

RESULTADOS DO MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA EM TEMPO REAL, NOS AQÜÍFEROS CÁRSTICOS COBERTOS DE LAGOA SANTA / MG

Paulo Fernando Pereira Pessoa¹ & Celso de Oliveira Loureiro²

Resumo – As oscilações do nível d'água (NA) dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa/MG foram analisadas em tempo real, a partir da instalação de sensores automáticos de pressão e de armazenadores de dados (*data loggers*) em seis poços piezométricos situados numa zona de interferência de lavra de calcário. As rochas carbonáticas que constituem a região estudada pertencem ao Grupo Bambuí, de idade neoproterozóica, sendo a área caracterizada especificamente pela sua proximidade à borda da bacia sedimentar e cratônica. São analisadas as variações do NA de forma combinada com os dados locais de precipitação pluviométrica. Em paralelo, são avaliados os efeitos das atividades de rebaixamento do nível d'água do aquífero cárstico, bem como os procedimentos de desaguamento da cava que ocorrem em um sumidouro situado nas adjacências da área minerada. Os resultados dos hidrogramas de NA configurados ao longo de seis meses de amostragens, evidenciam uma forte heterogeneidade dos aquíferos cársticos, tendo sido esboçada de forma preliminar, as primeiras interpretações acerca dos índices de recarga observados em cada estação amostrada, e demais parâmetros hidráulicos que puderam ser quantificados.

Abstract – Water level (WL) oscillations into the mantled karstic aquifer near from Lagoa Santa city, Minas Gerais, were analyzed in real time from automatic sensors and data loggers installed in six boreholes located in an interference area of limestone quarry. The region is inserted in the Bambuí Group of neoproterozoic age and comprises pelitic and carbonate sequences. The WL variations were analyzed in a combined way with the local pluviometric data. In parallel, the effects of the ore exploitation activities, together with the WL drawdown in the karstic aquifer, as well as the mine dewatering procedures that takes place in a located swallet in the neighborhood of the mined area were appraised. It was possible to notice, from the WL hydrograms performed along ten months of monitoring observations, the strong heterogeneity of the karstic aquifer. Also, it was possible to sketch, in a preliminary way, the first interpretations concerning the recharge indexes observed in each sampled station, and other hydraulic parameters that could be quantified.

Palavras-Chave – aquífero cárstico, monitoramento automático, 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

Conforme citado em Kiang & Neto (2006) “o monitoramento de águas subterrâneas há muito é considerado como uma medida importante para o acompanhamento das condições dos aquíferos, a fim de que possam ser feitas previsões e controle de sua exploração”.

As análises apresentadas nesse estudo referem-se às interpretações das leituras de nível d’água realizadas por transdutores automáticos de pressão instalados em 6 poços de monitoramento situados no entorno das cavas da mina Lapa Vermelha, localizada na região do carste coberto de Lagoa Santa, Minas Gerais (Pessoa, 2005). Esses seis poços com sensores praticamente circundam as frentes de lavra atualmente em exploração, devendo ser considerada sua maior capacidade de detalhar o modo como ocorrem as interferências decorrentes dos aportes induzidos pelo rebaixamento do nível d’água realizado, sazonalmente, a partir de um *sump* instalado para o desaguamento do fundo da cava, cujo descarte é direcionado para um sumidouro localizado nas adjacências dos maciços lavrados.

Cumprе ressaltar, de início, que os dados apresentados neste documento referem-se a uma parte da tese de doutorado concluída pelo primeiro autor deste artigo, em 2005, intitulada “*Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos da Região de Lagoa Santa/MG*”.

As referências bibliográficas pesquisadas sobre a análise das flutuações de NA de aquíferos cársticos restringem-se a algumas comparações realizadas por alguns pesquisadores (Milanović, 1976; Stojić *et al.*, 1976; Torbarov, 1976; Bonacci, 1987; Teutsch & Sauter, 1991) sobre as formas de correlação de NA existente entre distintos poços de sondagens, entre poços e cursos d’água ou surgências, ou ainda, entre poços e as precipitações pluviométricas. No entanto, somente em poucos estudos pesquisados, foi verificada a adoção de procedimentos de amostragem sistemática das oscilações do NA, através das quais, foram analisados os tipos de influência das precipitações pluviométricas sobre as variações do NA. Contudo, a análise em detalhe e contínua (tempo real) das variações de NA foram pouco exploradas nas pesquisas investigadas.

As causas das oscilações diárias do nível d’água nos aquíferos livres são normalmente afetadas, tanto pelos efeitos das marés terrestres (Freitas e Cordini, 1998) quanto pelas interferências dos efeitos da evapotranspiração.

Diversos estudos demonstram a complexidade da análise das oscilações do NA no meio aquífero cárstico, em face da extrema heterogeneidade do meio, devendo-se considerar ainda as peculiaridades do local de estudo em um sistema aquífero cárstico coberto. Bonacci (1987) cita que a cobertura dos solos sobre os aquíferos cársticos, do ponto de vista hidrológico, denota uma limitada influência no desenvolvimento dos processos de superfície, subsuperfície e dos fluxos subterrâneos, salientando ainda, que sua existência ou ausência (sem considerar sua espessura e

distribuição) não pode interferir de forma significativa na mudança das características dos fluxos subterrâneos em ambientes cársticos típicos.

No entanto, segundo este mesmo autor, tem sido demonstrado que as coberturas inconsolidadas de solos sobre as rochas carbonáticas fortalecem a ação dos processos químicos erosivos, resultando em um número muito maior de casos em que a ocorrência dos fenômenos subterrâneos de dissolução nos carstes cobertos se desenvolve de maneira mais acentuada do que nos sistemas de rochas carbonáticas expostas. De acordo com essas prerrogativas, Bonacci (1987) cita que os dados mais importantes obtidos a partir das leituras de NA em piezômetros, são aqueles relacionados às velocidades máximas e mínimas de ascensão e queda do nível d'água subterrânea, os quais representam uma importante base de dados para a análise da permeabilidade do maciço carbonático e de sua capacidade de armazenamento e recarga.

2. OBJETIVOS

Como principais objetivos dessa pesquisa, podem ser citados os seguintes:

- compreender os processos hidrodinâmicos que se desenvolvem nos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa e os principais atributos intervenientes nas formas de oscilação do NA;
- analisar os efeitos da flutuação do nível d'água no sistema aquífero cárstico, em comparação às oscilações pluviométricas locais;
- reconhecer os efeitos dos processos induzidos de rebaixamento e de desaguamento da cava no sistema hídrico subterrâneo.

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 área de estudo é caracterizada basicamente pelas rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí, de idade neoproterozóica, cujos atributos litoestruturais principais relacionam-se às condições de borda de bacia cratônica e sedimentar, onde atuaram esforços de uma deformação subhorizontal, tipo *thin skinned* (Ribeiro *et al.*, 2003) cujas implicações resultaram na superposição de estratos carbonáticos de composição diferenciada.

O pacote de metassedimentos basais da Formação Sete Lagoas, que assenta diretamente sobre o assoalho cristalino, apresenta-se normalmente interestratificado, sendo constituído fundamentalmente por calcários puros do membro Lagoa Santa, calcário filitos e calcário xistos do membro Pedro Leopoldo, podendo exibir-se de forma alternada, verticalmente, a depender da zona em que se encontram empilhados, tectonicamente. Sobrepondo esse pacote de materiais essencialmente carbonáticos encontra-se a cobertura pelítica decomposta a semi-decomposta da Formação Serra de Santa Helena, compreendida por materiais silto-argilosos, predominantemente.

A Figura 1 apresenta abaixo a localização da área de estudo e a distribuição dos poços onde estão instalados os transdutores de pressão em torno da mina Lapa Vermelha de Lagoa Santa. Esse domínio está inserido integralmente 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. No entanto, os poços em que se encontram instalados os sensores de pressão alternam sua localização entre pontos com presença de coberturas espessas e outros onde a cobertura é mais delgada.

