



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS IBAMA

DIRETORIA DE ECOSISTEMAS – DIREC

CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS – CECAV

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - PNUD



PRODUTO 06

TERMO DE REFERÊNCIA Nº 119701

ANDRÉ LUIZ DE MOURA CADAMURO
CONSULTOR TÉCNICO, GEÓLOGO - CECAV/IBAMA
CONTRATO Nº 2006/000372

**RELATÓRIO SOBRE O PROCESSO DE EXECUÇÃO DE ENSAIOS
QUANTITATIVOS DE INTERFERÊNCIAS FÍSICAS NO AQUÍFERO
COM POTENCIAL DE PRESSÃO SOBRE AS GRUTAS NA REGIÃO
DA ÁREA DA BACIA DO SÃO FRANCISCO.**

Dezembro de 2007



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Relatório sobre o processo de execução de ensaios quantitativos de interferências físicas no aquífero com potencial de pressão sobre as grutas na região da área da Bacia do São Francisco, elaborado.

1. INTRODUÇÃO

No contexto ambiental da Zona Cárstica de Pains – MG, várias são as pressões antrópicas exercidas sobre as cavidades naturais, sistemas espeleológicos e sistemas aquíferos. Neste compartimento do carste, destaca-se a região onde está inserido o Sistema Espeleológico da Gruta do Éden.

Em termos hidrogeológicos outras regiões também poderiam ser apontadas como áreas de destaque no carste, entretanto, no que se refere à questão espeleológica, a região do Sistema Éden é, de toda a referida zona cárstica, a que abrange as características hidrogeológicas mais relevantes e também uma significativa gama de conflitos ambientais que motivaram o desenvolvimento de estudos do meio físico capazes de permitir a delimitação de uma área de influência mínima, já caracterizada. De uma maneira geral, a área de influência como um todo, considerando seus aspectos espeleológicos e hidrogeológicos, é de uma relevância ímpar para o desenvolvimento sócio-econômico e ambiental do município de Pains – MG.

Desta forma, a área de influência delimitada para o Sistema Éden serve como uma região piloto de estudos hidrogeológicos, nos permitindo avaliar os diversos tipos de pressões antrópicas e respectivas conseqüências físicas sobre este e outros sistemas espeleológicos.

Foram levantadas várias pressões antrópicas na área de influência do Sistema Éden, dentre as quais, várias interferências físicas foram abordadas de forma qualitativa, havendo significativas possibilidades de alterações na integridade física do sistema aquífero cárstico local e conseqüentemente, na história genética e evolutiva do Sistema Éden. É sobre essas alterações, que este Produto tem por objetivo a execução de ensaios quantitativos e a avaliação dos resultados destes ensaios, buscando a verificação das reais possibilidades de interferência física no sistema aquífero, capaz de provocar conseqüentes impactos às cavidades naturais do Sistema Éden.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Devido às diversas limitações de execução de ensaios quantitativos, buscou-se então a abordagem de apenas um, dentre os diversos tipos de pressão antrópica com interferências físicas, já abordadas em outros produtos. Este produto aborda de forma quantitativa, baseado em testes de bombeamento em poços tubulares dentro da área de influência, possíveis situações de bombeamentos excessivos da água subterrânea, com exploração indiscriminada do manancial e conseqüente alteração das condições naturais de circulação hídrica nas cavidades.

Vários são os danos ambientais que este tipo de pressão antrópica pode causar sendo possível citar, como exemplo: o rebaixamento do nível potenciométrico dos aquíferos, a indução de recargas indesejadas, com aceleração da contaminação da água subterrânea e superficial, a modificação da condição freática ou vadosa, com alteração da dinâmica hídrica nas cavidades naturais, as alterações na carstificação e formação de espeleotemas dentro das cavernas; a redução do ambiente natural de desenvolvimento de uma ou mais espécies animais e conseqüente desequilíbrio ecológico; a diminuição das vazões subterrâneas e superficiais; a subsidência (abatimento) de terrenos, podendo causar problemas nas fundações das construções; a interrupção e/ou modificação da circulação hídrica natural do carste, com o aumento da vulnerabilidade natural no sistema aquífero cárstico e etc.

Atualmente, na área de influência do Sistema Éden, assim como em toda a Zona Cárstica de Pains, o uso da água subterrânea restringe-se principalmente ao abastecimento humano de água potável, havendo também, em menor escala, o uso da água subterrânea em alguns processos industriais e de atividade mineraria. Todavia, frente ao acelerado processo de extração mineral de calcário e aos diversos conflitos ambientais envolvendo o tipo de lavra atualmente desenvolvido na região, em médio prazo deve-se esperar a extração de calcário com a execução de rebaixamento da superfície potenciométrica do aquífero buscando viabilizar novos recursos minerais mais profundos sem maiores problemas ambientais. Outra possibilidade, em médio prazo, para a região é a implantação de monoculturas específicas, como soja e cana de açúcar, devido a políticas federais de desenvolvimento econômico, que certamente vão contar unicamente com a água subterrânea como manancial para irrigação.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Essas atividades podem causar grandes alterações na quantidade e qualidade do manancial subterrâneo, sendo expressivo os volumes diários de uso da água subterrânea para manutenção deste tipo de agricultura ou mineração. Desta forma justifica-se a seleção do bombeamento da água subterrânea, como atividade antrópica potencialmente impactante, sob o ponto de vista físico, para visualização preventiva de possíveis cenários de pressão antrópica com avaliação quantitativa dos potenciais impactos, e por fim algumas sugestões de formas de gestão dos prováveis conflitos ambientais.

2. CONSIDERAÇÕES BASICAS SOBRE A HIDROGEOLOGIA CÁRSTICA

O armazenamento e a circulação da água subterrânea no carste ocorrem por meio dos aquíferos cársticos e fissuro-cársticos. Do ponto de vista hidrogeológico considera-se como aquífero cárstico todo o pacote de rochas carbonáticas, incluindo aspectos exógenos e endógenos, capaz, simultaneamente, de armazenar e transmitir a água, dentro do quadro do ciclo hidrológico. Nesse aspecto a caverna, ou cavidade natural, faz parte da porosidade secundária que possibilita esse armazenamento e circulação hídrica. A movimentação das águas subterrâneas nesses tipos de aquíferos ocorre através dessas cavidades naturais, dos condutos, galerias e descontinuidades, como as fraturas das rochas constituintes do aquífero, abrangendo tanto a porção saturada quanto insaturada de água.

Segundo Karman (2001), os aquíferos de condutos (como também podem ser chamados os aquíferos cársticos) caracterizam-se pela porosidade cárstica*, constituída por uma rede de condutos, com diâmetros milimétricos a métricos, gerados pela dissolução de rochas carbonáticas. Os aquíferos carbonáticos, segundo Fetter (1994) mostram uma larga variação nas características hidrológicas. Em termos hidrogeológicos, um carste apresenta-se como um meio anisotrópico, onde as propriedades do aquífero são variáveis, até mesmo em poucos metros de distância.

