárias para a ocorrência de nascentes de grande variabilidade de características: enquanto a primeira encontra-se na Depressão do Alto-Médio São Francisco, embasada por rochas clastoquímicas neoproterozóicas do Grupo Bambuí; a segunda configura-se como a porção sul da Serra do Espinhaço Meridional, em rochas

siliciclásticas neoproterozóicas do Grupo Macaúbas. Ademais, a proximidade espacial entre as áreas auxilia a logística dos trabalhos de campo e promove condições pluviométricas similares, o que foi essencial para a comparação dos resultados obtidos.

Após os primeiros trabalhos de campo, foram catalogadas 61 nascentes, sendo 31 delas em um quadrante de aproximadamente 12,15 km² na Serra do Cipó e as demais 30 em uma área de aproximadamente 15,5 km² em Lagoa Santa. Assim, a primeira área apresentou uma densidade de nascentes consideravelmente superior à segunda (2,55 e 1,92 nascente/km², respectivamente na Serra do Cipó e em Lagoa Santa). Associando critérios técnicos, logísticos e a busca por uma grande heterogeneidade fisiográfica, 24 nascentes foram selecionadas para a realização da pesquisa. Essa amostra apresentou todas as morfologias e tipos de exfiltração preditos na literatura brasileira, representando além dos dois contextos geomorfológicos correspondentes às macrounidades do relevo nas quais as áreas de estudo estão inseridas, quatro unidades geológicas e três unidades pedológicas distintas (nas escala de 1:250.000).

A execução do modelo de tipologia multivariada possibilitou a separação das nascentes estudadas em quatro grupos principais: freáticas; sazonais; flutuantes; dinâmicas. O ajuste do modelo foi extremamente satisfatório, sendo que 70% dos casos foram perfis puros (enquadram-se em apenas um grupo). Esses dados além de comprovar a heterogeneidade fisiográfica da amostra selecionada para o estudo, sistematiza as nascentes de acordo com suas características hidrogeomorfológicas, auxiliando as interpretações realizadas posteriormente. Dentro dessa tipologia, uma primeira associação multiescalar foi percebida uma vez que as nascentes localizadas na depressão (escala regional) foram mormente enquadradas como dinâmicas (37%) e freáticas (36%), graças a suas características locais. Por outro lado, na Serra do Cipó, predominaram os tipos sazonal (54%) e flutuante (23%). Indubitavelmente, a utilização de um método fundamentado na estatística nebulosa ampliou as possibilidades de interpretação, sem mascarar a diversidade das nascentes estudadas.

As vazões das nascentes apresentaram valores baixos. De um modo geral, as médias das mensurações realizadas ao longo de um ano hidrológico ficou abaixo de 0,2 L/s. Alguns poucos casos superaram 0,5 L/s em pelo menos uma medida, entretanto, dois casos registraram vazões excepcionais para os registros da literatura brasileira: a nascente PV03, em Lagoa Santa, teve média superior a 5,0 L/s, superando em duas medições o valor de 20,0 L/s. a nascente SC01, na Serra do Cipó, registrou vazão superior a 100,0 L/s em uma das medições, porém, sua média anual ficou comprometida pela falta de dados, uma vez que,

devido à negativa do proprietário do terreno onde se encontra esta nascente, seu monitoramento foi abortado.

Observando individualmente as nascentes em função da variabilidade das vazões ao longo do ano hidrológico de monitoramento, percebeu-se uma grande oscilação associada à estacionalidade climática. As vazões mais baixas são registradas entre abril e setembro, porém, o comportamento sazonal das nascentes não é uniforme nas duas áreas, apesar da pluviometria semelhante. Apesar de não ter sido possível realizar a separação dos fluxos no hidrograma das nascentes, estabeleceu-se a relação das vazões com os acumulados pluviométricos. De uma forma geral, as nascentes apresentaram respostas rápidas às chuvas, sobretudo na Serra do Cipó, onde o índice de intermitência foi elevado (a área abrange oito das 11 nascentes intermitentes investigadas). A avaliação estatística a partir da correlação linear de Pearson apontou que as nascentes de Lagoa Santa, geralmente, apresentam correlação significativa com acumulados de precipitação mais prolongados, sobretudo, de 60 dias. Por outro lado, os maiores coeficientes de correlação para as nascentes da Serra do Cipó foram encontrados para acumulados menores, principalmente inferiores a 20 dias. Esses resultados levaram à conclusão que a resposta hidrológica diferenciada das áreas de estudo estaria condicionada pelo tipo de material do aquífero, destacando-se, nesse contexto, a natureza e profundidade das coberturas superficiais.

Dentre as 24 nascentes monitoradas, 12 são móveis, sendo apenas três delas em Lagoa Santa e as outras nove na Serra do Cipó. Observando os dados obtidos, verificou-se que as nascentes intermitentes são mais propensas a migrar. Buscando explicar esse fenômeno, avaliou-se a profundidade das coberturas superficiais nesse conjunto de nascentes, podendo concluir que os maiores deslocamentos ocorrem justamente em nascentes com coberturas mais rasas e que, excetuando-se SC04, todas as nascentes com coberturas superficiais de profundidade superior a 50 cm possuem deslocamentos significativamente menores (inferior a 10 m). Além disso, diferentemente do que se esperava, a mobilidade das nascentes não necessariamente promove mudanças na morfologia e no tipo de exfiltração. Contudo, a recíproca parece ser verdadeira, uma vez que praticamente todas as nascentes que apresentaram mudanças sazonais em sua morfologia ou em seu tipo de exfiltração eram móveis.

Ficou evidenciado que alterações sazonais nos aspectos geomorfológicos locais, como a mobilidade da exfiltração e a mudança na morfologia ou no tipo de exfiltração, estão diretamente relacionadas ao comportamento hidrológico das nascentes. Assim, as características hidrogeomorfológicas locais das nascentes apresentaram íntima relação entre

si e indicaram um forte condicionamento espacial. Essa conclusão colocou ainda mais em evidência a importância das coberturas superficiais na manutenção dos processos hidrogeomorfológicos ao longo do ano. As nascentes menos estáveis ao longo do ano, com grandes variações de vazão, migração e morfologia, estavam localizadas em áreas com coberturas superficiais rasas.

