

A DINÂMICA AQUÍFERA DO CARSTE COBERTO DE LAGOA SANTA, COM BASE NAS ANÁLISES DAS OSCILAÇÕES DO NÍVEL D'ÁGUA NA ZONA EPICÁRSTICA

Paulo Fernando Pereira Pessoa¹ & Celso de Oliveira Loureiro²

Resumo – Levantou-se dados das variações de nível d'água nos sistemas aquíferos cársticos cobertos da região de Lagoa Santa/MG, onde ocorrem os calcários do Grupo Bambuí. Foram medidos os níveis d'água durante 18 meses, em intervalos mensais no período seco e, quinzenais no período úmido, em vinte poços piezométricos tipo câmaras duplas, e instalados de modo equidistante ao longo de três alinhamentos específicos. Nesses locais foram executadas sondagens testemunhadas, instalando-se um par de poços, sendo o mais profundo finalizado no embasamento cristalino e o mais raso alcançando apenas a base do pacote de decomposição de solos. Considerando-se o regime das oscilações de nível d'água nos dois aquíferos analisados, poroso e cárstico, verifica-se uma dinâmica fundamentalmente regida pela zona epicárstica bem desenvolvida abaixo do contato dos solos com os calcários, que se descreve por uma extensa zona de dissolução variável, as quais, em função dos fatores litoestratigráficos e estruturais locais, ditam as regras da flutuação do nível d'água.

Abstract - Results of a current hydrogeological investigation are presented, regarding a carbonated rock aquifer located around the Lagoa Santa lake, in the city of Lagoa Santa, estate of Minas Gerais. The methods and tools used to characterize the groundwater behavior and dynamics in the epicarstic system include 20 boreholes drilled in three aligned sections of about 1500 meters long, corresponding to two monitoring wells in each station, separated by filter packs located respectively on the porous mantle and in the karstic media, near the bottom surface of bedrock. Water monitoring was performed during eighteen months, in both types of installed wells, which demonstrated that epicarstic zone play a rule of groundwater dynamics in the upper massive karstic environment and in the whole system. All the investigated sites are controlled by the litologic fabric of the karstic rocks, thickness and composition of soil mantle that distributes aquifer flows in distinct modes of water level oscillations through the epicarstic zone.

Palavras-Chave – aquífero cárstico, zona epicárstica, nível d'água.

¹ Ph.D., HIDROVIA Hidrogeologia e Meio Ambiente Ltda. Rua Albita, 131/306. Belo Horizonte, MG, Brasil. CEP. 30.310-160. Tel.: (31) 3284-7977, e-mail: ppessoa@hidrovia.com.br

² Ph.D., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno 842, 7º andar, Bairro Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30.110-060, Tel.: (31) 3238-1884, e-mail: celso@desa.ufmg.br

1. INTRODUÇÃO

Uma das muitas questões pertinentes tanto ao estudo da espeleogênese quanto ao estudo geomorfológico e hidrogeológico dos ambientes em que se desenvolvem os aquíferos cársticos, e que exaustivamente, vem sendo discutida e debatida na literatura, refere-se à caracterização dos processos de dissolução dos carbonatos, se ocorrendo de forma mais intensa, abaixo, acima ou paralelamente ao topo da superfície freática (NA), que, de maneira freqüente, coincide à presença da zona epicárstica (ZE).

Uma série de estudos trata de assuntos correlatos, ressaltando-se alguns clássicos trabalhos como os de Thrailkill (1968), Drogue (1980), Williams (1983), Bonacci (1987), Ford & Williams (1989), Klimchouk (2000, 2004), Bakalowicz (2004) e outros.

No entanto, a busca pelo entendimento desses fenômenos tem sido praticada, mormente, pelas observações visuais dos terrenos onde o carste se encontra exposto (*bare karst*), não tendo sido observada na literatura a análise mais detalhada das condicionantes hidrológicas desses fenômenos em carstes cobertos (*mantled karst*), como no caso em questão, onde a dificuldade de análise é refletida, obviamente, pelo custo e, conseqüentemente, pela ausência das ferramentas adequadas ao monitoramento dos processos hidrológicos que ocorrem nas zonas epicársticas mais profundas, restringindo-se assim, a sua melhor compreensão.

Os diversos estudos citados mostram que os fenômenos que ocorrem na zona epicárstica são controlados por uma quantidade significativa de fatores, os quais variam no tempo e no espaço, tornando muito complexa sua análise em detalhe. Não se pretende aqui, avançar além do que os dados levantados permitem deduzir, entendendo-se que a contribuição no assunto volta-se, apenas, para as observações que se tornaram possíveis, mediante o conhecimento adquirido até o momento, e aplicado na análise dos dados coletados através da metodologia proposta. Cumpre ressaltar, de início, que os dados apresentados a seguir referem-se a uma das investigações realizadas no âmbito do estudo de doutoramento concluído pelo primeiro autor deste artigo, intitulado “Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa/MG”.

Diversos estudos que contextualizam as condições de fluxo na zona epicárstica, utilizam-se, apenas, das observações do NA em poços construídos por câmaras simples¹, instalados essencialmente nas zonas de circulação freática dos aquíferos cársticos. Assim, as análises que se

¹ Câmara simples – poços piezométricos construídos com uma única zona filtrante na base do revestimento
XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas

apresentam a seguir estão fundamentadas em dados coletados em ambos os sistemas de circulação freática, tanto no meio poroso superficial, quanto no meio aquífero cárstico, considerando-se que a análise integrada quanto à observação periódica desses dois sistemas, em áreas representativas do carste coberto de Lagoa Santa, possam expandir o conhecimento acerca dos mecanismos de controle atuantes nesses domínios.

A definição de Williams (1983) para esse importante compartimento do sistema cárstico é descrita como sendo a porção superior e intemperizada do maciço carbonático, localizada logo abaixo da cobertura pedológica e acima da zona permanentemente saturada do aquífero cárstico.

Os principais processos intervenientes, segundo Williams (1983), referem-se à ação das águas que percolam desde a superfície até o interior do sistema, cujas concentrações mais elevadas de CO₂ dissolvido tornam-na mais agressiva pela formação de ácido carbônico nos solos, e assim, potencializam a sua capacidade de decomposição da rocha calcária. Com o avanço da percolação em profundidade, estas águas vão perdendo parte de seu poder corrosivo, em função da diminuição da quantidade de CO₂ presente na água, tendendo a solução ao equilíbrio. Dessa maneira, a quantidade e a profundidade dos processos de dissolução variam de acordo com o volume de chuvas, do tempo, do tipo de rocha, da composição e espessura dos solos, da pressão parcial de CO₂ e da natureza do sistema em que ocorrem esses processos; seja anaeróbico ou fechado, ou aeróbico ou aberto, respectivamente relacionados ao modelo seqüencial ou coincidente de Drake (1983).