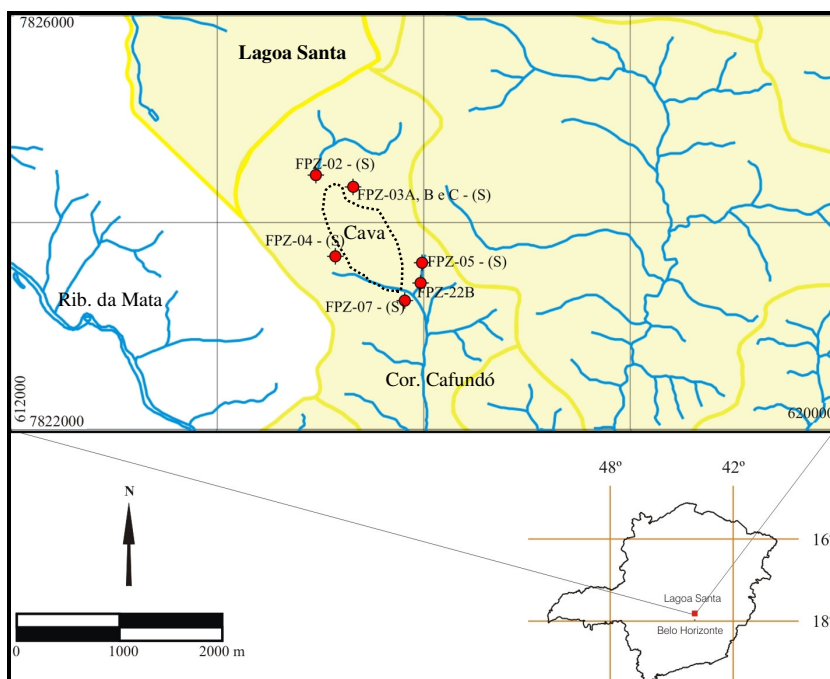


Figura 1 – Localização dos poços onde se encontram instalados os sensores automáticos

Fonte: Adaptado de Pessoa (2005).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Deve-se salientar, inicialmente, que os procedimentos de análise adotados buscaram explorar o detalhe da informação proporcionada pelos dispositivos de medição implantados, basicamente, pelo fato de ser este o diferencial dessa instrumentação em relação às outras formas de monitoramento normalmente aplicadas. Assim, os efeitos observados nas oscilações do NA, simultaneamente às medições das precipitações ao longo do tempo, tornam-se a tônica da pesquisa em questão. Entretanto, entende-se que os resultados encontrados através dos procedimentos analíticos adotados, consistem numa síntese dos principais parâmetros hidrodinâmicos que se pôde levantar a partir das composições gráficas dos hidrogramas de NA, que foram delineadas naturalmente pelos valores resgatados nos sensores.

Como será visto adiante, parte destes resultados apresentam-se ainda inconclusos, o que merecerá atenção especial mediante a realização de estudos futuros voltados à compreensão de determinadas particularidades de ambientes cársticos cobertos, a partir dessas ferramentas.

As coletas dos dados de carga hidráulica (NA) compreenderam quase a totalidade do ano hidrológico de 2004 / 2005, tendo sido iniciadas as amostragens em 30 de setembro de 2004, e finalizadas em 29 de julho de 2005. Serviram para a composição de gráficos demonstrativos das formas de oscilação do nível d'água nesses seis poços piezométricos, comparativamente, com os registros horários das precipitações pluviométricas e das variações termométricas do ar que estavam sendo registradas pela estação climatológica automática instalada na mina, simultaneamente.

Com relação às campanhas de monitoramento do nível d'água, as interpretações foram realizadas a partir dos dados coletados pelos transdutores de pressão adquiridos da *Druck*[®] do Brasil, que, dentre os tipos existentes, foi adotado o modelo PTX 1730, confeccionado em aço inoxidável. Variando em dois *ranges* distintos, de acordo com as profundidades de carga hidráulica existentes nos poços onde foram instalados, foram engatados em quatro poços, os cabos condutores de 30m, e em dois poços, os cabos de 50m de comprimento. Estes equipamentos apresentam precisão de $\pm 0,25\%$ e funcionam com uma carga de voltagem variável entre 9 e 30 VDC, tendo sido utilizadas baterias de 12 volts na alimentação.

O sistema de monitoramento em tempo real utiliza para armazenamento das leituras ao longo do tempo, um registrador eletrônico de dados analógicos (*data logger*) que fica acoplado aos transdutores de pressão. Esse aparelho foi adquirido da empresa NOVUS[®] e é denominado *LogBox*[®]. Sua alimentação provém de uma bateria interna com capacidade para mais de 2 anos de uso, dependendo da frequência de aquisição dos dados. A configuração é realizada pelo software *LogChart*[®], desenvolvido para plataforma *Windows*, o qual se comunica com um *PC (Notebook)* para transmissão dos dados do *LogBox* através de uma interface ótica, onde a troca de informações é realizada por sinal infra-vermelho (*IR-Link*), sem contato elétrico. Esse equipamento apresenta precisão de $\pm 0,15\%$.

As configurações para leitura e armazenamento dos registros de dados foram direcionadas para possibilitar o melhor aproveitamento possível dos equipamentos em termos dos intervalos entre coletas e a carga máxima admissível de informações. Sendo assim, optou-se por adequar os intervalos de leitura que atingissem aproximadamente, um número total de 16300 medidas, que corresponde à capacidade máxima de memória do *LogBox*. Programado para atingir essa eficiência em intervalos mensais de coleta no campo, a configuração final do equipamento foi então processada para leituras a cada 30s, onde as aquisições fossem registradas na memória, apenas, para as médias de cada 6 leituras consecutivas, correspondendo assim, ao registro do valor médio em cada intervalo de 3 minutos. Assim, para cada hora do dia foram armazenados 20 registros que

correspondem cada um, a uma média das leituras realizadas naqueles intervalos. O total das medidas registradas durante o período de 10 meses, por poço de observação amostrado, atingiu cerca de 144.000 registros de nível d'água e cerca de 14.400 dados climatológicos de temperatura e de precipitação, em face da escala horária de armazenamento destas leituras.

Devido ao elevado número de registros, ainda que bem suportado pelo ambiente propício de cálculos e de visualização gráfica oferecida pela planilha eletrônica do *software Excel*, há uma complexidade inerente à geração das informações necessárias, devido ao tamanho e ao distanciamento dos dados em uma mesma planilha, e ao acúmulo das informações num mesmo gráfico, implicando na necessidade de observação dos dados em escalas e gráficos distintos.

A adequação da terminologia adotada na descrição do registro de dados ou de sua configuração gráfica é apresentada como forma de se expressar o significado hidrológico de determinado conjunto de valores de NA e de sua relação com os eventos pluviométricos locais. Dessa forma, considera-se como registro ou dado, um valor de leitura do NA realizada pelo sensor e armazenado no registrador de dados. A união de dados ou de um conjunto de dados forma um segmento. Os segmentos estão representados por dois tipos principais, quais sejam: os de recarga, que se manifestam através de segmentos ascendentes marcados pela elevação das cotas altimétricas de NA, e os de descarga, os quais se manifestam a partir de segmentos descendentes, com a diminuição das cotas altimétricas de NA.

Os segmentos são identificados ou definidos, então, de acordo com um intervalo específico de tempo. Observa-se, pois, que os segmentos identificados em um determinado intervalo de tempo, sendo de recarga ou descarga, ocorrem em geral após um determinado período de ocorrência ou de ausência de eventos pluviométricos, cuja intensidade varia, sazonalmente.

Como será visto adiante, as oscilações mais significativas de NA estão intimamente relacionadas à quantidade e intensidade de chuvas incidentes na área, sendo, portanto, a variável mais importante na avaliação do comportamento dinâmico do NA. Como citado anteriormente, os registros pluviométricos amostrados de hora em hora pela estação localizada na mina, estão apresentados em conjunto aos dados de oscilação de NA em cada gráfico gerado, sendo assim, um fator comparativo na análise hidrodinâmica local.

Quanto aos aspectos hidrogeológicos e operacionais de cada ponto de monitoramento, faz-se necessário identificar a situação em que se encontram instalados esses equipamentos. Na **Tabela 1**, apresenta-se parte dessas informações, para cada ponto de investigação.