Conforme Costa & Silva (2000), a caracterização do sistema hidráulico desses tipos de aquíferos são dificultadas pela aleatoriedade da dissolução cárstica e fraturamento das rochas carbonáticas, que condicionam a circulação e o armazenamento das águas

* A porosidade cárstica é um tipo de porosidade secundária, ou seja, desenvolve-se na rocha após a sua formação por meio da dissolução das rochas carbonáticas aproveitando feições primárias como fraturas ou planos de acamamento da mesma.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

subterrâneas. Todavia, apesar dessa aparente aleatoriedade mencionada pelos autores, sempre há um padrão de dissolução cárstica bem definido, sendo possível individualizar zonas cársticas distintas, isso ocorre devido ao controle estrutural e hidráulico que condicionam as misturas de água e a circulação hídrica.

Dentre as principais peculiaridades hidrogeológicas dos aquíferos cársticos pode-se destacar (Costa & Silva, 2000):

- Grande rapidez da infiltração das chuvas e outras águas superficiais;
- Anomalias na direção do fluxo de água com relação ao gradiente potenciométrico regional;
- Grande diferença entre a média e a mediana da distribuição estatística dos valores de permeabilidade em um mesmo aquífero (parâmetros com valores anisotrópicos);
- Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, como o coeficiente de armazenamento (S) e transmissividade (T) com valores bastante variáveis dentro de um mesmo aquífero cárstico (anisotropia).

Segundo UT (2006), o sistema cárstico apresenta de forma geral alguns elementos hidrológicos principais (figura 1). Uma parte do armazenamento e/ou circulação da água pode ser feita nas fraturas e na matriz porosa da rocha, quando houver; ou através do sistema de condutos, desenvolvido por meio da dissolução de planos preferenciais, ou por um misto dos dois, fraturas e condutos.

O sistema de condutos é muito mais permeável do que o sistema fissural e a matriz porosa. As cavernas são formadas na intersecção e sobreposição desses condutos, em pontos de mistura de diferentes águas, com diferentes concentrações hidroquímicas. Pode-se considerar também, que uma determinada caverna possui uma rede de condutos e galerias que a constituem, ou até mesmo, que é constituída de um único conduto ou galeria. O mais importante é que a união dessas porosidades cársticas, ou seja, a interconexão dessas aberturas é responsável pela manutenção e evolução genética dos ambientes espeleológicos.

A recarga dos aquíferos num carste pode ocorrer de forma difusa por meio da infiltração da água da chuva nos solos e de forma concentrada através de pontos de coleta



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

d'água, como dolinas, uvalas e outras feições cársticas, que dão acesso indireto ou direto à rede de condutos e cavernas vadasas que, por sua vez, dão acesso à água para circular na zona insaturada (vadosa) e alcançar a zona saturada (freática). Uma vez alcançada a superfície de água subterrânea (*water table*), a água, através da mesma rede de condutos e cavernas freáticas, agora segue caminho em função dos gradientes hidráulicos locais e regionais até alcançar as áreas de descarga, em níveis de base locais e regionais, como lagoas e rios.

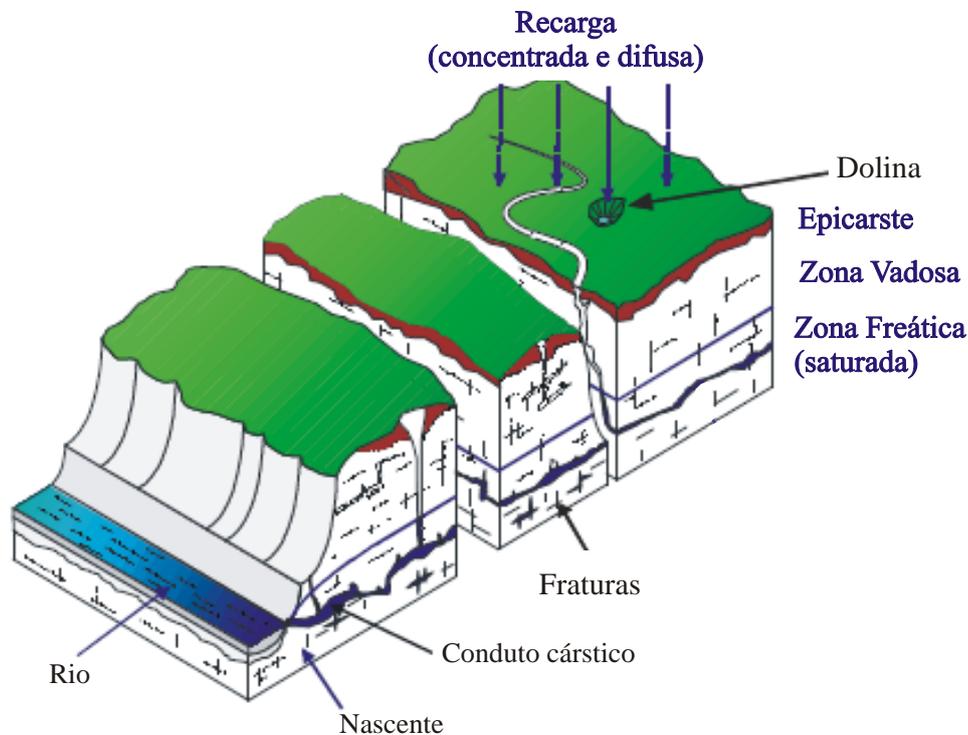


Figura 1 – Esquema geral dos sistemas de recarga, armazenamento e circulação de água nos carstes. Modificado de: UT (2006).

Os meios carbonáticos carstificados normalmente são tidos como os meios rochosos de mais alta condutividade hidráulica (alta circulação e descarga), com valores entre 10^{-5} e 10^{-1} m/s, perdendo apenas para depósitos inconsolidados, como conglomerados. São meios rochosos que podem possuir simultaneamente baixa e alta descarga (drenagem pobre e livre).



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Devido a suas características hidrodinâmicas o carste, ou uma zona cárstica, é um ambiente de elevada vulnerabilidade natural, tanto sob o ponto de vista de interferências físicas quanto da qualidade das águas subterrâneas. Tal como o meio onde está inserida, a caverna também passa a ser um ambiente altamente vulnerável, assim como a tudo o que nela se desenvolve.