Ainda que conduzidos por objetivos distintos, mas a partir da adoção de ferramentas similares às utilizadas nesta análise, os estudos realizados por Milanovic (1976), Torbarov (1976) Faulkner (1976) e Stojić *et al.* (1976) avançaram na compreensão da dinâmica hídrica subterrânea dos aquíferos cársticos sob a ótica das correlações entre os dados de oscilação do nível d'água em poços de sondagens e os de hidrogramas de descargas em surgências, tendo sido interpretadas e debatidas, amplamente, as questões relativas aos parâmetros hidrológicos na zona subcutânea dos referidos sistemas.

2. OBJETIVOS

Como principais objetivos dessa pesquisa, podem ser citadas as seguintes:

- compreender os mecanismos de dissolução que ocorrem na zona epicárstica de terrenos cársticos cobertos por manto de intemperismo;

- verificar se há ocorrência de uma zona saturada no meio poroso e sua relação com os níveis d'água dos aquíferos cársticos subjacentes;
- analisar os efeitos da flutuação do nível d'água no meio poroso e no sistema aquífero cárstico, em comparação às oscilações pluviométricas locais.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O domínio de estudo localiza-se na porção situada imediatamente ao sul da lagoa central da cidade de Lagoa Santa, Minas Gerais; distando cerca de 35 km ao norte de Belo Horizonte. A Figura 1 apresenta uma visão geral da área de estudo e indica o local onde se encontram os poços de sondagens que foram utilizados para a referida pesquisa.

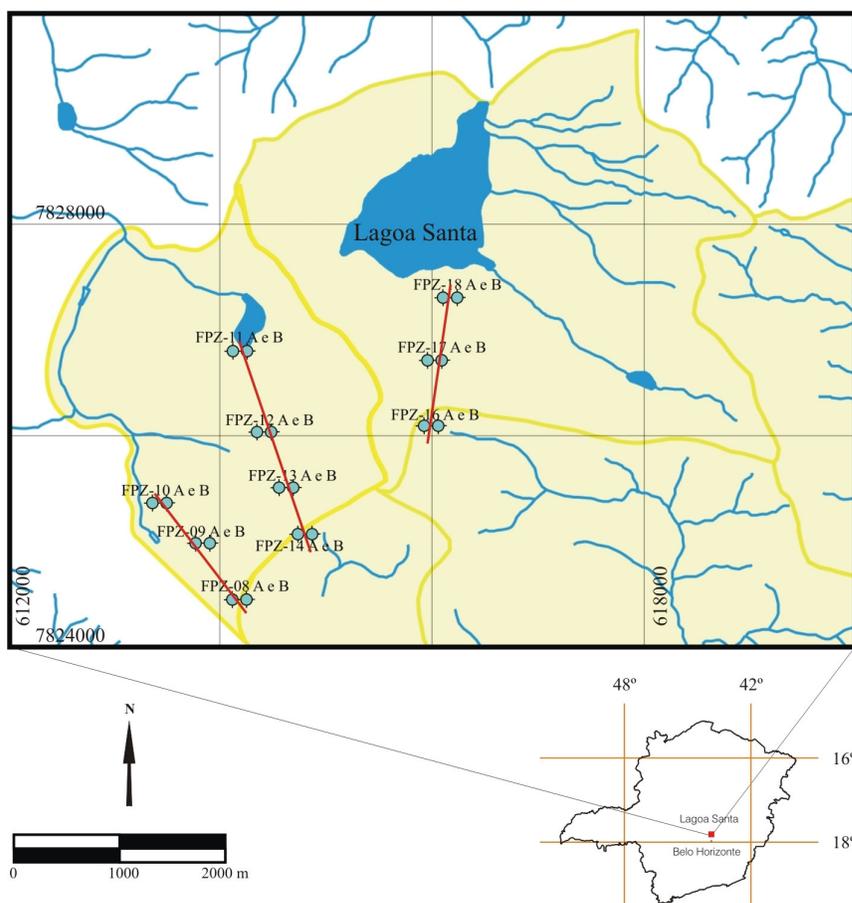


Figura 1 – Área de estudo identificando a localização das seções onde se encontram os poços de sondagens de câmaras duplas monitorados. Fonte: Adaptado de Pessoa (2005).

Esse domínio está compreendido integralmente pelas rochas metassedimentares do Grupo Bambuí, numa área de relevo suave, caracterizado por colinas arredondadas e topografia pouco acidentada, conformando uma superfície extensa na forma de uma cobertura pedológica muito espessa, cujas profundidades médias alcançam cerca de 60 metros, podendo atingir em determinados locais até 100 metros de profundidade.

Esses mantos intempéricos referem-se aos materiais alterados dos metassiltitos da Formação Serra de Santa Helena, os quais se apresentam na forma de materiais silto-argilosos de coloração vermelho amarelada, estando assentados sobre os carbonatos da Formação Sete Lagoas. Esta se divide em dois membros: um membro basal denominado Membro Pedro Leopoldo, e um membro superior denominado Lagoa Santa.

O primeiro constitui-se de calcários impuros, com extensa contribuição argilosa, tonalidade cinza escura, comumente interstratificado com níveis filíticos e mármores silicosos, e o segundo, por calcários puros de alto teor (> 50% CaO) que ocupam, por vezes, a zona de topo do edifício carbonático, sendo nesta área de pesquisa o tipo litológico preponderante em contato com os materiais da cobertura pedológica.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Como ferramentas essenciais à análise proposta, os poços de monitoramento (FPZ's A) perfurados até o contato do solo com o topo rochoso objetivam uma melhor compreensão dos mecanismos que ocorrem nessa zona subcutânea, que no caso do carste coberto, só pode ser observada, comumente, perante a existência dessas sondagens, as quais totalizaram cerca de 500 metros em camadas inconsolidadas e 2350 metros em rocha maciça.

Assim, dotando-se os locais analisados também de uma sondagem profunda, perfurada lateralmente à anterior, pode-se dizer que cada estação de monitoramento está constituída por poços de câmaras duplas (FPZ-A e FPZ-B), onde o mais profundo retrata apenas as oscilações de água que fluem no aquífero cárstico.

O esquema instalado em cada estação está ilustrado através da seção esquemática demonstrativa da disposição dos poços de sondagens testemunhadas, perfurados nos referidos sistemas aquíferos, conforme apresentado na **Figura 2** a seguir.

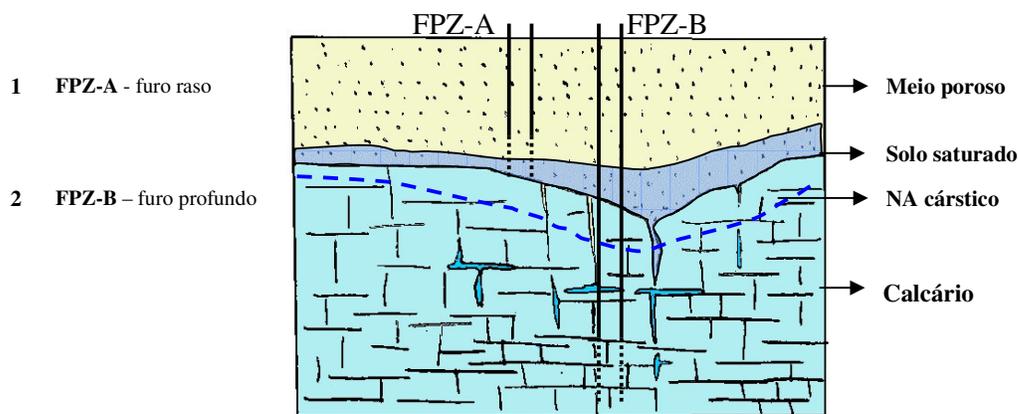


Figura 2 – Seção esquemática mostrando poços de sondagens adotados para medição do NA, conforme citado em Pessoa (2005)

Nesta pesquisa os furos de sondagem mais rasos, transformados em poços de monitoramento, serviram para analisar o comportamento das águas de percolação meteórica que se armazenam na base do pacote litológico semidecomposto, comparativamente aos níveis d'água medidos nos poços de monitoramento profundos instalados no aquífero cárstico.