Tabela 1 – Parâmetros da configuração hidrogeológica local

Identificação do ponto	Cota do terreno (mNM)	Cota do NA* (mNM)	Prof. do furo (m)	Cota do topo rochoso (mNM)	Prof. do solo (m)	Prof. da zona vadosa (m) ou do NA	Distância ao sumidouro (m)	Cota do sensor (mNM)
FPZ-02	750,73	737,03	65,90	729,33	21,40	13,70	1.150	719,47
FPZ-03 B	752,67	729,53	87,88	731,54	21,13	23,14	850	722,22
FPZ-04	787,18	746,22	103,05	701,09	86,09	40,96	370	725,71
FPZ-05	760,42	721,32	102,04	737,72	22,70	39,10	300	698,91
FPZ-07	745,08	724,47	88,40	709,43	35,65	20,61	380	713,62
FPZ-22B	739,46	720,59	180,60	721,95	17,51	18,87	350	708,13

Fonte: Pessoa (2005) Obs.:*na data da instalação (30/09/04)

No que se refere ao posicionamento dos instrumentos no interior da câmara piezométrica de revestimento, além de dados de interesse à análise da dinâmica hídrica subterrânea, tais como materiais atravessados, profundidade e cota dos furos, das zonas saturada e vadosa, e dos respectivos níveis d'água no momento da instalação dos equipamentos. Além disso, encontram-se indicadas as distâncias de cada poço ao sumidouro onde são aduzidas as águas de descarte do bombeamento. Após a configuração geral de todos os registros de dados num mesmo gráfico, para um mesmo ponto de amostragem, foi iniciada a análise do comportamento hídrico subterrâneo, com base, essencialmente, na individualização de segmentos retilíneos quanto ao traçado das curvas de ascensão (recarga) e de queda (descarga) do NA.

Os perfis litoestratigráficos característicos de cada ponto amostrado refletem de maneira pontual, os cenários distintos em que estão constituídos os aquíferos cársticos, localmente, e que, face ao reconhecimento de suas feições de dissolução em subsuperfície (cavidades amostradas), exemplifica a intrincada malha de fissuras, cavernas e condutos de dissolução que interconectam os trechos perfurados, ditando as regras do comportamento hidráulico no referido domínio aquífero.

Considerando-se que, a análise da dinâmica hídrica subterrânea está compreendida em um cenário hidrogeológico conhecido, do ponto de vista de seus atributos físicos fundamentais, são identificadas, a seguir, as premissas básicas que atuam no sistema e devem ser satisfeitas perante o processo de análise:

1. Os aportes de água (pluviométricos ou induzidos) para o sistema aquífero cárstico são equivalentes para todos os pontos analisados;
2. As variações diárias na intensidade de insolação e da temperatura do ar, bem como as taxas de variação da evapotranspiração são similares em todos os pontos; o que determina que as variações diárias nas oscilações do NA sejam também equivalentes perante estes critérios;
3. Os quantitativos de infiltração são considerados os mesmos perante todos os perfis de poços amostrados, se consideradas as condições de declividade dos terrenos, os tipos de solos e de cobertura vegetal.

Assumindo-se tais premissas, as únicas variáveis que podem afetar a configuração dos segmentos que descrevem as oscilações do NA, estão representadas pelas próprias heterogeneidades

intrínsecas do sistema hidrogeológico cárstico, permitindo-se então, que sejam estabelecidas as hipóteses descritas abaixo:

1. A amplitude das variações do NA em cada ponto amostrado são decorrentes da intensidade da atuação dos processos de dissolução dos carbonatos em subsuperfície; ou seja, dependendo da condição de estruturação do ambiente aquífero, em termos de sua porosidade total (primária e secundária), haverá uma maior ou menor facilidade de escoamento, o que implicará num maior ou menor tempo de residência da água no aquífero.
2. O ângulo que define a inclinação da reta de tendência de um dado segmento de descarga ou de recarga é caracterizado em função da espessura da zona saturada do aquífero em cada ponto; ou seja, essa inclinação é resultado das distintas variações de gradiente hidráulico transcorridas ao longo dos processos de recarga e descarga.
3. A maior ou menor presença de condutos cársticos de dissolução no meio aquífero está expressa através do maior ou menor índice de vazios (porosidade efetiva).
4. O maior ou menor índice de vazios detectados em subsuperfície é proporcional a maior ou menor presença de calcários calcíticos no meio aquífero.
5. O maior ou menor índice de vazios está associado à presença das litoestruturas, tais como contatos estruturais, entre os planos de estratificação das camadas e fraturas.
6. A associação das condições acima citadas permite pressupor que os parâmetros porosidade efetiva para fluxo e permeabilidade variam espacialmente e no tempo.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o objetivo de se aproveitar ao máximo as informações coletadas através dos sensores de pressão instalados nos referidos poços de monitoramento, devido a sua capacidade de armazenamento de dados e à maneira em que foram configurados, os resultados apresentados a seguir foram caracterizados de acordo com as seguintes análises:

1. Oscilações do NA em escala de minutos, horária e diária.
2. Oscilações do NA devido a eventos pluviométricos.
3. Oscilações do NA devido a eventos induzidos (*sump*).

As análises sobre a oscilação do NA em escalas de maior detalhe ao longo do tempo evidenciam de forma bastante nítida, o que Custódio & Lamas (1976), Freeze & Cherry (1979) e Fetter (1994) já haviam demonstrado com relação às variações cíclicas diárias de evapotranspiração. No entanto, tais citações referem-se à influência da evapotranspiração em zonas mais rasas dos aquíferos freáticos, associadas, preferencialmente, às zonas de descarga.

Com base nas observações das oscilações de NA em escala diária, Todd (1959) identifica que, sob o efeito de histerese, o nível freático mínimo se manifesta até o final da tarde, e o máximo,

até em torno do meio dia. Meyboom (1967) de maneira similar mostra que os poços situados em aquíferos freáticos rasos apresentam uma variação notadamente delineada por rebaixamentos diurnos como resultado do consumo das plantas freatófitas, e de ascensões noturnas devidas à inatividade das mesmas, configurando assim o padrão característico de variação diária dos NA's, devido a evapotranspiração.

Contudo, como verificado através dos poços de monitoramento onde foram instalados os sensores de pressão, a profundidade dos níveis d'água variam, aproximadamente, entre 10 e 42 m, ou seja, bem abaixo das profundidades citadas anteriormente, tendo sido detectados os mesmos mecanismos diários de evapotranspiração em todos os pontos de medição, a partir dos referidos equipamentos. No entanto, segundo Freitas e Cordini (1998), a existência das marés terrestres deve ser considerada como um dos fatores causadores de pequenas oscilações na crosta, a partir das quais seria então possível, incrementar as diferenças diurnas / noturnas dos níveis d'água nos poços, sendo assim, refletidas em qualquer profundidade, mas sendo detectadas a depender da sensibilidade dos equipamentos de medição. Quando da ausência de precipitações, os registros obtidos nas medições realizadas para os seis poços de monitoramento mostram que as oscilações que se manifestam em intervalos curtos de tempo, em escalas de minutos, até horária, configuram-se de maneira extremamente similar. No entanto, pequenas diferenças podem ser notadas entre os extremos de NA e de temperatura para um período aproximado de 15 horas, os quais variam, respectivamente, na ordem de alguns centímetros e graus, como mostra a Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Variações de NA nos poços com sensores e temperatura do ar

Identificação do ponto	Período observado	Temp. do ar (°C)	Variação do NA (cm)	Profundidade do NA (m)
FPZ-02	18/10/04 12:01h	30,91	16	13,70
	19/10/04 02:49h	16,48		
FPZ-03 B	18/10/04 15:00h	31,71	11	23,14
	19/10/04 06:23h	14,73		
FPZ-04	18/10/04 15:30h	31,62	20	40,96
	19/10/04 06:51h	14,73		
FPZ-05	18/10/04 15:08h	31,71	24	39,10
	19/10/04 05:32h	14,73		
FPZ-07	18/10/04 11:55h	30,91	19	20,61
	19/10/04 06:19h	14,73		
FPZ-22B	18/10/04 14:55h	31,71	13	18,87
	19/10/04 06:35h	14,73		

Fonte: Pessoa (2005).