3. ANÁLISE E INTERPRETAÇÕES DOS TESTES DE BOMBEAMENTO

Atualmente o principal uso da água subterrânea e superficial na Zona Cárstica de Pains tem sido bastante restrito, podendo até mesmo ser considerado insignificante. A subutilização do manancial consiste no aproveitamento, quase que exclusivo, para abastecimento humano em sedes municipais, distritais, vilas, bairros e pequenos núcleos rurais, onde a extração é executada através de captações do tipo poços tubulares profundos, cisternas e captações diretas em fontes e surgências cársticas.

A mineração, base econômica da região é o setor que mais utiliza a água subterrânea através de poços tubulares profundos para diversos fins no processo de produção industrial da cal e manutenção geral das áreas de extração mineral. Ainda assim, ainda são baixos os volumes explorados de água subterrânea, não havendo significativos rebaixamentos do nível da superfície potenciométrica capazes de promoverem impactos ao carste e às cavidades naturais.

A agricultura, essencialmente representada pelo cultivo de milho, quase não utiliza a água subterrânea, uma vez que é desenvolvida exclusivamente sob a forma de sequeiro.

Apesar da forma como atualmente vêm sendo executadas as frentes de lavra na região de Pains e Dorisópolis e do baixo custo deste tipo de extração mineral, quando comparadas a outros métodos de lavra, se espera, que em médio prazo a tendência seja a substituição dos desmontes de maciços expostos por lavras bem planejadas, a céu aberto, com rebaixamento de lençol, viabilizando a extração de rochas carbonáticas mais profundas. Esta também é uma boa alternativa de preservação da paisagem cárstica, onde a modificação da paisagem natural tem sido o principal problema ambiental causado pela atividade mineraria da forma como vem sendo executada na região.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Outra tendência como alternativa econômica para a região é o incentivo à atividade agrária de monoculturas, tais como a soja e a cana de açúcar, principalmente devido às políticas de produção de biocombustíveis do Governo Federal. De qualquer forma, em ambas possibilidades, lavras com rebaixamento do lençol freático e monoculturas, haverá o incremento do uso da água subterrânea, que é o único manancial disponível para o desenvolvimento destes setores, sendo indispensável à previsão de situações e cenários de conflitos ambientais resultantes da exploração excessiva do manancial, com impactos físicos no sistema aquífero cárstico e nos sistemas espeleológicos existentes.

Dentro deste contexto, inicialmente o objetivo deste produto foi executar, um ou mais, ensaios de bombeamento de água subterrânea para observação direta do rebaixamento do nível da superfície potenciométrica em um poço de observação. A intenção era também observar, se possível, em alguma cavidade natural próxima do ponto de bombeamento, a interferência física do rebaixamento na dinâmica hídrica da caverna. Entretanto, não foi possível a localização de uma área com as condições logísticas e operacionais adequadas, que atendessem aos requisitos básicos de execução de ensaios de bombeamento, isso devido à atual característica das lavras de calcário na região, onde não há lavras que executam procedimentos de rebaixamento do lençol.

Para prever situações de rebaixamento da superfície potenciométrica no carste e manter o objetivo do trabalho, uma vez que não foi possível a observação direta do rebaixamento em condições de alta vazão, este trabalho utilizou os resultados dos testes de vazão, executados para efeito de obtenção de outorgas de uso da água subterrânea, nas captações do tipo poços tubulares profundos do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) do município de Pains-MG.

Os testes de vazão foram executados sob a forma de bombeamento contínuo de água, com vazão constante, durante um período de 24 (vinte e quatro) horas, com monitoramento sistemático do rebaixamento e da recuperação do nível estático após o término do bombeamento. Os poços utilizados, suas características construtivas e as vazões de teste de aquífero estão listados na tabela 3.1. A partir dos dados de vazão e rebaixamento do nível dinâmico em todos os poços utilizados foram calculados os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, nas suas respectivas imediações.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Tabela 3.1 – Características construtivas disponíveis dos poços tubulares profundos do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) do município de Pains-MG. Dados fornecidos pelo SAAE de Pains.

DADOS CONSTRUTIVOS	P. ALVORADA	P. MINA	P. CARVÃO	P. SUMIDOURO
Vazão de Teste (m ³ /h)	15,25	8,08	12,21	11,83
Profundidade Total do Poço	100m	100m	100m	80m
Diâmetro Útil	150mm	100mm	150mm	150mm
Profundidade de Revestimento	5,70m	50m	6m	17,5m
Profundidade Total da Coluna do Filtro	0	50m	0	0
Profundidade das Entradas de Água (Faturas ou Condutos aproveitados)	26m e 58m	NC	NC	NC
NC – não consta nos arquivos do SAAE/Pains-MG				

Com os parâmetros calculados para os poços do Distrito de Mina e do bairro de Alvorada, localizados dentro da área de influência mínima do Sistema Éden, foi possível fazer algumas previsões e simulações do rebaixamento em condições de exploração a altas vazões, calculando a área de abrangência dos possíveis cones de depressão em cada poço. O objetivo é ter parâmetros mínimos de referência para previsão do tamanho da área de abrangência de possíveis cones de depressão em função das vazões de exploração executadas. Com estes parâmetros de referência podem-se prever possíveis condições de interferência física do rebaixamento do lençol em condutos freáticos e da superfície potenciométrica.

Para as outras captações dos distritos Carvão e Sumidouro, localizadas fora da área de influência mínima do Sistema Éden, o objetivo foi apenas levantar os parâmetros hidrodinâmicos e corroborar com uma melhor amostragem das diferentes formas de circulação hídrica natural do meio anisotrópico, vislumbrando se realmente há significativas variações das características hidrogeológicas no carste da região.

A seguir são apresentados os gráficos de rebaixamento versus tempo, primeiramente para os poços Mina e Alvorada (figura 02) e posteriormente para os poços Carvão e Sumidouro (figura 03). Na tabela 3.2 são apresentados os resultados dos valores calculados para condutividade hidráulica (K - m/s), transmissividade (T - m²/s) e coeficiente de armazenamento (S) nos poços do SAAE de Pains.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