As estações de monitoramento utilizadas nessa análise estão representadas por vinte poços de observação do nível d'água, sendo cada uma composta por dois poços, como ilustrado através das seções geológicas apresentadas na **Figura 3** a seguir. O furo raso informa sobre as oscilações do NA no aquífero poroso, e o segundo, do aquífero cárstico. Estes poços encontram-se alinhados em três seções distintas, A-A', B-B' e C-C', cujas direções variam, respectivamente, entre N38W, N21W e N09E.

De forma a caracterizar as oscilações sazonais dos NA's medidos nesses pares de poços, foram elaboradas seções gráficas demonstrativas da situação hidrogeológica dos mesmos, alinhados em suas respectivas direções, considerando-se as duas situações em conjunto, ou seja, representando-se as variações máximas e mínimas dos NA's tanto no meio poroso como no meio aquífero cárstico ao longo do tempo (**Figuras 4, 5 e 6**).

Tanto as variações máximas como as mínimas correspondem, respectivamente, às médias dos valores máximos e mínimos de cota de NA, coletados em períodos trimestrais ao longo dos 18 meses de observação, sendo analisadas em paralelo às oscilações pluviométricas. O arranjo proposto para essa forma de análise das oscilações ao longo do tempo visa minimizar a ausência de registros do NA em menores intervalos de observação, que provavelmente trariam um melhor

refinamento da base de dados, e conseqüentemente, um grau maior de conhecimento acerca das variáveis envolvidas.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Cumprе ressaltar, de início, algumas premissas que foram assumidas previamente, a fim de possibilitar o avanço nas interpretações dos dados coletados, perante o quadro hidrogeológico em questão:

- ✓ Os processos de infiltração ocorrem de forma equivalente ao longo das seções analisadas; ou seja, as poucas variações na declividade do terreno, entre os poços, não são suficientes para impor alterações significativas entre os pontos analisados;
- ✓ As características estruturais, granulométricas e composicionais dos solos são idênticas, salientando-se a provável existência de uma faixa delgada de material semidecomposto na base do pacote poroso (metassiltitos Serra de Santa Helena);
- ✓ Todas as seções hidrogeológicas estão compostas por furos de sondagens cujos topos rochosos são constituídos por material carbonático;
- ✓ O regime pluviométrico e a evapotranspiração são idênticos ao longo de toda a área onde se encontram instalados os poços de monitoramento;
- ✓ Os rebaixamentos induzidos pelos poços de bombeamento existentes nas vizinhanças da área analisada, não interferem nas leituras de NA;
- ✓ As condições químicas de dissolução dos materiais carbonáticos na zona epicárstica são assumidas, em princípio, como constantes ao longo das seções analisadas;
- ✓ As análises são de ordem qualitativa e restringem-se, exclusivamente, às observações da área de abrangência das referidas seções.

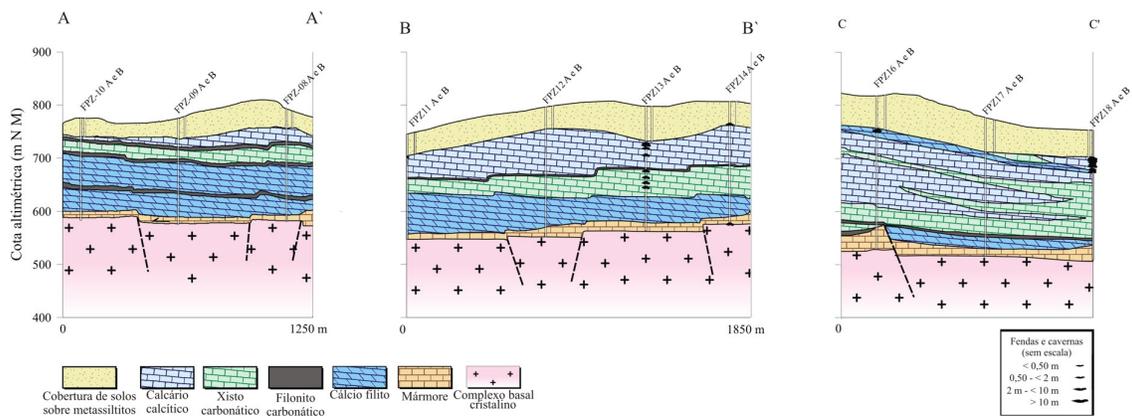


Figura 3 – Seções geológicas representativas dos locais de instalação dos poços A e B, adaptado de Pessoa (2005).

Considerando-se que a espessura da lâmina d'água conformada na base do meio poroso constitui-se em um dos elementos preponderantes no desenvolvimento do sistema cárstico subjacente, o objetivo principal dessa análise busca enfatizar, como e quais mecanismos controlam seu comportamento acima da ZE.

Diante das premissas apontadas acima, entende-se que tais mecanismos devem ser controlados por um conjunto de variáveis inerentes aos aquíferos cárstico e poroso, as quais devem atuar, simultaneamente; sendo as principais que se pretende analisar em função dos recursos adotados, as seguintes: a espessura do pacote de solos acima da zona epicárstica, o grau de fraturamento do material carbonático subjacente, e a declividade do topo rochoso calcário que sustenta esse pacote poroso de solos.

Deve-se salientar que essa zona de saturação do meio poroso pode, freqüentemente, encontrar-se suspensa, havendo uma zona vadosa ou aerada entre o topo do aquífero cárstico e a base do pacote litológico semidecomposto, retratando-se assim, a definição explícita de Williams (1983) para a zona epicárstica. Porém, como se verificou em 50% dos pontos de observação, a zona de contato entre o meio poroso e o topo da rocha calcária encontra-se saturada constantemente, não ocorrendo assim, a existência de uma zona epicárstica típica.

Em linhas gerais, verifica-se que as seções apresentadas através dos gráficos identificam claramente que a zona saturada do meio poroso, identificada pela lâmina d'água sobreposta à zona epicárstica, mantém uma mesma configuração ao longo do período de monitoramento, percebendo-se, comparativamente à intensidade das chuvas incidentes, poucas modificações.