Assim, grande parte das explicações relacionadas à dinâmica hidrogeomorfológica passa pela espessura e natureza das coberturas superficiais. Estudos futuros verticalizados que foquem a questão sobre como esse aquífero granular afeta o comportamento das nascentes são necessários para ampliar essa discussão. Porém, parece correto afirmar que coberturas superficiais com maior capacidade de armazenamento de água, permitem uma maior constância dos processos hidrogeomorfológicos das nascentes, mesmo em climas de dupla estacionalidade.

Complementando as interpretações hidrológicas, as análises hidrogeoquímicas foram essenciais para a compreensão da gênese e da dinâmica das nascentes. Os resultados obtidos para o TDS da água das nascentes apontaram uma grande variabilidade. A média anual de solutos alcançou mais de 200 mg/L em algumas nascentes, enquanto, em outras, não ultrapassou 10 mg/L. Comparativamente, esses resultados foram ligeiramente superiores aos encontrados na literatura para águas superficiais dos mesmos compartimentos, denotando a importância da água subterrânea nas nascentes. Foi possível associar os valores de TDS com os aquíferos de origem das nascentes, uma vez que estando em contato com rochas mais friáveis por maior tempo, a água possui maior capacidade de se enriquecer de solutos. Com isso, diferenciou-se com muita clareza as nascentes de aquíferos carbonáticos (elevado TDS) daquelas de coberturas siliciclásticas (baixo TDS).

Também se pôde perceber que as nascentes são importantes veículos de desnudação geoquímica. A associação da carga química dissolvida com a vazão das nascentes permite interpretar a quantidade de material retirado a partir das nascentes em um intervalo de tempo. Apesar das baixas vazões quando comparadas aos cursos fluviais de maior ordem, o grau de mineralização de suas águas tende a ser maior. Isso implica em taxas de perda geoquímica relativamente altas: as nascentes apresentaram perda da ordem de 10 kg/y, para os casos menos expressivos, até um máximo de 45 T/y. Esses valores suscitam questionamentos quanto ao papel das nascentes na evolução do relevo regional a partir da desnudação geoquímica, porém, já apontam para uma conjuntura de fatores os quais envolvem a formação geológica do aquífero e o tempo de residência da água (que controlam o TDS) e seu potencial

hidrodinâmico e a hidrogeomorfologia da sua bacia de contribuição (que controlam sua vazão).

A assinatura geoquímica das águas confirmou os apontamentos da literatura sobre os íons majoritários: 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. Essa diferenciação foi realizada pelos diagramas de Stiff e Schoeller, que clarificaram os agrupamentos de águas com assinaturas geoquímicas semelhantes. 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.

A condutividade elétrica (EC) das águas também foi utilizada para interpretar o grau de mineralização das águas e a associação entre as águas subterrâneas e meteóricas. Evidentemente, as águas dos sistemas aquíferos sob influência das rochas carbonáticas, apresentaram EC mais elevada. Por outro lado, aquelas que apresentaram elevada variação da EC ao longo do ano foram as com maior influência da água meteórica. De um modo geral, as nascentes da Serra do Cipó foram as que apresentaram, além de menores EC, maior variação percentual de EC, o que implica em maior taxa de mistura com a água meteórica. Portanto, os resultados de EC corroboraram os resultados obtidos pelas análises hidrológicas quanto à influência da precipitação nas nascentes.

A datação da água a partir da mensuração das concentrações de trítio colaborou para ampliar as conclusões sobre a gênese hidrogeológica das nascentes. Concordando com os dados hidrológicos, a maioria das nascentes apresentou água moderna (seis em oito no período seco e 16 em 24 no período seco). Entretanto, apesar da influência da água meteórica, que tende a reduzir a concentração de trítio e a idade aparente, as datações não apresentaram resultados inferiores a 12 anos. Isso mostra que apesar da correlação das vazões com a

precipitação dentro de um ano hidrológico, a água meteórica, ao infiltrar, coloca em movimento águas retidas no aquífero. Por isso, a idade aparente calculada é representativa da média da mistura de águas meteóricas extremamente recentes com águas mais antigas que podem estar retidas no aquífero por décadas.

A maioria das nascentes apresentou comportamento sazonal do trítio esperado, com a diminuição da idade aparente entre as amostragens realizadas no período seco (setembro/2011) e úmido (março/2012). Isso se deve a maior participação da água meteórica, mais recente. Porém, em três nascentes, a contribuição da água das chuvas diminuiu a concentração de trítio e, simultaneamente, aumentou sua idade aparente. A complexidade da mistura das águas meteóricas e subterrâneas que exfiltram nas nascentes pode ser a chave para compreender esses casos.

Todavia, deve-se salientar que o modelo de mistura homogênea, utilizado para calcular a idade aparente das águas a partir da concentração de trítio residual nas nascentes, está chegando ao seu limite. Os valores modelados da concentração residual de trítio para as chuvas atuais e do período imediatamente anterior aos testes atômicos (décadas de 1950 e 1960) estão muito próximos. Isso implica que muito em breve, ele não mais será útil para tais estudos, sendo necessárias novas formulações matemáticas que permitam explorar o decaimento radioativo do trítio nas águas subterrâneas. A ponderação pelo seu isótopo filho (He^3) pode solucionar esse problema.

Ao final, avaliando as heranças hidrogeomorfológicas das nascentes, foram idealizados cinco principais modelos teóricos de gênese das nascentes: erosão linear (em sulco); condutos cársticos; *piping/sapping*; *seepage erosion*; cavitação. Partindo da necessidade de contato da superfície topográfica com a superfície potenciométrica, eles priorizam processos geomorfológicos de retirada de material. A combinação multiescalar de elementos regionais e locais definirá o modelo evolutivo de uma determinada nascente. Assim, áreas com maior declividade terão mais condições de abrigar nascentes criadas pelos processos de erosão linear ou cavitação; por outro lado, áreas cársticas tendem a formar nascentes pela dissolução de condutos subterrâneos. Porém, aspectos locais podem fazer com que uma nascente surja a partir de processos que não são os mais característicos de seu contexto ambiental, podendo ocorrer, por exemplo, nascentes originadas por *piping* em áreas mais propícias à erosão linear. Independentemente do processo predominante ou do modelo teórico de gênese, as nascentes efetivamente nascem quando esses processos promovem retirada de material suficiente para promover o contato da superfície freática com a topográfica.

Todavia, esses modelos podem não ocorrer de forma isolada, havendo claras intercessões entre eles. Assim, uma nascente pode iniciar sua formação a partir de um processo e, posteriormente, evoluir em outra direção. Contudo, as ideias propostas de origem das nascentes dialogam com as teorias mais aceitas da geomorfologia de formação de canais, seja por processos superficiais ou subterrâneos.

