

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA AMBIENTAL DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DA MINA LAPA VERMELHA, NA REGIÃO CÁRSTICA DE LAGOA SANTA, MG

Joana Cruz de Souza e Silva¹; Celso de Oliveira Loureiro² & Paulo Fernando Pereira Pessoa³

Resumo - O presente estudo consistiu na caracterização hidrogeológica da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, em Minas Gerais. Um modelo hidrogeológico conceitual foi proposto, em escala local, o qual permitiu gerar um modelo hidrogeológico computacional capaz de descrever o comportamento hidrodinâmico das águas subterrâneas na área circunvizinha à mina. O aplicativo computacional *Visual ModFlow* foi utilizado como ferramenta auxiliar para o desenvolvimento do modelo, sendo a área cárstica do estudo considerada equivalente a um meio poroso. Com base no modelo hidrogeológico computacional, assim como em dados medidos em campo, foram analisados os efeitos hidrogeológicos já causados pela atividade mineradora, cuja cava encontra-se na cota de 735 m. Além disso, foram avaliados, ainda, os efeitos hidrológicos e hidrogeológicos que poderão ser provocados pelo rebaixamento do lençol freático, com o aprofundamento do nível d'água até a cota de 680 m.

Abstract - This study consisted of the hydrogeologic characterization of the influential area of the Lapa Vermelha Mine, located in the karst region of Lagoa Santa, in the State of Minas Gerais. A conceptual hydrogeological model was developed, in local scale, which allowed generating a computational hydrogeologic model capable to describe the hydrodynamic behavior of underground waters in the surrounding area of the mine. The applicative computer package, named *Visual ModFlow*, was used as an auxiliary tool for the development of the model, being the karst area approached as an equivalent porous medium. Based on the proposed hydrogeological model, as well as on field data collected directly in the area, the hydrogeological and hydrological effects that had

¹ Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos; Rua José Hemetério Andrade, 401/501 – Buritis, Belo Horizonte, Minas Gerais, 30.455-770; tel.: (31) 3377-3026, joana.cruz@terra.com.br.

² Ph.D., Professor Adjunto, UFMG, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental ; Av. do Contorno, 842 – Centro, Belo Horizonte, Minas Gerais, 30.110-060; tel.: (31) 3238-1884; celso@desa.ufmg.br.

³ Geólogo, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da UFMG. Rua do Ouro, 1875/103. Belo Horizonte, MG. CEP 30.210-590. Tel.: (31) 3284.7977; paulofpp@terra.com.br.

already been caused by the mining activity in the Mina Lapa Vermelha Mine, with the current pit level at 735 m, were analyzed. Also, the eventual hydrogeological effects, predicted for the future, due to the continuing groundwater drawdown, down to the pit level of 680 m, were also evaluated.

Palavras-Chave - Lagoa Santa; água subterrânea; carste; *Visual ModFlow*; modelo hidrogeológico.

INTRODUÇÃO

A região calcária cárstica de Lagoa Santa, localizada próximo ao centro urbano de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, é, reconhecidamente, uma das mais importantes do país sob os aspectos arqueológicos, paleontológicos e espeleológicos, tendo atraído a atenção do pesquisador dinamarquês Peter Wilhelm Lund, em 1835. Por esta razão, esta região tem sido alvo de muitos estudos, sendo que os principais trabalhos já desenvolvidos até o momento dão enfoque, sobretudo, às pesquisas arqueológicas (Prous, 1992), paleontológicas e espeleológicas (Auler, 2002; Rubboli & Auler, 2002) e geomorfológicas (Kohler *et. al.*, 1976; Kohler, 1978; Parizzi, 1993; Piló, 1996; Piló, 2002).

No entanto, para aquela região, ainda não foram abordados, de forma mais aprofundada, os aspectos do balanço hídrico e do comportamento dinâmico das águas subterrâneas locais. Este tema, qual seja, o comportamento hidrodinâmico dos aquíferos subterrâneos locais, desperta um especial interesse para as comunidades locais, devido ao avanço das atividades de mineração do calcário na região, com a conseqüente necessidade de promover o rebaixamento do nível freático das águas subterrâneas e os respectivos potenciais efeitos hidrológicos e hidrogeológicos causados por estas atividades.

Assim sendo, com base em dados hidrológicos de campo e na aplicação de modelos de simulação do fluxo subterrâneo, este trabalho visou caracterizar a dinâmica hídrica subterrânea do aquífero local e avaliar os potenciais efeitos ambientais, hidrológicos e hidrogeológicos, causados pelas atividades de lavra da Mina Lapa Vermelha, localizada no município de Lagoa Santa. Os conflitos naturais decorrentes do avanço das atividades de mineração, considerados como o rebaixamento do nível das águas subterrâneas e os potenciais efeitos hidrológicos e hidrogeológicos, constituem o foco de investigação do presente estudo.

DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO

A Mina Lapa Vermelha, em operação na região desde 1976, extrai o calcário em uma cava aberta, cuja cota do “*pit*” atual é de 735 m. Ao atingir cotas um pouco mais elevadas, em 1992,

alcançou-se o nível d'água do aquífero carbonático. O desaguamento da mina vem sendo mantido, desde então, em virtude do aporte das águas subterrâneas à cava, somado aos freqüentes acúmulos nos períodos chuvosos. As águas que aportam na cava são direcionadas para um *sump* localizado no “*pit*” da mina e, periodicamente, são bombeadas por cerca de 800 m e lançadas em um ponto de descarga no interior do maciço carbonático vizinho (sumidouro).

OBJETIVOS

A fim de se conhecer os efeitos das atividades de rebaixamento das águas subterrâneas, no sistema hidrogeológico constituído pelos aquíferos de rochas calcárias, este trabalho objetiva o seguinte:

- definir o balanço hídrico da região;
- elaborar o modelo hidrogeológico conceitual do comportamento de fluxos subterrâneos;
- analisar o comportamento hidrodinâmico dos aquíferos através da aplicação de um modelo computacional de escoamento;
- confrontar o modelo hidrogeológico computacional de escoamento com o modelo hidrogeológico conceitual;
- simular cenários de utilização das águas subterrâneas;
- avaliar os potenciais efeitos hidrológicos e hidrogeológicos, gerados pelo desaguamento da mina e o conseqüente rebaixamento das águas subterrâneas locais; e,
- avaliar, se a atividade de rebaixamento interfere no nível da lagoa central de Lagoa Santa e dos córregos, rios e nascentes da área modelada.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo em questão, foram seguidas, conforme Silva (2003), as etapas descritas a seguir.

Revisão das informações existentes

Inicialmente foram realizadas as seguintes atividades:

- identificação, coleta e revisão das informações bibliográficas disponíveis;
- levantamento das informações topográficas, geomorfológicas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas existentes; e,
- filtragem dos dados existentes no que se refere às condições anteriores ao início das atividades de lavra e nas condições atuais.