Os valores máximos de oscilação diária do NA ocorrem em torno de 24 cm, enquanto os mínimos ocorrem em torno de 11 cm; sendo que a temperatura do ar medida na estação climatológica próxima aos poços varia em uma amplitude média de 15°C ao longo do dia, considerando-se a ausência de precipitações nos períodos analisados, conforme mostra a tabela. As variações desses parâmetros podem ser observadas em períodos distintos de análise, conforme

gráficos apresentados abaixo. O primeiro gráfico relativo à Figura 2, demonstra que ao longo de um período curto de tempo, em torno de 60 minutos, há uma queda gradativa para os dois parâmetros, o que no referido caso oscila entre os extremos de apenas 5,0 cm, quanto ao NA, e cerca de 1°C quanto à temperatura, considerando-se o horário noturno de medição apresentado.

Contudo, dependendo do período, diurno ou noturno, a ascensão ou queda do NA e da temperatura são observados invariavelmente para todos os poços monitorados, e que nos exemplos mostrados abaixo, evidenciam o que ocorre via de regra: valores mais rasos de NA concordando com os valores mais elevados de temperatura no período diurno, e os mais profundos de NA com as mais baixas temperaturas nos períodos noturnos (Figuras 3 e 4).

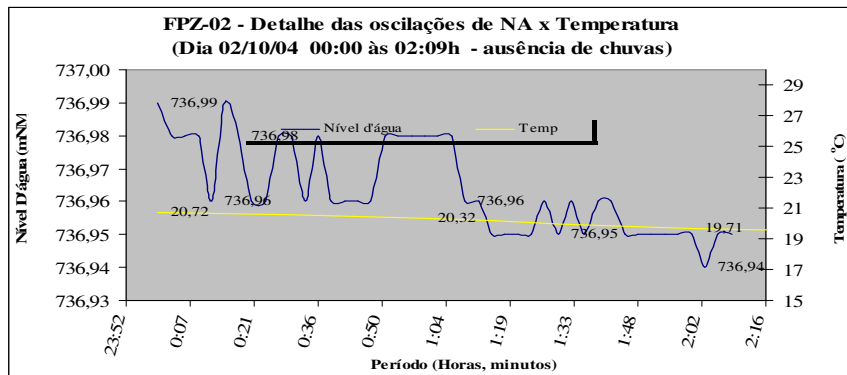


Figura 2 – Oscilações na escala de minutos do NA e temperatura do ar. Fonte: Pessoa (2005).

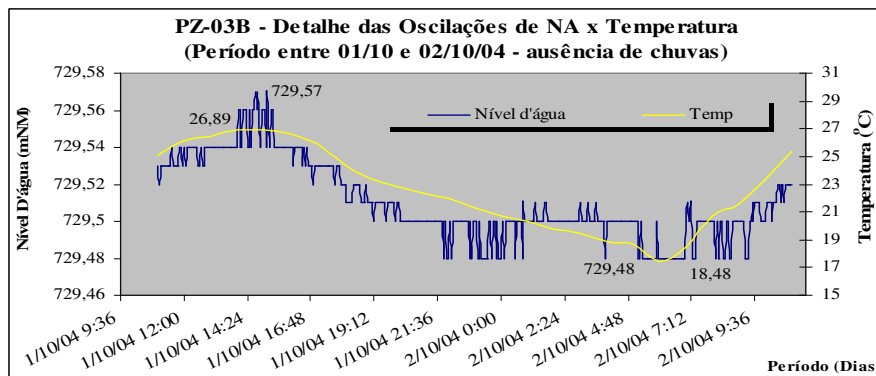


Figura 3 – Oscilações horárias e de minutos do NA e temperatura do ar. Fonte: Pessoa (2005).

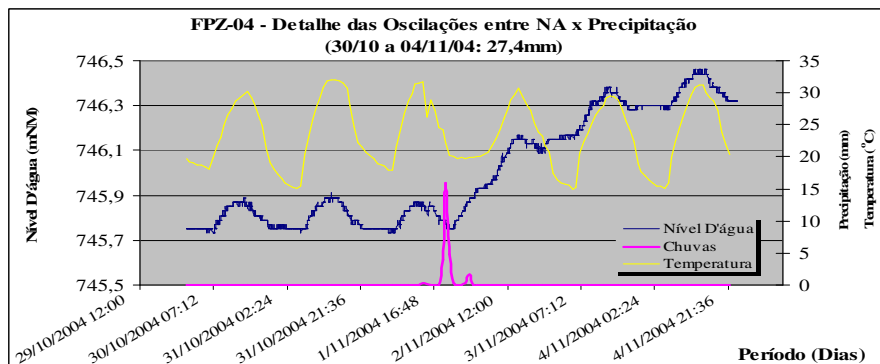


Figura 4 – Oscilações diárias do NA e da temperatura do ar. Fonte: Pessoa (2005).

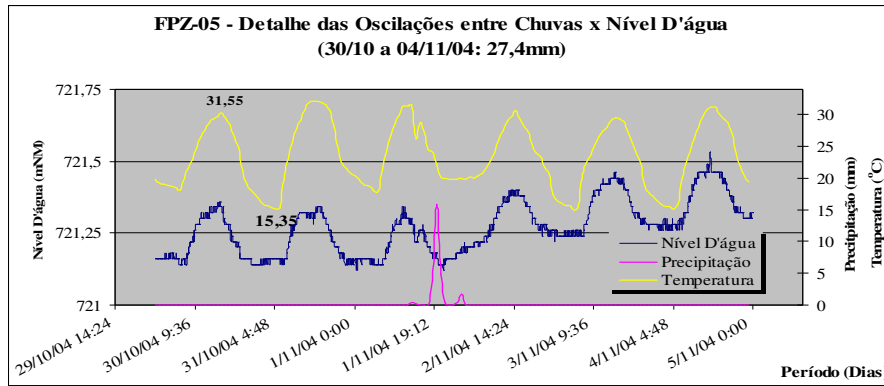


Figura 5 – Oscilações diárias de NA e da precipitação. Fonte: Pessoa (2005).

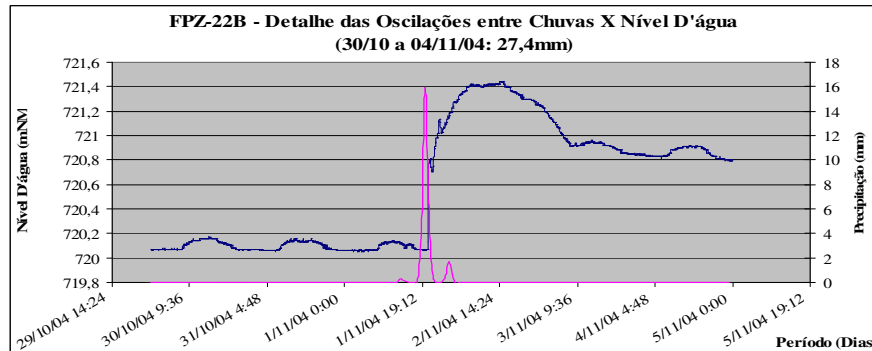


Figura 6 – Oscilações diárias de NA e da precipitação. Fonte: Pessoa (2005).

Conforme mostrado nos gráficos das Figuras 4, 5 e 6 acima, observa-se que o ritmo das variações do NA torna-se modificado quando o sistema é submetido à ação das recargas pluviométricas, as quais influenciam nas características de circulação das águas subterrâneas de maneira diferenciada, para uma mesma intensidade de eventos. Isto pode ser verificado a partir das configurações dos hidrogramas de NA apresentados nas figuras acima, onde as condições de permissividade presentes nos aquíferos cársticos, próximo à zona de entorno dos poços monitorados, condicionam respostas distintas de comportamento, para uma intensidade pluviométrica equivalente a 27 mm em dois dias. Observa-se na primeira figura, uma elevação abrupta do NA, o qual se eleva em cerca de 70 cm em três dias; no segundo poço analisado a elevação mostra-se inferior, com cerca de 30cm, mas, no terceiro poço, nas mesmas condições, a elevação é de 1,51m.