Naturalmente, em função da escala de apresentação, não é possível se observar de forma muito nítida essas variações que ocorrem na espessura da lâmina d'água, embora tenham atingido um máximo de até 28 m (FPZ-13A, Nov-Jan/05) e um mínimo de 2,55 m (FPZ-14A, fev/05). Essas variações estão apresentadas na Tabela 1, além de uma síntese das demais variáveis envolvidas quanto às oscilações de NA no meio poroso, sendo que estimativas mais detalhadas dos valores de NA para o aquífero cárstico, serão discutidas na próxima tabela.

A análise dos gráficos demonstrativos das oscilações do NA com o auxílio da Tabela 1 permitiu que se verificassem algumas características hidrogeológicas do meio poroso, no que se refere a sua condição de aquífero superficial, mantenedor das recargas difusas para o sistema cárstico subjacente. A análise que se segue, trata, inicialmente, do cenário integrado acerca dos

dados levantados e disposto graficamente pela composição de cada seção, para, em seguida, discorrer sobre as variações isoladas que foram observadas pontualmente.

Tabela 1 – Identificação de parâmetros hidrogeológicos dos poços no meio poroso

Identificação das seções	Cota terreno (mNM)	Profundidade do furo (m)	Cota do topo rochoso (mNM)	Lâmina d'água (m)			Amplitude NA (m)	
				Máxima	Média	Mínima		
A-A'	FPZ-08A	804,22	38,65	765,57	12,72	4,99	2,69	10,03
	FPZ-09A	778,61	40,35	738,26	9,51	5,32	3,93	5,58
	FPZ-10A	771,82	29,50	742,32	5,03	1,47	0,50	4,53
B-B'	FPZ-14A	817,59	57,30	760,29	5,46	2,68	0,35	5,11
	FPZ-13A	796,12	67,55	728,57	36,37	21,97	7,96	28,41
	FPZ-12A	795,76	41,45	754,31	10,60	4,66	1,93	8,67
	FPZ-11A	741,47	39,75	701,72	31,34	29,75	28,79	2,55
C-C'	FPZ-16A	825,70	67,68	758,02	50,60	46,26	44,33	6,27
	FPZ-17A	784,76	71,40	713,36	52,57	46,85	45,77	6,80
	FPZ-18A	753,71	48,03	705,68	18,03	16,29	15,17	2,86

Fonte: Pessoa (2005).

Quanto à espessura dos solos, esta corresponde à profundidade dos furos indicada na tabela acima, sendo verificado que o valor médio por seção amostrada, encontra-se entre 29 e 40m na seção A-A', entre 40 e 68m na seção B-B', e entre 48 e 71m na seção C-C'. Quando observadas as espessuras médias de lâmina d'água correspondentes a essas seções da cobertura pedológica, verifica-se que há uma correlação positiva entre as mesmas, ou seja, à medida que os solos se espessam, há uma tendência similar de espessamento da lâmina d'água nas respectivas seções, equivalendo em termos médios, a 4m, 15m e 36 m de espessura.

Considerando-se as relações de causa e efeito acima descritas, justifica-se de modo preliminar, que esse cenário pode ser estabelecido em função de uma maior retenção específica relativa à composição do material que caracteriza os solos da região, visto que estes são constituídos predominantemente, pelas frações argilosas. Segundo Fetter (1994), as argilas podem conter uma porosidade de até 50%, com uma retenção específica de 48%.

Dessa maneira, sendo muito lento o tempo de percolação vertical das parcelas de águas meteóricas que infiltram, um maior acúmulo de água é favorecido, saturando-se assim, uma faixa mais espessa do material poroso, visto que sua zona de descarga situa-se muito abaixo do topo do pacote (zona epicárstica). Como os aportes pluviométricos retornam a precipitar nos terrenos antes que uma parcela significativa das chuvas antecedentes tenha sido drenada verticalmente, eleva-se a coluna saturada no meio poroso. Esses mecanismos ocorrem de maneira similar nos pacotes de solos menos espessos. No entanto, como a distância vertical entre o topo do pacote poroso e o

contato com a zona epicárstica é menor, as águas de percolação atingem a faixa de descarga mais rapidamente, estabelecendo-se nestas circunstâncias, uma das formas de controle para a configuração de uma lâmina d'água mais delgada no topo da zona epicárstica.

Em relação à segunda variável citada no contexto da referida análise, dado o reconhecimento do grau elevado de fraturamento do material carbonático subjacente, entende-se que os fatores relativos à porosidade secundária dos referidos maciços exerceram e vem exercendo desde os primórdios dos processos de abertura dos protocondutos (Lowe, 2000), uma atuação marcante na conformação atual da ZE, que por sua vez, vem se transformar, muito provavelmente, em uma das formas preponderantes no controle das condições de estocagem de água no meio poroso, em conjunto à espessura do manto de decomposição dos solos.

Assim, os fatores intervenientes relacionados à porosidade secundária incidente na ZE, atuam de maneira isolada ou em conjunto, se fazendo notar através da análise das variações do NA nas seções apresentadas. Observa-se através da **Tabela 1**, uma maior amplitude das faixas de oscilação do NA em algumas estações de medição, cujas implicações se referem possivelmente, à presença de uma zona epicárstica mais desenvolvida em termos de seu volume vadoso.

Estas características sugerem então, devido à facilidade de escoamento superimposta pela diferenciada porosidade efetiva que se manifesta localmente, uma modificação na dinâmica de fluxos, e que, segundo Williams (1983) é regulado verticalmente, em virtude de que as fissuras em profundidade tendem a ser mais apertadas, dificultando o deslocamento dos fluxos nesse sentido e incrementando o escoamento lateral.

Esses mecanismos que ocorrem na zona epicárstica são responsáveis por uma série de processos que se desencadeiam no sistema aquífero cárstico, inclusive o de desenvolvimento das dolinas por dissolução, conforme o clássico esquema elaborado pelo referido autor, o qual identifica os processos relativos à dinâmica de fluxos e de armazenamento na zona epicárstica, conforme apresentado na **Figura 7**.