Dessa maneira, foram criados subsídios para avaliação do comportamento hidrogeológico do sistema local, assim como para a elaboração do modelo conceitual e análise do balanço hídrico.

Caracterização das condições ambientais na área da mina

Realizou-se uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de levantar as condições de cobertura vegetal e de uso dos solos e das águas na área do entorno da Mina Lapa Vermelha. Esta fase do estudo contemplou, também, análises de fotografias aéreas e entrevistas a moradores, de maneira que se tornou possível a concepção do cenário existente. Vale ressaltar que a utilização de fotos aéreas neste estudo teve como objetivo principal auxiliar na definição dos seguintes aspectos: 1) a natureza litológica da área; 2) as formas estruturais existentes; 3) a natureza da vegetação; 4) a densidade de drenagem; e, 5) as formas de relevo.

Cadastro dos pontos d'água da região

Para uma acomodação satisfatória dos dados de campo no modelo hidrogeológico computacional, foram realizadas campanhas para levantamento de poços tubulares, lagoas, cisternas, nascentes e surgências presentes na região.

A este cadastro foram acrescentadas as informações disponíveis acerca dos pontos d'água levantados anteriormente pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) e pela COPASA (Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais).

Avaliação detalhada do balanço hídrico local

As séries temporais hidrológicas, assim como as informações de caracterização ambiental da área da mina, foram utilizadas para uma estimativa do balanço hídrico local, nas condições atuais.

Identificação do domínio de interesse do modelo

Para a delimitação da área de estudo foram consideradas as principais condições de contorno existentes no entorno da área de cava, tendo sido priorizadas as calhas de drenagem e zonas elevadas de cumeeira que marcam os divisores naturais do domínio de interesse.

Definição dos parâmetros hidráulicos

A definição dos parâmetros hidráulicos foi condicionada à existência de ensaios de bombeamento desenvolvidos na área pela COPASA. Esta pesquisa foi enriquecida, também, com os valores publicados pela TECISAN (2000).

Interpretação hidro-estratigráfica

Realizou-se uma análise lito-estratigráfica dos dados existentes, relativos às sondagens exploratórias e à instalação de piezômetros, identificando e definindo as respectivas unidades hidro-estratigráficas e incorporando-as nos modelos hidrogeológicos conceitual e computacional.

Elaboração do modelo hidrogeológico conceitual

Após a análise dos dados existentes, foi desenvolvido um modelo hidrogeológico conceitual envolvendo a hidro-estratigrafia e o escoamento da água subterrânea na área de influência da Mina Lapa Vermelha.

Elaboração do modelo hidrogeológico computacional

O modelo hidrogeológico conceitual foi, então, acomodado no respectivo modelo hidrogeológico computacional. Este, após a calibração com base nos dados de campo das cotas d'água dos piezômetros, dos medidores de níveis d'água e nascentes, e nos dados de vazões d'água nos córregos, foi revisto e refinado para representar criteriosamente as condições do comportamento hidrogeológico do campo.

Avaliação dos efeitos hidrológicos e hidrogeológicos

Após a elaboração do modelo hidrogeológico computacional, e a sua devida calibração, foi realizada uma análise sobre os efeitos hidrológicos e hidrogeológicos ambientais, já provocados, e os que seriam potencialmente causados pelas atividades de lavra da Mina Lapa Vermelha.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Definição do domínio de investigação

A área de estudo localiza-se ao norte da região metropolitana de Belo Horizonte, abrangendo parte do município de Lagoa Santa.

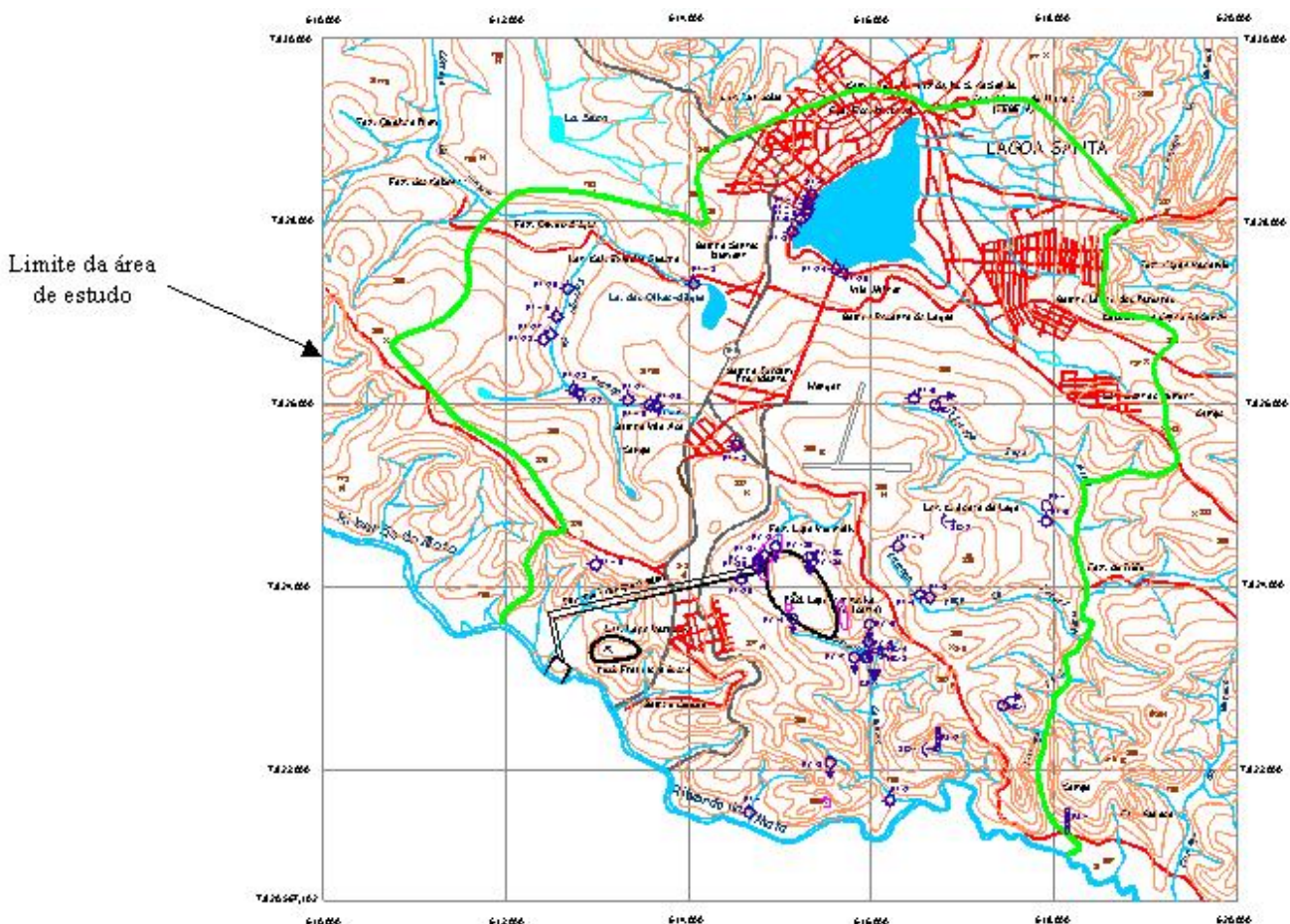
O limite sul da área de investigação é fixado pelo ribeirão da Mata; enquanto que o norte, pelas drenagens que contribuem nas extremidades sudeste e sudoeste da lagoa central da cidade de Lagoa Santa, na bacia do córrego Bebedouro. A leste, a região de interesse é demarcada pelo córrego José Maria e a oeste, por um divisor de elevação topográfica que atinge a margem esquerda do ribeirão da Mata. Dessa forma, conforme mostrado na Figura 1, o marco da área de investigação encontra-se, em termos de seus limites físicos, configurado às zonas que visam abranger os efeitos potenciais da interferência do rebaixamento do nível d'água na lavra carbonática, não se