Com base nas modificações acarretadas na configuração do hidrograma do NA, em decorrência de uma seqüência de eventos de precipitação incidente em intervalos mais definidos, como apresentado na Figura 7 a seguir, observa-se que o traçado de seus segmentos, ainda que mantido seu ritmo diário, apresenta-se em um padrão constante ao longo dos períodos de recargas ou descargas. Dessa maneira, é possível caracterizar, através da superposição das linhas de tendência de tais segmentos, ascendentes (recarga) ou descendentes (descarga), os padrões de

superposição que essas linhas adquirem perante as distintas propriedades hidráulicas de cada ambiente investigado, relativo à zona de entorno dos poços de monitoramento analisados.

A Figura 7 apresentada abaixo objetiva sintetizar o entendimento desse procedimento de análise, o qual foi executado para facilitar a interpretação das oscilações de NA em cada poço de monitoramento analisado pelos sensores, entendendo-se que o regime natural das oscilações de NA vão refletir o comportamento hidrodinâmico que se manifesta em cada compartimento aquífero, sendo assim, passíveis de interpretação, os padrões de recarga e de descarga típicos do domínio amostrado, através da análise semiquantitativa descrita a seguir.

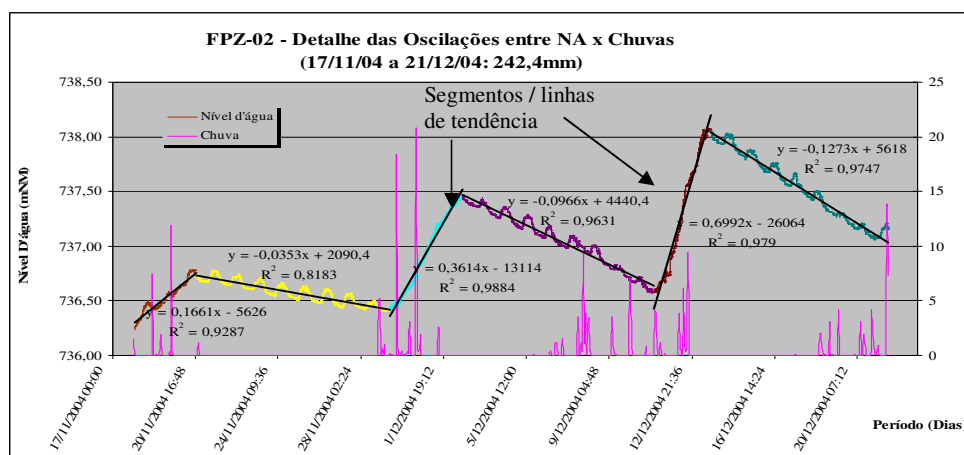


Figura 7 – Modelo utilizado na análise das oscilações de NA nos poços com sensores. Fonte: Pessoa (2005).

Foi possível compor para cada poço de monitoramento os gráficos correspondentes ao apresentado acima, a partir dos quais, puderam ser reconhecidas diversas variáveis envolvidas no processo de recarga e descarga durante o referido período de observação entre Out/04 e Jul/05, considerando-se as respectivas variações de NA e chuvas incidentes. Diante das informações coletadas nesses gráficos, gerou-se uma tabela síntese onde foi lançada para cada trecho individualizado como segmento de tendência, uma lista de dados relativos às principais variáveis que puderam ser extraídas através da configuração de cada segmento, sendo as mais importantes descritas a seguir:

- Número total de dias com chuva (TDChSeg): correspondente ao total de dias em que se verificou, pelo menos, um registro de precipitação, independente do volume precipitado em cada segmento.
- Número total de horas de chuva (THChSeg): somatória dos volumes de chuva medidos na estação climatológica, onde cada valor lançado é correspondente a uma hora de precipitação efetiva por segmento.

- Número total de dias do segmento (TDSeg): este valor corresponde a subtração da data final pela data inicial de cada segmento.
- Variação diária do NA (DDNASeg): resulta da diferença entre os valores final e inicial das cotas de NA para cada segmento.
- Volume total de chuvas (VChSeg): corresponde à somatória das precipitações horárias ao longo de cada segmento(mm).
- Média diária de chuvas (MChDSeg): refere-se à razão entre o total de dias de chuvas incidentes pelo número total de dias em cada segmento (mm/dia).
- Média horária de chuvas (MChHSeg): refere-se à razão entre o total de horas de chuvas incidentes pelo número total de horas de cada segmento (mm/hora).
- Fator de fluxo $(SVChSeg)_{Rec} / (SVChSeg)_{Desc}$: razão entre a somatória total das recargas (Rec) e descargas (Desc) representadas pela relação entre os volumes totais de chuva precipitada nos respectivos segmentos (VChSeg).
- Taxa de recarga / descarga horária: razão entre a variação total do NA pelo número de horas de chuva em cada segmento.

De acordo com as informações sobre as variações de NA coletadas ao longo do período de observação, gerou-se para cada poço de monitoramento, um gráfico completo, onde se verifica a configuração final dessas oscilações de NA e das precipitações pluviométricas. Estes gráficos estão apresentados a seguir, através das Figuras 8 a 13. Os parâmetros extraídos dos segmentos de recarga e descarga serviram à elaboração de uma planilha geral interpretativa, no sentido de se reconhecer, através das relações entre as diversas variáveis levantadas, os padrões de comportamento do sistema aquífero cárstico em análise.

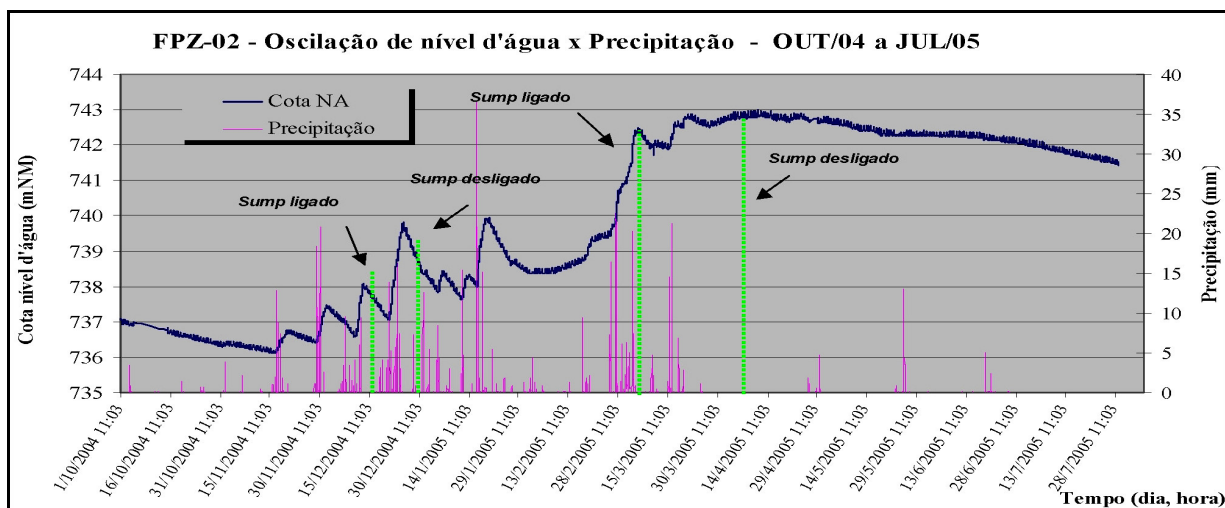


Figura 8 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-02

Fonte: Pessoa (2005).