Portanto, este trabalho coloca uma nova luz sobre as nascentes, a partir de sua interpretação sob um viés geomorfológico, evidenciando, além da água que exfiltra, seu subsistema morfológico. Por fim, reitera-se a importância de desvendar os mistérios das nascentes, elementos tão caros ao equilíbrio ambiental e ainda pouco conhecidos pelas ciências.

REFERÊNCIAS

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.

ALLABY, A.; ALLABY, M. **The concise Oxford Dictionary of earth sciences**. Oxford: Oxford University, 1991.

ALMEIDA-ABREU, P. A.; RENGER, 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.

ALVARENGA, A. P.; BOTELHO, S. A.; PEREIRA, I. M. Avaliação da regeneração natural na recomposição de matas ciliares em nascentes na região sul de Minas Gerais. **Cerne**, v. 12, n. 4, p. 360-372, 2006.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION; EATON, Andrew D.; FRANSON, Mary Ann H. **Standard methods for the examination of water & wastewater**. Centennial ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 21 ed., 2005.

ATEKWANA, E. A.; ATEKWANA, E. A.; ROWE, R. S.; WERKWMA JR, D. D.; LEGALL, F. D. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. **Journal of Applied Geophysics**, v. 56, n. 4, p. 281-294, nov 2004.

AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Piping em Área de Voçorocamento, Noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, p. 9-18, 2006.

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.

BABAR, M. **Hydrogeomorphology: Fundamentals, Applications and Techniques.** New Delhi: Publisher, 2005.

BEDMAR, A. P. **Isotopos em Hidrologia.** Madrid: Editorial Alhambra, 1972.

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.

BERTACHINI, A. C. **Monitoramento das nascentes do Parque das Mangabeiras.** [Não publicado]. [s.d.].

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. **R. RAÍE GA,** Curitiba, n. 8, Editora UFPR: 2004. p. 141-152.

BRASIL. **Código Florestal. Lei 12.651,** de 25 de maio de 2012.

BRASIL. **Código Florestal. Lei 4.771,** de 15 de setembro de 1965.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 303,** de 20 de março de 2002. Ministério do Meio Ambiente, 2002.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357,** de 17 de março de 2005. Ministério do Meio Ambiente, 2005.

BRIDGE, J. S. **Rivers and floodplains: forms, processes and sedimentary record.** Osney Mead Oxford: Blackwell Science Ltd., 2003.

CARDOSO, N.; MORAES, J. S. Restauração de nascentes. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004. Florianópolis, SC. **Anais do...** Florianópolis: ABAS, 2004.

CARVALHO, D. F.; FARIA, R. A.; SOUSA, S. A. V.; BORGES, H. Q. Espacialização do período de veranico para diferentes níveis de perda de produção na cultura do milho, na bacia do rio Verde Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 172-176, 2000.

CERQUEIRA, C. A. **Tipologia e características dos estabelecimentos escolares brasileiros**. Tese (doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

CHARLTON, R. **Fundamentals of fluvial geomorphology**. London: Routledge, 2008.

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, p. 118-127, 2012.

CHORLEY, R. J. **Spatial analysis in geomorphology**. London: Methuen, 1972.

CHORLEY, R. J.; SUGDEN, D. E.; SCHUMM, S. A. **Geomorphology**. London; New York, 1985.

CHORLEY, R.J. The Hillslope Hydrological Cycle. In: KIRKBY, M.J. (ed.) **Hillslope Hydrology**. 3rd ed. John Wiley & sons, 1980. p. 1-42.

CHRISTENSON, S., PARKHUSRT, D., HUNT, A., ATHAY, D. Age-dating groundwater beneath Tinker Air Force Base, Midwest City, Oklahoma, 2003-04. **US Geological Survey**. Fact Sheet 2005-3099. Jan. 2006.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: E. Blucher; Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 1981.

CLARK, I.; FRITZ, P. **Environmental isotopes in hydrogeology**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997.

CLARKE, F. W. Mineral wells and springs. **The data of geochemistry**. US Geological Survey, Reston, VA, p. 181-217, 1924.

CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. [s.l.]: Princeton Groundwater; Clean Environment Brasil; ABRH, 1989.

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.; MOREAU, A.; MOREAU, M. Estabilidade da sílica biogênica extraída de Capim Jaraguá (*hyparrhenia rufa*) em solução de NaOH. **Química Nova**, v. 33, n. 8, p. 1658-1663, 2010.

COSTA, L.; SANTOS, R.; SCHAEFER, C.; MOREAU, A.; MOREAU, M. Ocorrência de corpos silicosos em horizontes superficiais de solos de diferentes ecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.871-879, 2010.

CPRM. **Mapa geológico do Brasil ao Milionésimo**. Rio de Janeiro: CPRM, 2004.

CRUZ, S. C. P.; ALKIMIM, F. F. The tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí Belt, São Francisco craton region, Eastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 1, p. 151-173, 2006.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterrânea**. V. 2. Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1976.

DAVIS, S. N. **Hydrogeology**. New York: 1966.

DE BLIJ, H. J.; MULLER, P. O.; WILLIAMS, R. S. **Physical geography: the global environment**. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 2004.

DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; RENEAU, S. L. Hollows, colluvium, and landslides in soil-mantled landscapes. In: ABRAHAM, A. D. (ed.) **Hillslope Processes**. London: Allen and Unwin, 1986. p. 361-388.

DONOVAN, D. J.; KISTINGER, G. M.; ACHEAMPONG, S. Y. Characterization of springs in Eastern Nevada. In: NWRA Annual Conference. **Annals of...** February, 2007

DRUMOND, L. N.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização hidrossedimentológica e dos processos evolutivos de voçoroca em área de rochas gnáissicas do alto rio das Velhas (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 7, nº 2, p. 87-96, 2006.

DULINSKI, M.; ROZANSKI, K.; KANIA, J.; KARLIKOWSKA, J.; KORCZYNSKI-JACKOWICZ, M.; WITCZAK, S. MOCHALSKI, P.; OPOKA, M.; SLIWAKA, I.; ZUBER, A. Groundwater dating with sulfur hexafluoride: methodology and field comparisons with tritium and hydrodynamic methods. In: Isotope Hydrology and Integrated Water Resources Management (International Symposium). Viena, 19-23 may, 2003. **Annals of...** Viena: International Atomic Energy Agency, 2003. p. 48-49.