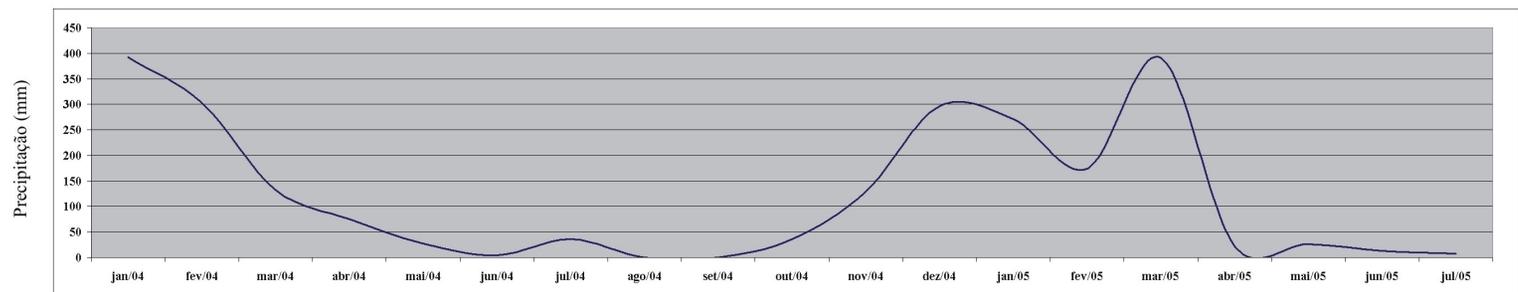
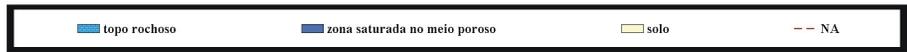
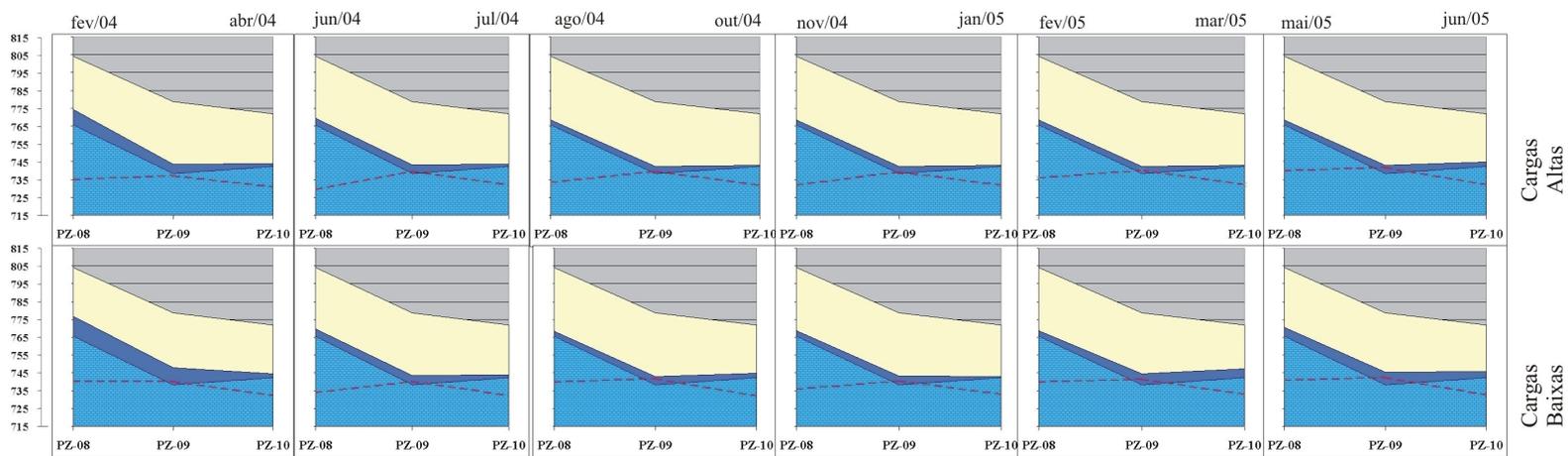


Figura 4 – Oscilações dos níveis d’água na zona epicárstica em comparação aos NA’s do aquífero cárstico (Perfil A-A’)
 Fonte: Pessoa (2005).

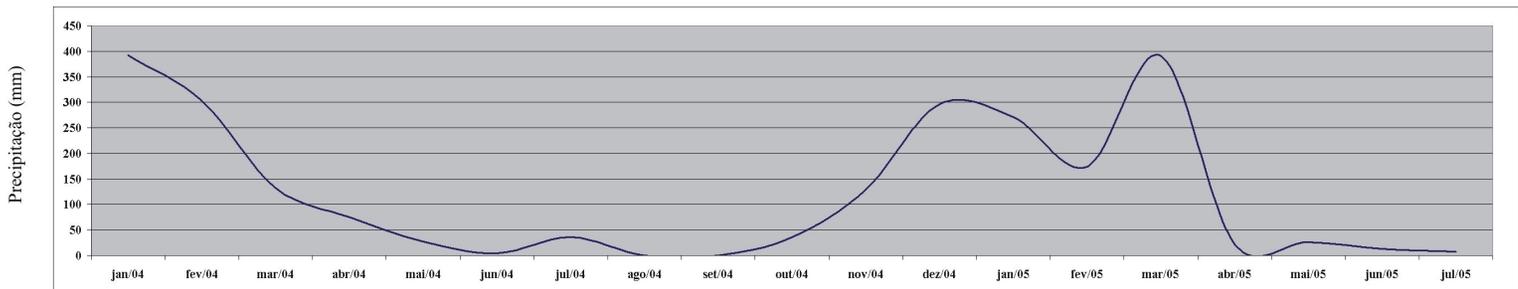
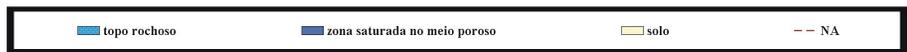
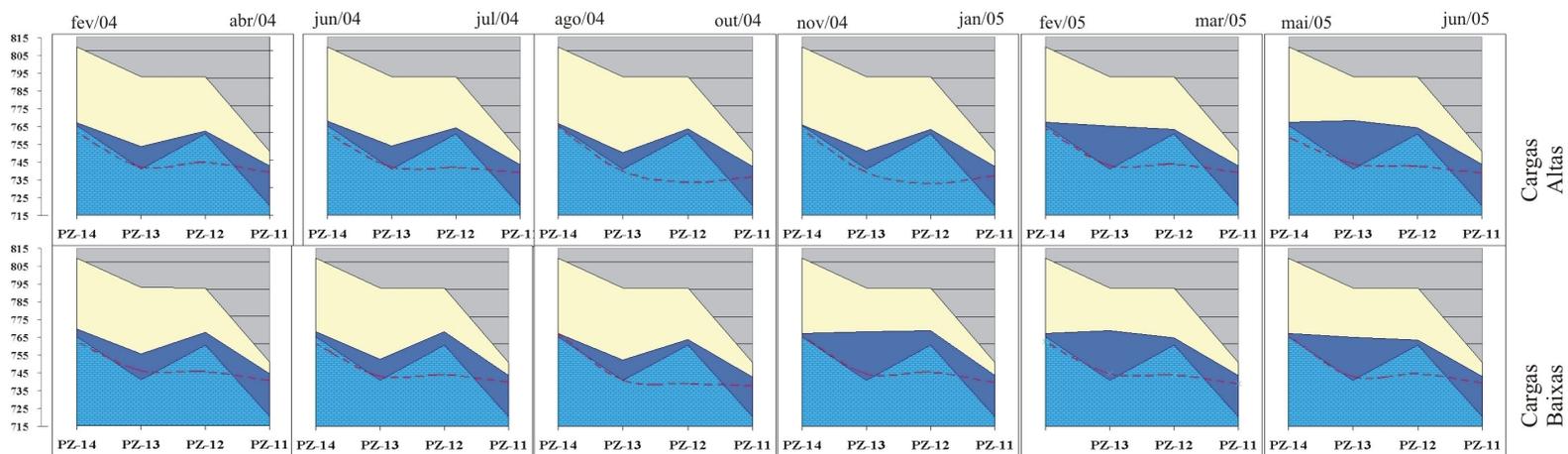


Figura 5 – Oscilações dos níveis d’água na zona epicárstica em comparação aos NA’s do aquífero cárstico (Perfil B-B’)
 Fonte: Pessoa (2005).