restringindo apenas aos domínios da Mina Lapa Vermelha. Assim, a área total de investigação está localizada entre as coordenadas de projeção UTM (610.000, 620.000) e (7.820.500, 7.830.500), compreendendo uma extensão de 47 km² e um perímetro de 32,68 km.

Geologia local

Geologicamente, Kohler *et. al.* (1976) afirmam que a região localiza-se sobre rochas do Grupo Bambuí (Pré-Cambriano Superior).

O Grupo Bambuí, presente sobre o embasamento cristalino, compreende basicamente os litotipos das Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena, sendo a Formação Sete Lagoas subdividida nos Membros Pedro Leopoldo, basal, e o Membro Lagoa Santa, no topo. A Formação Sete Lagoas é sobreposta pela Formação Serra de Santa Helena, sendo esta caracterizada por metapelitos de granulação média a fina.



Fonte: IBGE - Folha SE. 23-Z-C-VI-1.

Figura 1 - Localização da área de estudo

No topo da Formação Serra de Santa Helena são encontradas coberturas superficiais terciário-quaternárias, representadas por depósitos detrítico-lateríticos e sedimentos colúvio-aluvionares.

Na Figura 2 é apresentado o perfil geológico da área de estudo.

A caracterização dos aspectos estruturais presentes na área de estudo foi realizada através de análises foto-interpretativas e sondagens (Tecisan, 2000). Dessa maneira, tornou-se possível a identificação de estruturas como feixes e alinhamentos de fraturas, cujas direções mapeadas e os referidos comprimentos auxiliaram de certa forma, no entendimento da dinâmica que rege o sistema hídrico subterrâneo.

Geomorfologicamente, a área de influência da Mina Lapa Vermelha encontra-se instalada em domínio planáltico, mais precisamente no bloco interfluvial ribeirão da Mata - rio das Velhas.

Aspectos hidrográficos da área de interesse

A rede hidrográfica que caracteriza a área de investigação é composta basicamente pelos tributários das sub-bacias de drenagem locais, sendo o ribeirão da Mata e seus afluentes ao sul, e na porção norte, representada pelas cabeceiras do córrego Bebedouro, onde se situa a Lagoa Santa. Assim, pois, parte do sistema drena para o norte e a outra maior parte para o sul, rumo ao nível de base local representado pelo ribeirão da Mata.

As principais bacias de drenagem abrangidas na área de investigação são: córrego Cafundó, córrego José Maria e ribeirão da Mata, os quais drenam para o sistema ribeirão da Mata, no sentido Sul. Já a bacia da Lagoa Santa - córrego do Bebedouro drena para o sistema do rio das Velhas, no sentido Norte. Além dos cursos d'água anteriormente relacionados, menciona-se a existência do córrego do Inhame Rosa ou Carrapato, pequenos tributários da margem direita do vale do Cafundó.

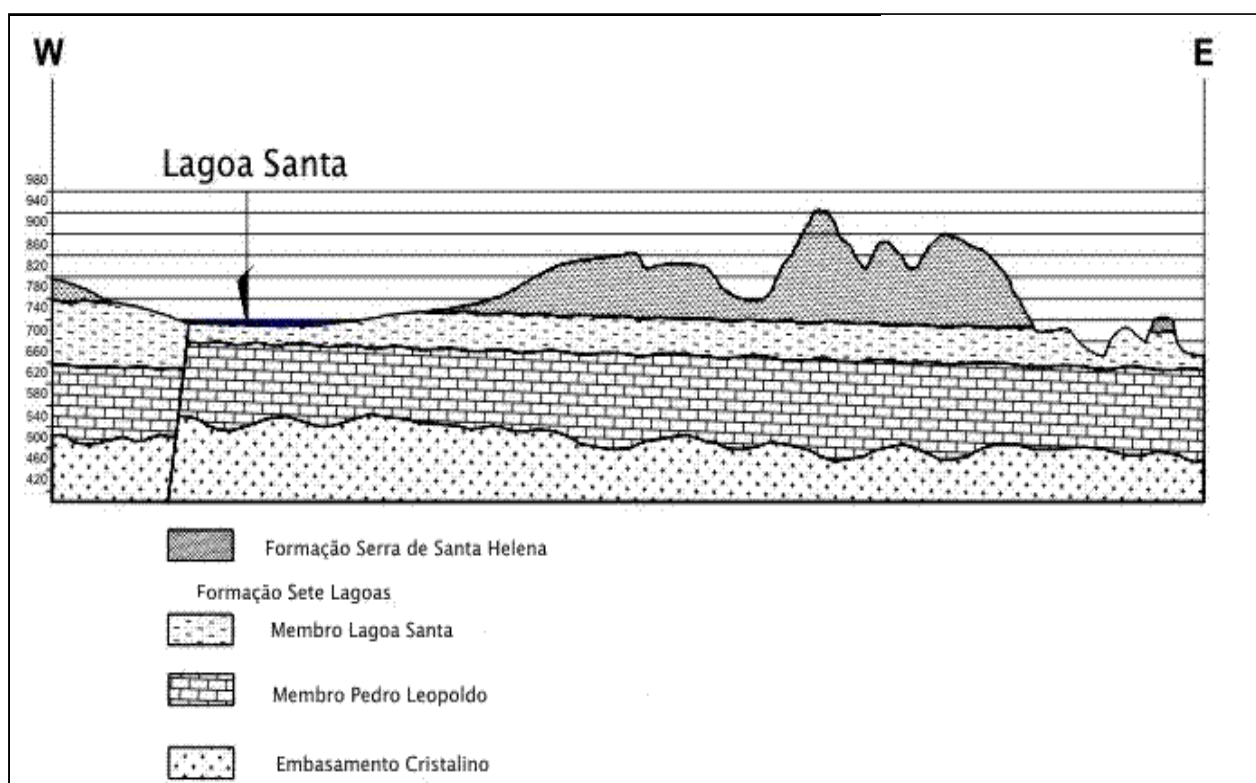


Figura 2 - Perfil geológico da área de estudo.