DUNNE, T. Formation and controls of channel networks. **Prog. Phys. Geogr.**, v. 4, p. 211-239, 1980.

DUSSIN, I. A.; DUSSIN, T. M. Supergrupo Espinhaço: modelo de evolução geodinâmica. **Geonomos**, v. 3, n. 1, p. 19-26, 1995.

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.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Mapa solos do estado de Minas Gerais** (base digital). Escala original 1:1.000.000. FEAM, s.d.

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.; 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, M. F.; MAGALHAES JR., A. P.; GARCIA, R. Tipologia e classificação das zonas preferenciais de recarga de aquíferos em Belo Horizonte-MG: aplicação do método grade of membership (GoM). **Boletim de Geografia (Online)**, Maringá, v. 31, p. 101-114, 2013.

FELIPPE, M. F.; MAGALHAES JR., A. P.; GARCIA, R. Utilização do método grade of membership (GoM) na classificação da eficiência ambiental de zonas de recarga de aquíferos em Belo Horizonte-MG. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande - MS. **Anais do....** Campo Grande: ABRH, 2009.

FELIPPE, M. F.; MAGALHAES JR.; A. P.; LAVARINI, C.; PEIFER, D.; DOLABELA, D. Espacialização e Caracterização das Nascentes em Unidades de Conservação de Belo Horizonte-MG. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande - MS. **Anais do....** Campo Grande - MS: ABRH, 2009.

FERNANDEZ, S.; MARQUINEZ, J.; MENENDEZ-DUARTE, R. A sapping erosion susceptibility model for the southern Cantabrian Range, North Spain. **Geomorphology**, v.95, p.145–157, 2008.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

GARCIA, R. A; SOARES-FILHO, B.; SAWYER, D. O. Dimensões sócio-econômicas e movimentos populacionais: uma regionalização da Amazônia brasileira. In: Encontro Nacional de Estudos Populacionais, XIV, 2004, Caxambu. **Anais...** Caxambu: ABEP, 2004.

GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M.; SANTOS, I. Hidrogeomorfologia: princípios, conceitos, processos e aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, p. 103-111, 2012.

GOUDIE, A. **Encyclopedia of geomorphology**. London; New York: Routledge: International Association of Geomorphologists, 2004.

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.

GUERRA, A. T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. 8ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.

GURGEL, E. A. Determinação dos sólidos e cátions totais dissolvidos a partir da condutividade elétrica em água subterrânea. 2º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Salvador-BA. **Anais do...** Salvador: ABAS, set, 1982.

HAHM, D.; KIM, K. Observation of bottom water renewal and export production in Japan Basin, East Sea, using tritium and helium isotopes. **Ocean Science Journal**. v. 43, n.1. 2008. p. 39-48.

HILL, M. E.; MARTIN, A.; STEWART, M. T. Performance Evaluation of the MODFLOW-2005 Conduit Flow Process Applied to a Karst Aquifer Underlying West-Central Florida. **U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings**, Bowling Green, Kentucky, May 27-29, 2008.

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.

HINKLE, S. R. **Tritium/Helium-3 Apparent Ages of Shallow Ground Water**. Portland Basin, Oregon, 1997-98.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, mar 1945.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de climas do Brasil**. Escala 1:5.000.000. IBGE, 2002.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de unidades de relevo do Brasil**. Escala 1:5.000.000. IBGE, 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de vegetação do Brasil**. Escala 1:5.000.000. IBGE, 2004.

IEF– INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. **Mapa das coberturas vegetais do estado de Minas Gerais** (base digital). Escala original 1:1.000.000. IEF, 2009.

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.

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.

JONES, J. A. A. Soil piping and its hydrogeomorphic function. **Cuaternario y geomorfología**, v.8 (3-4), p. 77-102, 1994.

JONES, J. A. A. Soil Piping and Stream Channel Initiation. **Water Resources Research**, v.7 (3), p. 602-610, 1981.

KING, L. C. A geomorfologia do Brasil oriental. **Revista Brasileira de Geografia**, n. 18, p. 147-265, 1956.

KNIGHTON, D. **Fluvial forms and processes**. London: 1984.

KOHLER, H. C. A escala na análise geomorfológica. **R. B. Geomorfologia**, ano 3, n. 1, p. 21-31, 2002.

- LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2011.
- LUO, W. Quantifying groundwater-sapping landforms with a hypsometric technique. **Journal of geophysical research**, v.105, n.E1, p.1685-1694, January, 2000.
- MAGALHÃES JR, A. P.; MATOS, R. E. S.; FELIPPE, M. F.; UMBELINO, G. Domínios hidrogeológicos como critério de identificação de territorialidades-chaves na bacia do rio São Francisco. **Revista Geografias**, v. 3, n. 1, p. 24-45, 2007.
- MANTON, K., WOODBURY, M., TOLLEY, D. Statistical applications using fuzzy sets. [s.l.]: Wiley, 1994.
- MEINZER, O.E. Large springs in the United States. **U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 557**. Washington D.C. 1927.
- MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas I: conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 2, n.1, p. 59-81, 1997.
- MENEZES, M. D.; JUNQUEIRA-JÚNIOR, J. A.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha – Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 82, p. 175-184, jun. 2009.
- MICHAELLIS. **Moderno dicionário da Língua Portuguesa**. São Paulo: Ed. Melhoramentos, 2008.
- MOLINARI, D. C. **Dinâmica erosiva em cicatrizes de movimentos de massa – Presidente Figueiredo (Amazonas)**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Source areas, drainage density, and channel initiation. **Water Resources Research**, v. 25, n. 8, p. 1907-1918, ago, 1989.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Where do channels begin? **Nature**, v. 336, n. 6196, p. 232-234, nov 1988.

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

MORAN, J. E.; HUDSON, G. B.; LEIF, R.; EATON, G. F. Assessing aquifer contamination vulnerability using tritium-helium ages in public drinking water wells in California, United States of America. In: *Isotope Hydrology and Integrated Water Resources Management (International Symposium)*. Viena, 19-23 may, 2003. **Annals of...** Viena: International Atomic Energy Agency. p. 46-47, 2003.

MORAN, J., BRYANT-HUDSON, G., CEY, B. D., SINGLETON, M. Lessons learned from two thousand Tritium-Helium groundwater ages in California USA. 4th Mini Conference on Noble Gases in the Hydrosphere and in Natural Gas Reservoirs. Potsdam, Germany. **Proceedings of...** Potsdam, Germany. p. 12-13. 2007.