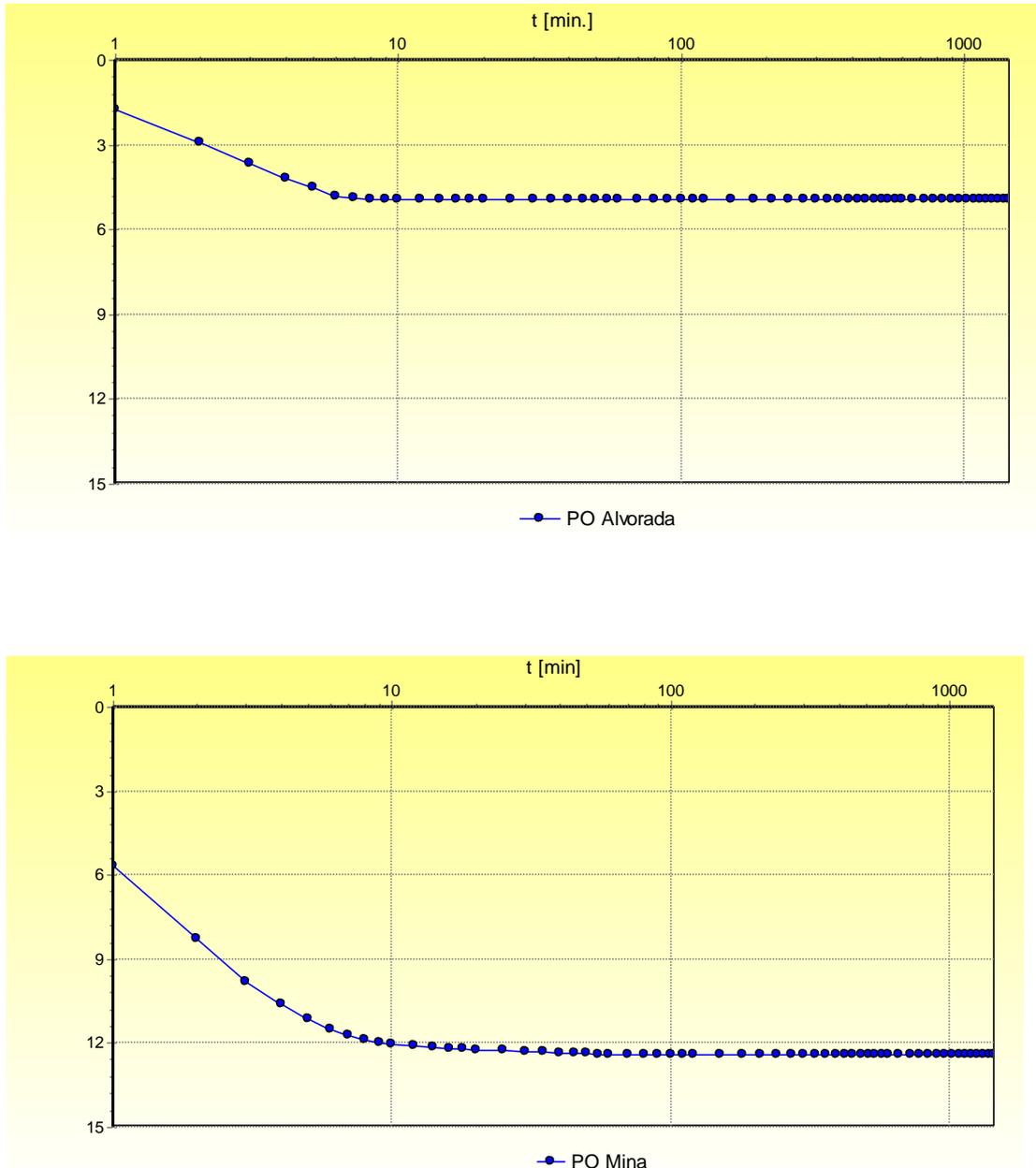


Figura 02 – Gráficos de rebaixamento versus tempo dos poços Alvorada e Mina, respectivamente. Observa-se um rebaixamento significativamente maior, durante o mesmo período de tempo, no poço tubular profundo do Distrito Mina. Ambos os bombeamentos entram em regime permanente quando submetidos a bombeamentos com vazões iguais àquelas utilizadas no teste de aquífero.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

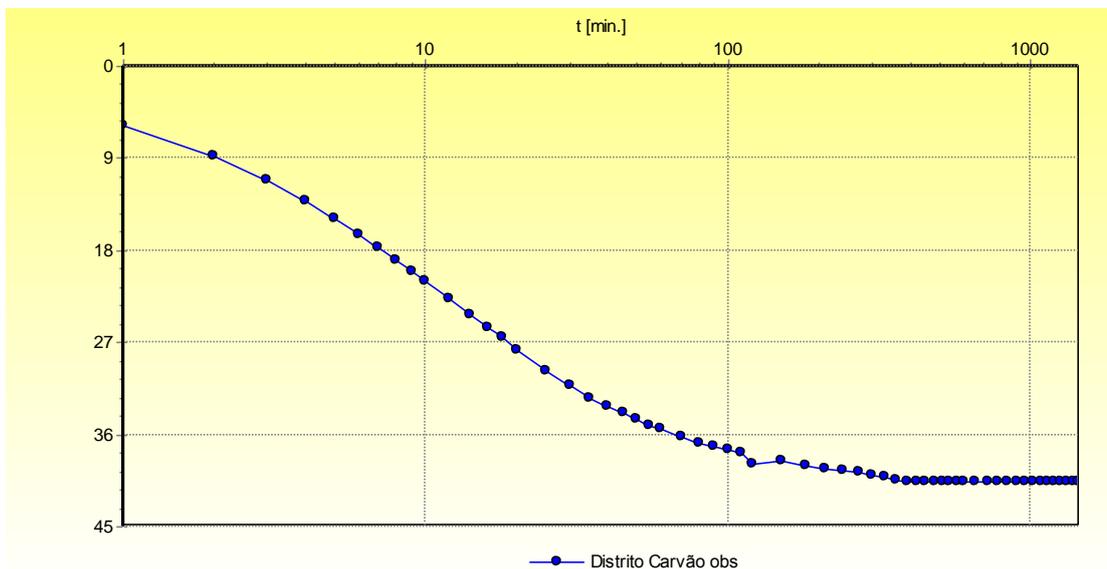
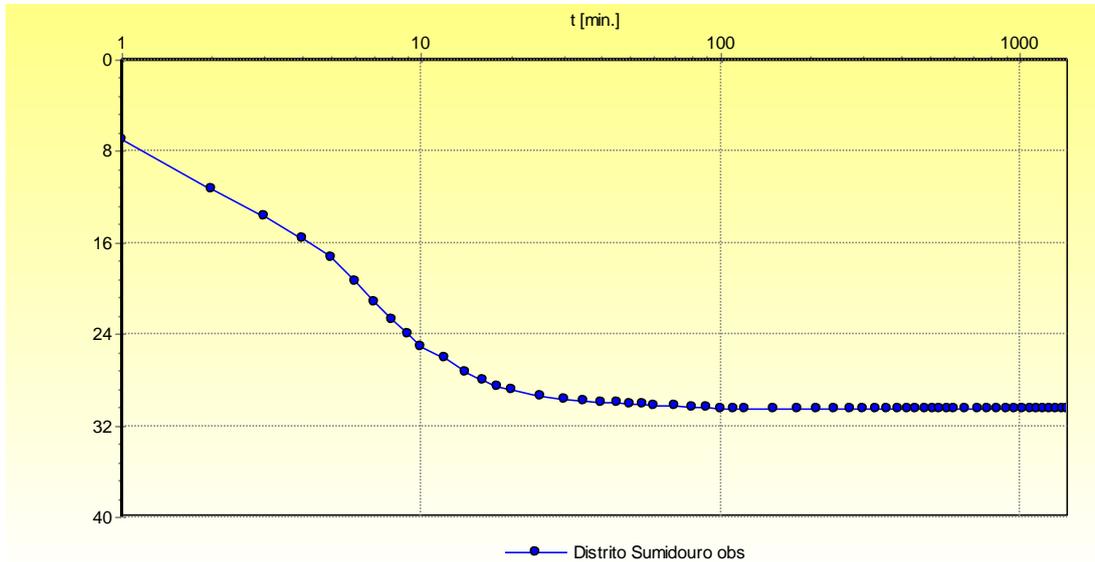


