

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

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

**Joana Cruz de Souza e Silva**

**Belo Horizonte**

**2003**

**Caracterização Hidrogeológica Ambiental da Área de  
Influência da Mina Lapa Vermelha na Região Cárstica de  
Lagoa Santa, MG.**

**Joana Cruz de Souza e Silva**

**Joana Cruz de Souza e Silva**

**Caracterização Hidrogeológica Ambiental da Área de  
Influência da Mina Lapa Vermelha na Região Cárstica  
de Lagoa Santa, MG.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio-Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Hidrogeologia

Orientador: Prof. Celso de Oliveira Loureiro, PhD.

Belo Horizonte

Escola de Engenharia

Universidade Federal de Minas Gerais

2003

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio-Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Celso de Oliveira Loureiro, Ph.D (orientador)

---

Prof. Adelbani Brás da Silva, Ph.D

---

Prof. Mário Cicarelli, Ph.D

---

Eng. Otávio Eurico de Aquino Branco, Ph.D

---

Prof. Ricardo Hirata, Ph.D

*Os rios*

*João Cabral de Melo Neto<sup>1</sup>*

*Os rios que eu encontro  
vão seguindo comigo.  
Rios são de uma água pouca,  
em que a água sempre está por um fio.  
Cortados no verão  
que faz secar todos os rios.  
Rios todos com nome  
e que abraço como a amigos.  
Uns com nome de gente,  
outros com nome de bicho,  
uns com nome de santo,  
muitos só com apelido.  
Mas todos como a gente  
que por aqui tenho visto:  
a gente cuja vida  
se interrompe quando os rios.*

---

<sup>1</sup> Melo Neto, João Cabral. *Morte e vida severina: e outros poemas em voz alta*. 30. ed. Rio de Janeiro: José Olympio, 1990. 145 p.

*Aqueles que precisam dessas águas.*

## AGRADECIMENTO

Expoente da literatura húngara, Dezső Kosztolányi<sup>2</sup> é autor de uma obra que abrange a poesia, o romance e o conto. Um de seus contos mais interessantes é o intitulado “*O tradutor cleptomaniaco*”, no qual é relatada a estória de Gallus, um jovem inteligente, culto e poliglota, mas que era incorrigivelmente cleptomaniaco. Depois de passar um período encarcerado por causa de seus delitos, Gallus recebeu uma proposta de trabalho bastante atraente: traduzir uma obra do inglês para o húngaro.

Apesar de seu profundo conhecimento de ambos os idiomas, sua tradução foi prontamente rejeitada pelo editor. O motivo? Gallus era mesmo um cleptomaniaco inveterado. Se no original inglês descrevia-se um salão com quatro lustres de cristal, na versão húngara havia somente dois deles. Se o salário de um personagem no livro inglês era de 1.500 libras, no texto húngaro era de apenas 150 libras. E assim por diante:

*Trabalhava de várias maneiras. Na maioria das vezes, os objetos desapareciam sem mais nem menos. Aqueles tapetes, cofres, talheres de prata, cuja missão era enobrecer o original inglês, não os encontrei em nenhum lugar no manuscrito húngaro. Em outros casos só tirava uma parte, a metade ou dois terços. Se alguém mandava o criado levar cinco malas para a cabine do trem, ele só mencionava duas; sobre as outras três silenciava sorrateiramente. De todos os casos, para mim, o pior – porque isso decididamente mostrava má intenção e falta de hombridade – era que com frequência trocava as pedras e metais preciosos por outros sem nobreza e sem valor; a platina por lata, o ouro por latão, o diamante por zirconita ou vidro. (Kosztolányi, 1996).*

Não manifestar explicitamente minha gratidão àqueles que participaram ativamente na execução deste trabalho seria furtar-lhes a co-autoria e dar a errônea impressão de que este projeto é fruto de um esforço individual. Não lhes mencionar os nomes e sublinhar os papéis cruciais que desempenharam na concepção, sustentação e discussão deste projeto seria uma apropriação indevida de algo que não pertence apenas a uma pessoa. Seria, em suma, um ato cleptomaniaco – como aqueles do personagem de Kosztolányi.

---

<sup>2</sup> Kosztolányi, Dezső. *O tradutor cleptomaniaco*. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora 34, 1996. 93p.

E sendo este o resultado do esforço de várias pessoas, se há aqui algum mérito, este deve ser compartilhado com aqueles que lhes merecem.

Sou grata a Deus, por Sua força criadora, que dá vigor às águas e firmeza às rochas; por sustentar Sua Criação com beleza inexprimível – e por graciosamente conceder que eu seja alvo de Seus atributos e de Sua bondade: foi também Ele quem me criou; é quem dá vida ao meu coração; é quem não deixa meus passos vacilarem; é quem sustenta a minha existência.

O Professor Celso de Oliveira Loureiro figura como o “orientador” deste trabalho. A paciência, a disposição em ensinar e debater idéias, sua singular e dedicada preocupação com a solidez de minha formação científica serão sempre por mim lembrados como virtudes de alguém que, desde o início deste projeto, tornou-se para mim um referencial de zelo científico.

Tenho profunda gratidão pelos professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos e do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Em especial, agradeço ao “Mestre”, Professor Luiz Rafael Palmier, por ter despertado em mim o interesse pelas águas subterrâneas, ainda no curso de graduação. E, sobretudo, agradeço-lhe os ensinamentos, a amizade e a convivência agradável durante todos esses anos.

Este projeto foi enriquecido pelas críticas, sugestões e idéias de Antônio Cabral e de Paulo Pessoa, aos quais agradeço pelas valiosas contribuições.

Agradeço aos amigos Léa, Gisele e Rinaldo, que não se fatigaram em me incentivar durante todo o curso de mestrado, amenizando e alegrando as longas horas de estudo e de trabalho.

Meus pais, Jacimar e Marcos, pelo investimento abnegado e afetuoso, pelos princípios que moldaram meu caráter, pelo estímulo à busca do conhecimento: eles são parte viva de minha história e da história deste trabalho.

Ao meu querido irmão e amigo, Léo, que, através da literatura, contribuiu para embelezar este estudo.

Fernando Pessoa escreveu que *assim como falham as palavras em exprimir qualquer pensamento, assim falham os pensamentos em exprimir qualquer realidade*. Há um abismo profundo entre as possibilidades lingüísticas (inúmeras, mas

irremediavelmente limitadas) e o meu sentimento pelo Davi. Há muito fui acolhida pelo seu carinho companheiro, pela sua paciência doce, pela sua sabedoria simples e sensata; nos últimos meses, fui ainda mais agasalhada por esse amor terno e leal. Por tudo que vivemos juntos, devoto ao Davi minha gratidão, meu afeto, meu amor.

## RESUMO

O presente estudo consiste na caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha na região cárstica de Lagoa Santa, no Estado de Minas Gerais, Brasil.

Em operação desde 1976, a Mina Lapa Vermelha, de propriedade da Sociedade de Empreendimentos Industriais Comerciais e Mineração – SOEICOM S. A., extrai o calcário em uma cava a céu aberto, cujo nível atual do piso (*pit* da mina) é 735 m. A partir de 1992, quando o nível d'água do aquífero carbonático foi atingido, iniciou-se as atividades de rebaixamento do lençol freático.

Para a realização deste estudo, foram executadas algumas tarefas iniciais com vistas à coleta de informações específicas (*e.g.* levantamento topográfico; geomorfológico; geológico-estrutural; hidrogeológico e estudos de balanço hídrico) para caracterizar os principais condicionantes do sistema aquífero considerado. Assim, pela realização destas atividades, foi possível propor um modelo hidrogeológico conceitual, que permitiu gerar experimentalmente um modelo hidrogeológico computacional capaz de descrever o comportamento hidrodinâmico das águas subterrâneas na área circunvizinha à cava da Mina Lapa Vermelha. Para tanto se utilizou como ferramenta auxiliar o programa *Visual ModFlow*, sendo a área cárstica de estudo aproximada como um equivalente meio poroso.

Com base no modelo hidrogeológico proposto, foram analisadas as interferências hidrológicas e hidrogeológicas já causadas pela atividade mineradora desenvolvida na Mina Lapa Vermelha. Além disso, foram avaliadas as intervenções que poderão ser provocadas pelo rebaixamento do lençol freático, nesta mina, até a cota de 680 m.

Os resultados da simulação experimental do modelo hidrogeológico computacional sugerem que as atividades atuais de lavra ainda não provocaram modificações significativas ao aquífero carbonático da região. Paralelamente, registra-se que quando a cava da Mina Lapa Vermelha for aprofundada até as cotas de 700 e 680 m, algumas surgências cársticas da região terão suas vazões suprimidas, assim como, a lagoa central de Lagoa Santa terá uma redução de aproximadamente 6 cm na altura de sua lâmina d'água.

## ABSTRACT

This study consists of the hydrogeologic environmental characterization of the influential area of the Lapa Vermelha Mine located in the karst region of Lagoa Santa, in the State of Minas Gerais, Brazil.

In operation since 1976, the mine, which belongs to the Sociedade de Empreendimentos Industriais Comerciais e Mineração – SOEICON S. A., extracts the calcareous rock in an open air mining area, whose current pit is of 735 meters. In 1992, when the water level of the carbonatic aquifer was reached, the dewatering activities of the water table began.

To realize this study, some initial tasks were carried out aiming the gathering of specific information (*e.g.* topographical, geomorphological, geological-structural and hydrogeological field researches; water balance) to characterize the main conditioning factors of the aquifer system considered. Once these tasks were completed, it was possible to propose a conceptual hydrogeological model, in a regional scale, which allowed the creation of a computational hydrogeological model capable of describing the hydrodynamic behavior of the groundwater in the circumscribed area of the Lapa Vermelha Mine mining area. For so much, the *Visual ModFlow* was used as auxiliary tool, being the karst area study approached as an equivalent porous medium.

Based on the hydrogeological model proposed, the hydrogeological and hydrological impacts that had already been caused by the mining activity in the Mina Lapa Vermelha Mine were analyzed. And also the impacts that may be provoked by the drawdown of the water table, in this mine, to the point of 680 meters were evaluated.

The results of the simulation of the computational hydrogeological model, obtained with the use of the software *Visual ModFlow*, suggest that the current digging activities have not yet impacted significantly the carbonatic aquifer in the region. Parallel to this, we register that when the mining in the Mina Lapa Vermelha deepens to the point of 700 and 680 meters, some karst sources of the region will have their outflow suppressed, as well as will the Lagoa Santa have a reduction of approximately 6 centimeters of its water surface height.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTO</b> .....	vii
<b>RESUMO</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xvi
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	xxi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>4</b>
3.1 Revisão das informações existentes.....	4
3.2 Caracterização das condições ambientais na área da mina.....	4
3.3 Cadastro dos pontos d'água da região .....	4
3.4 Avaliação detalhada do balanço hídrico local .....	5
3.5 Identificação do domínio de interesse do modelo .....	5
3.6 Definição dos parâmetros hidráulicos.....	5
3.7 Interpretação hidroestratigráfica .....	5
3.8 Elaboração do modelo hidrogeológico conceitual.....	6
3.9 Elaboração do modelo hidrogeológico computacional.....	6
3.10 Avaliação ambiental.....	7
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>8</b>
<b>5 DEFINIÇÕES CONCEITUAIS E CARACTERIZAÇÃO DO AQUÍFERO CÁRSTICO</b> .....	<b>11</b>
<b>6 DESCRIÇÃO REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>18</b>
6.1 Situação da área de estudo no contexto geográfico .....	18
6.2 Aspectos geológicos .....	21
6.3 Características litoestratigráficas e estruturais.....	23
6.3.1 Complexo Gnáissico Migmatítico ou Embasamento Cristalino..	27
6.3.2 Grupo Bambuí.....	28
6.3.2.1 Formação Sete Lagoas .....	30
6.3.2.2 Formação Serra de Santa Helena .....	32
6.3.3 Coberturas Superficiais.....	32
6.4 Geomorfologia.....	36

6.5	Arqueologia, Espeleologia e Paleontologia .....	44
6.6	Vegetação.....	47
6.7	Hidrologia e Hidrografia.....	48
6.8	Características climatológicas.....	50
<b>7</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO LOCAL DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>51</b>
7.1	Definição do domínio de investigação.....	51
7.2	Geologia Local.....	54
7.3	Geologia Estrutural .....	59
7.4	Geomorfologia .....	65
7.5	Aspectos hidrográficos da área de interesse .....	70
<b>8</b>	<b>BALANÇO HÍDRICO .....</b>	<b>73</b>
8.1	Precipitação.....	74
8.1.1	Análise dos dados pluviométricos .....	74
8.2	Evaporação e evapotranspiração.....	79
8.2.1	Evaporação.....	79
8.2.2	Evapotranspiração.....	81
8.2.2.1	Cálculo da evapotranspiração potencial baseado na temperatura .....	82
8.2.2.2	Cálculo da evapotranspiração potencial baseado na radiação .....	85
8.2.2.3	Cálculo da evapotranspiração potencial baseado no método combinado.....	88
8.2.2.4	Análise dos resultados da evapotranspiração potencial .....	94
8.2.3	Evapotranspiração Real .....	95
8.2.3.1	Fórmula de L. Turc .....	95
8.2.3.2	Fórmula de Coutagne.....	99
8.2.3.3	Análise dos resultados da evapotranspiração real.....	101
8.3	Escoamento superficial e subterrâneo.....	102
8.4	Equação do balanço hídrico .....	105
<b>9</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO.....</b>	<b>108</b>
<b>10</b>	<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL .....</b>	<b>115</b>
10.1	Unidades Hidroestratigráficas.....	115
10.2	Comportamento Hidrodinâmico .....	118

10.2.1	Zonas de recarga dos aquíferos.....	119
10.2.2	Zonas de circulação intermediária .....	120
10.2.3	Zonas de descarga dos aquíferos.....	120
<b>11</b>	<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL.....</b>	<b>123</b>
11.1	Discussões preliminares.....	123
11.1.1	Modelagem em regiões cársticas .....	123
11.1.2	Etapas de modelagem .....	126
11.1.3	Aplicativo Computacional .....	129
11.1.4	Representação física das condições de contorno .....	130
11.2	Desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional.....	131
11.2.1	Definição dos contornos do domínio de cálculo.....	131
11.2.2	Consideração temporal.....	133
11.2.3	Malha de cálculo .....	133
11.2.4	Definição das condições de contorno .....	135
11.2.5	Parâmetros hidráulicos.....	138
11.2.6	Poços tubulares de bombeamento.....	142
11.3	Calibração do modelo hidrogeológico computacional .....	143
<b>12</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>150</b>
12.1	Cenários hidrogeológicos.....	153
12.1.1	Cenário 1 .....	153
12.1.2	Cenário 2 .....	153
12.1.3	Cenário 3 .....	156
12.1.4	Cenário 4 .....	163
12.2	Diagnóstico da lagoa central de Lagoa Santa .....	167
12.3	Análises secundárias .....	181
12.3.1	Análise da cava .....	181
12.3.2	Análise da lagoa central de Lagoa Santa .....	183
<b>13</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>185</b>
<b>14</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>188</b>
<b>15</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>190</b>

<b>16 ANEXO A – CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL .....</b>	<b>197</b>
16.1 Anexo A1 .....	198
16.2 Anexo A2 .....	203
16.3 Anexo A3 .....	207
<b>17 ANEXO B – HIDROGRAMAS E MÉTODO DE SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTOS .....</b>	<b>219</b>
17.1 Anexo B1 .....	220
17.2 Anexo B2 .....	221
17.3 Anexo B3 .....	229
17.4 Anexo B4 .....	230
17.5 Anexo B5 .....	240
<b>18 ANEXO C – MEDIÇÕES OBTIDAS ATRAVÉS DA REDE DE MONITORAMENTO .....</b>	<b>241</b>
18.1 Anexo C1 .....	242
18.2 Anexo C2 .....	248
18.3 Anexo C3 .....	254
18.4 Anexo C4 .....	264
18.5 Anexo C5 .....	270

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 5.1</b> - Afloramento de rochas carbonáticas no mundo.....	12
<b>Figura 5.2</b> - Dissolução e precipitação da calcita num perfil cárstico de origem calcária.....	15
<b>Figura 5.3</b> - Principais componentes do sistema cárstico.....	16
<b>Figura 5.4</b> - Representação esquemática do escoamento em uma região cárstica.....	17
<b>Figura 6.1</b> - Localização da área de estudo.....	20
<b>Figura 6.2</b> - Esboço geológico do Brasil.....	21
<b>Figura 6.3</b> - Localização do Carste de Lagoa Santa no esboço geológico do Cráton do São Francisco.....	22
<b>Figura 6.4</b> - Arcabouço tectônico da porção sul do cráton do São Francisco.....	25
<b>Figura 6.5</b> - Domínios estruturais de deformação na área do Projeto VIDA.....	26
<b>Figura 6.6</b> - Mapa litoestratigráfico da APA Carste de Lagoa Santa.....	34
<b>Figura 6.7</b> - Forma triangular da lagoa central de Lagoa Santa.....	38
<b>Figura 6.8</b> - Forma triangular da lagoa central de Lagoa Santa.....	38
<b>Figura 6.9</b> - Processo evolutivo da lagoa central de Lagoa Santa.....	40
<b>Figura 6.10</b> - Esboço das formações superficiais na bacia de drenagem da Lagoa Santa, MG.....	43
<b>Figura 6.11</b> - Gruta da Lapinha, Lagoa Santa.....	46
<b>Figura 6.12</b> - Gruta dos Helictites, Lagoa Santa.....	46
<b>Figura 7.1</b> - Perfil dos piezômetros da Mina Lapa Vermelha.....	56
<b>Figura 7.2</b> - Mapa de geologia superficial local.....	57
<b>Figura 7.3</b> - Perfil geológico da área de estudo.....	58
<b>Figura 7.4</b> - Mapa de geologia estrutural – cota 640 m.....	60
<b>Figura 7.5</b> - Mapa de geologia estrutural – cota 680 m.....	61
<b>Figura 7.6</b> - Mapa de geologia estrutural – cota 700 m.....	62
<b>Figura 7.7</b> - Mapa de geologia estrutural – cota 740 m.....	63
<b>Figura 7.8</b> - Mapa de geologia estrutural – cota 770 m.....	64
<b>Figura 7.9</b> - Dolina do Jacaré.....	65
<b>Figura 7.10</b> - Surgência do Tadinho.....	65
<b>Figura 7.11</b> - Detalhe da surgência do Tadinho.....	66
<b>Figura 7.12</b> - Detalhe do maciço calcário onde surge a nascente do Tadinho.....	66

<b>Figura 7.13</b> - Aspecto geral da topografia da área de influência da Mina Lapa Vermelha.....	68
<b>Figura 7.14</b> - Aspecto geral da topografia da área de influência da Mina Lapa Vermelha.....	69
<b>Figura 8.1</b> - Precipitação mensal do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, no período de 1988 a 2001.....	75
<b>Figura 8.2</b> - Média pluviométrica mensal do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, no período de 1988 a 2001.....	76
<b>Figura 8.3</b> - Totais pluviométricos anuais (mm) e localização das estações pluviométricas – Período: 1961-1990.....	78
<b>Figura 8.4</b> - Evaporação média mensal medida na estação Lagoa Santa entre 1961-1970.....	80
<b>Figura 8.5</b> - Comparação entre os valores das precipitações médias anuais com os valores anuais da evapotranspiração potencial mensal, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999.....	85
<b>Figura 8.6</b> - Comparação entre os valores das precipitações anuais com os valores anuais da evapotranspiração potencial, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999.....	88
<b>Figura 8.7</b> - Comparação entre os valores das precipitações anuais e os valores anuais da evapotranspiração potencial, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999.....	94
<b>Figura 8.8</b> - Comparação entre os valores das precipitações médias anuais com os valores anuais da evapotranspiração real média, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999.....	97
<b>Figura 8.9</b> - Comparação entre os valores das precipitações médias anuais com os valores anuais da evapotranspiração real média, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999.....	99
<b>Figura 8.10</b> - Comparação entre os valores das precipitações médias anuais com os valores anuais da evapotranspiração real média, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999, segundo a equação de Coutagne.....	101
<b>Figura 8.11</b> - Técnicas de separação dos tipos de escoamento.....	103

<b>Figura 9.1</b> - Régua linimétrica instalada na surgência do Tadinho.....	110
<b>Figura 9.2</b> - Poço tubular localizado na várzea da Lagoa Santa. ....	110
<b>Figura 9.3</b> - Poço tubular situado na Fazenda Ribeirão da Mata. ....	111
<b>Figura 9.4</b> - Curva de descarga característica do córrego Cafundó. ....	112
<b>Figura 9.5</b> - Curva de descarga característica do córrego Carrapato. ....	113
<b>Figura 9.6</b> - Evolução das medições de nível d'água.....	114
<b>Figura 10.1</b> - Representação da distribuição das linhas equipotenciais elaboradas a partir dos dados de monitoramento. ....	118
<b>Figura 10.2</b> - Domínios hidrogeológicos presentes na área de influência da Mina Lapa Vermelha. ....	122
<b>Figura 11.1</b> - Etapas de modelagem.....	127
<b>Figura 11.2</b> - Definição do domínio de cálculo do modelo hidrogeológico com os respectivos contornos no plano horizontal. ....	132
<b>Figura 11.3</b> - Definição do domínio de cálculo do modelo hidrogeológico com os respectivos contornos no plano vertical (escala vertical ampliada dez vezes).....	132
<b>Figura 11.4</b> - Malha de cálculo adotada no modelo hidrogeológico computacional (200 colunas, 200 linhas e 31 camadas – Célula típica com 50×50×10 m). .	134
<b>Figura 11.5</b> - Definição do domínio de cálculo, com a indicação das células ativas, em branco, e inativas em verde. ....	136
<b>Figura 11.6</b> - Valores de recarga adotados, após a calibração, no modelo hidrogeológico computacional. ....	138
<b>Figura 11.7</b> - Representação em planta dos domínios das unidades hidroestratigráficas existentes na região de interesse do modelo (24 <sup>a</sup> camada). ....	141
<b>Figura 11.8</b> - Representação em corte vertical, na seção A-A' (Figura 11.7) das unidades hidroestratigráficas existentes na região de interesse do modelo. (Obs.: dimensão vertical ampliada em dez vezes com relação à dimensão horizontal). ....	141
<b>Figura 11.9</b> - Localização dos poços tubulares, acomodados no modelo hidrogeológico computacional. ....	143
<b>Figura 11.10</b> - Distribuição dos pontos utilizados na calibração do modelo hidrogeológico computacional. ....	146

<b>Figura 11.11</b> - Curva de calibração – Comparação entre as cargas hidráulicas medidas e simuladas no modelo calibrado. ....	148
<b>Figura 12.1</b> - Seção horizontal de rebaixamento do nível d'água na 21ª camada (entre 736 e 728 m) com a cava localizada na cota de 735 m (cenário 2).....	155
<b>Figura 12.2</b> - Representação em corte vertical AA' (Figura 12.1) do rebaixamento do cenário atual com a cava localizada na cota de 735 m (cenário 2). ....	155
<b>Figura 12.3</b> - Seção horizontal de rebaixamento do nível d'água na 25ª camada (entre 703 e 696,5 m) com a cava localizada na cota de 700 m (cenário 3)....	157
<b>Figura 12.4</b> - Representação em corte vertical AA' (Figura 12.3) do rebaixamento do cenário com a cava localizada na cota de 700 m (cenário 3). ....	157
<b>Figura 12.5</b> - Representação horizontal da direção das velocidades de escoamento na 24ª camada (entre 710 e 703 m), com a cava localizada na cota de 735 m (cenário 2). ....	159
<b>Figura 12.6</b> - Representação horizontal da direção das velocidades de escoamento na 24ª camada (entre 710 e 703 m), com a cava localizada na cota de 700 m (cenário 3). ....	159
<b>Figura 12.7</b> - Representação horizontal da magnitude das velocidades de escoamento na 24ª camada (entre 710 e 703 m) com a cava localizada na cota de 735 m (cenário 2). ....	160
<b>Figura 12.8</b> - Representação horizontal da magnitude das velocidades de escoamento na 24ª camada (entre 710 e 703 m) com a cava localizada na cota de 700 m (cenário 3). ....	161
<b>Figura 12.9</b> - Representação horizontal do caminhamento de partículas específicas na 24ª camada (entre 710 e 703 m) com a cava localizada na cota de 735 m (cenário 2). ....	162
<b>Figura 12.10</b> - Representação horizontal do caminhamento de partículas específicas na 24ª camada (entre 710 e 703 m) com a cava localizada na cota de 700 m (cenário 3). ....	162
<b>Figura 12.11</b> - Seção horizontal de rebaixamento do nível d'água na 28ª camada (entre 683 e 676,5 m) com a cava localizada na cota de 680 m (cenário 4).....	164

<b>Figura 12.12</b> - Representação em corte vertical AA' (Figura 12.11) do rebaixamento do cenário com a cava localizada na cota de 680 m (cenário 4). .....	165
<b>Figura 12.13</b> - Pontos coletados nos trabalhos de batimetria realizada na lagoa central de Lagoa Santa, no mês de agosto de 2003. ....	168
<b>Figura 12.14</b> - Isolinhas representando as cotas, em metros, do fundo da lagoa central de Lagoa Santa. ....	169
<b>Figura 12.15</b> - Resultado em superfície da batimetria realizada na lagoa central de Lagoa Santa, no mês de agosto de 2003. ....	170
<b>Figura 12.16</b> - Perfil típico da lagoa central de Lagoa Santa, no sentido N-S, resultante da batimetria realizada no mês de agosto de 2003. ....	171
<b>Figura 12.17</b> - Perfil típico da lagoa central de Lagoa Santa, no sentido L-W, resultante da batimetria realizada no mês de agosto de 2003. ....	171
<b>Figura 12.18</b> - Ilustração da alteração da área de exposição da lagoa central de Lagoa Santa quando esta tem sua cota alterada. ....	172
<b>Figura 12.19</b> - Gráfico demonstrativo da evolução dos níveis d'água na cava da Mina Lapa Vermelha, mediante o avanço do rebaixamento simulado pelo modelo hidrogeológico computacional. ....	181
<b>Figura 12.20</b> - Gráfico demonstrativo da evolução dos níveis d'água na lagoa mediante o avanço do rebaixamento simulado pelo modelo computacional .....	184

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 6.1</b> - Síntese das principais colunas estratigráficas formuladas para a Bacia do São Francisco (com base em Dardenne 1978).....	29
<b>Tabela 6.2</b> - Coluna estratigráfica regional .....	35
<b>Tabela 8.1</b> - Índices pluviométricos medidos na estação meteorológica do Aeroporto Internacional Presidente Tancredo Neves (Confins) no período entre 1988 e 2000.....	75
<b>Tabela 8.2</b> - Médias pluviométricas mensais medidas em estações localizadas nas vizinhanças de Lagoa Santa.....	77
<b>Tabela 8.3</b> - Evaporação medida através de Tubo Piché na estação de Lagoa Santa no período entre 1961 e 1970.....	80
<b>Tabela 8.4</b> - Temperatura média mensal, representativa da região em estudo, para o período entre 1988 e 2001.....	83
<b>Tabela 8.5</b> - Evapotranspiração potencial média anual representativa da região em estudo, segundo Thornthwaite.....	84
<b>Tabela 8.6</b> - Radiação solar medida no 5º Distrito de Meteorologia do INMET, situado em Belo Horizonte, no período entre 1991 e 1999.....	86
<b>Tabela 8.7</b> - Evapotranspiração potencial média anual, representativa da região em estudo, segundo a metodologia de Jensen e Haise.....	87
<b>Tabela 8.8</b> - Umidade relativa medida no 5º Distrito de Meteorologia do INMET, situado em Belo Horizonte, no período entre 1990 e 2002.....	91
<b>Tabela 8.9</b> - Insolação total, medida no 5º Distrito de Meteorologia do INMET, situado em Belo Horizonte, no período entre 1990 e 2002.....	91
<b>Tabela 8.10</b> - Velocidade dos ventos, medida no 5º Distrito de Meteorologia do INMET, situado em Belo Horizonte, no período entre 1960 e 1970.....	92
<b>Tabela 8.11</b> - Evapotranspiração potencial média anual, representativa para a área de estudo, no período entre 1990 e 1999, segundo o método combinado... ..	93
<b>Tabela 8.12</b> - Evapotranspiração real média anual, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999, segundo a equação de L. Turc, citada por Vasconcelos (1994).....	96

<b>Tabela 8.13</b> - Evapotranspiração real média anual, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999, segundo a equação de L. Turc, citada por Custodio & Llamas (1976).....	98
<b>Tabela 8.14</b> - Evapotranspiração real média anual, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999, segundo a equação de Coutagne. ....	100
<b>Tabela 8.15</b> - Variáveis envolvidas no balanço hídrico. ....	106
<b>Tabela 9.1</b> - Localização dos pontos da rede de monitoramento. ....	109
<b>Tabela 10.1</b> - Materiais litológicos distintos, integrantes da região de interesse, com a identificação das respectivas unidades hidroestratigráficas.....	116
<b>Tabela 11.1</b> - Distribuição da malha de cálculo na direção vertical; caracterização das camadas, por cotas altimétricas, na área do modelo. ....	135
<b>Tabela 11.2</b> - Caracterização das sete unidades hidro-estratigráficas adotadas no modelo hidrológico computacional, com a indicação dos respectivos valores de condutividade hidráulica.....	140
<b>Tabela 11.3</b> - Identificação dos poços tubulares, com suas respectivas vazões médias, acomodadas no modelo hidrogeológico computacional. ....	142
<b>Tabela 11.4</b> - Pontos utilizados para a calibração do modelo hidrogeológico computacional. ....	145
<b>Tabela 11.5</b> - Dados dos piezômetros utilizados para a calibração do modelo hidrogeológico computacional.....	146
<b>Tabela 11.6</b> - Resultado da calibração - Comparação entre as vazões de água medidas no campo e simuladas pelo modelo hidrogeológico computacional calibrado.....	149
<b>Tabela 11.7</b> - Resultado da calibração – Análise qualitativa das vazões de água medidas no campo e simuladas pelo modelo hidrogeológico computacional calibrado. ....	149
<b>Tabela 12.1</b> - Quadro resumo das simulações hidrogeológicas computacionais. ....	152
<b>Tabela 12.2</b> - Resultados da simulação obtidos para o cenário 1 (condição hidrodinâmica original).....	153
<b>Tabela 12.3</b> - Resultados da simulação para o cenário com a cava a 735 m (cenário 2). . .....	154

<b>Tabela 12.4</b> - Resultados da simulação para o cenário com a cava a 700 m (cenário 3). . .....	156
<b>Tabela 12.5</b> - Resultados da simulação para o cenário com a cava a 680 m (cenário 4). . .....	163
<b>Tabela 12.6</b> - Resultados da simulação obtidos para os diversos cenários. ....	165
<b>Tabela 12.7</b> - Comparação percentual entre os resultados das simulações dos diferentes cenários hidrodinâmicos e a condição hidrodinâmica original (sem a presença da cava). ....	166
<b>Tabela 12.8</b> - Calculo do impacto ambiental causado à Lagoa Santa quando o lençol freático é rebaixado até a cota de 700 m na Mina Lapa Vermelha. ....	179

## 1 INTRODUÇÃO

O meio cárstico, segundo Prous (1992), *influi sobre as populações humanas pela sua paisagem e os horizontes que oferece, pelas possibilidades diversas de nele organizar o habitat e por permitir vários tipos de exploração econômica.*

As regiões cársticas normalmente são áreas de grande interesse econômico e hidrogeológico porque, na maioria das vezes, possuem bons solos, riqueza mineral e grandes reservas de água no subsolo. Atualmente, em virtude desse patrimônio, um grande contingente populacional vive nestas regiões, gerando uma demanda de abastecimento de águas cársticas, confirmando o posicionamento de Prous (1992).

Por estar próximo ao centro urbano de Belo Horizonte e apresentar recursos minerais que são explorados principalmente pelos fabricantes de cimento, o município de Lagoa Santa, região cárstica de destaque no país, vem vivenciando o conflito entre o avanço da mineração e os impactos ambientais por ela causados. Paralelamente, a região de Lagoa Santa é, reconhecidamente, uma das mais importantes do país sob 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 os aspectos do balanço hídrico, do comportamento da dinâmica das águas subterrâneas nem do rebaixamento do lençol freático causado pelas atividades mineradoras. Assim sendo, este trabalho visou, de forma experimental, caracterizar a hidrogeologia e avaliar as interferências ambientais causadas pelas atividades da Mina Lapa Vermelha/SOEICOM, localizada no município de Lagoa Santa.

A Sociedade de Empreendimentos Industriais Comerciais e Mineração - SOEICOM S.A. - tem como atividade a exploração e aproveitamento de jazidas minerais no território nacional e o exercício da indústria e comércio de materiais de

construção. A Fábrica de Cimentos LIZ - SOEICOM está sediada no município de Vespasiano, sendo que o setor de mineração encontra-se no município vizinho de Lagoa Santa, de onde são extraídos os calcários da Mina Lapa Vermelha.

A Mina Lapa Vermelha, que opera na região desde 1976, extrai o calcário em uma cava aberta cujo nível do piso atual é 735 m. Ao atingir esta cota, em 1992, alcançou-se o nível d'água do aquífero carbonático. Desde então, em virtude do aporte das águas subterrâneas à cava da mina, somado às freqüentes inundações as quais o sistema é exposto nos períodos chuvosos, vem sendo mantido um sistema de bombeamento, à base de bombas flutuantes. Dessa maneira, as águas do *sump* são aduzidas por cerca de 800 metros e lançadas em um ponto de descarga no interior do maciço carbonático.

Em decorrência do andamento das atividades de lavra, da necessidade da empresa de expandir a sua área de exploração e, simultaneamente, da necessidade de conhecer os efeitos de tais atividades no sistema hidrogeológico constituído pelos aquíferos de rochas calcárias, fez-se necessária a elaboração de um estudo, a fim de avaliar as modificações hidrológicas e hidrogeológicas já causadas e as que eventualmente serão provocadas pelo exercício da atividade mineradora nesta região cárstica..

Dessa maneira, este trabalho propôs-se elaborar um estudo hidrogeológico da região cárstica da área de influência da Mina Lapa Vermelha que contemplasse o conhecimento do regime de circulação das águas do aquífero local e suas propriedades hidráulicas. Tal pesquisa permitiu, assim, a compreensão dos processos hidrogeológicos envolvidos na área de estudo e, desta maneira, possibilitou a avaliação experimental das interferências já causadas pela mineração sobre as águas subterrâneas do local, esperando-se minimizar as alterações hidrológicas e hidrogeológicas ambientais futuras.

## **2 OBJETIVOS**

A pesquisa proposta visou caracterizar a hidrogeologia ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa/MG, abrangendo uma extensão de 47 km<sup>2</sup>.

Para tanto, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- definir o balanço hídrico da região a partir de dados adquiridos junto à Mina Lapa Vermelha, ao Aeroporto Internacional Presidente Tancredo Neves, ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), à CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente) e à ANA (Agência Nacional de Águas);
- elaborar um modelo conceitual que retrate o comportamento do fluxo subterrâneo;
- analisar, experimentalmente, o comportamento hidrodinâmico dos aquíferos da área através de um modelo hidrogeológico computacional de escoamento;
- confrontar o modelo hidrogeológico computacional de escoamento com o modelo hidrogeológico conceitual;
- simular cenários passados e futuros de utilização de água subterrânea; e,
- avaliar as interferências hidrológicas ambientais geradas pelo desaguamento da mina e o conseqüente rebaixamento das águas subterrâneas locais.

Além dos objetivos já expostos, o presente trabalho buscou, também, responder, especificamente, ao questionamento mais comum que afeta diretamente os interesses da comunidade, qual seja:

- se a atividade de lavra de calcário na área da mineração Lapa Vermelha, juntamente com o seu rebaixamento do lençol freático, irá interferir no nível da lagoa central de Lagoa Santa e dos córregos, rios e nascentes da região.

### **3 METODOLOGIA**

Para o desenvolvimento do estudo em questão, foram seguidas as etapas descritas a seguir.

#### **3.1 Revisão das informações existentes**

Inicialmente foram feitas a identificação, coleta e revisão das informações topográficas, geomorfológicas, geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas disponíveis sobre a área, em condições anteriores às atividades de lavra e em condições atuais. Dessa maneira, foram criados subsídios para avaliação do comportamento hidrogeológico do sistema local, assim como para a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual e análise do balanço hídrico.

#### **3.2 Caracterização das condições ambientais na área da mina**

Realizou-se uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de caracterizar as condições de cobertura vegetal e de uso dos solos e das águas na região 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.

#### **3.3 Cadastro dos pontos d'água da região**

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

A este cadastro, também, foram acrescentados os dados de pontos d'água da região monitorados pela CPRM e pela COPASA (Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais).

### **3.4 Avaliação detalhada do balanço hídrico local**

Considerando que a infiltração e circulação de água e a presença ou ausência de solos e vegetação nos ambientes calcários carstificados estão intimamente relacionados ao clima, torna-se fundamental a análise dos dados climatológicos da região. Dessa maneira, as séries temporais climatológicas e hidrológicas, assim como as informações de caracterização ambiental da área da mina foram utilizadas para uma estimativa do balanço hídrico local, nas condições atuais.

### **3.5 Identificação do domínio de interesse do modelo**

O comportamento hidrogeológico da área de estudo foi avaliado em um modelo computacional desenvolvido, experimentalmente, em um domínio de interesse limitado especificamente sobre a área de influência da Mina Lapa Vermelha.

Por tratar-se de uma região que sofre com a carstificação, o processo para delimitação do domínio de interesse do modelo foi bastante criterioso, tomando-se como base inicial a bacia hidrográfica que circunscreve a Mina Lapa Vermelha. Além da hidrologia superficial, da topografia e da geomorfologia, também foram considerados os resultados de ensaios feitos com traçadores corantes para determinar os limites desta área.

### **3.6 Definição dos parâmetros hidráulicos**

A definição dos parâmetros hidráulicos do sistema hidrogeológico local pôde ser feita com base em pesquisa bibliográfica, sendo esta realizada a partir de um banco de dados constituído pelos testes de bombeamento desenvolvidos na região pela COPASA. Esta pesquisa foi enriquecida, também, com os valores publicados pela TECISAN (Técnica de Engenharia Civil e Sanitária Ltda).

### **3.7 Interpretação hidroestratigráfica**

Realizou-se uma análise litoestratigráfica dos dados existentes, relativos às sondagens exploratórias e à instalação de piezômetros, identificando e definindo as respectivas unidades hidroestratigráficas e incorporando-as, para toda a área, nos modelos hidrogeológicos conceitual e computacional.

### **3.8 Elaboração do modelo hidrogeológico conceitual**

Após a análise dos dados existentes, foi desenvolvido um modelo hidrogeológico conceitual completo da hidroestratigrafia e do escoamento da água subterrânea da área de influência da Mina Lapa Vermelha.

### **3.9 Elaboração do modelo hidrogeológico computacional**

O modelo hidrogeológico conceitual, elaborado para a área de influência da Mina Lapa Vermelha, 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.

Para o desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional em questão, utilizou-se, como ferramenta complementar, o programa *Visual ModFlow*, elaborado pela Waterloo Hydrogeologic.

Para o desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional foram seguidas as seguintes etapas:

- 1) levantamento da base topográfica da área de estudo para sua incorporação no programa *Visual ModFlow* (Guiguer & Franz, 1998). Para tanto, utilizou-se a carta do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) em escala 1:50.000, Folha Lagoa Santa (SE.23-Z-C-VI-1);
- 2) definição dos limites de abrangência da área a ser modelada;
- 3) incorporação das camadas hidroestratigráficas fornecidas pelo modelo hidrogeológico conceitual;
- 4) apropriação dos valores dos parâmetros hidráulicos para cada unidade hidroestratigráfica;
- 5) definição das condições de contorno, tais como drenos, rios, cargas constantes, fluxos nulos, recarga, descarga, poços de bombeamento e barreiras hidráulicas; e,
- 6) calibração do modelo, através do ajuste da recarga e dos parâmetros hidráulicos, objetivando uma convergência entre os valores simulados de cota e vazão d'água e os respectivos valores medidos em campo.

### **3.10 Avaliação ambiental**

Após a elaboração do modelo hidrogeológico computacional e sua devida calibração, foi realizada uma análise experimental sobre as possíveis interferências hidrológicas e hidrogeológicas ambientais já provocadas e as que serão causadas, a fim de orientar a exploração da água subterrânea.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A região de Lagoa Santa tem despertado interesse de um grande número de pesquisadores. A seguir são comentados alguns trabalhos acadêmicos e/ou técnicos, cuja relevância apresenta interesse na aplicação direta ou indireta do escopo do presente estudo.

Como uma das primeiras contribuições para o entendimento da área de estudo, registram-se os trabalhos desenvolvidos por Lund. O naturalista dinamarquês Peter Wilhelm Lund, segundo Auler (2002), *visitou mais de 800 cavernas na região central de Minas Gerais, elaborando interpretações detalhadas sobre os vários processos que ocorrem no interior das grutas*. Por tantos feitos, Lund é reconhecido como pai da arqueologia e da espeleologia, sendo o primeiro a assinalar a presença de inscrições rupestres, além de descrever instrumentos líticos encontrados.

De acordo com Piló (2002), a geomorfologia de Lund foi recolhida em alguns documentos, como a Segunda memória sobre as cavernas e a Primeira, a Segunda e a Terceira memória sobre a fauna das cavernas. Esses documentos, conforme Piló (2002), foram reunidos nas “Memórias sobre a Paleontologia Brasileira”.

Journaux (1977), em “*Méthodologie pour une cartographie de l’environnement des sites préhistoriques: l’exemple de Lagoa Santa (Minas Gerais, Brésil)*”, pesquisou a geomorfologia da área e estudou os sítios existentes na região.

Carvalho *et. al.* (1978) estabeleceram o comportamento hídrico de Lagoa Santa através de suas condicionantes naturais, tais como rocha, solo, clima, vegetação e ação antrópica.

Kohler (1978), estudando a bacia que aloja a lagoa central de Lagoa Santa, estabeleceu o ritmo de eventos morfogenéticos ocorridos na região e analisou a origem daquela lagoa, assim como a sua estratigrafia e orientação de suas camadas.

Coutinho & Barbosa (1980) diagnosticaram o caráter pseudo-cárstico da lagoa central de Lagoa Santa através da análise de teores de matéria orgânica, nitrogênio orgânico total, fósforo total, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe e Mn, analisados em três frações de sedimentos. Este mesmo estudo foi realizado também na Lagoa Olhos d’Água e

Lagoa do Sumidouro, distinguindo, então, a geomorfologia de cada uma das lagoas estudadas.

Kohler & Malta (1991) descreveram uma excursão realizada na região de Lagoa Santa, buscando contemplar os diferentes aspectos que testemunham as transformações ocorridas durante o Quaternário. Dessa forma, este trabalho relatou, de maneira minuciosa, os aspectos relacionados à: geografia; geologia; morfodinâmica; arqueologia; história e paleontologia.

Prous (1992), em “O Carste e a Arqueologia”, apresentou alguns aspectos da ocupação das regiões cársticas, particularmente na pré-história. Mostrou, também, as peculiaridades da arqueologia em abrigos.

Baeta *et. al.* (1992) apresentaram o levantamento sistemático da arte rupestre na região de Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, tendo como objetivo estudar a relação entre os sucessivos autores de grafismos rupestres com a paisagem e a sua percepção de cada sítio.

Parizzi (1993), estudando a gênese e a dinâmica da lagoa central de Lagoa Santa, com base em estudos palinológicos, geomorfológicos e geológicos de sua bacia, contribuiu para o entendimento da dinâmica hídrica de subsuperfície e, também, para o conhecimento das distinções existentes entre o ambiente aquífero carbonático e o sistema da referida lagoa.

CPRM (1994 a, b) apontou diversos dados da área de interesse na configuração do arcabouço geológico, espeleológico, geomorfológico e hidrogeológico de uma extensa faixa de rochas carbonáticas, delimitada como área de estudo do Projeto Vida (Confins, Lagoa Santa, Matozinhos, Pedro Leopoldo, Sete Lagoas e Vespasiano). Assim, criou-se um banco de dados abrangente e facilitador da integração dos atributos geoambientais inerentes à referida região.

CPRM & IBAMA (1998 a, b), através da criação das áreas de preservação ambiental da APA (Área de Proteção Ambiental) Carste de Lagoa Santa, reforçaram o estudo iniciado pelo Projeto Vida, objetivando garantir a preservação do conjunto físico, espeleológico, arqueológico e cultural da região cárstica de Lagoa Santa.

Malta (1995), em sua dissertação, identificou os processos responsáveis pela evolução do endo e exocarste do sistema cárstico da Lapa Vermelha de Pedro Leopoldo e os integrou aos fenômenos cársticos ocorridos no planalto de Lagoa Santa.

Pessoa (1996), através do levantamento e identificação das formas de uso das águas subterrâneas, das características litoestratigráficas locais e das variáveis hidroclimatológicas, realizou a quantificação das reservas aquíferas dos terrenos de rochas carbonáticas da região de Sete Lagoas/MG.

Coutard *et. al.* (s.d.) apresentaram resumidamente alguns comentários acerca da carta da região cárstica de Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, abrangendo aspectos sobre a hidrologia do carste, a evolução cárstica e suas formas e a ocupação humana.

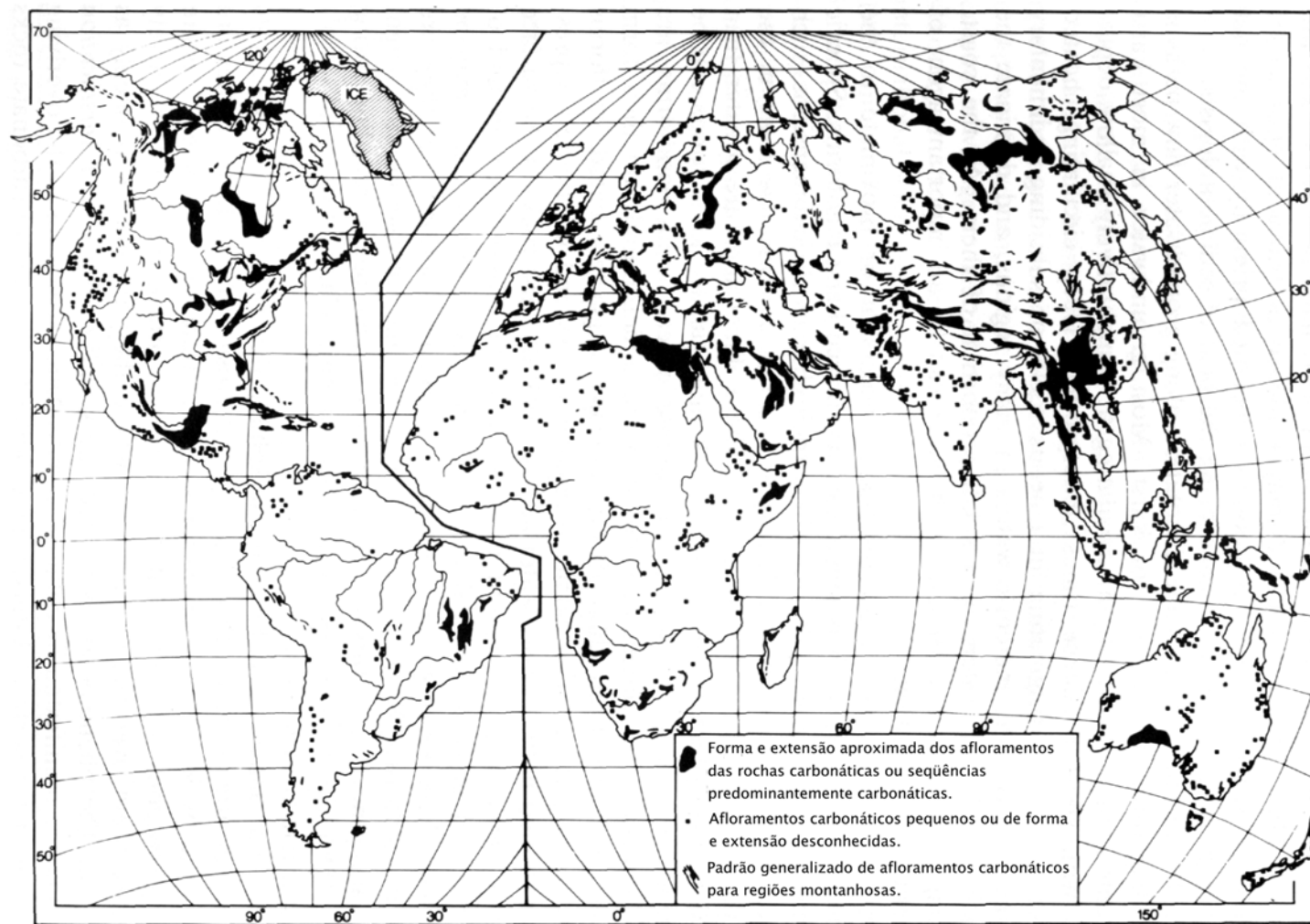
PLAMBEL (s.d.), através do levantamento das informações hidrológicas, geológicas e geomorfológicas, descreveu a região de Lagoa Santa. Além disso, tal trabalho englobou uma descrição dos aspectos históricos, arqueológicos, antropológicos e naturais, versando estes sobre fauna e flora.

## 5 DEFINIÇÕES CONCEITUAIS E CARACTERIZAÇÃO DO AQÜÍFERO CÁRSTICO

Conforme Lladó (1970), o termo carste ou *carst* deriva do vocábulo *kras*, que significa "campo de pedras calcárias". Designa a região noroeste da Iugoslávia e nordeste da Itália, que se localiza na península de Istria, ao norte do mar Adriático, onde ocorreram as primeiras investigações sobre a circulação da água em regiões calcárias.

Ainda segundo Lladó (1970), os fenômenos cársticos representam um conjunto de transformações que se produzem em uma região calcária como consequência da circulação da água, sendo a água o elemento ativo e o calcário o meio passivo. Dessa forma, o fenômeno cárstico é produzido enquanto existe circulação hídrica. Como esta depende diretamente do clima, pode-se afirmar que nas regiões chuvosas os fenômenos cársticos se manifestam com maiores intensidades. O processo de carstificação também é favorecido, consoante Karmann *in* Teixeira *et. al.* (2001), em climas quentes com densa vegetação. Nestes ambientes, *a grande produção de CO<sub>2</sub> no solo é maior, aumentando o teor de ácido carbônico nas águas de infiltração, estimulando, conseqüentemente, a dissolução das rochas* (Karmann *in* Teixeira *et. al.*, 2001).

O termo carste, antes restrito a regiões calcárias, se estende atualmente a outras rochas carbonáticas, como mármore e dolomitos, e a outras rochas solúveis ou friáveis, tais como evaporitos e quartzitos. Entretanto, segundo Marinho (1991), *é nas rochas carbonáticas que o carste se apresenta mais diversificado e com maior expressão regional em termos mundiais, devido principalmente a alta solubilidade e resistência mecânica, em comparação a outras litologias*. Dessa maneira, as principais ocorrências de carstes no mundo ocorrem em terrenos que apresentam afloramentos de rochas carbonáticas, como mostrado na Figura 5.1, conforme Ford & Williams (1989). Vale ressaltar que as rochas carbonáticas são aquelas que apresentam em sua composição minerais predominantes como a calcita (CaCO<sub>3</sub>) e a dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), os quais dissociam-se nos íons Ca<sup>+2</sup> e/ou Mg<sup>+2</sup> e CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> pela ação da água.



**Figura 5.1 -** Afloramento de rochas carbonáticas no mundo.  
**Fonte -** Ford & Williams, 1989.

Segundo Karmann *in* Teixeira *et. al.* (2001), as rochas evaporíticas originam carstes somente em condições especiais, como em áreas áridas a semi-áridas, pois seu intemperismo sob clima úmido é tão rápido que não permite o pleno desenvolvimento do carste.

Já os quartzitos, de acordo com Karmann *in* Teixeira *et. al.* (2001), podem originar ambientes carstes quando, ainda que raramente, *sofrem longos períodos de exposição à ação da água subterrânea.*

A ocorrência dos ambientes carstificados, portanto, está relacionada à incidência de algumas características, como descrito a seguir:

*Existem determinados condicionantes para a elaboração do carste, sendo a composição mineralógica da rocha solúvel, sua estrutura (acamamento e fraturamento), espessura, localização topográfica, o clima atuante, a vegetação e solos existentes, os principais fatores no modelado destes relevos. A variação nestes componentes, na escala de tempo-espço, modifica a intensidade ou mesmo a forma de atuação dos processos morfogenéticos existentes, acarretando na criação de inúmeras tipologias cársticas. (Marinho, 1990).*

As regiões cársticas apresentam características especiais do ponto de vista geomorfológico e hidrogeológico. São elas, de acordo com Costa & Silva *in* Feitosa & Manuel Filho (2000):

- presença de extensas zonas sem correntes de água superficial;
- ocorrência de depressões cuja drenagem é subterrânea;
- existência de cavidades no subsolo pelas quais circulam correntes de água subterrânea;
- pequeno valor de escoamento superficial;
- grande rapidez de infiltração das chuvas e outras águas superficiais;
- grande variação dos valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento;
- complexa circulação de água subterrânea; e,
- existência de zonas desnudas de vegetação.

Além das características acima citadas, White (1988) destaca que as paisagens cársticas são marcadas, do mesmo modo, pela presença de depressões fechadas de diferentes tamanhos e arranjos, conhecidas como dolinas.

Os carstes são caracterizados, também, por apresentarem entradas de águas superficiais em condutos localizados na superfície do terreno, os chamados sumidouros.

Estes pontos localizados de infiltrações, conforme Costa & Silva *in* Feitosa & Manuel Filho (2000), devem-se à *grande variabilidade espacial da permeabilidade e da capacidade de infiltração, que é muito maior em meios cársticos do que em outros meios permeáveis*. Além dos sumidouros, são peculiares às regiões cársticas a presença de surgências ou ressurgências, que correspondem à saída de água subterrânea na superfície do terreno.

Outro aspecto que merece destaque nas paisagens cársticas é a ocorrência de cavernas. Estas são um componente subterrâneo do relevo cárstico formado pela dissolução de certos tipos de rochas pela água subterrânea. A exemplo disso, citam-se os terrenos constituídos por rochas calcárias, onde ocorre a dissolução da calcita, principal mineral constituinte das rochas carbonáticas. Dessa maneira, como visto na Figura 5.2, ocorre a dissolução ácida do carbonato de cálcio pelo ácido carbônico, gerado pela reação entre água e gás carbônico.

Além das peculiaridades anteriormente descritas, as cavernas estão intrinsecamente relacionadas às outras feições cársticas, servindo freqüentemente como condutos para transporte de água subterrânea captada em superfície, que, posteriormente, escoam rumo às nascentes, servindo de ambiente para deposição.

Resumidamente, como apresentado na Figura 5.3, as paisagens cársticas são marcadas hidrológica e geomorfologicamente pela existência de alguns componentes principais e especiais, tais como dolinas, cavernas, condutos subterrâneos, surgências e sumidouros.

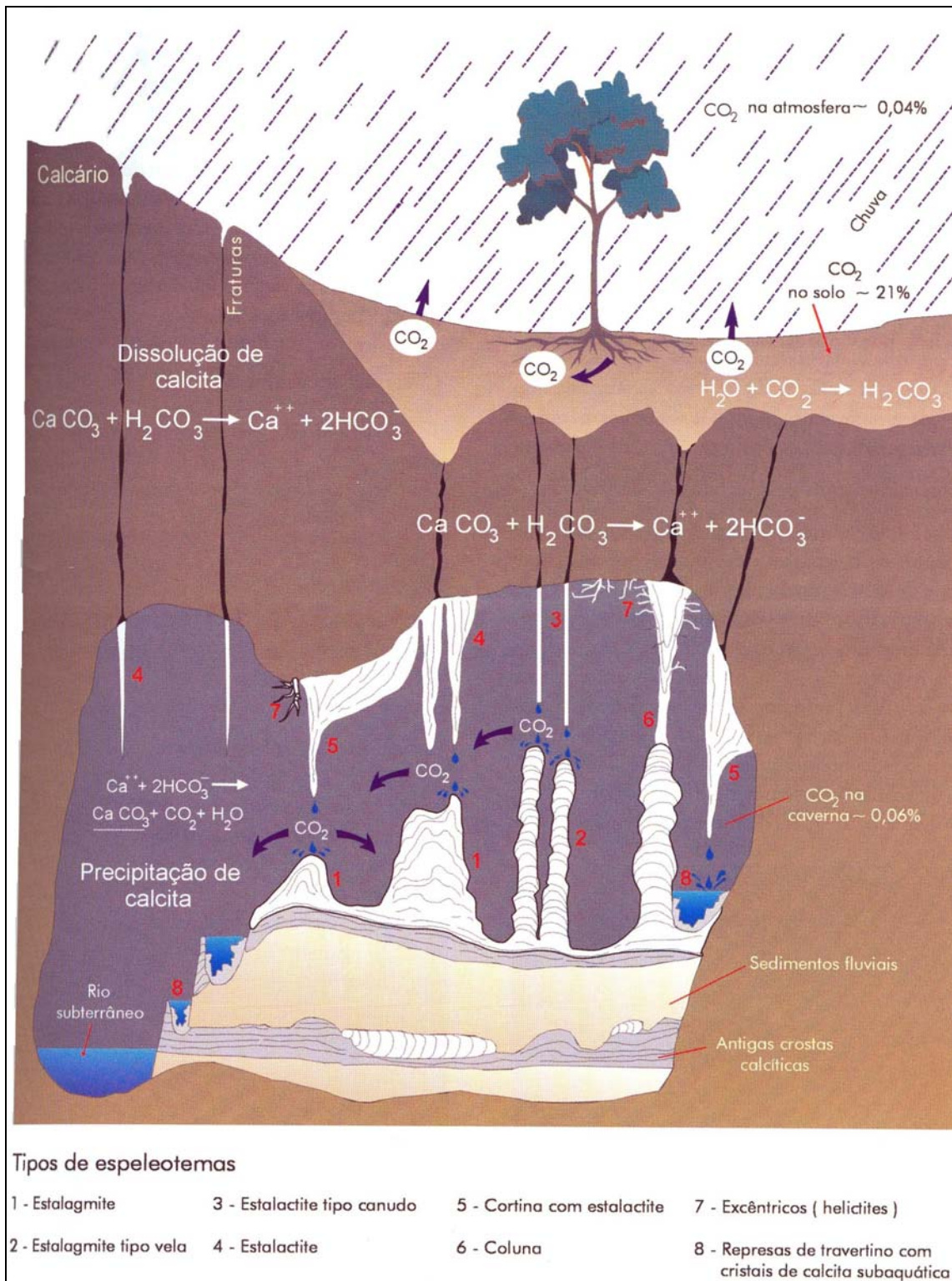
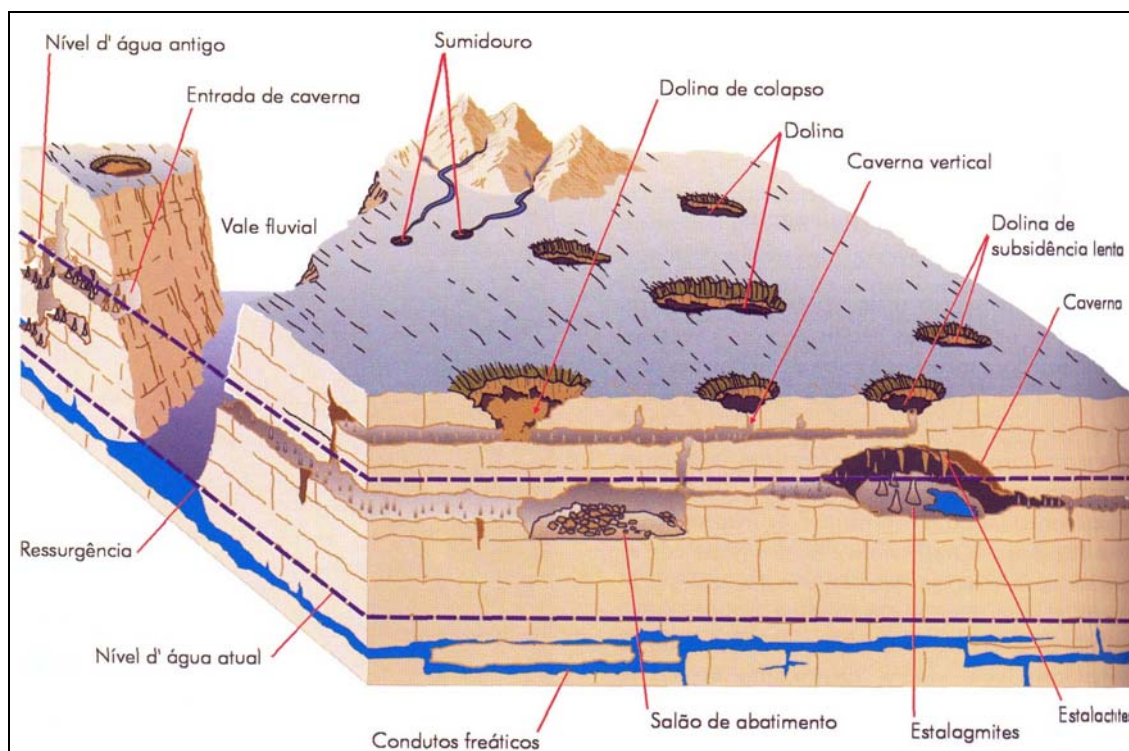


Figura 5.2 - Dissolução e precipitação da calcita num perfil cárstico de origem calcária.

Fonte - Karmann in Teixeira *et. al*, 2001.