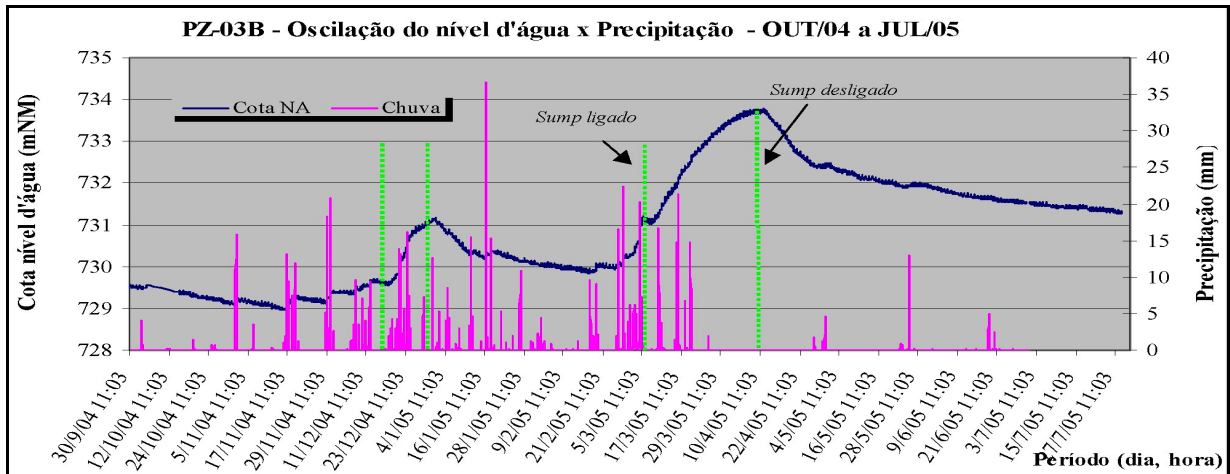


Figura 9 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-03B

Fonte: Pessoa (2005).

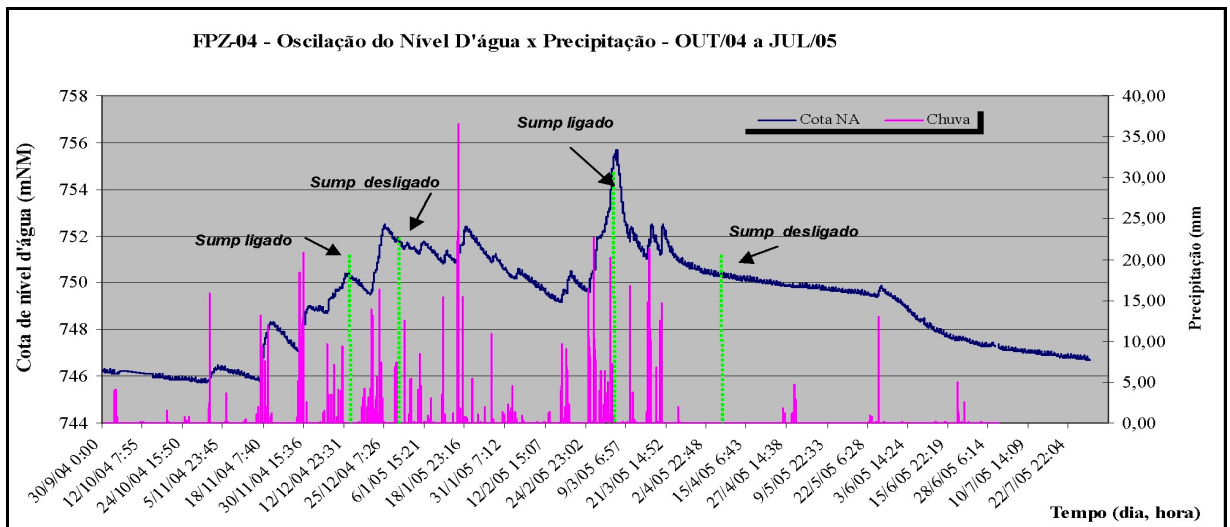


Figura 10 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-04

Fonte: Pessoa (2005).

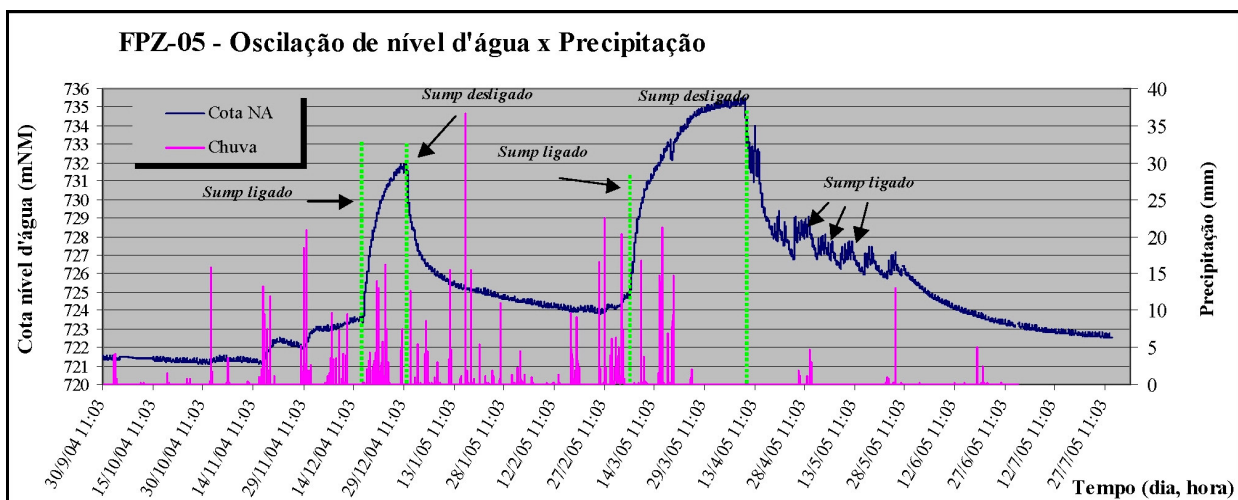


Figura 11 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-05
 Fonte: Pessoa (2005).

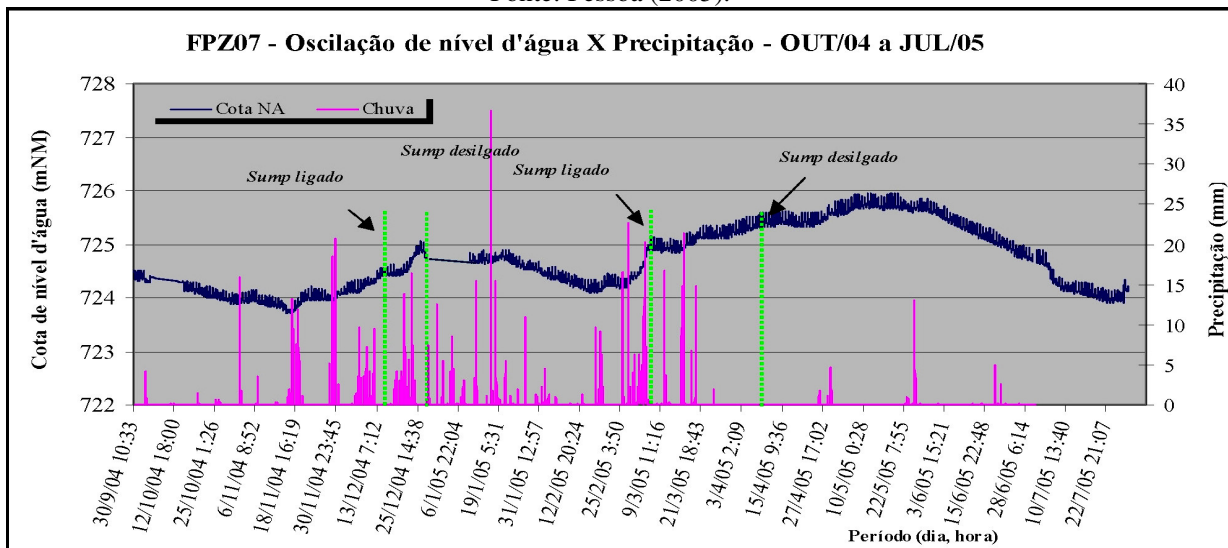


Figura 12 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-07
 Fonte: Pessoa (2005).