Figura 03 – Gráficos de rebaixamento versus tempo dos poços Sumidouro e Carvão, respectivamente. Observa-se um rebaixamento significativamente maior, durante o mesmo período de tempo, no poço tubular profundo do Distrito Carvão, onde o cone de rebaixamento evolui progressivamente por mais tempo (~600min.), permanecendo o aquífero durante mais tempo num regime transitório até entrar em regime permanente. Ambos os bombeamentos entram em regime permanente quando submetidos a bombeamentos com vazões iguais àquelas utilizadas no teste de aquífero.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Tabela 3.2 – Valores dos parâmetros hidrodinâmicos do(s) aquífero(s) nas imediações dos poços tubulares profundos do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) do município de Pains.

PARÂMETRO CALCULADO	P. ALVORADA	P. MINA	P. CARVÃO	P. SUMIDOURO
Transmissividade T (m ² /s)	$5,83 \cdot 10^{-04}$	$1,48 \cdot 10^{-04}$	$4,79 \cdot 10^{-05}$	$6,23 \cdot 10^{-05}$
Condutividade Hidráulica K (m/s)	$1,07 \cdot 10^{-05}$	$1,67 \cdot 10^{-06}$	$5,02 \cdot 10^{-07}$	$8,08 \cdot 10^{-07}$
Coefficiente de Armazenamento S	$1,66 \cdot 10^{-01}$	$8,02 \cdot 10^{-03}$	$1,28 \cdot 10^{-01}$	$7,99 \cdot 10^{-02}$

Os parâmetros foram calculados a partir dos dados de rebaixamento do nível dinâmico, vazão e tempo de bombeamento fornecido pelo SAAE de Pains. Para análise e interpretação dos testes de aquífero utilizou-se o *software* Aquifer Test Pro vs 3.5 da *Waterloo Hydrogeologic*. Como os poços foram construídos em aquíferos fraturados e fraturados com carstificação, foi utilizado o método de **Moench** para fluxo em fraturas, considerando os aquíferos com sendo confinados.

Apenas com os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero é possível a elaboração de previsões para o tamanho da área de projeção horizontal do cone de rebaixamento da superfície potenciométrica naquele ponto de bombeamento. Para isso, ou seja, previsão da zona de influência da captação durante os bombeamentos executados nos testes de vazão, assim como a simulação de possíveis cones de rebaixamento em situações extremas de bombeamento, vazões capazes de secar os poços tubulares profundos, foi utilizada o método de previsão de **Theis**, que calcula o rebaixamento e o raio do cone de depressão em função da vazão e do tempo de bombeamento.

Essas previsões da zona de influência da captação, com vazões de exploração nas condições atuais de operação, e simulações, com altas vazões de exploração, foi executada apenas nas captações do Distrito de Mina e do bairro residencial de Alvorada, haja vista, essas captações estarem localizadas dentro do limites da área de influência mínima do Sistema Éden.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

A seguir são apresentados, respectivamente, nas figuras 04 e 05, os gráficos das previsões de Theis para o raio do cone de depressão nas captações de Mina e Alvorada, em condições de operação atual e de altas vazões.



Figura 04 – Gráficos de rebaixamento versus distância do raio do cone de depressão para um bombeamento de 24 horas consecutivas. O primeiro gráfico mostra o rebaixamento e a distância do raio para condição atual de operação do poço de Mina ($Q = 8,08\text{m}^3/\text{h}$) e o segundo gráfico mostra a simulação de como seria o rebaixamento e a distância do raio para uma condição de operação de alta vazão ($42,5\text{m}^3/\text{h}$) no mesmo poço, suficiente para secar o poço.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

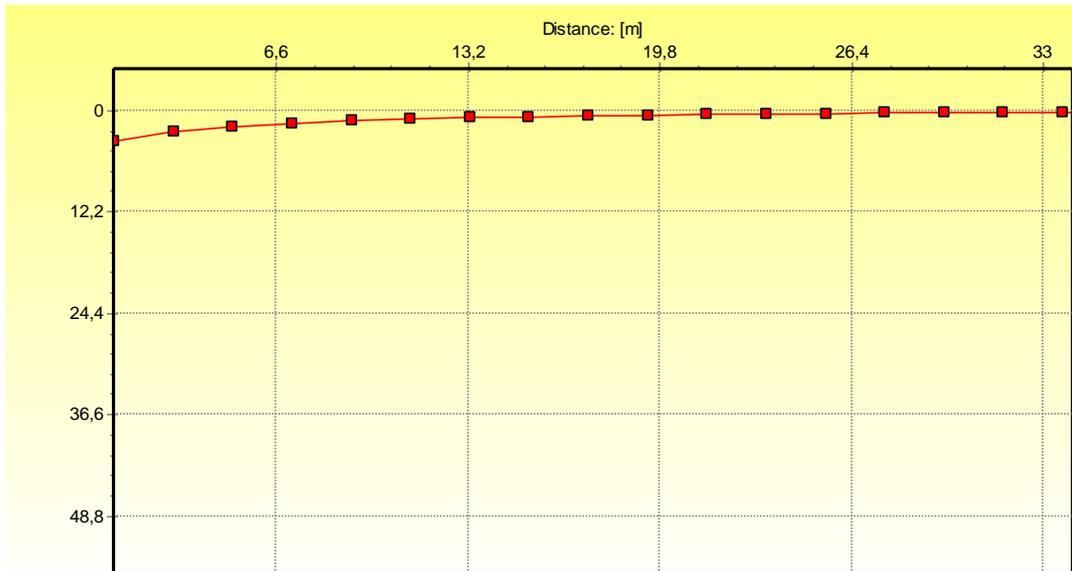


Figura 05 – Gráficos de rebaixamento versus distância do raio do cone de depressão para um bombeamento de 24 horas consecutivas. O primeiro gráfico mostra o rebaixamento e a distância do raio para condição atual de operação do poço de Alvorada ($Q = 15,25\text{m}^3/\text{h}$) e o segundo gráfico mostra a simulação de como seria o rebaixamento e a distância do raio para uma condição de operação de alta vazão ($225\text{m}^3/\text{h}$) no mesmo poço, suficiente para secar o poço.