**Figura 5.3** - Principais componentes do sistema cárstico.

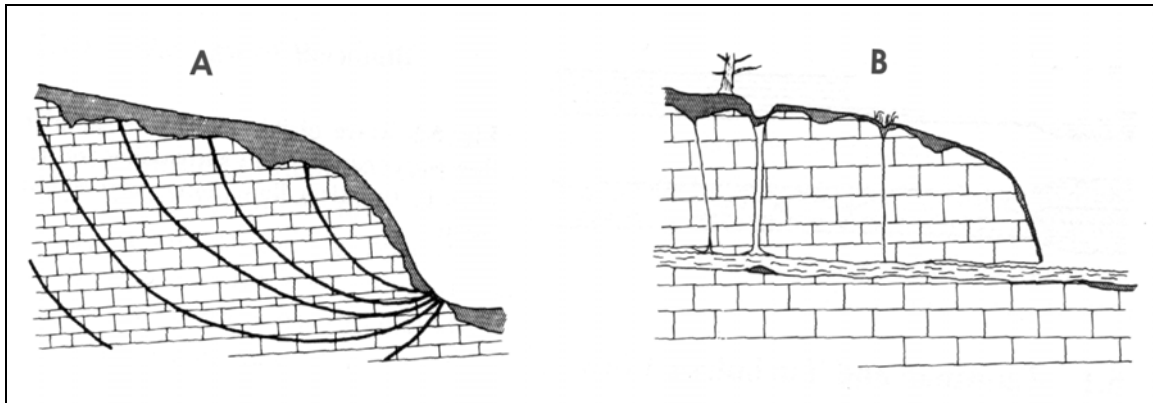
**Fonte** - Karmann *in* Teixeira *et. al.*, 2001.

Segundo Bonacci (1987), o escoamento das águas em regiões cársticas é dividido em dois tipos: o escoamento difuso e o turbulento.

O escoamento difuso, também conhecido como escoamento laminar, ocorre conforme Bonacci (s.d.), nas camadas cársticas inferiores, caracterizadas por apresentarem pequenas juntas e fissuras. Neste caso, mediante Bonacci (1987), o escoamento é caracterizado por apresentar um longo período de retenção das águas cársticas nas rochas, seguindo os princípios da lei de Darcy, similar ao fluxo no meio poroso.

O escoamento turbulento, similar ao escoamento dos condutos, ocorre nas camadas cársticas mais superiores, sendo estas caracterizadas por apresentarem um grau de carstificação mais desenvolvido. Assim, ocorrendo em fissuras grandes através dos condutos cársticos, cujas dimensões variam da ordem de 1 cm até alguns metros, o escoamento turbulento apresenta grandes velocidades quando comparadas ao regime laminar. Acredita-se que, conforme Jennings (1985), o escoamento encontrado nas grutas e canais com mais de 1 cm de diâmetro seja turbulento, sendo governado não

mais pela lei de Darcy e sim pela equação de Darcy-Weisbach. A Figura 5.4 ilustra esses dois tipos de escoamento presentes nos cenários cársticos.



**Figura 5.4 -** Representação esquemática do escoamento em uma região cárstica.

A) Escoamento difuso com aproximações de um meio poroso.

B) Escoamento turbulento com aproximações de um escoamento em canais.

**Fonte -** Dreybrodt, 1988.

Apesar de ter sido feita uma abordagem generalizada dos ambientes carstificados, vale ressaltar que cada sistema cárstico possui características próprias e que modelos hidrogeológicos pré-concebidos e inspirados em determinados carstes não são imediatamente adaptáveis a todos os sistemas.

## 6 DESCRIÇÃO REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO

### 6.1 Situação da área de estudo no contexto geográfico

*A cidade às margens do rio  
Mario Quintana<sup>3</sup>*

*Quando a água reflete todos os postes de iluminação,  
sabe que esta cidade já foi pequena.  
Quando vão dormir as bem-amadas, as velhas carolas,  
os executivos e os catedráticos,  
Quando na noite alta o último boêmio passa cantando  
e as meninazinhas há muito tempo dormem,  
As águas vão passando...  
Na cidade quieta  
Só o rio corre dentro da noite  
É a vida continuando pelo mundo...*

A cidade de Lagoa Santa localiza-se no planalto mineiro ao norte da capital do estado, pertencendo à região metropolitana de Belo Horizonte. Precisamente, está situada na latitude  $-19,37^\circ$  e longitude  $-43,53^\circ$ . Esta cidade possui uma população de 33.025 habitantes, espalhados em uma área de 232,7 km<sup>2</sup>.

Com relação à infra-estrutura viária, a região é servida pela rodovia estadual MG-010 e, indiretamente, por um ramal ferroviário da Rede Ferroviária Federal S.A., que se desenvolve ao longo da margem direita do ribeirão da Mata. Juntamente com o município de Confins, a cidade de Lagoa Santa abriga a área pertencente ao Aeroporto Internacional Tancredo Neves.

O importante naturalista dinamarquês Peter Lund, citado por Piló (2002), descreve, na “Primeira memória sobre a fauna das cavernas”, a região de Lagoa Santa da seguinte maneira:

---

<sup>3</sup> Quintana, Mario. Água: os últimos textos de Mario Quintana. ed. Trilíngüe. Porto Alegre: Artes e Ofícios, 2001. 77 p.

*Uma cadeia de montanhas, formada de rochas calcárias, destaca-se da serra mais importante do planalto central – a Serra do Espinhaço – perto da capital de Minas, e alarga-se para noroeste, servindo de separação às águas do Rio das Velhas e Paraopeba.*

Complementando a descrição de Peter Lund, Coutard *et. al.* (s.d.) afirmaram que a *região integra-se dentro da porção meridional da bacia hidrográfica e da plataforma (Cráton do São Francisco) que é limitada a oeste pela Serra da Canastra, a leste pela Serra do Espinhaço e a sul pelo Quadrilátero Ferrífero.* Sendo assim, a região está inserida no domínio de abrangência da bacia hidrográfica do rio das Velhas, localizada dentro da grande bacia hidrográfica do rio São Francisco.

A Figura 6.1 a seguir apresenta a localização da área de estudo diante do cenário regional em seu entorno.

**Figura 6.1 -** Localização da área de estudo

MAPA AUTOCAD

## 6.2 Aspectos geológicos

A região de Lagoa Santa, dentro do quadro de evolução geológica, insere-se na era Pré-Cambriana, sendo que esta compreende os éons Arqueano e Proterozóico. Tal classificação poder ser vista na Figura 6.2.

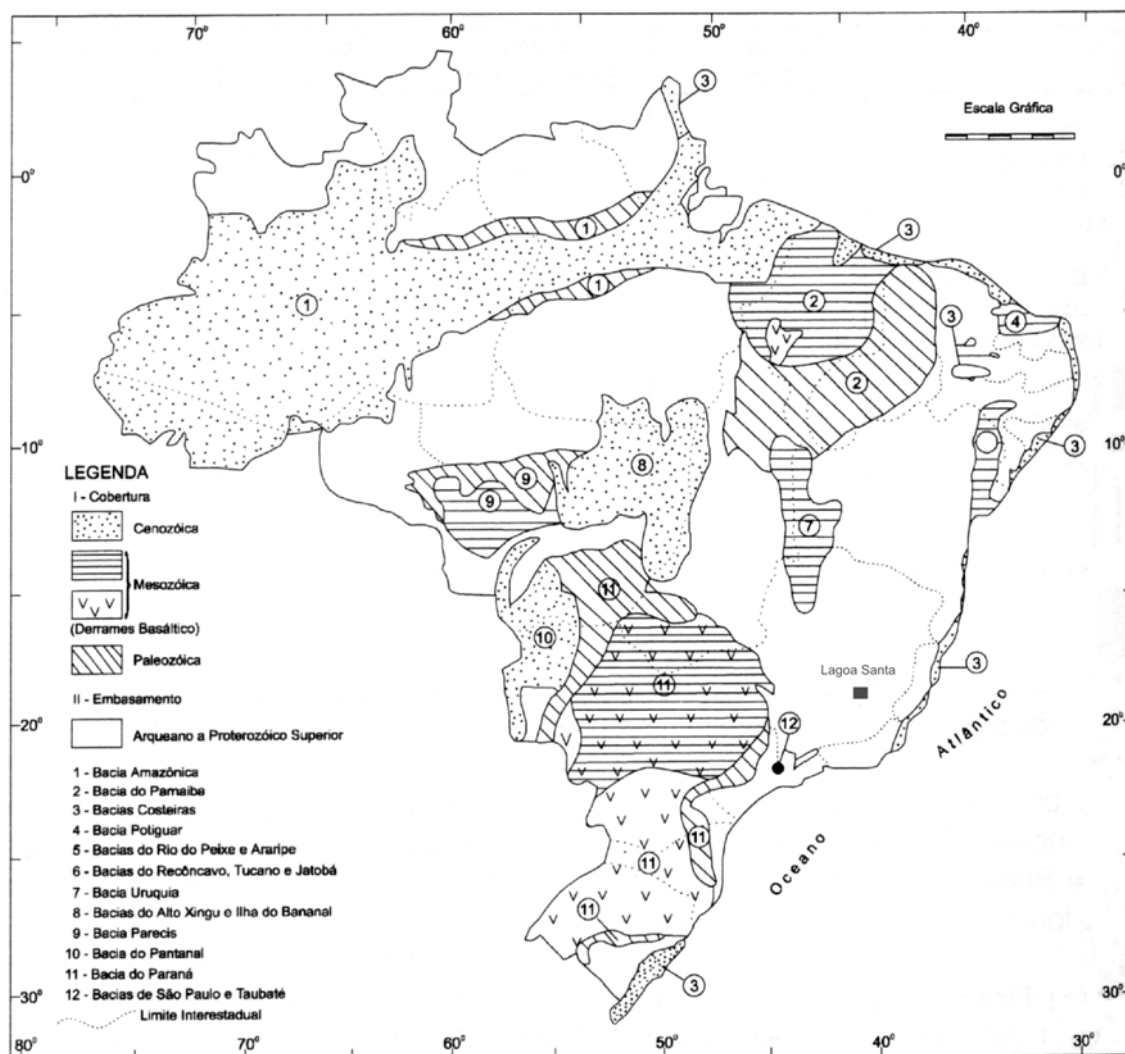
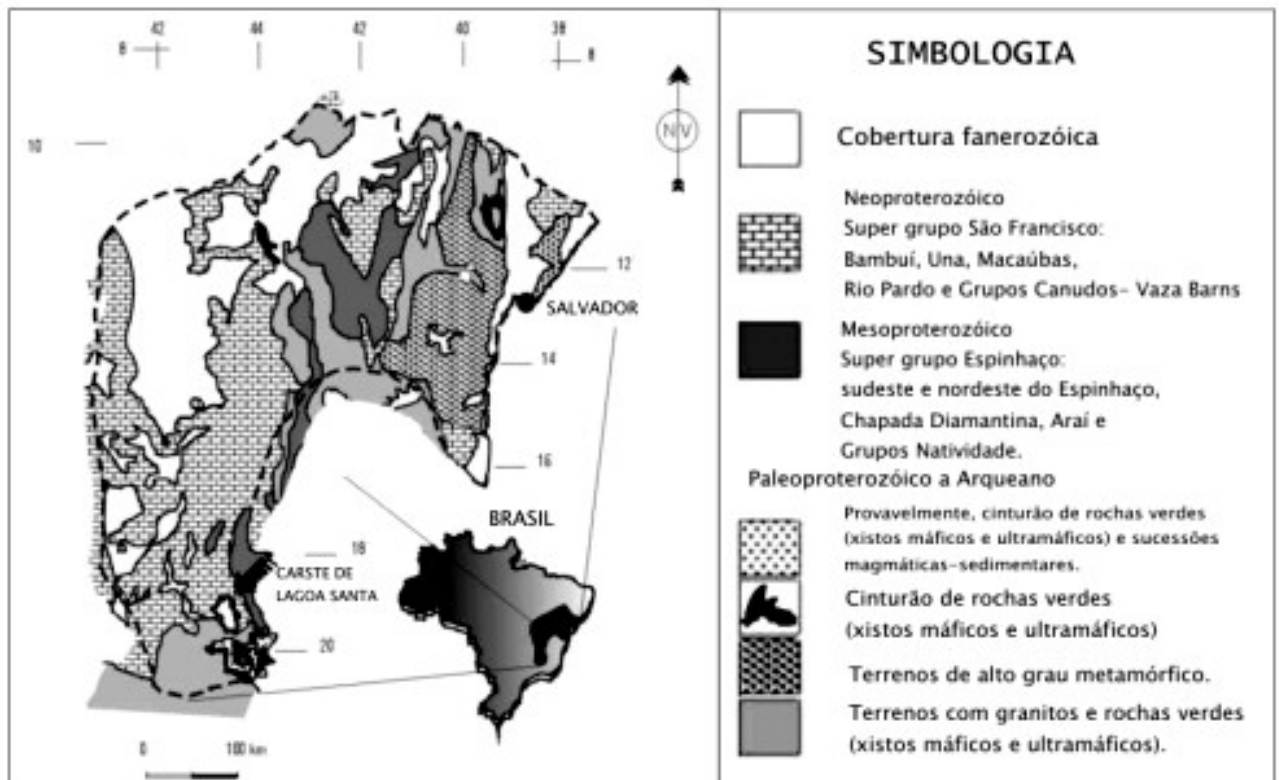


Figura 6.2 - Esboço geológico do Brasil.

Fonte - Adaptado de BRASIL DNPM/CPRM (1983), citado por Mente *in* Feitosa & Manuel Filho, 2000.

Geologicamente, Kohler *et. al.* (1976) afirmam que a região localiza-se sobre rochas do Grupo Bambuí (pré-cambriano superior), caracterizado por apresentar em sua litologia filitos, argilitos e calcários, sendo que estes apresentam diferentes graus de metamorfismo.

Complementando a descrição de Kohler *et. al.* (1976), Berbert-Born (2000) afirmou que as rochas carbonáticas que caracterizam o carste de Lagoa Santa são *litotipos neoproterozóicos do Grupo Bambuí, componentes da Formação Sete Lagoas, aflorantes no extremo sudeste da extensa bacia sedimentar pré-cambriana do Bambuí que integra o Cráton do São Francisco, como visto na Figura 6.3.*



**Figura 6.3 -** Localização do Carste de Lagoa Santa no esboço geológico do Cráton do São Francisco.

**Fonte -** Berbert-Born, 2000.

### 6.3 Características litoestratigráficas e estruturais

Um dos principais fatores que influenciam no regime de fluxo subterrâneo, principalmente em ambientes de rochas calcárias, é a trama estrutural impressa, através dos tempos, pela dinâmica oriunda dos eventos tectônicos pretéritos. Essa estruturação comanda sobremaneira as condições de circulação e armazenamento das águas subterrâneas. Para se ter entendimento desse arcabouço tectônico, remonta-se à estruturação brasiliana do Cráton do São Francisco, sendo que este se refere à área central do escudo brasileiro correspondente à Bacia do São Francisco.

Estruturalmente, de acordo com Piló (1997), a região de Lagoa Santa sofreu deformações em consequência da ação de faixas móveis adjacentes ao Cráton do São Francisco (onde se depositou o Grupo Bambuí).

A estruturação brasiliana do Cráton do São Francisco foi consolidada no éon Arqueano. Segundo Loureiro (2003), *esta megaestrutura “teria se comportado como plataforma estável de sedimentação no pré-cambriano mais recente ou início do Paleozóico”, e posteriormente atingida por uma tectônica com falhamentos e dobramentos nas bordas, originando assim a Faixa de Dobramentos Brasília a oeste, e a Faixa de Dobramentos Araçuaí a leste*, como apresentado na Figura 6.4. Nesta figura, aponta-se o arcabouço tectônico da porção sul do cráton, cuja deformação de vergência centrípeta individualizou as respectivas faixas deformadas nos extremos, poupando os compartimentos (C1 e C2) na parte central.

De acordo com a posição e grau de deformação observado, o município de Lagoa Santa abrange apenas os pulsos medianos dos esforços tectônicos, caracterizando um dos três domínios estruturais que compõem a área do Projeto Vida, estudo desenvolvido pela CPRM (1994 a, b). Tais domínios estão apresentados na Figura 6.5. Menciona-se, ainda, que as rochas do município de Lagoa Santa apresentam uma deformação de baixa a média intensidade.

Complementando, ainda, a descrição da geologia estrutural da região, afirma-se que o conhecimento da orientação das fraturas na região cárstica de Lagoa Santa é fundamental para o entendimento do escoamento geral das águas, uma vez que, segundo Coutard *et. al.* (s.d.), à princípio, *a inclinação das camadas, aliada à posição das diáclises maiores, imprime um sentido preferencial para o escoamento das águas e*

ao surgimento de pontos privilegiados para o desaparecimento das águas. Dessa maneira, o escoamento das águas está diretamente ligado à inclinação geral das camadas, com mergulho para leste, localmente NE ou SE, e à disposição do sistema de fraturas, sendo que, consoante Coutard *et. al.* (s.d.), a inclinação das camadas é mais forte e irregular nas proximidades do Ribeirão da Mata e menos acentuada e mais regular próximo ao Rio das Velhas.

Ainda de acordo com Coutard *et. al.* (s.d.), o Grupo Bambuí é levemente dobrado, na maioria das vezes, levemente ondulado. É caracterizado, também, por falhas e diáclises orientadas de SW-NE e NW-SE.

O Grupo Bambuí é caracterizado predominantemente pelas rochas metassedimentares pelítico-carbonáticas da Formação Serra de Santa Helena. Tais rochas estão expostas superficialmente e cobrem as rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas por quase toda a área. Já a Formação Sete Lagoas está sobreposta ao embasamento gnáissico-migmatítico. No topo da Formação Serra de Santa Helena são encontradas coberturas superficiais terciário-quadernárias, representadas por depósitos detrítico-lateríticos e sedimentos colúvio-aluvionares, geralmente pouco espessos.

A seguir, a estratigrafia anteriormente citada será descrita detalhadamente.

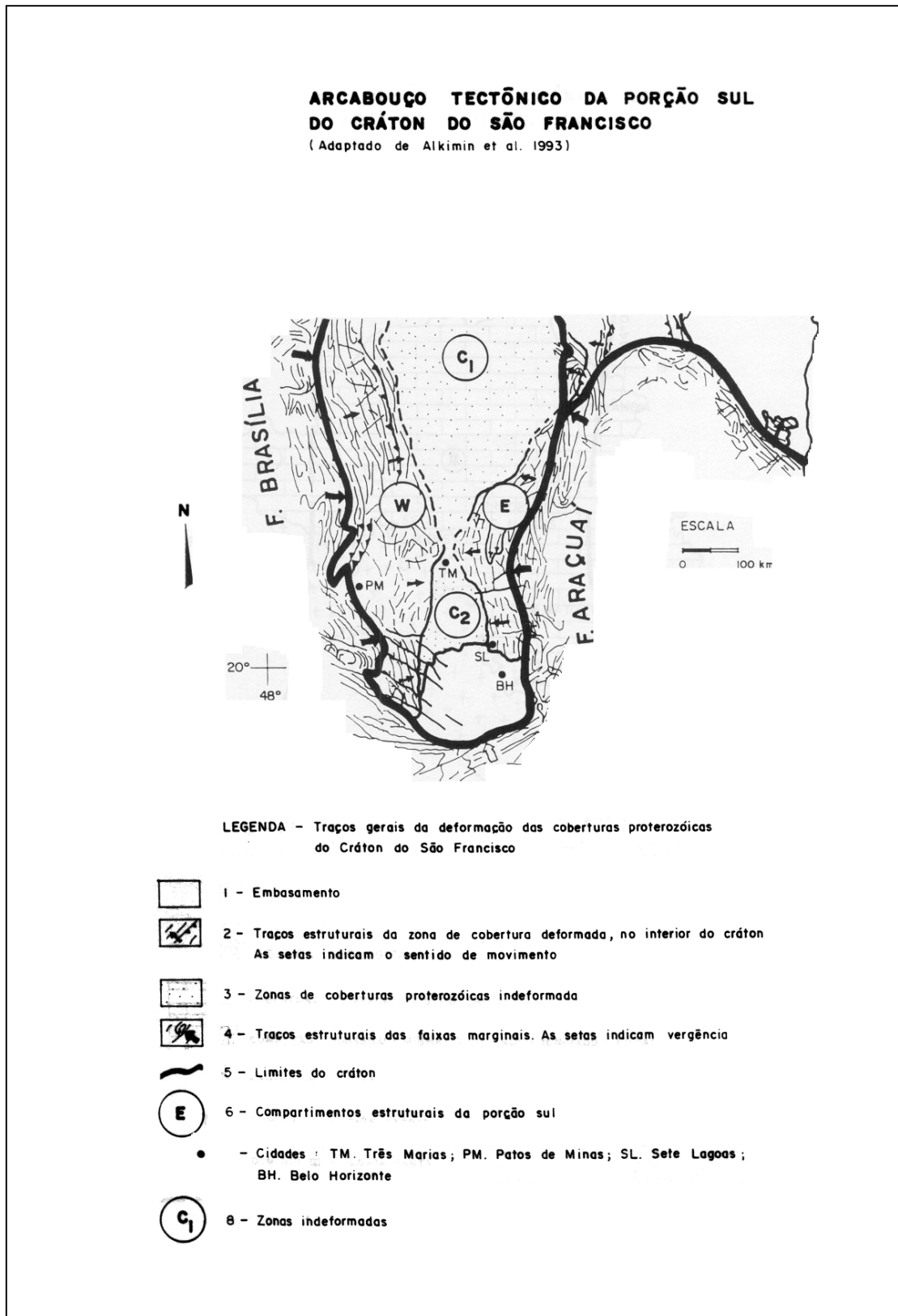
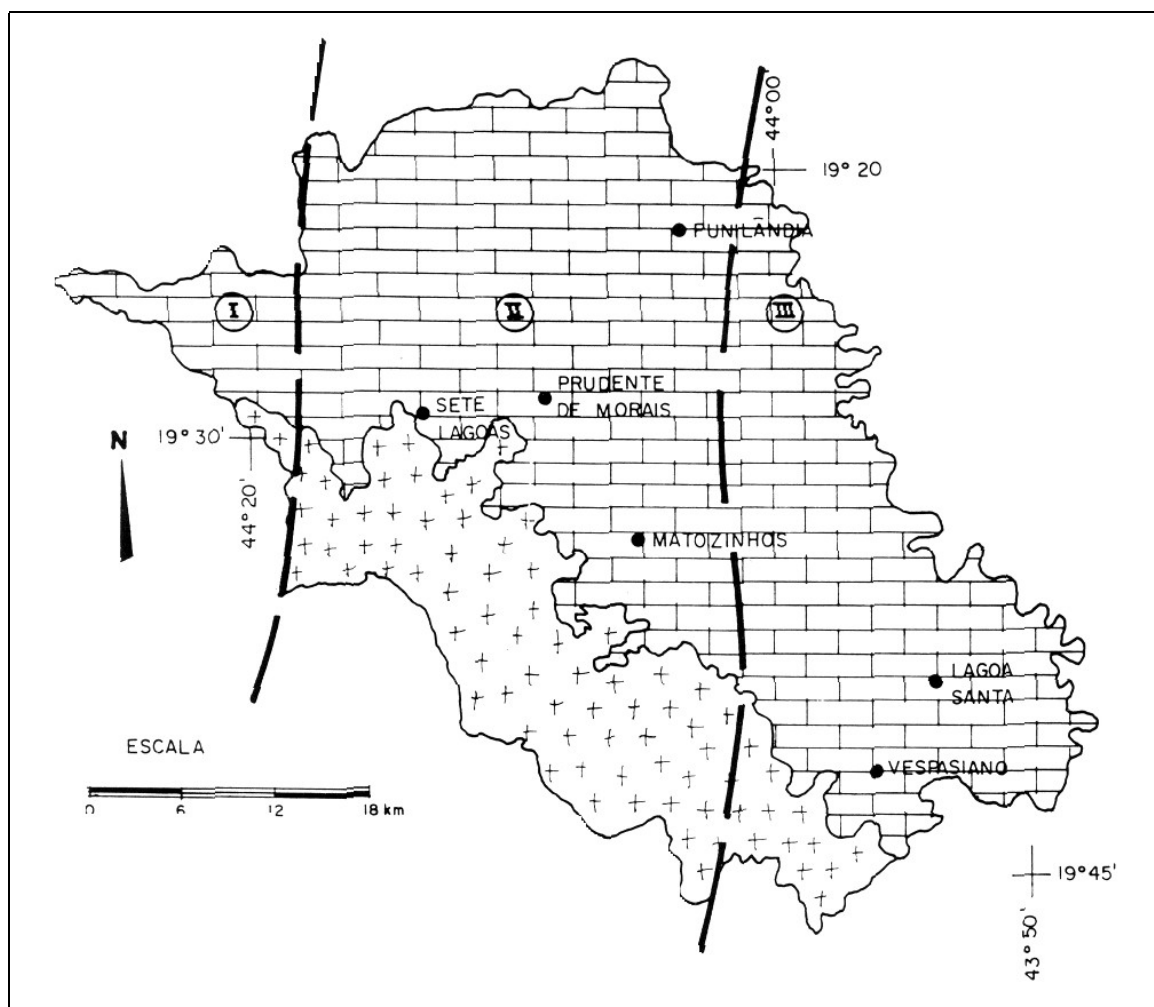


Figura 6.4 - Arcabouço tectônico da porção sul do cráton do São Francisco.

Fonte - Loureiro, 2003.



**LEGENDA GEOLÓGICA SIMPLIFICADA**

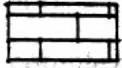
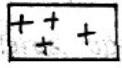





-  COBERTURAS SUPRACRUSTAIS DO GRUPO BAMBUÍ
-  COMPLEXO GNÁISSICO - MIGMATÍTICO INDIFERENCIADO / EMBASAMENTO CRISTALINO
-  DOMÍNIO I - RIACHO DO CAMPO
-  DOMÍNIO II - SETE LAGOAS
-  DOMÍNIO III - LAGOA SANTA
-  LIMITE DOS DOMÍNIOS ESTRUTURAIS
-  CIDADE

Figura 6.5 - Domínios estruturais de deformação na área do Projeto VIDA.

Fonte - Loureiro, 2003.

### 6.3.1 Complexo Gnáissico Migmatítico ou Embasamento Cristalino

O complexo gnáissico migmatítico abrange apenas os litotipos presentes em subsuperfície, não ocorrendo afloramentos na área de investigação. Estes litotipos, segundo Pessoa (1996), correspondem, em geral, a *um agrupamento de rochas gnáissicas em associação a granitóides e zonas migmatizadas*.

De acordo com CPRM (1994a), identificou-se nesta unidade estratigráfica a existência de três litotipos diferentes, quais são: rochas básicas, granitóides e gnaisses-migmatitos.

As rochas básicas, conforme CPRM (1994a), ocorrem em forma de blocos irregulares, apresentando cor preta com suaves tons esverdeados. Macroscopicamente, estas rochas *evidenciam granulação média, não sendo observada orientação preferencial de seus grãos* (CPRM, 1994a).

Os granitóides apresentam formas irregulares de tamanho centimétrico a métrico. Sua granulação também apresenta um intervalo de abrangência, variando de média a grossa. A sua coloração exhibe tons esbranquiçados a rosados. Quanto à textura, a rocha apresenta grãos irregulares, granoblásticos e hipidiomórficos (CPRM, 1994a).

Os gnaisses-migmatitos, como ressalta CPRM (1994a), apresentam grãos equigranulares, textura lepidogranoblástica e composição granítica (quartzo-feldspática). Petrograficamente, são compostos por: 30% de plagioclásio, 20% de quartzo, 18% de biotita, 15% de piroxênio, 3% de anfibólio, 9% de microclina e 5% de minerais secundários (CPRM, 1994a).

Estruturalmente, o complexo gnáissico migmatítico ou embasamento cristalino pode apresentar-se bastante escalonado e evidenciar sinais de basculamento em blocos. Tal evidência foi comprovada por furos de sondagem realizados nas imediações da área da Mina Lapa Vermelha, onde se atingiu o embasamento a cerca de 220 metros de profundidade, variando as cotas do assoalho gnáissico entre 555 e 620 m de altitude.

Conforme Pessoa (1996), *as fraturas presentes neste complexo são mais freqüentes junto às zonas migmatizadas, ocorrendo preenchidas por calcita ou mesmo por veios quartzo-felspáticos e pegmatóides*.

Como dito inicialmente, não ocorrem afloramentos do embasamento cristalino na área de estudo, entretanto, foram diagnosticados, bem próximo a ela,

afloramentos na margem direita do ribeirão da Mata, confirmando, portanto, o basculamento deste complexo.

### **6.3.2 Grupo Bambuí**

Segundo a CPRM (1994a), o grupo Bambuí compreende uma seqüência pelítica carbonática, capeada por um pacote de sedimentos predominantemente arenosos, com espessura entre 600 e 800 m.

Várias tentativas de divisão litoestratigráfica de aplicação regional surgiram buscando enquadrar o Grupo Bambuí, conforme visto na Tabela 6.1.

Neste estudo foram adotadas as denominações de Dardenne, incluídas as modificações de Grossi & Quade, citados por CPRM (1994a) conforme apresentadas na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1 -** Síntese das principais colunas estratigráficas formuladas para a Bacia do São Francisco (com base em Dardenne 1978).

Coluna Litoestratigráfica	Eschewege (1822)	Guimarães (1955)	Branco e Costa (1961)		C. Barbosa (1965)	Oliveira (1967)	Braun (1968)	Scholl (1972, 1973)	Dardenne (1978)	Grossi Sad e Quade (1985)
. Siltitos e folhelhos verdes-carbonáticos	Arenito de Pirapora	Arenito de Pirapora	Membro Serra da Saudade Três Marias	Formações Rio Paraopeba	Formações Três Marias	Formações Três Marias	Formações Três Marias	Formações Três Marias	Formações Três Marias	Grupos Superiores
. Siltitos verdes									Serra da Saudade	
. Arcóseos avermelhados										
. Lentes de arcóseos escuros										
. Siltitos e folhelhos cinza-escuros			Lagoa do Jacaré.	Sete Lagoas	Lagoa do Jacaré.	Lagoa do Jacaré.	Paraopeba	Lagoa do Jacaré.	Lagoa do Jacaré.	Bambuí "Strictu sensu"
. Calcários e dolomitos			Serra de Santa Helena		Serra Gineta	Serra de Santa Helena		Serra de Santa Helena	Serra de Santa Helena	
. Calcários escuros com intraclastos e oólitos										
. Siltitos e folhelhos										
. Siltitos e folhelhos										
. Folhelhos cinza-esverdeados										
. Folhelhos com lentes de margas e calcários										
. Metapelitos escuros										
. Calcários com estromatolitos										
. Calcários cinza-escuro										
. Calcários finamente laminados										
. Mármore com quartzo e clorita										
. Calcários negros e dolomitos										
. Mármore e filitos										
. Conglomerados, arcóseos e filitos				Carrancas		Jequitai		Macaúbas	Jequitai	Vespasiano
OBS.: Embasamento ou unidades pré Supergrupo São Francisco										

**Fonte -** Com base em Dardenne (1978), citado por CPRM, 1994a.

### 6.3.2.1 Formação Sete Lagoas

A Formação Sete Lagoas é caracterizada, conforme CPRM (1994a), da seguinte maneira:

*A Formação Sete Lagoas é constituída por cerca de 200 metros de espessura de calcários cinzentos a negros. Na base do pacote, os calcários são mais claros, devido à maior proporção de quartzo e filossilicatos e sua granulação é usualmente fina. Para o topo, o calcário torna-se mais puro e sua cor mais escura, adquirindo até uma tonalidade negra, devido à presença de grafita. O calcário puro, encontrado nas proximidades do contato com a Formação Serra de Santa Helena, pode conter estruturas estromatolíticas, de cor negra, compostas de carbonato espático. (CPRM, 1994a).*

Segundo CPRM (1994a), esta formação foi dividida, de acordo com suas características sedimentológicas e estratigráficas, em dois membros - um inferior, denominado Membro Pedro Leopoldo, e um superior, denominado Membro Lagoa Santa.

O membro basal Pedro Leopoldo é constituído, conforme relatado por Pessoa (1996), por quatro litofácies:

- FÁCIES A - corresponde a um calcário cinza a cinza-claro, em camadas tabulares, delgadas e contínuas, com intercalações delgadas e escuras de metapelitos;
- FÁCIES B - trata-se de um calcário cinza a cinza-escuro com intercalações mais escuras de metapelito, e interdigitações de calcário ainda mais escuros, onde se observa deformação branda do tipo interestratal;
- FÁCIES C - corresponde a um calcário cinza-claro, esverdeado a marrom e creme com intercalações escuras de metapelito, há presença de estratificações cruzadas plano-paralelas;
- FÁCIES D - refere-se a uma marga de cor cinza-clara e rósea, finamente laminada, pouco deformada, intercalada por estratos mais finos (argilosos), com pequenas dobras.

Numa análise global, Pessoa (1996) afirma que este membro corresponde a um calcissiltito, podendo ser caracterizado como um calcário cinza muito laminado, apresentando-se invariavelmente com impurezas argilosas e deformação interestratal incipiente.

De acordo com a APA Carste de Lagoa Santa (CPRM & IBAMA,1998b), os carbonatos que compõem o Membro Pedro Leopoldo são finos e impuros, possuindo

proporção expressiva de material não-carbonático. Composicionalmente são, portanto, desfavoráveis ou menos favoráveis à formação de cavernas.

Complementando, ainda, a descrição do Membro Pedro Leopoldo, pode-se afirmar, conforme CPRM (1994a), que esta unidade encontra-se sobreposta ao complexo gnáissico-migmatítico, *onde feições deformacionais observadas nas rochas mostram a presença de um descolamento basal, corroborando as evidências de um contato tectônico entre as duas unidades.*

O membro Lagoa Santa, que apresenta teor de CaCO<sub>3</sub> superior a 94%, pode alcançar 200 m de espessura. Tal formação é composta por duas litofácies, caracterizadas a seguir, segundo Pessoa (1996):

- *FÁCIES A* - refere-se a um calcário cinza-escuro a preto, com grânulos arredondados, em camadas tabulares contínuas e pouco espessas. Exibem característica peculiar de odor fétido, quando partido. São observadas pequenas falhas assimétricas, com vergência para oeste, e veios de calcita;
- *FÁCIES B* - caracteriza-se pela presença de calcários estromatolíticos, constituindo biolititos de forma alongada, ligeiramente achatados e estirados ao longo do plano de foliação.

O Membro Lagoa Santa, conforme CPRM (1994a), está sobreposto ao Membro Pedro Leopoldo por meio de um contato tectônico, materializado por sigmatóides e veios de composições quartzo-calcíticas.

Ao contrário do Membro Pedro Leopoldo, os calcários que compõem o Membro Lagoa Santa são homogêneos, grosseiros e fortemente predispostos à dissolução. Dessa maneira, onde ocorrentes, instalou-se, segundo a APA Carste de Lagoa Santa (CPRM & IBAMA, 1998b), *um típico relevo cárstico superficial, com paredões, dolinamentos, vales cegos e rochedos, muitas vezes alinhados ou agrupados.* Ocorre, também, neste tipo litológico a maior frequência de cavernas, ou a quase totalidade delas, bem como os sistemas hidrológicos subterrâneos.

Estruturalmente, a Formação Sete Lagoas, segundo CPRM (1994a), é caracterizada por apresentar fraturas pouco intensas, curvas, não preenchidas, com baixa densidade (em média, não superior a três por metro linear) e pouco penetrativas.

### 6.3.2.2 Formação Serra de Santa Helena

A Formação Serra de Santa Helena é, segundo CPRM (1994a), composta por folhelhos e siltitos, apresentando tonalidades entre cinza e cinza-esverdeado. É constituída, também, por extensas lentes de calcário cinza escuro e dolomitos cinza claro, encaixados, em geral, nos siltitos. A origem desta formação é siliciclástica, com raros sedimentos carbonáticos.

Os siltitos da Formação Serra de Santa Helena são, conforme mencionado por CPRM (1994a), de ambiente de águas mais profundas que as rochas da Formação Sete Lagoas, abaixo da influência das ondas e das correntes de maré. Seus calcários são escuros microcristalinos, finamente laminados.

A espessura de toda a Formação Serra de Santa Helena apresenta valores bastante variáveis, ocorrendo locais onde as camadas medem centímetros e em outros em que atingem valor de até 200 m de espessura.

Nesta formação, o fraturamento mostra uma direção principal em torno de N80°W e uma secundária em torno de N25°E. As fraturas principais são geralmente retas, planas, lisas, fortemente penetrativas, subverticais, não preenchidas, com alta densidade e regularmente distribuídas. Já as secundárias são também retas, planas, lisas, medianamente penetrativas, subverticais, não preenchidas, com baixa densidade e regularmente distribuídas.

Evidencia-se, também, que as maiores vazões encontradas nos poços tubulares estão associadas às feições cársticas, seguidos do contato geológico entre as formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena.

### 6.3.3 Coberturas Superficiais

Conforme ressaltado por Piló (2002), Lund identificou, em meados do século XIX, uma das principais características do carste local: *a espessa cobertura de solos que recobre os vales, as dolinas e os topos planálticos*. Esta cobertura é formada por uma espessa camada de argila, sem vestígios de estratificação e com diversas quantidades de quartzo.

Em seguida, Lund, segundo Piló (2002), identificou os dois principais solos presentes na região: *vermelho e amarelo-claro, interpretando essa diferença em função da pureza de composição (o amarelo mais próximo da rocha)*. Estas interpretações

quanto à cobertura da paisagem cárstica, feitas por Lund em 1937, foram confirmadas por estudos mineralógicos realizados posteriormente, certificando que *a alteração dos siltitos e folhelhos, sobrepostos estratigraficamente aos calcários, é a principal fonte de origem dos solos regionais, tanto dos horizontes vermelhos como dos amarelos* (Piló, 2002).

Estes solos vermelho e amarelo-claro, além de serem distintos quanto à composição, apresentam porosidades diferentes. Segundo Piló (2002), *nos vermelhos a porosidade é intergranular, dando ao conjunto uma porosidade muito expressiva, enquanto nos amarelos é fissural e menos desenvolvida*.

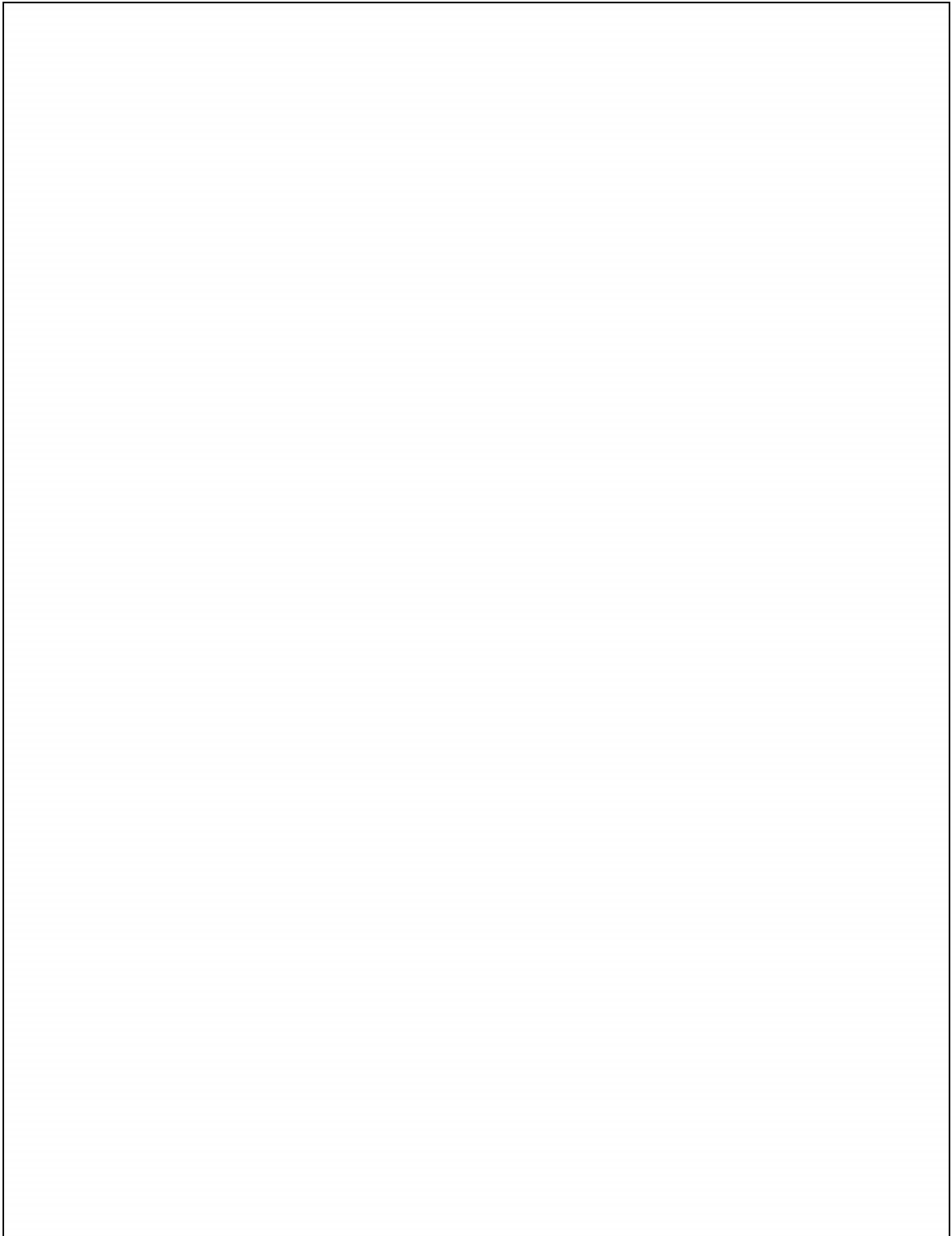
Modernamente, tem-se o conhecimento de que os materiais encontrados nas coberturas superficiais constituem-se por depósitos colúvio-aluvionares quaternários, onde os detritos mais recentes são representados pelas aluviões dos leitos atuais do rio das Velhas e ribeirão da Mata.

A composição destes sedimentos, cuja distinção já havia sido notada por Lund, varia, conforme Pessoa (1996), entre depósitos inconsolidados mal selecionados de cascalho, areia, silte e argila, onde os seixos são essencialmente de rochas pelíticas, carbonáticas e quartzo.

Após a descrição detalhada da estratigrafia regional, pode-se afirmar resumidamente que, conforme Berbert-Born (2000), a estratigrafia da área de estudo é caracterizada da seguinte maneira:

*A geomorfologia instalada é reflexo de uma estratigrafia marcada pela sucessão de duas unidades carbonáticas composicionalmente diferenciadas (Formação Sete Lagoas), superpostas por rochas siliciclásticas muito finas (Formação Serra de Santa Helena), estando tal seqüência assentada em discordância sobre rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico Arqueano. As coberturas detrítico-lateríticas elúvio-coluvionares do Cenozóico que ocorrem como superfícies residuais aos estágios de aplainamento também desempenham papel na estruturação do relevo cárstico aqui descrito. (Berbert-Born, 2000).*

Tal descrição é apresentada na Figura 6.6. Logo em seguida, a Tabela 6.2 aponta a coluna estratigráfica regional.



**Figura 6.6 -** Mapa litoestratigráfico da APA Carste de Lagoa Santa.

**Fonte -** Berbert-Born,2000.

Tabela 6.2 - Coluna estratigráfica regional

SUPER GRUPO	GRUPO	FORMAÇÃO	MEMBRO	IDADE ma	ESPESSURA (m)	LOCAL tipo	COLUNA	LITOLOGIA	AMBIENTE DEPOSICIONAL
					0-40			Aluviões compostos por areias de várias granulometrias e cascalho.	
					0-30			Coberturas detritico-lateríticas com camadas delgadas lateríticas.	
S Ã O  F R A N C I S C O	B A M B U Í	SERRA DE SANTA HELENA		600	200	SERRA DE SANTA HELENA		Metapelitos em camadas tabulares de espessura média a espessa, de cor esverdeada a preta quando são. Marcas onduladas suaves, estruturas de carga e estratificação cruzada. Intercaladas por camadas tabulares delgadas a média de metassilito calcífero de cor esverdeada a acinzentada.	Transgressão marinha, afogamento plataformar
		SERETE	LAGOA SANTA	800	80	PEDREIRA CARVÃO		Metacalcarenito variando de fino a grosseiro em camadas tabulares de espessura média a espessa, coloração do preto ao cinza. No topo, identificadas bioconcentrações algálicas de cor escura. Estromatólitos do gênero "Gymnosilenida". Posto da Polícia Rodoviária de Sete Lagoas.	Marinho, plataforma externa para plataforma rasa, no
		LAGOAS	PEDRO LEOPOLDO		100	PEDREIRAS CANAÃN e ILCON		Calcissilito em camadas tabulares de espessura delgada a média, coloração variando de cinza claro a esverdeado, com intercalações de camada muito finas a delgadas de metargilitos ( Laminitos algálicos ).	topo marinho raso, borda de plataforma
COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO						PEDREIRA DA PREFEITURA		Gnaisses indiferenciados, migmatitos com estruturas dobradas, nebulítica, dictomítica, schiliren. Estíliolítica e surreítica. Porções graníticas com granulações variando de média a grosseira.	

Fonte - Adaptado e modificado de Tuller *et. al.*, citado por Pessoa, 1996.

#### 6.4 **Geomorfologia**

A área estudada apresenta uma considerável variedade de formas de relevo, devido basicamente à atuação de diversos processos morfogenéticos em um conjunto de litologias com variados graus de metamorfismo e características estruturais.

Numa caracterização genérica, conforme CPRM (1994b), estabelece-se a seguinte correlação entre formas de relevo e os tipos litológicos predominantes:

- sobre as rochas pelíticas e carbonáticas do Grupo Bambuí ocorrem depósitos coluviais, predominantemente argilosos. *Essas coberturas detríticas correspondem às superfícies de aplainamento, que se apresentam como topos suavemente ondulados ou como extensas superfícies rebaixadas, planas ou onduladas;*
- nos domínios do embasamento cristalino tem-se um relevo constituído de colinas convexas e algumas cristas associadas a diques de rochas básicas; e,
- nas calhas dos rios são comumente encontrados sedimentos detríticos aluviais, constituindo a planície e os terraços fluviais.

O carste da região de Lagoa Santa, de acordo com CPRM (1994a), é representado por dois domínios morfológicos: o exocarste e o endocarste. O exocarste, representando um domínio superficial, é caracterizado pela presença de sumidouros, dolinas, vales e escarpamentos. Já o endocarste, que se refere a um domínio subterrâneo, é constituído por um conjunto de galerias e grutas e por um sistema de drenagem alimentado por vários sumidouros.

Complementando a descrição desta paisagem cárstica, as depressões características da região, originalmente, eram vastas, com formas bastante suavizadas, sendo, de acordo com Coutard *et. al.* (s.d.), futuramente alteradas através do processo de afundamento. Coutard *et. al.* (s.d.) destacaram, também, que as vertentes e os assoalhos sofreram alterações, sendo primeiramente recobertos por material coluvial vermelho, repleto de seixos (fragmentos de quartzo de veiro, seixos rolados de quartzo e quartzito).

As dolinas coalescentes, que estão em contínuo aprofundamento, conforme mencionado por Coutard *et. al.* (s. d.), são descritas por Kohler & Malta (s.d.) como depressões circulares cuja profundidade (até 20 m) não excede seu diâmetro. O fundo dessas dolinas, segundo Piló (1997), *é marcado por entradas de cavernas labirínticas,*

*secas, de morfologia tipicamente de regime freático. Além disso, estas dolinas, segundo Piló (2002), evidenciam a faixa topográfica mais favorável à dissolução em subsuperfície e, conseqüentemente, maior dinâmica do carste.*

Além das dolinas características, já observadas por Lund, são encontrados na região paredões que podem atingir até 50 m de altura e morros alongados.

O relevo cárstico encontra-se instalado em domínio planáltico, mais precisamente no bloco interfluvial ribeirão da Mata – rio das Velhas. Destaca-se, também, segundo Piló (1997), o compartimento do planalto cárstico, coberto por uma espessa cobertura pedológica e, localmente, por rochas metapelíticas.

Existem, também, nesta área, feições geomorfológicas cársticas especiais, como a lagoa central de Lagoa Santa, o Poço do Jacaré, a Lagoa dos Pereiras, a Lagoa dos Olhos D'Água, sendo situadas sobre o filito. Especialmente, a lagoa central de Lagoa Santa, cuja existência do filito também foi mencionada por Journaux (1977), terá um enfoque especial neste tópico, a fim de contribuir na elaboração do modelo hidrogeológico conceitual de fluxo subterrâneo.

Parizzi *et. al.* (1998) afirmaram que a lagoa central de Lagoa Santa apresenta forma triangular, como visto nas Figuras 6.7 e 6.8, cuja base de depressão é formada por rochas argilosas, sendo estas impermeáveis e retentoras de água. Esta mesma lagoa, é alimentada principalmente pela água da chuva que cai diretamente em sua superfície e/ou pela água drenada superficialmente da vizinhança e do Córrego Francisco Pereira, localizado a sudeste da região. Nas cheias, as águas desta lagoa, conforme Kohler (1978), *alcançam o Rio das Velhas através do Córrego Bebedouro, localizado no vértice norte.*



**Figura 6.7 -** Forma triangular da lagoa central de Lagoa Santa.

**Fonte -** <http://www.lagoasanta.com.br/lagoacen/frame2.htm>



**Figura 6.8 -** Forma triangular da lagoa central de Lagoa Santa.

**Fonte -** <http://www.lagoasanta.com.br/lagoacen/frame2.htm>

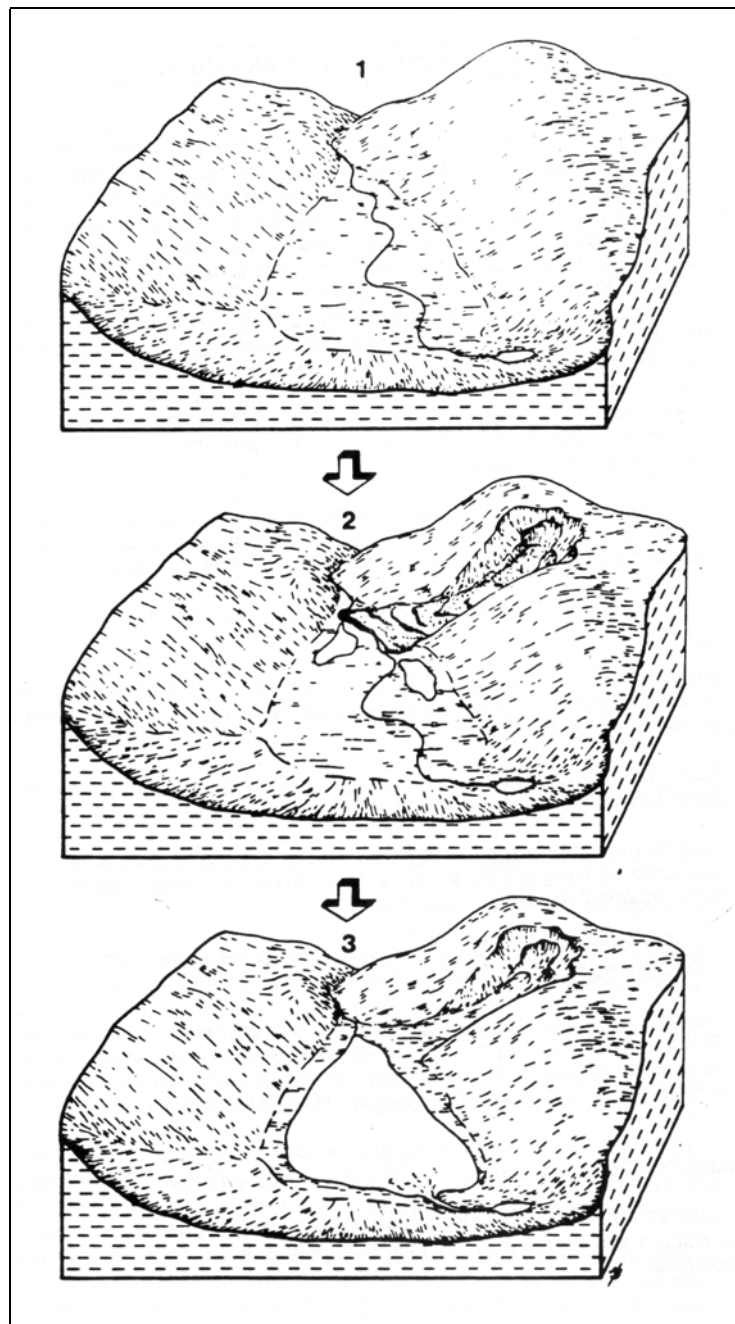
A forma triangular da lagoa central de Lagoa Santa a qual Parizzi *et. al.*(1998) se referiram em seu estudo, já tinha sido abordada por Carvalho *et. al.* em 1978, quando afirmaram que esta disposição triangular poderia ser devida ao fato de ocorrerem *estruturas geológicas em profundidade que teriam funcionado como linhas*

*preferenciais de dissolução. Estes mesmos autores acreditam que outro fator de desvio da forma arredondada seria a ocorrência de um capeamento insolúvel e impermeável, mas essencialmente anisotrópico e competente para não se abater enchendo todos os vazios sotopostos.*

Ainda com alusão à lagoa central de Lagoa Santa, afirma-se que sua depressão, segundo Kohler (1978), é fechada e apresenta uma única saída localizada no vértice noroeste, numa cota superior ao nível médio da lagoa. Acredita-se que tal depressão tenha se formado a partir do abatimento do calcário situado abaixo do filito, dando à lagoa uma característica pseudo cárstica. Complementando, ainda, a hipótese da formação da lagoa por dissolução do calcário, Kohler (1978) afirmou:

*Admitindo-se a hipótese da formação da lagoa por dissolução do pacote de calcário subjacente ao filito, ao longo de alinhamentos estruturais antigos, aliado ao seu caráter não cárstico, atestado pela sua perenicidade, que vem desde o século XVIII (crônicas antigas), pode-se concluir que a lagoa 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. Por outro lado, deve-se assinalar a intensa evolução das voçorocas, modificando o equilíbrio das vertentes atuais e assoreando a lagoa com material erodido. (Kohler, 1978).*

Parizzi *et. al.* (1998) relataram que este deslizamento de terra que levou à formação da lagoa central de Lagoa Santa foi causado por chuvas torrenciais que obstruíram um vale na parte nordeste, por onde escoava água anteriormente, conforme mostrado na Figura 6.9.



**Figura 6.9 -** Processo evolutivo da lagoa central de Lagoa Santa

1 - O Polje aberto por onde corria o córrego Bebedouro.

2 - O deslizamento de terra responsável pelo represamento do córrego Bebedouro e inundação do polje.

3- A inundação do polje e a formação da lagoa central de Lagoa Santa.

**Fonte -** Parizzi, 1993.

O caráter pseudo cárstico da lagoa central de Lagoa Santa descrito por Kohler (1978) foi confirmado posteriormente por um estudo realizado por Coutinho & Barbosa (1980) através da análise de teores de matéria orgânica, nitrogênio orgânico total, fósforo total,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Fe e Mn, analisados em três frações dos sedimentos. Este mesmo estudo foi realizado na Lagoa Olhos d'Água e Lagoa do Sumidouro.

Como ressaltado por Coutinho & Barbosa (1980), os valores de  $\text{Ca}^{2+}$  encontrados na lagoa central de Lagoa Santa e na Lagoa Olhos d'Água são muito baixos quando comparados aos teores obtidos na Lagoa do Sumidouro, distinguindo, então, a geomorfologia de cada uma das lagoas estudadas da seguinte maneira:

*Os baixos valores de  $\text{Ca}^{2+}$  obtidos na Lagoa Olhos d'Água e Lagoa Santa, quando comparados àqueles obtidos na Lagoa do Sumidouro poderiam ser explicados pela própria geomorfologia da região. Assim, apesar dos dois primeiros lagos se localizarem na região do carste central de Minas Gerais, não são, na verdade, lagos cársticos típicos, já que se localizam em afloramentos de filitos. (Coutinho & Barbosa, 1980).*

Objetivando, ainda, caracterizar a região da lagoa central de Lagoa Santa, foram realizadas sondagens mecânicas e análises químicas, físicas e biológicas dos poços localizados ao seu redor, cujos resultados, segundo Carvalho *et. al.* (1978) são:

- não ocorre calcário até 40 m de profundidade;
- o nível do lençol freático está a 24,15 m de profundidade, ou seja, a 8 m abaixo da superfície da lagoa central de Lagoa Santa;
- *há evidência de que os poços de captação de água subterrânea instalados ao redor da lagoa não estão prejudicando o equilíbrio da lagoa, porquanto o aquífero calcário está isolado da bacia pelas formações superficiais impermeáveis;*
- os resultados obtidos com análises químicas dos poços ao redor da lagoa indicam que os sistemas que caracterizam os poços e a lagoa central de Lagoa Santa são independentes;
- *grande diferença quantitativa e qualitativa dos organismos planctônicos nos poços e na lagoa, e,*

- nas estações da lagoa central de Lagoa Santa aparecem numerosas espécies de fitoplâncton de dimensões muito menores do que as encontradas nos poços, o que sugere a não existência de um fluxo de água entre a lagoa e os poços.

Além dos resultados acima descritos, Carvalho *et. al.* (1978) chegaram às seguintes conclusões:

- *como as águas pluviais são as únicas responsáveis pela oscilação do nível da lagoa, nos anos de baixa precipitação são registrados níveis mais baixos na lagoa; e,*
- *as camadas de calcário que se situam abaixo da lagoa constituem importante reservatório natural, porque é para lá que se orienta o fluxo da águas que infiltram na área de afloramento natural do calcário, situadas a sudoeste da lagoa.*

Finalmente, como apresentado em um estudo feito por Kohler (1978), a lagoa central de Lagoa Santa apresenta o perfil geológico mostrado na Figura 6.10, cujas inclinações das camadas geológicas foram acomodadas no modelo hidrogeológico conceitual e computacional em questão. O corte típico através da depressão apresenta-se, segundo Kohler (1978), da seguinte maneira:

- I - 896 m, topo arredondado, declividade muito fraca, estrutura maciça muito porosa, textura siltito-argilosa;*
- II - 840-850 m, seixos de quartzito e quartzo em meio a uma matriz argilo-siltosa diretamente sobre o filito muito xistoso;*
- III - 800-820 m, ruptura de declive, cascalheira composta por seixos arredondados, repousando diretamente sobre o filito;*
- IV - Depósito coluvial vermelho, com estrutura maciça, textura argilosa. Nesta porção da vertente predominam as voçorocas que cortam a rampa aprofundando-se muitas vezes até 4 metros no elúvio filítico;*
- V - Nível referente da Lagoa Santa. Sua profundidade nunca ultrapassa 3 m;*
- VI - Corresponde a observações realizadas em uma voçoroca. Da superfície até os 4 metros, observa-se um material coluvial vermelho, com estrutura maciça, textura argilosa. Dos 4 aos 10 m, encontra-se um material argiloso. Após os 10 m, é encontrado o filito alterado;*
- VII - Filito meteorizado com mergulho de 3° NE;*
- VIII - Possível ocorrência de calcário por volta da cota de 670 metros;*
- IX - 800-820 m, cabeceiras de voçorocas; e,*
- X - 850 m, cascalho entre 1 e 6 cm, predominando de 3 a 4 cm matriz siltica argilosa.*

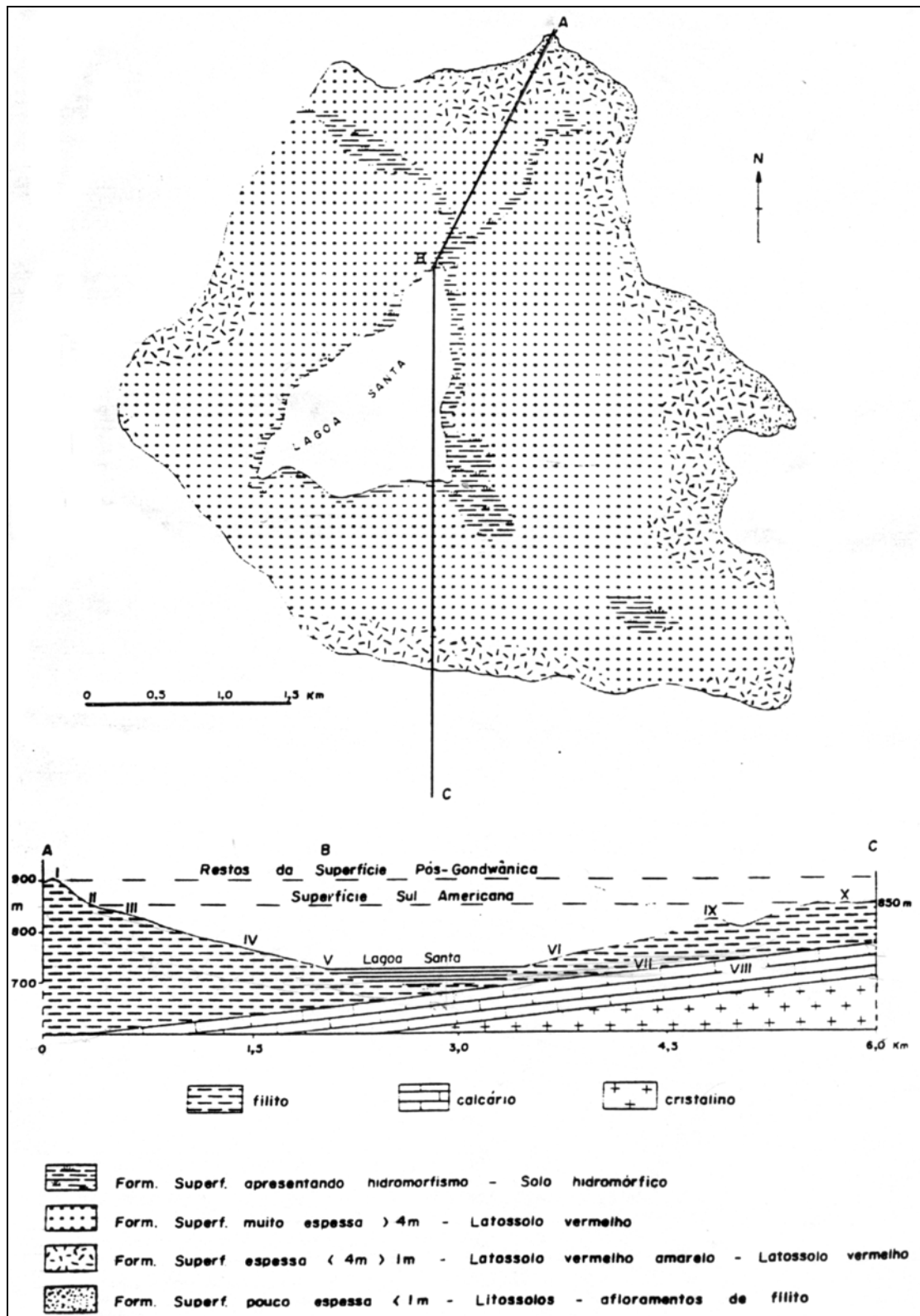


Figura 6.10 - Esboço das formações superficiais na bacia de drenagem da Lagoa Santa, MG.