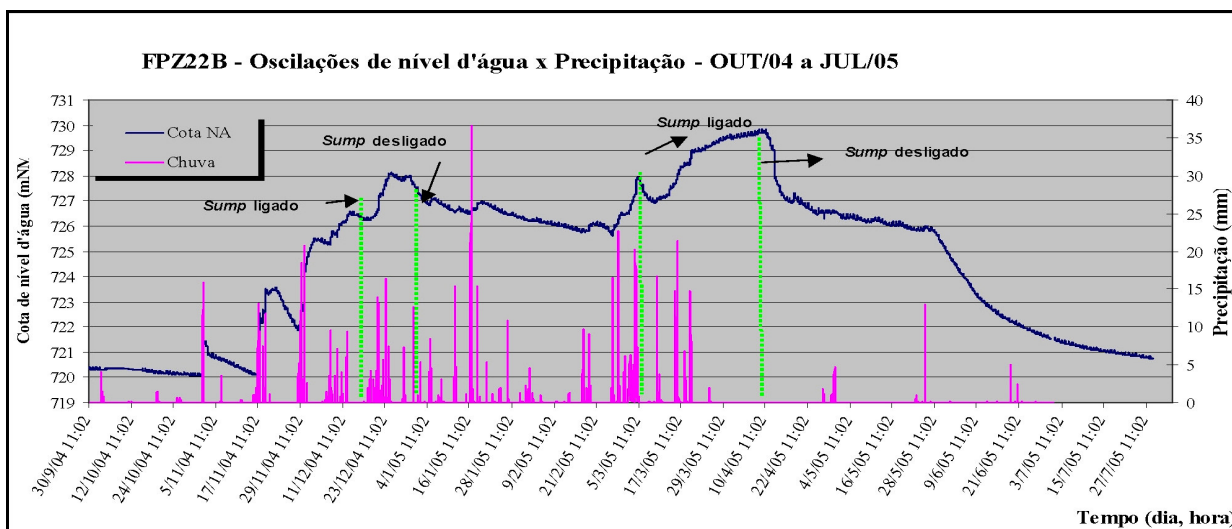


Figura 13 - Hidrograma das oscilações de nível d'água (NA) versus precipitações para o poço FPZ-22B
 Fonte: Pessoa (2005)

6. CONCLUSÕES

De acordo com os gráficos e dados acima apresentados, identifica-se na Tabela 3 a seguir, a síntese das variáveis que foram extraídas das tabelas de cada poço monitorado, correspondendo respectivamente, à separação entre dados de recarga (valores positivos) e dados de descarga (valores negativos).

Entendendo-se que o comportamento observado através desses resultados deve exprimir o condicionamento de uma área de abrangência relativamente restrita do entorno desses poços de monitoramento, conforme citado anteriormente, realizou-se uma análise de correlação entre os

principais parâmetros hidrodinâmicos encontrados numa tabela síntese, tendo sido assim identificados os locais onde essas correlações puderam apresentar similaridade de comportamento e, conseqüentemente, apontar quais domínios do aquífero estão governados por determinado padrão de fluxos; se por condutos, difusos ou mesmos por fluxos mistos.

Tabela 3 - Síntese das variáveis hidrodinâmicas calculadas para os segmentos de recarga e descarga ao longo do período entre Out/04 e Jul/05 em todos os poços de monitoramento

Identificação dos Poços	Número total de dias dos segmentos (TDSeg)		Número total de dias de precipitação (TDChSeg)		Volume Total de Chuvas no Segmento (mm) (VChSeg)		Média Diária de Chuvas no Segmento (mm/dia) (MDChSeg)		Média Horária de Chuvas no Segmento (mm/hora) (MHChSeg)		Variação do NA (m) (DDNASeg)	
	Rec	Desc	Rec	Desc	Rec	Desc	Rec	Desc	Rec	Desc	Rec	Desc
FPZ-02	69,44	231,52	42,00	76,00	678,70	537,90	12,51	3,99	2,21	2,03	13,75	-9,29
FPZ-03B	76,58	191,10	53,00	72,00	849,30	367,30	17,50	2,00	2,53	1,06	6,41	-4,63
FPZ-04	44,90	257,00	46,00	80,00	823,70	393,00	19,74	2,53	2,88	1,24	21,49	-21
FPZ-05	69,00	232,80	45,00	75,00	696,90	519,70	15,85	3,73	2,49	1,30	22,36	-21,31
FPZ-07	101,00	200,80	51,00	67,00	788,10	428,50	1,86	3,11	2,19	1,22	3,41	-3,68
FPZ-22B	70,16	231,73	49,00	77,00	867,30	350,10	17,02	1,65	2,48	0,85	16,86	-16,49

Fonte: Pessoa (2005) Obs.: Rec – recarga; Desc – descarga

Na tabela acima, os pares de dados apresentados para cada poço de monitoramento expressam a síntese dos quantitativos totalizados para os segmentos de recarga e descarga em todo o período de observação. Verifica-se que há diferenças entre os valores identificados na referida tabela, cujo significado está diretamente relacionado aos atributos intrínsecos dos aquíferos cársticos no entorno imediato dos poços de observação, segundo Bonacci (1987).

Como exemplo, verifica-se que a razão entre os totais de dias dos segmentos de recarga e de descarga varia entre 17 e 34%, para os poços FPZ-04 e FPZ-03B, respectivamente, sendo que para o volume total de chuva nos segmentos, observa-se uma variação nos índices de recarga percentualmente, de 56% e 71%, respectivamente aos poços FPZ-02 e FPZ-22B. Perante essas análises, ainda que extraídas empiricamente das tabelas acima, entende-se que o sistema reage, localmente, de maneira diferenciada, implicando numa nítida separação dos padrões de fluxos subterrâneos no sistema cárstico através de seus micro-regimes hidrodinâmicos.

Tais respostas do meio aquífero às ações dos eventos pluviométricos puderam ser distinguidas nos gráficos delineados pelos hidrogramas de NA em cada poço, tendo sido observados visualmente, pela análise dos padrões de configuração encontrados, ao menos dois grupamentos de poços, cujas oscilações de NA são delineadas por distintas condições de fluxos (recarga e descarga) em subsuperfície. Estes conjuntos referem-se aos seguintes domínios:

- Grupo 1: poços FPZ-02, FPZ-04 e FPZ-22B, em que a tipologia do hidrograma é configurada por um padrão agudo, caracterizado por reações rápidas do sistema às intervenções dos eventos pluviométricos, denotando, muito provavelmente a presença de

fluxos turbulentos em condutos. Contudo, a partir de uma certa taxa de saturação, dada a elevação das cotas de NA, mostra um comportamento mais suavizado do hidrograma, onde os segmentos passam a se comportar de maneira diferenciada em relação ao início das precipitações, momento este em que o sistema passa a se comportar através de fluxos em fissuras em regime laminar ou difuso.

- Grupo 2: poços FPZ-03B e FPZ-05, caracterizam-se por uma tipologia diferenciada das anteriores, embora mostrem-se conectados aos sistemas de bombeamento do *sump* de forma mais nítida. Comportam-se através de uma dinâmica mais ondulatória, quanto ao padrão de configuração de seus hidrogramas, denotando a presença de fluxos difusos sob regime laminar e, localmente, turbulento.

O poço FPZ-07 não pôde ser encaixado em nenhum dos grupos acima individualizados, em vista de que seu comportamento difere acentuadamente dos demais, exibindo pouca oscilação sazonal e fraca resposta aos eventos pluviométricos se comparados aos demais. Entende-se que o domínio de abrangência desse poço esteja isolado do sistema onde se encontram os demais, do ponto de vista hidrodinâmico.

Como forma de corroborar o exposto sobre a divisão dos grupamentos de poços descritos acima, é apresentada a seguir, uma figura esquemática das situações observadas quanto ao padrão das oscilações de NA caracterizados pelos seus respectivos hidrogramas. Trata-se de uma demonstração ilustrada sobre os tipos de comportamento esperado do hidrograma de NA, quando os poços perfurados incidem em zonas aquíferas cujos padrões de porosidade tenham sido reconhecidos. Em A, observa-se dois piezômetros perfurados em zonas fissuradas e de condutos, respectivamente, e, em B, o padrão típico de oscilação do NA após um determinado evento de precipitações pluviométricas para os dois poços mostrados em A, verificando-se, no segundo, a resposta mais aguda do padrão de contorno do hidrograma.