O córrego Cafundó, onde está instalada uma calha Parshal, representa uma drenagem perene. Este corpo d'água drena uma vazão de cerca de 15 m³/h (0,00416 m³/s ou 4,16 l/s), a qual está relacionada, em sua maior parte, às contribuições da surgência cárstica existente na porção de seu médio/alto curso.

O córrego José Maria, limite leste da área de investigação, estende-se desde a porção elevada dos interflúvios representados pela zona de recarga regional junto à pista de pouso do PAMA (Parque de Material Aeronáutico de Lagoa Santa) e Bairro Aeronautas até sua confluência com o ribeirão da Mata, extremo sudeste da área de investigação.

Representando uma calha de drenagem expressiva em comparação ao córrego do Cafundó, o córrego José Maria é monitorado por uma régua linimétrica. A vazão média característica deste córrego é de 313,2 m³/h (0,087 m³/s ou 87 l/s). Vale lembrar que somente parte dessa descarga monitorada por aquela régua é proveniente de sua margem direita, oriunda da área de investigação.

A principal surgência encontrada na área de investigação é denominada Olho D'água, ou do Tadinho, sendo que sua vazão aponta para um valor de 170 m³/h (0,047 m³/s ou 47 l/s) nos períodos chuvosos. Como diagnosticado pela aplicação de traçadores corantes, esta surgência está conectada hidráulicamente ao sumidouro "Ponto de Injeção", localizada no entorno da Mina Lapa Vermelha. Devido a esta peculiaridade, sua dinâmica aquífera se modifica em função das oscilações de descargas injetadas na dolina.

A lagoa central de Lagoa Santa, do ponto de vista hidrográfico de sua bacia, insere-se no domínio de drenagem do córrego Bebedouro, apresentando uma superfície de espelho d'água com cerca de 1,28 km². Conforme evidenciado através de inúmeras perfurações realizadas para construção de poços tubulares em sua margem, a lagoa central de Lagoa Santa é suportada por um espesso manto de alteração da rocha metapelítica subjacente, a qual serve de superfície impermeável entre o fundo da lagoa e o sistema hidrogeológico cárstico.

BALANÇO HÍDRICO

Em geral, o equacionamento básico do balanço hídrico pode ser descrito através da seguinte expressão:

$$P - ETR - R - E_s = \Delta S \quad (1)$$

sendo:

P = precipitação, expressa em (mm/ano);

ETR = evapotranspiração real, expressa em (mm/ano);

R = recarga ou escoamento subterrâneo, dado em (mm/ano);

Es = escoamento superficial ou deflúvio, expresso em (mm/ano); e,

ΔS = variação do armazenamento, dado em (mm/ano).

A Equação (1) contém cinco variáveis, sendo que quatro delas foram estimadas para a região de estudo, a saber: 1) a precipitação; 2) a evapotranspiração real (determinada dentro de um intervalo de confiança); 3) a recarga ou escoamento subterrâneo; e, 4) o escoamento superficial.

Para uma estimativa da média pluviométrica da área de influência da Mina da Lapa Vermelha foram considerados os dados coletados entre os anos de 1988 e 2000, na estação meteorológica localizada no Aeroporto Internacional Presidente Tancredo Neves (Confins) e os dados pluviométricos publicados CPRM & IBAMA (1998a). Sendo assim, o valor encontrado para a precipitação média anual da área em questão é 1.236,8 mm/ano.

Para a determinação da evapotranspiração potencial característica da área em apreço, utilizou-se o método combinado, ou equação de Penman, obtendo-se o valor de 1.254,3 mm/ano.

A evapotranspiração real anual média foi estimada a partir das metodologias de L. Turc e de Coutagne, citadas por Vasconcelos (1994). Obteve-se o intervalo de abrangência que varia entre 400 e 1.000 mm/ano.

O valor de recarga incidente na área em questão foi determinado a partir do método de separação dos escoamentos nos hidrogramas. Para tanto, foram utilizados os dados de vazão das estações de Vespasiano e Ponte Raul Soares, obtidos junto à ANA (Agência Nacional de Águas), sendo estas medidas referentes aos anos de 1976 a 2000. Optou-se por utilizar as estações anteriormente mencionadas por serem os postos fluviométricos mais próximos da região de estudo e por estarem instaladas em extensões com características físicas (*e.g.*: geológicas, hidrológicas, hidrogeológicas) similares à mesma. Sendo assim, as condições de recarga aí existentes podem ser transportadas para a área de influência da Mina Lapa Vermelha, uma vez que aquelas estações também se localizam nos domínios do Grupo Bambuí.

Resumidamente, os escoamentos médios anuais superficial e subterrâneo obtidos pelo método gráfico de separação no hidrograma são, respectivamente, 139,7 e 310,9 mm/ano.

Considerando um ciclo hidrológico completo, em que a variação do armazenamento seja desprezível, a Equação (1) pode ser escrita como:

$$P - ETR - R - E_s = 0 \quad (2)$$

Assim, os valores aproximados das variáveis envolvidas no balanço hídrico são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis envolvidas no balanço hídrico

Variável	Valor (mm)
Precipitação (P)	1.237
Recarga (R)	311
Escoamento superficial (Es)	140

Por conseguinte, tem-se que:

$$ETR = P - R - E_s \quad (3)$$

Assim,

$$ETR = 1237 - 311 - 140 \text{ mm/ano} = 786 \text{ mm/ano.}$$

Nota-se que a evapotranspiração real média anual calculada através do equacionamento do balanço hídrico encontra-se dentro do intervalo anteriormente previsto pelas equações empíricas de L. Turc e Coutagne, entre 400 e 1.000 mm/ano. Além disso, seu resultado, como esperado, apresenta-se inferior à evapotranspiração potencial média anual característica da área de estudo, determinada a partir da metodologia do método combinado.

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO

A rede de monitoramento hidrogeológico, constituída pelos dispositivos controladores de nível d'água dos aquíferos e das suas vazões de drenagem, é composta por poços tubulares, cisternas, calhas, baldes graduados e régua linimétrica. Complementando, ainda, esta rede de monitoramento, foram instalados dez poços piezométricos, objetivando observar as oscilações de nível d'água nas zonas adjacentes à cava.

Dessa forma, o comportamento do sistema hidrogeológico cárstico foi acompanhado a fim de buscar a compreensão de sua dinâmica, relacionando-o com o comportamento dos rios, das surgências e das nascentes presentes.