Fonte - Kohler, 1978.

## 6.5 Arqueologia, Espeleologia e Paleontologia

A região de Lagoa Santa é, reconhecidamente, uma das mais importantes do país sob os aspectos arqueológicos, espeleológicos e paleontológicos. Desde a chegada de Peter Lund em 1835, as grutas da região adquiriram uma enorme importância científico-cultural, tendo despertado a inspiração do grande escritor mineiro João Guimarães Rosa, como apontado em um poema de seu livro *Magma*.

*Gruta do Maquiné*  
Guimarães Rosa<sup>4</sup>

*A gruta de Ali-Babá ainda existe  
graças a Deus, ainda existia,  
quando eu disse:  
\_ “Abre-te Sésamo!...”,  
na fralda da serra,  
e fui entrando, deixando cá fora  
também o sol, a meio céu, querendo entrar ...*

*Bafio quaternário. O preto  
da imensa noite, anterior ao mundo,  
com pesadelos agachados  
e pavores dormindo pelos cantos,  
enrolados nas caudas de gelatina fria,  
vem comprimir o peito e os olhos.  
E ao acendermos as velas e as lanternas,  
a treva se retrai, como um enorme corvo,  
das paredes paleozóicas,  
salitradas.  
Subterrâneos de Poe, salões de Xerezade,  
calabouços, algares, subcavernas,  
masmorras de Luís XI, repiradouros  
do centro da terra,  
buracos negros, onde as pedras jogadas  
não encontram fundo, como pesadelos  
de um metafísico...  
Flores de pedra,  
cachoeiras de pedra,  
cabeleiras de pedra,  
moitas e sarças de pedra,  
e sonhos d'água, congelados em calcário.  
Andares superpostos, hieróglifos, colunas,*

---

<sup>4</sup> Rosa, João Guimarães. *Magma*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997. p.35-37.

*estalagmites subindo  
para estalactites,  
marulhos gotejando das pontas rendilhadas:  
- Plein!... ritmos do Infinito...  
- Plein!... e séculos medidos por milímetros...  
Não falemos, que as nossa vozes, baças,  
recuam espavoridas  
das galerias ressumantes, das reentrâncias  
de um monstruoso caracol...  
Rastros de ursos apeleus e trogloditas,  
candelabros rochosos,  
lustres pendentes de ogivas,  
e a visão de Lund, sorrindo, sonhando  
com fêmures de homens primitivos,  
com megatério e megalodontes...  
Mas é preciso sair. Já é hora  
da noite deslizar para fora da furna,  
e subir, desenrolando as voltas  
de píton ciclópico,  
para encaixar todos os anéis, na altura,  
com milhões de escamas fosforescendo  
e o enorme olho frio vigiando...*

O pioneirismo das pesquisas arqueológicas, espeleológicas e paleontológicas, desenvolvidas na região de Lagoa Santa, é justificado, em princípio, por tratar-se da porção do país onde atualmente se registra o maior número de cavernas por área, sendo que estas são caracterizadas por serem de pequeno porte, tendo em geral menos de cem metros de desenvolvimento.

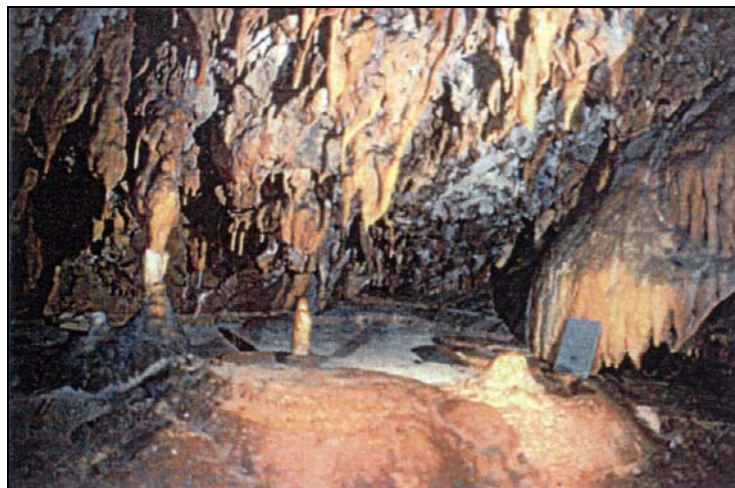
Além das características anteriormente mencionadas, as cavernas da região de Lagoa Santa são marcadas por desenvolver-se, conforme Berbert-Born (2000), *nos calcarenitos homogêneos do Membro Lagoa Santa, onde está instalado o típico relevo cárstico superficial e os principais sistemas hidrológicos subterrâneos.*

Duas cavernas, dentre as muitas encontradas na região de Lagoa Santa são apresentadas a seguir nas Figuras 6.11 e 6.12.



**Figura 6.11** - Gruta da Lapinha, Lagoa Santa.

**Fonte** - CPRM & IBAMA, 1998b.



**Figura 6.12** - Gruta dos Helictites, Lagoa Santa.

**Fonte** - CPRM & IBAMA, 1998b.

Essa aglomeração de grutas e abrigos guarda grande quantidade de fósseis pleistocênicos, entre eles a chamada megafauna extinta. Dentre estas preciosidades descobertas, destaca-se um crânio humano de aproximadamente 10.000 anos que passou a ser conhecido na literatura como o “Homem de Confins”, encontrado na Lapa Mortuária de Confins.

De acordo com Coutard *et. al.* (s.d.), a presença do homem na região de Lagoa Santa, cujos indícios aproximam-se dos 20.000 anos, foi verificada através da

descoberta de esqueletos, utensílios de cerâmica e pinturas rupestres, tornando-a um dos sítios com a datação mais antiga da América do Sul.

Além dos fósseis encontrados, a região de Lagoa Santa é caracterizada, também, pela riqueza das artes rupestres, expressão legítima da cultura pré-histórica.

Berbert-Born (2000) menciona que:

*“... a existência de numerosos sítios com “grafismos parietais” elevam Lagoa Santa ao status de uma das mais importantes “províncias rupestres” do país, tendo particular importância as informações sobre a cronologia das pinturas e o reconhecimento de várias unidades estilísticas. ...”*

## 6.6 Vegetação

*Fruticultura no Cerrado*

*Mario Quintana<sup>5</sup>*

*Quando a árvore não dá frutos  
Seus galhos se contorcem como mãos de enterrados vivos,  
Os galhos desnudos, ressecos, sem o perdão de Deus!  
E, depois, meu Deus, uma lenta procissão de retirantes...  
De vez em quando um tomba, exausto à beira do caminho  
Porque não há no lábio o frescor da água,  
A doçura do fruto...*

A vegetação de Lagoa Santa foi estudada pela primeira vez por Eugênio Warming durante os anos de 1863 a 1866. Durante este período, segundo Parizzi (1993), o botânico descreveu e coletou mais de 2.600 espécies de plantas.

Segundo Plambel (s.d.), a vegetação de Lagoa Santa foi subdividida por Warming em primitivas e secundárias; primitivas aquelas que conservaram as características que receberam de sua evolução natural, independente das transformações provenientes da ocupação humana; secundárias as que foram radicalmente transformadas ou substituídas.

---

<sup>5</sup> Quintana, Mario. Água: os últimos textos de Mario Quintana. ed. trilingüe. Porto Alegre: Artes e Ofícios, 2001. 77 p.

Como primitivas, conforme Plambel (s.d.), Warming classificou as matas, campos, cerrados, brejos e formações de plantas aquáticas e, como secundárias, as lavouras e pastagens.

Em seu trabalho, em 1892, conforme descrito por Parizzi (1993), Warming menciona que as matas ocupavam todas as depressões e vales, ou seja, todos os cursos d'água e, também, todas as rochas calcárias. Segundo ele, os campos cobriam a maior parte do território. Especificou, também, que ao redor da lagoa central de Lagoa Santa eram encontrados tanto os campos limpos quanto os cerrados.

Estudos desenvolvidos pela Plambel (s.d.), modernamente, não se afastam muito do modelo proposto por Warming, visto que as matas não constituem e não constituíram, antes da ocupação humana, a principal cobertura. Apesar de serem encontradas acompanhando os cursos d'água como vegetação ciliar, ou nos vales esculpidos no relevo ondulado dos topos filíticos, cobrindo os talwegues mais profundos, as matas, reforça Plambel (s.d.), aparecem mais comumente e tipicamente junto aos paredões calcários.

Resumidamente, segundo Kohler *et. al.* (1976), *a vegetação é composta essencialmente por cerrados sobre filito e de "floresta seca" na região de calcário.*

Hoje, conforme ressaltado por Kohler & Malta (s.d.), *restam os cerrados e as matas semidecíduais sobre os afloramentos de calcário não explorados*, já que o avanço da metrópole sobre o campo descaracterizou a paisagem vigente.

## **6.7 Hidrologia e Hidrografia**

A região de estudo está inserida numa área onde se destaca a presença da bacia do rio das Velhas, por sua vez, pertencente à grande bacia do rio São Francisco. Conforme CPRM & IBAMA (1998a), com exceção do ribeirão da Mata, afluente expressivo do rio das Velhas, *todos os demais tributários do rio das Velhas localizados na região são de pequeno porte, gerando uma contribuição hídrica pouco expressiva quanto ao aspecto quantitativo.*

O rio das Velhas, nível de base regional, flui, segundo Kohler & Malta (s.d.), para o norte e o seu afluente ribeirão da Mata segue em direção quase oposta (NW-SE). Nota-se, da mesma forma, conforme Kohler & Malta (s.d.), que *os tributários do ribeirão da Mata também apresentam direção norte.*

Com relação à lagoa central de Lagoa Santa, acredita-se que toda a sua bacia esteja ligada ao sistema fluvial do Rio das Velhas. Afirma-se, também, que, segundo Parizzi (1993), a lagoa é abastecida por águas pluviais e pelo córrego Francisco Pereira, cujas águas desaparecem em períodos de secas prolongadas. O seu caráter pseudo-cárstico confere a esta lagoa uma perenicidade em seu nível d'água, distinguindo-a dos demais corpos d'água da região.

O córrego Bebedouro, no vértice norte da lagoa central de Lagoa Santa, *funciona como sangradouro, recebendo suas águas durante a época da cheia e desaguando no Rio das Velhas*. Além das águas daquela lagoa, o Bebedouro, durante seu curso até rio das Velhas, é abastecido por pequenos afluentes (Parizzi, 1993).

Como já afirmado, a região de Lagoa Santa é caracterizada por um carste bem desenvolvido, sendo marcado pela presença de inúmeras feições típicas como dolinas, uvalas, cavernas, sumidouros e surgências. Segundo CPRM & IBAMA (1998a), algumas dessas feições, principalmente os sumidouros, grutas e dolinas alimentam, juntamente com a infiltração difusa, um sistema de drenagem subterrânea. Sendo assim, alguns dos principais cursos d'água da região de Lagoa Santa têm, conforme mencionado por CPRM & IBAMA (1998a), suas nascentes provenientes de surgências em afloramentos calcários e, por vezes, suas águas drenam para condutos subterrâneos, ressurgindo pouco mais a jusante. Este comportamento inusitado do fluxo subterrâneo foi descrito por Lund, citado por Piló (2002), da seguinte maneira:

*Outro fenômeno ligado à riqueza da rocha calcária destas zonas é a desaparecimento súbita dos rios, que desaparecem em lugares mais ou menos distantes. A existência desses sumidouros origina-se da grande quantidade de fendas superficiais ou subterrâneas existentes na rocha. (Lund, 1937).*

Em função das características cársticas da área de estudo, há de se ressaltar a ocorrência de uma série de lagoas e lagos que, segundo CPRM & IBAMA (1998a), apresentam em sua maioria, *características temporárias, com ciclos anuais ou plurianuais, condicionados pelo regime pluviométrico associado ao nível freático e aos sistemas de fluxo do aquífero cárstico*. Em contrapartida, as numerosas flutuações do nível d'água dos lagos cársticos opõem-se a relativa estabilidade dos lagos pseudocársticos instalados sobre os filitos.

A lagoa do Sumidouro, que é alimentada pelo córrego Samambaia, é o principal corpo lacustre da região. Não é perene, apresentando ciclo plurianual. (CPRM & IBAMA, 1998a).

Outra lagoa expressiva é a lagoa dos Mares, situada na área adjacente ao ribeirão da Mata. Trata-se de uma lagoa perene, cujas águas drenam subsuperficialmente para uma ressurgência próxima ao ribeirão da Mata. (CPRM & IBAMA, 1998a).

Com relação às demais lagoas, observa-se que têm sofrido alteração em seus regimes hídricos em virtude das diversas atividades antrópicas, sobretudo minerárias. Segundo CPRM & IBAMA (1998a), a lagoa do Santo Antônio *teve seus sumidouros tamponados por um aterramento causado por uma mineradora*, provocando elevações de nível d'água. As lagoas situadas no município de Confins, do mesmo modo, também têm sofrido alteração de nível, possivelmente associada à implantação do sistema de drenagem superficial do Aeroporto Internacional Tancredo Neves. (CPRM & IBAMA, 1998a).

## **6.8 Características climatológicas**

A região de Lagoa Santa é caracterizada por apresentar um elevado grau de umidade absoluta e temperatura interior elevada, em função da intensa radiação solar incidente, sendo enquadrada no tipo climático Tropical Aw. Portanto, a região apresenta clima tropical úmido com inverno seco e verão chuvoso, uma vez que a temperatura média do mês mais frio é superior a 18° C e os totais pluviométricos anuais encontram-se em média entre 1000 e 1500 mm.

Resumidamente, afirma-se, também, que a precipitação anual não ultrapassa 1300 mm, concentrada nos meses de outubro a abril. De acordo com Kohler & Malta (s.d.), apenas 20% das chuvas têm uma duração superior a 4 horas. O índice xerotérmico da região é 55, sendo os meses de maio a agosto considerados os mais quentes. A temperatura média anual está registrada em torno de 22° C.

## 7 CARACTERIZAÇÃO LOCAL DA ÁREA DE ESTUDO

### 7.1 Definição do domínio de investigação

A área de estudo do presente trabalho localiza-se ao norte da região metropolitana de Belo Horizonte, abrangendo parte do município de Lagoa Santa. Seu limite sul 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, 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 restringindo-se apenas aos domínios da Mina Lapa Vermelha, localizada próximo ao trevo de acesso à cidade de Lagoa Santa.

A área total de investigação, que engloba toda a porção minerada e adjacências, como descrito anteriormente, está localizada entre as coordenadas de projeção UTM (610.000, 620.000) e (7.820.500, 7.830.500), compreendendo uma extensão de 47 km<sup>2</sup> e um perímetro de 32,68 km.

O processo de delimitação da área de influência da Mina Lapa Vermelha foi bastante criterioso. Como salientado por Piló (1999), *as bacias de drenagem no carste não se limitam necessariamente aos divisores de água superficiais, podendo estender-se muito além desses limites*. Devido a esta imprevisibilidade de fluxo das águas a qual Piló (1999) se referiu, tornou-se fundamental a elaboração de um estudo com traçador químico corante de forma a elucidar a direção do escoamento das águas. Nesses ambientes cársticos, as águas precipitadas e infiltradas num determinado ponto da bacia hidrográfica assumem caminhos invariavelmente imprevisíveis, podendo até mesmo desviar-se para outras bacias através dos condutos subterrâneos.

Devido, então, à necessidade de se desenvolver um estudo com traçador corante em uma região cárstica, o presente trabalho valeu-se de um ensaio de traçador feito na área em questão, realizado pela TECISAN. Este estudo, segundo TECISAN (2000), consistiu em um experimento qualitativo, *de forma a apenas caracterizar a rota de fluxo, sem pretensão de quantificar a quantidade relativa de água drenada entre o ponto de injeção e o ponto de descarga*. Para tanto, utilizou-se a fluoresceína sódica ( $C_{20}H_{12}O_5Na_2$ ), que é um composto orgânico fluorescente solúvel em água.

Segundo TECISAN (2000), o estudo de aplicação do traçador corante foi iniciado com a instalação de cápsulas perfuradas com carvão ativo em algumas nascentes, visto que tal substância, quando em contato com a pluma, possui a capacidade de reter a fluoresceína. A seguir, foi introduzida a fluoresceína na dolina “Ponto de Injeção” da Mina Lapa Vermelha. Posteriormente, as cápsulas de carvão ativado foram retiradas e encaminhadas ao laboratório, onde foi medida a quantidade de fluoresceína acumulada durante o tempo estudado, possibilitando, então, detectar as rotas de fluxo subterrâneo.

A fluoresceína injetada na dolina “Ponto de Injeção” da Mina Lapa Vermelha foi encontrada na surgência do Tadinho, comprovando a existência de uma conexão hidráulica presente no local. Com isso, afirma-se que a surgência do Tadinho é um ponto de descarga da área da Mina Lapa Vermelha, para onde converge o fluxo artificialmente injetado na dolina. Entretanto, em virtude dessa surgência ser perene, funcionando independentemente da água injetada, acredita-se que a mesma drene uma região maior e, não somente, a área da mina.

Além da dolina “Ponto de Injeção” da Mina Lapa Vermelha, introduziu-se o mesmo traçador em outros pontos da região a fim de averiguar a existência de outras estruturas cársticas que conectasse hidraulicamente a área de investigação. Apesar de várias tentativas, nenhuma conexão foi encontrada, além da já relatada.

Estes ensaios com traçadores desenvolvidos pela TECISAN foram muito importantes para determinar a área de influência da Mina Lapa Vermelha, uma vez que os divisores de águas superficiais não necessariamente coincidem com os limites da bacia cárstica. Complementando tais estudos, foram avaliadas as informações hidrográficas e geomorfológicas da região.

Os aquíferos cársticos são caracterizados pela presença de fraturas que armazenam e transmitem as águas subterrâneas. Essas fraturas, na maioria das vezes, apresentam traços superficiais que podem ser observados em fotografias aéreas ou através de levantamentos de campo. Dessa forma, sob o ponto de vista geomorfológico, foram feitas análises das fotografias aéreas, a fim de contribuir para a definição dos limites da área de influência da Mina Lapa Vermelha.

Objetivando reforçar a demarcação da área de influência da Mina Lapa Vermelha, foram avaliados os aspectos hidrográficos. Para tanto, estabeleceu-se que o limite sul da área em questão, como dito inicialmente, está delimitado pelo ribeirão da Mata, visto que tal corpo d'água representa o nível de base local. Este ribeirão trata-se, portanto, do maior potencial hídrico encontrado na área de estudo, para onde as águas superficiais convergem.

A norte, a região foi limitada um pouco acima da lagoa central de Lagoa Santa, passando pelos divisores de água daquele local. Dessa maneira, foram avaliadas as águas que estão escoando superficialmente em direção às três vertentes desta lagoa.

A leste, definiu-se como extremo da área de estudo o córrego José Maria. Este local foi escolhido como limite por tratar-se de um córrego com expressividade na região, apresentando caráter perene. Vale dizer, também, que por ser um talvegue, representa um ponto de descarga do sistema de fluxo da água subterrânea.

Já o limite oeste foi determinado por um divisor hidrográfico da bacia do Ribeirão da Mata.

Dessa maneira, avaliando-se os aspectos geomorfológicos, hidrográficos e os resultados dos estudos com traçador corante, delimitou-se a área de influência da Mina Lapa Vermelha como aquela apresentada na Figura 6.1. Acredita-se, de fato, que tal limite represente a área de interferência da Mina Lapa Vermelha, pois analisando-se os aspectos geomorfológicos, observa-se que não existe ao redor deste limite zonas com cotas mais elevadas que, portanto, poderiam contribuir para a recarga da área em questão. Além disso, não foi detectada, através de estudo de traçador corante e avaliações de fotografias aéreas, a evidência de alguma estrutura cárstica capaz de fornecer água para a área de estudo.

## 7.2 **Geologia Local**

A área de estudo está inserida numa região que apresenta, segundo a TECISAN (2000), *uma geologia que inclui litotipos ígneos, metamórficos e sedimentares do Pré-Cambriano.*

O embasamento cristalino característico da região, como descrito no Capítulo 6, é formado por rochas granito-gnáissicas, sendo recobertas pelas rochas carbonáticas do Grupo Bambuí. Entretanto, vale aqui reafirmar que o embasamento cristalino não apresenta afloramentos dentro da área de investigação.

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.

O Membro Pedro Leopoldo *é formado por rochas compostas por calcissiltitos, calcários laminados intercalados com níveis argilosos.* Já o Membro Lagoa Santa, alvo de lavra na Mina Lapa Vermelha, é constituído por calcários escuros e finos, contendo níveis grafitosos (TECISAN, 2000).

De acordo com TECISAN (2000), a Formação Sete Lagoas é sobreposta pela Formação Serra de Santa Helena, sendo esta caracterizada por *metapelitos de granulação média a fina, compondo volumes designados como parte do estéril da mina.*

Acima da Formação Serra de Santa Helena é encontrado um manto de alteração de caráter elúvio-coluvionar com espessura variando em torno de 30 m. Nota-se que este manto compreende, provavelmente, a alteração geoquímica dos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena.

Objetivando uma descrição geológica mais detalhada, a TECISAN (2000) desenvolveu algumas investigações em campo, as quais encaminharam para às seguintes evidências:

- os afloramento das rochas calcárias existentes nas porções de topografia mais baixas do terreno denotam a existência de contatos entre os Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa; e,
- analisando os perfis de sondagem de quatro poços tubulares existentes na área da mina, conclui-se que existe uma zona de calcários fraturados, preenchidos por material argilo-arenoso entre as cotas 735 e 700 m de profundidade.

Além das evidências descritas anteriormente, certifica-se, através da análise dos perfis dos piezômetros instalados ao redor da cava da Mina Lapa Vermelha, que o calcário encontrado neste local apresenta um certo grau de basculamento, visto que ora ele é encontrado a uma profundidade de aproximadamente 50 m (piezômetro PZ-2), ora a quase 90 m (piezômetro PZ-4). Ocorre, também, que este mesmo calcário, a uma distância de alguns metros, deixa de ser encontrado. Tal fato pode ser comprovado examinando a ocorrência desta litologia no piezômetro PZ-3A e sua ausência no piezômetro PZ-1, sendo que estão distanciados por pouco mais de 150 m. Ressalta-se que a localização dos piezômetros está apresentada na Figura 6.1.

A seguir, nas Figuras 7.1, 7.2 e 7.3 são apresentados, respectivamente, os perfis dos piezômetros, o mapa da geologia superficial local e um perfil geológico da área de estudo.

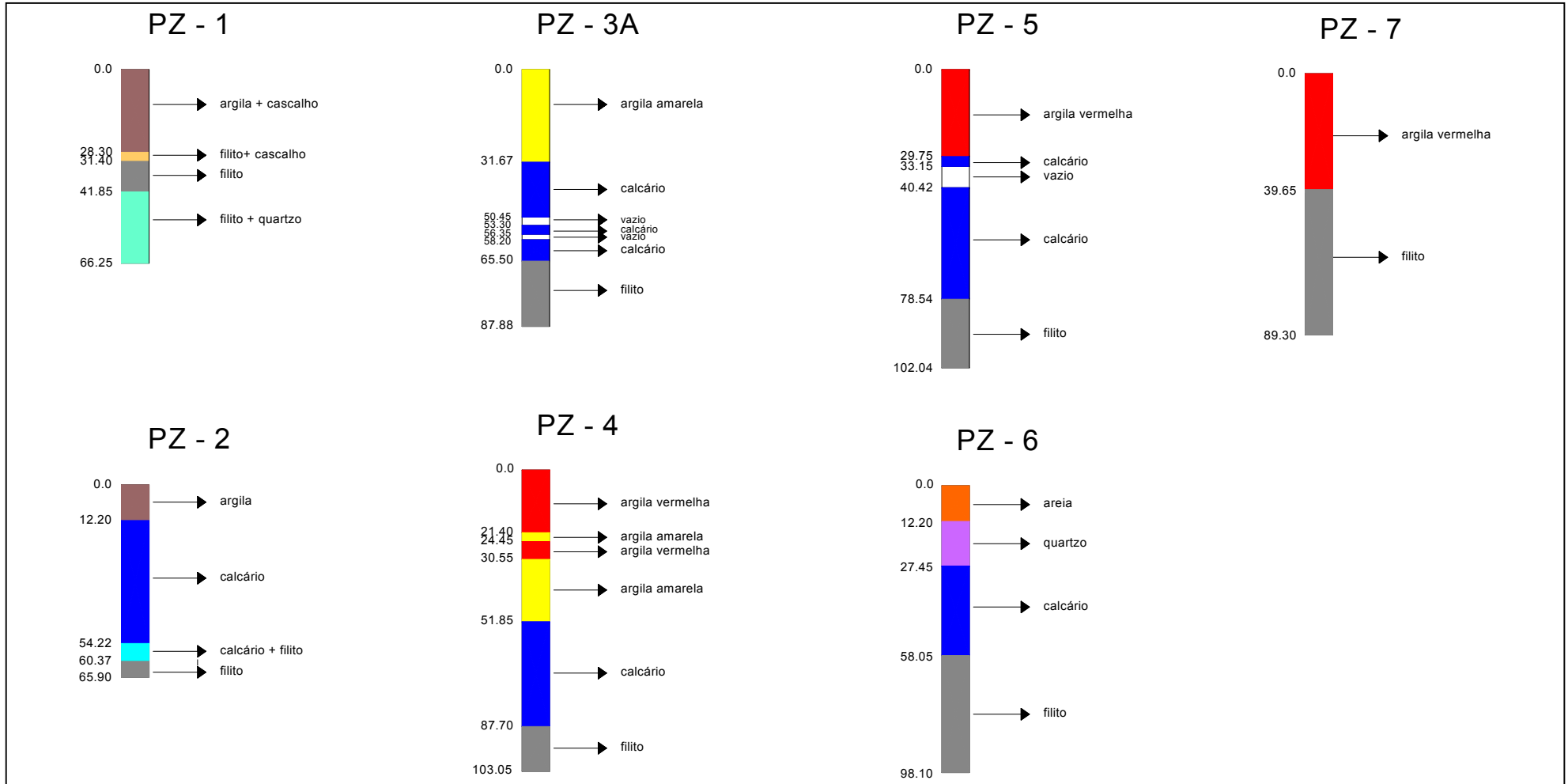


Figura 7.1 - Perfil dos piezômetros da Mina Lapa Vermelha.

MAPA AUTOCAD

**Figura 7.2 -** Mapa de geologia superficial local.

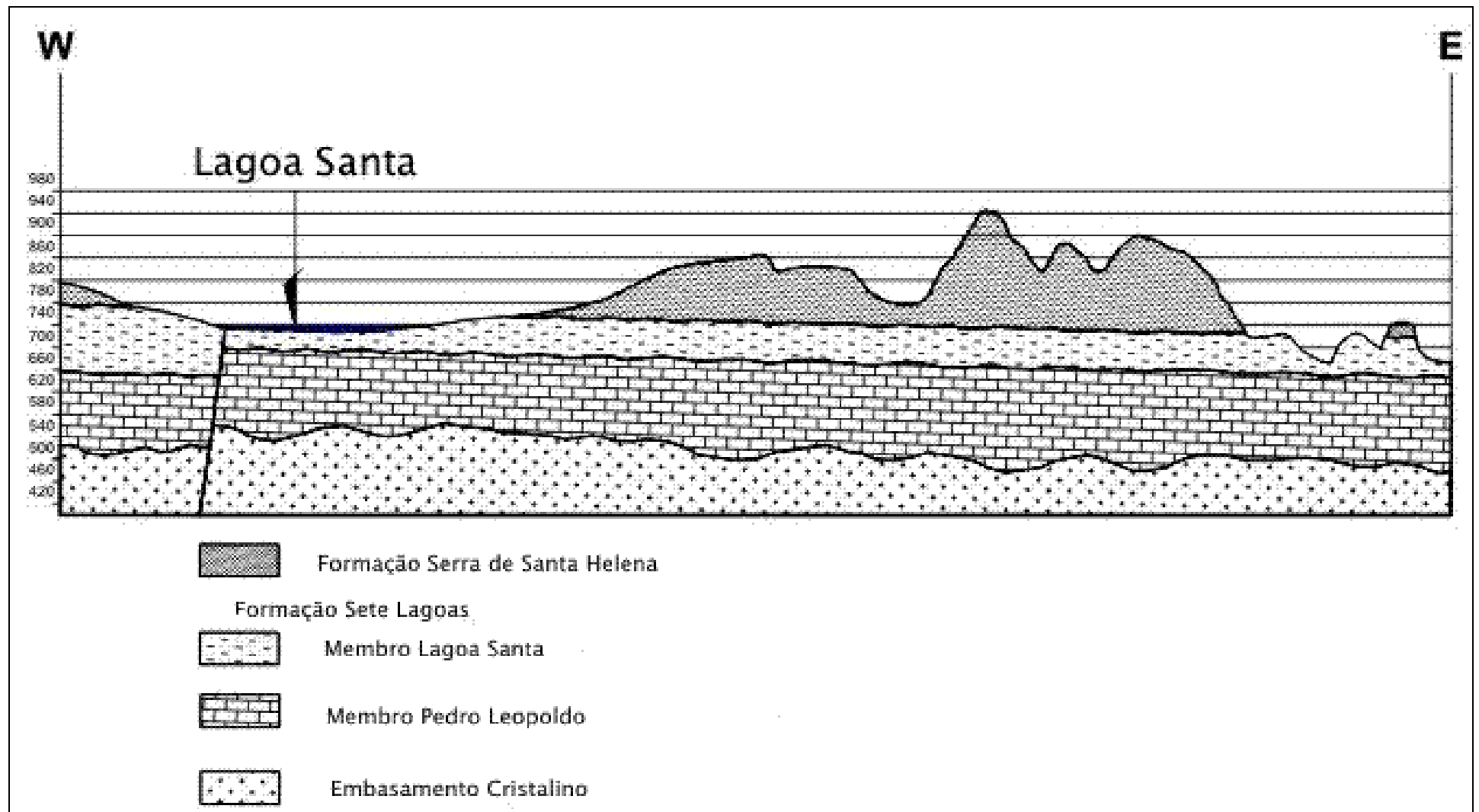


Figura 7.3 - Perfil geológico da área de estudo.

### 7.3 **Geologia Estrutural**

As rochas que compõem o grupo Bambuí foram, segundo a TECISAN (2000), *tectonicamente afetadas pelo evento Brasileiro*. Em geral, mostram-se pouco deformadas, sendo que apenas localmente, apresentam dobras ou falhas em escala mesoscópica, ocorrendo na maioria dos casos em baixo ângulo.

A baixa intensidade de deformação e de metamorfismo das rochas componentes do Grupo Bambuí é comprovada pela própria disposição das camadas, conformadas subhorizontalmente. Seus limites de contato são definidos em superfície por uma tectônica de baixo ângulo, denotando mergulhos suaves em torno de N45 -10W /10NE.

A caracterização dos aspectos estruturais que distingue a região de estudo foi garantida através de análises foto-interpretativas e sondagens. Dessa maneira, tornou-se possível a identificação de estruturas como feixes e alinhamentos de fraturas, cujas direções mapeadas e os referidos comprimentos auxiliaram, sobremaneira, no entendimento da dinâmica que rege o sistema hídrico subterrâneo. Sendo assim, as análises de sondagens contribuíram para a compreensão da ocorrência, em profundidade, das diversas litologias que compõem a área de estudo. Já os levantamentos estruturais efetuados na área em apreço permitiram a composição dos principais traços de fraturas. Estas fraturas se manifestam como estruturas de significado tectônico, sendo interpretadas como zonas condutoras de água em subsuperfície. Algumas dessas interpretações estruturais são apresentadas nas Figuras 7.4 a 7.8.

**Figura 7.4 -** Mapa de geologia estrutural – cota 640 m.

**Figura 7.5 -** Mapa de geologia estrutural – cota 680 m.

**Figura 7.6 -** Mapa de geologia estrutural – cota 700 m.

**Figura 7.7 -** Mapa de geologia estrutural – cota 740 m.

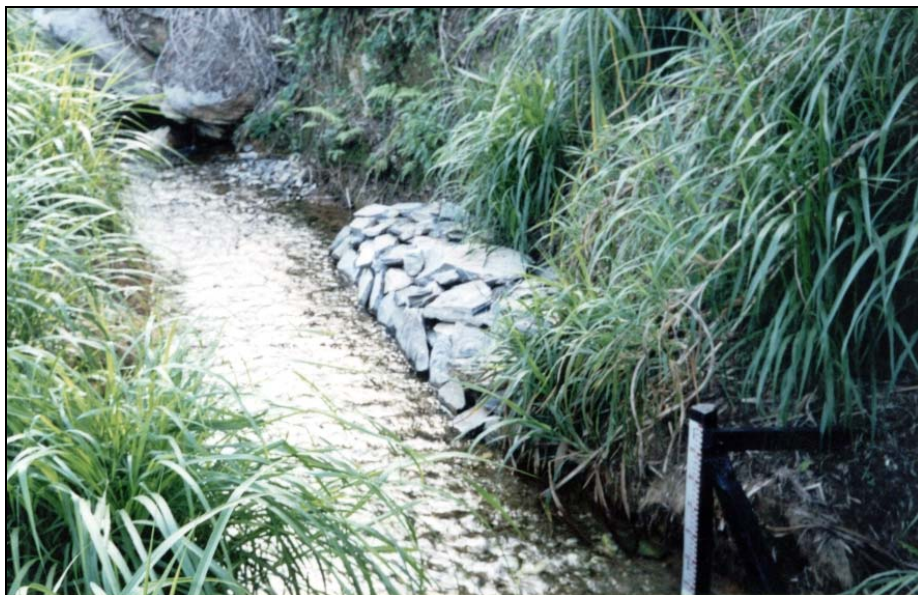
**Figura 7.8 -** Mapa de geologia estrutural – cota 770 m.

#### **7.4 Geomorfologia**

A área da Mina Lapa Vermelha insere-se na região cárstica de Lagoa Santa, sendo caracterizada por apresentar um relevo cárstico maduro, onde pode ser encontrada a maior parte das feições cársticas típicas, como dolinas, sumidouros, ressurgências, cavernas e paredões, como apresentado nas próximas figuras.



**Figura 7.9 -** Dolina do Jacaré.



**Figura 7.10 -** Surgência do Tadinho.



**Figura 7.11** - Detalhe da surgência do Tadinho.



**Figura 7.12** - Detalhe do maciço calcário onde surge a nascente do Tadinho.

**Fonte** - TECISAN, 2000.

Apesar da ocorrência das principais estruturas que caracterizam as paisagens cársticas, a área em estudo é marcada fundamentalmente pelo endocarste. Assim sendo, o carste da região é do tipo coberto e o calcário somente aflora em rupturas do relevo. A drenagem, segundo TECISAN (2000), ocorre primordialmente em subsuperfície, já que

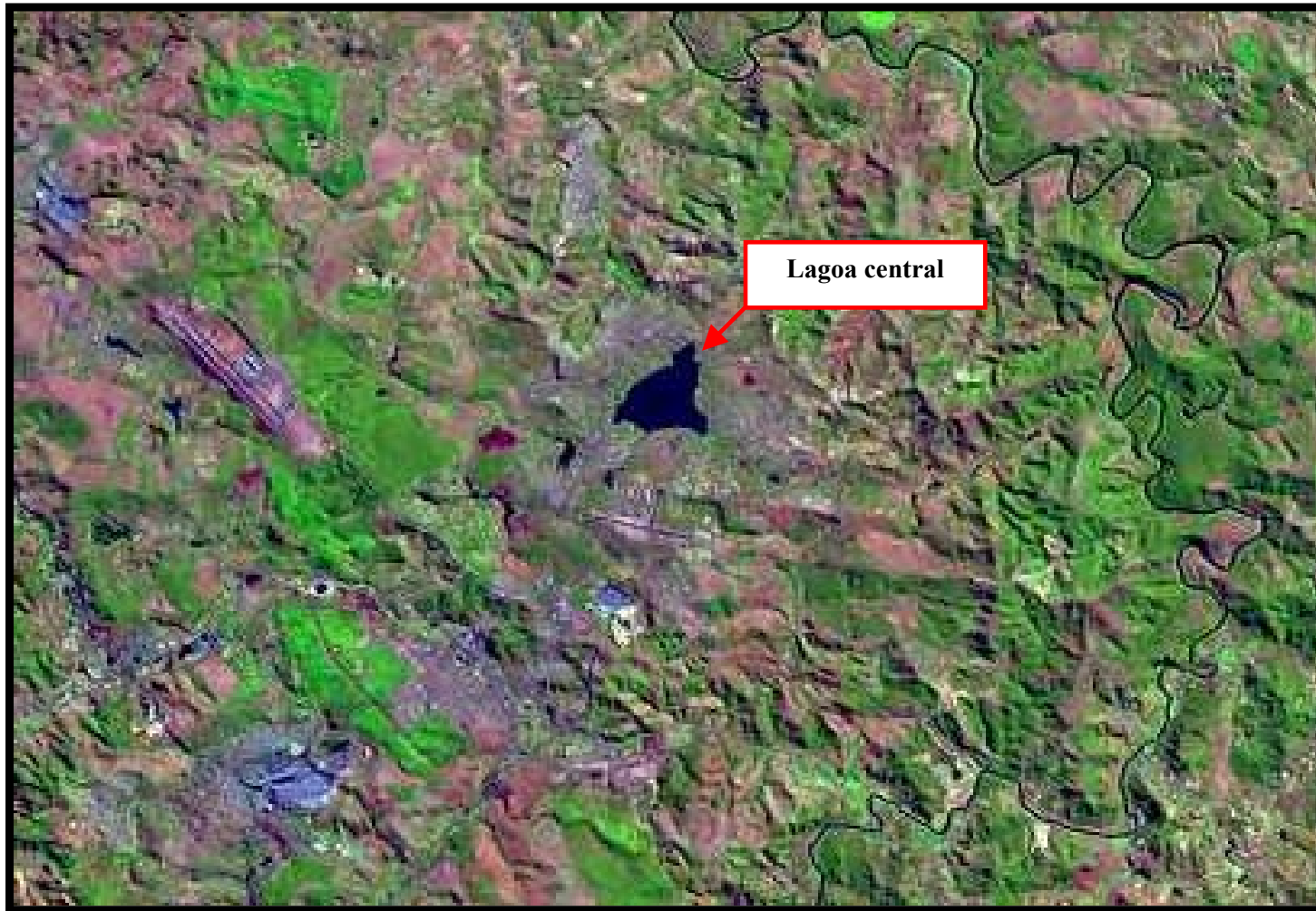
a maior parte da água infiltra rapidamente através de fraturas alargadas em fundo de dolinas ou através de sumidouros.

Atualmente, devido aos trabalhos de lavra, a área da Mina Lapa Vermelha encontra-se alterada em relação ao seu aspecto geomorfológico original. Sabe-se que sua extensão compreendia um compartimento rebaixado onde se localizava a caverna Lapa Vermelha de Lagoa Santa. Esta caverna, caracterizada por suas grandes dimensões, foi mapeada, segundo Rubbioli & Auler (2002), pelo norueguês Peter Andréas Brandt.

Em virtude das alterações introduzidas pelas atividades de mineração no meio físico, pode-se afirmar que o maciço atualmente lavrado não possui cavernamento expressivo. Além disso, é possível perceber a existência de dolinas de extensão e profundidades variadas ocorrendo na área da Mina Lapa Vermelha.

A sul do maciço principal, onde se processa atualmente a lavra da Mina Lapa Vermelha, ocorre um vale cárstico limitado por encostas e escarpas calcárias. Este vale, conforme (TECISAN, 2000), *é seco em sua porção montante, contendo, no entanto, as nascentes do córrego Cafundó em sua porção distal*. Ademais, a área desta mina está limitada por platôs metapelíticos da Formação Serra de Santa Helena, dominando as cotas topográficas entre 750 e 880 m de altitude.

Nas Figuras 7.13 e 7.14, são apresentados, respectivamente, uma imagem de satélite e um bloco diagrama da região da área de influência da Mina Lapa Vermelha, a fim de ilustrar sua topografia local.



**Figura 7.13** - Aspecto geral da topografia da área de influência da Mina Lapa Vermelha.

**Fonte** - <http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br/mg> (Escala 1:50.000).

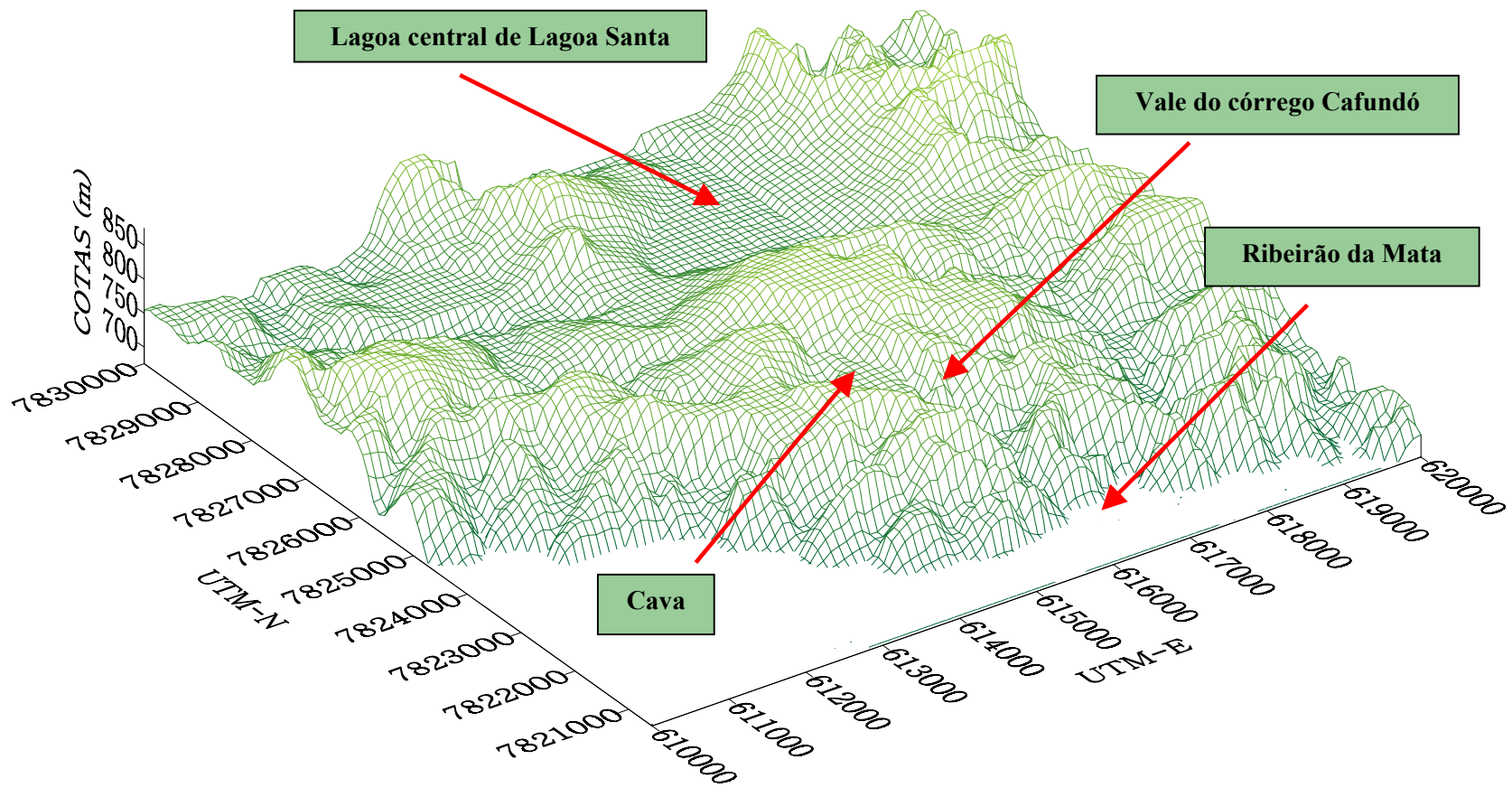


Figura 7.14 - Aspecto geral da topografia da área de influência da Mina Lapa Vermelha.

### 7.5 Aspectos hidrográficos da área de interesse

A rede hidrográfica característica da região de investigação é composta basicamente pelos tributários das sub-bacias de drenagem locais.

O limite norte da área de estudo é demarcado pela bacia de drenagem do córrego Bebedouro, onde está assentada a lagoa central de Lagoa Santa.

Já o limite sul da região de interesse é determinado pelo ribeirão da Mata. Este curso d'água desenvolve-se na direção de um alinhamento E-W, com fluxo direcionado de oeste para leste, apresentando um baixo gradiente hidráulico. Além disso, pode-se afirmar que o ribeirão da Mata compreende o curso d'água de maior expressão local, representando o nível de base para onde vertem todos os fluxos de água da área de estudo, tanto superficiais quanto subterrâneos.

Quanto à qualidade das águas, o ribeirão da Mata mostra-se com oscilações decorrentes do período climático. Sendo assim, apresenta elevada turbidez nas épocas úmidas em detrimento dos teores mais baixos de sólidos em suspensão observados nos períodos secos.

Com exceção do ribeirão da Mata, os cursos d'água existentes na área de estudo apresentam uma maior expressão hidrográfica devida à conformação do vale que ocupam do que propriamente pelas descargas que drenam. 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 do 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, tributário da margem direita do vale do Cafundó.

O córrego Cafundó trata-se de uma drenagem perene, onde está instalada uma calha Parshal. Este corpo d'água drena uma vazão de cerca de 15 m<sup>3</sup>/h (0,00416 m<sup>3</sup>/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. Contudo, valores maiores de vazão podem ocorrer em função das contribuições de escoamento superficial ao longo da bacia na época das enchentes. Paralelamente, segundo a TECISAN (2000), a existência de três pequenas barragens diminui e, nos períodos de estiagem, até mesmo

obstrui o alcance de seu volume mais a jusante, chegando o mesmo a não atingir o ribeirão da Mata.

Além das características já descritas, o vale do córrego Cafundó representa uma zona deprimida do relevo cárstico local, onde afloram paredões em meio à presença de pequenas dolinas, surgências e sumidouros.

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 m<sup>3</sup>/h (0,087 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/h (0,047 m<sup>3</sup>/s ou 47 l/s) nos períodos chuvosos.

Como já confirmado pela aplicação de traçadores corantes, esta surgência está conectada hidraulicamente à dolina “Ponto de Injeção”, localizada no entorno da Mina Lapa Vermelha. Devido a esta peculiaridade, sua dinâmica aquífera se modificada em função das oscilações de descargas injetadas na dolina. Dessa maneira, nos períodos de estiagem, quando não são necessários os bombeamentos na área da mineração, a vazão medida neste ponto diminui, sem, no entanto, secar.

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 km<sup>2</sup>. 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 semi-impermeável entre o fundo da lagoa e o sistema hidrogeológico cárstico. Assim sendo, as constatações advindas das perfurações desses poços confirmaram a idéia apresentada por Parizzi *et. al.* (1998)

quando afirmaram que a base de depressão da lagoa central de Lagoa Santa é formada por rochas argilosas que são impermeáveis e, portanto, retém a água.

A lagoa central de Lagoa Santa, em virtude da sazonalidade climática local e das intervenções antrópicas de uso e de ocupação do solo, apresenta períodos de ciclos secos, que promovem sua desconexão com o restante do córrego Bebedouro. A exemplo das ações provocadas pelo homem, pode-se citar a canalização de um trecho a jusante de seu leito natural. Já nos períodos úmidos, a lagoa central de Lagoa Santa verte os excedentes das descargas de precipitação.

## 8 BALANÇO HÍDRICO

*Os Rios*  
*Olavo Bilac<sup>6</sup>*

*Magoados, ao crepúsculo dormente,  
Ora em rebojos galopantes, ora  
Em desmaios de pena e de demora,  
Rios, chorais amarguradamente.*

*Desejais regressar... Mas, leito em fora,  
Correis... E misturais pela corrente  
Um desejo e uma angústia, entre a nascente  
De onde vindes, e a foz que vos devora.*

*Sofreis da pressa, e, a um tempo, da lembrança...  
Pois no vosso clamor, que a sombra invade,  
No vosso pranto, que no mar se lança,*

*Rios tristes! agita-se a ansiedade  
De todos os que vivem de esperança,  
De todos os que morrem de saudade...*

O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica, obedecendo aos princípios da conservação de massa, envolve a quantificação dos componentes hídricos em um sistema, visando ao melhor entendimento do comportamento da região e à utilização racional dos recursos hídricos. Para tanto, o seu equacionamento contabiliza todas as entradas e saídas de água em uma unidade hidrográfica, a fim de determinar a variação do armazenamento dentro da mesma.

Considerando a conservação de massa e a troca de energia dos sistemas envolvidos, no tempo e no espaço, o balanço hídrico envolve os seguintes fenômenos:

- precipitação;
- evaporação;
- transpiração;

---

<sup>6</sup> Bilac, Olavo. *Poesias*. São Paulo: Martins Fontes, 2001. p.285.

- evapotranspiração;
- escoamento superficial; e,
- escoamento subterrâneo.

## 8.1 **Precipitação**

*Toada da Chuva*  
*Guimarães Rosa<sup>7</sup>*

...  
*(Chuva boa,*  
*chuva meiga,*  
*que assim me vens consolar ...*  
*Se no céu estão chorando,*  
*Por que preciso chorar?!...)*

### 8.1.1 **Análise dos dados pluviométricos**

Zonas de baixa latitude, tropicais, são caracterizadas pela presença de duas estações climáticas bem marcadas, uma úmida e outra seca. Na área em estudo este comportamento é bem observado, já que os meses de junho, julho e agosto são bastante secos, enquanto os meses de novembro, dezembro e janeiro, chuvosos.

Para uma estimativa da média pluviométrica da área de influência da Mina da Lapa Vermelha foram considerados, inicialmente, os dados coletados entre os anos de 1988 e 2000, na estação meteorológica localizada no Aeroporto Internacional Presidente Tancredo Neves (Confins), situado a aproximadamente 10 km da região em apreço. Optou-se pelos dados desta estação em virtude da ausência de registros pluviométricos recentes na cidade de Lagoa Santa e por esta ser a estação mais próxima à área de estudo. Estes dados estão apresentados na Tabela 8.1 e nas Figuras 8.1 e 8.2, ressaltando-se que não há registros pluviométricos para o ano de 1989.

---

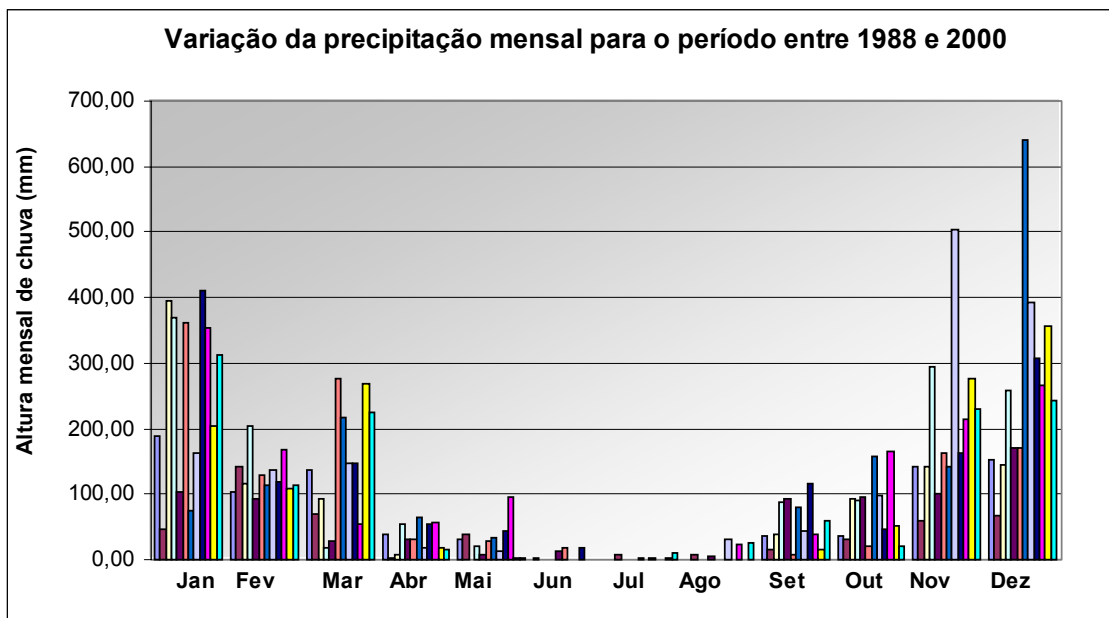
<sup>7</sup> Rosa, João Guimarães. *Magma*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997. p.118-121.

**Tabela 8.1 -** Índices pluviométricos medidos na estação metereológica do Aeroporto Internacional Presidente Tancredo Neves (Confins) no período entre 1988 e 2000.

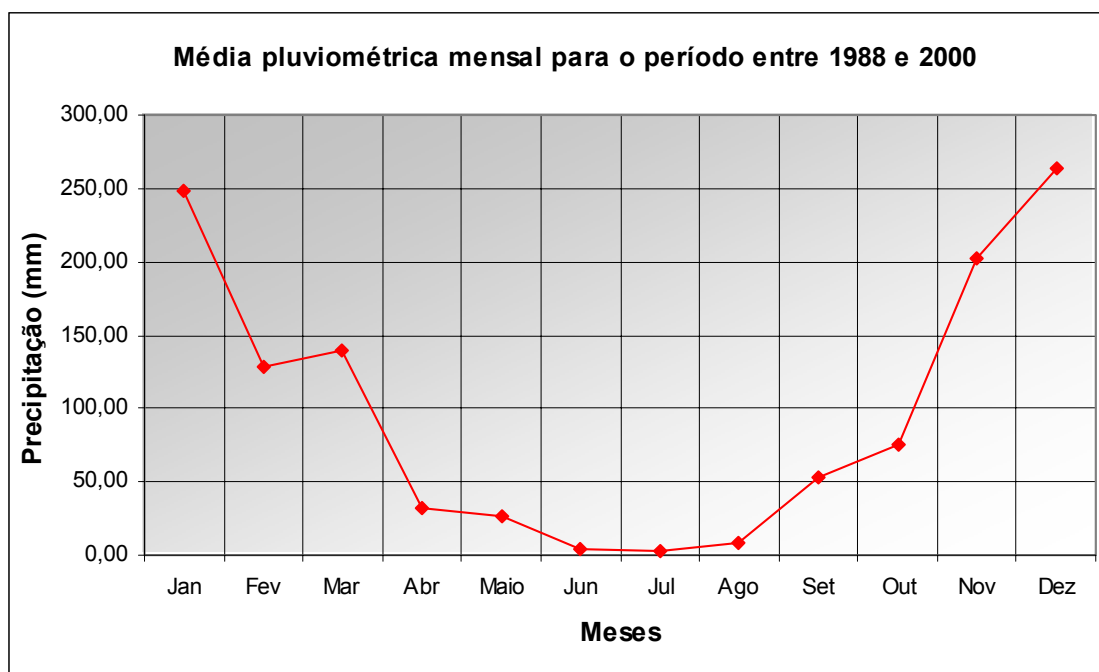
Ano/Mês	Índice pluviométrico – mm												Total anual (mm)
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
1988,0	189,0	103,0	137,0	40,0	30,0	2,0	0,0	0,0	36,0	35,0	143,0	152,0	867,0
1990,0	47,0	142,0	69,0	3,0	39,0	0,1	9,0	8,0	15,0	32,0	60,0	68,0	492,1
1991,0	396,0	116,0	93,0	7,0	1,0	0,0	0,1	0,0	38,9	93,0	142,0	144,0	1031,0
1992,0	369,0	203,0	19,0	53,0	21,0	0,1	1,0	1,0	89,0	90,0	295,0	259,0	1400,1
1993,0	104,0	93,0	29,0	31,0	6,5	12,0	0,0	6,4	93,7	96,3	101,0	170,3	743,2
1994,0	360,6	128,9	276,0	30,0	28,8	17,6	3,0	0,0	8,2	20,7	163,1	170,0	1206,9
1995,0	74,3	114,9	217,4	65,2	33,7	0,0	0,0	0,0	78,8	158,2	143,0	641,8	1527,3
1996,0	163,4	136,6	146,1	18,6	12,2	0,2	1,7	30,2	42,8	97,9	502,6	392,2	1544,5
1997,0	411,1	118,2	147,1	53,4	45,2	19,3	0,2	0,5	117,3	47,3	163,6	308,2	1431,4
1998,0	354,6	168,8	54,6	57,1	94,9	0,0	0,0	23,1	39,2	164,7	213,4	266,4	1436,8
1999,0	204,6	108,5	267,5	19,3	3,2	0,3	2,5	0,0	15,7	50,9	276,0	356,8	1305,3
2000,0	312,1	113,7	225,5	15,7	1,5	0,0	11,6	26,7	59,0	20,1	230,9	243,6	1260,4
<b>Média</b>	<b>248,8</b>	<b>128,9</b>	<b>140,1</b>	<b>32,8</b>	<b>26,4</b>	<b>4,3</b>	<b>2,4</b>	<b>8,0</b>	<b>52,8</b>	<b>75,5</b>	<b>202,8</b>	<b>264,4</b>	<b>1187,2</b>
$\sigma$	133,2	30,7	90,3	20,8	26,5	7,4	3,9	11,7	34,9	49,8	116,5	151,7	335,4
<b>Mínima</b>	<b>47,0</b>	<b>93,0</b>	<b>19,0</b>	<b>3,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>8,2</b>	<b>20,1</b>	<b>60,0</b>	<b>68,0</b>	<b>492,1</b>
<b>Máxima</b>	<b>411,1</b>	<b>203,0</b>	<b>276,0</b>	<b>65,2</b>	<b>94,9</b>	<b>19,3</b>	<b>11,6</b>	<b>30,2</b>	<b>117,3</b>	<b>164,7</b>	<b>502,6</b>	<b>641,8</b>	<b>1544,5</b>

Fonte - Aeroporto de Confins, 2000.

Valores em vermelho correspondem a valores inexistentes na série inicial, os quais foram preenchidos com a média mensal do período.



**Figura 8.1 -** Precipitação mensal do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, no período de 1988 a 2001.



**Figura 8.2 -** Média pluviométrica mensal do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, no período de 1988 a 2001.

Analisando-se a Tabela 8.1, pode-se afirmar que a chuva média anual para a área de estudo corresponde a 1187,2 mm/ano, cujo desvio padrão é de 335,4 mm/ano.

Complementando, ainda, a descrição da média pluviométrica característica da região em destaque, segue-se para sua análise considerando os valores publicados pela CPRM & IBAMA (1998a).

De acordo com o estudo apresentado pela CPRM & IBAMA (1998a), a chuva média anual característica da região de Lagoa Santa em pouco se difere da média pluviométrica anual encontrada anteriormente (1187,2 mm/ano), tendo como valor médio 1286,5 mm/ano. Para o cálculo deste parâmetro, a CPRM & IBAMA (1998a) utilizaram medições obtidas junto às estações pluviométricas de Vespasiano, Lagoa Santa, Ponte Raul Soares, Prudente de Moraes e Pedro Leopoldo, cujos dados estão demonstrados na Tabela 8.2. Vale ressaltar que tais estações, apresentadas na Figura 8.3, foram escolhidas para estabelecerem um caráter regional à análise em questão.

**Tabela 8.2** - Médias pluviométricas mensais medidas em estações localizadas nas vizinhanças de Lagoa Santa.

Estação	Vespasiano (1941-1993)	Lagoa Santa (1941-1971)	Ponte Raul Soares (1973-1993)	Prudente de Moraes (1941-1978)	Pedro Leopoldo (1941-1993)
Mês	P (mm)	P (mm)	P (mm)	P (mm)	P (mm)
Janeiro	252,5	275,6	260,3	255,2	240,7
Fevereiro	155,4	169,8	149,5	185,7	163,8
Março	141,6	139,9	125,2	155,4	142,6
Abril	50,4	56,2	65,0	54,7	49,5
Maio	24,1	18,5	26,8	21,2	21,8
Junho	8,4	7,9	10,0	8,2	9,2
Julho	10,6	6,9	14,5	11,4	9,2
Agosto	10,0	5,8	9,4	5,4	8,0
Setembro	36,7	29,8	44,7	31,8	35,6
Outubro	98,7	120,6	91,8	109,1	105,4
Novembro	205,4	200,7	197,4	213,3	209,1
Dezembro	277,8	317,0	258,2	304,0	297,6
<b>Total médio anual</b>	1271,6	1348,7	1252,8	1355,4	1292,5

Fonte - CPRM & IBAMA, 1998.

A partir dos dados das estações apresentados na Tabela 8.2 e dos dados das estações vizinhas, foram traçadas, segundo CPRM & IBAMA (1998a), as isoietas relativas às normais pluviométricas anuais para o período de 1961 a 1990, comum à maioria das estações consideradas, sendo estas apresentadas na Figura 8.3. Em seguida, calculou-se a precipitação média anual para a região de estudo, chegando-se ao valor já mencionado de 1286,5 mm.