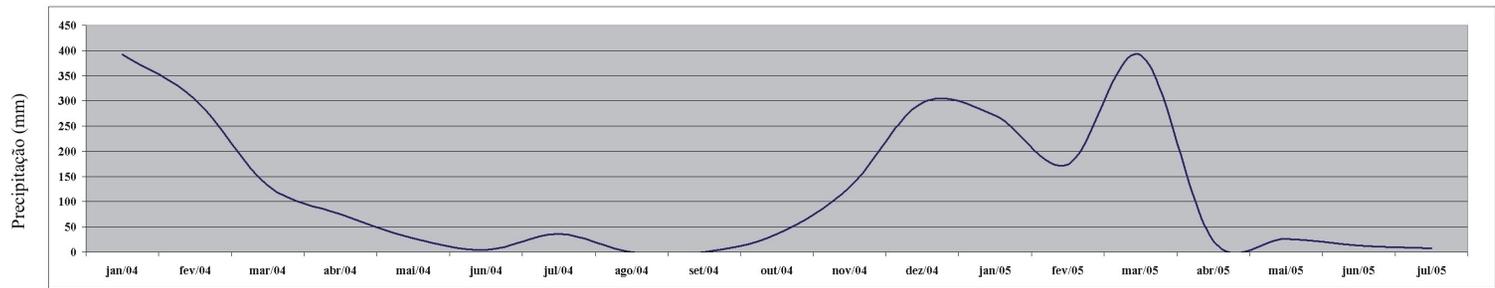
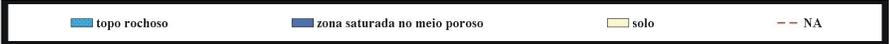
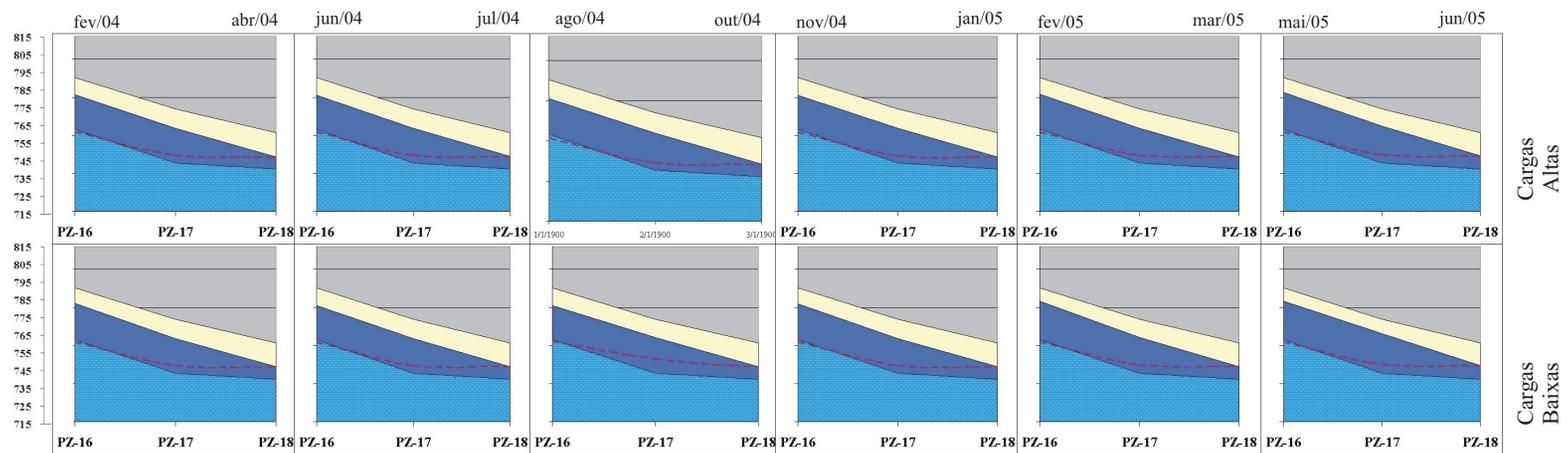


Figura 6 – Oscilações dos níveis d’água na zona epicárstica em comparação aos NA’s do aquífero cárstico (Perfil C-C’)
 Fonte: Pessoa (2005)

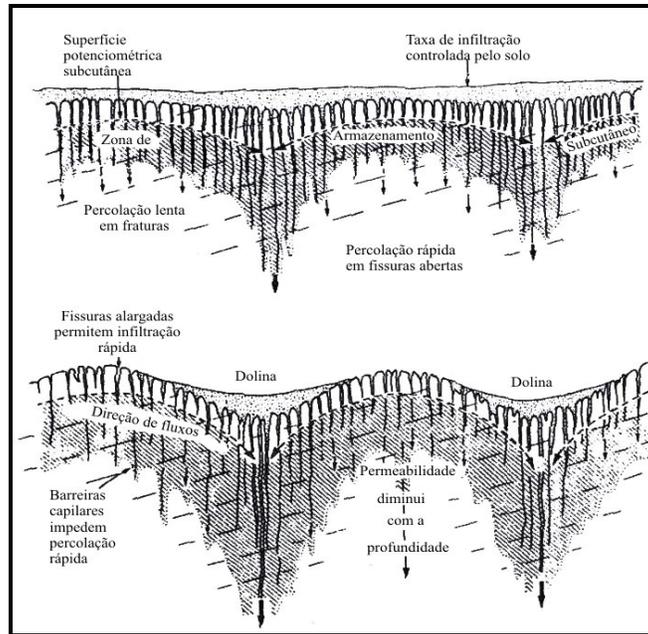


Figura 7 – Esquema hidrológico da zona epicárstica, mostrando o armazenamento subcutâneo, dinâmica de fluxos para zonas de alta permeabilidade e evolução das dolinas de dissolução (Williams, 1983).

Corroborando o esquema apresentado na figura acima, verifica-se através dos valores correspondentes às cotas do topo rochoso e da zona epicárstica alcançadas em ambos os furos de cada estação, conforme **Tabelas 1 e 2**, haver diferenças de até 3m de desnível entre as superfícies de topo da ZE para os respectivos poços de sondagens, denotando uma irregularidade bastante acentuada dessa superfície de contato entre o pacote superior representado pelo manto de alteração dos solos e a superfície de topo do edifício carbonático subjacente.

Bonacci (1987), analisando as condições de armazenamento de água e do fluxo lateral na zona epicárstica ou subcutânea, enfatiza que raramente esses parâmetros se distribuem de maneira uniforme e regular dentro da referida zona, sugerindo que a mesma se estabeleça numa faixa estreita, compreendida por uma espessura média de 0,5 e 2,0 m, localizada abaixo da cobertura intemperizada de solos, e no topo da zona não-saturada do aquífero cárstico, justamente na área onde os processos de carstificação são mais desenvolvidos.