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

Unidades hidro-estratigráficas

Através da análise de perfis de sondagem e da caracterização da geologia regional e local (Tecisan, 2000), teve-se o conhecimento da lito-estratigrafia característica da região em destaque, o que indicou que, de base para o topo, as unidades hidroestratigráficas reconhecidas na área são aquelas apresentadas na Tabela 2.

O embasamento cristalino comporta-se como um aquícluído, devido à sua desprezível porosidade primária. Desta forma, em relação às unidades muito mais permeáveis situadas acima, o embasamento cristalino é considerado como o limite inferior de fluxo das águas subterrâneas, não sendo aqui assumido como uma unidade hidroestratigráfica. Dessa forma, o embasamento cristalino não participou do estudo de modelagem hidrogeológica.

O comportamento hidrogeológico dos calcários componentes da Formação Sete Lagoas foi agrupado em uma única unidade hidroestratigráfica. Sendo assim, devido às suas semelhanças hidrogeológicas, ignorou-se a distinção entre os Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, constituintes da Formação Sete Lagoas.

A unidade hidro-estratigráfica que caracteriza a Formação Sete Lagoas é caracterizada pela presença de alinhamentos de fraturas verticais ao longo das quais, também ocorre a circulação da água subterrânea, considerando-se, a princípio o comando majoritário das fissuras inter-estratais. Este conjunto de fraturas e fissuras pode se mostrar pouco aberto ou mesmo bastante desenvolvido, fato que implica em valores de condutividade hidráulica bastante diversos e elevados, variando desde 10^{-5} até 10^{-2} cm/s. Em virtude da heterogeneidade das fraturas encontradas na unidade hidro-estratigráfica que compõe a Formação Sete Lagoas, foram acomodadas dentro deste domínio outras distintas unidades hidro-estratigráficas que correspondem especificadamente às fraturas, sendo estas incorporadas também no modelo hidrogeológico computacional. Diante das discontinuidades mais importantes do ponto de vista da dinâmica aquífera local, merece destaque a fratura que garante a conexão entre o “Ponto de Injeção” e a surgência do Tadinho.

Tabela 2 - Identificação das unidades hidro-estratigráficas.

LITOESTRATIGRAFIA		UNIDADES
Grupo	Formação	HIDROESTRATIGRÁFICAS
Depósitos elúvio-coluvionares indivisos (coberturas inconsolidadas)		Unidade 1 – Sistema hidrogeológico livre / freático: porosidade intersticial primária.
Bambuí	Formação Serra de Santa Helena	Unidade 2 - Sistema hidrogeológico Santa Helena: porosidade fissural secundária e baixos valores de condutividade hidráulica (da ordem de 10^{-7} m/s).
	Formação Sete Lagoas	Unidade 3 - Sistema hidrogeológico Sete Lagoas: porosidade cárstica fissural secundária e elevados valores de condutividade hidráulica (da ordem de 10^{-6} m/s).
Embasamento Cristalino	Granitos e gnaisses, Migmatitos	Unidade 4 - Sistema hidrogeológico Embasamento Cristalino: porosidade secundária desprezível; baixíssimos valores de condutividade hidráulica (da ordem de 10^{-9} m/s).

Como unidade hidro-estratigráfica, a Formação Serra de Santa Helena caracteriza-se por possuir baixa permeabilidade, significativa capacidade de armazenamento e porosidade fissural pouco desenvolvida. Ressalta-se, todavia, que os metapelitos da Formação Serra de Santa Helena encontram-se exclusivamente na zona não saturada e, portanto, não constituem objeto de análise deste trabalho, uma vez que a ferramenta utilizada para a modelagem hidrogeológica computacional engloba apenas a zona saturada.

Os sedimentos constituintes da cobertura inconsolidada estão inseridos, predominantemente, na zona não saturada, sendo objeto de análise apenas para sua adoção como material poroso sobrejacente, onde toda a recarga é processada. O comportamento hidrogeológico desta unidade hidro-estratigráfica é pouco conhecido, mas acredita-se que possuam baixa porosidade primária, devido ao alto teor de argilas, e porosidade secundária desprezível devido à ausência de descontinuidades expressivas.

Comportamento Hidrodinâmico

A partir dos dados de monitoramento levantados nos diversos dispositivos implementados na área, elaborou-se, conforme mostrado na Figura 3, uma primeira concepção das direções de fluxo que definem o escoamento das águas subterrâneas da região em análise.

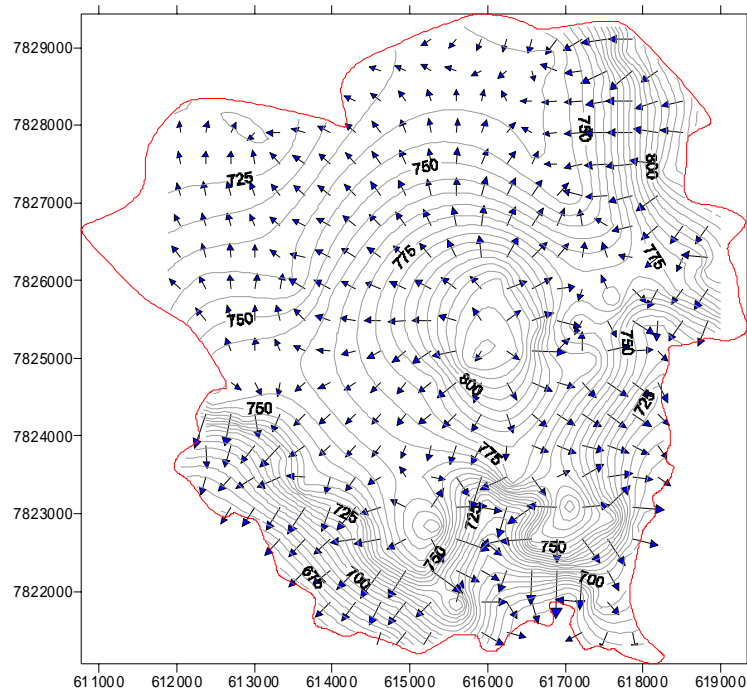


Figura 3 - Representação da distribuição das linhas equipotenciais elaboradas a partir dos dados de monitoramento.

MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL

A versão computacional do modelo que representa a dinâmica hidrogeológica nos domínios de investigação foi desenvolvida através do aplicativo *Visual ModFlow* (Guiguer & Franz, 1998), sendo a calibração dos resultados feita com os dados obtidos em medições de piezômetros, cisternas e nascentes existentes na área. Vale ressaltar que, o *Visual ModFlow* (Guiguer & Franz, 1998), elaborado pela Waterloo Hydrogeologic, é um modelo computacional que simula, através de um modelo numérico de diferenças finitas baseado na lei de Darcy, o escoamento da água subterrânea em uma configuração geométrica tridimensional.

Desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional

Definição dos contornos do domínio de cálculo

Os limites da área de estudo foram definidos com base na caracterização dos seus respectivos contornos. Desse modo, o contorno norte da área de estudo foi definido pela existência de uma barreira hidráulica, representada pelos divisores de água topográficos, e uma barreira física, determinada pela lagoa central de Lagoa Santa. Já a porção sul foi delimitada por uma barreira física, representada pelo ribeirão da Mata. O córrego José Maria, por sua vez, definido como barreira física, determinou o limite leste. Enquanto isso, o limite oeste constituiu-se por uma

barreira hidráulica topográfica. Os contornos de topo foram fixados pela superfície topográfica dos terrenos e os limites de fundo, pela superfície de contato da formação calcária com o embasamento cristalino, considerado impermeável.

Consideração temporal e malha de cálculo

O modelo hidrogeológico computacional, segundo Silva (2003), foi desenvolvido em uma condição temporal estacionária e estruturado em uma malha irregular de cálculo, com cerca de 200 colunas, 200 linhas e 31 camadas sub-horizontais. Trata-se, portanto, de um bloco tridimensional do sistema subsuperficial que abrange 260 m de espessura na direção vertical, 10.000 m de largura na direção horizontal de x (leste – oeste) e 9.500 m na direção horizontal de y (norte – sul). Uma célula típica da malha de cálculo tem, aproximadamente, as dimensões de 50×50×10 m, nas direções de x , y e z , respectivamente. Próxima à área da cava da mina, a malha de cálculo foi refinada, gerando células de 25×25×10 m.

Definição das condições de contorno

Inicialmente, inseriu-se o limite da área a ser estudada dentro da malha de cálculo. As células situadas externamente aos limites da região de interesse foram classificadas como inativas. Posteriormente, seguiu-se para determinação das condições de contorno do mesmo.

Primeiramente, o córrego José Maria, foi considerado hidrologicamente com um caráter essencialmente efluente. Desse modo, foi simulado como um dreno no modelo hidrogeológico computacional, admitindo-se, assim, que funciona somente como um elemento de retirada de água do sistema subsuperficial.

A região da cava também foi acomodada no modelo hidrogeológico computacional através do “pacote” dreno. Neste caso, para representar a situação atual, foi atribuída a este dreno uma cota de drenagem de 735 m, que corresponde ao *pit* atual da cava da Mina Lapa Vermelha.

A única fonte de recarga no sistema de fluxo subterrâneo em questão é proveniente da precipitação pluvial total. Dessa maneira, atribuiu-se ao modelo hidrogeológico computacional uma zona de recarga geral de 311 mm/ano, sendo este valor advindo dos estudos do balanço hídrico. Em virtude do procedimento de calibração do modelo hidrogeológico computacional (a ser descrito oportunamente), esta zona de recarga geral foi alterada, posteriormente, para 400 mm/ano, correspondendo a 32% da precipitação média anual. Definiu-se, também, uma zona de recarga diferenciada para a região da cava da Mina Lapa Vermelha, com uma taxa de 700 mm/ano, visto que esta área apresenta uma perda menor por escoamento superficial e uma maior taxa de infiltração.

De acordo com o modelo hidrogeológico conceitual, a água acumulada no *sump* da cava da Mina Lapa Vermelha é bombeada a uma vazão média anual de 32 m³/h, e reinjetada em um sumidouro adjacente a cava. Esta condição foi acomodada no modelo hidrogeológico computacional através do acréscimo de um fator adicional de recarga de 32 m³/h sobre a região de injeção, correspondendo, portanto, a uma recarga de 12.860 mm/ano.

Parâmetros hidráulicos

Como mencionado por Silva (2003), a unidade hidroestratigráfica que caracteriza a Formação Sete Lagoas é marcada pela presença de alinhamentos de fraturas, sendo que estas podem se mostrar pouco abertas ou bastante desenvolvidas. Em vista dessa distinção hidráulica, criaram-se outras duas distintas unidades hidro-estratigráficas, correspondendo às fraturas rasas e às fraturas profundas.

Mediante os resultados das atividades realizadas através da aplicação de traçadores corantes na área, pôde-se identificar a zona de contribuição da surgência do Tadinho. Dessa forma, no modelo hidrogeológico computacional, foi incorporada uma fratura conectando hidráulicamente o sumidouro de injeção, localizado nas adjacências da cava da Mina Lapa Vermelha, à surgência em questão. Por ser uma das descontinuidades mais importantes do ponto de vista da dinâmica aquífera local, esta fratura foi assumida no modelo hidrogeológico computacional como uma unidade hidro-estratigráfica diferenciada.

Concluindo, ainda, a descrição dos parâmetros hidráulicos da região de influência da Mina Lapa Vermelha, merece destaque a lagoa central de Lagoa Santa. Segundo Parizzi *et. al.* (1998), esta lagoa é formada por rochas argilosas que são impermeáveis e, portanto, retém a água. Por conseguinte, esta peculiaridade inerente à Lagoa Santa foi acomodada no modelo hidrogeológico computacional com o auxílio de uma nova unidade hidroestratigráfica, representando a condutividade hidráulica típica das argilas.

Resumindo, as sete diferentes unidades hidroestratigráficas adotadas no modelo hidrogeológico computacional, com os respectivos valores de condutividade hidráulica, são caracterizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização das sete unidades hidroestratigráficas adotadas no modelo hidrogeológico computacional.

Unidades litoestratigráficas e estruturais	Unidades hidroestratigráficas	Condutividade hidráulica K (m/s)
Depósitos elúvio-coluvionares indivisos	Colúvio	$3,0 \times 10^{-5}$
Formação Serra de Santa Helena	Santa Helena	$4,8 \times 10^{-7}$
Formação Sete Lagoas	Calcário	$2,5 \times 10^{-6}$
Granito e gnaisses, migmatitos.	Embasamento	–
Argila abaixo da lagoa	Argila	$1,9 \times 10^{-9}$
Fratras rasas	Fratras rasas	$2,0 \times 10^{-3}$
Fratras profundas	Fratras profundas	$5,0 \times 10^{-5}$
Fratura do Tadinho	Fratura do Tadinho	$1,0 \times 10^{-2}$

Poços tubulares de bombeamento

No modelo hidrogeológico computacional foram acomodados 29 poços tubulares.

Calibração do modelo hidrogeológico computacional

A calibração de um modelo hidrogeológico computacional tem como objetivo adquirir uma maior confiabilidade no modelo já desenvolvido, de tal forma que os valores de carga hidráulica e de vazões de água, calculados pelo modelo, possam ser comparados satisfatoriamente bem como os valores observados em campo.

As condições hidrogeológicas reais da região de estudo correspondem a uma situação de desaguamento da cava da mina da Lapa Vermelha a uma cota de 735 m. Conseqüentemente, a calibração do modelo hidrogeológico computacional foi realizada considerando a condição hidrogeológica atual.

Um dos procedimentos utilizados nesta etapa de calibração é a variação, em módulo, de alguns parâmetros, incluindo a condutividade hidráulica das unidades hidro-estratigráficas e as taxas efetivas de recarga do aquífero.