A partir dos distintos valores encontrados para a precipitação média anual característica da área de estudo, define-se como a chuva adotada no modelo hidrogeológico conceitual e computacional o valor médio das precipitações médias anuais encontradas via CPRM & IBAMA (1998a) e via Aeroporto Internacional Presidente Tancredo Neves. Optou-se por não descartar nenhum dos resultados porque cada uma das análises apresenta as suas vantagens. No caso do estudo desenvolvido pela CPRM & IBAMA (1998a), os dados utilizados passaram por uma análise de consistência, a qual possibilitou a *avaliação dos dados de determinada estação através da comparação com os respectivos dados de estações próximas, assim como a detecção e correção de erros e preenchimentos de falhas*. Já no caso do resultado obtido junto à estação climatológica do Aeroporto Internacional Presidente Tancredo Neves, os dados são mais recentes, corroborando para a avaliação da precipitação atual incidente na área em apreço. Dessa forma, estima-se como precipitação média anual para a área de estudo 1236,8 mm, ou seja, a média entre 1187,2 e 1286,5 mm/ano.

### **AUTOCAD**

**Figura 8.3 -** Totais pluviométricos anuais (mm) e localização das estações pluviométricas –  
Período: 1961-1990

**Fonte -** CPRM & IBAMA, 1998. p. 16.

## 8.2 Evaporação e evapotranspiração

### 8.2.1 Evaporação

De acordo com Tucci & Beltrame *in* Tucci (2000), em meteorologia, o termo evaporação *restringe-se à mudança da água no estado líquido para vapor devido à radiação solar e aos processos de difusão molecular e turbulenta*, sendo também influenciada pela temperatura do ar, velocidade do vento e pela pressão de vapor.

Os métodos normalmente utilizados para determinar a evaporação são, conforme Tucci & Beltrame *in* Tucci (2000):

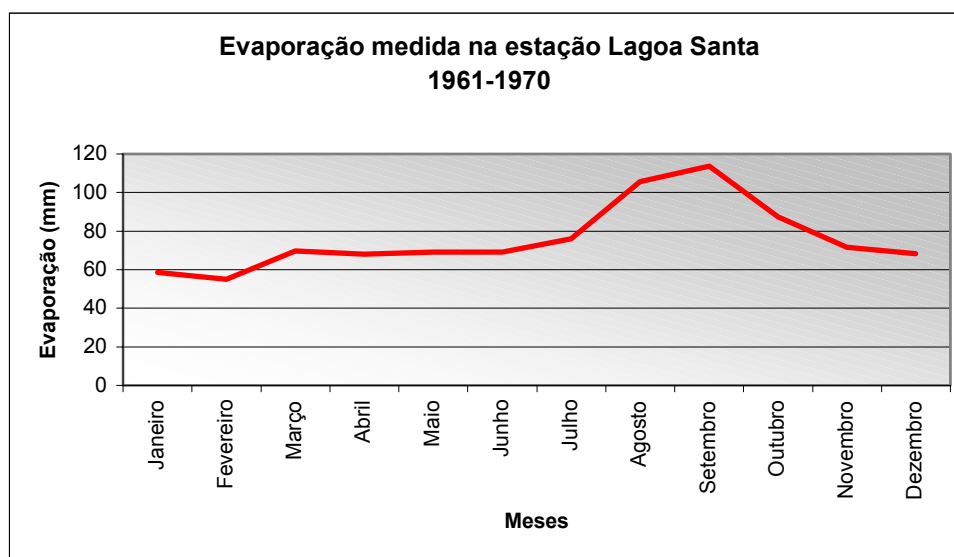
- transferência de massa;
- balanço de energia;
- equações empíricas;
- balanço hídrico; e,
- evaporímetros.

Para o cálculo da parcela de evaporação característica da região de estudo, será utilizado o método de evaporímetros, valendo-se dos valores publicados pela CPRM & IBAMA (1998a). Dessa maneira, de acordo com CPRM & IBAMA (1998a), a estação climatológica de Lagoa Santa possui dados evaporimétricos medidos no atmômetro tipo Piché para o intervalo de anos entre 1961 e 1970, sendo estes apresentados na Tabela 8.3 e na Figura 8.4. Vale salientar que atmômetro é um aparelho que mede o potencial de vaporização d'água para a atmosfera, ao integrar as condições de temperatura, umidade, radiação solar e vento na quantidade de água evaporada.

**Tabela 8.3 -** Evaporação medida através de Tubo Piché na estação de Lagoa Santa no período entre 1961 e 1970.

<b>Evaporação total mensal média - Tubo Piché (mm)</b>	
<b>1961-1970</b>	
Janeiro	58,7
Fevereiro	54,9
Março	69,6
Abril	68,1
Maió	69,0
Junho	69,0
Julho	76,1
Agosto	105,7
Setembro	113,6
Outubro	87,5
Novembro	71,6
Dezembro	68,2
<b>Total médio anual</b>	<b>912,0</b>

Fonte - CPRM & IBAMA, 1998a.



**Figura 8.4 -** Evaporação média mensal medida na estação Lagoa Santa entre 1961-1970.

Observando-se a Tabela 8.3, afirma-se que a evaporação total média anual medida na estação Lagoa Santa é 912 mm para o período entre 1961-1970. Cabe ressaltar que, conforme mencionado por CPRM & IBAMA (1998a), a evaporação medida em Piché difere consideravelmente da que ocorre em superfícies livres de água, solo descoberto ou vegetado, uma vez que o aparelho é instalado dentro do abrigo meteorológico, onde a exposição à radiação solar e aos ventos é prejudicada. Além

disso, as condições de temperatura e umidade no abrigo são também diferentes das que ocorrem em ambiente externo, dificultando, ainda mais, a caracterização real do processo de evaporação.

### 8.2.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é considerada como a perda de água por evaporação da superfície terrestre, seja ela solo ou água, associada à perda de água devido à transpiração da planta. Dessa maneira, a evapotranspiração envolve todo o volume de água que retorna à atmosfera sob a forma de vapor, seja por transpiração das plantas, seja por evaporação das superfícies líquidas ou da umidade do solo.

Para uma análise primária da evapotranspiração, é necessária a distinção entre dois conceitos fundamentais apresentados a seguir:

- **Evapotranspiração potencial (ETP):** quantidade de água transferida de uma superfície extensa, completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida por água, para a atmosfera através dos fenômenos de evaporação e transpiração. Conforme Naghettini (1999), a evapotranspiração potencial é facilmente entendida como sendo a *evapotranspiração que ocorreria caso o solo apresentasse, a todo instante, um teor de umidade suficiente para levar a planta à plena maturidade.*
- **Evapotranspiração real (ETR):** quantidade de água transferida para a atmosfera, nas condições reais de fatores atmosféricos e umidade do solo, sendo menor ou no máximo igual à evapotranspiração potencial.

Sendo um processo complexo e dinâmico que envolve sistemas com expressiva variação hídrica, como os solos, os organismos vivos e a cobertura vegetal do terreno, é muito difícil determinar o valor exato da evapotranspiração real. Informações confiáveis sobre tal parâmetro, segundo Tucci & Beltrame *in* Tucci (2000), *são escassas e de difícil obtenção*, pois demandam um longo tempo de observação e um custo oneroso. Em geral, segundo Vasconcelos (1994), quando não há medição de evapotranspiração real, sua determinação pode ser feita através da utilização de formas empíricas baseadas em fatores climáticos, tais como: temperatura média, altura de precipitação e, às vezes, insolação. Além dessa possibilidade, a evapotranspiração real

pode ser determinada a partir do equacionamento do balanço hídrico, desde que as demais variáveis sejam conhecidas.

Já a evapotranspiração potencial pode ser obtida através de modelos e relações empíricas, sendo os principais procedimentos empregados para medir ou estimar tal variável citados adiante :

- medidas diretas;
- métodos baseados na temperatura;
- métodos baseados na radiação;
- método combinado; e,
- balanço hídrico.

#### 8.2.2.1 Cálculo da evapotranspiração potencial baseado na temperatura

Segundo Tucci & Beltrame *in* Tucci (2000), entre as mais antigas expressões para estimativa da evapotranspiração potencial com base na temperatura do ar, destaca-se a equação de Thornthwaite.

De acordo com Tucci & Beltrame *in* Tucci (2000), *a equação original de Thornthwaite é baseada em dados de precipitação e escoamento, de inúmeras bacias hidrográficas localizadas nas regiões central e leste dos Estados Unidos, onde predomina um clima temperado com invernos úmidos e verões secos.*

Neste método, de acordo com Gupta (1989), a evapotranspiração potencial é considerada como função da temperatura e das horas de sol. Para um caso simplificado de 30 dias por mês e 12 horas de sol por dia, a equação tem a forma dada pela expressão (8.1):

$$ETP_m = 16,2 \times \left( 10 \frac{T_m}{I} \right)^a \quad (8.1)$$

sendo o parâmetro “a” calculado a partir da equação (8.2) :

$$a = 675 \times 10^{-9} \times I^3 - 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 179 \times 10^{-4} \times I + 492 \times 10^{-3} \quad (8.2)$$

e o índice anual de calor, I, avaliado pela equação (8.3):

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left( \frac{T_m}{5} \right)^{1,514} \quad (8.3)$$

sendo:

$ETP_m$  = média mensal da evapotranspiração potencial, em (mm/dia);

$T_m$  = temperatura média mensal do ar, em ( $^{\circ}$  C ); e,

I = índice anual de calor, excluindo temperaturas negativas, em ( $^{\circ}$  C ).

Vale salientar que a equação (8.1) é uma simplificação do fenômeno de evapotranspiração potencial, considerando 12 horas de insolação em um período de 30 dias por mês. Para determinar o valor final da evapotranspiração potencial mensal deve-se ajustar o resultado inicialmente obtido, multiplicando-o por um fator de correção. Este fator de correção, que é estabelecido em função da latitude, do número de dias no mês e da estação do ano, irá, dessa forma, representar as verdadeiras condições de exposição solar a qual a área de estudo está submetida.

Para a avaliação da  $ETP_m$  representativa da região em análise, com base no modelo de Thornthwaite (Equação 8.1), foram utilizados os dados mensais de temperatura coletados na estação meteorológica do Aeroporto Internacional Tancredo Neves (Confins), apresentados nas Tabela 8.4. Os detalhes de aplicação deste método estão apresentados no Anexo A, parte A1.

**Tabela 8.4** - Temperatura média mensal, representativa da região em estudo, para o período entre 1988 e 2001.

Temperatura média (em $^{\circ}$ C)													
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
1988	25,1	24,1	23,9	23,3	22,8	18,8	17,7	19,7	23,2	22,4	22,0	22,9	22,2
1990	25,8	24,4	24,7	23,6	20,5	19,6	19,6	20,3	21,0	23,2	24,6	23,8	22,8
1991	22,6	23,9	23,5	22,3	20,5	19,8	18,8	19,7	20,7	22,4	23,5	23,8	21,8
1992	22,9	22,9	24,0	23,6	22,2	20,1	19,4	20,8	20,6	22,1	22,4	22,4	22,0
1993	23,8	23,4	24,4	22,7	19,9	18,7	20,3	20,4	23,1	23,4	24,4	23,3	22,3
1994	23,3	24,1	22,3	22,1	21,2	19,1	18,6	19,9	22,3	23,9	23,2	23,7	21,8
1995	25,5	24,2	23,7	22,3	20,5	18,6	19,4	21,3	21,5	22,5	22,1	22,4	22,0
1996	24,5	24,2	23,9	22,1	19,3	18,6	18,6	19,0	20,5	22,9	21,6	22,3	21,5
1997	23,0	23,7	22,0	21,4	19,1	18,4	18,7	19,8	23,3	23,4	24,6	23,7	21,8
1998	23,9	25,2	24,5	23,2	20,4	18,2	18,9	21,8	23,4	22,1	22,0	23,6	22,3
1999	24,5	24,7	23,5	22,6	19,7	19,5	19,7	20,3	22,0	22,8	23,0	23,2	22,0
<b>Média</b>	<b>24,1</b>	<b>24,1</b>	<b>23,7</b>	<b>22,7</b>	<b>20,6</b>	<b>19,0</b>	<b>19,1</b>	<b>20,3</b>	<b>22,0</b>	<b>22,8</b>	<b>23,0</b>	<b>23,2</b>	
$\sigma_{\text{mensal}}$	1,1	0,6	0,8	0,7	1,1	0,6	0,7	0,8	1,2	0,6	1,1	0,6	
<b>Mínima</b>	<b>22,6</b>	<b>22,9</b>	<b>22,0</b>	<b>21,4</b>	<b>19,1</b>	<b>18,2</b>	<b>17,7</b>	<b>19,0</b>	<b>20,5</b>	<b>22,1</b>	<b>21,6</b>	<b>22,3</b>	
<b>Máxima</b>	<b>25,8</b>	<b>25,2</b>	<b>24,7</b>	<b>23,6</b>	<b>22,8</b>	<b>20,1</b>	<b>20,3</b>	<b>21,8</b>	<b>23,4</b>	<b>23,9</b>	<b>24,6</b>	<b>23,8</b>	

Fonte - Aeroporto de Confins, 2000.

Valores em vermelho correspondem a valores inexistentes na série inicial que foram preenchidos com a média mensal do período.

Assim, aplicando-se o modelo de Thornthwaite, chega-se ao valor de evapotranspiração potencial média anual representativa da área de estudo apresentado na Tabela 8.5, para o intervalo de anos entre 1988 e 1999.

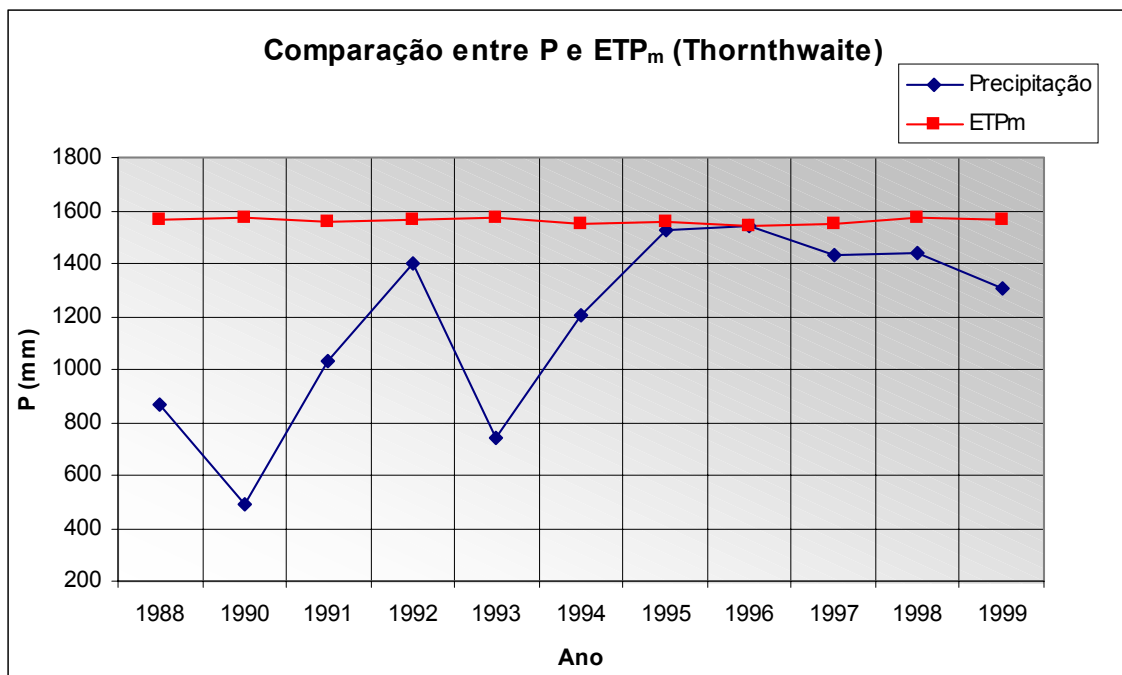
**Tabela 8.5** - Evapotranspiração potencial média anual representativa da região em estudo, segundo o modelo de Thornthwaite.

Ano	P (mm/ano)	ETP (mm/ano)
1988	867,0	1563,6
1990	492,1	1575,7
1991	1031,0	1553,7
1992	1400,1	1563,7
1993	743,2	1570,8
1994	1206,9	1552,7
1995	1527,3	1559,9
1996	1544,5	1542,4
1997	1431,4	1550,2
1998	1436,8	1568,7
1999	1305,3	1562,9
<b>Média (mm/ano)</b>		<b>1560,4</b>
$\sigma_{anual}$ (mm/ano)		<b>9,8</b>

Os valores de precipitação correspondem aos valores médios anuais obtidos na estação meteorológica do Aeroporto Internacional Presidente Tancredo Neves (Confins).

Dessa forma, como mostrado na Tabela 8.5, a evapotranspiração potencial média anual calculada segundo a metodologia de Thornthwaite, para os dados de temperatura obtidos junto ao Aeroporto Internacional Tancredo Neves, é de 1560,4 mm/ano. Este valor, assim como a média pluviométrica, não deve ser adotado de maneira absoluta, considerando, todavia, o seu desvio padrão de 9,8 mm/ano.

Comparando-se os valores das precipitações médias anuais com os valores, também anuais, da evapotranspiração potencial média segundo Thornthwaite, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 8.5.



**Figura 8.5 -** Comparação entre os valores das precipitações médias anuais com os valores anuais da evapotranspiração potencial mensal, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999.

Analisando-se o gráfico anterior, percebe-se que a evapotranspiração potencial média se iguala ou supera, em um mesmo ano, o valor da precipitação média. Este comportamento é previsível devido às características climáticas da região (Tropical Aw) marcada por altas temperaturas.

#### 8.2.2.2 Cálculo da evapotranspiração potencial baseado na radiação

A equação de Jensen e Haise, exibida pela expressão (8.4), é, segundo Tucci & Beltrame *in* Tucci (2000), um exemplo de método baseado na radiação que tem dado resultados razoáveis em diferentes condições climáticas.

$$ETP_m = (0,025 T + 0,08) \frac{G}{59} \quad (8.4)$$

sendo:

$ETP_m$  = média mensal da evapotranspiração potencial, em (mm/dia);

T = temperatura do ar (°C); e,

G = radiação incidente de onda curta ( $\text{cal. cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

Apesar da equação de Jensen e Haise ter sido inicialmente proposta para valores diários de temperatura e radiação, o cálculo da evapotranspiração potencial por

este método foi desenvolvido a partir de medidas médias mensais dessas variáveis, devido à ausência de valores diários. Acredita-se que a variabilidade dos dados empregados não compromete a metodologia de Jensen e Haise, uma vez que tais valores foram gerados a partir de dados diários, aos quais não se tem acesso. Portanto, para o cálculo da evapotranspiração potencial foram utilizados os valores médios mensais de temperatura e radiação, obtendo-se, assim, a média mensal da evapotranspiração potencial, posteriormente convertida para média anual.

Para o desenvolvimento do método de Jensen e Haise foram utilizadas as temperaturas coletadas na estação meteorológica do Aeroporto Internacional Presidente Tancredo Neves, já apresentadas na Tabela 8.4, e os valores de radiação solar coletados no 5º Distrito de Meteorologia do INMET, situado à Avenida do Contorno, nº 8.159 – Cidade Jardim, Belo Horizonte / MG, sendo estes indicados na Tabela 8.6.

Deve-se destacar que, devido à proximidade de localização, as medidas de radiação solar adquiridas em Belo Horizonte em pouco se diferem dos valores que poderiam ser obtidos na cidade de Lagoa Santa, caso houvesse medição. Dessa maneira, foram utilizados os valores de radiação solar medidos na cidade de Belo Horizonte para o desenvolvimento do cálculo da evapotranspiração potencial característica da região de Lagoa Santa segundo o método de Jensen e Haise.

**Tabela 8.6 -** Radiação solar medida no 5º Distrito de Meteorologia do INMET, situado em Belo Horizonte, no período entre 1991 e 1999.

Radiação solar (cal. cm <sup>-2</sup> )												
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1991	7220,6	8471,7	8011,5	7634,6	7404,7	6890,5	6882,2	8216,2	8311,3	9490,8	8506,6	8201,2
1992	5911,0	8006,0	8899,2	6230,7	5017,7	4660,5	5139,1	5849,2	4978,2	5473,3	5179,9	5525,1
1993	6490,0	5214,4	6419,2	4977,7	4729,6	4345,9	4836,5	4568,2	4923,7	6849,3	6433,3	4746,9
1994	5364,2	6672,4	4580,6	4653,3	4007,6	3793,1	5141,2	5111,4	5638,9	5321,4	4683,2	4975,0
1995	5659,5	4237,9	4414,0	3667,6	3437,2	3550,1	3982,4	5853,7	7102,5	6665,7	5996,4	5593,4
1996	7603,2	6510,8	6519,6	6169,2	5888,1	5225,6	5814,9	6160,8	5974,2	6640,6	5412,1	5942,1
1997	5470,3	6650,6	5368,3	5317,1	5294,9	4126,5	5360,7	6499,3	6378,1	7297,6	6430,3	6552,6
1998	6756,0	5940,4	6761,3	5983,5	5070,9	4628,6	5659,2	5531,2	6567,6	5586,9	5329,3	6563,9
1999	6309,4	6463,0	6371,7	5579,2	5106,3	4652,6	5352,0	5973,8	6234,3	6665,7	5996,4	6012,5
<b>Média</b>	6309,4	6463,0	6371,7	5579,2	5106,3	4652,6	5352,0	5973,8	6234,3	6665,7	5996,4	6012,5
<b>Mínima</b>	5364,2	4237,9	4414,0	3667,6	3437,2	3550,1	3982,4	4568,2	4923,7	5321,4	4683,2	4746,9
<b>Máxima</b>	7603,2	8471,7	8899,2	7634,6	7404,7	6890,5	6882,2	8216,2	8311,3	9490,8	8506,6	8201,2

Fonte - INMET, 2002.

Valores em vermelho correspondem a valores inexistentes na série inicial que foram preenchidos com a média mensal do período.

Dessa forma, determinando-se a evapotranspiração potencial média anual da área de estudo, no período entre 1991 e 1999, através da equação de Jensen e Haise,

chega-se aos resultados apresentados na Tabela 8.7. Os detalhes da aplicação deste método estão apresentados no Anexo A, parte A2.

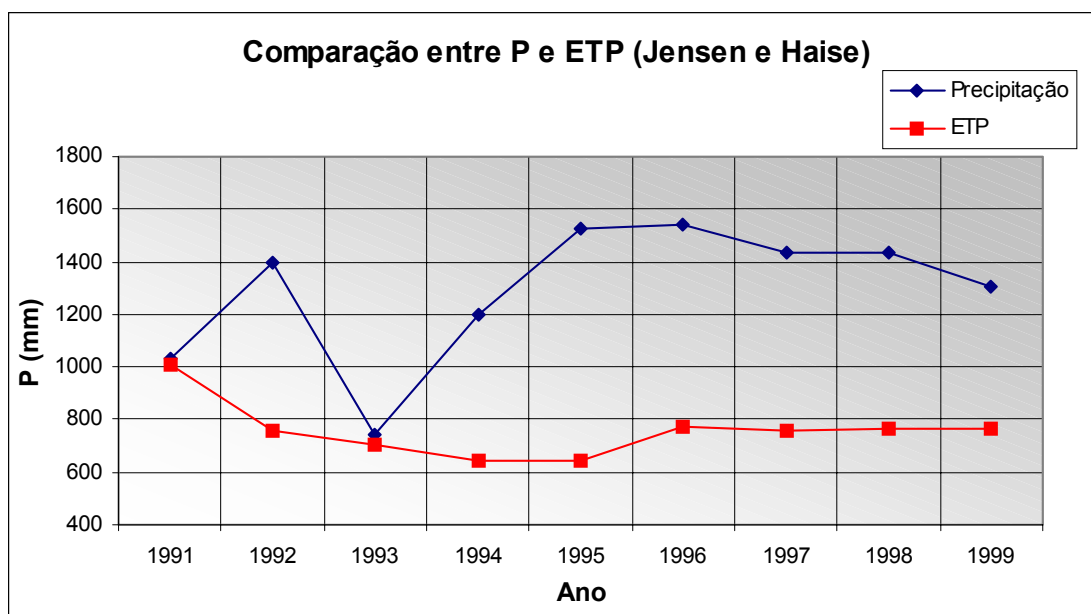
**Tabela 8.7** - Evapotranspiração potencial média anual, representativa da região em estudo, segundo a metodologia de Jensen e Haise.

Ano	P (mm/ano)	ETP (mm/ano)
1988	867,0	-
1990	492,1	-
1991	1031,0	1011,9
1992	1400,1	761,0
1993	743,2	703,8
1994	1200,0	642,5
1995	1527,3	646,1
1996	1544,5	776,4
1997	1431,4	754,5
1998	1436,8	765,0
1999	1305,3	762,9
<b>Média (mm/ano)</b>		<b>758,2</b>
<b><math>\sigma_{anual}</math> (mm/ano)</b>		<b>108,2</b>

Os valores de precipitação correspondem aos valores médios anuais obtidos na estação metereológica do Aeroporto Internacinal Presidente Tancredo Neves (Confins).

Dessa forma, como mostrado na Tabela 8.7, a evapotranspiração potencial média anual, característica da região em apreço, calculada segundo Jensen e Haise, é de 758,2 mm/ano, cujo desvio padrão é de 108,2 mm/ano.

Comparando-se os valores das precipitações médias anuais com os valores, também anuais, da evapotranspiração potencial média segundo Jensen e Haise, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 8.6.



**Figura 8.6 -** Comparação entre os valores das precipitações anuais com os valores anuais da evapotranspiração potencial, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999.

Apesar de Tucci & Beltrame *in* Tucci (2000) ter afirmado que métodos desenvolvidos com base na variável radiação são confiáveis, no presente estudo percebe-se que os resultados médios de evapotranspiração potencial anual obtidos segundo a metodologia de Jensen e Haise não são satisfatórios. Os resultados calculados através desta equação empírica se mostraram relativamente baixos quando comparados com a precipitação média anual, não sendo, portanto, condizentes com o clima tropical Aw.

### 8.2.2.3 Cálculo da evapotranspiração potencial baseado no método combinado

Conforme salientado por Tucci & Beltrame *in* Tucci (2000), o método combinado ou equação de Penman, além de permitir o cálculo da evaporação de superfícies livres de água, também é utilizado correntemente para a avaliação da evapotranspiração potencial.

A estimativa da evapotranspiração potencial segundo o método em questão é feita a partir da Equação (8.5), sendo necessários alguns esclarecimentos a respeito dos parâmetros que a compõem.

$$ETP_m = \left( \frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{q_{ef}}{L} + E_i \right) \div \left( \frac{\Delta}{\gamma} + 1 \right) \quad (8.5)$$

sendo:

$ETP_m$  = média mensal da evapotranspiração potencial, em (mm/dia).

Inicialmente define-se a Equação (8.6) a seguir:

$$\frac{\Delta}{\gamma} = \frac{38.640 \times 10^{7,5 T / (237,3 + T)}}{(237,3 + T)^2} \quad (8.6)$$

em que:

$\Delta$  = variável auxiliar referente à razão  $\Delta e_a / \Delta T$ ;

$\gamma$  = parâmetro de Bowen, constante psicométrica, tendo como valor 0,66 mbares ° C ou 0,485 mm Hg / °C; e,

T = temperatura do ar, expressa em °C.

Segue-se agora para a introdução da Equação (8.7) subsequente:

$$q_{ef} / L = [G(1 - a) - \sigma T^4 \times (0,56 - 0,09 e_a^{1/2}) \times (0,1 + 0,9 p)] \div L \quad (8.7)$$

em que:

$q_{ef}$  = termo referente à radiação efetiva na superfície de interesse, expressa em (mm/dia);

L = calor latente de vaporização por unidade de massa, em cal/(cm<sup>2</sup>.mm), sendo equivalente a 59 cal/(cm<sup>2</sup>.mm);

G = radiação incidente de onda curta, em (cal/cm<sup>2</sup>.dia), podendo ser obtida por registros locais ou estimado com base na Equação (8.8):

$$G \text{ (cal/cm}^2\text{.dia)} = Rt (0,24 + 0,58 p) \quad (8.8)$$

na qual:

Rt = radiação solar recebida no topo da atmosfera no 15º dia de cada mês, em função da latitude e do mês em questão, sendo expressa em (cal/cm<sup>2</sup> .dia); e,

p = proporção entre o efetivo número de horas de brilho solar e o máximo possível, tendo, portanto, valor adimensional.

Complementando, ainda, a descrição dos parâmetros componentes da Equação (8.7), registra-se:

a = parcela referente ao albedo, cujo valor é adimensional;

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman, em cal/cm<sup>2</sup>.dia, equivalente a  $1,19 \times 10^{-7}$  cal/cm<sup>2</sup>.dia;

T = temperatura, expressa em (°K); e,

$e_a$  = tensão parcial de vapor de água, em (mm/Hg), sendo que é estimada a partir da Equação (8.9):

$$e_a = \frac{U e_s}{100} \quad (8.9)$$

em que:

U = umidade relativa do ar, expressa em %;

$e_s$  = tensão de vapor saturado, dada em mm/Hg e determinada mediante a Equação (8.10):

$$e_s = 4,58 \times 10^{7,5T/237,3+T} \quad (8.10)$$

na qual:

T = temperatura do ar, em °C.

Finalmente, introduz-se o termo  $E_i$ , expresso pela Equação (8.11)

$$E_i = 0,35 \times \left(1 + \frac{w_2}{160}\right) \times (e_s - e_a) \quad (8.11)$$

sendo:

$E_i$  = termo aerodinâmico;

$w_2$  = velocidade do vento a 2 m de altura, expressa em km/dia ou m/s, sendo calculada a partir da Equação (8.12):

$$w_2 = w_h \times \frac{\log(200/2)}{\log(100 h)} \quad (8.12)$$

na qual:

$w_h$  = velocidade do vento medida a uma altura h, em km/dia ou m/s; e,

h = altura onde foi medida a velocidade do vento, em km ou m.

Apesar da equação de Penman ter sido, inicialmente, proposta para valores diários de temperatura, umidade relativa, velocidade dos ventos e radiação, o cálculo da evapotranspiração potencial por este método foi desenvolvido a partir de medidas mensais dessas variáveis, devido à ausência de valores diários. Acredita-se que a

variabilidade dos dados empregados não compromete a metodologia de Penman, uma vez que tais valores foram gerados a partir de dados diários, aos quais não se tem acesso. Portanto, para o cálculo da evapotranspiração potencial foram utilizados os valores médios mensais de temperatura, umidade relativa, radiação e velocidade dos ventos, obtendo-se, assim, a média mensal da evapotranspiração potencial, posteriormente convertida para média anual.

Dessa maneira, para o desenvolvimento da equação de Penman foram utilizados os dados apresentados nas tabelas subseqüentes, assim como os dados de temperatura média já apresentados na Tabela 8.4.

**Tabela 8.8** - Umidade relativa medida no 5º Distrito de Meteorologia do INMET, situado em Belo Horizonte, no período entre 1990 e 2002.

Umidade relativa média (em %)												
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1990	68	75	74	74	74	75	62	67	62	63	63	67
1991	81	74	75	70	68	67	61	55	61	63	70	74
1992	84	69	65	68	66	63	62	62	72	73	74	77
1993	69	74	65	73	68	57	57	59	54	60	63	75
1994	78	58	78	52	70	66	61	53	51	58	67	71
1995	63	56	67	70	70	63	62	51	56	66	68	77
1996	66	67	69	65	69	62	62	64	67	75	84	85
1997	84	72	74	69	69	71	62	54	47	64	66	72
1998	71	72	71	71	69	69	65	64	58	68	72	70
1999	65	64	71	66	59	60	61	50	53	62	70	72
2000	73	69	72	68	61	57	61	55	66	54	73	70
2001	67	58	64	59	61	62	58	56	61	63	73	73
2002	71	77	67	62	63	61	63	52	62	-	-	-

Fonte - INMET, 2002.

**Tabela 8.9** - Insolação total, medida no 5º Distrito de Meteorologia do INMET, situado em Belo Horizonte, no período entre 1990 e 2002.

Insolação total (em horas)												
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1990	286,2	195,0	238,4	228,7	232,6	232,0	230,2	176,3	240,7	216,4	234,9	203,0
1991	107,9	183,6	163,5	209,5	224,9	255,6	228,4	238,1	177,7	203,1	176,4	148,2
1992	87,2	162,8	202,8	171,6	239,7	230,0	238,1	219,1	149,1	154,3	142,6	155,6
1993	203,5	157,3	231,8	197,9	202,2	211,9	237,3	85,1	170,0	238,5	230,1	146,8
1994	152,1	278,3	137,1	220,4	223,6	229,0	237,3	228,1	218,4	197,0	156,1	164,4
1995	240,5	175,8	214,0	218,3	193,3	232,0	238,9	268,1	214,5	211,3	195,3	157,2
1996	251,8	209,0	220,6	228,7	216,4	232,4	258,5	233,6	196,7	196,9	135,9	147,4
1997	173,4	233,6	165,0	207,7	207,1	219,0	245,8	277,9	229,2	235,6	179,7	190,2
1998	196,7	185,7	213,9	217,5	205,2	200,9	246,8	227,6	221,6	163,0	160,0	199,2
1999	223,0	209,6	187,8	224,7	244,6	218,7	226,5	260,5	211,5	157,1	158,7	168,6
2000	185,7	180,4	186,8	240,6	252,3	245,8	222,2	244,6	170,9	258,6	129,9	195,7
2001	213,1	224,9	222,7	249,3	201,5	235,0	239,1	242,5	197,6	205,3	166,1	148,6
2002	168,7	118,2	247,0	245,7	241,3	234,1	235,9	264,2	202,4	-	-	-
<b>Média</b>	191,5	193,4	202,4	220,0	221,9	229,0	237,3	228,1	200,0	203,1	172,1	168,7

Fonte - INMET, 2002.

Valores em vermelho correspondem a valores inexistentes na série inicial, os quais foram preenchidos com a média mensal do período.

**Tabela 8.10** - Velocidade dos ventos, medida no 5º Distrito de Meteorologia do INMET, situado em Belo Horizonte, no período entre 1960 e 1970.

Velocidade média dos ventos (em m/s)												
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1960	1,4	2,1	1,5	2,0	1,3	2,8	2,2	2,9	3,0	3,2	2,7	1,9
1961	1,3	1,4	2,3	2,2	1,7	2,6	2,2	2,3	2,2	3,4	1,8	1,9
1962	0,8	1,1	1,1	1,3	1,7	2,6	2,8	2,4	3,1	2,5	1,6	1,6
1963	2,3	1,8	2,4	2,1	2,3	1,3	2,0	1,8	2,7	2,3	2,1	2,4
1964	2,2	1,9	2,7	2,4	2,2	1,7	2,7	3,5	4,5	2,4	2,3	2,2
1965	2,3	1,3	1,7	2,4	1,8	2,6	2,0	2,3	3,1	1,5	1,3	0,8
1966	1,0	1,6	1,0	1,3	1,8	1,4	2,0	2,1	2,2	1,3	1,6	1,3
1967	1,2	1,5	1,4	0,9	0,9	1,0	1,0	1,2	1,4	1,4	1,0	1,0
1968	1,2	1,1	1,5	1,6	1,2	1,4	2,0	1,6	1,8	1,7	1,5	1,1
1969	1,0	1,1	1,0	1,3	1,2	1,4	1,2	1,4	1,6	1,6	1,3	1,4
1970	1,1	1,2	1,2	1,0	1,0	1,3	1,5	1,8	1,7	1,1	1,1	1,1

Fonte - INMET, 2002.

Analisando-se os dados apresentados nas Tabelas 8.8, 8.9 e 8.10, observa-se que as medidas dos respectivos parâmetros foram determinadas no 5º Distrito de Meteorologia do INMET, situado em Belo Horizonte. Este procedimento foi adotado em virtude da carência de dados climatológicos na cidade de Lagoa Santa e de sua proximidade em relação à metrópole de Belo Horizonte. Dessa forma, os dados referentes à umidade relativa do ar, radiação e velocidade dos ventos medidos na capital mineira foram conferidos ao município de Lagoa Santa, admitindo-se que os mesmos não variariam significativamente caso pudessem ser obtidos diretamente naquela cidade.

É importante ressaltar igualmente que os dados de velocidade de vento utilizados para o cálculo da evapotranspiração potencial característica da região de estudo referem-se ao período de 1960 a 1970. Tal época foi adotada devido ao diferente grau de urbanização que distingue os municípios de Belo Horizonte e Lagoa Santa. Assim sendo, assume-se que a velocidade dos ventos medida nas décadas de 60 e 70 na região metropolitana de Belo Horizonte se assemelharia aos valores que seriam obtidos atualmente na cidade de Lagoa Santa. Destaca-se, também, que esta medição foi realizada a uma altura de 10 m.

De posse de todos os dados necessários para determinar a evapotranspiração potencial da área em consideração através do método combinado, calculou-se tal incógnita para os anos entre 1990 a 1999, visto que este intervalo é comum a todos os parâmetros envolvidos nesta metodologia. Os resultados da aplicação deste método estão apresentados na Tabela 8.11, sendo seus detalhes apresentados no Anexo A, parte A3.

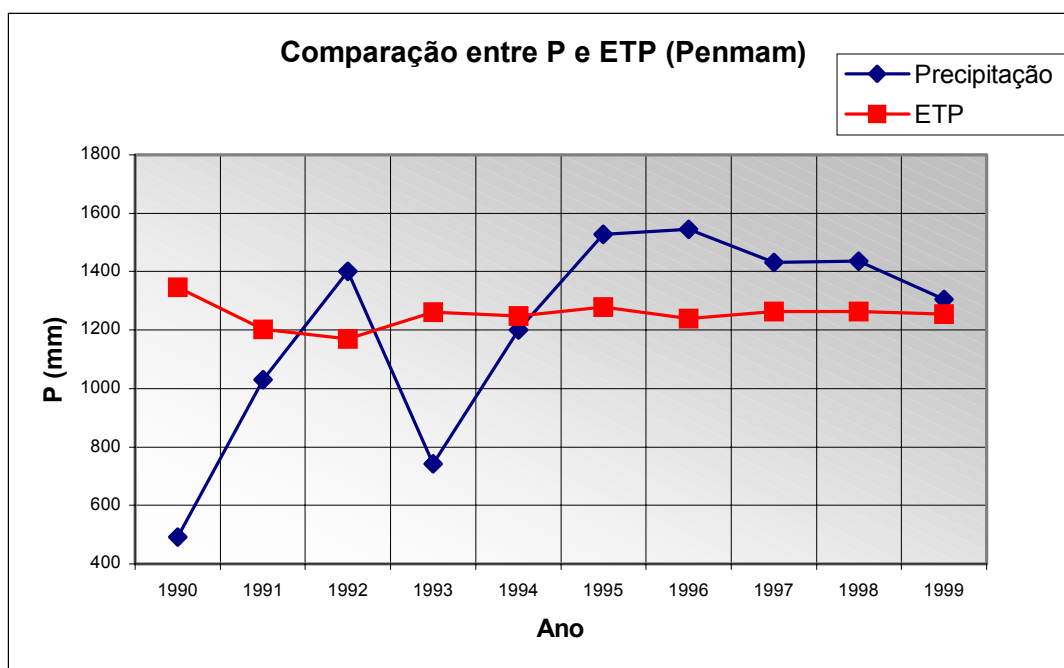
**Tabela 8.11** - Evapotranspiração potencial média anual, representativa para a área de estudo, no período entre 1990 e 1999, segundo o método combinado.

<b>Ano</b>	<b>P (mm/ano)</b>	<b>ETP (mm/ano)</b>
1990	492,1	1346,8
1991	1031,0	1203,4
1992	1400,1	1170,5
1993	743,2	1260,6
1994	1200,0	1248,4
1995	1527,3	1278,8
1996	1544,5	1239,8
1997	1431,4	1263,5
1998	1436,8	1264,5
1999	1305,3	1266,3
<b>Média (mm/ano)</b>		<b>1254,3</b>
$\sigma_{anual}$ (mm/ano)		<b>46,4</b>

Os valores de precipitação correspondem aos valores médios anuais obtidos na estação metereológica do Aeroporto Internacinal Presidente Tancredo Neves (Confins).

Dessa forma, como mostrada na tabela anterior, a evapotranspiração potencial média anual calculada segundo a metodologia do método combinado é 1254,3 mm/ano, cujo desvio padrão é de 46,4 mm/ano.

Comparando-se os valores das precipitações médias anuais com os valores, também anuais, da evapotranspiração potencial média segundo Penman, obtém-se o seguinte gráfico apresentado na Figura 8.7.



**Figura 8.7 -** Comparação entre os valores das precipitações anuais e os valores anuais da evapotranspiração potencial, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999.

Analisando-se o gráfico anterior, percebe-se que, apesar das incertezas envolvidas no desenvolvimento do método de Penman (*e. g.*: albedo), os resultados obtidos para a evapotranspiração potencial expressam com coerência as características climáticas da região (Tropical Aw), uma vez que seus valores são significativamente elevados. Vale salientar que vários são os fatores que influenciam no valor do albedo, dentre os quais: tipos de solo, tipos de cobertura (*e. g.* vegetação, neve, água, gelo), grau de urbanização e posição dos raios solares.

#### 8.2.2.4 Análise dos resultados da evapotranspiração potencial

Examinando-se as condições climáticas da região em estudo, afirma-se que a região é úmida, com temperaturas elevadas. Dessa maneira, espera-se que os valores da evapotranspiração potencial sejam também elevados. Portanto, observando-se os gráficos de comparação entre os valores médios anuais de precipitação e os valores médios de evapotranspiração potencial anuais adquiridos através das três metodologias aqui expostas, percebe-se que os resultados obtidos através do método de Jensen e Haise não estão satisfatórios, uma vez que a evapotranspiração potencial apresenta valores baixos. Apesar de apresentar altos valores de evapotranspiração, os resultados

da evapotranspiração potencial obtido mediante a equação de Thornthwaite devem ser descartados, uma vez que se trata de um método simples, não podendo aqui ser ajustado à real área de estudo. Para que fossem alcançados resultados satisfatórios o modelo de Thornthwaite deveria ser calibrado localmente. Dessa maneira, por envolver um maior número de variáveis, por ser um modelo mais robusto e apresentar valores elevados de evapotranspiração, assume-se neste estudo os resultados de evapotranspiração potencial obtidos através da metodologia de Penman, confirmando a sua recomendação pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

### 8.2.3 Evapotranspiração Real

#### 8.2.3.1 Fórmula de L. Turc

Segundo Vasconcelos (1994), a evapotranspiração real anual média pode ser determinada através da metodologia de L. Turc, mediante a Equação (8.13).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (8.13)$$

sendo:

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

P = altura média anual de precipitação, expressa em mm; e,

L = dado pela Equação (8.14).

$$L = 300 + 25t + 0,05 t^3 \quad (8.14)$$

em que:

t = temperatura média anual, dada em °C.

É conveniente utilizar, de acordo com Vasconcelos (1994), a média ponderada da temperatura para o cálculo do modelo de L. Turc. Para tanto, utiliza-se a Equação (8.15):

$$t = \frac{\sum P_i t_i}{\sum P_i} \quad (8.15)$$

sendo:

P<sub>i</sub> = precipitação média para cada mês do ano, em (mm); e,

t<sub>i</sub> = temperatura média para cada mês do ano, em °C.

Sendo assim, aplicando-se a equação de L. Turc a partir dos dados de precipitação e temperatura já apresentados, respectivamente nas Tabelas 8.1 e 8.4, estimou-se o valor da evapotranspiração real média anual, como apontado na Tabela 8.12.

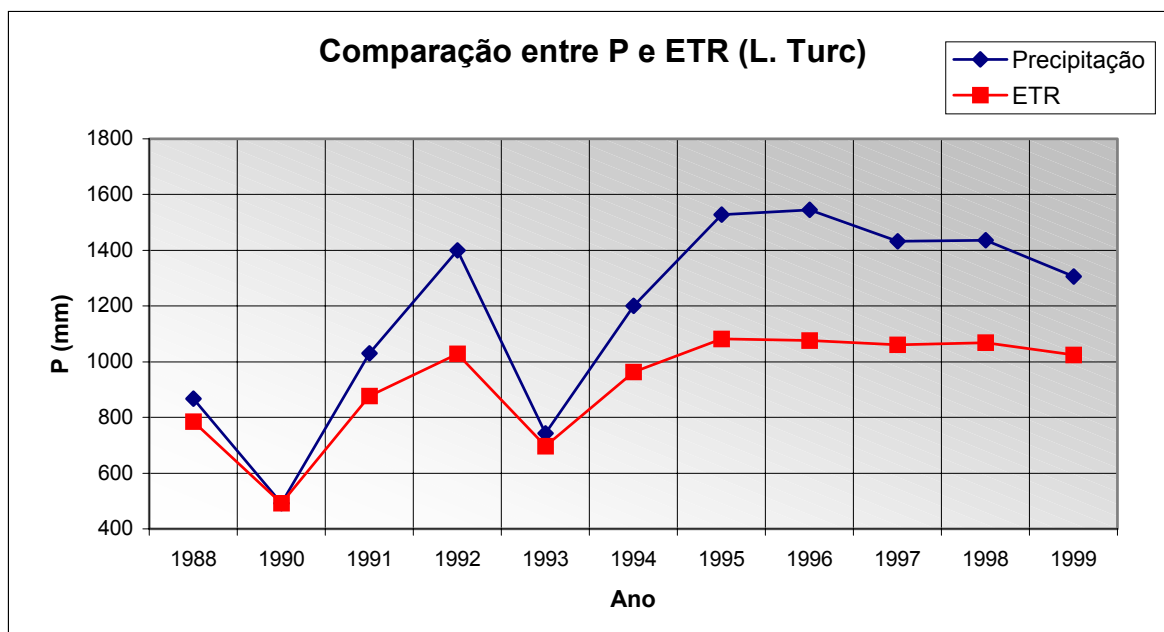
**Tabela 8.12** - Evapotranspiração real média anual, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999, segundo a equação de L. Turc, citada por Vasconcelos (1994).

Ano	T média anual (°C)	P (mm/ano)	L	ETR (mm/ano)
1988	22,2	867,0	1402,1	765,6
1990	22,8	492,1	1462,6	488,9
1991	21,8	1031,0	1363,0	849,7
1992	22,0	1400,1	1382,4	1008,9
1993	22,3	743,2	1412,0	685,0
1994	21,8	1200,0	1363,0	927,2
1995	22,0	1527,3	1382,4	1048,8
1996	21,5	1544,5	1334,4	1032,0
1997	21,8	1431,4	1363,0	1011,4
1998	22,3	1436,8	1412,0	1032,8
1999	22,0	1305,3	1382,4	975,2
<b>Média (mm/ano)</b>				<b>893,2</b>
<b><math>\sigma_{anual}</math> (mm/ano)</b>				<b>179,8</b>

Os valores de precipitação correspondem aos valores médios anuais obtidos na estação meteorológica do Aeroporto Internacional Presidente Tancredo Neves (Confins).

Como visto na tabela anterior, a evapotranspiração real média anual típica da área de estudo, calculada segundo a equação de L. Turc, é 893,2 mm/ano, sendo o seu desvio padrão de 179,8 mm/ano.

Comparando-se os valores das precipitações médias anuais com os valores, também anuais, da evapotranspiração real média segundo L. Turc obtém-se o gráfico apresentado na Figura 8.8.



**Figura 8.8 -** Comparação entre os valores das precipitações médias anuais com os valores anuais da evapotranspiração real média, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999.

Por se tratar de uma fórmula empírica, o equacionamento da evapotranspiração real segundo a expressão de L. Turc apresenta algumas divergências, sendo apresentada por Custodio & Llamas (1976) da seguinte maneira:

$$ETR = \frac{P}{0,9 + \frac{P^2}{L^2}} \quad (8.16)$$

sendo:

ETR = evapotranspiração real média anual, expressa em mm/ano;

P = altura média anual da precipitação, dada em mm/ano; e,

L = dado pela Equação (8.17).

$$L = 300 + 25t + 0,05 t^2 \quad (8.17)$$

em que:

t = temperatura média anual, medida em °C.

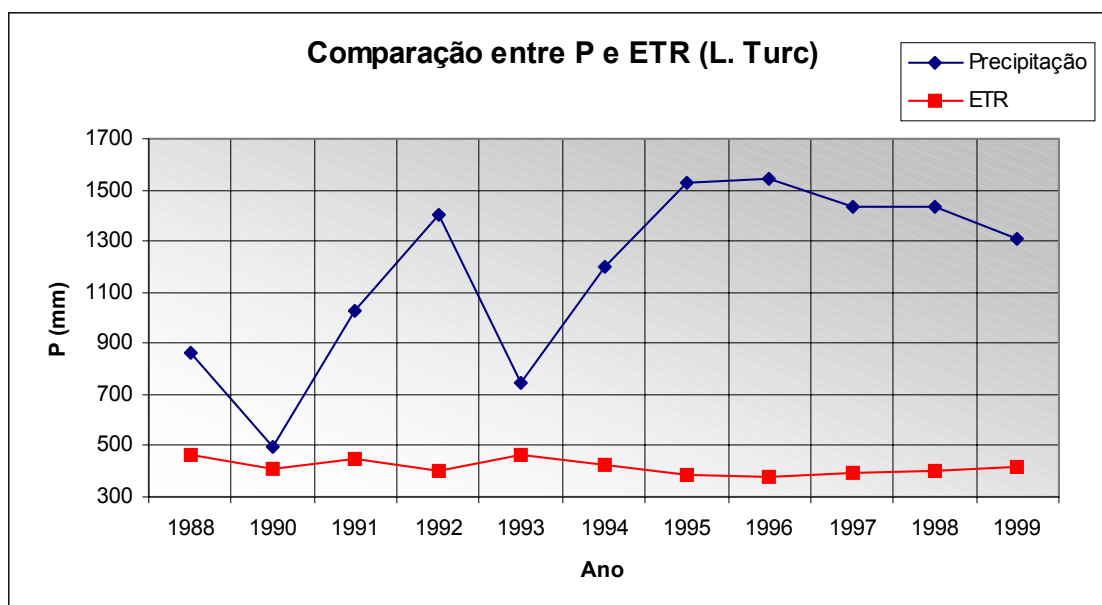
Sendo assim, aplicando-se a equação de L. Turc, segundo Custodio & Llamas (1976), a partir dos dados de precipitação e temperatura, apresentados, respectivamente, nas Tabelas 8.1 e 8.4, estima-se o valor da evapotranspiração real média anual, como demonstrado na Tabela 8.13.

**Tabela 8.13** - Evapotranspiração real média anual, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999, segundo a equação de L. Turc, citada por Custodio & Llamas (1976).

Ano	T média anual (°C)	P (mm/ano)	L	ETR (mm/ano)
1988	22,2	867,0	879,6	463,3
1990	22,8	492,1	896,0	409,5
1991	21,8	1031,0	868,8	446,6
1992	22,0	1400,1	874,2	404,1
1993	22,3	743,2	882,4	461,8
1994	21,8	1200,0	868,8	427,4
1995	22,0	1527,3	874,2	386,4
1996	21,5	1544,5	860,6	374,8
1997	21,8	1431,4	868,8	396,0
1998	22,3	1436,8	882,4	404,6
1999	22,0	1305,3	874,2	417,1
<b>Média (mm/ano)</b>				<b>417,4</b>
$\sigma_{anual}$ (mm/ano)				<b>29,4</b>

Como visto na Tabela 8.13, a evapotranspiração real média anual, para a região em análise, calculada segundo a equação de L. Turc, mediante considerações de Custodio & Llamas (1976), é 417,4 mm/ano, com um desvio padrão de 29,4 mm/ano.

Comparando-se os valores das precipitações médias anuais com os valores, também anuais, da evapotranspiração real média segundo a equação de L. Turc, citado por Custodio & Llamas (1976), obtém-se a Figura 8.9.



**Figura 8.9 -** Comparação entre os valores das precipitações médias anuais com os valores anuais da evapotranspiração real média, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999.

Analisando-se os resultados obtidos com as duas expressões de L. Turc registradas na literatura, afirma-se que não é possível determinar com precisão o valor da evapotranspiração real média. O comportamento dos dados resultantes da aplicação das duas metodologias de L. Turc aqui referidas apresenta-se bastante divergente, como visto nas Figuras 8.8 e 8.9. Certifica-se, entretanto, que para o conjunto de dados fornecidos, a evapotranspiração real média anual da área de estudo oscila entre aproximadamente 400 e 1000 mm/ano, devendo este intervalo ser ainda questionado no momento do equacionamento do balanço hídrico.

### 8.2.3.2 Fórmula de Coutagne

Segundo Vasconcelos (1994) e Custodio & Llamas (1976), a fórmula de Coutagne desenvolvida para o cálculo da evapotranspiração real média anual é:

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (8.18)$$

sendo:

ETR = evapotranspiração real média anual, expressa em (m/ano);

P = precipitação média anual, dada em (m/ano); e,

$\lambda$  = dado pela Equação 8.19:

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T} \quad (8.19)$$

em que:

T = a temperatura anual média, em °C.

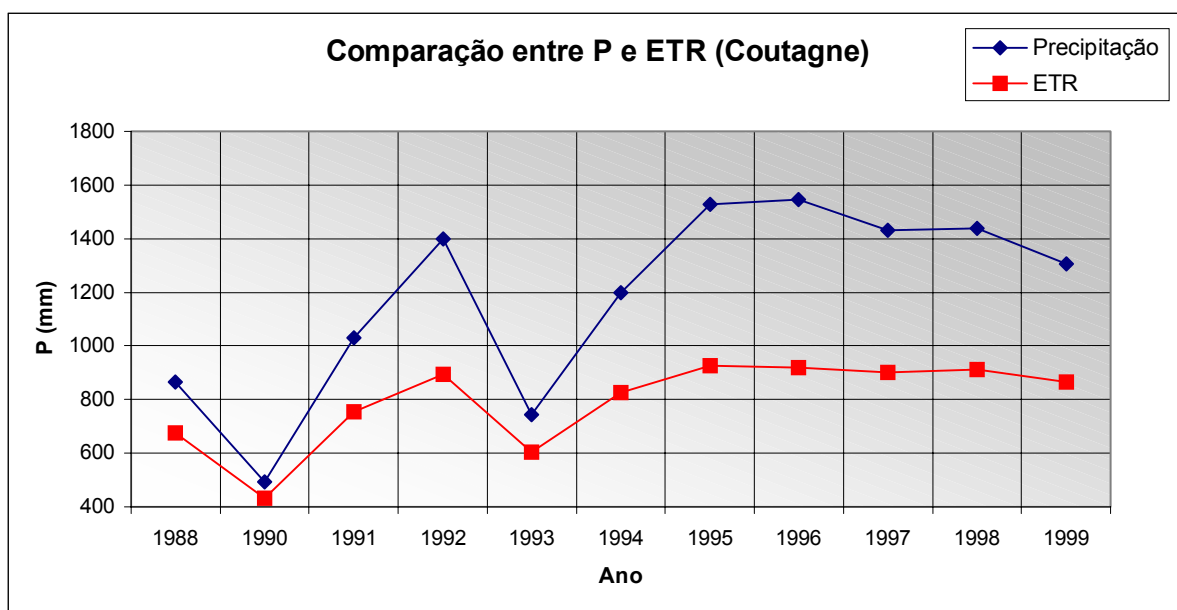
Esta fórmula é aplicável, segundo Vasconcelos (1994), para a precipitação P, em metros, compreendida entre  $\frac{1}{8}\lambda$  e  $\frac{1}{\lambda}$ , ou seja, entre 0,0313 e 3,922 m de precipitação.

Após verificar a aplicabilidade desta equação, desenvolveu-se a fórmula de Coutagne a partir dos dados de precipitação e temperatura apresentados, respectivamente nas Tabelas 8.1 e 8.4. Dessa forma, o valor da evapotranspiração real média anual foi estimado em 791,4 mm/ano, com um desvio padrão de 160,6 mm/ano, como mostrado na Tabela 8.14.

**Tabela 8.14** - Evapotranspiração real média anual, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999, segundo a equação de Coutagne.

Ano	T média anual (°C)	P (mm/ano)	P (m/ano)	$\lambda$	$1/8 \lambda$	$1/\lambda$	ETR (m/ano)	ETR (mm/ano)
1988	22,2	867,0	0,867	0,256	0,0320	3,908	0,675	674,7
1990	22,8	492,1	0,492	0,251	0,0313	3,992	0,431	431,4
1991	21,8	1031,0	1,031	0,260	0,0325	3,852	0,755	755,0
1992	22,0	1400,1	1,400	0,258	0,0322	3,880	0,895	894,9
1993	22,3	743,2	0,743	0,255	0,0319	3,922	0,602	602,4
1994	21,8	1200,0	1,200	0,260	0,0325	3,852	0,826	826,2
1995	22,0	1527,3	1,527	0,258	0,0322	3,880	0,926	926,1
1996	21,5	1544,5	1,545	0,262	0,0328	3,810	0,918	918,4
1997	21,8	1431,4	1,431	0,260	0,0325	3,852	0,899	899,5
1998	22,3	1436,8	1,437	0,255	0,0319	3,922	0,910	910,4
1999	22,0	1305,3	1,305	0,258	0,0322	3,880	0,866	866,2
							<b>Média (mm/ano)</b>	<b>791,4</b>
							<b><math>\sigma</math> anual (mm/ano)</b>	<b>160,6</b>

Comparando-se os valores das precipitações médias anuais com os valores, também anuais, da evapotranspiração real média segundo Coutagne, obtém-se gráfico mostrado na Figura 8.10.



**Figura 8.10** - Comparação entre os valores das precipitações médias anuais com os valores anuais da evapotranspiração real média, representativa para a área de estudo, no período entre 1988 e 1999, segundo a equação de Coutagne.

### 8.2.3.3 Análise dos resultados da evapotranspiração real

Os dois métodos descritos anteriormente para o cálculo da evapotranspiração real anual média, quais sejam, a fórmula de L. Turc e a fórmula de Coutagne, utilizam os mesmos dados meteorológicos (precipitação e temperatura). Julga-se bizarra a dispersão dos resultados, evidenciando a fragilidade desses procedimentos. Esta fragilidade torna-se mais nítida quando há distintos registros na literatura para uma mesma metodologia, como visto no desenvolvimento do modelo de L. Turc.

A dispersão dos resultados obtidos com as equações de L. Turc e Coutagne pode ainda ser explicada, conforme Vasconcelos (1994), *pela diversidade de fatores intervenientes no processo de evapotranspiração e pela dificuldade de quantificar o nível de influência de cada um destes fatores*. Além disso, deve-se observar que estas fórmulas foram propostas para climas não tropicais, onde as variações de temperatura são bem mais significativas que no caso de Lagoa Santa.

Em virtude dos diferentes resultados obtidos para a evapotranspiração real média anual da área de estudo, deve-se comparar tais resultados com aquele que posteriormente será calculado através do equacionamento do balanço hídrico. Vale

ressaltar que o intervalo de abrangência da evapotranspiração real média anual adotado neste trabalho se encontra dentro dos limites de 400 e 1000 mm/ano, definido a partir do desenvolvimento das equações de L. Turc e Coutagne.

### **8.3 Escoamento superficial e subterrâneo**

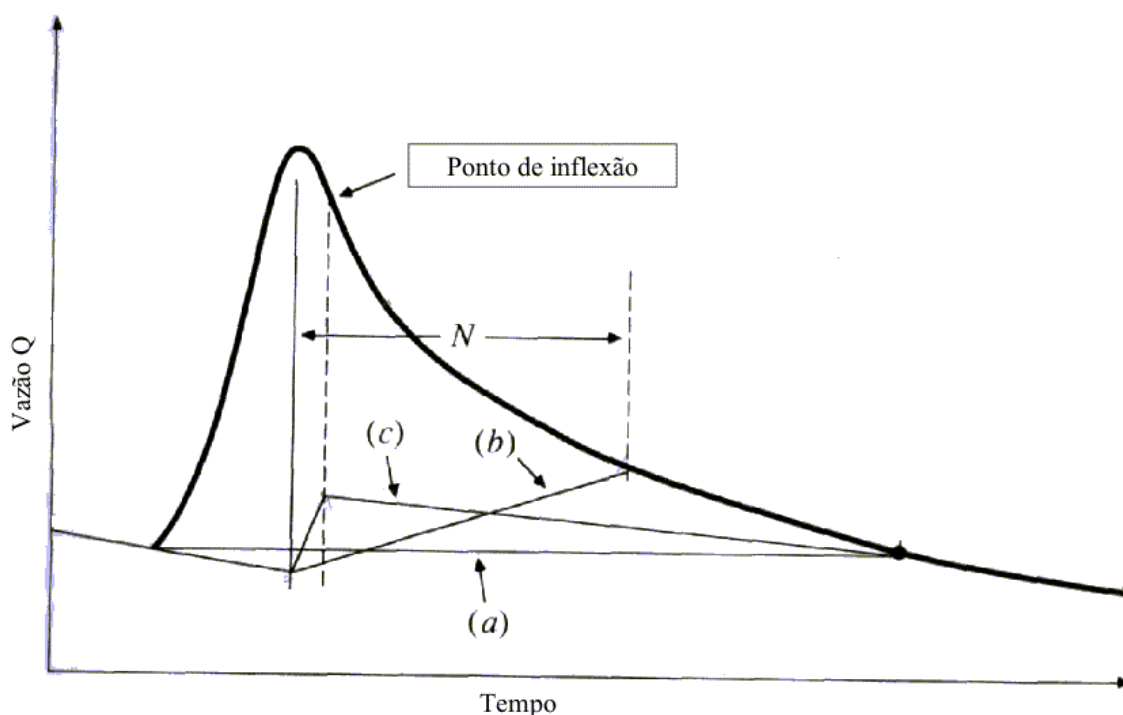
Segundo Tucci *in* Tucci (2000), os escoamentos são definidos em:

- superficial, que representa o fluxo sobre a superfície do solo e pelos seus múltiplos canais;
- subsuperficial, que alguns autores definem como fluxo que se dá junto às raízes da cobertura vegetal; e,
- subterrâneo, que é o fluxo devido à contribuição do aquífero.