MOURÃO, M. A. A. Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese (doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

NASCIMENTO, F. R.; SAMPAIO, J. L. F. Geografia física, geossistemas e estudos integrados da paisagem. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, Sobral. V. 6/7, n. 1, p. 167-179, 2004/2005.

ONDA, Y. Seepage erosion and its implication to the formation of amphitheatre valley heads: A case study at Obara, Japan. **Earth Surface Processes and Landforms**. Volume 19, Issue 7, pages 627–640, November 1994.

PANE, Edgar; PEREIRA, Sueli Y. As fontes em Itamonte, sul de Minas Gerais – uma contribuição para o entendimento das relações entre água superficial e subterrânea. **Águas subterrâneas**. v. 19. n. 1, p. 1-14, 2005.

PEREZ-FILHO, A.; QUARESMA, C. C. Ação antrópica sobre as escalas temporais dos fenômenos geomorfológicos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 3, p. 83-90, 2011.

PERRAULT, P. **On the Origin of Springs**. Hafner: Nova Iorque, 1967 (original de 1694).

PIÉGAY, H.; SCHUMM, S. A. System Approaches in Fluvial Geomorphology. In: KONDOLF, G. M.; PIÉGAY, H. **Tools in Fluvial Geomorphology**. John Willey & Sons: Chichester, 2007. p. 105-134.

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.

PINTO, L. V. A.; BOTELHO, S. A.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; DAVIDE, A. C. Estudo da vegetação como subsídios para propostas de recuperação das nascentes da bacia hidrográfica do ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 775-793, 2005.

PINTO, N. L. S. **Hidrologia básica**. São Paulo: E. Blucher, 1986

PRIBERAM. **Dicionário Priberam da Língua Portuguesa**. Portugal: Priberam Informática, S.A., 2009. Disponível em <<http://www.priberam.pt/dlpo/>>. Acesso em: 28 jul. 2009.

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.

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.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia FFLCH-USP**, n.6, p.17-29, 1992.

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**, Ano 4, Nº 2, p. 31-40, 2003.

SAMPAIO, S. C.; SILVESTRO, M. G.; FRIGO, E. P.; BORGES, C. M. Relação entre série de sólidos e condutividade elétrica em diferentes águas residuárias. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 557-562, out-dez, 2007.

SANTOS, I. M.; ZEILHOFER, P. Modelagem Hidrológica Integrada em Sistemas de Informação Geográfica. **Geodésia Online**, Florianópolis, v. 4, p. 1-16, 2005

SANTOS, L.; BACCARO, C. A. D. Caracterização geomorfológica da bacia do rio Tijuco. **Caminhos de Geografia**, v.1, n.11, p. 1-21, 2004.

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.

SCANLON, T. M.; RAFFENSPERGER, J. P.; HORNBERGER, G. M.; CLAP, R. B. Shallow subsurface storm flow in a forested headwater catchment: observations and modeling using a modified topmodel. **Water Resources Research**, v. 36, n. 9, p. 2575-2586, set 2000.

SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. Caldwell, N.J.: Blackburn Press, 2003.

SHAPIRO, S. D.; ROWE, G.; SCHLOSSER, P.; LUDIN, A.; STUTE, M. Tritium–Helium 3 Dating Under Complex Conditions in Hydraulically Stressed Areas of a Buried-Valley Aquifer, **Water resources research**, 34(5), 1165–1180, 1998.

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.

SIDLE, R. C.; ONDA, Y. **Hydrogeomorphology: overview of an emerging science**. *Hydrological Processes*, v. 18, p. 597-602, 2004.

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.

SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: UFRGS, 2002. p. 335-389.

SOUZA, A. H.; CARMO, L. G.; FELIPPE, M. F. Compartimentação morfológica do parque nacional da Serra do Cipó-MG a partir de técnicas de geoprocessamento e interpretação de perfis topográficos. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2011, Dourados. **Anais do....** Dourados-MS: LGF-UFGD, 2011.

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

STEVENS, L. E.; MERETSKY, V. J. **Aridlands springs in North America: ecology and conservation**. University of Arizona Press, Tucson, 2008.

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

STRAHLER, A.; STRAHLER, A. **Modern Physical Geography**. 4ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1992.

STUTE, M., DEAK, J., REVESZ, K., BOHLKE, J. K., DESEO, E., WEPPERLIG, R., SCHLOSSER, P. Tritium/³He dating of river infiltration: an example from the Danube in the Szigetkoz area, Hungary. **Ground Water**, v. 35, n. 5, p. 905-911. sep-oct, 1997.

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

SZABO, Z.; RICE, D. E.; PLUMMER L. N.; BUSENBERG, E.; DRENKARD, S.; SCHLOSSER, P. Age Dating of Shallow Groundwater with Chlorofluorocarbons, Tritium/Helium 3, and Flow Path Analysis, Southern New Jersey Coastal Plain. **Water resources research**, 32(4), 1023–1038, 1996.

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

TODD, D. K.; MAYS, L. W. **Groundwater hydrology**. John Willey & Sons, 2005.

TODD, David K. **Hidrologia de águas subterrâneas**. São Paulo: E. Blucher, 1959.

TROMPETTE, R.; UHLEIN, A.; DA SILVA, M. E.; KARMANN, I. The brasiliano São Francisco craton revisited (central Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 6, n. 1/2, p. 49-57, 1992.

ULHEIN, A.; TROMPETTE, R.; EGYDIO-SILVA, M. Riftingamentos 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.

VALENTE, O. F.; GOMES, M. A. **Conservação de nascentes: hidrologia e manejo de bacias hidrográficas de cabeceiras**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2005.

VAN DER KAMP, G. The hydrogeology of springs in relation to the biodiversity of spring fauna: a review. **Journal of the Kansas Entomological Society**, v. 68, n. 2, p. 4-17, 1995.

VARLAM, C.; LAZAR, R.; STEFANESCU, I.; STEFLEA, D. Study of tritium concentration in environmental water samples measured by two standard methods. In: Isotope Hydrology and Integrated Water Resources Management (International Symposium). Viena, 19-23 may, 2003. International Atomic Energy Agency. **Annals of...** Viena: International Atomic Energy Agency. p. 475-476. 2003.

VITTE, A. C. A construção da geomorfologia brasileira: as transformações paradigmáticas e o estudo do relevo. **Geografia: Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 12, n.2, p. 36-45, 2008.

WALTON, N. R. G. Electrical conductivity and total dissolved solids - what is their precise relationship? **Desalination**, v. 12, p. 275-292, 1989.