Assim, a calibração foi iniciada com a alteração do valor da condutividade hidráulica das unidades hidro-estratigráficas, comparando-se os valores simulados de carga hidráulica com os valores medidos nas nascentes locais e nos piezômetros instalados na área.

Os valores de cargas hidráulicas utilizados no processo de calibração, correspondentes às nascentes das drenagens, foram obtidos a partir do mapa topográfico de Lagoa Santa (IBGE, 1976) e verificados em campo. Além desses registros, foram utilizados os valores de sete piezômetros instalados no entorno da cava da Mina Lapa Vermelha e de três nascentes cadastradas.,

As medidas de fluxo utilizadas na calibração deste modelo hidrogeológico computacional, considerando a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota 735 m, referem-se: 1) às vazões

que foram obtidas junto à surgência de água subterrânea do Tadinho; 2) às vazões obtidas no córrego Cafundó, através das leituras feitas na calha Parshal; e, 3) principalmente, à vazão do *sump* da cava. Auxiliando neste processo, foram, também, desenvolvidas análises qualitativas (seco ou úmido) de alguns corpos d'água superficiais, a saber: 1) ribeirão da Mata; 2) lagoa central de Lagoa Santa; 3) córrego Cafundó; 4) córrego José Maria; e, 5) lagoa Olhos D'água.

Ao modificar adequadamente os valores da recarga e das condutividades hidráulicas, obteve-se um modelo hidrogeológico computacional calibrado para a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota 735 m, cuja curva de calibração apresenta um erro normalizado de 7,35%.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Considerando o modelo hidrogeológico computacional já calibrado para a condição atual, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 735 m, foram então simulados os seguintes cenários de comportamento hidrogeológico:

- condição hidrodinâmica original do sistema, sem a presença da cava;
- condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 700 m; e,
- condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 680 m.

A fim de avaliar o comportamento hidrodinâmico da área em questão com maior precisão, foram analisados os cenários intermediários correspondentes às condições de cota da cava Mina Lapa Vermelha equivalente a 717, 699, 698 e 697 m.

A seguir, na Tabela 4, são apresentados todos resultados obtidos com as distintas análises hidrogeológicas.

Com relação à condição hidrodinâmica atual, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 735 m, observa-se que, quando comparado com a simulação da condição hidrodinâmica original, houve um aumento significativo na saída de água na surgência do Tadinho e no córrego do Cafundó. Este aumento, conforme Silva (2003), é causado pela necessidade de injeção de água no sumidouro de injeção, ponto este que se encontra conectado hidráulicamente ao sistema cárstico.

Para o cenário preditivo em que cava a da Mina Lapa Vermelha estiver na cota de 700 m, a evolução do processo de rebaixamento do lençol freático até aquela cota demonstrou interferências nas surgências do Tadinho e no córrego do Cafundó, denotadas pela supressão de suas descargas. Com alusão à lagoa central de Lagoa Santa, os resultados, comparados com a situação hidrodinâmica original, indicam uma diminuição insignificante do aporte de água proveniente do escoamento de base.

Tabela 4 - Resultados da simulação obtidos para os diversos cenários.

Cenários Simulados	Vazão d'Água - Saídas (m ³ /dia)			Aporte de Água
				(Escoamento de Base)
	Cava da Mina	Surgência do Tadinho	Cafundó	(m ³ /dia)
Original - Sem cava	-	3.150,00	42,00	4.489,00
Cava a 735 m	932,23	3.362,60	59,14	4.486,10
Cava a 717 m	4.740,10	2.026,40	seco	4.414,50
Cava a 700 m	8.954,70	seco	seco	4.314,10
Cava a 699 m	9.333,20	seco	seco	4.337,50
Cava a 698 m	9.453,30	seco	seco	4.328,70
Cava a 697 m	9.195,40	seco	seco	4.328,20
Cava a 680 m	11.057,00	seco	seco	4.265,90

A fratura do Tadinho, conforme modelo hidrogeológico conceitual, estabelece uma conexão hidráulica direta entre a dolina de injeção, situada nas proximidades da cava da Mina Lapa Vermelha localizada, e a surgência do Tadinho, localizada na cota de 700 m.

Inicialmente, na condição de simulação para a situação hidrodinâmica com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 735 m, a fratura do Tadinho, em toda a sua extensão, situava-se na zona saturada, transmitindo ao sistema 7.472,9 m³/dia de água. Com o avanço da lavra da Mina Lapa Vermelha e a necessidade de prosseguir com o rebaixamento do lençol freático, parte desta fratura passou a ocupar uma porção da zona de aeração. Sendo assim, sua taxa de contribuição ao sistema reduziu-se para 1.464 m³/dia de água. Esta mudança de comportamento da fratura do Tadinho altera a hidrodinâmica da área de estudo, provocando, assim, uma pequena redução no aporte de água subterrânea para a lagoa central de Lagoa Santa e a supressão da descarga do córrego do Cafundó e da surgência do Tadinho.

A simulação dos trabalhos continuados de rebaixamento do lençol freático na Mina Lapa Vermelha para a cota de 680 m confirmou a tendência de secagem das surgências do Tadinho e do córrego do Cafundó, como já detectado no estágio com a cava localizada na cota de 700 m. Para a lagoa central de Lagoa Santa, ao comparar estes resultados com aqueles advindos da simulação da condição hidrodinâmica original (sem a presença da cava), notou-se um decréscimo ainda maior de seu aporte de água subterrânea.

Diagnóstico da lagoa central de Lagoa Santa

Como descrito anteriormente, os resultados da simulação da condição hidrodinâmica com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 700 m indicam para a lagoa central de Lagoa Santa uma diminuição pouco significativa no seu aporte de água proveniente do escoamento de base (3,89%).

A fim de determinar o real efeito que as atividades de rebaixamento do lençol freático na Mina Lapa Vermelha podem provocar à lagoa central de Lagoa Santa, fez-se uma batimetria deste corpo d'água no mês de agosto de 2003.

Em 1978, Kohler afirmou que a lagoa central de Lagoa Santa *encontra-se em relativo estado de equilíbrio, nada tendo a ver com a ciclicidade típica das lagoas cársticas, como é o caso das inúmeras lagoas da região, destacando-se a do Sumidouro*. Entretanto, com a redução da taxa de contribuição do escoamento de base para a lagoa central de Lagoa Santa, detectado pela simulação da condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 700 e 680 m, os resultados do presente estudo indicam que um novo equilíbrio hídrico desta lagoa será alcançado.

Devido à diminuição do aporte de água advindo do escoamento subterrâneo para a lagoa central de Lagoa Santa, há a tendência de redução do nível d'água desta lagoa. Esta redução implicará, conforme diagnosticado pela batimetria, na diminuição da área de exposição desta lagoa, provocando, entre outros efeitos, uma alteração em sua evaporação.