Em geral, conforme Tucci *in* Tucci (2000), *os escoamentos superficial e subterrâneo correspondem à maior parte do total, ficando o escoamento subsuperficial contabilizado no superficial ou no subterrâneo*. Para que os mesmos sejam analisados individualmente é necessário separar no hidrograma a parcela que corresponde a cada tipo de fluxo.

Antes de separar os tipos de escoamento presentes nos hidrogramas típicos da área de estudo, vale abordar alguns aspectos a respeito desta metodologia.

De acordo com Chow (1988), existem vários métodos utilizados para separar os escoamentos superficial e subterrâneo em um hidrograma. O mais antigo deles é chamado de curva de depleção normal, tendo sido descrito por Horton em 1933. Os outros três métodos tradicionalmente existentes são caracterizados por fazerem a distinção entre os escoamentos de maneira gráfica. De acordo com Chow (1988), estas metodologias são o método da linha reta, o método do escoamento fixo de base e o método da inclinação variável, podendo ser identificados na Figura 8.11.



**Figura 8.11** - Técnicas de separação dos tipos de escoamento.

- (a) método da linha reta;
- (b) método do escoamento fixo de base; e,
- (c) método da inclinação variável.

**Fonte** - Chow, 1988.

No presente estudo, para isolar os tipos de escoamento característicos da região em estudo, adotou-se uma variação do método da linha reta.

Originalmente, conforme mencionado por Chow (1988), o método da linha reta consiste em desenhar uma linha horizontal do ponto onde a precipitação inicia-se até o momento onde a mesma intercepta a curva de recedimento. Posteriormente, este método sofreu uma alteração, passando a utilizar uma reta inclinada para ligar os pontos inicial e final do escoamento superficial, sendo esta modificação incorporada no presente estudo. Dessa forma, o volume acima da reta desenhada corresponde ao escoamento superficial, enquanto o abaixo, ao escoamento subterrâneo.

Vale ressaltar que a separação dos escoamentos feita através de uma estimativa nos hidrogramas não deve, segundo Bonacci (1987), afetar mais que 5% e no máximo 10% dos valores encontrados, corroborando para a aplicação desta técnica.

Após tais considerações, segue-se para a determinação dos escoamentos superficial e subterrâneo característicos da área em apreço. Para tanto, foram utilizados os dados de vazão das estações de Vespasiano e Ponte Raul Soares, obtidos junto à ANA, sendo estas medidas referentes aos anos de 1976 a 2000, apresentando algumas falhas. 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 localizam-se nos domínios do Grupo Bambuí.

A separação dos tipos de escoamento para os hidrogramas, gerados a partir dos dados das estações de Vespasiano e Ponte Raul Soares, foi iniciada com o desenvolvimento do método gráfico alterado, em cada ano do intervalo entre 1976 e 2000. Em seguida, foram estimadas as vazões correspondentes ao escoamento subterrâneo e superficial, sendo estas tomadas em relação às áreas das bacias hidrográficas envolvidas. A partir de então, a proporção (vazão/área) encontrada foi multiplicada pela real área de estudo, tornando-se, finalmente, possível, quantificar as vazões superficiais e subterrâneas para a região de influência da Mina Lapa Vermelha.

Os dados das estações de Vespasiano e Ponte Raul Soares estão disponíveis no site da ANA, não sendo aqui apresentados. Já os hidrogramas e o método gráfico de separação de escoamento encontram-se no Anexo B deste volume.

Resumidamente, os escoamentos superficial e subterrâneo obtidos via método gráfico de separação são distingüidos a seguir.

#### Estação Vespasiano

- Escoamento superficial = 141,8 mm/ano
- Escoamento de base = 247,4 mm/ano

#### Estação Ponte Raul Soares

- Escoamento superficial = 137,6 mm/ano
- Escoamento de base = 374,3 mm/ano

Valendo-se dos resultados anteriormente obtidos, determina-se como valor médio dos tipos de escoamento para a região de influência da Mina Lapa Vermelha a média dos escoamentos das duas estações. Portanto, os escoamentos médios anuais superficial e subterrâneo para a área de estudo são, respectivamente, 139,7 e 310,9 mm/ano.

#### **8.4 Equação do balanço hídrico**

Em geral, para uma região, o equacionamento básico do balanço hídrico pode ser descrito através da Equação (8.20).

$$P - ETR - R - Es = \Delta S \quad (8.20)$$

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,

$\Delta S$  = variação do armazenamento, dado em (mm/ano).

A equação (8.20) contém cinco variáveis, sendo que quatro delas foram estimadas ao longo deste trabalho, 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. Como a equação (8.20) não pode ser solucionada sem informação da variação do armazenamento, estipula-se a premissa de que tal parâmetro seja nulo. Esta medida pode ser justificada porque no caso do estudo hidrogeológico ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, o modelo hidrogeológico computacional a ser desenvolvido será estacionário, ou seja, com características invariáveis ao longo do tempo.

No caso em estudo, utilizando a simplificação mencionada, a Equação (8.20) reduz-se à Equação (8.21), cuja solução é imediata, uma vez que os valores médios anuais da precipitação, da recarga e do escoamento superficial são conhecidos.

$$P - ETR - R - Es = 0 \quad (8.21)$$

Portanto, como descrito nos itens anteriores, as variáveis envolvidas no balanço hídrico apresentam os seguintes valores aproximados:

**Tabela 8.15** - Variáveis envolvidas no balanço hídrico.

Variável	Valor (mm)
Precipitação (P)	1237
Recarga (R)	311
Escoamento superficial (Es)	140

Por conseguinte, afirma-se que:

$$ETR = P - R - Es \quad (8.22)$$

sendo:

$$ETR = 1237 - 311 - 140$$

$$ETR = 786 \text{ mm/ano}$$

Nota-se que a evapotranspiração real média anual calculada através do equacionamento do balanço hídrico encontra-se dentro do intervalo previsto pelas equações empíricas de L. Turc e Coutagne. 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.

Vale novamente ressaltar que os valores apresentados na Tabela 8.15 não devem ser adotados criteriosamente no modelo hidrogeológico computacional, devendo ser considerados, para tanto, os desvios padrões de cada variável. Da mesma forma, os escoamentos superficial e subterrâneo não devem ser adotados absolutamente, uma vez que uma estimativa via método gráfico induz a um erro da ordem de 5 a 10%, conforme Bonacci (1987).

Ressalta-se aqui a importância de ter sido desenvolvida uma análise do balanço hídrico da área de estudo. Através desse procedimento, foi possível diagnosticar se os valores típicos encontrados para a recarga estão condizentes com os demais parâmetros envolvidos no ciclo hidrológico. Como visto anteriormente, utilizando o valor de 311 mm/ano como taxa de recarga característica da área de estudo, obteve-se

um valor coerente de evapotranspiração real média, uma vez que este resultado se encontra dentro do intervalo especificado pelo estudo do balanço hídrico.

Assim sendo, nos modelos hidrogeológicos, conceitual e computacional, será adotada, inicialmente, uma recarga igual à encontrada nas estações de Vespasiano e Ponte Raul Soares, obtida pelo método gráfico, devendo esta ser minimamente alterada, se necessário, durante o processo de calibração.

## 9 CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO

*...(será que a água destes poços  
é toda aqui consumida  
pelas roças, pelos bichos,  
pelo sol com suas línguas?  
será que quando chegar  
o rio da nova invernia  
um resto da água do antigo  
sobrará nos poços ainda?)...*

*João Cabral de Melo Neto<sup>8</sup>*

A rede de monitoramento hidrogeológico do presente trabalho, 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 linimétricas, existentes em toda a região de abrangência do estudo. Complementando, ainda, esta rede de monitoramento, foram instalados dez poços piezométricos, objetivando observar as oscilações de nível d'água nas zonas adjacentes à cava, no interior da área de decreto de lavra. Dessa forma, o comportamento do sistema hidrogeológico cárstico em apreço foi acompanhado a fim de buscar a compreensão de sua dinâmica, relacionando-o com o comportamento dos rios, das surgências e das nascentes presentes.

A localização de todos os pontos componentes da rede de monitoramento foi apresentada no mapa da Figura 6.1, sendo resumida a seguir na Tabela 9.1.

---

<sup>8</sup> Melo Neto, João Cabral. *Morte e vida severina*: e outros poemas em voz alta. 30. ed. Rio de Janeiro: José Olympio, 1990. 145 p.

**Tabela 9.1 -** Localização dos pontos da rede de monitoramento.

Identificação	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /dia)	Identificação	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /dia)
PT1	614.752,60	7.824.239,00	25,00	PT16	612.700,00	7.826.140,00	78,34
PT2	614.831,00	7.824.342,00	168,00	PT17	613.590,00	7.826.000,00	1.267,49
PT3	616.180,00	7.821.635,00	288,00	PT18	613.515,00	7.826.010,00	864,00
PT4	613.870,00	7.823.895,00	168,00	PT19*	615.355,00	7.828.270,00	570,24
PT5	616.800,00	7.825.920,00	24,00	PT20*	615.335,00	7.828.230,00	1.328,83
PT6	616.855,00	7.827.345,00	1.233,79	PT21*	615.315,00	7.828.165,00	1.728,00
PT7	613.735,00	7.825.980,00	656,64	PT22*	615.285,00	7.828.008,00	2.160,00
PT8	616.160,00	7.824.400,00	216,00	PT23*	615.230,00	7.828.020,00	2.880,00
PT9	612.110,00	7.826.070,00	216,00	PT24	616.795,00	7.827.635,00	2.160,00
PT10	612.400,00	7.826.670,00	374,11	PT25	613.640,00	7.824.980,00	720,00
PT11	612.490,00	7.826.770,00	480,00	PT26	616.510,00	7.823.880,00	240,00
PT12	612.800,00	7.826.170,00	149,47	PT27	612.562,00	7.823.406,00	432,00
PT13	612.815,00	7.826.130,00	240,00	PT28	612.645,00	7.823.267,00	1.188,00
PT14	613.360,00	7.826.070,00	56,16	PT29	618.165,00	7.826.817,00	744,00
PT15	613.230,00	7.825.430,00	65,66	PT = poço tubular / * Correspondem a poços inativos.			
Identificação	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Cota (m)	Localização			
PE-1	617.919,00	7.824.890,00	-	Cisterna do Haras JP			
NC-1	617.407,00	7.822.663,00	734,00	Nascente da fazenda Camamu			
NC-2	616.653,00	7.825.918,00	802,00	Cabeceiras do córrego José Maria			
NC-3	615.944,00	7.823.230,00	720,5	Nascente do córrego Cafundó			
SG-1	616.659,00	7.822.313,00	817,60	Surgência da propriedade de Geraldo Tadinho			
SG-2	616.805,00	7.824.724,00	673,00	Surgência do poço do Jacaré			
CP-1	616.032,16	7.823.048,78	673,00	Calha Parshal do córrego Cafundó			
RL-1	618.231,00	7.821,307	707,00	Régua linimétrica do córrego José Maria			
RL-2	616.659,00	7.822,313	754,19	Régua linimétrica da propriedade de Geraldo Tadinho			
PZ-1	614.767,00	7.824.300,00	754,20	Piezômetro instalado no entorno da cava			
PZ-2	614.952,00	7.824.446,00	750,70	Piezômetro instalado no entorno da cava			
PZ-3A	615.315,00	7.824.332,00	752,90	Piezômetro instalado no entorno da cava			
PZ-3B	615.312,43	7.824.331,51	752,67	Piezômetro instalado no entorno da cava			
PZ-3C	615.315,45	7.824.331,57	752,66	Piezômetro instalado no entorno da cava			
PZ-4	615.141,00	7.823.660,00	787,20	Piezômetro instalado no entorno da cava			
PZ-5	615.981,00	7.823.598,00	760,40	Piezômetro instalado no entorno da cava			
PZ-6	615.967,00	7.823.402,00	739,60	Piezômetro instalado no entorno da cava			
PZ-7	615.814,00	7.823.232,00	745,10	Piezômetro instalado no entorno da cava			
PZ-8	615.556,00	7.822.081,00	731,50	Piezômetro instalado na fazenda do Raí			

Alguns dos pontos integrantes da rede de monitoramento são exibidos nas figuras subseqüentes.



**Figura 9.1 -** Règua linimétrica instalada na surgência do Tadinho.

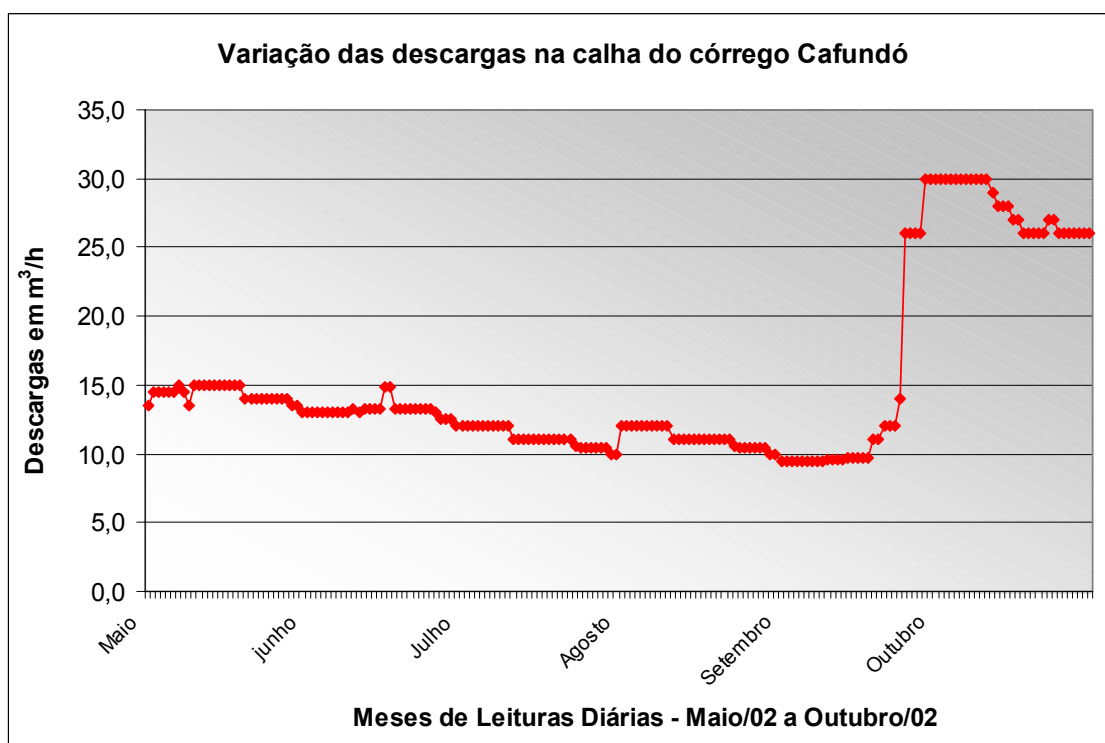


**Figura 9.2 -** Poço tubular localizado na várzea da Lagoa Santa.



**Figura 9.3 -** Poço tubular situado na Fazenda Ribeirão da Mata.

Um dos medidores de vazão que compõe a rede de monitoramento do presente estudo é a calha Parshal. Instalada no córrego Cafundó, este dispositivo de medição de vazão acusou que este corpo d'água drena uma vazão de cerca de  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,00416 \text{ m}^3/\text{s}$  ou  $4,16 \text{ l/s}$ ). Esta vazão corresponde à média das vazões coletadas entre os meses de maio a outubro de 2002, sendo sua curva de descarga característica demonstrada na Figura 9.4. Vale salientar que os dados que geraram esta curva se encontram no Anexo C, parte C1.



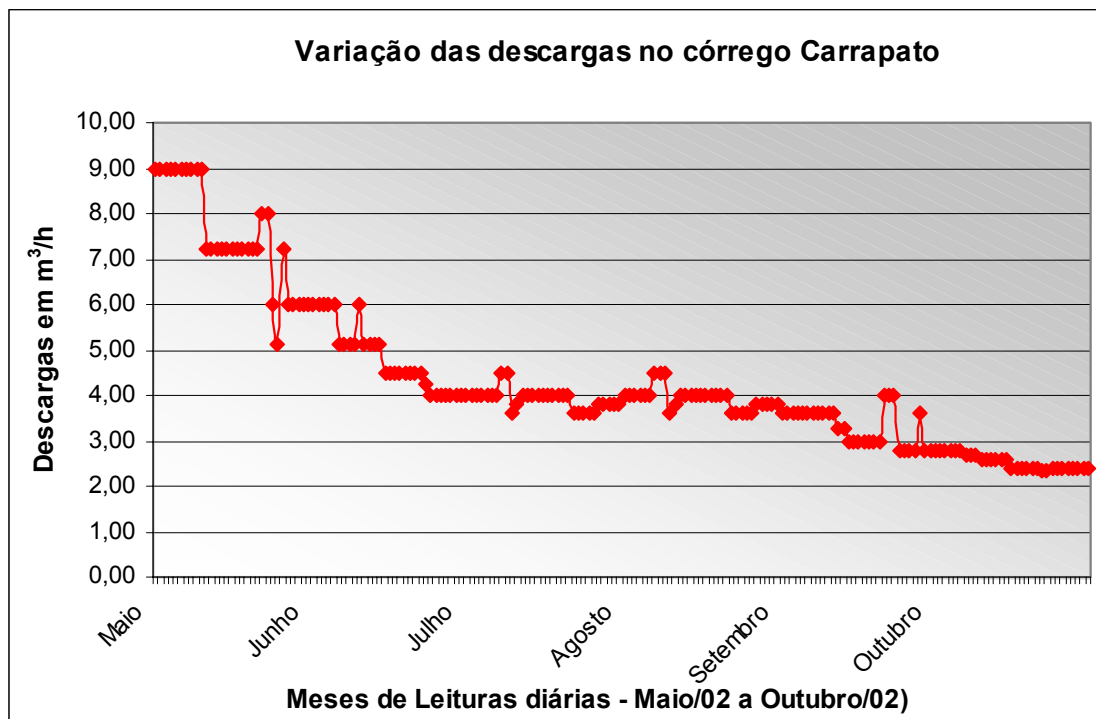
**Figura 9.4 -** Curva de descarga característica do córrego Cafundó.

Analisando-se o gráfico da figura anterior, afirma-se que o córrego do Cafundó recebe água proveniente da dolina de injeção, uma vez que o mês de outubro, apesar de se enquadrar dentro do período chuvoso, apresenta um grande pico na curva de descarga, correspondendo ao mesmo período em que se processou à injeção artificial de água no *sump* da cava da Mina Lapa Vermelha.

Uma das réguas linimétricas que compõem a rede de monitoramento do presente estudo foi instalada no córrego José Maria. A vazão média característica deste córrego foi, então, estimada em 320,4 m<sup>3</sup>/h (0,089 m<sup>3</sup>/s ou 89 l/s), equivalendo à média das medições colhidas nesta drenagem. Vale reafirmar que somente parte dessa descarga monitorada por aquela régua é proveniente de sua margem direita, oriunda da área de investigação. Os dados que definiram a vazão média que escoar no córrego José Maria se encontram no Anexo C, parte C2.

A surgência do Tadinho foi monitorada através de uma régua linimétrica, sendo que sua vazão apontou para um valor de 170 m<sup>3</sup>/h (0,047 m<sup>3</sup>/s ou 47 l/s) nos períodos chuvosos. Os dados referentes a estas medições estão apresentados no Anexo C, parte C3.

Além dos cursos d'água anteriormente relacionados, registra-se que o córrego do Inhame Rosa ou Carrapato, tributário da margem direita do vale do Cafundó foi monitorando através de balde graduado, sendo suas medições apresentadas no Anexo C, parte C4 e sua curva de descarga exibida na Figura 9.5.

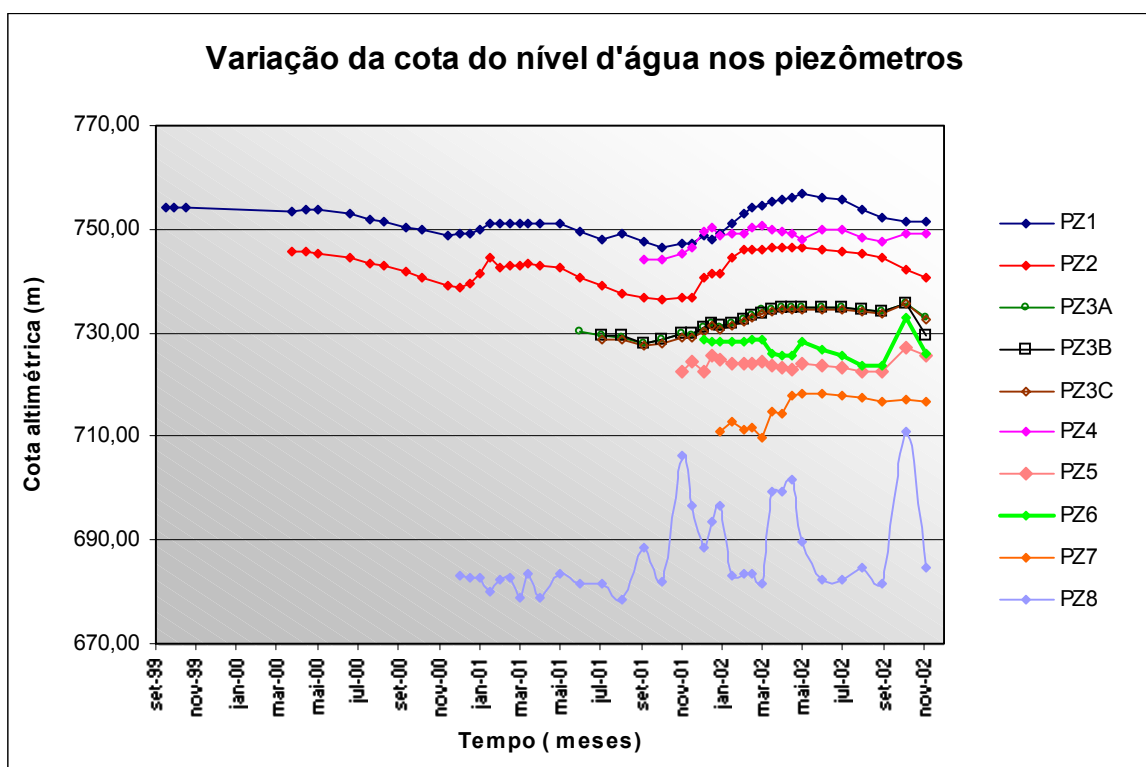


**Figura 9.5 -** Curva de descarga característica do córrego Carrapato.

Analisando-se o gráfico da Figura 9.5, afirma-se que o córrego Carrapato não apresenta conexão hidráulica com o sistema hidrogeológico cárstico da cava da Mina Lapa Vermelha, uma vez que sua curva de descarga não apresenta pico relacionado ao período em que se iniciou a injeção artificial de água no *sump* da cava em questão.

Os resultados obtidos com o monitoramento do sistema hidrogeológico cárstico em consideração foram utilizados para o desenvolvimento dos modelos hidrogeológicos conceitual e computacional. Sendo assim, todos os poços tubulares, cujas vazões estiveram sob inspeção foram inseridos no modelo hidrogeológico computacional, apresentando uma taxa de bombeamento igual à encontrada em campo. Já as cargas hidráulicas referentes às cisternas, às nascentes, às régua linimétricas e aos poços piezométricos foram utilizadas na fase de calibração, com o intuito de verificar os resultados obtidos no modelo hidrogeológico computacional.

As medições de nível d'água dos piezômetros, além de terem participado do processo de calibração, auxiliaram no esclarecimento do comportamento do aquífero da região, contribuindo para a concepção do modelo hidrogeológico conceitual. Para tanto, gerou-se um gráfico referente às oscilações sazonais do nível d'água do sistema hidrogeológico, observadas ao longo de dois anos de medição, como mostrado no gráfico da Figura 9.6. Vale ressaltar que os dados que geraram este gráfico estão presentes no Anexo C, parte C5.



**Figura 9.6 -** Evolução das medições de nível d'água.

Observando-se o gráfico da Figura 9.6, comenta-se que:

- o comportamento do aquífero em estudo é muito sensível ao balanço das entradas e saídas de água no sistema. Tal fato pode ser comprovado observando-se que o nível d'água nos períodos chuvosos se eleva, enquanto nos secos, diminui;
- o processo de rebaixamento do lençol freático da Mina Lapa Vermelha ainda não causou oscilações bruscas do nível d'água dos piezômetros e, portanto, ainda não afetou drasticamente o aquífero cárstico; e,
- o comportamento hídrico subterrâneo está condicionado diretamente às oscilações pluviométricas locais, as quais regulam as cargas hidráulicas do sistema aquífero.

## 10 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

*Carta*

*Mario Quintana<sup>9</sup>*

*O Profeta diz a todos:*

*“eu vos trago a Verdade”,*

*enquanto o poeta, mais humildemente,*

*limita-se a dizer a cada um:*

*“eu te trago a minha verdade”...*

O objetivo da elaboração de um modelo conceitual, conforme mencionado por Anderson & Woessner (1992), é o de simplificar o problema real apresentado e organizar os dados existentes, obtendo-se uma melhor interpretação do funcionamento do sistema e facilitando a sua análise. Entretanto, esta simplificação deve ser fiel à complexidade do assunto que está sendo examinado, de modo que se torne válida a representação das condições hidrogeológicas.

### 10.1 Unidades Hidroestratigráficas

Conforme mencionado por Anderson & Woessner (1992), as unidades hidroestratigráficas compreendem as unidades geológicas que apresentam propriedades hidrogeológicas similares, tais como condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento. Dessa forma, muitas unidades geológicas que se comportam da mesma maneira podem ser agrupadas em uma única unidade hidroestratigráfica. Paralelamente, é possível, também, que uma mesma formação geológica seja dividida em várias unidades hidroestratigráficas.

Através da análise de perfis de sondagem e da caracterização da geologia regional e local, tem-se o conhecimento da litoestratigrafia característica da região em destaque, sendo possível afirmar que, de base para o topo, as unidades hidroestratigráficas reconhecidas na área são aquelas apresentadas na Tabela 10.1.

---

<sup>9</sup> Quintana, Mario. Caderno H. [s. n. t.].

**Tabela 10.1** - Materiais litológicos distintos, integrantes da região de interesse, com a identificação das respectivas unidades hidroestratigráficas.

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

Os valores da condutividade hidráulica assumidos para cada unidade hidroestratigráfica foram determinados a partir de pesquisa literária e testes de bombeamento.

Como visto na Tabela 10.1, o embasamento cristalino é a sustentação de todo o pacote de sedimentos sobrepostos. Acima dele são encontrados os calcários constituintes da Formação Sete Lagoas, seguidos imediatamente pelos calcário-filitos da Formação Serra de Santa Helena. Posteriormente a esta litologia, depositam-se os materiais de alteração representados pelas coberturas inconsolidadas.

O embasamento cristalino comporta-se como um aquíclode, devido à sua inexistente porosidade primária. Já a sua porosidade secundária é desconhecida, mas acredita-se que seja pouco significativa. 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, como esta premissa foi adotada nos modelos hidrogeológicos conceitual e computacional da área de investigação, o embasamento cristalino não participou do estudo de modelagem hidrogeológica.

O comportamento hidrogeológico dos calcários componentes da Formação Sete Lagoas é agrupado em uma única unidade hidroestratigráfica. Sendo assim, devido às suas semelhanças hidrogeológicas, ignora-se, no presente momento, a distinção entre os Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, constituintes da Formação Sete Lagoas.

A unidade hidroestratigráfica que caracteriza a Formação Sete Lagoas é caracterizada pela presença de alinhamentos de fraturas verticais ao longo das quais ocorre a circulação da água subterrânea. Estas fraturas podem se mostrar pouco abertas ou mesmo bastante desenvolvidas, fato que implica em valores de condutividade hidráulica bastante elevados, variando entre  $10^{-5}$  a  $10^{-2}$  m/s. Em virtude da heterogeneidade das fraturas encontradas na unidade hidroestratigráfica que compõe a Formação Sete Lagoas, foram acomodadas dentro deste domínio outras distintas unidades hidroestratigráficas que correspondem especificadamente às fraturas, sendo estas incorporadas também no modelo hidrogeológico computacional. Diante das descontinuidades mais importantes do ponto de vista da dinâmica aquífera local, merece destaque a fratura que garante a conexão entre a “Dolina de Injeção” e a surgência do Tadinho.

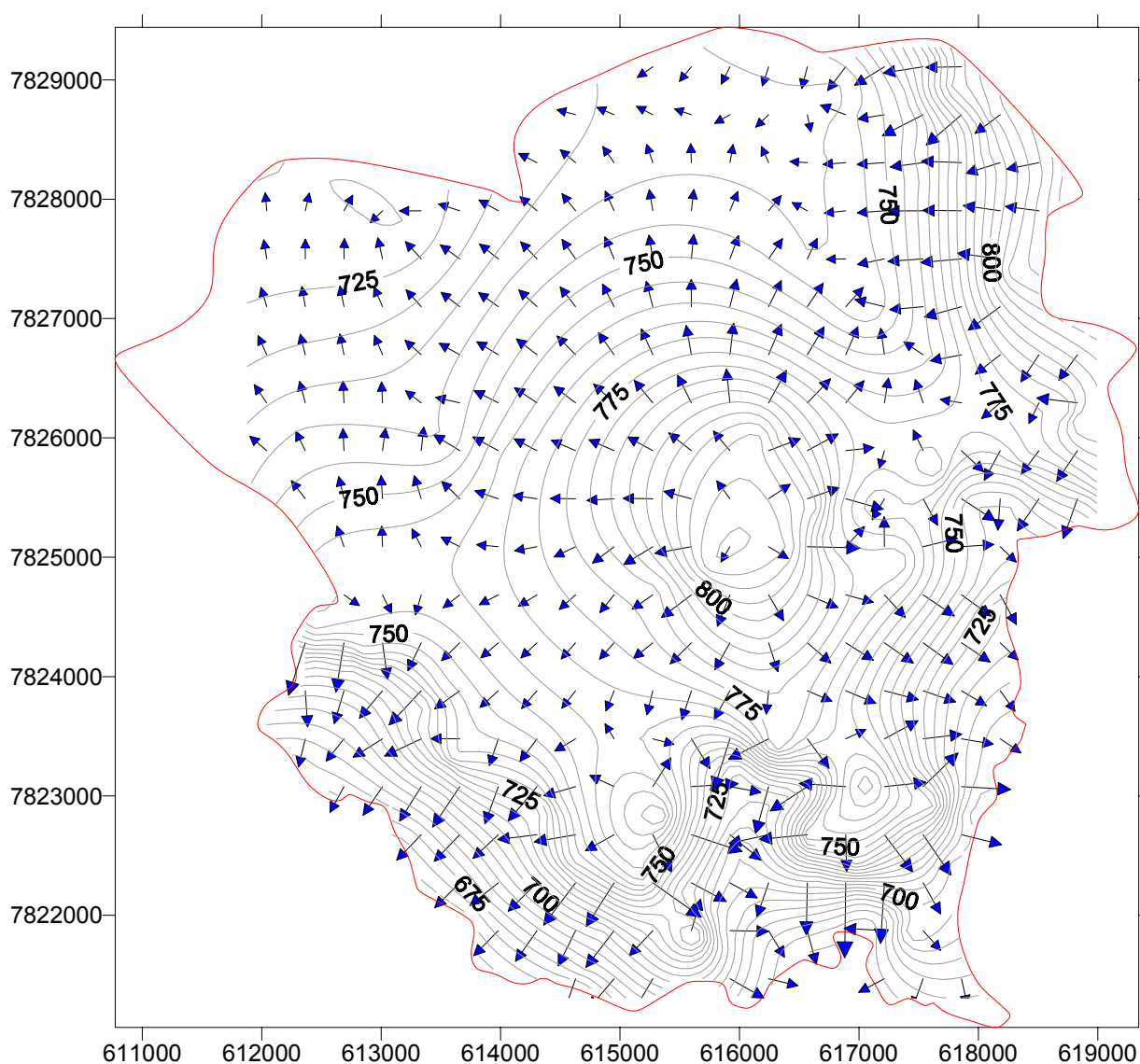
Como unidade hidroestratigráfica, a Formação Serra de Santa Helena caracteriza-se por possuir baixa permeabilidade, significativa capacidade de armazenamento e porosidade fissural pouco desenvolvida, o que deve conferir-lhe baixos valores de condutividade hidráulica (da ordem de  $10^{-7}$  m/s). Ressalta-se, 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 hidroestratigráfica 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.

## 10.2 Comportamento Hidrodinâmico

A partir dos dados de monitoramento colhidos nos poços tubulares, piezômetros, cisternas, surgências, nascentes, calhas, baldes graduados e régua linimétrica existentes em toda a região de abrangência do estudo, elaborou-se, conforme Figura 10.1, uma primeira concepção das direções de fluxo que definem o escoamento das águas subterrâneas da região em análise.



**Figura 10.1** - Representação da distribuição das linhas equipotenciais elaboradas a partir dos dados de monitoramento.

Examinando a figura anterior, é possível proceder a uma avaliação hidrogeológica preliminar, na qual a área de estudo é subdividida em três domínios de acordo com os tipos de materiais existentes e suas características morfológicas e topográficas, sendo eles:

- zonas de recarga;
- zonas de circulação intermediária; e,
- zonas de descarga.

### **10.2.1 Zonas de recarga dos aquíferos**

Na área de estudo, como visto na Figura 10.1, as zonas de recarga desenvolvem-se na porção central, sendo constituídas pela faixa elevada dos topos, que definem os principais interflúvios locais, e pelas faixas planas ocupadas por cerrados ralos e campos cerrados remanescentes. Estão delimitadas pelas cotas altimétricas que variam entre aproximadamente 780 e 850 m de altitude.

A área tipo desse compartimento, segundo Loureiro (2003), pode ser observada na porção onde está inserido o trevo de Lagoa Santa, trecho que representa localmente o divisor entre as bacias do ribeirão da Mata e rio das Velhas. Além disso, esta zona alonga-se para norte no sentido do aeroporto de Confins, englobando a pista de pouso do PAMA. Compreende, também, um trecho inferior que serve de cabeceiras de drenagem para os afluentes do córrego Cafundó.

Estas zonas de recarga, cuja natureza é argilo-arenosa, constituem-se ora por materiais alterados da Formação Serra de Santa Helena, ora por coberturas dispostas diretamente sobre os calcários. Devido à expressiva porosidade efetiva da argila (entre 0,01 e 0,18), tais compartimentos se tornam aptos para armazenar água, enquanto que possuem baixa capacidade de condução, constituindo, assim, um meio aquífero. Dessa forma, são capazes de alimentar lentamente os sistemas hidrogeológicos inferiores.

Ressalta-se, também, que nessas áreas de recarga ocorre pouca susceptibilidade à formação de cavernas, apresentando apenas dolinamentos isolados e pequenas exposições de rochas metapelíticas.

Algumas dolinas presentes na área de estudo, como a dolina do Jacaré, podem implicar em recargas pontuais. Representam, dessa forma, pontos de absorção de água para o sistema profundo, onde há uma convergência dos aportes meteóricos exclusivamente para as componentes subterrâneas, através dessas mini-bacias concêntricas.

### 10.2.2 Zonas de circulação intermediária

As zonas de circulação intermediária, definidas pelos compartimentos das zonas deprimidas e dos vales encaixados, estão relacionadas às porções das seções hidrogeológicas representadas pelos caminhamentos dos fluxos subterrâneos mais curtos. Na maioria dos casos é possível afirmar:

*“...verifica-se nesses trechos a existência de nascentes perenes ou ainda intermitentes nos sopés das encostas, cujos aportes não atingiram o nível de base regional, mas sim os níveis de base intermediários representados pelas calhas de pequena ordem dos tributários locais.” Loureiro (2003).*

As zonas de circulação intermediária correspondem às nascentes de pequena vazão, cuja qualidade natural das águas são decorrentes do pouco tempo de permanência no meio aquífero. Ademais, para o caso do sistema rio das Velhas, fazem parte dessas zonas de circulação os trechos de descarga que servem de alimentação à lagoa central de Lagoa Santa, à lagoa Olhos D'água e aos demais mananciais existentes nas cabeceiras do córrego do Fidalgo. Já para o sistema de drenagem do ribeirão da Mata, citam-se os aportes de descarga intermediária do córrego José Maria e de alguns afluentes do córrego Cafundó.

Em geral, conforme Loureiro (2003):

*“...podem ser atribuídas a esse sistema as formas de circulação de descarga para os níveis imediatamente subjacentes, ou seja, entre as camadas superficiais de solos e os materiais que constituem os aquíferos livres do meio poroso representado pelas rochas de alteração pelítico-carbonáticas subjacentes.”*

### 10.2.3 Zonas de descarga dos aquíferos

A descarga geral dos sistemas hidrogeológicos abrangidos pela área de investigação é delineada pelo vale do ribeirão da Mata e pela depressão da lagoa central de Lagoa Santa, sendo que seus níveis de base correspondem, respectivamente, às cotas 665 e 740 m.

Devido à proximidade com o ribeirão da Mata, que representa o nível de base, a porção sul, a jusante da área da Mina Lapa Vermelha, apresenta feições pontuais de descarga, caracterizadas pelas surgências cársticas, como a do Tadinho.

Em relação aos gradientes hidráulicos observados entre as zonas de recarga e as zonas de descarga características da área em apreço, nota-se que o valor máximo

para o gradiente hidráulico no sentido sul é de aproximadamente 0,0289 m/m, enquanto que no sentido norte para a lagoa central de Lagoa Santa é de cerca de 0,0217 m/m. Tal diferença ocorre em virtude do maior desnível existente entre o divisor de águas e o ribeirão da Mata quando comparado com a diferença de nível entre este mesmo divisor de água e a lagoa central de Lagoa Santa.

As zonas de recarga, de circulação intermediária e de descarga anteriormente descritas estão ilustradas na Figura 10.2.

**Figura 10.2** - Domínios hidrogeológicos presentes na área de influência da Mina Lapa Vermelha.

## **11 MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL**

### **11.1 Discussões preliminares**

#### **11.1.1 Modelagem em regiões cársticas**

Desde os anos 70, com o avanço dos métodos numéricos e da tecnologia dos computadores, muito tem sido o interesse em estudar o escoamento das águas cársticas.

O estudo de modelagem em regiões marcadas pela presença do carste é complicado devido, principalmente, à anisotropia, à heterogeneidade das rochas carbonáticas e à dificuldade em caracterizar as propriedades cársticas, sobretudo a geometria dos condutos subterrâneos e as condutividades hidráulicas. Apesar destas dificuldades, segundo Anderson & Woessner (1992), três maneiras têm sido utilizadas neste processo de modelagem, sendo elas:

- o escoamento no meio poroso e nas rochas fraturadas é assumido ser governado pela lei de Darcy;
- a aproximação de uma “caixa preta” é utilizada para modelar carstes maduros, sendo que, neste caso, são desenvolvidas funções para reproduzir os dados de entrada e as respostas do sistema. Análises dos hidrogramas de descargas, recargas, geoquímica das recargas e das águas das nascentes são utilizadas para desenvolver equações que descrevem a descarga do sistema;
- outra aproximação, utilizando as funções geradas anteriormente, desenvolvem o método dos meios porosos equivalentes.

Anderson & Woessner (1992) afirmam que, geralmente, pesquisadores têm dificuldade em aceitar o uso de sistemas equivalentes em meios porosos para estudar paisagens cársticas em escala local. No entanto, quando se trata de uma análise regional, o uso desta metodologia é bem aceito. Rapidamente, serão descritos alguns pesquisadores que apóiam a aproximação de regiões cársticas como meios porosos.

Como afirmado por Anderson & Woessner (1992), o escoamento de águas subterrâneas em regiões de calcário, dolomita, mármore e outras rochas solúveis

comporta-se como um sistema típico de escoamento em meios fraturados, sendo possível modelá-los, incluindo as paisagens cársticas, tendo-se o conhecimento detalhado das características de campo da região estudada.

No início de 1960, o Professor Belendratt *et. al.*, citado por Yusun & Ji (1988), afirmaram que o escoamento de água em meios fraturados poderia ser analisado considerando-se o meio como sendo poroso e homogêneo, desde que fossem utilizados parâmetros de permeabilidade representativos da região estudada. Diante disso, Yusun & Ji (1988) mencionam que quando o cenário examinado for cárstico, a análise do escoamento da água deve ser feita considerando-se o meio tridimensional como meio poroso, com altos valores de permeabilidade.

Troisi & Vurro (1988), como conclusão de seu trabalho, afirmaram que o comportamento do escoamento hidrodinâmico em meios fissurados é comparável ao escoamento em meio poroso. Dessa maneira, de acordo com Troisi & Vurro (1988), as simplificações e as hipóteses válidas para o meio poroso podem ser aplicadas para sistemas fissurados.

De acordo com Ford & Williams (1989), a aplicabilidade da lei de Darcy para estudos de regiões cársticas é justificada pelo fato da rocha poder ser considerada como um meio contínuo formado por espaços vazios e material sólido, cujos parâmetros macroscópicos (como condutividade hidráulica) podem ser definidos. Isso significa, então, que, no carste, a rocha fraturada pode ser substituída por um meio contínuo representativo para o qual é possível determinar os parâmetros hidráulicos macroscópicos. (Ford & Williams, 1989).

Em alguns casos, como mencionado por Pulido-Bosh & Padilla (1988), a anisotropia e a descontinuidade de meios cársticos podem ser simuladas através de ferramentas desenvolvidas para meios porosos, considerando-se sempre a existência de uma alta condutividade para os elementos cársticos.

Pusic (1997) também afirma que é possível modelar cenários cársticos através da utilização dos princípios da lei de Darcy. Ao estudar uma região cárstica da Sérvia, Pusic (1997) dividiu a área analisada em grandes blocos homogêneos separados por zonas de carstificação, gerando um modelo bidimensional baseado na lei de Darcy.

El-Kadi (1995) sustenta a idéia apresentada por Anderson & Woessner (1992) de que os aquíferos cársticos, quando modelados, devem ser estudados em escala

regional. De acordo com El-Kadi (1995), modelos desenvolvidos em escala pequena têm gerado resultados pouco confiáveis. Isto ocorre porque quando o estudo é analisado em pequenas escalas, faz-se necessário o uso de dados excessivos de permeabilidade, exigindo análises de campo muito detalhadas.

Em 1998, Delleur também confirmou a possibilidade de modelar regiões cársticas através da lei de Darcy. Segundo Delleur (1998), tal modelagem é recomendada desde que se assumam altos valores de condutividade hidráulica em um estudo de escala regional. Ele ressalta também que esta aproximação da paisagem cárstica por um meio poroso tem sido correntemente aplicada, uma vez que um modelo completamente adequado para estudos de aquíferos cársticos ainda não foi desenvolvido.

Dufresne & Drake (1999) desenvolveram, através do programa *ModFlow*, um modelo de escoamento de águas subterrâneas para a região cárstica da Flórida, nos Estados Unidos da América, baseado na lei de Darcy. Neste estudo de Dufresne & Drake, um modelo de escoamento hidrodinâmico das águas subterrâneas foi elaborado para determinar o uso potencial do aquífero da Flórida nos anos subsequentes, sendo representados, em uma escala regional, a alta permeabilidade e o aquífero fraturado da Flórida como um meio poroso equivalente.

Quinlan *et. al.*, citado por Dufresne & Drake (1999), afirmam que modelos numéricos como *ModFlow* podem representar adequadamente dados de carga hidráulica e relações de recarga e descarga de aquíferos cársticos.

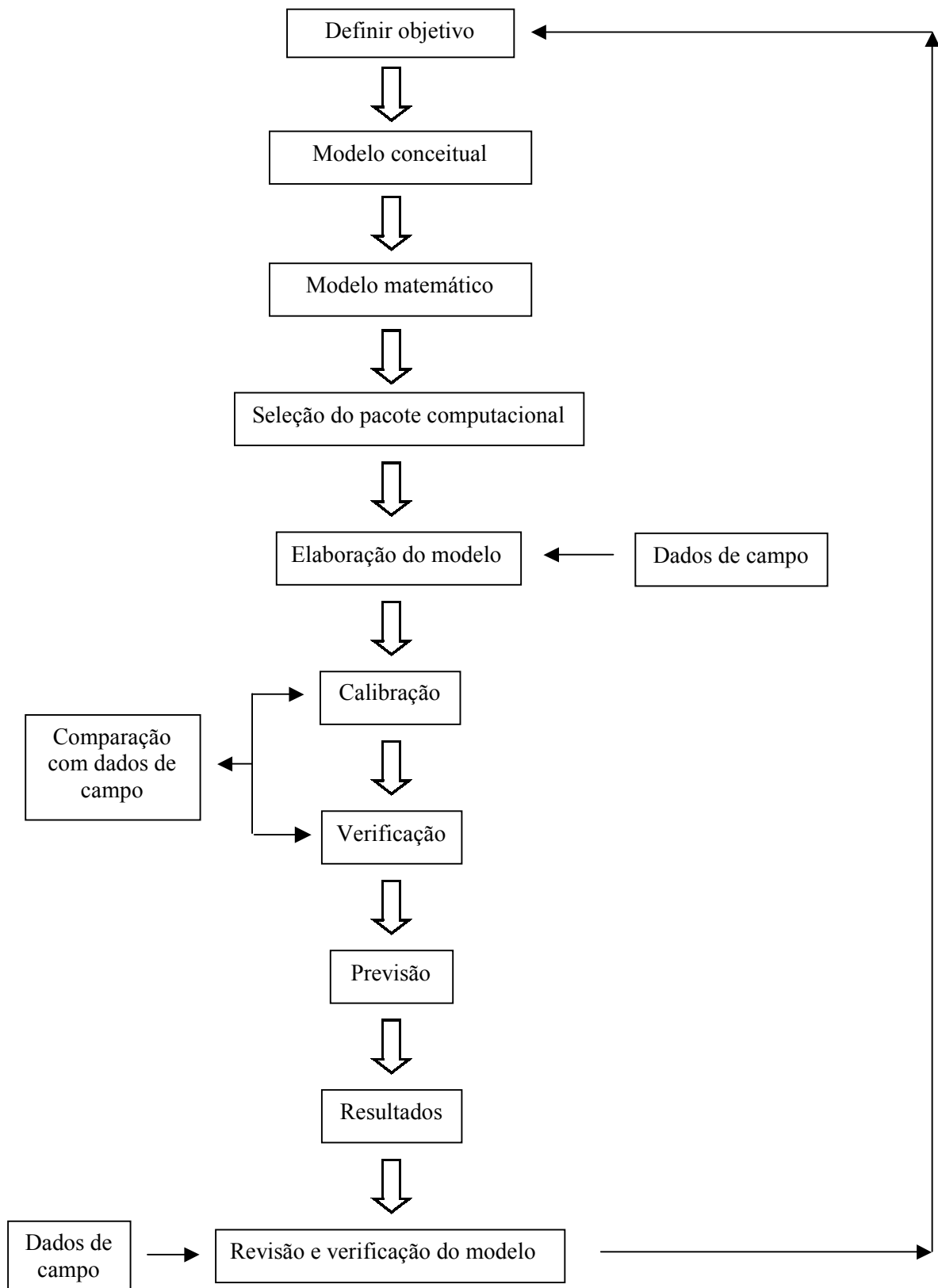
A modelagem em regiões fraturadas, segundo White (2002), tem, ao longo dos anos, apresentado sucessos, sendo modeladas usando as mesmas aproximações utilizadas em meios porosos. White (2002) afirma que a grande dificuldade em modelar regiões cársticas consiste em saber lidar com as grandes diferenças de condutividade hidráulica e sua distribuição espacial na área de estudo. Vale ressaltar que a escala de trabalho deve ser suficientemente grande para que a descontinuidade entre as rochas fraturadas e as não-fraturadas seja pequena. Estes modelos citados por White (2002) preconizam que o fluxo nas fraturas é laminar e que o escoamento segue a lei de Darcy, ignorando o escoamento nos condutos. (White, 2002).

### 11.1.2 Etapas de modelagem

Na busca de uma ferramenta que permita reproduzir com maior representatividade o sistema de água subterrânea da região no entorno da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, foram iniciados os estudos de modelagem matemática aplicada à simulação dos fluxos subterrâneos.

Trata-se de um modelo matemático numérico, interpretativo, tridimensional e estacionário. 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.

Com o objetivo de obter um modelo hidrogeológico computacional que represente a realidade encontrada no campo, o processo de modelagem foi orientado de acordo com o roteiro metodológico proposto por Anderson & Woessner (1992), conforme o fluxograma apresentado na Figura 11.1.



**Figura 11.1** - Etapas de modelagem  
**Fonte** - Adaptado de Anderson & Woessner, 1992.

Conforme apresentado na figura anterior, a modelagem de um aquífero envolve diversas etapas que, segundo Anderson & Woessner (1992) e Cabral & Demetrio *in* Feitosa & Manuel Filho (2000), são descritas da seguinte maneira:

- definição dos objetivos → compreende a identificação clara do problema a ser estudado, o que implicará na escolha do modelo que deverá ser utilizado;
- modelo conceitual → após a definição dos objetivos, parte-se para a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual, identificando-se as condições de contorno do sistema, as unidades hidroestratigráficas, as recargas, as conexões hidráulicas e os poços de bombeamento;
- seleção do pacote computacional → inicialmente deve-se selecionar qual a equação que rege o sistema que está sendo estudado e, posteriormente, escolhe-se o código computacional que possui o algoritmo capaz de resolver as equações diferenciais;
- elaboração do modelo → esta etapa consiste na adaptação do modelo hidrogeológico conceitual, de forma que possa ser interpretado pelo programa de modelagem. Inclui, portanto, a discretização do problema, a seleção do intervalo de tempo de simulação, a definição das condições iniciais e de contorno, a seleção dos parâmetros iniciais do aquífero e as condições de recarga e bombeamento;
- calibração → esta é a fase do ajuste dos parâmetros do modelo hidrogeológico computacional, objetivando reproduzir as cargas hidráulicas e fluxos medidos no campo;
- verificação → o objetivo desta fase é verificar o modelo hidrogeológico computacional já calibrado. Para tanto é utilizado um novo conjunto de dados de campo e, assim, compara-se novamente os valores de carga hidráulica e fluxo obtidos em campo com os valores fornecidos pelo modelo hidrogeológico computacional;
- previsão → fornece a resposta do aquífero para eventos futuros de recarga e bombeamento; e,
- revisão e verificação do modelo → é importante que o monitoramento dos aquíferos continue sendo feito para que sejam avaliadas novas simulações, corrigindo, assim, as imprecisões cometidas nas modelagens anteriores.

### 11.1.3 Aplicativo Computacional

Tendo em vista tratar-se de um aplicativo computacional amplamente utilizado e reconhecido na literatura internacional, o *Visual ModFlow* (Guiguer & Franz, 1998) foi adotado por representar um programa de alta capacidade de interação de dados numéricos, com uma interface gráfica muito elaborada, permitindo, assim, que sejam acomodados todos os elementos constituintes do modelo hidrogeológico conceitual.

Elaborado pela Waterloo Hydrogeologic, o *Visual ModFlow* (Guiguer & Thomas, 1998) 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. Dessa maneira, a simulação do escoamento subterrâneo em três dimensões, consoante Anderson & Woessner (1992), é descrita pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{\sigma}{\sigma x} \left( K_x \frac{\sigma h}{\sigma x} \right) + \frac{\sigma}{\sigma y} \left( K_y \frac{\sigma h}{\sigma y} \right) + \frac{\sigma}{\sigma z} \left( K_z \frac{\sigma h}{\sigma z} \right) = S_s \frac{\sigma h}{\sigma t} - R^* \quad (11.1.3.1)$$

sendo que:

$K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$  representam os componentes do tensor de condutividade hidráulica nas direções x, y e z, respectivamente, [ $LT^{-1}$ ];

h representa a carga hidráulica, [L];

$S_s$  representa o armazenamento específico do meio poroso, [ $L^{-1}$ ];

$R^*$  representa o termo geral de fonte ou sumidouro de água [ $T^{-1}$ ], reproduzindo a introdução ( $R > 0$ ) ou remoção ( $R < 0$ ) de um volume de água, por unidade de volume do meio, por unidade de tempo; e,

t é o tempo.

Complementando a descrição deste aplicativo, o *Visual ModFlow* permite acomodar os componentes hidrológicos e as condições de contorno do sistema, tais como rios, córregos, drenos, poços e taxas de recarga, possibilitando, assim, representar, de maneira adequada, os elementos reais incorporados no respectivo modelo

hidrogeológico conceitual. Esta ferramenta admite, também, a existência de unidades hidroestratigráficas distintas, de acordo com a configuração real de campo.

#### **11.1.4 Representação física das condições de contorno**

As condições de contorno são aproximações matemáticas que representam as fronteiras hidráulicas ou físicas que delimitam o modelo. Sendo assim, afirma-se, de acordo com Anderson & Woessner (1992), que os limites físicos são formados, por exemplo, pela presença física de uma rocha impermeável ou por um grande corpo de água, como lagos e rios. Já os limites hidráulicos, que são invisíveis, representam os divisores de água subterrânea e córregos.

Matematicamente, as condições de contorno são classificadas em três tipos, segundo Anderson & Woessner (1992):

- 1) condição de Dirichlet, na qual a carga hidráulica é conhecida, como no caso de corpos d'água de grande porte;
- 2) condição de Neuman, no qual o fluxo que corre através do contorno é conhecido. Exemplifica-se aqui o fluxo nulo para divisores de água subterrânea ou para barreiras físicas presentes na região de estudo; e,
- 3) condição de Cauchy, na qual o fluxo através do contorno é calculado em função de um valor de carga hidráulica conhecido no exterior do modelo.

No desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional foram incorporados todos os elementos integrantes do modelo hidrogeológico conceitual, incluindo as suas respectivas unidades hidroestratigráficas, os aspectos geológicos estruturais, as condições de recarga, o sistema de drenagem superficial, a conformação topográfica do terreno e os poços de bombeamento. O modelo hidrogeológico computacional assim constituído passou por um procedimento de calibração na busca de ajustar os resultados simulados com os dados de cota d'água e de vazão de água medidos através da rede de monitoramento.

Após a calibração satisfatória, o modelo hidrogeológico computacional foi utilizado para a simulação de casos específicos de comportamento hidrodinâmico do sistema hidrogeológico sob diferentes condições pré-determinadas.

Uma descrição do desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional, do procedimento de calibração e dos resultados de simulação do

comportamento hidrodinâmico da área de influência da Mina Lapa Vermelha é apresentada a seguir.

## **11.2 Desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional**

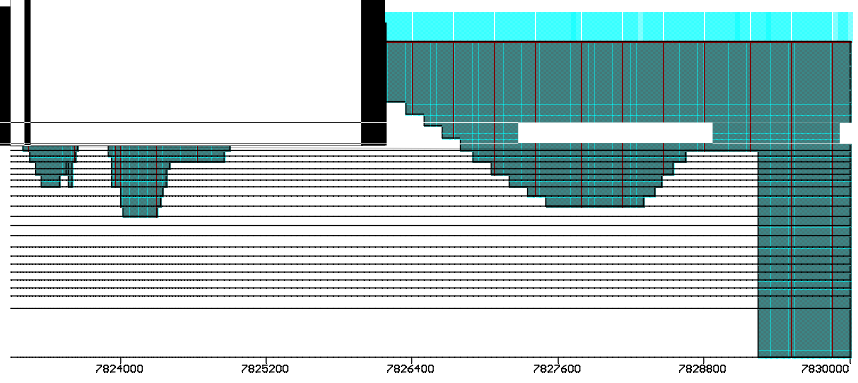
### **11.2.1 Definição dos contornos do domínio de cálculo**

Os limites da área de estudo foram definidos com base na caracterização dos seus respectivos contornos, os quais podem ser representados por duas formas distintas, quais sejam: a primeira, na forma de um contorno físico bem definido, tal como uma barreira hidráulica de permeabilidade nula, um corpo d'água superficial ou um eixo de drenagem; e, a segunda, na forma de um contorno hidráulico de fluxo zero, constituído por um divisor de água topográfico. Desse modo, o contorno norte da área de estudo foi marcado pela existência de uma barreira hidráulica, representada pela topografia (condição de Neuman). Acrescenta-se igualmente à descrição deste limite o registro de uma barreira física determinada pela lagoa central de Lagoa Santa (condição de Dirichlet). Já a porção sul foi delimitada por uma barreira física, representada pelo ribeirão da Mata (condição de Dirichlet). O córrego José Maria, por sua vez, definido como barreira física, determinou o limite leste (condição de Cauchy). Enquanto isso, o limite oeste constituiu-se por uma barreira hidráulica topográfica (condição de Neuman). 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 impermeável. Sendo assim, a espessura do modelo é variável, em função da topografia natural do terreno, conforme pode ser observado no corte apresentado na Figura 11.3. Evidentemente, todos esses contornos concordam com aqueles já descritos na proposição da área de investigação.

Uma ilustração do domínio de cálculo adotado no modelo hidrogeológico computacional, com a indicação dos seus respectivos contornos nos planos horizontal e vertical é apresentada, respectivamente, nas Figuras 11.2 e 11.3.



o hidrogeológico com os respectivos



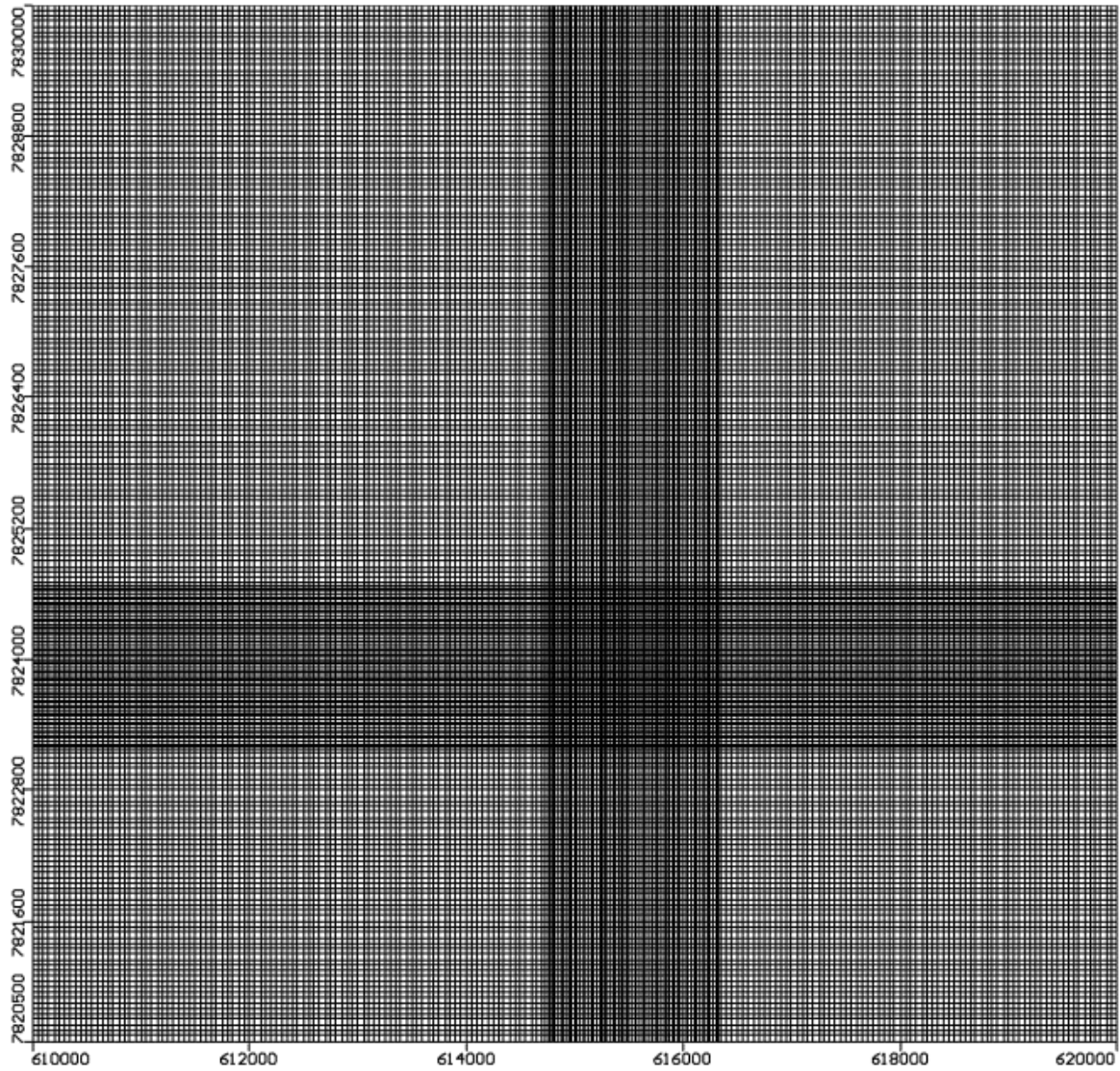
### 11.2.2 Consideração temporal

O modelo hidrogeológico computacional foi desenvolvido em uma condição temporal estacionária, portanto adotando-se um regime de fluxo permanente no qual os valores das cargas hidráulicas variam espacialmente, porém são constantes no tempo. Dessa maneira, os resultados gerados a partir deste modelo foram baseados em valores médios representativos de um ano hidrológico. Assume-se, portanto, que a oscilação da carga hidráulica e das vazões nos períodos chuvosos e secos seja razoavelmente pequena.

### 11.2.3 Malha de cálculo

O modelo computacional desenvolvido para a área de entorno da Mina Lapa Vermelha foi estruturado em uma malha irregular de cálculo, com cerca de 200 colunas, 200 linhas e 31 camadas subhorizontais. 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. Uma representação horizontal da malha de cálculo alocada sobre a área de estudo entre os pontos de coordenadas UTM (610.000, 7.820.500) e (620.000, 7.830.000) m está apresentada na Figura 11.4.