A tabela 3.3 mostra o resumo dos resultados das previsões e simulações dos cones de depressão em diferentes condições de operação, bem como as zonas radiais de influência das captações no Distrito de Mina e no bairro de Alvorada.



Tabela 3.2 – Valores dos raios e zonas de influência do cone de rebaixamento do lençol para diferentes condições de exploração de água nos poços tubulares profundo de Mina e Alvorada, dentro dos limites da área de influência mínima do Sistema Éden.

POÇO	Condição de exploração	Vazão (m ³ /h)	Tempo de exploração (h)	s (m)	Raio do cone (m)	Zona de influência (m ²)
MINA	Vazão atual	8,0	24	12,40	75,0	17.671,46
	Vazão máxima	80,0	24	90,00	105,0	34.636,06
ALVORADA	Vazão atual	15,0	24	4,91	33,0	3.421,19
	Vazão máxima	225,0	24	56,00	75,0	17.671,46

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os sistemas aquíferos cársticos são, antes de tudo, meios anisotrópicos de armazenamento e circulação hídrica e como tais, podem apresentar significativas variações hidrogeológicas em poucos metros de deslocamento. Num carste, além do grau de conectividade, abertura, rugosidade, frequência e persistência das discontinuidades do maciço geológico, outra variável também deve ser considerada: a dissolução e ampliação de discontinuidades naturais, o que promove concentração dos volumes de água nas zonas de descarga e a intensificação dos valores de condutividade hidráulica. Dentre os meios rochosos encontrados na crosta terrestre, os calcários carstificados são aqueles que naturalmente apresentam os maiores valores de condutividade hidráulica, sendo superados apenas por meios granulares inconsolidados de seixos homogêneos.

Por esse motivo, águas que se movimentam através de sistemas cársticos podem viajar a velocidades muito maiores do que as estimadas pelos valores médios das propriedades hidráulicas do aquífero, calculadas usando-se um método de meios porosos qualquer. Com esta preocupação, que este trabalho utilizou para o cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos um método para meios fraturados. Apesar de haver grandes variações hidrodinâmicas entre um conduto freático e outro, ou entre uma entrada d'água e outra num mesmo poço tubular profundo, implicando em um valor de condutividade hidráulica para cada discontinuidade, o método calcula um valor médio para o poço testado, ou para o aquífero naquele ponto.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Os valores típicos de condutividade hidráulica em calcários cársticos podem variar entre 10^{-5} e 10^{-1} m/s e em calcários e dolomitos com carstificação insipiente, ou descontinuidades preenchidas com argila espera-se valores entre 10^{-9} e 10^{-6} m/s (Freeze & Cherry, 1979). Essa amplitude para os valores de K em rochas carbonáticas exige um bom controle de campo do aquífero estudado, incluindo controle estrutural das feições cársticas e amplos levantamentos sistemáticos das ocorrências espeleológicas, para que seja possível uma generalização de condutividade hidráulica ou a compartimentação de setores com as mesmas respostas hidráulicas.

Na Zona Cárstica de Pains, especificamente na área de influência mínima do Sistema Éden, ocorrem dois importantes sistemas aquíferos, que na etapa de fotointerpretação foram perfeitamente observados e separados em duas zonas de texturas bem discriminadas, referentes a dois meios rochosos distintos: o meio cárstico e o fissurado-cárstico, este abrangendo também as coberturas de solos residuais. No que se refere ao meio fissurado-cárstico, as feições geomorfológicas indicam a predominância de rochas carbonáticas com carstificação insipiente, em detrimento às rochas terrígenas, que não afloram na área de influência, encobertas pelo espesso manto de intemperismo.

Para o sistema aquífero fissurado-cárstico esperam-se valores de K típicos de captações que exploram água subterrânea de calcários fraturados, com carstificação incipiente e/ou fraturas preenchidas com argila. Já para o sistema cárstico esperam-se valores mais próximos daqueles típicos de calcários carstificados.

Os parâmetros calculados para os poços tubulares profundos do SAAE de Pains mostram bem essa separação dos sistemas hidrogeológicos da área de influência do Sistema Éden. O poço Alvorada, cuja região foi mapeada como uma área predominantemente cárstica, com médio a alto grau de dissolução nas descontinuidades, apresentou resultados típicos de condutividade hidráulica em calcários carstificados (10^{-5} m/s), ao passo que o poço Mina, cuja área foi mapeada como de calcários e terrígenos do Subgrupo Paraopebas, Grupo Bambuí, apresentou resultados típicos de calcários com carstificação insipiente (10^{-6} m/s), ou fraturas preenchidas com argila. Isso é bem coerente com a ocorrência, nos arredores do Distrito de Mina, de espesso manto de solos residuais e um histórico de aproveitamento do solo para agricultura, favorecendo a acolmatação de dolinas e condutos.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Os resultados das análises e interpretações dos testes de bombeamento dos poços Mina e Alvorada confirmam a separação dessas duas zonas homólogas atribuídas a diferentes sistemas aquíferos. Onde se tem um meio rochoso fraturado compartimentado em dois sistemas aquíferos, com respostas hidrodinâmicas características para cada um.

Desta forma pode-se esperar para a região da área de influência do Sistema Éden, extrapolando essa conclusão com cautela para toda Zona Cárstica de Pains, valores médios de condutividade hidráulica entre 10^{-4} e 10^{-5} m/s para poços tubulares profundos que aproveitam, predominantemente, o manancial do sistema aquífero cárstico, ou seja, regiões com elevado grau de conectividade das descontinuidades, predomínio de calcário e alto grau de carstificação. Por outro lado, se esperam valores médios de condutividade hidráulica entre 10^{-6} e 10^{-7} m/s para poços tubulares profundos que aproveitam, predominantemente, o manancial do sistema aquífero fissurado-cárstico, em regiões de menor grau de carstificação no calcário, baixa conectividade e elevado acúmulo de argila nas fraturas.

As análises de meios rochosos cársticos não devem ficar restritas a aplicação de parâmetros hidrodinâmicos calculados a partir de testes de vazão em poços tubulares profundos, mesmo quando calculados com o auxílio de métodos específicos para meios anisotrópicos, como foi feito neste trabalho. Deve-se aplicar também um rigoroso controle das ocorrências cársticas, como nascentes, surgências, sumidouros, dolinas, uvalas, cavernas e um sistemático reconhecimento de campo na região estudada, utilizando, como forma de adensamento da informação, mapeamentos sistemáticos de feições cársticas próximas, leitura de fotografias aéreas e imagens de satélite e, se possível, levantamento geofísico e aplicação de ensaios de traçadores em áreas mais complexas.