Paralelamente a este efeito, a medida em que o nível d'água da lagoa central de Lagoa Santa é reduzido, verifica-se um aumento do gradiente hidráulico entre este corpo d'água e as contribuições externas, fato que fomentará o aumento do escoamento de base. Conseqüentemente, com este aumento do escoamento de base, o nível d'água desta lagoa tenderá a reduzir-se a uma taxa menor em relação àquela inicialmente atuante. Seguido a este fenômeno, a área de exposição da lagoa altera-se sucessivamente, apresentando um novo valor característico de evaporação. Dessa forma, esse processo se repetirá até que a lagoa central de Lagoa Santa se encontre novamente em uma situação de estabilidade hídrica, em que o seu nível d'água não mais se alterará.

Objetivando determinar a configuração final de equilíbrio hídrico da lagoa central de Lagoa Santa, foram adotadas como premissas as seguintes proposições provenientes dos modelos hidrogeológicos conceitual e computacional:

- a lagoa central de Lagoa Santa encontra-se atualmente em estado de equilíbrio, não tendo variação no seu nível d'água;
- a lagoa central de Lagoa Santa é alimentada por água proveniente da precipitação direta, do escoamento de base e do escoamento superficial correspondente ao deflúvio das camadas coluvionares;
- a perda de água a qual a lagoa central de Lagoa Santa é submetida refere-se exclusivamente ao fenômeno de evaporação;
- considera-se que a lagoa central de Lagoa Santa não verte água; e,
- as parcelas referentes à precipitação e ao escoamento superficial são constantes ao longo do tempo.

Para a determinação final do equilíbrio hidrodinâmico da lagoa central de Lagoa Santa foi elaborado um modelo matemático, sendo este incorporado em uma planilha eletrônica. Os resultados obtidos em tal análise indicaram que o rebaixamento do lençol freático provocado pela Mina Lapa Vermelha até a cota de 700 m provocaria uma redução de aproximadamente 6 cm na lâmina d'água da lagoa central de Lagoa Santa.

CONCLUSÕES

A avaliação comparativa dos vários cenários simulados sobre a condição hidrodinâmica do aquífero subterrâneo local, no entorno da Mina Lapa Vermelha, quando comparados com a simulação da condição hidrodinâmica original, sugeriu algumas conclusões apresentadas a seguir.

(1) Condição hidrodinâmica atual, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 735 m:

- aumento de cerca de 6,8% na saída de água na surgência do Tadinho;
- aumento de cerca de 41% na saída de água do córrego do Cafundó; e,
- redução insignificante do aporte do escoamento de base para a lagoa central de Lagoa Santa.

(2) Cenário especulativo da condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 700 m:

- supressão na descarga de água da surgência do Tadinho;
- supressão na descarga de água do córrego do Cafundó; e,
- redução de cerca de 4% do escoamento de base para a Lagoa Santa, o que implicará em redução de aproximadamente 6 cm em sua altura da lâmina d'água.

(3) Cenário especulativo da condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 680 m:

- supressão na descarga de água da surgência do Tadinho;
- supressão na descarga de água do córrego do Cafundó; e,
- redução de cerca de 5% do escoamento de base para a Lagoa Santa, o que implicará em redução de aproximadamente 6 cm em sua altura da lâmina d'água.

Com relação à condução da lavra, foi possível chegar a algumas conclusões, as quais têm estreita relação com os efeitos hidrológicos previstos:

- o tempo necessário para que se evolua a lavra até cota de 700 m é de cerca de 40 anos, o que possibilita a tomada de precauções quanto ao incremento dos volumes de água bombeados e o aumento no rebaixamento da superfície freática;
- os volumes de água a serem drenados na Mina Lapa Vermelha, em decorrência do rebaixamento até as cotas de 700 e de 680 m, poderão ser usados em um plano adequado de gestão das águas na região, buscando minimizar os eventuais impactos hidrológicos e hidrogeológicos causados pela atividade mineradora; e,
- os volumes de água drenados da mina serão aumentados gradativamente e, conseqüentemente, todas as questões relativas à gestão das águas bombeadas poderão ser criteriosamente planejadas e resolvidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AULER, A.. Peter Wilhelm Lund e a sua visão das cavernas. *O Carste*, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. 24-31, jan. 2002.
- [2] CPRM & IBAMA. *APA Carste de Lagoa Santa: meio físico*. Belo Horizonte: [s. n.], 1998. v. 1.
- [3] GUIGUER, N. & FRANZ, T..1998. Visual MODFLOW. Waterloo Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Canada.
- [4] IBGE, 1976. Folha Lagoa Santa (SE.23-Z-C-VI-1). Escala 1:50.000.
- [5] KOHLER, H. C.. A evolução morfogenética da Lagoa Santa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. *Anais ... Associação Brasileira de Geologia*, 1978. p. 147-153.
- [6] KOHLER, H.C.; QUEIROZ NETO, J. P.; COLTRINARI, L.; FERREIRA, R.P.D.; STANOWSKI, S.M.; CANÇADO, A. M.; GOMES, D.G.; MACIEIRA, F.L.; NASCIMENTO, N.R. Os diferentes níveis de seixos nas formações superficiais da região de Lagoa Santa - MG. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 29., 1976. *Anais ... Associação Brasileira de Geologia*, [s. d.], p. 343-347.
- [7] PARIZZI, M. G.. A gênese e a dinâmica da Lagoa Santa com base em estudos palinológicos, geomorfológicos e geológicos de sua bacia. 1993. 55 p . Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [8] PILÓ, L. B.. Solos sobre calcários – Referências e perspectivas de análise no contexto da geomorfologia cárstica. *O Carste*, Belo Horizonte, v. 8, n. 1, p. 11-15, jan. 1996.
- [9] PILÓ, L. B.. Peter Wilhelm Lund e a geomorfologia cárstica de Lagoa Santa. *O Carste*, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. 12-17, jan. 2002.

- [10] PROUS, A.. O carste e a arqueologia. In: CONGRESSO ABEQUA, 3, 1992, Belo Horizonte. *Anais ...*Belo Horizonte: [s. n.], [s. d.]. p. 330-341.
- [11] RUBBIOLI, E. L. & AULER, A.. Peter Andréas Brandt e os levantamentos topográficos das grutas pesquisadas por Lund. *O Carste*, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. 18-23, jan. 2002.
- [12] SILVA, J. C. S.. *Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG*. 2003. 303 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [13] TECISAN. Relatório final de hidrogeologia: Desaguamento da Mina Lapa Vermelha – Lagoa Santa / MG. Belo Horizonte, 2000. 66 p. Relatório.
- [14] VASCONCELOS, S. M. S.. Estimativa da recarga subterrânea a partir do balanço hídrico: exemplo de Fortaleza (CE). *Revista de Geologia*, Fortaleza, v. 7, p. 27-34, 1994.