Vale ressaltar que no momento do refinamento da malha, optou-se por gerar uma rede com as menores células possíveis, sem comprometer a capacidade do computador em solucionar as equações de fluxo. Tal procedimento foi adotado porque, segundo Haitjema *et. al.* (2001), a utilização de células com dimensões grandes pode dificultar a representação das condições de contorno, como poços, córregos e rios, além de comprometer a exatidão dos resultados.



**Figura 11.4** - Malha de cálculo adotada no modelo hidrogeológico computacional (200 colunas, 200 linhas e 31 camadas – Célula típica com 50×50×10 m).

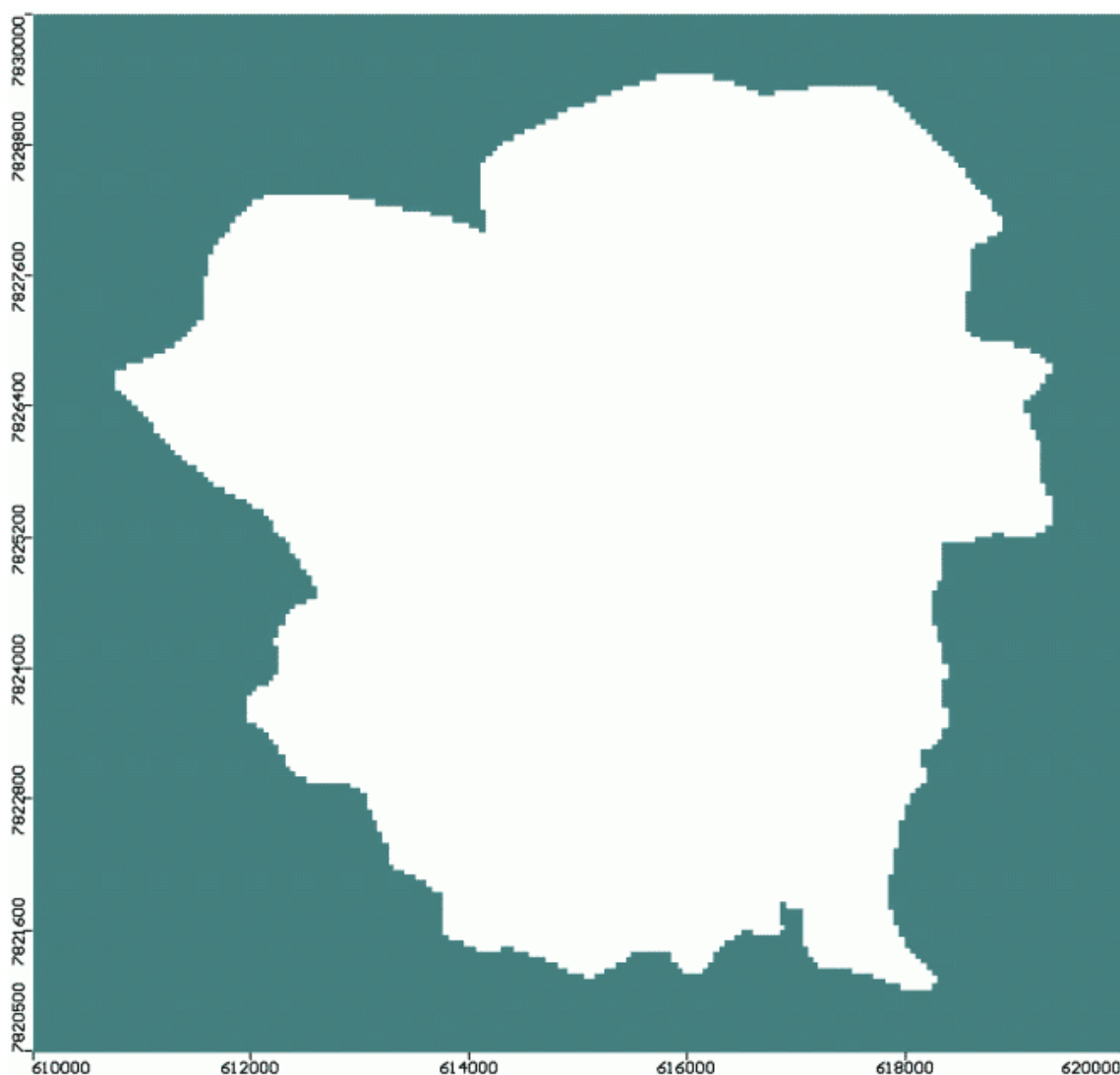
A distribuição vertical da espessura das 31 (trinta e uma) camadas da malha de cálculo está apresentada na Tabela 11.1.

**Tabela 11.1** - Distribuição da malha de cálculo na direção vertical; caracterização das camadas, por cotas altimétricas, na área do modelo.

Camada	Cotas (metros)	Espessura (metros)	Camada	Cotas (metros)	Espessura (metros)
1 <sup>a</sup>	880 - 870	10	17 <sup>a</sup>	765 - 760	5
2 <sup>a</sup>	870 - 860	10	18 <sup>a</sup>	760 - 752	8
3 <sup>a</sup>	860 - 850	10	19 <sup>a</sup>	752 - 744	8
4 <sup>a</sup>	850 - 840	10	20 <sup>a</sup>	744 - 736	8
5 <sup>a</sup>	840 - 830	10	21 <sup>a</sup>	736 - 728	8
6 <sup>a</sup>	830 - 820	10	22 <sup>a</sup>	728 - 720	8
7 <sup>a</sup>	820 - 810	10	23 <sup>a</sup>	720 - 710	10
8 <sup>a</sup>	810 - 805	5	24 <sup>a</sup>	710 - 703	7
9 <sup>a</sup>	805 - 800	5	25 <sup>a</sup>	703 - 696,5	6,5
10 <sup>a</sup>	800 - 795	5	26 <sup>a</sup>	696,5 - 690	6,5
11 <sup>a</sup>	795 - 790	5	27 <sup>a</sup>	690 - 683	7
12 <sup>a</sup>	790 - 785	5	28 <sup>a</sup>	683 - 676,5	6,5
13 <sup>a</sup>	785 - 780	5	29 <sup>a</sup>	677 - 670	7
14 <sup>a</sup>	780 - 775	5	30 <sup>a</sup>	670 - 660	10
15 <sup>a</sup>	775 - 770	5	31 <sup>a</sup>	660 - 620	40
16 <sup>a</sup>	770 - 765	5			

#### 11.2.4 Definição das condições de contorno

Inicialmente, inseriu-se o limite da área a ser estudada dentro da malha de cálculo já determinada no *Visual Modflow* (Guiguer & Franz, 1998). As células situadas externamente aos limites da região de interesse foram classificadas como inativas, ou seja, com fluxo igual a zero, sendo esta representação demonstrada na Figura 11.5.



**Figura 11.5** - Definição do domínio de cálculo, com a indicação das células ativas, em branco, e inativas em verde.

Após a definição do domínio de cálculo do modelo hidrogeológico computacional, seguiu-se para determinação das condições de contorno do mesmo.

Primeiramente, o córrego José Maria, demarcador do limite leste da área em apreço, 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. As perdas de carga existentes entre o sistema de água subterrânea e esta drenagem superficial, representadas em termos de condutância, foram consideradas constantes ao longo de todo o leito do córrego José Maria, de tal forma

que no modelo hidrogeológico computacional utilizou-se um valor de condutância igual a  $10.000 \text{ m}^2/\text{dia}$ .

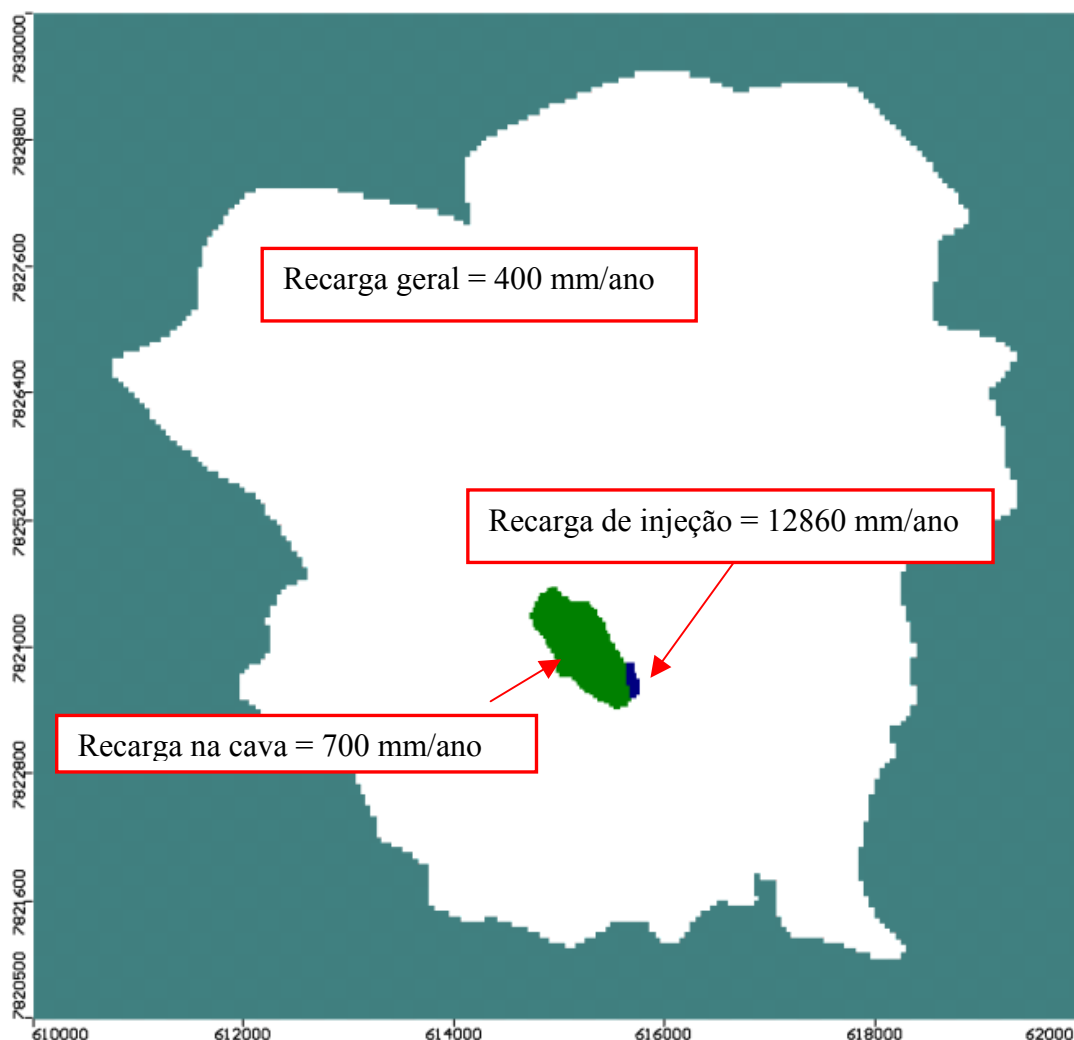
A região da cava também foi acomodada no modelo hidrogeológico computacional através do “pacote” dreno. Neste caso, para representar a situação atual, foi atribuída a este dreno uma cota de drenagem de 735 m, que corresponde ao *pit* atual da cava da Mina Lapa Vermelha a 735 m. Foram lançados, também, anéis de drenagem nos taludes da cava, os quais tiveram suas cotas de drenagem variando de acordo com a topografia.

A única fonte de recarga no sistema de fluxo subterrâneo em questão é, como visto na descrição do modelo hidrogeológico conceitual, proveniente da precipitação pluvial total. Dessa maneira, inicialmente, 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  $32 \text{ m}^3/\text{h}$ , e re-injetada em uma dolina adjacente. Esta condição foi acomodada no modelo hidrogeológico computacional através do acréscimo de um fator adicional de recarga de  $32 \text{ m}^3/\text{h}$  sobre a região de injeção, ou seja, sobre a dolina em questão. Para tanto, a recarga de injeção nesta dolina foi calculada da seguinte maneira:

- área de injeção =  $22.500 \text{ m}^2$  (referente a 36 células localizadas sobre a dolina);
- recarga de injeção =  $32 \text{ m}^3/\text{h} / 22.500 \text{ m}^2 = 0,00142 \text{ m}/\text{h} = 1,42 \text{ mm}/\text{h}$ ;
- recarga de injeção =  $1,42 \text{ mm}/\text{h} \times 365 \text{ dias}/\text{ano} \times 24 \text{ horas}/\text{dia} = 12.458,66 \text{ mm}/\text{ano}$ ;
- e,
- recarga final na dolina de injeção =  $12.458,66 + 400 = 12.858,66 \text{ mm}/\text{ano} \cong 12.860 \text{ mm}/\text{ano}$ .

Assim, as diferentes zonas de recarga, definidas no procedimento de calibração, estão apresentadas na Figura 11.6 a seguir.



**Figura 11.6** - Valores de recarga adotados, após a calibração, no modelo hidrogeológico computacional.

### 11.2.5 Parâmetros hidráulicos

Como o modelo hidrogeológico computacional foi desenvolvido considerando um regime estacionário de fluxo, as cargas hidráulicas não variam em relação ao tempo e, conseqüentemente, não há alteração no armazenamento de água no meio. Nesta condição, os únicos parâmetros que afetam a distribuição espacial das cargas hidráulicas são a condutividade hidráulica e a recarga, sendo que esta já foi

assumida como condição de contorno. Resta, portanto, a descrição da condutividade hidráulica.

No modelo hidrogeológico computacional, a discretização dos diferentes materiais foi obtida a partir das seções geradas mediante os furos de sondagem. A condutividade hidráulica de cada unidade hidroestratigráfica foi determinada, inicialmente, a partir dos valores registrados na literatura e mediante os testes de bombeamento realizados na região pela COPASA.

Como afirmado neste trabalho, 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 hidroestratigráficas, correspondendo às fraturas rasas e às fraturas profundas.

A porção do sistema de fluxo que contribui com água para um poço ou um corpo de água superficial é definida como zona de contribuição. Mediante os resultados das atividades realizadas através da aplicação de traçadores corantes na região em apreço, pôde-se identificar a zona de contribuição da surgência do Tadinho. Dessa forma, no modelo hidrogeológico computacional, foi incorporada uma fratura conectando hidráulicamente a dolina de injeção, localizada nos arredores 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 hidroestratigráfica diferenciada, uma vez que apresenta condutividade hidráulica superior às demais fraturas.

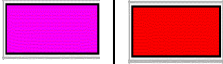






Concluindo, ainda, a descrição dos parâmetros hidráulicos da região de influência da Mina Lapa Vermelha, merece destaque, no presente momento, a lagoa central de Lagoa Santa. Segundo Parizzi *et. al.* (1998), esta lagoa é formada por rochas argilosas que são impermeáveis e, portanto, retém a água. Por 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.

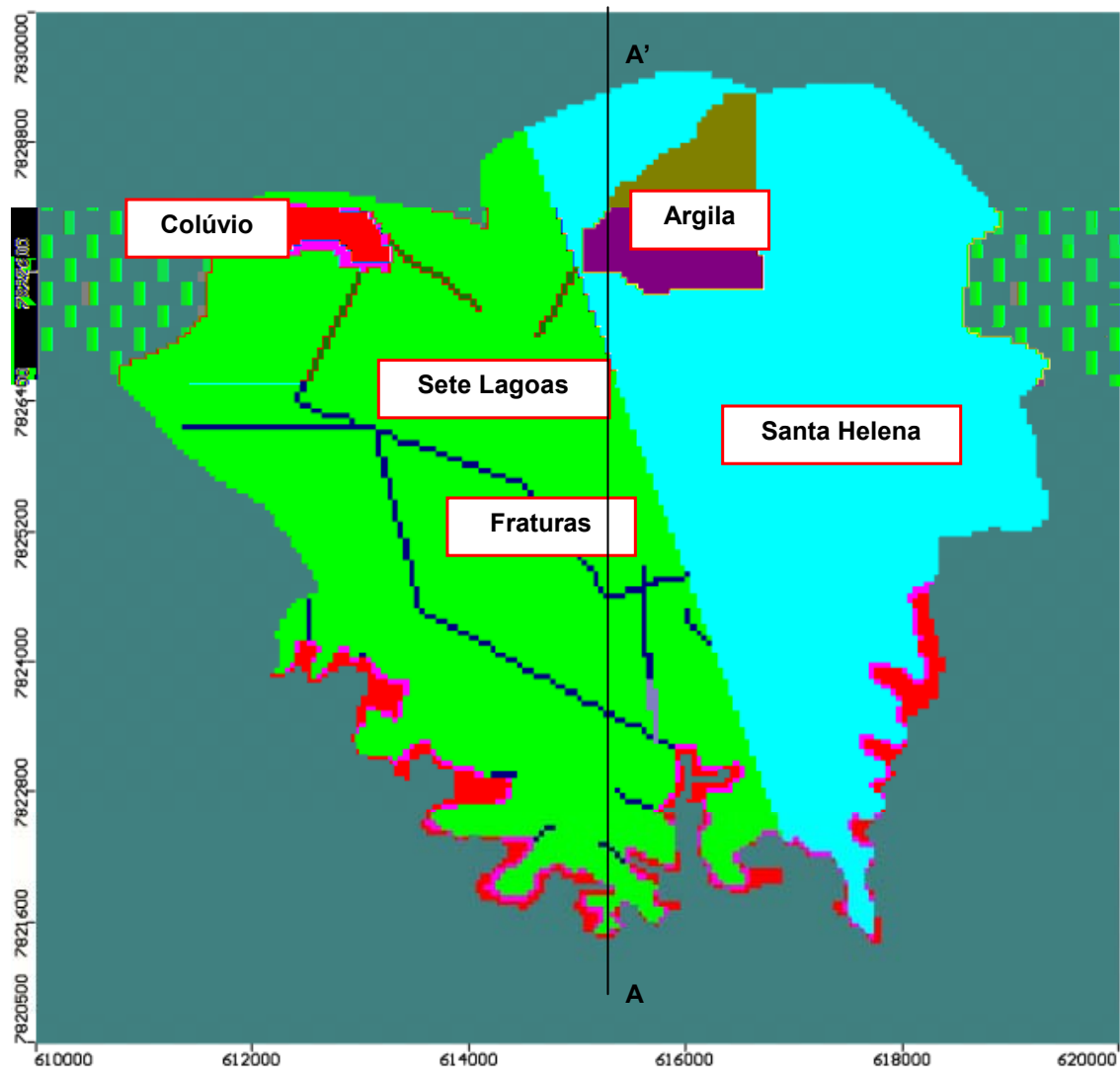
Resumindo, as sete diferentes unidades hidroestratigráficas adotadas no modelo hidrogeológico computacional, com os respectivos valores de condutividade

hidráulica, são caracterizadas na Tabela 11.2 e apresentadas nas Figuras 11.7 e 11.8. Vale lembrar que por não participar do estudo de modelagem, o embasamento cristalino não constitui uma unidade hidroestratigráfica.

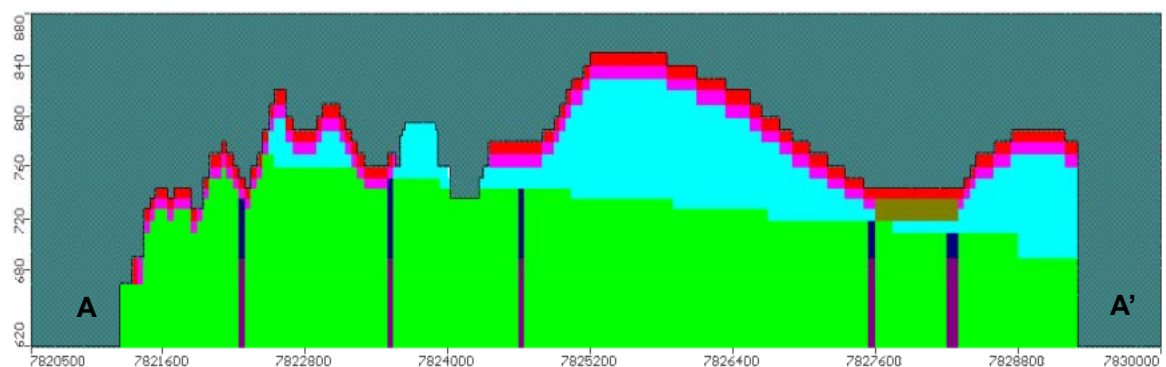
Com relação à anisotropia da condutividade hidráulica, admitiu-se como premissa não haver diferenciação entre as propriedades nas componentes de  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ .

**Tabela 11.2** - Caracterização das sete unidades hidro-estratigráficas adotadas no modelo hidrogelológico computacional, com a indicação dos respectivos valores de condutividade hidráulica.

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



**Figura 11.7** - Representação em planta dos domínios das unidades hidroestratigráficas existentes na região de interesse do modelo (24ª camada).



**Figura 11.8** - Representação em corte vertical, na seção A-A' (Figura 11.7) das unidades hidroestratigráficas existentes na região de interesse do modelo. (Obs.: dimensão vertical ampliada em dez vezes com relação à dimensão horizontal).

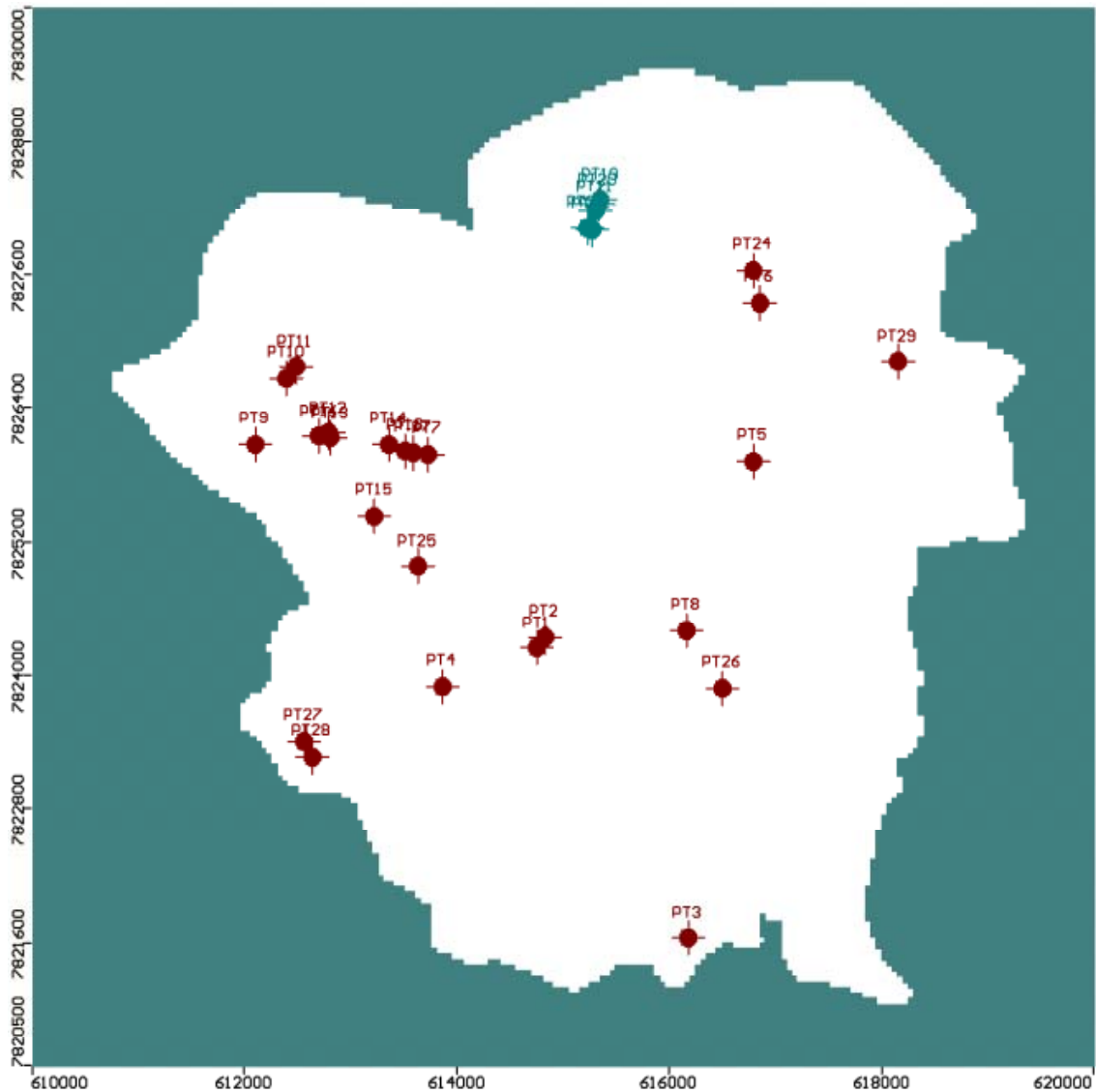
### 11.2.6 Poços tubulares de bombeamento

A região de influência da Mina Lapa Vermelha é abastecida predominantemente por água subterrânea através de poços tubulares privados e públicos. No modelo hidrogeológico computacional foram acomodados 29 poços tubulares, cuja localização e vazões estão apresentadas respectivamente na Tabela 11.3 e na Figura 11.9.

**Tabela 11.3** - Identificação dos poços tubulares, com suas respectivas vazões médias, acomodadas no modelo hidrogeológico computacional.

Identificação	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /dia)	Identificação	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /dia)
PT1	614.752,60	7.824.239,00	25,00	PT16	612.700,00	7.826.140,00	78,34
PT2	614.831,00	7.824.342,00	168,00	PT17	613.590,00	7.826.000,00	1.267,49
PT3	616.180,00	7.821.635,00	288,00	PT18	613.515,00	7.826.010,00	864,00
PT4	613.870,00	7.823.895,00	168,00	PT19*	615.355,00	7.828.270,00	570,24
PT5	616.800,00	7.825.920,00	24,00	PT20*	615.335,00	7.828.230,00	1.328,83
PT6	616.855,00	7.827.345,00	1.233,79	PT21*	615.315,00	7.828.165,00	1.728,00
PT7	613.735,00	7.825.980,00	656,64	PT22*	615.285,00	7.828.008,00	2.160,00
PT8	616.160,00	7.824.400,00	216,00	PT23*	615.230,00	7.828.020,00	2.880,00
PT9	612.110,00	7.826.070,00	216,00	PT24	616.795,00	7.827.635,00	2.160,00
PT10	612.400,00	7.826.670,00	374,11	PT25	613.640,00	7.824.980,00	720,00
PT11	612.490,00	7.826.770,00	480,00	PT26	616.510,00	7.823.880,00	240,00
PT12	612.800,00	7.826.170,00	149,47	PT27	612.562,00	7.823.406,00	432,00
PT13	612.815,00	7.826.130,00	240,00	PT28	612.645,00	7.823.267,00	1.188,00
PT14	613.360,00	7.826.070,00	56,16	PT29	618.165,00	7.826.817,00	744,00
PT15	613.230,00	7.825.430,00	65,66				

\* Correspondem a poços inativos.



**Figura 11.9 -** Localização dos poços tubulares, acomodados no modelo hidrogeológico computacional.

Os poços grafados em vermelho representam poços ativos e, os verdes, inativos.

### **11.3 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 com os valores observados em campo, através do programa de monitoramento hidrológico e hidrogeológico. Dessa maneira, o procedimento de calibração consiste na variação sistemática de alguns parâmetros do

modelo hidrogeológico computacional, dentro de intervalos de valores previamente estabelecidos. Busca-se, portanto, ajustar os valores calculados de carga hidráulica e de vazões de água com os respectivos valores medidos através do monitoramento de campo, tendo sempre como meta alcançar a menor discrepância entre eles.

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 hidroestratigráficas e as taxas efetivas de recarga do aquífero. Assim, no caso do presente estudo, a calibração foi iniciada com a alteração do valor da condutividade hidráulica das unidades hidroestratigráficas, 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). Para tanto foram identificados 25 pontos de nascentes nesta carta topográfica, os quais foram verificados em campo. Além desses registros, foram cadastradas, de forma inédita, três nascentes, como apresentado na Tabela 11.4 a seguir. Destaca-se que todos os pontos de nascente acima descritos referem-se à situação com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota 735 m, ou seja, à situação de campo atual.

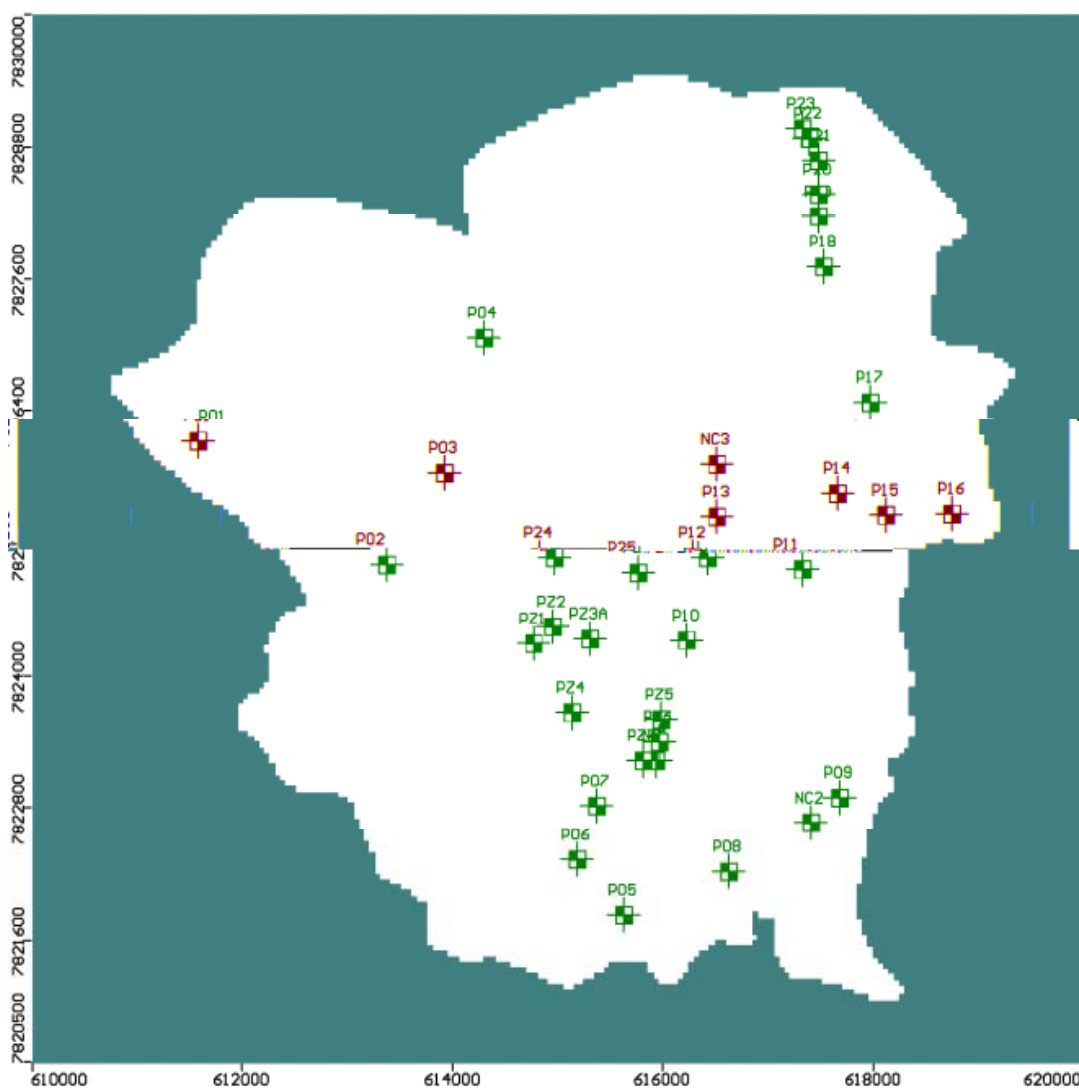
**Tabela 11.4 -** Pontos utilizados para a calibração do modelo hidrogeológico computacional.

Identificação	Fonte	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Z observação (m)	Cota d'água (m)
NC1	UFMG	615.944	7.823.230	720,5	720,5
NC2	UFMG	617.407	7.822.663	736,0	736,0
NC3	UFMG	616.653	7.825.918	790,0	790,0
P01	IBGE	611.717	7.826.127	750,0	750,0
P02	IBGE	613.372	7.825.018	740,0	740,0
P03	IBGE	614.063	7.825.842	765,0	765,0
P04	IBGE	614.302	7.827.072	750,0	750,0
P05	IBGE	615.633	7.821.828	740,0	740,0
P06	IBGE	615.182	7.822.329	760,0	760,0
P07	IBGE	615.371	7.822.819	780,0	780,0
P08	IBGE	616.628	7.822.224	700,0	700,0
P09	IBGE	617.691	7.822.900	740,0	740,0
P10	IBGE	616.225	7.824.325	796,0	796,0
P11	IBGE	617.331	7.824.971	780,0	780,0
P12	IBGE	616.423	7.825.076	814,0	814,0
P13	IBGE	616.661	7.825.446	800,0	800,0
P14	IBGE	617.801	7.825.661	760,0	760,0
P15	IBGE	618.272	7.825.454	740,0	740,0
P16	IBGE	618.894	7.825.466	760,0	760,0
P17	IBGE	617.974	7.826.477	767,0	767,0
P18	IBGE	617.534	7.827.713	760,0	760,0
P19	IBGE	617.481	7.828.175	760,0	760,0
P20	IBGE	617.484	7.828.375	760,0	760,0
P21	IBGE	617.491	7.828.671	760,0	760,0
P22	IBGE	617.395	7.828.875	760,0	760,0
P23	IBGE	617.336	7.828.973	760,0	760,0
P24	IBGE	614.976	7.825.073	800,0	800,0
P25	IBGE	615.768	7.824.932	820,0	820,0

Além dos pontos anteriormente mencionados, também foram utilizados no processo de calibração os dados de sete piezômetros instalados no entorno da cava da Mina Lapa Vermelha, sendo estes apresentados na Tabela 11.5. A distribuição de todos os pontos de calibração utilizados no modelo hidrogeológico computacional é exposta na Figura 11.10.

**Tabela 11.5** - Dados dos piezômetros utilizados para a calibração do modelo hidrogeológico computacional.

Número	Coordenadas (m)			Cota do meio do filtro (m)	Carga Hidráulica (m)
	UTM-E	UTM-N	Z		
PZ-1	614.767	7.824.300	754,2	691,0	751,0
PZ-2	614.952	7.824.446	750,7	688,0	743,0
PZ-3A	615.315	7.824.332	752,9	668,0	732,0
PZ-4	615.141	7.823.660	787,2	687,0	748,0
PZ-5	615.981	7.823.598	760,4	661,0	724,0
PZ-6	615.967	7.823.402	739,6	645,0	727,0
PZ-7	615.814	7.823.232	745,1	659,0	715,0

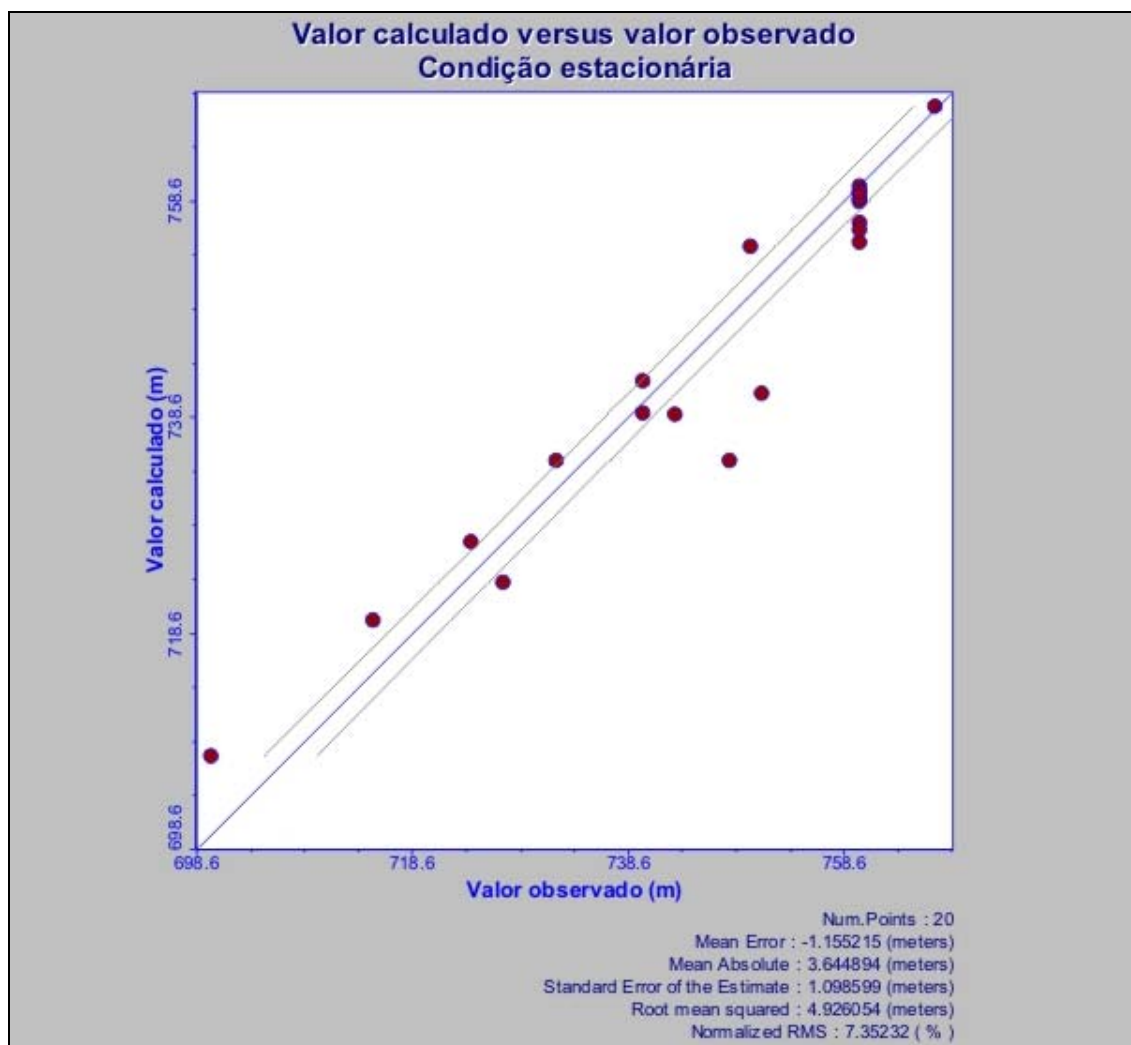


**Figura 11.10** - Distribuição dos pontos utilizados na calibração do modelo hidrogeológico computacional.

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 ali instalada; e, 3) principalmente, à vazão do *sump* da cava. Auxiliando no processo de calibração, 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.

Analisando-se o impacto da variação dos valores das condutividades hidráulicas sobre as cargas hidráulicas e as vazões, percebeu-se que as leituras nos piezômetros e as vazões de saída da surgência do Tadinho e do córrego do Cafundó ainda não estavam bem ajustadas com os valores de campo. Dessa forma, constatou-se que somente a mudança nos valores das condutividades hidráulicas não seria suficiente para possibilitar a convergência entre os dados calculados pelo modelo hidrogeológico computacional e aqueles obtidos em campo. Mediante isso, seguiu-se, então, para a alteração dos valores de recarga.

Ao modificar adequadamente o valor da recarga, foi possível criar uma melhor relação entre valores medidos em campo das cargas hidráulicas e das vazões e os valores calculados pelo modelo hidrogeológico computacional. Produziu-se, assim, um modelo hidrogeológico computacional calibrado para a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota 735 m, sendo sua curva de calibração apresentada na Figura 11.11. Vale ressaltar que mesmo variando a condição de recarga, esta permaneceu coerente com o intervalo de confiança estipulado pelo estudo do balanço hídrico.



**Figura 11.11** - Curva de calibração – Comparação entre as cargas hidráulicas medidas e simuladas no modelo calibrado.

Com relação às cargas hidráulicas, o modelo hidrogeológico computacional foi considerado calibrado, apresentando um erro normalizado de 7,35%. Este erro, considerado satisfatório, corresponde à melhor situação de calibração encontrada, expressando os melhores valores de carga hidráulica para os piezômetros instalados na circunvizinhança da Mina Lapa Vermelha.

No que diz respeito ao fluxo subterrâneo ao qual o erro normalizado de 7,35% é extensivo, o modelo hidrogeológico computacional foi assumido como calibrado quando a vazão de saída nos drenos da cava aproximou-se razoavelmente bem da vazão do *sump* da cava da Mina Lapa Vermelha. Além desse valor, analisaram-se, paralelamente, as saídas em alguns pontos de monitoramento, tais como: calha Parshal localizada no córrego Cafundó e régua linimétrica instalada na surgência do Tadinho,

cujos valores de vazão média são, respectivamente, da ordem de 4 l/s (360 m<sup>3</sup>/dia) e 47 l/s (4061 m<sup>3</sup>/dia). Uma comparação entre os valores das vazões medidas em campo e os resultados simulados pelo modelo hidrogeológico computacional calibrado para a cava localizada na cava de 735 m está apresentada na Tabela 11.6. Complementando ainda este estudo, foram verificados qualitativamente alguns corpos d'água superficiais, reforçando a credibilidade do modelo hidrogeológico computacional. Os resultados desta análise para a cava localizada na cava de 735 m estão apresentados na Tabela 11.7.

**Tabela 11.6** - Resultado da calibração - Comparação entre as vazões de água medidas no campo e simuladas pelo modelo hidrogeológico computacional calibrado.

Itens de comparação	Vazão d'água (m <sup>3</sup> /dia)		
	Cava da mina (m <sup>3</sup> /dia)	Surgência do Tadinho (m <sup>3</sup> /dia)	Cafundó (m <sup>3</sup> /dia)
Valores medidos em campo	768	4061.0	360
Valores simulados pelo modelo	932,23	3362,6	59.139
Variação (%)	(+ 21 %)	(- 17 %)	(-83%)

**Tabela 11.7** - Resultado da calibração – Análise qualitativa das vazões de água medidas no campo e simuladas pelo modelo hidrogeológico computacional calibrado.

Corpos d'água analisados	Análise qualitativa	
	Situação encontrada no campo	Situação referente ao modelo calibrado
Ribeirão da Mata	úmida	úmida
Lagoa central de Lagoa Santa	úmida	úmida
Córrego Cafundó	úmida	úmida
Córrego José Maria	úmida	úmida
Lagoa Olhos D'água	úmida	úmida

## **12 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, experimentalmente, 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 717 m;
- condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 700 m;
- condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 699 m;
- condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 698 m;
- condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 697 m; e
- condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 680 m.

Deve-se ressaltar que, em todas as simulações preditivas experimentais, algumas características do modelo hidrogeológico computacional foram alteradas. A exemplo disso, cita-se a modificação a qual os drenos típicos da cava da Mina Lapa Vermelha foram sujeitos, a fim de retratar com exatidão a nova cota desta cava após o avanço das atividades de mineração. Além disso, retirou-se a recarga na dolina de injeção, uma vez que, futuramente, com o adiantamento da lavra, esta dolina não mais existirá. As demais propriedades, a saber, a condição temporal, a malha de cálculo, as condições de contorno, os parâmetros hidráulicos e as condições de bombeamento permaneceram constantes para as distintas condições de simulação hidrodinâmica.

Com relação à simulação da condição hidrodinâmica original do sistema, caracterizada pela ausência da cava da Mina Lapa Vermelha, além da retirada dos

drenos que representam a cava, as zonas de recarga também foram alteradas. Nesta configuração, o modelo hidrogeológico computacional apresenta uma única taxa de recarga, correspondendo esta a 400 mm/ano. Tal medida foi adotada em virtude da região não ser escavada e, portanto, apresentar uma maior taxa referente ao escoamento superficial. Assim como nas outras simulações computacionais, as demais propriedades do modelo hidrogeológico computacional foram preservadas nesta modelagem.

Na Tabela 12.1 é apresentada uma descrição de todos modelos hidrogeológicos computacionais gerados neste trabalho. Os resultados obtidos com a simulação dos diferentes cenários hidrogeológicos , assim como as suas análises, serão descritos a seguir.

**Tabela 12.1** - Quadro resumo das simulações hidrogeológicas computacionais.

Denominação	Descrição	Carga nos drenos da cava (m)	Zonas de recarga
Cenário 1	Condição hidrodinâmica original do sistema, sem a presença da cava.	-	Única zona de recarga com valor de 400 mm/ano.
Cenário 2	Condição atual, com a cava na cota de 735 m.	735	Três zonas de recarga, com valores de 400 mm/ano, 700 mm/ano e 12.860 mm/ano equivalentes, respectivamente, à taxa de recarga geral, à recarga na região da cava e à recarga na dolina de injeção.
	Condição futura, com a cava na cota de 717 m.	717	Dois zonas de recarga com valores de 400 mm/ano e 700 mm/ano, equivalentes, respectivamente, à taxa de recarga geral e à recarga na região da cava.
Cenário 3	Condição futura, com a cava na cota de 700 m.	700	Dois zonas de recarga com valores de 400 mm/ano e 700 mm/ano, equivalentes, respectivamente, à taxa de recarga geral e à recarga na região da cava.
	Condição futura, com a cava na cota de 699 m.	699	Dois zonas de recarga com valores de 400 mm/ano e 700 mm/ano, equivalentes, respectivamente, à taxa de recarga geral e à recarga na região da cava.
	Condição futura, com a cava na cota de 698 m.	698	Dois zonas de recarga com valores de 400 mm/ano e 700 mm/ano, equivalentes, respectivamente, à taxa de recarga geral e à recarga na região da cava.
	Condição futura, com a cava na cota de 697 m.	697	Dois zonas de recarga com valores de 400 mm/ano e 700 mm/ano, equivalentes, respectivamente, à taxa de recarga geral e à recarga na região da cava.
Cenário 4	Condição futura, com a cava na cota de 680 m.	680	Dois zonas de recarga com valores de 400 mm/ano e 700 mm/ano, equivalentes, respectivamente, à taxa de recarga geral e à recarga na região da cava.

## 12.1 Cenários hidrogeológicos

### 12.1.1 Cenário 1

Como visto na Tabela 12.1, o cenário 1 reporta a condição hidrodinâmica original do sistema, sem a presença da cava. Ao simular experimentalmente tal situação a partir do modelo calibrado para a condição hidrodinâmica atual, chegou-se aos seguintes resultados apresentados na Tabela 12.2.

**Tabela 12.2** - Resultados da simulação obtidos para o cenário 1 (condição hidrodinâmica original).

Cenário Simulado	Vazão d'Água - Saídas (m <sup>3</sup> /dia)			Aporte de Água
				(Escoamento de Base)
	(m <sup>3</sup> /dia)			
Cava da Mina	Surgência do Tadinho	Cafundó	Lagoa Central	
Original - Sem cava	-	3.150,00	42,00	4.489,00

Os resultados apresentados na Tabela 12.2 indicam as condições hidrogeológicas originais da área de influência da Mina Lapa Vermelha. Dessa forma, todos os resultados obtidos com as simulações dos distintos cenários hidrogeológicos demonstrados a seguir, foram comparados com esta situação hidrodinâmica. Assim, tornou-se possível, de maneira experimental, a determinação dos impactos ambientais já causados e os que futuramente serão provocados pelo avanço das atividades de mineração.

### 12.1.2 Cenário 2

O cenário 2, conforme Tabela 12.1, refere-se à simulação da condição hidrodinâmica atual, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 735 m, cujos resultados estão apresentados na Tabela 12.3.

**Tabela 12.3** - Resultados da simulação para o cenário com a cava a 735 m (cenário 2).

Cenário Simulado	Vazão d'Água - Saídas (m <sup>3</sup> /dia)			Aporte de Água
				(Escoamento de Base)
	Cava da Mina	Surgência do Tadinho	Cafundó	Lagoa Central
Cava a 735 m	932,23	3.362,60	59,14	4.486,10

Neste contexto, os processos de rebaixamento da cava da Mina Lapa Vermelha até a cota de 735 m proporcionaram um aumento significativo na saída de água nas surgências do Tadinho (6,75%) e Cafundó (41%), quando comparada com a simulação da condição hidrodinâmica original do sistema. Este acréscimo foi provocado pela necessidade de se injetar uma quantidade significativa de água no sistema hidrogeológico carbonático. Com relação à lagoa central de Lagoa Santa, notou-se uma diminuição pouco expressiva em seu aporte de água referente ao escoamento subterrâneo, sendo este equivalente a 0,06%. Dessa maneira, o rebaixamento do nível d'água realizado ao longo do tempo mostra, então, que os efeitos decorrentes da atividade mineradora, no que se refere à diminuição de demandas ou déficits hídricos sensíveis, pouco ou nada interferiram na hidrodinâmica do sistema hidrogeológico carbonático.

Uma visualização gráfica da distribuição potenciométrica espacial (carga hidráulica), no domínio de interesse do modelo hidrogeológico computacional, representativo do cenário em questão, é apresentado nas Figuras 12.1 e 12.2.

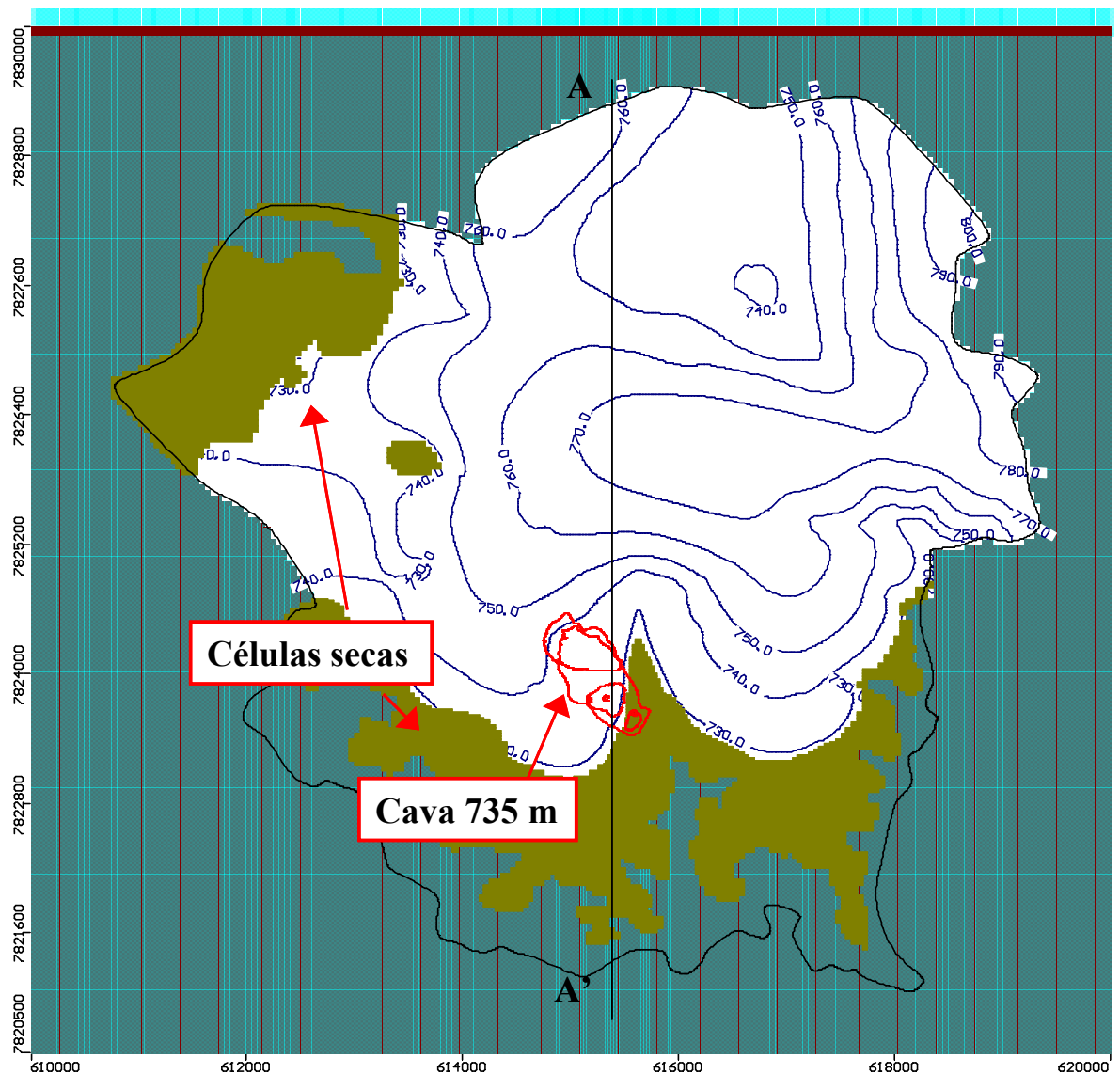
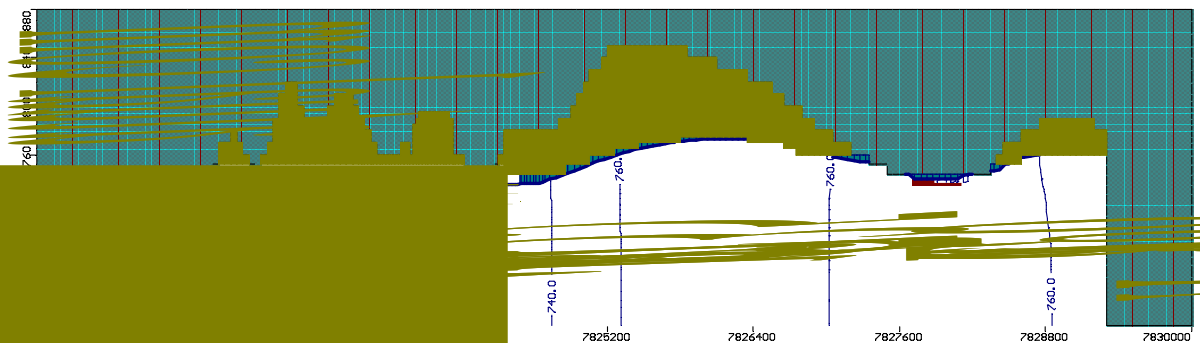


Figura 12.1 - Seção horizontal de rebaixamento do nível d'água na 21ª camada (entre 736 e 728 m) com a cava localizada na cota de 735 m (cenário 2).



Seção vertical AA' (Figura 12.1) do rebaixamento do cenário 2 com a cava localizada na cota de 735 m (cenário 2).

### 12.1.3 Cenário 3

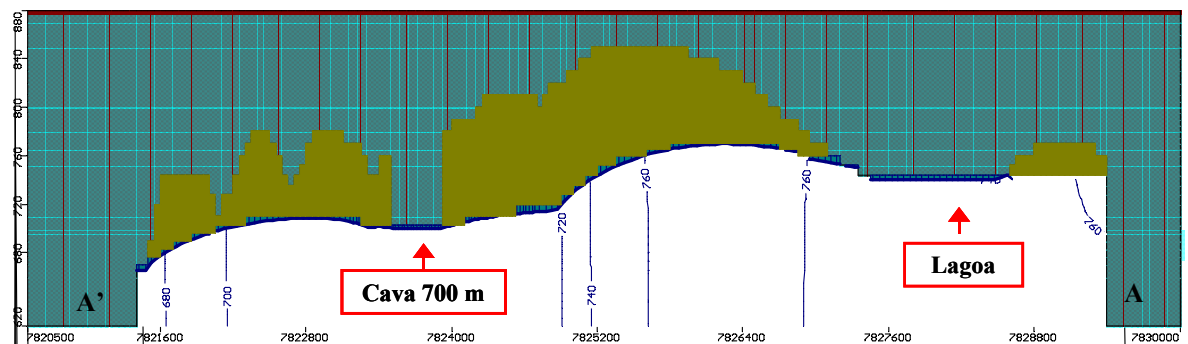
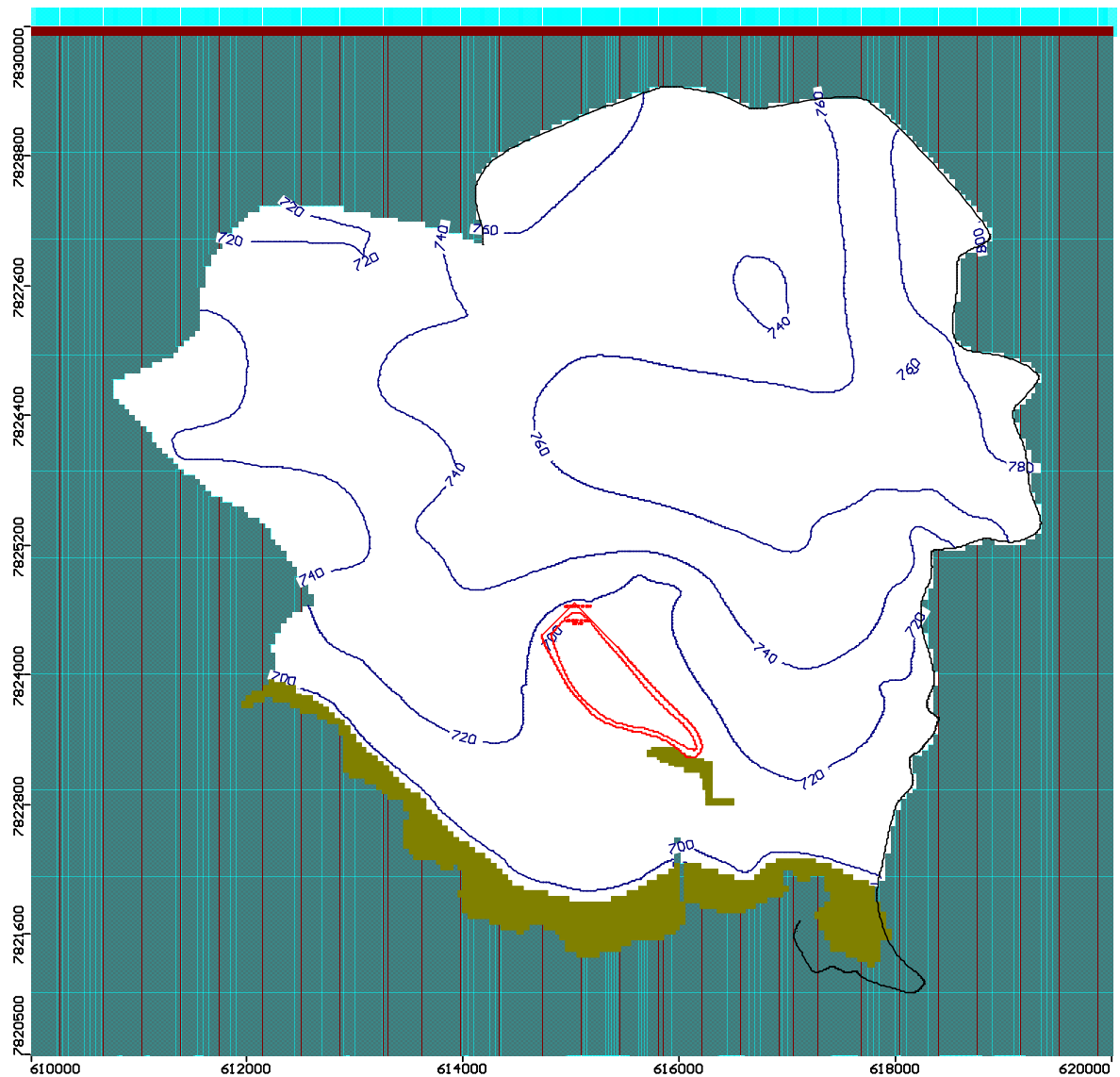
Simulando-se a condição hidrodinâmica na qual a cava da Mina Lapa Vermelha estará localizada na cota de 700 m (cenário 3), chegou-se aos resultados experimentais apresentados na Tabela 12.4.

**Tabela 12.4** - Resultados da simulação para o cenário com a cava a 700 m (cenário 3).

Cenário Simulado	Vazão d'Água - Saídas (m <sup>3</sup> /dia)			Aporte de Água (Escoamento de Base)
	Cava da Mina	Surgência do Tadinho	Cafundó	(m <sup>3</sup> /dia)
				Lagoa Central
Cava a 700 m	8.954,70	seco	seco	4.314,10

Uma visualização gráfica da distribuição potenciométrica espacial (carga hidráulica), no domínio de interesse do modelo hidrogeológico computacional, representativo do cenário em questão, é apresentada nas Figuras 12.3 e 12.4.

Ressalta-se que no momento em que a cava da Mina Lapa Vermelha estiver na cota de 700 m, a dolina de injeção terá sido lavrada e, portanto, o modelo hidrogeológico computacional característico deste cenário não apresenta uma zona de recarga diferenciada para esta dolina. Sendo assim, conforme Tabela 12.1, este modelo hidrogeológico computacional apresenta duas únicas zonas de recarga, sendo elas referentes à recarga geral e à recarga atuante na região da cava da Mina Lapa Vermelha.