WARD, A.; TRIMBLE, S. **Environmental hydrology**. 2^a ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 2004.

WARD, D. M.; FERRIS, M. J.; NOLD, S. C.; BATESON, M. M. A natural view of microbial biodiversity within hot spring cyanobacterial mat communities. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 62, n. 4, p. 1353-1370, 1998.

WHITING, P. J.; STAMM, John The hydrology and form of spring-dominated channels **Geomorphology**, Volume 12, Issue 3, June 1995, Pages 233-240.

WIKIPÉDIA – **a encyclopédia livre**. <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Nascente>> acesso em 15 de agosto de 2009.

WILLIAMS, R. B. G. **Introduction to statistics for geographers and earth scientists**. London: [s.n.], 1984.

YEHDEGHO, B.; REICHL, P. Recharge areas and hydrochemistry of carbonate springs issuing from Semmering Massif, Austria, based on long-term oxygen-18 and hydrochemical data evidence. **Hydrogeology Journal**, v.10, p.628–642, 2002.

ZIMNOCH, M.; ROZANSKI, K.; CHMURA, W.; MIKOLAJCZAK, M. Dynamics of water transport through catchment of the Danube river traced by environmental ³H and ¹⁸O – the neural networks approach. In: Isotope Hydrology and Integrated Water Resources Management (International Symposium). Viena, 19-23 may, 2003. **Annals of...** Viena: International Atomic Energy Agency. p. 67-68. 2003.

ZUBER, A., ROZANSKI, K. Groundwater dating with the AID of tracers: strategies, pitfalls and open problems. 4th Mini Conference on Noble Gases in the Hydrosphere and in Natural Gas Reservoirs, Potsdam, Germany. **Proceedings of...** Potsdam. p. 17-18. 2007.

APÊNDICE A

QUADRO GERAL DE CARACTERIZAÇÃO DAS NASCENTES IDENTIFICADAS

Nascente	DADOS SECUNDÁRIOS			DADOS DE CAMPO									
	Ud Relevo (IBGE, 2006)	Ud Geológica (CPRM, 2004)	Tipo Solo (FEAM, s.d.)	Altitude	Morfologia	Exfiltração	Relevo	Contatos	Afloramento	Prof. Manto Intemp.(cm)	Antropogenia	Vazão (L/s)	Data
LS01	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	722	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Sim	--	22/08/2010 10:14
LS02	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	753	Concavidade	Difusa	Calha	Solo/Rocha	Não	5	Não	0,007	26/01/2011 09:47
LS03	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	766	Concavidade	Difusa	Calha	Solo/Rocha	Na nascente	18	Não	--	26/01/2011 10:50
LS04	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	727	Concavidade	Múltipla	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	--	26/01/2011 10:52
LS05	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	761	Canal	Pontual	Calha	Rocha	Não	19	Não	0,032	26/01/2011 13:48
LS06	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	760	Canal	Pontual	Calha	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,062	26/01/2011 14:20
LS07	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	733	Canal	Difusa	Calha	Rocha	Não	20	Não	--	26/01/2011 14:56
LS08	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	770	Afloramento	Difusa	Calha	Rocha	Na nascente	< 5	Não	--	26/01/2011 15:18
LS09	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	838	Afloramento	Múltipla	Calha	Rocha	Na nascente	< 5	Não	--	03/02/2011 11:20
LS10	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	859	Afloramento	Múltipla	Calha	Estratificação	Na nascente	< 5	Não	--	03/02/2011 11:30
LS11	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	839	Afloramento	Múltipla	Calha	Estratificação	Na nascente	< 5	Não	--	03/02/2011 11:41
LS12	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	855	Canal	Difusa	Calha	Rocha	Na nascente	35	Não	0,018	03/02/2011 12:33
LS13	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	800	Canal	Pontual	Calha	Rocha	Na nascente	15	Não	0,026	12/02/2011 09:20
LS14	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	829	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Montante	> 50	Não	0,010	12/02/2011 09:39
LS15	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	810	Canal	Difusa	Calha	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,036	12/02/2011 10:34
PV01	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	767	Afloramento	Múltipla	Cabeceira	Estratificação	Na nascente	< 5	Não	0,028	14/08/2010 10:49
PV02	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	720	Afloramento	Múltipla	Cabeceira	Estratificação	Na nascente	< 5	Não	0,018	14/08/2010 15:48
PV03	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2spl	Argissolo	710	Cavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	3,550	14/08/2010 12:31
PV04	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	823	Duto	Pontual	Média-vertente	Calha	Não	> 50	Não	0,072	11/01/2011 10:28
PV05	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2spl	Argissolo	736	Duto	Pontual	Calha	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,032	11/01/2011 11:37
PV06	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2spl	Argissolo	681	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Sim	--	11/01/2011 13:53
PV07	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	709	Duto	Múltipla	Calha	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,062	11/01/2011 14:41
PV08	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	723	Canal	Difusa	Calha	Rocha	Na nascente	< 5	Não	--	11/01/2011 15:03
PV09	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	753	Canal	Múltipla	Calha	Hz B/Hz C	Não	> 50	Não	--	13/01/2011 10:34
PV10	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	752	Afloramento	Pontual	Cabeceira	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,051	13/01/2011 12:23
PV11	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	741	Afloramento	Múltipla	Cabeceira	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,026	18/01/2011 11:45
PV12	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	731	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	--	18/01/2011 13:13
PV13	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2sh	Argissolo	707	Afloramento	Difusa	Calha	Rocha	Na nascente	< 5	Não	--	18/01/2011 13:32
PV14	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2spl	Argissolo	697	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	0,002	20/01/2011 13:30
PV15	Depressão do Alto-Médio São Francisco	NP2spl	Argissolo	676	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	--	20/01/2011 12:01