Esses espaços vazios foram caracterizados anteriormente, em termos de sua distribuição e densidade observadas pelas sondagens, e no caso específico dessas seções, encontram-se, em parte, listados na **Tabela 2** apresentada a seguir. Há de se ressaltar, contudo, que os valores representados para as cavidades do epicarste servem apenas para exemplificar a grande incidência de vazios

detectada pelas sondagens, pontualmente, não exercendo influência no contexto da análise, embora lateralmente possam relacionar-se ao ambiente de entorno.

Tabela 2 – Relações entre nível d'água nos poços profundos e a zona epicárstica

Identificação dos poços	Altitude do terreno	Cavidades no epicarste (m)	Cota da zona epicárstica (ZE) (mNM)	Nível d'água (NA em m) (16/11/04) (Estiagem)	Cota NA (mNM) (16/11/04)	Nível d'água (NA em m) (31/03/05) (Per. úmido)	Cota NA (mNM) (31/03/05)	Relação entre NA e ZE
FPZ-08B	804,22	1,38	768,95	72,45	731,77	64,96	739,26	3
FPZ-09B	778,61	0,14	738,25	39,28	739,33	37,2	741,41	1
FPZ-10B	771,82	0,0	742,31	40,1	731,72	38,9	732,92	3
FPZ-11B	741,47	0,47	700,38	17,03	724,44	14,57	726,90	1
FPZ-12B	795,76	3,0	752,06	75,04	720,72	61,31	734,45	3
FPZ-13B	796,12	0,35	727,62	69,35	726,77	62,7	733,42	2 1
FPZ-14B	817,59	0,12	762,44	60	757,59	58,78	758,81	3
FPZ-16B	825,70	1,4	758,20	71,54	754,16	70,98	754,72	3
FPZ-17B	784,76	0,0	714,26	61,47	723,29	60,43	724,33	1
FPZ-18B	753,71	2,82	705,71	32,25	721,46	31,63	722,08	1

1	NA acima da ZE
2	NA igual a ZE
3	NA abaixo da ZE

NA – nível d'água
ZE – zona epicárstica

Fonte: Pessoa (2005).

Estes fatores, coexistindo em maior ou menor intensidade ao longo das faixas alinhadas pelos poços amostrados, podem induzir a um aumento da taxa de rebaixamento (descarga) da zona saturada porosa, modificando o regime sazonal de fluxos no epicarste, cuja influência permite que se manifeste de forma marcante, a atuação de processos mais intensos de dissolução, em função do aumento do poder de corrosão por misturas de águas (Bogli, 1964) e pela maior disponibilidade de CO₂ na zona vadosa.

Isso se deve ao fato dessas zonas caracterizadas por fraturas e pelas descontinuidades estratiformes do pacote carbonático terem sido responsáveis pela potencialização dos vazios detectados nas sondagens, mas que, ao longo do tempo, devem ter evoluído, conforme citado por Ford & Williams (1989) e Lowe (2000), a partir de microfaturas que serviram como canalículos de iniciação para a percolação das águas, e que, paulatinamente, foram sendo alargados pela remoção do calcário, resultando na formação de cavidades maiores.

Como observado na **Tabela 2** e nas seções gráficas de variação do NA (A-A' a C-C') apresentadas nas **Figuras 4 a 6**, os níveis d'água do aquífero cárstico em alguns pontos mostram-se mais elevados do que a zona epicárstica (ZE) para todo o período de monitoramento, tendo sido destacados em amarelo na referida tabela. Outros locais mostram-se, ao contrário, sempre abaixo da ZE, e em apenas um local verificou-se que o NA do aquífero cárstico oscila sazonalmente através

da ZE. Esses fatores permitem que se avance a discussão para a terceira variável citada anteriormente, a qual está relacionada à questão da declividade da superfície topográfica representada pelo topo do edifício carbonático.

Como se verificou através das seções gráficas de variação do NA, apesar da escala de apresentação, os desníveis entre os pontos de medição são evidentes, e mostram que a ação dos processos de dissolução deve interagir de maneira a rebaixar essa superfície no sentido da zona de maior permeabilidade (Williams, 1983) criada nos locais de maior concentração de vazios da ZE.

À medida que esses locais passam a induzir com maior frequência os aportes das águas de percolação através da ZE, sazonalmente, possibilitam o desenvolvimento de trechos com maior dissolução química, a partir de um potencial hidráulico gerado no mesmo sentido, e conseqüentemente, em zonas de convergência e divergência dos fluxos no epicarste, como verificado na seção B-B'.

Dessa forma, dependendo da distribuição espacial dos locais com maior ou menor concentração de vazios no topo do maciço calcário, estabelecem-se rotas de fluxos no sentido da maior facilidade de escoamento encontrada, que no referido caso, coincidem invariavelmente, às rotas laterais em função da presença constante dos planos de estratificação subhorizontais dos calcários calcíticos e de suas estruturas secundárias como falhas de cavalgamento de baixo ângulo e fraturas subverticais, sendo estas responsáveis pelo aprofundamento dos processos de dissolução, quando for o caso.

No que se refere à análise pontual das estações de medição adotadas para a configuração geral das seções apresentadas nas **Figuras 4 a 6**, torna-se extremamente difícil qualquer inferência sobre seu condicionamento no contexto hidrogeológico descrito, entendendo-se que o cenário em que se estabelece a dinâmica hídrica subterrânea nos aquíferos cársticos, só pode e deve ser analisado, de forma integrada, visto que o sistema funciona de forma interconectada, e um ponto de forma isolada, não reflete as características do meio como um todo.

No entanto, pode-se afirmar que há, para o domínio aquífero representado pelas faixas de entorno dos poços rasos FPZ's-08, 10, 12, 14 e 16A, um controle hidrológico que deve se caracterizar, em determinado trecho atravessado por suas respectivas seções, pelo contato do meio saturado poroso com uma ZE mais desenvolvida.

De maneira distinta, as faixas aquíferas incidentes no domínio de entorno dos poços rasos representados pelos FPZ's-09, 11, 17 e 18A não dependem das condições da dinâmica aquífera da ZE imediatamente abaixo, podendo sua dinâmica apenas influenciar, sazonalmente, o condicionamento hidrológico entre a faixa de contato da ZE com o meio poroso subjacente.

Estas averiguações trazem a tona importantes considerações sobre o comportamento de fluxos do meio poroso e do meio aquífero cárstico, posto que nesses últimos pontos citados observam-se invariavelmente, tratar-se de zonas intermediárias de fluxo ou de descarga, em ambos os aquíferos. Dessa maneira, conforme observado nos referidos gráficos e nos respectivos NA's dos poços A e B, pode estar ocorrendo a mistura das águas do meio poroso com as do aquífero cárstico, em vista da presença, apenas, de fluxos horizontais nesses sistemas freáticos (aquíferos livres e regidos pela pressão atmosférica).