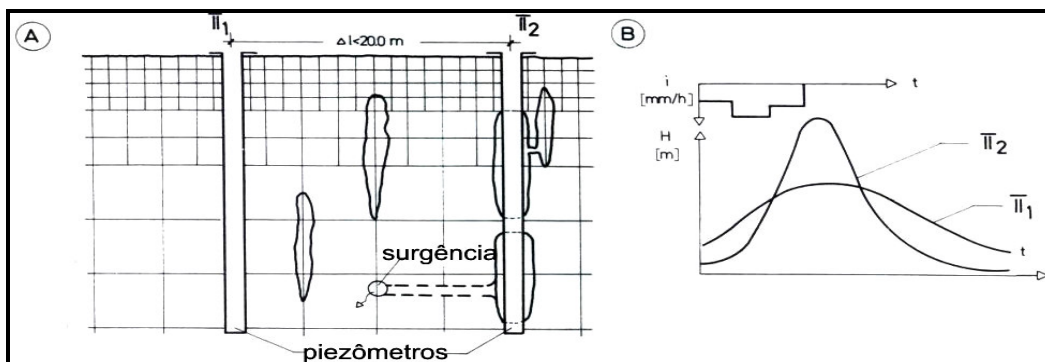


Figura 14 – Variações na forma do hidrograma do NA em poços de monitoramento separados por cerca de 20 m de distância, em função de distintas zonas de porosidade no maciço carbonático (Bonacci, 1987).

Buscando-se os elementos necessários à avaliação do nível de correlação que possa existir diante dos parâmetros apresentados na Tabela 4, calcularam-se as razões entre os totais de recarga e descarga apresentados em cada poço de monitoramento.

Tabela 4 – Razões entre totais de recarga e descarga por parâmetro hidrodinâmico calculado

Poços	$\frac{(TDSeg)_{Rec}}{(TDSeg)_{Desc}}$	$\frac{(TDChSeg)_{Rec}}{(TDChSeg)_{Desc}}$	$\frac{(VChSeg)_{Rec}}{(VChSeg)_{Desc}}$	$\frac{(MDChSeg)_{Rec}}{(MDChSeg)_{Desc}}$	$\frac{(MHChSeg)_{Rec}}{(MHChSeg)_{Desc}}$	$\frac{(DDNAseg)_{Rec}}{(DDNAseg)_{Desc}}$
FPZ-02	0,300	0,553	1,262	3,135	1,089	1,480
FPZ-03B	0,401	0,736	2,312	8,750	2,387	1,384
FPZ-04	0,175	0,575	2,096	7,802	2,323	1,023
FPZ-05	0,296	0,600	1,341	4,249	1,915	1,049
FPZ-07	0,503	0,761	1,839	0,598	1,795	0,927
FPZ-22B	0,303	0,636	2,477	10,315	2,918	1,022

Como observado na Tabela 5, verifica-se uma correlação fortemente positiva entre os fatores determinados pelas razões de recarga e descarga dos poços FPZ-02, FPZ-03B, FPZ-04, FPZ-05 e FPZ-22B, com exceção do poço FPZ-07, que não manteve correlação nenhuma com os demais.

Entende-se que os domínios abrangidos pelos respectivos poços, através de suas respostas de variação do NA, para o período avaliado entre Out/04 e Jul/05, demonstram corresponder a um mesmo sistema aquífero cárstico, interconectado hidráulicamente, e regidos pelos mesmos mecanismos de controle de seu comportamento hidrodinâmico, os quais se apresentam, em termos de sua área de captação, condicionadas pelas mesmas características hidrogeológicas.

Tabela 5 - Resultados das análises de correlação ente os fatores de Rec/Desc apontados na tabela anterior

Poços	FPZ-02	FPZ-03B	FPZ-04	FPZ-05	FPZ-07	FPZ-22B
FPZ-02	1,0000					
FPZ-03B	0,9522	1,0000				
FPZ-04	0,9456	0,9987	1,0000			
FPZ-05	0,9465	0,9848	0,9900	1,0000		
FPZ-07	-0,0928	-0,1392	-0,0975	-0,0221	1,0000	
FPZ-22B	0,9351	0,9983	0,9992	0,9868	-0,1224	1,0000

No entanto, quando analisadas em maior detalhe as condições do entorno imediato dos poços monitorados, percebe-se nitidamente a presença de feições características de aquíferos cársticos mais desenvolvidos, cuja geometria pode ser retratada, em parte, pelos padrões de configuração do hidrograma de NA. Outra questão a ser abordada no referido contexto de análise, resulta das interferências do bombeamento do *sump* para o interior do sistema, cujas manifestações foram assinaladas nos gráficos de hidrogramas apresentados anteriormente.

Ficou evidente ao longo das discussões sobre as interpretações das oscilações de NA, que esta ferramenta induzida de análise pôde comprovar a existência de uma intrincada rede de fissuras e condutos, através das quais, quase todo o sistema aquífero cárstico se comunica, observada pelos registros mais detalhados obtidos em tempo real pelos transdutores de pressão.

Ficou evidenciada, ainda, uma conexão mais rápida entre o sumidouro e alguns poços de monitoramento, como o FPZ-05, por exemplo, que em questão de alguns minutos tem seu NA elevado e, o poço FPZ-03B, que após três dias começa a apresentar a elevação de seu NA. Da mesma maneira que neste último, o poço FPZ-22B tem seu NA elevado apenas, após 4 dias do acionamento do *sump*. Esses atrasos na comunicação hidráulica do sistema cárstico devem-se, essencialmente, aos fatores relacionados ao gradiente hidráulico local e às condições geométricas de condutos e fissuras no interior do maciço carbonático. Dessa forma, o poço FPZ-03B que se encontra a montante do sumidouro, a cerca de 850 m de distância em linha reta, acusa a elevação do NA antes do poço FPZ-22B que se situa a 350 m de distância do sumidouro.

Essas observações, assim como as que forneceram dados para a análise de conexão hidráulica entre o sumidouro e poços situados a cerca de 1500 m a montante do mesmo, têm também um outro significado importante que deve ser levado em consideração, o qual pode ser melhor explicado, observando-se o hidrograma de NA do poço FPZ-05.

Neste caso encontra-se a mais nítida detecção de acionamento do *sump* no referido poço. Contudo, como se observa em seu hidrograma de NA, nos dois momentos em que o *sump* foi acionado (17/12/04 a 29/12/04 e 07/03/05 a 10/04/05), percebe-se que em função dos distintos períodos em que o mesmo permaneceu ligado, as cotas de NA atingidas são diferentes entre si, sendo a primeira mais baixa, em torno de 732 mNM, e a segunda em torno de 736 mNM, tendo sido para sua elevação permanecido ligado durante 34 dias. Dessa maneira, quando observadas as situações de gradiente hidráulico entre os poços vizinhos à cava, somente nesse segundo momento, é que se torna possível uma inversão do gradiente hidráulico, para que os fluxos possam então se direcionar para NW, situação de montante.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bonacci, O. (1987).** Karst Hydrology, with special reference to the Dinaric Karst. Springer-Verlag. 184p.
- Custódio, E. & Llamas, M. R. (1976).** Hidrologia Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, Primera Edición.
- Fetter, C.W. (1994).** Applied Hydrogeology. Third Edition. Prentice Hall.NJ.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979).** Groundwater. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Freitas, S.R.C de & Cordini, J. (1998).** Implicações Geodinâmicas no Posicionamento Geodésico. B. Ci. Geodésicas, Curitiba, v. 3, p.82-84.

- Kiang, C.H. & Neto, D. C. (2006).** Automação no monitoramento de águas subterrâneas. In: I Simpósio Latino Americano de Monitoramento das Águas Subterrâneas. Belo Horizonte/MG. (CD ROM).
- Milanović, P.T. (1976).** Water regime in deep karst. Case study of the Ombla spring drainage area. In: Karst hydrology and water resources, Water Resource Publications, Fort Collins, p.165-191.
- Ribeiro, J.H.; Tuller, M.P.; Filho, A. D.; Padilha, A. V.; Córdoba, C. V. (2003).** Projeto VIDA: mapeamento geológico, relatório final, escala 1:50.000. 2ª ed.; Belo Horizonte: CPRM, 54p.
- 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.
- Teutsch, G., & Sauter, M. (1991).** Groundwater modeling in karst terranes: Scale effects, data acquisition and field validation. Proc. Third Conf. Hydrogeology, Ecology, Monitoring, and Management of Ground Water in Karst Terranes, Nashville, TN, 17-35.
- Todd, D.K. (1959).** *Groun Water Hydrology*. John Wiley & Sons, New York.
- 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.

AGRADECIMENTOS

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