Nascente	DADOS SECUNDÁRIOS			DADOS DE CAMPO									
	Ud Relevô (IBGE, 2006)	Ud Geológica (CPRM, 2004)	Tipo Solo (FEAM, s.d.)	Altitude	Morfologia	Exfiltração	Relevo	Contatos	Afloramento	Prof. Manto Intemp.(cm)	Antropogenia	Vazão (L/s)	Data
SC02	Serra do Espinhaço Meridional	Q2a	Latossolo	796	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	--	15/02/2011 12:30
SC03	Serra do Espinhaço Meridional	Q2a	Latossolo	807	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	0,288	15/02/2011 13:39
SC04	Serra do Espinhaço Meridional	Q2a	Latossolo	806	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Sim	0,013	15/02/2011 15:41
SC05	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	798	Afloramento	Múltipla	Calha	Solo/Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,038	16/02/2011 09:20
SC06	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	837	Afloramento	Múltipla	Calha	Solo/Rocha	Na nascente	< 5	Não	--	16/02/2011 09:51
SC07	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	920	Canal	Difusa	Topo	Rocha	Na nascente	< 5	Não	--	16/02/2011 10:33
SC08	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	929	Canal	Difusa	Topo	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,004	16/02/2011 11:02
SC09	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	929	Canal	Difusa	Topo	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,022	16/02/2011 11:28
SC10	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	929	Concavidade	Difusa	Topo	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,011	16/02/2011 11:53
SC11	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	938	Afloramento	Múltipla	Topo	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,006	16/02/2011 12:28
SC12	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	926	Concavidade	Pontual	Média-vertente	Solo/Rocha	Montante	17	Não	0,004	16/02/2011 12:47
SC13	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	968	Concavidade	Difusa	Topo	Solo/Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,073	16/02/2011 14:48
SC14	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	936	Canal	Pontual	Média-vertente	Sedimento/Rocha	Não	14	Sim	0,030	16/02/2011 15:28
SC15	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	932	Concavidade	Múltipla	Média-vertente	Não	Na nascente	< 5	Não	--	16/02/2011 15:55
SC16	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	931	Concavidade	Difusa	Média-vertente	Solo/Rocha	Jusante	7	Não	0,052	16/02/2011 16:09
SC17	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	934	Afloramento	Múltipla	Média-vertente	Rocha	Na nascente	< 5	Não	--	16/02/2011 16:11
SC18	Serra do Espinhaço Meridional	NP12mi	Neossolo	837	Concavidade	Difusa	Média-vertente	Rocha	Arredores	< 5	Não	0,010	23/02/2011 12:14
SC19	Serra do Espinhaço Meridional	NP12mi	Neossolo	836	Concavidade	Múltipla	Média-vertente	Solo/Rocha	Montante	< 5	Não	0,019	23/02/2011 12:47
SC20	Serra do Espinhaço Meridional	NP2sl	Latossolo	827	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	--	23/02/2011 15:12
SC21	Serra do Espinhaço Meridional	NP2sl	Latossolo	821	Concavidade	Múltipla	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	0,002	23/02/2011 15:21
SC22	Serra do Espinhaço Meridional	NP2sl	Latossolo	859	Concavidade	Múltipla	Baixa-vertente	Estratificação	Arredores	< 5	Não	0,003	23/02/2011 15:50
SC23	Serra do Espinhaço Meridional	NP2sl	Latossolo	853	Concavidade	Difusa	Cabeceira	Não	Não	> 50	Não	0,084	23/02/2011 16:27
SC24	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	974	Canal	Difusa	Calha	Rocha	Na nascente	< 5	Não	0,082	24/02/2011 10:46
SC25	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	976	Concavidade	Difusa	Calha	Rocha	Na nascente	12	Não	0,013	24/02/2011 11:40
SC26	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	949	Canal	Difusa	Calha	Estratificação	Na nascente	< 5	Não	0,003	24/02/2011 12:34
SC27	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	935	Duto	Múltipla	Calha	Rocha	Na nascente	> 50	Não	0,036	24/02/2011 12:58
SC28	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	974	Afloramento	Difusa	Baixa-vertente	Estratificação	Na nascente	< 5	Não	0,007	24/02/2011 13:37
SC29	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	942	Concavidade	Múltipla	Média-vertente	Não	Não	> 50	Não	0,136	24/02/2011 13:59
SC30	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	942	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	--	24/02/2011 14:30
SC31	Serra do Espinhaço Meridional	NP12miq	Neossolo	941	Concavidade	Difusa	Baixa-vertente	Não	Não	> 50	Não	--	24/02/2011 14:33


```

GOM 3.4 (Aug 92)

INFILE "dr13.dat";

INLAMBDA RANDOM;
INGAMMA RANDOM;

RECORDS 24;

GRADIENT;

INPUT SubjID
MO EX CO VZ RV MI PM AF SZ;

PROFILES = 4;

INTERNAL
MO EX CO VZ RV MI PM AF SZ;

End of control file.

Control file summary

    Control file name : dr13_2.txt
      Case label : SubjID
    Input data file : dr13.dat
  Initial GOM scores : Random
    Fit GOM scores : Gradient
  Initial pure type prob : Random
    Fit Pure Type Prob : Gradient
#internal variables : 9
#external variables : 0
max #records to read : 24
    #profiles : 4

9 internal variables:
MO
EX
CO
VZ
RV
MI
PM
AF
SZ
24 records read from dr13.dat.

23 unique data patterns.
Saved record keys and cell numbers to dr13_2.cel

    MO   1.    3   12.5%
        2.    6   25.0%
        3.    2    8.3%
        4.   10   41.7%
        5.    3   12.5%

    EX   1.   13   54.2%
        2.    5   20.8%
        3.    6   25.0%

    CO   1.   15   62.5%
        2.    9   37.5%

    VZ   1.    4   16.7%
        2.   13   54.2%
        3.    5   20.8%
        4.    2    8.3%

    RV   1.    9   37.5%
        2.    3   12.5%
        3.    2    8.3%
        4.   10   41.7%

    MI   1.   10   41.7%
        2.   14   58.3%

    PM   1.   12   50.0%
        2.    4   16.7%
        3.    8   33.3%

    AF   1.   15   62.5%
        2.    9   37.5%

    SZ   1.   14   58.3%
        2.   10   41.7%