Metodologias para delimitação de áreas de proteção de fontes de abastecimento de água subterrânea podem ser bem úteis na delimitação de áreas sensíveis onde podem ocorrer com maior frequência interferências sobre cavernas e sistemas espeleológicos, sejam interferências físicas ou químicas, conforme aquelas citadas por Foster *et al.* (2006). Sob este ponto de vista, a determinação e delimitação da zona de proteção e zona de captura de captações de água do tipo poços tubulares profundos, para diferentes finalidades de uso, também servem para delimitação de possíveis áreas de influência dessas captações na



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

dinâmica hídrica local e, no caso dos carstes, possivelmente, na circulação freática em condutos e redes de canais constituintes de sistemas espeleológicos, tal qual o Sistema Éden. A delimitação de perímetros de proteção para as captações de água subterrânea no Distrito de Mina e no bairro de Alvorada, também acaba por delimitar a área de interferência dessas captações na dinâmica hídrica do Sistema Éden.

De modo geral caracterizam-se duas zonas: a de influência e a de captura. Por meio de dados sobre as condições hidrogeológicas locais e as características do próprio tipo de captação, pode-se estabelecer vários tipos de zonas de proteção da captação, geralmente concêntricas na superfície do terreno e ao redor da fonte considerada. A zona de captura deve ser tratada como todo o perímetro dentro do qual toda a recarga será captada na fonte considerada, o que é diferente da zona de influência, que é aquela onde literalmente está posicionado o cone de depressão da superfície potenciométrica e onde ocorre interferência hidráulica entre o cone e possíveis corpos d'água dentro de seus limites.

Apesar dos perímetros de proteção serem adotados com a finalidade de exercer uma vigilância contra a contaminação, se olharmos por outro ângulo, tudo o que está situado dentro dos limites dessas áreas de proteção, até mesmo da área de captura, também está, direta ou indiretamente, sendo influenciado pela captação. Este é o princípio do rebaixamento do lençol em uma área de extração mineral, calcula-se a área de influência até que ela se amplie o suficiente para secar as profundidades onde se encontra o bem mineral desejado. A figura 06 mostra um mapa da área de influência mínima do Sistema Éden, com a delimitação das áreas de influência das captações do tipo poços tubulares profundos de Alvorada e Mina.

A metodologia utilizada para delimitação dos perímetros foi a mesma adotada para proteção contra contaminação da água subterrânea nas captações, só que a abordagem foi feita no sentido de ter em mãos uma área mínima dentro da qual condutos, dolinas, cavernas e demais feições cársticas, constituintes de um sistema espeleológico, possam estar sendo influenciadas pela extração da água subterrânea no ponto da captação.

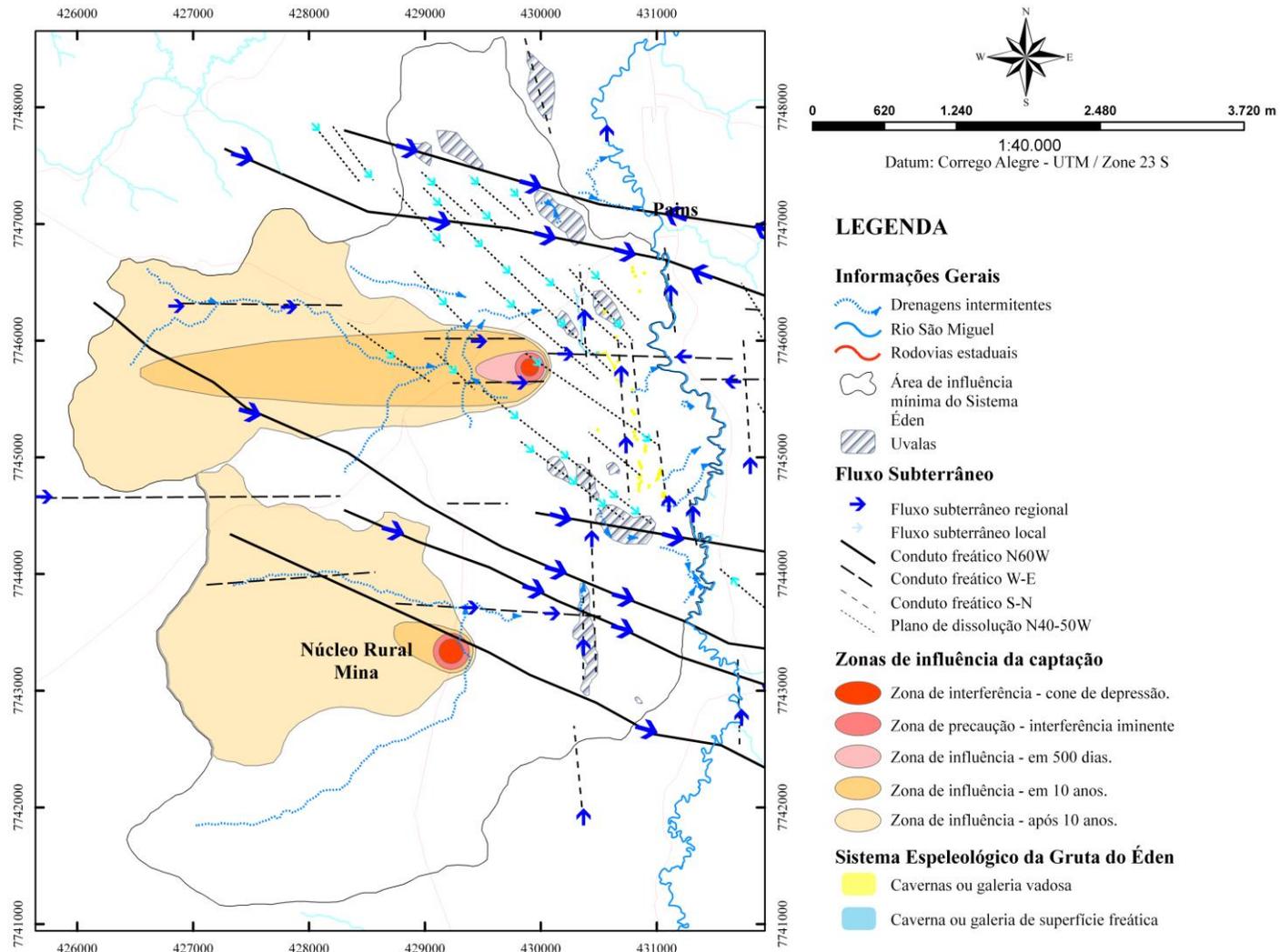


Figura 06 – Mapa das áreas de influência do Sistema Espeleológica da Gruta do Eden, com destaque para as áreas de influência e interferência físicas sobre o carste dos poços de Mina e Alvorada.