Assim, a porção saturada do meio poroso que se observa nos referidos gráficos denotam para os casos dos poços FPZ's-09, 11, 17 e 18A a presença de águas mistas oriundas dos referidos sistemas, em vista de que os NA's desses poços (A e B) coexistem numa mesma faixa saturada. Por fim, cumpre ressaltar que, nestes casos, a ZE encontra-se constantemente 'afogada', localmente, não se verificando então, uma zona vadosa em um nível superior do aquífero cárstico.

6. CONCLUSÕES

Diante das informações coletadas através do monitoramento do NA, ao longo de dezoito meses de medições nos poços de câmaras duplas instalados no domínio do manto de alteração e do maciço carbonático, foi possível analisar de maneira mais precisa os processos pelos quais se desenvolvem os aquíferos cársticos, considerando-se os fatores de dissolução intervenientes na zona epicárstica.

Quanto à compreensão dos mecanismos de dissolução que ocorrem na referida zona epicárstica, verificou-se haver um nítido controle perante três fatores principais:

- espessura do manto de alteração, que governa o tempo de infiltração das águas meteóricas até o topo do maciço carbonático, coincidente à base dos solos;
- grau de fraturamento da zona de topo dos maciços carbonáticos, proporcionando uma maior facilidade ao escoamento das águas de circulação do meio poroso, como zona de descarga desta, e capacitando o desenvolvimento de maiores espaços vazios através do aumento das taxas de dissolução concomitantemente aos processos de dissolução do topo carbonático;

- declive do ‘assoalho’ representado pelo topo do edifício carbonático, através do qual se desenvolvem corredores de fluxo cárstico em decorrência da presença dos agentes necessários à capacitação de uma dissolução mais intensa, tais como a disponibilidade de CO₂ na zona vadosa, águas mais agressivas, calcários calcíticos e a variação na intensidade de fraturamento, conduzindo os processos de dissolução lateralmente e criando um gradiente hidráulico mais acentuado, localmente.

Quanto à ocorrência da zona saturada no meio poroso e sua relação com os níveis d’água dos aquíferos cársticos subjacentes, foi possível observar que sua existência decorre dos processos acima identificados, estando atrelados fundamentalmente às condições de espessura do manto de solos, e do tipo de contato implicando num menor ou maior favorecimento das descargas do aquífero poroso e, assim, no controle de sua espessura relativa de lâmina d’água.

Quanto à análise da flutuação do nível d’água, conforme discutido acima, o meio poroso não mostrou ao longo do período de monitoramento, efeitos que pudessem ser correspondidos a sazonalidade pluviométrica local, o que foi observado de maneira branda para os níveis d’água do sistema aquífero cárstico.

Pode-se concluir, portanto, que os instrumentos utilizados perante a metodologia de análise proposta foram fundamentais para o reconhecimento das condições de fluxo na zona epicárstica existente sob espessas coberturas pedológicas, podendo ser adotada em regiões similares.

7. RECOMENDAÇÕES

Em vista dos resultados encontrados de forma pioneira nesses estudos, entende-se que sua otimização ainda venha a contribuir muito no entendimento dos processos de desenvolvimento das zonas subcutâneas ou epicársticas de sistemas aquíferos similares, devendo-se para tanto serem apropriadas algumas ferramentas básicas, quais sejam:

- o aporte de tomadas de nível d’água a partir de instrumentos automáticos, os quais vão permitir de forma mais detalhada, se conhecer as condições de flutuação dos níveis d’água, tanto na zona epicárstica, quanto nos maciços cársticos profundos;
- a medição conjunta de parâmetros físico-químicos que possam identificar nos referidos sistemas de poços de monitoramento de câmaras duplas, como estão ocorrendo as variações das concentrações de importantes parâmetros ao longo dos períodos secos e úmidos, tais como índice de saturação, alcalinidade de bicarbonato, cálcio, temperatura, pH e condutividade elétrica.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à SOEICOM – Sociedade Empreendimentos Indústria e Comércio SA, pelo apoio financeiro e logístico prestados na execução dos referidos estudos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bakalowicz, M. (2004). The epikarst, the skin of karst. In: Jones, W.K., Culver, D.C. and Herman, J. (Eds.) 2004. Epikarst. Proc. Of the symposium held October 1 through 4, 2003. Sheperdstown, West Virginia, USA, Karst Water Institute special publication 9, 16-22.

Bogli, A (1964). Mischungskorrosion; ein Betrag zum Verkarstungsproblem. Erdkunde 18(2), 83-92. In: Dissolution chemical and Kinetic behavior of the karst rocks. Ford & Williams, (1989).

Bonacci, O. (1987). Karst Hydrology, with special reference to the Dinaric Karst. Springer-Verlag. 184p.

Drake, J.J. (1983). The effects of Geomorphology and seasonality on the chemistry of carbonate groundwater. Journal of Hydrology, 61 (1983) 223-236. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Faulkner, G.L. (1976). Flow Analysis of Karst Systems with Well Developed Underground Circulation. In: Karst hydrology and water resources (Ed. V. Yevjevich), Water Resource Publications, Fort Collins, p.165-191.

Fetter, C.W. (1994). Applied Hydrogeology. Third Edition. Prentice Hall.NJ.

Ford, D.C. & Williams, P.W. (1989). Karst Resources, their exploitation and management. In: Karst Geomorphology and Hydrology. London, Chapman & Hall, p.513-546.

Klimchouk, A.B. (2000). The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis. In: A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt, Eds: Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: Natl. Speleol. Soc. 91-99.

Klimchouk, A.B. (2004). Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. Re-published (modified) from: Jones, W. K., Culver, D.C. and Herman, J. (Eds.) 2004. Epikarst. Karst Water Institute special publication 9, 23-35.

Lowe, D.J. (2000). Role of Stratigraphic Elements in Speleogenesis: The Speleoinception Concept. In: A.Klimchouk, D.Ford, A.Palmer, W.Dreybrodt, Eds: Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Huntsville: *Natl. Speleol. Soc.* 65-76.

Milanović, P.T. (1976). Water regime in deep karst. Case study of the Ombla spring drainage area. In: Karst hydrology and water resources (Ed. V. Yevjevich), Water Resource Publications, Fort Collins, p.165-191.

Pessoa, P. F. P. (2005). *Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos da Região de Lagoa Santa, MG.* Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental / DESA. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Tese de Doutorado, 335p.

Stojić, P.; Miličević, M.; Milanović, P. (1976). Use of Piezometers Boreholes for Karst Investigations (A Preliminary Communication). In: Karst hydrology and water resources (Ed. V. Yevjevich), Water Resource Publications, Fort Collins, p.165-191.

Thraikill J. (1968). Chemical and hydrologic factors in the excavation of limestone caves: Geological Society of America Bulletin, v. 79, p. 19-46.

Torbarov, K. (1976). Estimation of permeability and effective porosity in karst on the basis of recession curve analysis. In: Karst hydrology and water resources (Ed. V. Yevjevich), Water Resource Publications, Fort Collins, p. 121-136.

Williams, P.W. (1983). The role of the subcutaneous zone in karst hydrology: *Journal of hydrology*, v. 61, p.45-67.