```

```

Allocating LAMBDA gradient structures.
maxlevels=5

Pure type probabilities
-----

      K =      1      2      3      4
MO      1      0.1528  0.2044  0.4207  0.2383
        2      0.3506  0.1912  0.0905  0.3168
        3      0.2211  0.0914  0.0815  0.1133
        4      0.1200  0.3653  0.3069  0.1431
        5      0.1556  0.1477  0.1004  0.1885

EX      1      0.3764  0.5153  0.3921  0.0615
        2      0.0484  0.1649  0.1878  0.2050
        3      0.5752  0.3197  0.4200  0.7335

CO      1      0.6152  0.7475  0.9824  0.9497
        2      0.3848  0.2525  0.0176  0.0503

VZ      1      0.1339  0.3708  0.3645  0.3247
        2      0.0494  0.4392  0.2795  0.3455
        3      0.2698  0.0595  0.2716  0.0616
        4      0.5468  0.1305  0.0844  0.2681

RV      1      0.1998  0.0819  0.2767  0.2323
        2      0.2791  0.0208  0.3969  0.3839
        3      0.3299  0.5117  0.1491  0.1030
        4      0.1911  0.3856  0.1773  0.2808

MI      1      0.4797  0.0679  0.2914  0.8710
        2      0.5203  0.9321  0.7086  0.1290

PM      1      0.1519  0.4783  0.3564  0.3506
        2      0.5913  0.4325  0.1892  0.4891
        3      0.2569  0.0892  0.4544  0.1603

AF      1      0.6343  0.4612  0.3471  0.4588
        2      0.3657  0.5388  0.6529  0.5412

SZ      1      0.8471  0.4816  0.3538  0.5629
        2      0.1529  0.5184  0.6462  0.4371

Algorithm for GOM scores is Gradient.
Algorithm for pure type probabilities is Gradient.

Initial log-likelihood is -231.2618 .

      fit_G_1      0.002      -192.55843      0.1673574

      fit_P_1      0.000      -145.26091      0.2456268
      fit_P_1      0.001      -133.60086      0.0802697
      fit_P_1      0.002      -123.51979      0.0754566
      fit_P_1      0.003      -122.45911      0.0085871
      fit_P_1      0.004      -121.53516      0.0075450
      fit_P_1      0.005      -121.40030      0.0011097
      fit_P_1      0.006      -121.22673      0.0014297
      fit_P_1      0.007      -121.13741      0.0007369
      fit_P_1      0.008      -121.10204      0.0002920
      fit_P_1      0.009      -121.08035      0.0001791
      fit_P_1      0.010      -121.06200      0.0001516
      fit_P_1      0.011      -121.05410      0.0000652
      fit_P_1      0.012      -121.05038      0.0000307
      fit_P_1      0.013      -121.05017      0.0000018

      fit_G_1      1.001      -111.73853      0.0769239

      fit_P_1      1.000      -105.72332      0.0538329
      fit_P_1      1.001      -105.11200      0.0057823
      fit_P_1      1.002      -104.86024      0.0023952
      fit_P_1      1.003      -104.79550      0.0006174
      fit_P_1      1.004      -104.77505      0.0001952
      fit_P_1      1.005      -104.77504      0.0000000

```

Arquivo de saída do GoM – calculado sobre a matriz de entrada (parte 2/4)

fit_G_1	2.001	-99.67411	0.0486846
fit_P_1	2.000	-97.97188	0.0170780
fit_P_1	2.001	-97.20176	0.0078606
fit_P_1	2.002	-97.14642	0.0005694
fit_P_1	2.003	-97.04609	0.0010327
fit_P_1	2.004	-97.04045	0.0000581
fit_P_1	2.005	-97.04045	0.0000000
fit_G_1	3.001	-95.13200	0.0196665
fit_P_1	3.000	-94.51948	0.0064387
fit_P_1	3.001	-94.43272	0.0009180
fit_P_1	3.002	-94.42512	0.0000804
fit_P_1	3.003	-94.42303	0.0000221
fit_P_1	3.004	-94.42207	0.0000101
fit_P_1	3.005	-94.42207	0.0000000
fit_G_1	4.000	-94.04823	0.0039593
fit_P_1	4.000	-93.96207	0.0009161
fit_P_1	4.001	-93.92294	0.0004165
fit_P_1	4.002	-93.91967	0.0000348
fit_P_1	4.003	-93.91845	0.0000130
fit_P_1	4.004	-93.91808	0.0000039
fit_G_1	5.000	-93.79774	0.0012814
fit_P_1	5.000	-93.75629	0.0004420
fit_P_1	5.001	-93.75134	0.0000527
fit_P_1	5.002	-93.74964	0.0000182
fit_P_1	5.003	-93.74948	0.0000017
fit_G_1	6.000	-93.74154	0.0000847
fit_P_1	6.000	-93.74010	0.0000154
fit_P_1	6.001	-93.73989	0.0000022
fit_G_1	7.000	-93.73872	0.0000125
fit_P_1	7.000	-93.73775	0.0000104
fit_P_1	7.001	-93.73771	0.0000004
fit_G_1	8.000	-93.73679	0.0000098
fit_P_1	8.000	-93.73613	0.0000070
fit_G_1	9.000	-93.73545	0.0000072
fit_P_1	9.000	-93.73502	0.0000046
fit_G_1	10.000	-93.73434	0.0000072
fit_P_1	10.000	-93.73405	0.0000030
fit_G_1	11.000	-93.73386	0.0000020
fit_P_1	11.000	-93.73360	0.0000028

Arquivo de saída do GoM – calculado sobre a matriz de entrada (parte 3/4)

```

Final log-likelihood is -93.7336 .

Gom3 consumed 0 minutes for this problem.
Saved GOM scores and original data to dr13_2.gam
Saved pure type probabilities to dr13_2.lam

Pure type probabilities
-----

```

	K =	1	2	3	4
MO	1	0.0000	0.1074	0.0000	0.3065
	2	0.0000	0.4670	0.0000	0.2281
	3	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	4	0.0000	0.4256	1.0000	0.0000
	5	0.0000	0.0000	0.0000	0.4654
EX	1	1.0000	0.6202	0.7940	0.0000
	2	0.0000	0.0000	0.2060	0.6426
	3	0.0000	0.3798	0.0000	0.3574
CO	1	0.0000	0.8477	0.0000	1.0000
	2	1.0000	0.1523	1.0000	0.0000
VZ	1	0.0000	0.0000	0.4516	0.1858
	2	0.0000	0.6713	0.2027	0.8142
	3	0.0000	0.3287	0.3456	0.0000
	4	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
RV	1	1.0000	0.0000	1.0000	0.3715
	2	0.0000	0.0000	0.0000	0.3715
	3	0.0000	0.0000	0.0000	0.2571
	4	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
MI	1	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
	2	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000
PM	1	0.0000	0.6714	0.0000	0.8589
	2	0.0000	0.3286	0.0000	0.1411
	3	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
AF	1	0.0000	0.7936	0.2013	1.0000
	2	1.0000	0.2064	0.7987	0.0000
SZ	1	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000
	2	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000

```

Minimum amount of free RAM was 440768 bytes.

```

Arquivo de saída do GoM – calculado sobre a matriz de entrada (parte 4/4)