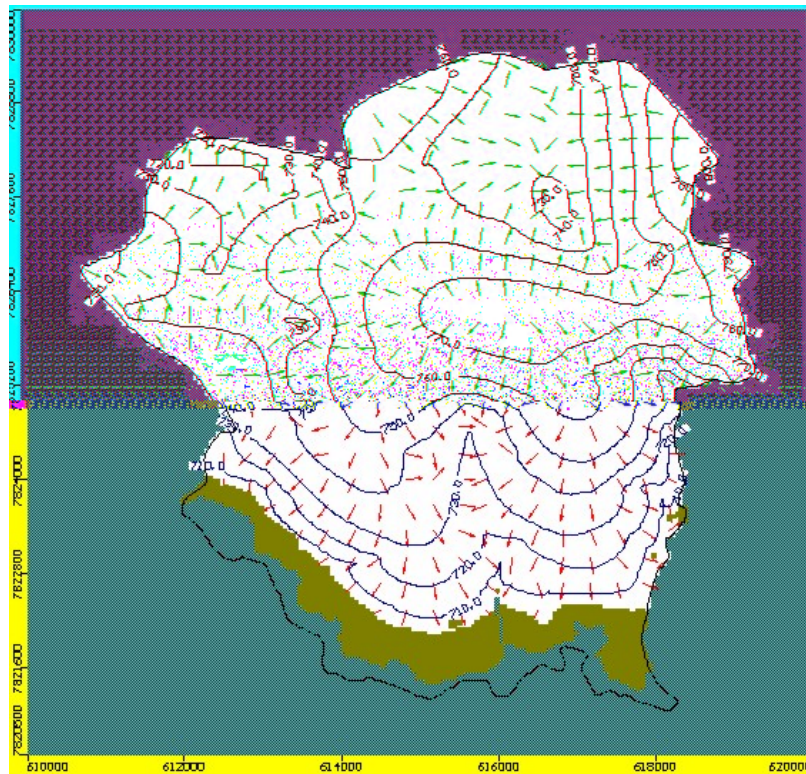


Representação em corte vertical AA' (Figura 12.3) do rebaixamento do cenário com a cava localizada na cota de 700 m (cenário 3).

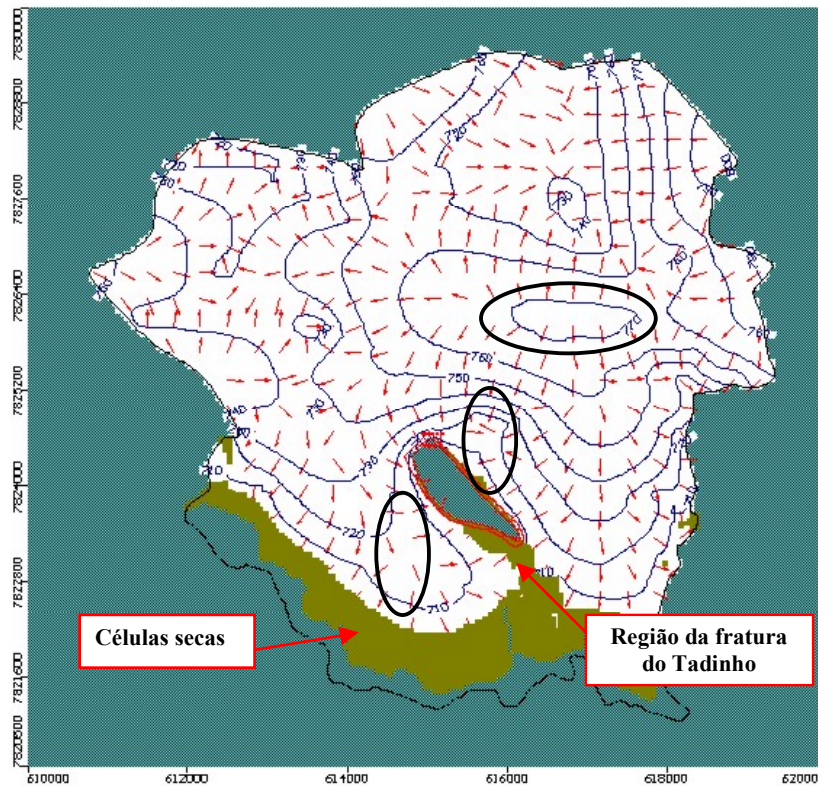
Para este cenário preditivo simulado experimentalmente, a evolução do processo de rebaixamento do lençol freático até a cota 700 m na Mina Lapa Vermelha demonstrou interferências nas surgências do Tadinho e no córrego do Cafundó, denotadas pela supressão das descargas nesses pontos. Com alusão à lagoa central de Lagoa Santa, os resultados, comparados com a situação hidrodinâmica original, indicam uma diminuição do aporte de água proveniente do escoamento de base de 3,89%.

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, na cota de 735 m, e a surgência do Tadinho, localizada na cota de 700 m. Acredita-se que, devido à sua alta condutividade hidráulica, sua atuação exerça significativa influência sobre todo o regime de fluxo da região de interesse, englobando, inclusive, a lagoa central de Lagoa Santa.

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 m<sup>3</sup>/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 passará a ocupar uma porção da zona de aeração. Sendo assim, sua taxa de contribuição ao sistema reduzir-se-á para 1.464 m<sup>3</sup>/dia de água. Esta mudança de comportamento da fratura do Tadinho, que pode ser visualizada nas Figuras 12.5 a 12.10, alterará de maneira significativa a hidrodinâmica da área de estudo, provocando, assim, uma 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.



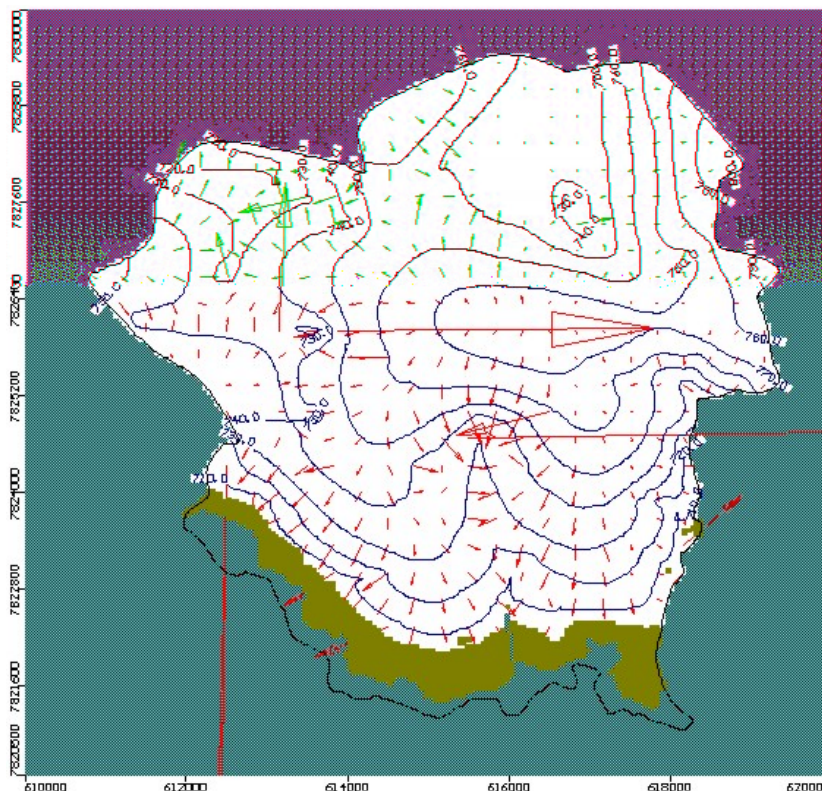
**Figura 12.5** - Representação horizontal da direção das velocidades de escoamento na 24ª camada (entre 710 e 703 m), com a cava localizada na cota de 735 m (cenário 2).



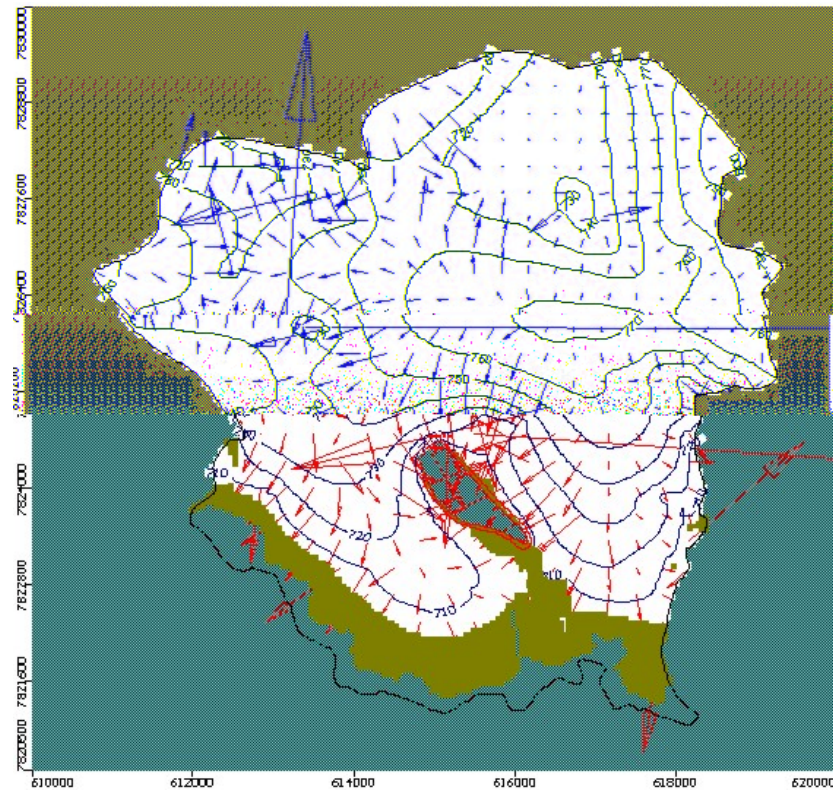
**Figura 12.6** - Representação horizontal da direção das velocidades de escoamento na 24ª camada (entre 710 e 703 m), com a cava localizada na cota de 700 m (cenário 3).

Analisando-se as Figuras 12.5 e 12.6, é possível comprovar que a fratura do Tadinho sofrerá uma alteração em seu comportamento, apresentando-se, no cenário 3 (cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 700 m), seca em parte de sua extensão (Figura 12.6). Paralelamente a esta mudança, registra-se que o prosseguimento das atividades de rebaixamento da Mina Lapa Vermelha até a cota de 700 m alterará todo o nível freático da área de estudo. Dessa forma, as curvas equipotenciais de carga hidráulica mostram-se bastante distintas nas simulações com cava da Mina Lapa Vermelha localizada nas cotas de 735 e 700 m. Estas modificações (apresentadas pelas marcações circulares das Figuras 12.5 e 12.6) são também responsáveis pela alteração ocorrida na camada coluvionar, contribuindo, assim, para redução da parcela do escoamento de base que chega à lagoa central de Lagoa Santa.

Ademais, há mudanças pontuais do vetor que representa a velocidade do escoamento subterrâneo. Dessa forma, todas as variações anteriormente citadas contribuem para modificar a configuração do fluxo hidrodinâmico da área em estudo, afetando, assim, a lagoa central de Lagoa Santa, o córrego do Cafundó e a surgência do Tadinho.

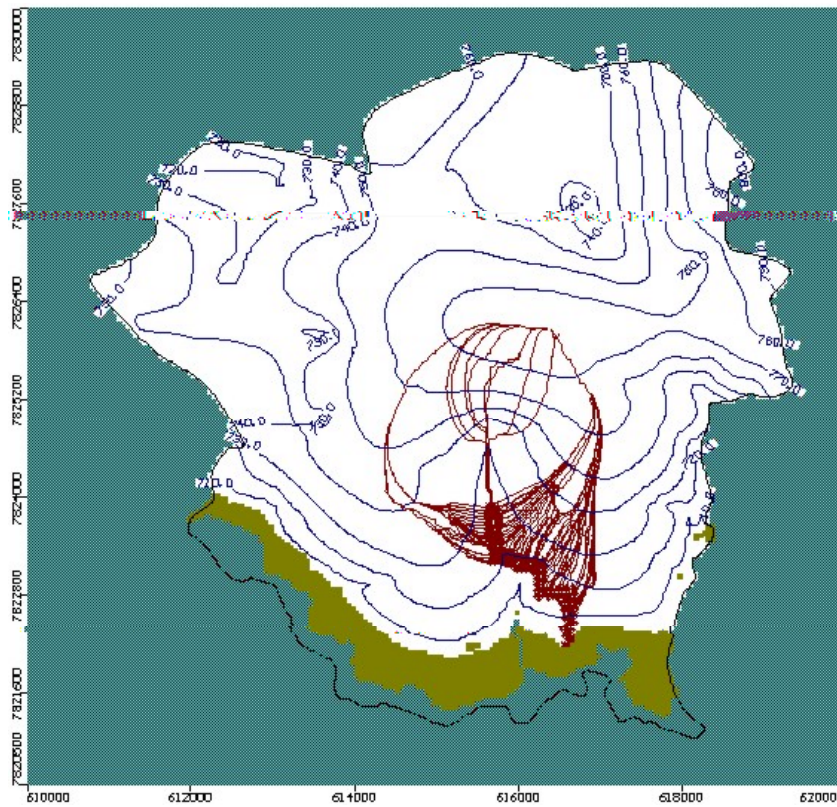


**Figura 12.7** - Representação horizontal da magnitude das velocidades de escoamento na 24ª camada (entre 710 e 703 m) com a cava localizada na cota de 735 m (cenário 2).

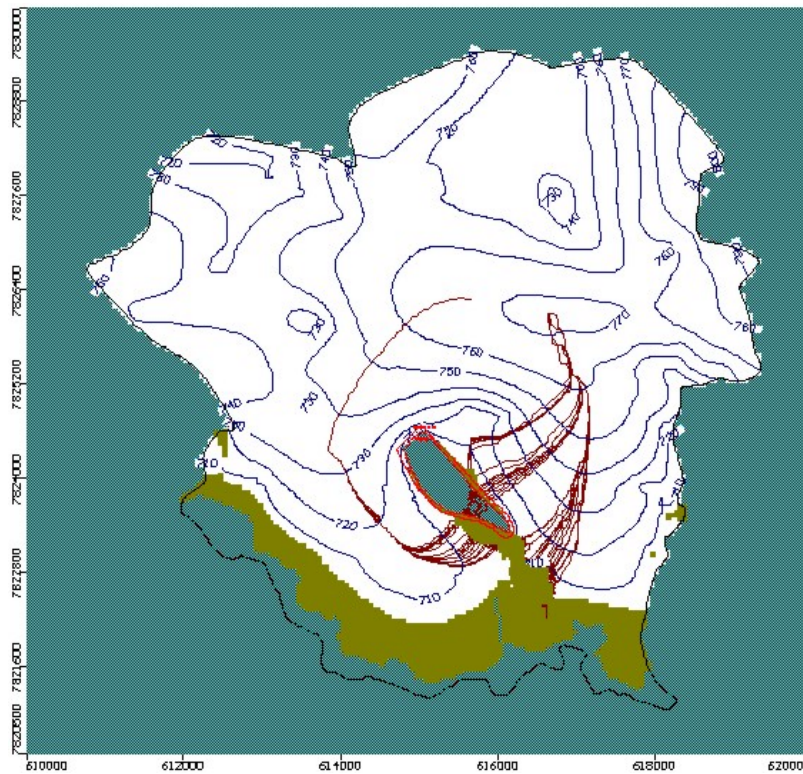


**Figura 12.8** - Representação horizontal da magnitude das velocidades de escoamento na 24ª camada (entre 710 e 703 m) com a cava localizada na cota de 700 m (cenário 3).

Como pode ser visto nas Figuras 12.7 e 12.8, há uma modificação significativa na magnitude das velocidades de escoamento, influenciando esta na configuração hidrodinâmica da região em apreço.



**Figura 12.9** - Representação horizontal do caminhamento de partículas específicas na 24ª camada (entre 710 e 703 m) com a cava localizada na cota de 735 m (cenário 2).



**Figura 12.10** - Representação horizontal do caminhamento de partículas específicas na 24ª camada (entre 710 e 703 m) com a cava localizada na cota de 700 m (cenário 3).

Evidencia-se, de acordo com as Figuras 12.9 e 12.10, que as partículas inseridas nos dois cenários de simulação hidrogeológica (cenários 2 e 3), sendo estas localizadas ao redor da fratura do Tadinho, diagnosticaram caminhos de origens diferentes, corroborando para a idéia de que aquela fratura, quando tem o seu comportamento alterado, interfere sobremaneira no sistema de escoamento subterrâneo da área de estudo. Ressalta-se que a quantidade de partículas inseridas e a sua localização espacial permaneceram constantes nas simulações referentes aos cenários 2 e 3.

Um manejo adequado da água retirada da área da cava (cerca de 9.000 m<sup>3</sup>/dia, ou 100 l/s, aproximadamente) poderá compensar os impactos hidrológicos decorrentes do rebaixamento, permitindo, assim, recompor as vazões retiradas do córrego do Cafundó, da surgência do Tadinho e as eventuais perdas d'água na lagoa central de Lagoa Santa.

#### 12.1.4 Cenário 4

Ao simular a condição hidrodinâmica com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 680 m (cenário 4), chegou-se aos resultados experimentais apresentados na Tabela 12.5.

**Tabela 12.5** - Resultados da simulação para o cenário com a cava a 680 m (cenário 4).

Cenário Simulado	Vazão d'Água - Saídas (m <sup>3</sup> /dia)			Aporte de Água
				(Escoamento de Base)
	Cava da Mina	Surgência do Tadinho	Cafundó	(m <sup>3</sup> /dia)
				Lagoa Central
Cava a 680 m	11.057,00	seco	seco	4.265,90

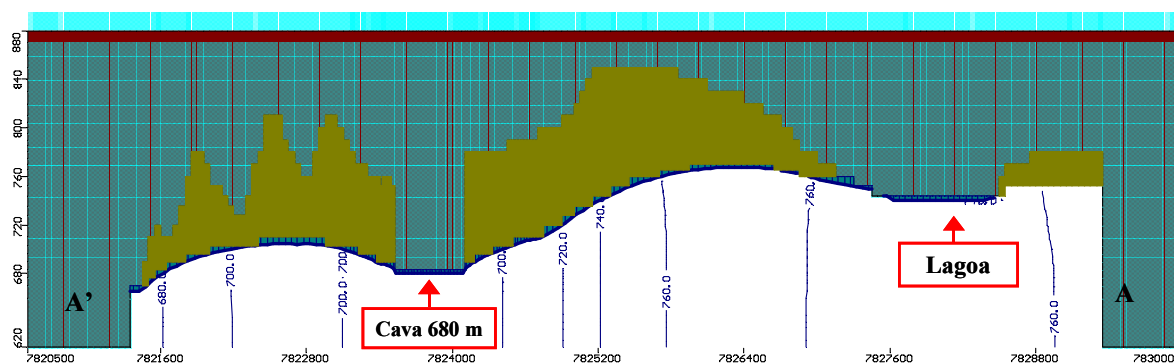
A simulação experimental dos trabalhos continuados de rebaixamento do lençol freático na Mina Lapa Vermelha para a cota de 680 m confirmou a tendência de secagem das surgências do Tadinho e do córrego do Cafundó, como já detectado no estágio com a cava localizada na cota de 700 m (cenário 3). Para a 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 de seu aporte de água subterrânea da ordem de 5%.

Ressalta-se que no momento em que a cava da Mina Lapa Vermelha estiver na cota de 680 m, a dolina de injeção terá sido lavrada e, portanto, o modelo hidrogeológico computacional característico deste cenário não apresenta uma zona de recarga diferenciada para esta dolina. Sendo assim, conforme Tabela 12.1, este modelo hidrogeológico computacional apresenta duas únicas zonas de recarga, sendo elas referentes à recarga geral e à recarga atuante na região da cava da Mina Lapa Vermelha.

Uma visualização gráfica da distribuição potenciométrica espacial (carga hidráulica), no domínio de interesse do modelo hidrogeológico computacional, representativo do cenário em questão, é apresentado nas Figuras 12.11 e 12.12.



**Figura 12.11** - Seção horizontal de rebaixamento do nível d'água na 28ª camada (entre 683 e 676,5 m) com a cava localizada na cota de 680 m (cenário 4).



**Figura 12.12** - Representação em corte vertical AA' (Figura 12.11) do rebaixamento do cenário com a cava localizada na cota de 680 m (cenário 4).

Além dos cenários hidrogeológicos descritos anteriormente, foram simuladas condições experimentais intermediárias, a fim de melhor caracterizar os possíveis impactos ambientais hidrológicos. Todos estes resultados estão apresentados resumidamente nas Tabelas 12.6 e 12.7.

**Tabela 12.6** - Resultados da simulação obtidos para os diversos cenários.

Cenários Simulados	Vazão d'Água - Saídas (m <sup>3</sup> /dia)			Aporte de Água
				(Escoamento de Base)
	Cava da Mina	Surgência do Tadinho	Cafundó	(m <sup>3</sup> /dia)
				Lagoa Central
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

**Tabela 12.7** - Comparação percentual entre os resultados das simulações dos diferentes cenários hidrodinâmicos e a condição hidrodinâmica original (sem a presença da cava).

Elemento de avaliação	Condição hidrodinâmica original (sem a cava)	Cota da cava a 735 m		Cota da cava a 717 m		Cota da cava a 700 m		Cota da cava a 699 m		Cota da cava a 698 m		Cota da cava a 697 m		Cota da cava a 680 m	
		Valor (m <sup>3</sup> /dia)	Variação percentual (%)	Valor (m <sup>3</sup> /dia)	Variação percentual (%)	Valor (m <sup>3</sup> /dia)	Variação percentual (%)	Valor (m <sup>3</sup> /dia)	Variação percentual (%)	Valor (m <sup>3</sup> /dia)	Variação percentual (%)	Valor (m <sup>3</sup> /dia)	Variação percentual (%)	Valor (m <sup>3</sup> /dia)	Variação percentual (%)
Aporte de água na lagoa central de Lagoa Santa (m <sup>3</sup> /dia).	4.489,00	4.486,10	-0,06	4414,50	-1,66	4.314,10	-3,90	4.337,50	-3,37	4.328,70	-3,57	4.328,20	-3,58	4.265,90	-4,97
Vazão da surgência do Tadinho (m <sup>3</sup> /dia)	3.150,60	3.362,60	6,73	2026,40	-35,68	Seco	-100	Seco	-100	Seco	-100	Seco	-100	Seco	-100
Vazão na calha parshal - Cafundó (m <sup>3</sup> /dia)	42,00	59,14	40,81	Seco	-100	Seco	-100	Seco	-100	Seco	-100	Seco	-100	Seco	-100

A variação percentual foi analisada a partir da condição hidrodinâmica original (sem a presença da cava).

## **12.2 Diagnóstico da lagoa central de Lagoa Santa**

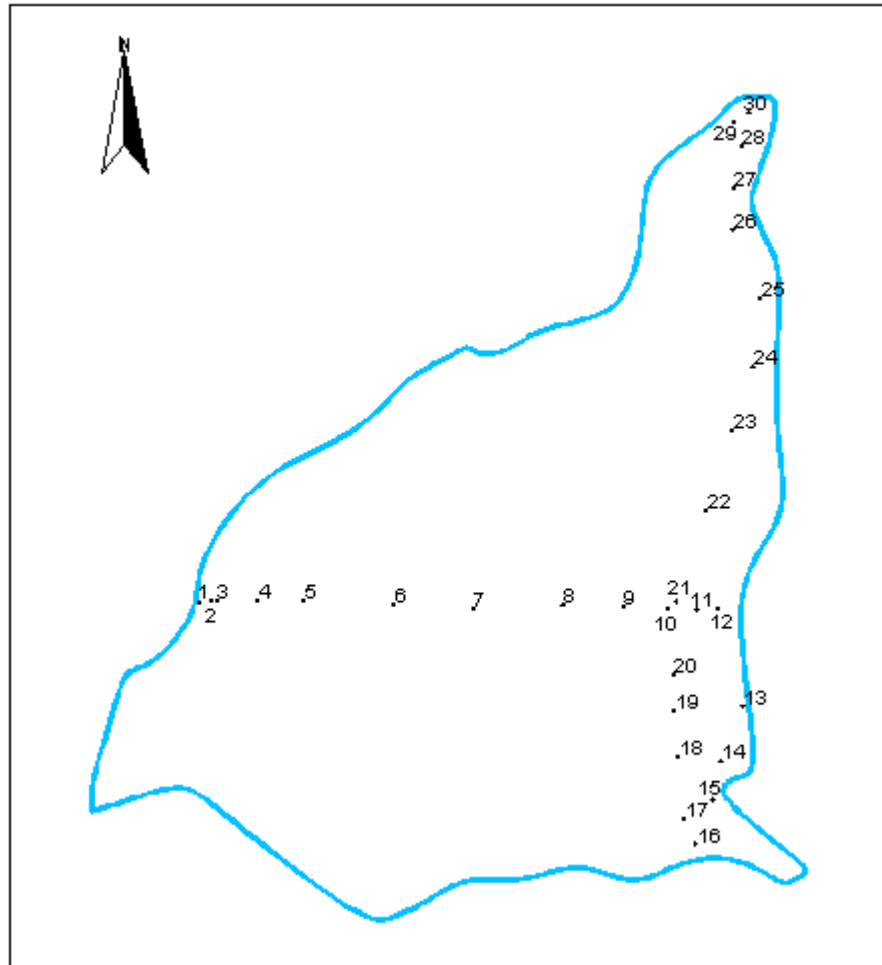
Como descrito anteriormente, os resultados da simulação experimental da condição hidrodinâmica com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 700 m (cenário 3) indicam para a lagoa central de Lagoa Santa uma diminuição de 3,89% no seu aporte de água proveniente do escoamento de base. É fundamental, portanto, a análise deste impacto, objetivando avaliar qualquer alteração que possa ocorrer na altura da lâmina d'água desta lagoa.

A fim de determinar o real impacto 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. As atividades de batimetria foram realizadas no mês de agosto de 2003, para as quais foram estabelecidas duas seções de trabalho, sendo estas direcionadas nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste. Um desenho em planta da lagoa central de Lagoa Santa é demonstrado na Figura 12.13, na qual são apresentados todos os 30 pontos coletados neste trabalho.

Após a execução da batimetria da lagoa central de Lagoa Santa, foi possível, como apresentado nas Figuras 12.13 a 12.17, determinar, em planta e em superfície, as cotas referentes ao fundo desta lagoa e, também, elaborar os seus perfis típicos. Ressalta-se que os perfis exibidos nas Figuras 12.16 e 12.17 correspondem aos perfis típicos característicos das direções Norte-Sul e Leste-Oeste, não coincidindo, portanto, com a localização dos pontos coletados nos trabalhos de batimetria.

Ademais, foram definidas algumas dimensões típicas da lagoa central de Lagoa Santa, sendo estas referentes à condição climática vigente no mês de agosto de 2003, as quais são:

- área superficial = 1.183.816,61 m<sup>2</sup>
- profundidade máxima = 6,52 m



**Figura 12.13** - Pontos coletados nos trabalhos de batimetria realizada na lagoa central de Lagoa Santa, no mês de agosto de 2003.

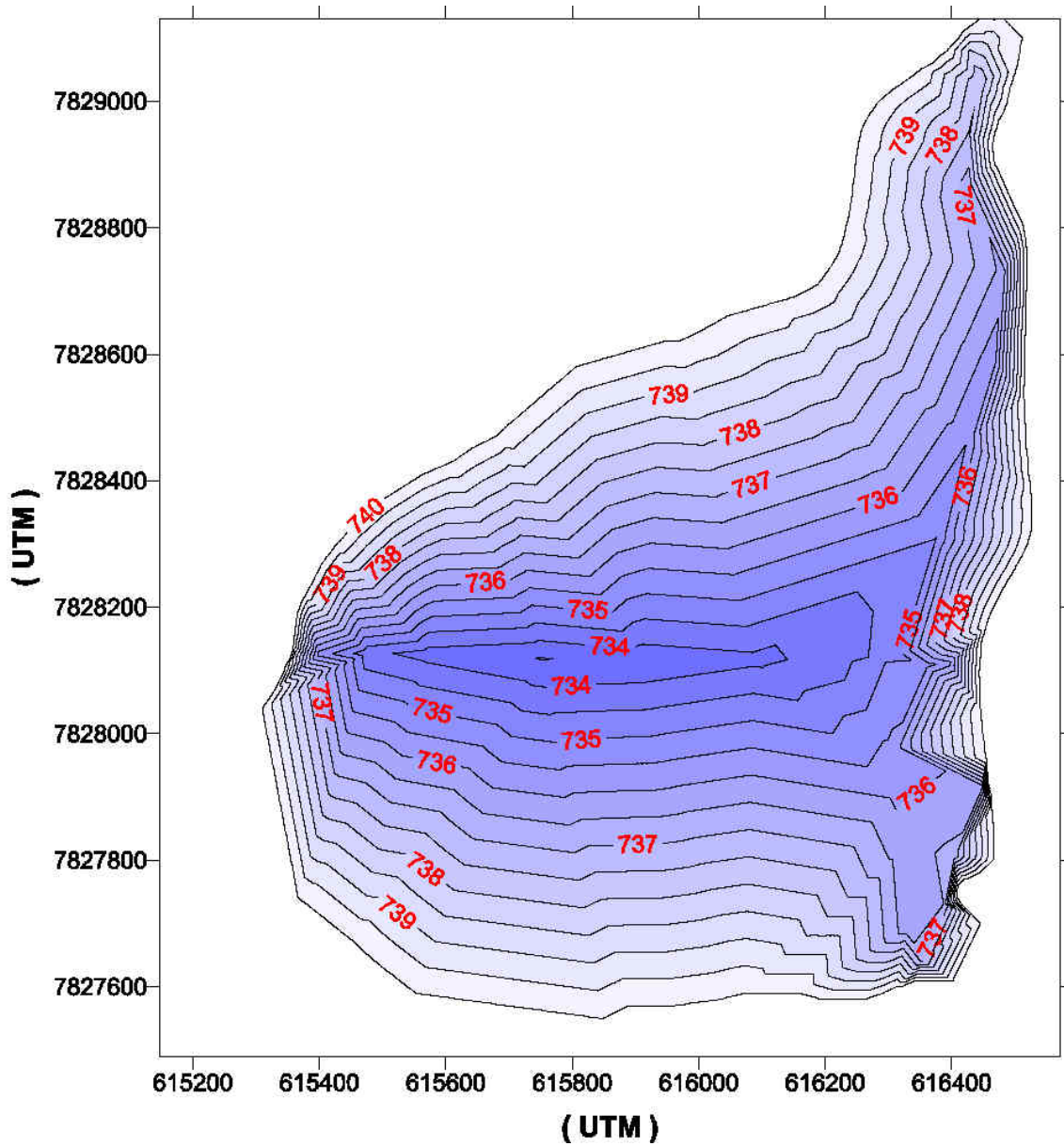


Figura 12.14 - Isolinhas representando as cotas, em metros, do fundo da lagoa central de Lagoa Santa.

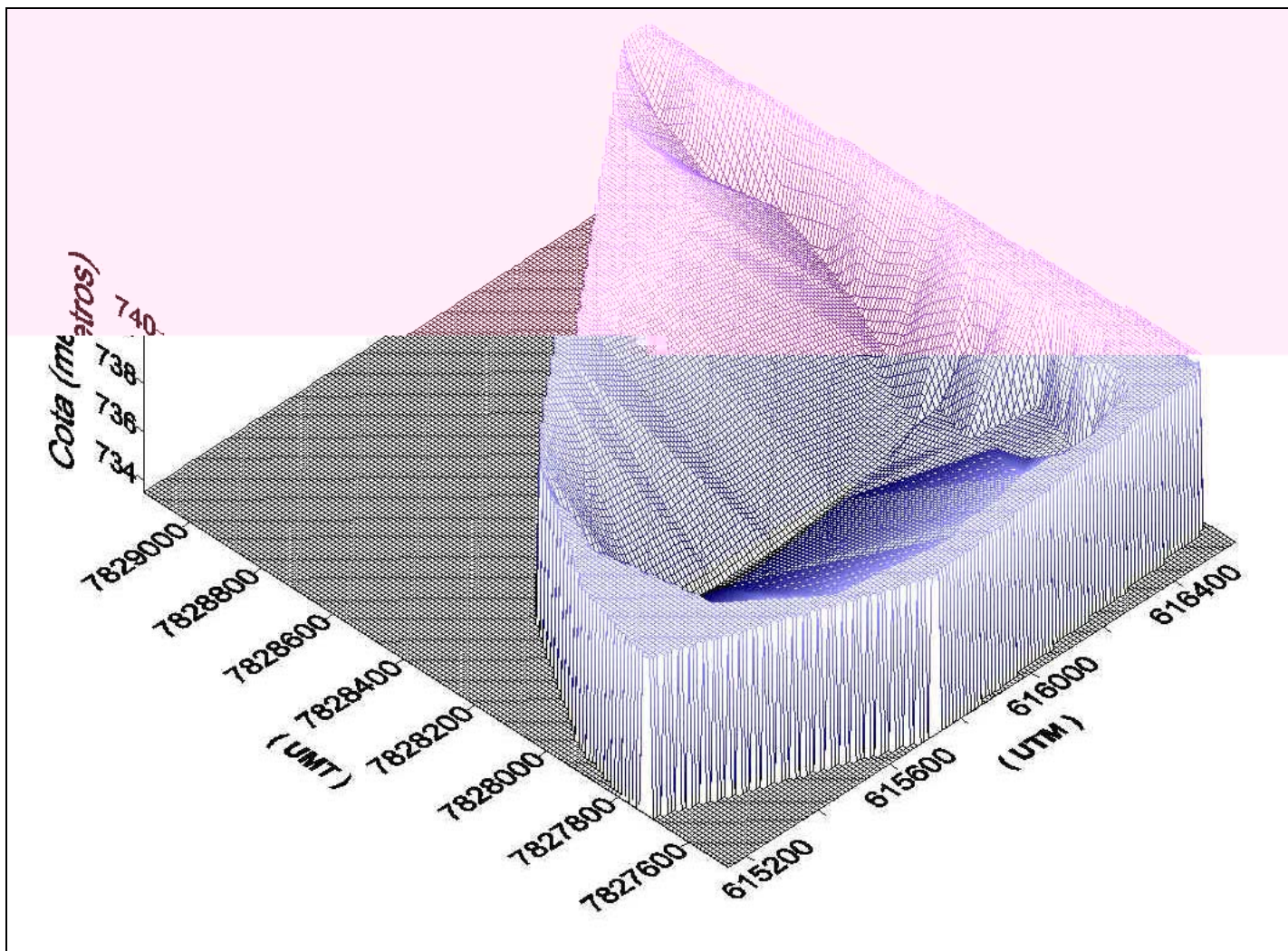
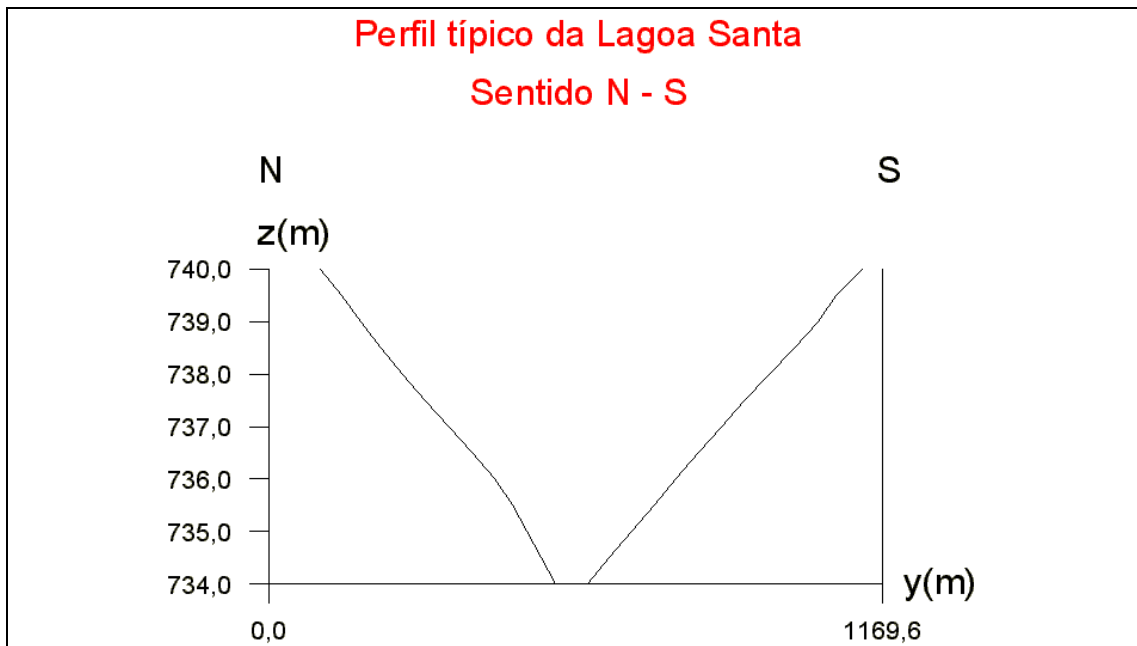
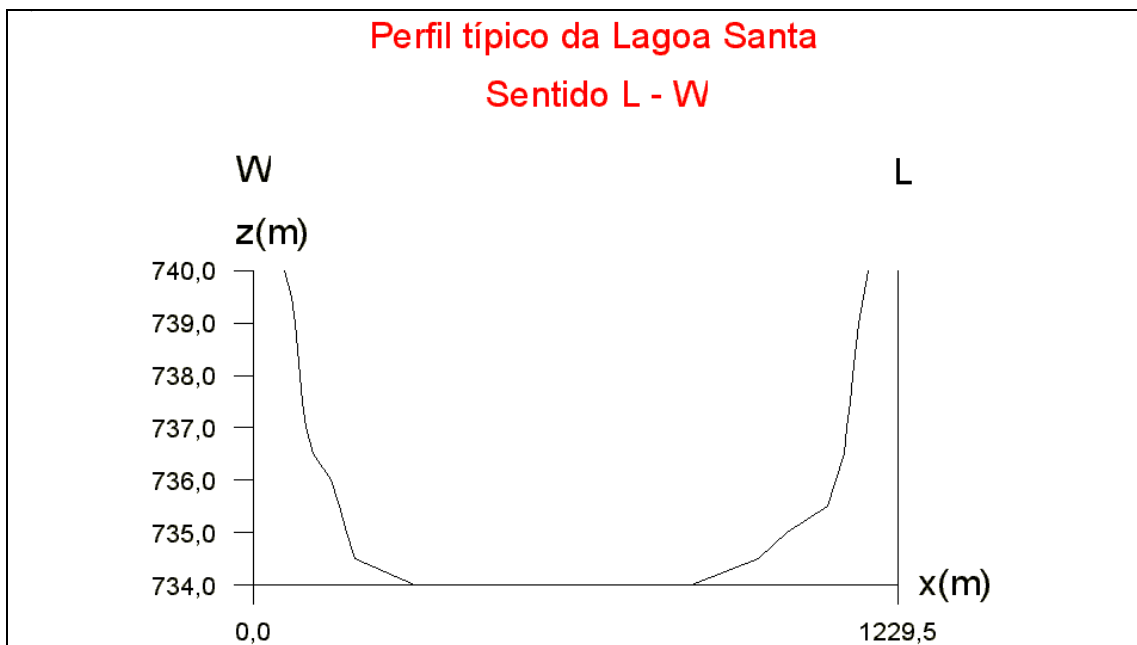


Figura 12.15 - Resultado em superfície da batimetria realizada na lagoa central de Lagoa Santa, no mês de agosto de 2003.



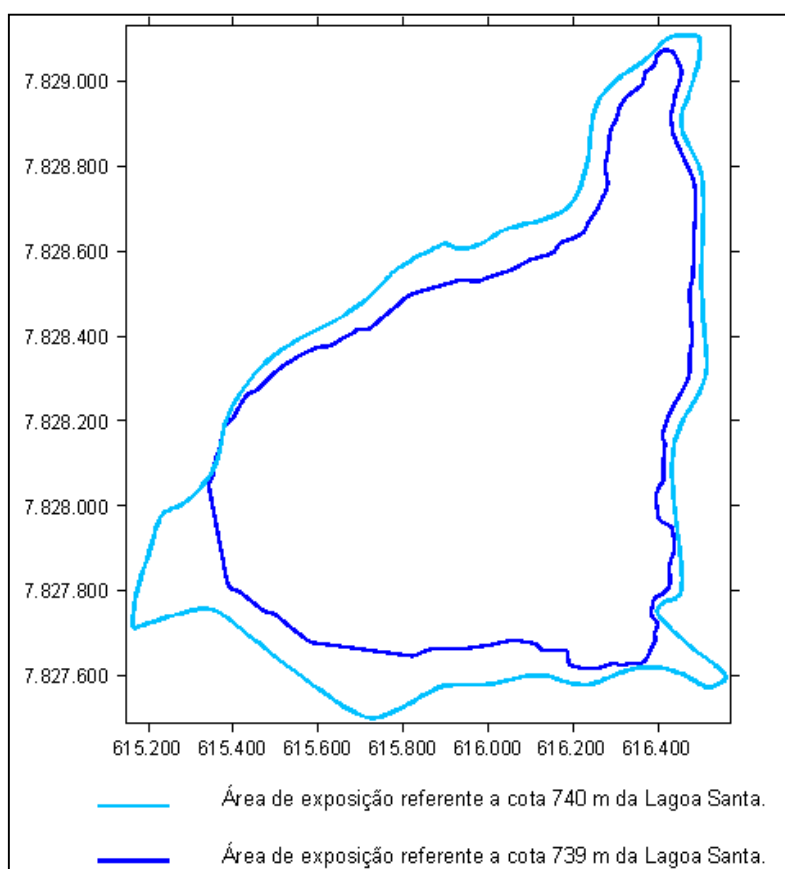
**Figura 12.16** - Perfil típico da lagoa central de Lagoa Santa, no sentido N-S, resultante da batimetria realizada no mês de agosto de 2003.



**Figura 12.17** - Perfil típico da lagoa central de Lagoa Santa, no sentido L-W, resultante da batimetria realizada no mês de agosto de 2003.

Como já mencionado neste trabalho, Kohler em 1978 afirmou que a 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 experimental da condição hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 700 m (cenário 3), afirma-se 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. Na Figura 12.18 é apresentada uma ilustração que reforça a idéia de que a área de exposição da lagoa central de Lagoa Santa é alterada quando o seu nível d'água se reduz.



**Figura 12.18** - Ilustração da alteração da área de exposição da lagoa central de Lagoa Santa quando esta tem sua cota alterada.

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. Seguida 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 experimentalmente 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:

#### **Premissas**

- 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 em seu vertedouro;
- e,
- as parcelas referentes à precipitação e ao escoamento superficial são constantes ao longo do tempo.

Inicialmente, ao simular a condição hidrodinâmica atual, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 735 m (cenário 2), obteve-se que, conforme Tabela 12.3, a contribuição do escoamento de base para a lagoa central de Lagoa Santa é de 4.486,1 m<sup>3</sup>/dia. Dessa forma, aproveitando-se os valores de precipitação e escoamento superficial já calculados neste trabalho através do balanço hídrico e os

valores de escoamento de base simulados pelo *Visual ModFlow*, é possível determinar a evaporação característica da lagoa central de Lagoa Santa, através da seguinte expressão:

$$P - E_v + E_B + E_S = \Delta S \quad (12.2.1)$$

sendo:

P = precipitação, dada em mm/ano;

$E_v$  = evaporação, dada em mm/ano;

$E_B$  = escoamento de base, dado em mm/ano;

$E_S$  = escoamento superficial, dado em mm/ano; e,

$\Delta S$  = variação do armazenamento, dado em (mm/ano).

Considerando que a variação do armazenamento é nula, a Equação (12.2.1) reduz-se à Equação (12.2.2), cuja solução é imediata.

$$P + E_B + E_S = E_v \quad (12.2.2)$$

Ressalta-se que os parâmetros anteriormente mencionados podem ser calculados em m<sup>3</sup>/dia, multiplicando-os pela área de exposição da lagoa central de Lagoa Santa.

Assim, para a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 735 m, calcula-se a evaporação incidente sobre a lagoa central de Lagoa Santa utilizando-se a Equação (12.2.2) e os seguintes parâmetros:

$$A = 1.183.816,61 \text{ m}^2;$$

$$P = 1.236,8 \text{ mm/ano ou } 4.011,35 \text{ m}^3/\text{dia} \text{ (vindo dos estudos de balanço hídrico);}$$

$$E_S = 139,7 \text{ mm/ano ou } 453,09 \text{ m}^3/\text{dia} \text{ (vindo dos estudos de balanço hídrico, particularmente das análises dos hidrogramas);}$$

$$E_B = 4486,10 \text{ m}^3/\text{dia} \text{ (vindo da simulação do } \textit{Visual ModFlow}\text{);}$$

Logo:

$$E_v = 4.011,35 + 453,09 + 4.486,1 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$E_v = 8.950,55 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Dessa forma, ao analisar a condição hidrodinâmica atual, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 735 m (cenário 2), a evaporação incidente sobre a lagoa central de Lagoa Santa apresentou um valor de 8.950,55 m<sup>3</sup>/dia (2.759,7 mm/ano). Ressalta-se que esta evaporação encontrada refere-se à condição atual em que a cota da lagoa central de Lagoa Santa é de 735 m.

Admitindo-se que a evaporação incidente sobre a lagoa central de Lagoa Santa é diretamente proporcional à sua área de exposição, considera-se a seguinte equação:

$$E_v = K \cdot A \quad (13.2.3)$$

sendo:

$$K = (P + ES + EB)/A \quad (13.2.4)$$

em que:

K = taxa de evaporação, dada em mm/ano ou m/dia;

P = precipitação, dada em mm/ano;

ES = escoamento superficial, dado em mm/ano; e,

EB = escoamento de base, dado em mm/ano.

Ressalta-se que os parâmetros referentes à precipitação, ao escoamento superficial e ao escoamento de base podem ser calculados em m<sup>3</sup>/dia, multiplicando-os pela área de exposição da lagoa central de Lagoa Santa.

Sendo conhecidas a evaporação incidente sobre a lagoa central de Lagoa Santa e a sua área inicial de exposição, quando a cava da Mina Lapa Vermelha está localizada na cota de 735 m (cenário 2), pode-se estabelecer o valor de K, como apresentado a seguir:

$$K = \frac{E_v}{A} \quad (12.2.5)$$

em que:

E<sub>v</sub> = evaporação, dada em m<sup>3</sup>/dia; e,

A = área de exposição da lagoa central de Lagoa Santa, dada em m<sup>2</sup>.

Portanto:

$$K = \frac{8.950,55 \text{ m}^3 / \text{dia}}{1.183.816,61 \text{ m}^2} = 0,00756 \text{ m} / \text{dia}$$

Após determinar o valor da taxa de evaporação (K), foi possível avaliar as demais evaporações incidentes sobre a lagoa central de Lagoa Santa, quando esta tem o seu nível d'água variado, como mostrado a seguir.

$$Ev' = K \cdot A' \quad (13.2.6)$$

sendo:

Ev' = novo valor da evaporação, quando a área de exposição da lagoa central de Lagoa Santa é alterada, dada em m<sup>3</sup>/dia;

K = taxa de evaporação; e,

A' = nova área de exposição da lagoa central de Lagoa Santa, quando o seu aporte de água subterrânea é reduzido, dado em m<sup>2</sup>.

Finalmente, para encontrar a nova situação de equilíbrio da lagoa central de Lagoa Santa, estabelece-se a seguinte equação:

$$P + ES + EB' - Ev' = FC \quad (12.2.7)$$

sendo:

P = precipitação;

ES = escoamento superficial;

EB' = escoamento de base calculado pelo *Visual ModFlow*, para distintas cotas de nível d'água da lagoa central de Lagoa Santa;

Ev' = nova evaporação incidente sobre a lagoa central de Lagoa Santa, quando esta tem sua área de exposição alterada; e,

FC = fator de convergência.

Desse modo, afirma-se que:

- quando  $FC > 0$ , o nível d'água da lagoa central de Lagoa Santa aumenta, não correspondendo a uma situação de equilíbrio;

- quando  $FC < 0$ , o nível d'água da lagoa central de Lagoa Santa diminui, não correspondendo a uma situação de equilíbrio; e,
- quando  $FC = 0$ , a lagoa central de Lagoa Santa está novamente em equilíbrio.

Objetivando desenvolver o modelo anteriormente descrito, adotou-se a seguinte rotina de cálculo:

### **Rotina de cálculo**

- determinar a taxa de evaporação característica da lagoa central de Lagoa Santa (Equação 12.2.2);
- rebaixar sucessivamente, no modelo hidrogeológico computacional, o nível d'água da lagoa central de Lagoa Santa em intervalos de 1 cm;
- estabelecer, para cada intervalo rebaixado, as novas áreas de exposição da lagoa central de Lagoa Santa;
- calcular, para cada intervalo rebaixado, as novas evaporações incidentes sobre a lagoa central de Lagoa Santa (Equação 12.2.6);
- estabelecer, para cada intervalo rebaixado, os novos aportes do escoamento de base (através do *Visual ModFlow*); e,
- repetir esta rotina até alcançar o nível d'água para o qual a lagoa central de Lagoa Santa apresente-se novamente estabilizada (Equação 12.2.7).

De acordo com os resultados obtidos com a rotina de cálculo já apresentada, o rebaixamento do lençol freático provocado pela Mina Lapa Vermelha até a cota de 700 metros, provocará, experimentalmente, uma redução de aproximadamente 6 cm na lâmina d'água da lagoa central de Lagoa Santa, o que corresponde a um rebaixamento em torno da cota de 739,94 m desta lagoa. Este cálculo é apresentado na Tabela 12.8.

Ao analisar a Tabela 12.8, percebe-se que para a condição hidrodinâmica em que a cava da Mina Lapa Vermelha está localizada na cota de 700 m, a Equação (12.2.2) não é inicialmente satisfeita. Nestas circunstâncias, o nível d'água da lagoa central de Lagoa Santa tem sofrido interferências negativas, denotadas pela sua redução ( $FC < 0$ ). Observa-se, também, que quando a cota da lagoa foi variada até o nível de 739,95 m, o fator de convergência correspondente à Equação (12.2.7) apresentou-se

negativo ( $FC < 0$ ). Da mesma forma, quando a cota da lagoa foi alterada para o nível de 739,94 m, o mesmo fator de convergência mostrou-se positivo ( $FC > 0$ ). Desse modo, admite-se que entre as cotas 739,95 e 739,94 m, o fator de convergência se anula, satisfazendo, então, a nova condição de equilíbrio hídrico da lagoa central de Lagoa Santa.

**Tabela 12.8** - Cálculo do impacto ambiental causado à Lagoa Santa quando o lençol freático é rebaixado até a cota de 700 m na Mina Lapa Vermelha.

Cota da Lagoa (m)	Profundidade máxima da Lagoa (m)	Área da Lagoa (m <sup>2</sup> )	Evaporação (m <sup>3</sup> /dia)	Precipitação (m <sup>3</sup> /dia)	ES (m <sup>3</sup> /dia)	EB <sub>Modelo</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	P + ES + EB - Ev (m <sup>3</sup> /dia)
740,00	6,52	1.183.816,61	8.950,55	4.011,35	453,09	4.314,10	-172,00
739,95	6,47	1.171.404,70	8.856,70	4.011,35	453,09	4.325,90	-66,36
739,94	6,46	1.169.365,48	8.841,29	4.011,35	453,09	4.431,40	54,56

O fato de não ter sido considerada na Equação (12.2.7) a água vertida pelo vertedouro nos meses chuvosos não compromete o resultado já demonstrado, uma vez que se trata de uma aproximação conservadora, como demonstrado a seguir.

Considerando-se a água vertida pelo vertedouro, a evaporação incidente sobre a lagoa central de Lagoa Santa deveria ser calculada da seguinte maneira:

$$E_v = P + ES + EB - Q_v \quad (12.2.8)$$

sendo:

P = precipitação, dada em mm/ano;

ES = escoamento superficial, dado em mm/ano;

EB = escoamento de base, dado em mm/ano; e,

$Q_v$  = vazão vertida pelo vertedouro, dada em mm/ano; e,

$E_v$  = evaporação, dada em mm/ano.

Assim, como apresentado na Equação (12.2.8), o valor da evaporação incidente sobre a lagoa central de Lagoa Santa seria menor do que aquele calculado pela Equação (12.2.2).

Da mesma forma, considerando a atuação do vertedouro, o fator de convergência deveria ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$P + ES + EB' - Q_v - E_v' = FC \quad (12.2.9)$$

sendo

$EB'$  = escoamento de base calculado pelo Visual ModFlow, para distintas cotas de nível d'água da lagoa central de Lagoa Santa;

$Q_v$  = vazão vertida pelo vertedouro, dada em mm/ano ou  $m^3$ /dia;

$E_v'$  = nova evaporação incidente sobre a lagoa central de Lagoa Santa, quando esta tem sua área de exposição alterada; e,

FC = fator de convergência.

Considerando-se a atuação do vertedouro, o fator de convergência nesta situação seria alcançado mais rapidamente. Sendo assim, verifica-se que o equilíbrio seria atingido a uma cota mais elevada, confirmando a hipótese de que quando a água vertida pelo vertedouro não é considerada, assume-se uma posição conservadora.

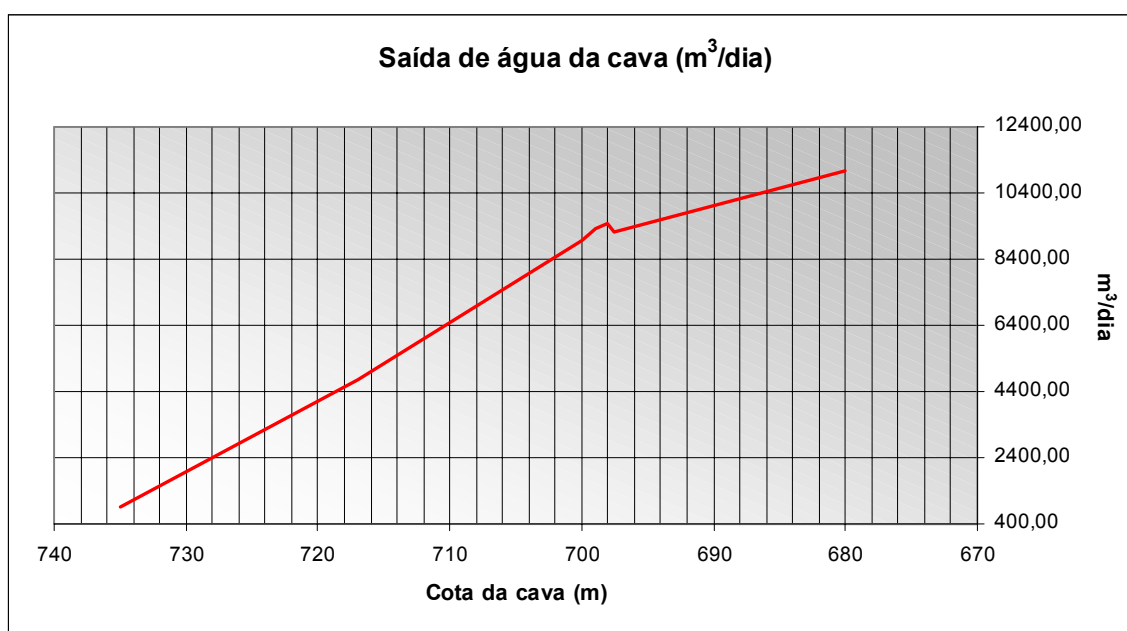
Com relação à condição hidrodinâmica futura em que a cava da Mina Lapa Vermelha será rebaixada até a cota de 680 m, prevê-se experimentalmente, como já descrito, uma redução de 5% em seu aporte de água subterrânea. Comparando-se esta porcentagem com aquela característica da condição hidrodinâmica em que a cava da Mina Lapa Vermelha situa-se na cota de 700 m, percebe-se que não houve uma alteração muito significativa. Sendo assim, acredita-se que o impacto causado pelo rebaixamento do lençol freático até 680 m na Mina Lapa Vermelha não provocará mudanças muito diferentes das já diagnosticadas.

### 12.3 Análises secundárias

A partir dos resultados obtidos através dos distintos cenários de simulações hidrogeológicas, torna-se fundamental as análises da saída de água na cava e do aporte de água na lagoa central de Lagoa Santa, sendo estes descritos a seguir.

#### 12.3.1 Análise da cava

A variação na taxa de desaguamento da cava da Mina Lapa Vermelha causada pelo avanço do rebaixamento simulado pelo modelo hidrogeológico computacional é apresentada na Figura 12.19. De acordo com tais simulações, a alteração da cota da cava da mina, passando esta de 735 para 680 m, demandará um acréscimo da sua taxa de desaguamento de 932,23 m<sup>3</sup>/dia para 11.057 m<sup>3</sup>/dia.



**Figura 12.19** - Gráfico demonstrativo da evolução dos níveis d'água na cava da Mina Lapa Vermelha, mediante o avanço do rebaixamento simulado pelo modelo hidrogeológico computacional.

Observando-se a Figura 12.19, percebe-se que há uma mudança de declividade na reta de evolução do desaguamento da cava em questão. Esta alteração está intimamente relacionada à fratura do Tadinho. Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato de que, a partir da cota 700 m, parte da fratura do Tadinho se encontrará na zona não saturada, alterando a configuração do sistema de fluxo subterrâneo, como já apresentado nas Figuras 12.5 a 12.10.

Com o avanço da atividade de lavra da Mina Lapa Vermelha e a necessidade de avançar as atividades de rebaixamento do lençol freático até as cotas de 700 e 680 m, parte da fratura do Tadinho passou a ocupar uma porção da zona de aeração. Em virtude desta mudança de comportamento, sua taxa de contribuição ao sistema reduziu-se de 7.472,9 m<sup>3</sup>/dia de água para 1.464 m<sup>3</sup>/dia de água. Conseqüentemente, a cava da Mina Lapa Vermelha passou a receber menos água proveniente desta fratura. Uma constatação desta idéia pode ser visualizada pelo cálculo das diferentes declividades da reta de desaguamento.

Paralelamente, ressalta-se, também, que a taxa de água que entra nos drenos da cava em m<sup>3</sup>/dia aumenta progressivamente dado que a cava se torna cada vez mais profunda. Dessa forma, a cava da Mina Lapa Vermelha passa a receber uma contribuição de água cada vez maior das formações geológicas ao seu redor. Tais considerações podem ser comprovadas ao verificar que a quantidade de água que entra em m<sup>3</sup>/dia na cava da Mina Lapa Vermelha, quando esta está localizada na cota de 680 m, é superior às demais situações de cota da cava.

#### **Trecho 717 – 700 m**

Cava 717 = 4740,1 m<sup>3</sup>/dia

Cava 700 = 8.954,7 m<sup>3</sup>/dia

Declividade = (8.954,7 – 4.740,1) / 17 metros de cava = 247 m<sup>3</sup>/dia/ metro de cava

Tal declividade indica que, a cada metro escavado, chega à cava uma taxa de água de 247 m<sup>3</sup>/dia, sendo que parte desta contribuição é promovida pela atuação da fratura do Tadinho.

### **Trecho 699 - 680 m**

Cava 699 = 9.333,2 m<sup>3</sup>/dia

Cava 680 = 11.057,0 m<sup>3</sup>/dia

Declividade = (11.057,0 – 9.333,2) / 19 metros de cava = 90,7 m<sup>3</sup>/dia/ metro de cava

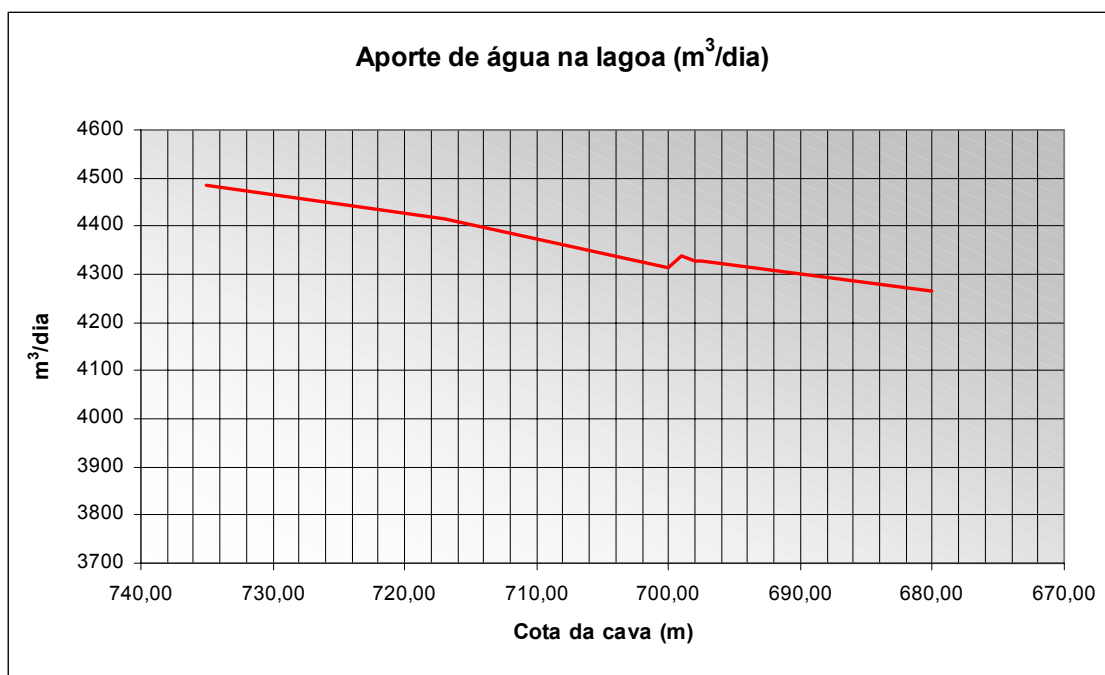
Assim como anteriormente, tal declividade indica que, a cada metro escavado, chega à cava uma taxa de água de 90,7 m<sup>3</sup>/dia.

Dessa maneira, como mostrado pelo cálculo das declividades anteriores, mesmo a cava da Mina Lapa Vermelha sendo aprofundada, a taxa de água que entra em sua estrutura, a cada metro escavado, em m<sup>3</sup>/dia, diminui. Este fenômeno é causado, fundamentalmente, pela mudança de comportamento da fratura do Tadinho.

Percebe-se, também, ao analisar a referida figura que o modelo hidrogeológico computacional apresenta uma faixa de transição com relativa instabilidade, ocorrendo entre as cotas 700 e 698 m. Tal instabilidade é justificada pela dificuldade em administrar grandes diferenças de condutividade hidráulica.