Vários são os fatores que influenciam na forma da zona de proteção da captação, tais como a distribuição areal da transmissividade do aquífero, a espessura do fluxo dinâmico do aquífero, a porosidade efetiva do aquífero, a taxa de extração anual legalmente licenciada, a declividade do terreno onde se encontra a captação e a taxa anual de recarga da água subterrânea. Todas essas informações ainda são muito precárias na área de estudo, de forma que é indispensável o aprofundamento do conhecimento do aquífero para se estabelecer um perímetro de proteção confiável. Além disso, a forma da área de proteção também pode variar com o tempo em função da perfuração de novos poços e em função do uso do solo.

Para o caso dos poços de Mina e Alvorada a área de proteção foi definida em função da área de recarga disponível para a captação, da direção estimada para o fluxo subterrâneo, onde cada zona tem o maior eixo longitudinal posicionado na mesma direção, mas em sentido oposto ao fluxo subterrâneo em regime permanente, e da previsão feita a partir dos testes de vazão para o raio dos cones de rebaixamento em condição de exploração em alta vazão, sendo de 80 m³/h para o Mina e de 225 m³/h para o poço Alvorada.

O raio do cone de rebaixamento do lençol para as referidas vazões foram utilizados para o estabelecimento de uma área circular ao redor dos poços de Mina e Alvorada, que delimitam o perímetro de abrangência do cone de rebaixamento, ou seja, da área de interferência direta na superfície potenciométrica. Qualquer feição ou intervenção antrópica dentro dos limites deste raio devem ser monitoradas para observação dos impactos desta interferência. Uma segunda zona circular com cinquenta metros de distância foi estabelecida ao redor da zona de interferência do cone para delimitar um perímetro de interferência iminente, como forma de precaução.

No caso do poço de Mina a zona de interferência é significativa abrangendo uma área circular de aproximadamente 36.000 m² ao redor do poço, tão grande que englobou as zonas com previsão de alcance de influência em 50 e 500 anos, sendo menor apenas que a zona com previsão de alcance de influência de 10 anos. Para o poço de Alvorada, por sua vez, a zona de interferência do cone, quando comparada com a mesma zona no poço de Mina, é bem menor, aproximadamente 18.000 m², sendo inferior as zonas de previsão de influência de 50 e 500 anos. Isso está relacionado com o valor da condutividade hidráulica, relativamente maior para o poço de Alvorada, implicando numa resposta melhor do aquífero que rapidamente alcança um regime permanente de circulação hídrica, no entanto as zonas de influência de 50 e 500 anos são bem maiores, visto que pontos mais distantes do aquífero alcançarão a captação em menor tempo.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Em termos gerais pode-se dizer que poços tubulares que explorem vazões da ordem de $80\text{m}^3/\text{h}$ no Sistema Aquífero Fissurado-Cárstico possuirão cones de rebaixamento com raio de alcance de 105 metros de distância em 24 horas de bombeamento, enquanto que, os explorem água subterrânea a vazões da ordem de $225\text{m}^3/\text{h}$ no Sistema Aquífero Cárstico possuirão cones de rebaixamento com raios que alcançam 75 metros de distância, também em 24 horas de bombeamento. Entretanto, para termos de gestão ambiental faz-se necessário incrementar mais 50 metros, para se compor uma *zona de precaução* (para interferência iminente) de bombeamentos excessivos nos sistemas aquíferos.

De forma geral estas devem ser as áreas ou perímetros esperados para interferências causadas por captações isoladas do tipo poços tubulares profundos em feições cársticas nas proximidades do Sistema Éden, podendo ser extrapoladas, com certa cautela, para outras áreas da Zona Cárstica de Pains, dependendo do nível de informação existente. É certo que no caso específico de futuras lavras com execução de rebaixamento do lençol através de um ou mais poços tubulares novos estudos devem ser considerados e as zonas de interferência serão bem maiores podendo realmente modificar a dinâmica hídrica de cavidades e demais feições cársticas próximas. Outro aspecto importante diz respeito à interferência em condutos freáticos que podem reduzir vazões em outras fontes e/ou captações que aproveitam a mesma água subterrânea.

Sendo assim, uma vez instalada uma atividade impactante, que necessite de altas vazões de extração da água subterrânea, devem-se solicitar novos ensaios nos poços a serem utilizados, possivelmente com observação dos níveis de rebaixamento em cavidades ou dolinas, ou outros poços próximos, para a simulação de novos cenários de interferências, haja vista que os valores determinados neste estudo podem variar devido a anisotropia do meio hidrogeológico de uma região cárstica.

Ainda assim os valores aqui determinados podem servir num primeiro momento de parâmetro para prever possíveis impactos no caso de extração de águas subterrâneas com altas vazões.

Deve-se considerar ainda que os empreendimentos já instalados dentro das zonas de influência de bombeamento da captação dos sistemas aquíferos fissurado-cárstico e cárstico devem ser mais severamente monitorados, haja vista que suas atividades impactantes são



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

potencialmente mais facilmente assimiladas pela captação, pois embora essa abordagem seja feita em cima em termos de análise de influência quantitativa, é sabido que as zonas de influência podem ser estendidas para as fontes de contaminação em superfície e subsuperfície.

As zonas de influência delimitadas para as captações do tipo poços tubulares profundos de Mina e Alvorada servem de referência para as instituições ambientais de fiscalização e gestão, na Zona Cárstica de Pains, quando houver, em médio prazo, casos de exploração elevada, localizada, de água subterrânea.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COSTA, W. D. & SILVA, A. B. 2000. Hidrogeologia dos Meios Anisotrópicos. *In*: Feitosa F. A. C. e Manoel Filho, J. (ed). Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações. (2ª edição) Fortaleza, CPRM/REFO, LABHID – UFPE, p. 133-174.

FETTER, C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. 3 ed. New York, Toronto, 691 p.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C.; GOMES, D.; D'ELIA, M. & PARIS, M. 2006. Proteção da qualidade da água subterrânea: Um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial, 104p.

FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall. 604p.

KARMAN, I. 2001. Ciclo da Água, Água Subterrânea e sua Ação Geológica, p. 113-138. *In*: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R. & TAIOLI, F.(ORG.). *Decifrando a Terra*. Oficina de Textos, São Paulo. 568p.

UT (Universität Tübingen). 2006. Fractured and Karst Aquifers. Disponível em: http://www.uni-tuebingen.de/zag/bilder/pdf/karst_ag.pdf. Acesso em: 27/11/2006.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [USEPA]. 1996. Regulatory determination on cement kiln dust. 14 p. Disponível em: www.epa.gov.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [USEPA]. 2000. Compilation of air pollutant emissions factors. Portland cement manufacturing. Disponível em: www.epa.gov.