### **12.3.2 Análise da lagoa central de Lagoa Santa**

Após as inúmeras simulações hidrogeológicas promovidas a partir do modelo hidrogeológico computacional é possível definir a curva que representa a variação do aporte de água procedente do escoamento de base para a lagoa central de Lagoa Santa, sendo esta apresentada na Figura 12.20. Dessa forma, verifica-se que o aporte de água para a Lagoa Santa variou de 4.489,0 m<sup>3</sup>/dia, na condição hidrodinâmica original, para 4.486,10 m<sup>3</sup>/dia, na condição hidrodinâmica atual. Os estudos prevêem, também, que quando a cava alcançar a cota de 680 m, este aporte se reduzirá para 4.265,90 m<sup>3</sup>/dia.



**Figura 12.20** - Gráfico demonstrativo da evolução dos níveis d'água na lagoa mediante o avanço do rebaixamento simulado pelo modelo computacional

Nota-se, igualmente, que na Figura 12.20 há uma mudança de declividade na reta que representa a evolução dos níveis d'água na lagoa central de Lagoa Santa mediante as atividades de rebaixamento. Este fenômeno se repetiu exatamente na mesma cota da cava da Mina Lapa Vermelha onde ocorreu a variação da declividade da Figura 12.19.

Inicialmente, com os trabalhos de rebaixamento, o aporte de água na lagoa central de Lagoa Santa diminuía a uma taxa de 5,90 m³/dia / metro de cava. Posteriormente, quando parte da fratura do Tadinho se encontra na zona não saturada, esta taxa passou para 3,76 m³/dia / metro de cava, ou seja, o aporte de água na lagoa continuou a diminuir, só que agora a uma taxa menor. Esta mudança de comportamento da fratura do Tadinho, como já dito anteriormente, altera de maneira expressiva a hidrodinâmica da área de estudo, provocando, assim, uma redução no aporte de água na lagoa central de Lagoa Santa.

## 13 CONCLUSÕES

O presente estudo consistiu na caracterização hidrogeológica da área de influência da Mina Lapa Vermelha na região cárstica de Lagoa Santa, em Minas Gerais. Foi proposto, então, um modelo hidrogeológico conceitual em escala regional que permitiu gerar um modelo hidrogeológico computacional capaz de descrever, experimentalmente, o comportamento hidrodinâmico das águas subterrâneas na área circunvizinha à Mina Lapa Vermelha. Sendo assim, os impactos ambientais já causados pela atividade mineradora desenvolvida naquela mina foram avaliados, assim como as interferências que serão provocadas pelo avanço do rebaixamento do lençol freático. Para tal avaliação foram observados os seguintes indicadores:

- deságüe da cava da Mina Lapa Vermelha;
- vazão de saída da surgência do Tadinho;
- vazão medida no córrego do Cafundó; e,
- aporte de água proveniente do escoamento de base para a Lagoa Santa.

A avaliação experimental da condição hidrodinâmica da Mina Lapa Vermelha apontou os resultados descritos a seguir quando comparados com a simulação da condição hidrodinâmica original.

### **(1) Condição hidrodinâmica atual, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 735 m (cenário 2):**

- aumento significativo de 6,75% na saída de água na surgência do Tadinho;
- aumento significativo 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. Ressalta-se que os acréscimos de água registrados nestes indicadores ocorreram devido à necessidade de se injetar a água do *sump* da Mina Lapa Vermelha na dolina de injeção. Assim, como esta dolina está interligada hidráulicamente ao vale do Cafundó e à surgência do Tadinho, a injeção de água em sua estrutura provocou o aumento das vazões medidas naqueles pontos monitorados.

**(2) Condição experimental da hidrodinâmica futura, com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 700 m (cenário 3):**

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

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. Com o avanço do rebaixamento do lençol freático até a cota de 700m, segundo análise experimental do modelo hidrogeológico computacional, parte desta fratura passará a ocupar uma porção da zona de aeração. Esta mudança de comportamento da fratura do Tadinho alterará, de maneira significativa, a hidrodinâmica da área de estudo, provocando, alterações de vazões naqueles pontos monitorados.

Apesar dos impactos diagnosticados por esta simulação experimental, é possível admitir o avanço da atividade mineradora até esta cota mais profunda da cava, uma vez que, através de medidas mitigadoras, é possível remediar tais alterações hidrológicas. Para tanto, sugere-se um manejo adequado da água retirada da área da cava (aproximadamente 9.000 m<sup>3</sup>/dia), destinando-a para recompor as vazões retiradas do córrego do Cafundó, da surgência do Tadinho e as eventuais perdas d'água na Lagoa Santa

**(3) Condição experimental da condição hidrodinâmica futura com a cava da Mina Lapa Vermelha localizada na cota de 680 m (cenário 4):**

- supressão na descarga de água da surgência do Tadinho;
- supressão na descarga de água do córrego do Cafundó; e,
- redução de 5% do aporte do escoamento de base para a Lagoa Santa, o que implicará em redução 6 cm em sua altura da lâmina d'água. A mudança de comportamento da fratura do Tadinho, como na simulação experimental anterior, continuará provocando alterações na hidrodinâmica da área de estudo, afetando quantitativamente as vazões nos pontos indicadores monitorados. Da mesma forma, portanto, sugere-se um manejo adequado da água proveniente do deságüe da cava (cerca

de 11.000 m<sup>3</sup>/dia) para recompor as vazões retiradas do córrego do Cafundó, da surgência do Tadinho e as eventuais perdas d'água na Lagoa Santa

Com relação à condução da lavra, analisando o seu processo de operação, é possível tecer as seguintes conclusões, as quais têm estreita relação com os impactos previstos:

- o tempo necessário para que se evolua a lavra até cota de 700 m é de aproximadamente 40 anos, o que possibilita a tomada de precauções quanto ao avanço dos volumes de água a serem rebaixados; e,
- os volumes de água a serem drenados na Mina Lapa Vermelha, em decorrência do rebaixamento até as cotas de 700 e 680 m, serão alcançados gradativamente e, conseqüentemente, qualquer demanda súbita de água no sistema poderá ser criteriosamente planejada.

## **14 RECOMENDAÇÕES**

Face aos resultados alcançados e às conclusões apresentadas neste estudo, são feitas as seguintes recomendações para continuidade desta pesquisa:

- instalação de uma linha de piezômetros na região norte, em direção à lagoa central de Lagoa Santa, com pelo menos três unidades, igualmente espaçadas desde a cava da mina até a margem da lagoa;
- instalação de uma linha de piezômetros na região noroeste, em direção aos condomínios, com pelo menos três unidades, igualmente espaçadas, a fim de verificar os possíveis impactos que os poços tubulares aí instalados podem causar ao aquífero carbonático;
- instalação de uma linha de piezômetros na região leste, em direção ao córrego José Maria, com pelo menos três unidades, igualmente espaçadas desde a cava da Mina Lapa Vermelha até a margem deste córrego;
- adensamento dos pontos de observação de nível d'água na Mina Lapa Vermelha, através da instalação de seis a oito novos piezômetros, igualmente espaçados no entorno da cava;
- instalação de dois conjuntos de piezômetros multicâmara, localizados à margem da lagoa central de Lagoa Santa, com câmaras abertas nas formações do colúvio superior e do calcário, a profundidades aproximadas de 20 e 100 m, respectivamente, com o objetivo de acompanhar as variações piezométricas verticais do sistema hidrogeológico sotoposto à lagoa;
- instalação de dispositivos de medição de descargas de superfície nos principais eixos de drenagem da área de investigação, objetivando melhorar a calibração do modelo hidrogeológico computacional aqui proposto;
- instalação de réguas linimétricas ao redor da lagoa central de Lagoa Santa;
- instalação de uma estação meteorológica na área de investigação, tendo como alvo aumentar a precisão do balanço hídrico da área de estudo;
- manutenção permanente de um cadastro dos poços tubulares, públicos e privados, instalados na região em estudo, com o acompanhamento das medidas mensais de vazão e cota d'água;

- manutenção do modelo hidrogeológico computacional da região em questão, sob constante verificação e calibração, utilizando-se dos dados de monitoramento hidrológico e hidrogeológico, com o objetivo de atualizar permanentemente as previsões aqui apresentadas;
- injetar parte da água bombeada pelo *sump* da cava da Mina Lapa Vermelha na surgência do Tadinho, no vale do Cafundó e na lagoa central de Lagoa Santa, a fim de restabelecer a paisagem original; e,
- disponibilizar parte da água drenada pelo *sump* da cava da Mina Lapa Vermelha para o abastecimento público.

## 15 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W.. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Califórnia: Academic Press, 1992. 381 p.
- AULER, A.. Peter Wilhelm Lund e a sua visão das cavernas. *O Carste*, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. 24-31, jan. 2002.
- BAETA, A. M.; SILVA, M. C.; PROUS, A.. Organização do espaço pictural nos sítios rupestres da região de Lagoa Santa - MG. In: CONGRESSO ABEQUA, 3, 1992, Belo Horizonte. *Anais ...* Belo Horizonte: [s. n.], [s. d.]. p.417-430.
- BERBERT-BORN, M.. Carste de Lagoa Santa. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, Brasília, 15, 2000. Disponibilidade e acesso: <<http://www.unb.br/ig/sigep/sitio015/sitio015.htm>>. Data de acesso: 24 Mar. 2003.
- BONACCI, O.. *Karst Hydrology: With Special Reference to the Dinaric Karst*. [s. e.]. Berlin: Springer-Verlag, 1987. 184 p. (Springer Series in Physical Environment, 2).
- BONACCI, O.. Similarities and differences in hydraulic, hydrology and hydrogeologic approaches to karst groundwater investigations. Available from Internet: <http://www.iahr.org/membersonly/grazproceedings99/doc/000/000/035.htm>>. Cited: 10 fev. 2003.
- BRASIL. DNPM/CPRM. *Mapa hidrogeológico do Brasil, escala 1/5.000.000*. Brasília: DNPM., 1983. Edição comemorativa *apud* MENTE, A.. Condições hidrogeológicas do Brasil. In: FEITOSA, F. A. C. & MANUEL FILHO, J.. (ed.). *Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações*. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. cap. 13, p. 323-340.
- CABRAL, J. & DEMETRIO, J. G. A.. Aplicação de modelos em hidrogeologia. In: FEITOSA, F. A. C. & MANUEL FILHO, J.. (ed.). *Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações*. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. cap. 15, p. 369-391.
- CARVALHO, E. T.; FREITAS, J. R.; KOHLER, H. C.; SANTOS, F. M. C. *Inventário geo-ecológico da região de Lagoa Santa- Minas Gerais*. 1978. 33 p. Relatório.
- CHOW, V. T.. *et. al. Applied hydrology*. [S. l.]: McGraw-Hill, 1988. 572 p.

- COSTA, W. D. & SILVA, A. B. Hidrogeologia dos meios anisotrópicos. In: FEITOSA, F. A. C. & MANUEL FILHO, J.. (ed.). *Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações*. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. cap. 7, p. 133-174.
- COUTARD, J.P.; JOURNAY, A.; KOHLER, H.C. *Comentário da carta carste de Lagoa Santa - Pedro Leopoldo / MG*. Belo Horizonte, [s. d.]. 10 p. Relatório.
- COUTINHO, M.E.; BARBOSA, F. R. Distribuição vertical de matéria orgânica, nitrogênio orgânico total, fósforo total e algumas formas iônicas nos sedimentos recentes de três lagos de Minas Gerais. *Acta Limnologia*, v. 1, p. 401-429, 1980.
- CPRM & IBAMA. *APA Carste de Lagoa Santa: meio físico*. Belo Horizonte: [s. n.], 1998a. v. 1.
- CPRM & IBAMA. *APA Carste de Lagoa Santa: patrimônio espeleológico, histórico e cultural*. Belo Horizonte: [s. n.], 1998b. v. 3.
- CPRM. *Informações Básicas para a Gestão Territorial: Cidade de Sete Lagoas – MG: Mapeamento geológico da cidade de Sete Lagoas com vistas à aplicação no planejamento urbano*. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1994a. 75 p.
- CPRM. *Informações Básicas para a Gestão Territorial: Região de Sete Lagoas – Lagoa Santa: Caracterização geomorfológica*. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais e Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1994b. 37 p.
- CUSTODIO, E. (ed.) & LLAMAS, M. R.. *Hidrología Subterránea*. 1. ed. Barcelona: Ediciones Omega, 1976. (Hidrología Subterránea, 4).
- DARDENNE, M.A. 1978. *Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. Anais. Recife, SBG, 2:597-610 *apud* CPRM. *Informações Básicas para a Gestão Territorial: Cidade de Sete Lagoas – MG: Mapeamento geológico da cidade de Sete Lagoas com vistas à aplicação no planejamento urbano*. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1994a. 75 p.
- DELLEUR, J. W. (Ed.). *The handbook of groundwater engineering*. Boca Raton: CRC, 1998. 909 p.
- DREYBRODT, W.. *Processes in Karst Systems: Physics, Chemistry and Geology*. [s. e.]. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 288 p. (Springer Series in Physical Environment, 4).

- DUFRESNE, D.& DRAKE, C.. Regional groundwater flow model construction and wellfield site selection in a karst área, Lake City, Florida. *Engineering Geology*, n. 52, p. 129-139, 1999. Available from Internet: < <http://www.sciencedirect.com/science?>>. Cited: 10 Fev. 2003.
- EL-KADI, A.. (Ed.). *Groundwater models for resources analysis and management*. Boca Raton: CRC Press, 1995. 367 p.
- FORD, D. & WILLIAMS, P.. *Karst geomorphology and hydrology*. 1. ed. Cambridge: Chapman & Hall, 1989. 601 p.
- GUIGUER, N. & FRANZ, T..1998.Visual MODFLOW. Waterloo Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Canada.
- GUPTA, R. S.. *Hidrology & hidraulic systems*. New Jersey: Prentice Hall, 1989. 739 p.
- HAITJEMA, H.; KELSON, V.; LANGE, W. de. Selecting ModFlow Cell Sizes for Accurate Flow Fields. *Ground Water*, [S. 1.], v. 39, n. 6, p. 931-938, nov./dec. 2001.
- IBGE, 1976. Folha Lagoa Santa (SE.23-Z-C-VI-1). Escala 1:50.000.
- JENNINGS, J. N.. *Karst Geomorphology*. 2. ed. Oxford: Bell and Bain Ltd, 1985. 293 p.
- JOURNAUX, A.. Géomorphologie et préhistoire: Méthodologie pour une cartographie de l'environnement des sites préhistoriques: l'exemple de Lagoa Santa (Minas Gerais, Brésil). *Norois*, [S. 1.], n. 95, p.319-337, 1977.
- KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F.. (org.). *Decifrando a terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2001. cap. 7, p.113-138.
- 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.
- 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.

- KOHLER, H. C. & MALTA, I. M.. Região de Lagoa Santa: O cenário cárstico: guardião da fauna extinta aos legados bandeirantes. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 3., 1991, Belo Horizonte. *Publicação especial n°2: Roteiro das excursões do III Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*. Belo Horizonte: [s. n.], [s. d.]. p. 11-37.
- LLADÓ, N. L.. *Fundamentos de Hidrogeologia Carstica*. Editorial Blume. Madri, 1970.
- LOUREIRO, C. de O.. (Coord.). *Relatório final dos estudos hidrogeológicos na área da Mina Lapa Vermelha, Lagoa Santa/MG: Estudos de rebaixamento do nível d'água do aquífero carbonático*. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, 2003, 91 p. Relatório.
- MALTA, I. M.. *Dinâmica e Evolução do sistema cárstico da Lapa Vermelha de Pedro Leopoldo*. 1995. 77 f. Dissertação - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MENTE, A.. Condições hidrogeológicas do Brasil. In: FEITOSA, F. A. C. & MANUEL FILHO, J.. (ed.). *Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações*. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. cap. 13, p. 323-340.
- MARINHO, M. A.. Conceituações gerais sobre carste e pseudo-carste. *Quebra-Corpo*, São Paulo, n. 3, 1990. Disponibilidade e acesso: <<http://www.gpme.org.br/qcorpo3.html#carste>>. Data de acesso: 24 Mar. 2003.
- MARINHO, M. A.. O carste em rochas carbonáticas. *Quebra-Corpo*, São Paulo, n. 4, 1991. Disponibilidade e acesso: <<http://www.gpme.org.br/qcorpo4.html#carste>>. Data de acesso: 24 Mar. 2003.
- NAGHETTINI, M.. Notas de aula de hidrologia aplicada: primeira parte. Belo Horizonte, 1999. Notas de aula. 237 p.
- 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.
- PARIZZI, M. G.; SALGADO-LABOURIAU, M. L.; KOHLER, H. C. Genesis and environmental history of Lagoa Santa, southeastern Brazil. *The Holocene*, [S. l.], n. 8, p. 311-321, 1998.
- PESSOA, P. F. P.. *Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas – MG: potencialidades e risco*. 1996. 101 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- 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.
- PILÓ, L. B.. Rochas carbonáticas e relevos cársticos em Minas Gerais. *O Carste*, Belo Horizonte, v. 9, n. 3, p. 72-78, jul. 1997.
- PILÓ, L. B.. Ambientes cársticos de Minas Gerais: Valor, fragilidade e impactos ambientais decorrentes da ação humana. *O Carste*, Belo Horizonte, v. 11, n. 3, p. 50-58, jul. 1999.
- 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.
- PLAMBEL. A região kárstica de Lagoa Santa. [s. n. t.]. Relatório.
- PROUS, A.. O carste e a arqueologia. In: CONGRESSO ABEQUA, 3, 1992, Belo Horizonte. *Anais ...* Belo Horizonte: [s. n.], [s. d.]. p. 330-341.
- PULIDO-BOSH, A. & PADILLA, A.. Some considerations about the simulation of karst aquifers . In: IAH CONGRESS - KARST HYDROGEOLOGY AND KARST ENVIRONMENT PROTECTION, 21, 1988, Beijing. *Proceedings...* Beijing: Geological Publishing House, 1988. p.583-588.
- PUSIC, M.. Simulation rainfall infiltration into a karst aquifer using a groundwater modeling approach. KARST-WATER ENVIRONMENT SYMPOSIUM PROCEEDINGS, Virginia. *Proceedings ...* Virginia: Virginia Water Resources Research Center, 1997. p. 48-52.
- QUILAN, J. F., DAVIES, G. J., JONES, S. W., HUNTOON, P. W.. The applicability of numerical models to adequately characterize ground-water flow in karstic and other triple-porosity aquifers citado por DUFRESNE, D. & DRAKE, C.. Regional groundwater flow model construction and wellfield site selection in a karst área, Lake City, Florida. In: *Engineering Geology*, n. 52, p. 129-139, 1999. Available from Internet: < <http://www.sciencedirect.com/science?>>. Cited: 10 Fev. 2003.
- 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.
- TECISAN. Relatório final de hidrogeologia: Desaguamento da Mina Lapa Vermelha – Lagoa Santa / MG. Belo Horizonte, 2000. 66 p. Relatório.
- TROISI, S. & VURRO, M.. Experimental tests to study the hydrodynamics analogies between fissured and porous media. In: IAH CONGRESS - KARST HYDROGEOLOGY AND KARST ENVIRONMENT PROTECTION, 21, 1988, Beijing. *Proceedings...* Beijing: Geological Publishing House, 1988. p.565-571.

- TUCCI, C. E. M.. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. (org). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/ UFRGS - ABRH, 2000. cap.11. p. 392-441.
- TUCCI, C. E. M & BELTRAME, L. F. S.. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. (org). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/ UFRGS - ABRH, 2000. cap.7. p. 253-287.
- TULLER, M. P; RIBEIRO, J. H.; DANDERFER, A. 1992. *Mapeamento Geológico da área do Projeto VIDA*, CPRM, Belo Horizonte. Relatório Interno apud PESSOA, P. F. P.. *Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas – MG: potencialidades e risco*. 1996. 101 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- 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.
- YUSUN, C. & JI, B.. The media and movement of karst water. In: IAH CONGRESS - KARST HYDROGEOLOGY AND KARST ENVIRONMENT PROTECTION, 21, 1988, Beijing. *Proceedings...* Beijing: Geological Publishing House, 1988. p.555-564.
- WHITE, W. B.. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. New York: Oxford University Press, 1988. 464 p.
- WHITE, W. B.. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Engineering Geology*, n. 65, p. 85-105, 2002. Available from Internet: < <http://www.sciencedirect.com/science?> > Cited: 10 Fev. 2003.
- [www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br/mg](http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br/mg) >. Data de acesso: 01 Set. 2003.
- [www.lagoasanta.com.br/lagoacen/frame2.htm](http://www.lagoasanta.com.br/lagoacen/frame2.htm) >. Data de acesso: 20 Mar. 2003.

*O Homem e a Água*  
Mario Quintana<sup>10</sup>

*Deixa-me ser o que sou,  
o que sempre fui,  
um rio que vai fluindo.  
E o meu destino é seguir... seguir para o mar.  
O mar onde tudo recomeça...  
Onde tudo se refaz...*

---

<sup>10</sup> Quintana, Mario. *Água: os últimos textos de Mario Quintana*. ed. trilingüe. Porto Alegre: Artes e Ofícios, 2001. 77 p.

## **16 ANEXO A – CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL**

### **ANEXO A1**

Cálculo da evapotranspiração potencial baseado na temperatura: equação de Thornthwaite.

### **ANEXO A2**

Cálculo da evapotranspiração potencial baseado na radiação: equação de Jensen e Haise.

### **ANEXO A3**

Cálculo da evapotranspiração potencial baseado no método combinado: equação de Penman.

## 16.1 Anexo A1

**Cálculo da evapotranspiração potencial baseado na temperatura: equação de Thornthwaite.**

Fator de correção													
LAT	LAT (Decimal)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
10	10	1	0,91	1,03	1,03	1,08	1,06	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
19° 38'	19,63	0,95185	0,90037	1,03	1,04926	1,12815	1,10815	1,13778	1,10852	1,02	1,00074	0,93185	0,94185
20	20	0,95	0,9	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1	0,93	0,94

	T média mensal (°C)	$i = (T/5)^{1,514}$	ETP não ajustada (mm)	Fator de ajuste	ETP ajustada (mm)
Janeiro	25,10	11,504	138,502	0,952	131,834
Fevereiro	24,10	10,818	134,854	0,900	121,418
Março	23,90	10,682	134,118	1,030	138,141
Abril	23,30	10,279	131,897	1,049	138,394
Mai	22,80	9,947	130,031	1,128	146,695
Junho	18,80	7,427	114,560	1,108	126,949
Julho	17,70	6,779	110,113	1,138	125,284
Agosto	19,70	7,972	118,132	1,109	130,952
Setembro	23,20	10,212	131,525	1,020	134,155
Outubro	22,40	9,684	128,529	1,001	128,624
Novembro	22,00	9,423	127,017	0,932	118,361
Dezembro	22,90	10,013	130,406	0,942	122,822
		<b>I = 9,562</b>			<b>ETP<sub>(1988)</sub> = 1563,629</b>
		<b>a = 0,657</b>			

	T média mensal (°C)	$i = (T/5)^{1.514}$	ETP não ajustada (mm)	Fator de ajuste	ETP ajustada (mm)
Janeiro	22,60	9,815	129,819	0,952	123,568
Fevereiro	23,90	10,682	134,645	0,900	121,230
Março	23,50	10,413	133,170	1,030	137,165
Abril	22,30	9,618	128,692	1,049	135,032
Maio	20,50	8,467	121,815	1,128	137,426
Junho	19,80	8,034	119,085	1,108	131,964
Julho	18,80	7,427	115,125	1,138	130,987
Agosto	19,70	7,972	118,692	1,109	131,572
Setembro	20,70	8,593	122,589	1,020	125,041
Outubro	22,40	9,684	129,068	1,001	129,164
Novembro	23,50	10,413	133,170	0,932	124,094
Dezembro	23,80	10,614	134,277	0,942	126,468
		<b>I = 9,311</b>	<b>ETP<sub>(1991)</sub> = 1553,711</b>		
		<b>a = 0,653</b>			

	T média mensal (°C)	$i = (T/5)^{1.514}$	ETP não ajustada (mm)	Fator de ajuste	ETP ajustada (mm)
Janeiro	22,90	10,013	130,899	0,952	124,596
Fevereiro	22,90	10,013	130,899	0,900	117,857
Março	24,00	10,750	134,978	1,030	139,027
Abril	23,60	10,480	133,502	1,049	140,079
Maio	22,20	9,553	128,267	1,128	144,705
Junho	20,10	8,219	120,195	1,108	133,195
Julho	19,40	7,789	117,441	1,138	133,622
Agosto	20,80	8,656	122,917	1,109	136,256
Setembro	20,60	8,530	122,143	1,020	124,586
Outubro	22,10	9,488	127,889	1,001	127,984
Novembro	22,40	9,684	129,022	0,932	120,229
Dezembro	22,40	9,684	129,022	0,942	121,519
		<b>I = 9,405</b>	<b>ETP<sub>(1992)</sub> = 1563,655</b>		
		<b>a = 0,654</b>			

	T média mensal (°C)	$i = (T/5)^{1.514}$	ETP não ajustada (mm)	Fator de ajuste	ETP ajustada (mm)
Janeiro	23,80	10,614	133,724	0,952	127,285
Fevereiro	23,40	10,346	132,240	0,900	119,065
Março	24,40	11,022	135,934	1,030	140,012
Abril	22,70	9,881	129,623	1,049	136,008
Maio	19,90	8,095	118,863	1,128	134,096
Junho	18,70	7,368	114,095	1,108	126,435
Julho	20,30	8,343	120,431	1,138	137,024
Agosto	20,40	8,405	120,821	1,109	133,932
Setembro	23,10	10,145	131,122	1,020	133,744
Outubro	23,40	10,346	132,240	1,001	132,338
Novembro	24,40	11,022	135,934	0,932	126,670
Dezembro	23,30	10,279	131,868	0,942	124,200
		<b>I = 9,655</b>	<b>ETP<sub>(1993)</sub> = 1570,809</b>		
		<b>a = 0,658</b>			

	T média mensal (°C)	$i = (T/5)^{1,514}$	ETP não ajustada (mm)	Fator de ajuste	ETP ajustada (mm)
Janeiro	23,30	10,279	132,808	0,952	126,413
Fevereiro	20,07	8,200	120,515	0,900	108,508
Março	22,30	9,618	129,070	1,030	132,942
Abril	22,10	9,488	128,315	1,049	134,636
Mai	21,20	8,909	124,889	1,128	140,894
Junho	19,10	7,608	116,691	1,108	129,311
Julho	18,60	7,308	114,693	1,138	130,496
Agosto	19,90	8,095	119,849	1,109	132,855
Setembro	22,30	9,618	129,070	1,020	131,651
Outubro	23,90	10,682	135,024	1,001	135,124
Novembro	23,20	10,212	132,437	0,932	123,411
Dezembro	23,70	10,547	134,288	0,942	126,479
		<b>I = 9,214</b>			<b>ETP<sub>(1994)</sub> = 1552,719</b>
		<b>a = 0,651</b>			

	T média mensal (°C)	$i = (T/5)^{1,514}$	ETP não ajustada (mm)	Fator de ajuste	ETP ajustada (mm)
Janeiro	25,50	11,783	140,173	0,952	133,424
Fevereiro	24,20	10,886	135,452	0,900	121,957
Março	23,70	10,547	133,612	1,030	137,621
Abril	22,30	9,618	128,390	1,049	134,714
Mai	20,50	8,467	121,506	1,128	137,077
Junho	18,60	7,308	114,008	1,108	126,338
Julho	19,40	7,789	117,196	1,138	133,343
Agosto	21,30	8,973	124,590	1,109	138,111
Setembro	21,50	9,101	125,355	1,020	127,862
Outubro	22,50	9,749	129,143	1,001	129,238
Novembro	22,10	9,488	127,635	0,932	118,936
Dezembro	22,40	9,684	128,767	0,942	121,279
		<b>I = 9,449</b>			<b>ETP<sub>(1995)</sub> = 1559,899</b>
		<b>a = 0,655</b>			

	T média mensal (°C)	$i = (T/5)^{1,514}$	ETP não ajustada (mm)	Fator de ajuste	ETP ajustada (mm)
Janeiro	24,50	11,091	137,286	0,952	130,676
Fevereiro	24,20	10,886	136,192	0,900	122,623
Março	23,90	10,682	135,094	1,030	139,147
Abril	22,10	9,488	128,399	1,049	134,724
Mai	19,30	7,728	117,589	1,128	132,658
Junho	18,60	7,308	114,803	1,108	127,219
Julho	18,60	7,308	114,803	1,138	130,620
Agosto	19,00	7,547	116,399	1,109	129,031
Setembro	20,50	8,467	122,285	1,020	124,731
Outubro	22,90	10,013	131,397	1,001	131,494
Novembro	21,60	9,165	126,505	0,932	117,884
Dezembro	22,30	9,618	129,152	0,942	121,642
		<b>I = 9,108</b>			<b>ETP<sub>(1996)</sub> = 1542,448</b>
		<b>a = 0,649</b>			

	T média mensal (°C)	$i = (T/5)^{1,514}$	ETP não ajustada (mm)	Fator de ajuste	ETP ajustada (mm)
Janeiro	23,00	10,079	131,336	0,952	125,012
Fevereiro	23,70	10,547	133,930	0,900	120,586
Março	22,00	9,423	127,582	1,030	131,409
Abril	21,40	9,037	125,301	1,049	131,473
Mai	19,10	7,608	116,343	1,128	131,252
Junho	18,40	7,189	113,543	1,108	125,823
Julho	18,70	7,368	114,748	1,138	130,558
Agosto	19,80	8,034	119,107	1,109	132,033
Setembro	23,30	10,279	132,451	1,020	135,100
Outubro	23,40	10,346	132,821	1,001	132,919
Novembro	24,60	11,159	137,226	0,932	127,874
Dezembro	23,70	10,547	133,930	0,942	126,142
		<b>I = 9,301</b>			<b>ETP<sub>(1997)</sub> = 1550,180</b>
		<b>a = 0,652</b>			

	T média mensal (°C)	$i = (T/5)^{1,514}$	ETP não ajustada (mm)	Fator de ajuste	ETP ajustada (mm)
Janeiro	23,90	10,682	134,146	0,952	127,687
Fevereiro	25,20	11,574	138,902	0,900	125,063
Março	24,50	11,091	136,352	1,030	140,442
Abril	23,20	10,212	131,548	1,049	138,028
Mai	20,40	8,405	120,876	1,128	136,367
Junho	18,20	7,071	112,135	1,108	124,262
Julho	18,90	7,487	114,953	1,138	130,792
Agosto	21,80	9,294	126,271	1,109	139,974
Setembro	23,40	10,346	132,293	1,020	134,939
Outubro	22,10	9,488	127,411	1,001	127,506
Novembro	22,00	9,423	127,032	0,932	118,375
Dezembro	23,60	10,480	133,036	0,942	125,300
		<b>I = 9,629</b>			<b>ETP<sub>(1998)</sub> = 1568,734</b>
		<b>a = 0,658</b>			

	T média mensal (°C)	$i = (T/5)^{1,514}$	ETP não ajustada (mm)	Fator de ajuste	ETP ajustada (mm)
Janeiro	24,50	11,091	136,387	0,952	129,820
Fevereiro	24,70	11,228	137,117	0,900	123,456
Março	23,50	10,413	132,709	1,030	136,690
Abril	22,60	9,815	129,351	1,049	135,723
Mai	19,70	7,972	118,206	1,128	133,354
Junho	19,50	7,850	117,417	1,108	130,115
Julho	19,70	7,972	118,206	1,138	134,492
Agosto	20,27	8,322	120,426	1,109	133,494
Setembro	21,96	9,397	126,936	1,020	129,475
Outubro	22,83	9,966	130,214	1,001	130,310
Novembro	23,04	10,106	130,998	0,932	122,071
Dezembro	23,19	10,205	131,557	0,942	123,907
		<b>I = 9,528</b>			<b>ETP<sub>(1999)</sub> = 1562,907</b>
		<b>a = 0,656</b>			

Ano	P (mm/ano)	ETP (mm/ano)
1988	867,0	1563,6
1990	492,1	1575,7
1991	1031,0	1553,7
1992	1400,1	1563,7
1993	743,2	1570,8
1994	1206,9	1552,7
1995	1527,3	1559,9
1996	1544,5	1542,4
1997	1431,4	1550,2
1998	1436,8	1568,7
1999	1305,3	1562,9
	<b>Média</b>	<b>1560,4</b>
	$\sigma_{\text{anual}}$	<b>9,8</b>

16.2 **Anexo A2**

**Cálculo da evapotranspiração potencial baseado na radiação: equação de Jensen e Haise.**

T média mensal (°C)	Radiação solar (cal. cm <sup>2</sup> /mês)	ETP (mm/mês)
22,60	7220,60	78,94
23,90	8471,70	97,28
23,50	8011,50	90,64
22,30	7634,60	82,49
20,50	7404,70	74,36
19,80	6890,50	67,15
18,80	6882,20	64,16
19,70	8216,20	79,72
20,70	8311,30	84,17
22,40	9490,80	102,95
23,50	8506,60	96,24
23,80	8201,20	93,83
<b>ETP (mm/ano 1991) =</b>		<b>1011,93</b>

T média mensal (°C)	Radiação solar (cal. cm <sup>2</sup> /mês)	ETP (mm/mês)
22,90	5911,00	65,37
22,90	8006,00	88,54
24,00	8899,20	102,57
23,60	6230,70	70,76
22,20	5017,70	54,00
20,10	4660,50	46,01
19,40	5139,10	49,21
20,80	5849,20	59,48
20,60	4978,20	50,20
22,10	5473,30	58,68
22,40	5179,90	56,19
22,40	5525,10	59,93
<b>ETP (mm/ano 1992) =</b>		<b>760,95</b>

T média mensal (°C)	Radiação solar (cal. cm <sup>2</sup> /mês)	ETP (mm/mês)
23,80	6490,00	74,25
23,40	5214,40	58,77
24,40	6419,20	75,07
22,70	4977,70	54,63
19,90	4729,60	46,29
18,70	4345,90	40,33
20,30	4836,50	48,16
20,40	4568,20	45,68
23,10	4923,70	54,87
23,40	6849,30	77,20
24,40	6433,30	75,24
23,30	4746,90	53,30
<b>ETP (mm/ano 1993) =</b>		<b>703,80</b>

T média mensal (°C)	Radiação solar (cal. cm <sup>2</sup> /mês)	ETP (mm/mês)
23,30	5364,20	60,23
24,03	6672,40	76,99
22,30	4580,60	49,49
22,10	4653,30	49,88
21,20	4007,60	41,43
19,10	3793,10	35,84
18,60	5141,20	47,49
19,90	5111,40	50,03
22,30	5638,90	60,93
23,90	5321,40	61,11
23,20	4683,20	52,39
23,70	4975,00	56,71
<b>ETP (mm/ano 1994) =</b>		<b>642,53</b>

T média mensal (°C)	Radiação solar (cal. cm <sup>2</sup> /mês)	ETP (mm/mês)
25,50	5659,50	68,83
24,20	4237,90	49,20
23,70	4414,00	50,31
22,30	3667,60	39,63
20,50	3437,20	34,52
18,60	3550,10	32,79
19,40	3982,40	38,14
21,30	5853,70	60,77
21,50	7102,50	74,34
22,50	6665,70	72,59
22,10	5996,39	64,28
22,40	5593,40	60,67
<b>ETP (mm/ano 1995) =</b>		<b>646,07</b>

T média mensal (°C)	Radiação solar (cal. cm <sup>2</sup> /mês)	ETP (mm/mês)
24,50	7603,20	89,24
24,20	6510,80	75,59
23,90	6519,60	74,86
22,10	6169,20	66,14
19,30	5888,10	56,14
18,60	5225,60	48,27
18,60	5814,90	53,71
19,00	6160,80	57,95
20,50	5974,20	60,00
22,90	6640,60	73,44
21,60	5412,10	56,87
22,30	5942,10	64,20
<b>ETP (mm/ano 1996) =</b>		<b>776,42</b>

T média mensal (°C)	Radiação solar (cal. cm <sup>2</sup> /mês)	ETP (mm/mês)
23,00	5470,30	60,73
23,70	6650,60	75,81
22,00	5368,30	57,32
21,40	5317,10	55,42
19,10	5294,90	50,03
18,40	4126,50	37,77
18,70	5360,70	49,75
19,80	6499,30	63,34
23,30	6378,10	71,62
23,40	7297,60	82,25
24,60	6430,30	75,75
23,70	6552,60	74,69
<b>ETP (mm/ano 1997) =</b>		<b>754,47</b>

T média mensal (°C)	Radiação solar (cal. cm <sup>2</sup> /mês)	ETP (mm/mês)
23,90	6756,00	77,58
25,20	5940,40	71,49
24,50	6761,30	79,36
23,20	5983,50	66,93
20,40	5070,90	50,71
18,20	4628,60	41,97
18,90	5659,20	53,00
21,80	5531,20	58,59
23,40	6567,60	74,02
22,10	5586,90	59,89
22,00	5329,30	56,91
23,60	6563,90	74,54
<b>ETP (mm/ano 1998) =</b>		<b>764,99</b>

T média mensal (°C)	Radiação solar (cal. cm <sup>2</sup> /mês)	ETP (mm/mês)
24,50	6309,35	74,05
24,70	6463,03	76,41
23,50	6371,71	72,09
22,60	5579,21	60,99
19,70	5106,34	49,55
19,50	4652,60	44,75
19,70	5352,03	51,93
20,34	5973,75	59,58
21,93	6234,31	66,37
22,84	6665,70	73,54
22,98	5996,39	66,51
23,15	6012,53	67,13
<b>ETP (mm/ano 1999) =</b>		<b>762,90</b>

Ano	P (mm/ano)	ETP (mm/ano)
1988	867,0	1563,6
1990	492,1	1575,7
1991	1031,0	1553,7
1992	1400,1	1563,7
1993	743,2	1570,8
1994	1206,9	1552,7
1995	1527,3	1559,9
1996	1544,5	1542,4
1997	1431,4	1550,2
1998	1436,8	1568,7
1999	1305,3	1562,9
<b>Média (mm/ano)</b>		<b>1560,4</b>
<b><math>\sigma_{anual}</math> (mm/ano)</b>		<b>9,8</b>

**16.3 Anexo A3**

**Cálculo da evapotranspiração potencial baseado no método combinado: equação de Penman**

Rt													
LAT	LAT (Decimal)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
18	18	968	932	850	743	637	590	620	702	814	903	956	974
19° 38'	19,630	976,965	932,000	840,220	724,255	618,255	570,440	600,440	687,330	804,220	898,110	960,890	982,965
20	20	979	932	838	720	614	566	596	684	802	897	962	985

Duração máxima da insolação diária													
LAT	LAT (Decimal)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
18	18	13,1	12,7	12,2	11,7	11,3	11,1	11,1	11,5	12	12,5	13	13,2
19° 38'	19,630	13,100	12,782	12,200	11,619	11,219	10,937	11,019	11,419	12,000	12,500	13,163	13,282
20	20	13,1	12,8	12,2	11,6	11,2	10,9	11	11,4	12	12,5	13,2	13,3

## 1990

Mês	Umidade (%)	T média mensal (°C)	T (K)	e <sub>s</sub> (mm Hg)	e <sub>a</sub> (mm Hg)	a (Albedo)	Rt (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Insolação máxima diária (h)	Insolação mensal (h)	Insolação média diária (h)
Jan	68	25,80	298,80	24,907	16,937	0,2	976,965	13,100	286,20	9,2323
Fev	75	24,40	297,40	22,916	17,118	0,2	932,000	12,782	195,00	6,9643
Mar	74	24,70	297,70	23,331	17,265	0,2	840,220	12,200	238,40	7,6903
Abr	74	23,60	296,60	21,842	16,141	0,2	724,255	11,619	228,70	7,6233
Mai	74	20,50	293,50	18,082	13,435	0,2	618,255	11,219	232,60	7,5032
Jun	75	19,60	292,60	17,103	12,759	0,2	570,440	10,937	232,00	7,7333
Jul	62	19,60	292,60	17,103	10,570	0,2	600,440	11,019	230,20	7,4258
Ago	67	20,27	293,27	17,828	11,998	0,2	687,330	11,419	176,30	5,6871
Set	62	21,00	294,00	18,648	11,599	0,2	804,220	12,000	240,70	8,0233
Out	63	23,20	296,20	21,321	13,454	0,2	898,110	12,500	216,40	6,9806
Nov	63	24,60	297,60	23,192	14,611	0,2	960,890	13,163	234,90	7,8300
Dez	67	23,80	296,80	22,106	14,899	0,2	982,965	13,282	203,00	6,5484

## 1990

Mês	p	G (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	σ (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	L (cal/cm <sup>2</sup> .mm)	q <sub>ef</sub> /L (mm/dia)	Δγ	w <sub>1</sub> (m/s)	w <sub>2</sub> (m/s)	E <sub>i</sub> (mm/dia)	E <sub>o</sub> (mm/dia)	E <sub>o</sub> (mm/mês)
Jan	0,7048	633,8124	0,000000119	59	6,3557	3,036	1,40	0,93	2,806	5,476	169,758
Fev	0,5449	518,2162	0,000000119	59	5,2788	2,823	2,10	1,40	2,047	4,433	124,136
Mar	0,6304	508,8419	0,000000119	59	4,9328	2,867	1,50	1,00	2,136	4,210	130,501
Abr	0,6561	449,4435	0,000000119	59	3,9555	2,707	2,00	1,33	2,012	3,431	102,936
Mai	0,6688	388,2142	0,000000119	59	2,8464	2,295	1,30	0,87	1,635	2,479	76,846
Jun	0,7071	370,8467	0,000000119	59	2,4317	2,186	2,80	1,87	1,538	2,151	64,539
Jul	0,6739	378,8087	0,000000119	59	2,3432	2,186	2,20	1,47	2,308	2,332	72,294
Ago	0,4981	363,5115	0,000000119	59	2,8983	2,267	2,90	1,93	2,065	2,643	81,940
Set	0,6686	504,8848	0,000000119	59	4,1654	2,358	3,00	2,00	2,498	3,669	110,064
Out	0,5585	506,4460	0,000000119	59	4,7163	2,651	3,20	2,13	2,790	4,189	129,852
Nov	0,5948	562,1327	0,000000119	59	5,4511	2,853	2,70	1,80	3,037	4,824	144,735
Dez	0,4930	517,0067	0,000000119	59	5,2010	2,736	1,90	1,27	2,542	4,489	139,167

**E<sub>o</sub> (mm/ano 1990) = 1346,769**

## 1991

Mês	Umidade (%)	T média mensal (°C)	T (K)	e <sub>s</sub> (mm Hg)	e <sub>a</sub> (mm Hg)	a (Albedo)	Rt (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Insolação máxima diária (h)	Insolação mensal (h)	Insolação média diária (h)
Jan	81	22,60	295,60	20,561	16,716	0,2	976,965	13,100	107,90	3,4806
Fev	74	23,90	296,90	22,239	16,457	0,2	932,000	12,782	183,60	6,5571
Mar	75	23,50	296,50	21,711	16,196	0,2	840,220	12,200	163,50	5,2742
Abr	70	22,30	295,30	20,190	14,052	0,2	724,255	11,619	209,50	6,9833
Mai	68	20,50	293,50	18,082	12,350	0,2	618,255	11,219	224,90	7,2548
Jun	67	19,80	292,80	17,317	11,567	0,2	570,440	10,937	255,60	8,5200
Jul	61	18,80	291,80	16,272	9,942	0,2	600,440	11,019	228,40	7,3677
Ago	55	19,70	292,70	17,209	9,465	0,2	687,330	11,419	238,10	7,6806
Set	61	20,70	293,70	18,307	11,222	0,2	804,220	12,000	177,70	5,9233
Out	63	22,40	295,40	20,313	12,817	0,2	898,110	12,500	203,10	6,5516
Nov	70	23,50	296,50	21,711	15,176	0,2	960,890	13,163	176,40	5,8800
Dez	74	23,80	296,80	22,106	16,358	0,2	982,965	13,282	148,20	4,7806

## 1991

Mês	p	G (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	σ (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	L (cal/cm <sup>2</sup> .mm)	qef/L (mm/dia)	Δ/γ	w <sub>1</sub> (m/s)	w <sub>2</sub> (m/s)	Ei (mm/dia)	Eo (mm/dia)	Eo (mm/mês)
Jan	0,2657	385,0267	0,000000119	59	4,2178	2,568	1,30	0,87	1,353	3,415	105,862
Fev	0,5130	500,9971	0,000000119	59	5,0774	2,750	1,40	0,93	2,036	4,266	119,456
Mar	0,4323	412,3299	0,000000119	59	4,0829	2,693	2,30	1,53	1,949	3,505	108,654
Abr	0,6011	426,3042	0,000000119	59	3,5919	2,527	2,20	1,47	2,168	3,188	95,646
Mai	0,6467	380,2747	0,000000119	59	2,6686	2,295	1,70	1,13	2,020	2,472	76,629
Jun	0,7790	394,6441	0,000000119	59	2,3358	2,210	2,60	1,73	2,034	2,242	67,253
Jul	0,6687	376,9735	0,000000119	59	2,2768	2,093	2,20	1,47	2,236	2,264	70,169
Ago	0,6726	433,1118	0,000000119	59	2,9163	2,198	2,30	1,53	2,736	2,860	88,662
Set	0,4936	423,2565	0,000000119	59	3,6276	2,320	2,20	1,47	2,502	3,289	98,662
Out	0,5241	488,5672	0,000000119	59	4,5367	2,541	3,40	2,27	2,661	4,007	124,213
Nov	0,4467	479,5705	0,000000119	59	4,8640	2,693	1,80	1,20	2,304	4,171	125,126
Dez	0,3599	441,1249	0,000000119	59	4,6809	2,736	1,90	1,27	2,028	3,971	123,089

**E<sub>o</sub> (mm/ano 1991) = 1203,419**

## 1992

Mês	Umidade (%)	T média mensal (°C)	T (K)	e <sub>s</sub> (mm Hg)	e <sub>a</sub> (mm Hg)	a (Albedo)	Rt (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Insolação máxima diária (h)	Insolação mensal (h)	Insolação média diária (h)
Jan	84	22,90	295,90	20,9380	17,4832	0,2	976,965	13,100	87,20	2,8129
Fev	69	22,90	295,90	20,9380	14,4681	0,2	932,000	12,782	162,80	5,8143
Mar	65	24,00	297,00	22,3732	14,4531	0,2	840,220	12,200	202,80	6,5419
Abr	68	23,60	296,60	21,8417	14,9179	0,2	724,255	11,619	171,60	5,7200
Mai	66	22,20	295,20	20,0671	13,2242	0,2	618,255	11,219	239,70	7,7323
Jun	63	20,10	293,10	17,6413	11,1493	0,2	570,440	10,937	230,00	7,6667
Jul	62	19,40	292,40	16,8918	10,5067	0,2	600,440	11,019	238,10	7,6806
Ago	62	20,80	293,80	18,4197	11,4202	0,2	687,330	11,419	219,10	7,0677
Set	72	20,60	293,60	18,1943	13,1363	0,2	804,220	12,000	149,10	4,9700
Out	73	22,10	295,10	19,9453	14,5601	0,2	898,110	12,500	154,30	4,9774
Nov	74	22,40	295,40	20,3126	15,1126	0,2	960,890	13,163	142,60	4,7533
Dez	77	22,40	295,40	20,3126	15,5595	0,2	982,965	13,282	155,60	5,0194

## 1992

Mês	p	G (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	σ (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	L (cal/cm <sup>2</sup> .mm)	qef/L (mm/dia)	Δ/γ	w <sub>1</sub> (m/s)	w <sub>2</sub> (m/s)	Ei (mm/dia)	Eo (mm/dia)	Eo (mm/mês)
Jan	0,2147	356,1436	0,000000119	59	3,9962	2,609	0,80	0,53	1,213	3,225	99,977
Fev	0,4549	469,5800	0,000000119	59	4,6527	2,609	1,10	0,73	2,275	3,994	111,828
Mar	0,5362	462,9697	0,000000119	59	4,2858	2,765	1,10	0,73	2,785	3,887	120,499
Abr	0,4923	380,6283	0,000000119	59	3,3606	2,707	1,30	0,87	2,436	3,111	93,340
Mai	0,6892	395,5349	0,000000119	59	2,7957	2,514	1,70	1,13	2,412	2,687	83,282
Jun	0,7010	368,8299	0,000000119	59	2,1780	2,246	2,60	1,73	2,297	2,215	66,438
Jul	0,6971	386,8632	0,000000119	59	2,3686	2,163	2,80	1,87	2,261	2,335	72,371
Ago	0,6190	411,7136	0,000000119	59	3,0561	2,333	2,40	1,60	2,474	2,882	89,328
Set	0,4142	386,1998	0,000000119	59	3,5801	2,308	3,10	2,07	1,793	3,040	91,196
Out	0,3982	422,9669	0,000000119	59	4,2167	2,501	2,50	1,67	1,904	3,556	110,241
Nov	0,3611	431,8678	0,000000119	59	4,4843	2,541	1,60	1,07	1,832	3,735	112,059
Dez	0,3779	451,3717	0,000000119	59	4,7347	2,541	1,60	1,07	1,675	3,870	119,985

**E<sub>o</sub> (mm/ano 1992) = 1170,544**

**1993**

Mês	Umidade (%)	T média mensal (°C)	T (K)	e <sub>s</sub> (mm Hg)	e <sub>a</sub> (mm Hg)	a (Albedo)	Rt (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Insolação máxima diária (h)	Insolação mensal (h)	Insolação média diária (h)
Jan	69	23,80	296,80	22,1061	15,2532	0,2	976,965	13,100	203,50	6,5645
Fev	74	23,40	296,40	21,5801	15,9693	0,2	932,000	12,782	157,30	5,6179
Mar	65	24,40	297,40	22,9160	14,8954	0,2	840,220	12,200	231,80	7,4774
Abr	73	22,70	295,70	20,6858	15,1007	0,2	724,255	11,619	197,90	6,5967
Mai	68	19,90	292,90	17,4242	11,8485	0,2	618,255	11,219	202,20	6,5226
Jun	57	18,70	291,70	16,1703	9,2170	0,2	570,440	10,937	211,90	7,0633
Jul	57	20,30	293,30	17,8607	10,1806	0,2	600,440	11,019	237,31	7,6551
Ago	59	20,40	293,40	17,9713	10,6031	0,2	687,330	11,419	85,10	2,7452
Set	54	23,10	296,10	21,1928	11,4441	0,2	804,220	12,000	170,00	5,6667
Out	60	23,40	296,40	21,5801	12,9480	0,2	898,110	12,500	238,50	7,6935
Nov	63	24,40	297,40	22,9160	14,4371	0,2	960,890	13,163	230,10	7,6700
Dez	75	23,30	296,30	21,4503	16,0877	0,2	982,965	13,282	146,80	4,7355

## 1994

Mês	Umidade (%)	T média mensal (°C)	T (K)	e <sub>s</sub> (mm Hg)	e <sub>a</sub> (mm Hg)	a (Albedo)	Rt (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Insolação máxima diária (h)	Insolação mensal (h)	Insolação média diária (h)
Jan	78	23,30	296,30	21,4503	16,7312	0,2	976,965	13,100	152,10	4,9065
Fev	58	24,07	297,07	22,4674	13,0311	0,2	932,000	12,782	278,30	9,9393
Mar	78	22,30	295,30	20,1895	15,7478	0,2	840,220	12,200	137,10	4,4226
Abr	52	22,10	295,10	19,9453	10,3715	0,2	724,255	11,619	220,40	7,3467
Mai	70	21,20	294,20	18,8778	13,2145	0,2	618,255	11,219	223,60	7,2129
Jun	66	19,10	292,10	16,5792	10,9423	0,2	570,440	10,937	228,95	7,6317
Jul	61	18,60	291,60	16,0694	9,8023	0,2	600,440	11,019	237,31	7,6551
Ago	53	19,90	292,90	17,4242	9,2348	0,2	687,330	11,419	228,10	7,3581
Set	51	22,30	295,30	20,1895	10,2967	0,2	804,220	12,000	218,40	7,2800
Out	58	23,90	296,90	22,2393	12,8988	0,2	898,110	12,500	197,00	6,3548
Nov	67	23,20	296,20	21,3212	14,2852	0,2	960,890	13,163	156,10	5,2033
Dez	71	23,70	296,70	21,9735	15,6012	0,2	982,965	13,282	164,40	5,3032

## 1994

Mês	p	G (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	σ (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	L (cal/cm <sup>2</sup> .mm)	qef/L (mm/dia)	Δ/γ	w <sub>1</sub> (m/s)	w <sub>2</sub> (m/s)	Ei (mm/dia)	Eo (mm/dia)	Eo (mm/mês)
Jan	0,3745	446,6999	0,000000119	59	4,7532	2,665	2,20	1,47	1,667	3,911	121,242
Fev	0,7776	644,0360	0,000000119	59	5,7786	2,775	1,90	1,27	3,329	5,130	143,629
Mar	0,3625	378,3123	0,000000119	59	3,8035	2,527	2,70	1,80	1,572	3,171	98,299
Abr	0,6323	439,4406	0,000000119	59	3,1937	2,501	2,40	1,60	3,384	3,248	97,444
Mai	0,6429	378,9343	0,000000119	59	2,7505	2,383	2,20	1,47	2,000	2,529	78,392
Jun	0,6978	367,7712	0,000000119	59	2,1830	2,128	1,70	1,13	1,987	2,120	63,609
Jul	0,6948	386,0568	0,000000119	59	2,2920	2,070	2,70	1,80	2,218	2,268	70,307
Ago	0,6444	421,8496	0,000000119	59	2,8281	2,222	3,50	2,33	2,908	2,853	88,441
Set	0,6067	475,9910	0,000000119	59	3,7671	2,527	4,50	3,00	3,527	3,699	110,974
Out	0,5084	480,3672	0,000000119	59	4,4446	2,750	2,40	1,60	3,302	4,140	128,335
Nov	0,3953	450,9207	0,000000119	59	4,5586	2,651	2,30	1,53	2,486	3,991	119,729
Dez	0,3993	463,5571	0,000000119	59	4,8171	2,721	2,20	1,47	2,251	4,127	127,952

$$E_o \text{ (mm/ano 1994)} = 1248,352$$

## 1995

Mês	Umidade (%)	T média mensal (°C)	T (K)	e <sub>s</sub> (mm Hg)	e <sub>a</sub> (mm Hg)	a (Albedo)	Rt (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Insolação máxima diária (h)	Insolação mensal (h)	Insolação média diária (h)
Jan	63	25,50	298,50	24,4684	15,4151	0,2	976,965	13,100	240,50	7,7581
Fev	56	24,20	297,20	22,6432	12,6802	0,2	932,000	12,782	175,80	6,2786
Mar	67	23,70	296,70	21,9735	14,7223	0,2	840,220	12,200	214,00	6,9032
Abr	70	22,30	295,30	20,1895	14,1327	0,2	724,255	11,619	218,30	7,2767
Mai	70	20,50	293,50	18,0825	12,6577	0,2	618,255	11,219	193,30	6,2355
Jun	63	18,60	291,60	16,0694	10,1237	0,2	570,440	10,937	232,00	7,7333
Jul	62	19,40	292,40	16,8918	10,4729	0,2	600,440	11,019	238,90	7,7065
Ago	51	21,30	294,30	18,9939	9,6869	0,2	687,330	11,419	268,10	8,6484
Set	56	21,50	294,50	19,2280	10,7677	0,2	804,220	12,000	214,50	7,1500
Out	66	22,50	295,50	20,4364	13,4880	0,2	898,110	12,500	211,30	6,8161
Nov	68	22,10	295,10	19,9453	13,5628	0,2	960,890	13,163	195,30	6,5100
Dez	77	22,40	295,40	20,3126	15,6407	0,2	982,965	13,282	157,20	5,0710

## 1995

Mês	p	G (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	σ (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	L (cal/cm <sup>2</sup> .mm)	qef/L (mm/dia)	Δ/γ	w <sub>1</sub> (m/s)	w <sub>2</sub> (m/s)	Ei (mm/dia)	Eo (mm/dia)	Eo (mm/mês)
Jan	0,5922	570,0462	0,000000119	59	5,6349	2,989	2,30	1,53	3,199	5,024	155,751
Fev	0,4912	489,2157	0,000000119	59	4,5903	2,794	1,30	0,87	3,506	4,304	120,524
Mar	0,5658	477,4014	0,000000119	59	4,4290	2,721	1,70	1,13	2,556	3,926	121,695
Abr	0,6263	436,9097	0,000000119	59	3,6680	2,527	2,40	1,60	2,141	3,235	97,053
Mai	0,5558	347,6921	0,000000119	59	2,5602	2,295	1,80	1,20	1,913	2,364	73,277
Jun	0,7071	370,8467	0,000000119	59	2,0900	2,070	2,60	1,73	2,104	2,094	62,831
Jul	0,6994	387,6788	0,000000119	59	2,3663	2,163	2,00	1,33	2,265	2,334	72,366
Ago	0,7574	466,8983	0,000000119	59	3,0206	2,396	2,30	1,53	3,289	3,100	96,086
Set	0,5958	470,9378	0,000000119	59	3,8307	2,422	3,10	2,07	2,999	3,588	107,633
Out	0,5453	499,5902	0,000000119	59	4,6893	2,554	1,50	1,00	2,447	4,059	125,814
Nov	0,4946	506,2444	0,000000119	59	4,9587	2,501	1,30	0,87	2,246	4,184	125,514
Dez	0,3818	453,5872	0,000000119	59	4,7600	2,541	0,80	0,53	1,641	3,879	120,250

**E<sub>o</sub> (mm/ano 1995) = 1278,795**

## 1996

Mês	Umidade (%)	T média mensal (°C)	T (K)	e <sub>s</sub> (mm Hg)	e <sub>a</sub> (mm Hg)	a (Albedo)	R <sub>t</sub> (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Insolação máxima diária (h)	Insolação mensal (h)	Insolação média diária (h)
Jan	66	24,50	297,50	23,0535	15,2153	0,2	976,965	13,100	251,80	8,1226
Fev	67	24,20	297,20	22,6432	15,1710	0,2	932,000	12,782	209,00	7,4643
Mar	69	23,90	296,90	22,2393	15,3451	0,2	840,220	12,200	220,60	7,1161
Abr	65	22,10	295,10	19,9453	12,9644	0,2	724,255	11,619	228,70	7,6233
Mai	69	19,30	292,30	16,7870	11,5830	0,2	618,255	11,219	216,40	6,9806
Jun	62	18,60	291,60	16,0694	9,9630	0,2	570,440	10,937	232,40	7,7467
Jul	62	18,60	291,60	16,0694	9,9630	0,2	600,440	11,019	258,50	8,3387
Ago	64	19,00	292,00	16,4761	10,5447	0,2	687,330	11,419	233,60	7,5355
Set	67	20,50	293,50	18,0825	12,1153	0,2	804,220	12,000	196,70	6,5567
Out	75	22,90	295,90	20,9380	15,7035	0,2	898,110	12,500	196,90	6,3516
Nov	84	21,60	294,60	19,3459	16,2506	0,2	960,890	13,163	135,90	4,5300
Dez	85	22,30	295,30	20,1895	17,1611	0,2	982,965	13,282	147,40	4,7548

## 1996

Mês	p	G (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	σ (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	L (cal/cm <sup>2</sup> .mm)	qef/L (mm/dia)	Δ/γ	w <sub>1</sub> (m/s)	w <sub>2</sub> (m/s)	E <sub>i</sub> (mm/dia)	E <sub>o</sub> (mm/dia)	E <sub>o</sub> (mm/mês)
Jan	0,6200	585,8133	0,000000119	59	5,7710	2,838	1,00	0,67	2,755	4,985	154,536
Fev	0,5840	539,3624	0,000000119	59	5,2515	2,794	1,60	1,07	2,633	4,561	127,713
Mar	0,5833	485,9058	0,000000119	59	4,5567	2,750	1,00	0,67	2,423	3,988	123,620
Abr	0,6561	449,4435	0,000000119	59	3,6021	2,501	1,30	0,87	2,457	3,275	98,245
Mai	0,6222	371,5104	0,000000119	59	2,5721	2,151	1,80	1,20	1,835	2,338	72,483
Jun	0,7083	371,2500	0,000000119	59	2,0665	2,070	1,40	0,93	2,150	2,094	62,808
Jul	0,7568	407,6623	0,000000119	59	2,3846	2,070	2,00	1,33	2,155	2,310	71,605
Ago	0,6599	428,0438	0,000000119	59	3,0796	2,116	2,10	1,40	2,094	2,763	85,663
Set	0,5464	447,8746	0,000000119	59	3,8876	2,295	2,20	1,47	2,108	3,348	100,425
Out	0,5081	480,2327	0,000000119	59	4,7593	2,609	1,30	0,87	1,842	3,951	122,480
Nov	0,3441	422,4120	0,000000119	59	4,5001	2,435	1,60	1,07	1,091	3,508	105,226
Dez	0,3580	440,0171	0,000000119	59	4,7543	2,527	1,30	0,87	1,066	3,709	114,968

$E_o$  (mm/ano 1996) = 1239,774

## 1997

Mês	Umidade (%)	T média mensal (°C)	T (K)	e <sub>s</sub> (mm Hg)	e <sub>a</sub> (mm Hg)	a (Albedo)	Rt (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Insolação máxima diária (h)	Insolação mensal (h)	Insolação média diária (h)
Jan	84	23,00	296,00	21,0650	17,6946	0,2	976,965	13,100	173,40	5,5935
Fev	72	23,70	296,70	21,9735	15,8209	0,2	932,000	12,782	233,60	8,3429
Mar	74	22,00	295,00	19,8241	14,6699	0,2	840,220	12,200	165,00	5,3226
Abr	69	21,40	294,40	19,1106	13,1863	0,2	724,255	11,619	207,70	6,9233
Mai	69	19,10	292,10	16,5792	11,4396	0,2	618,255	11,219	207,10	6,6806
Jun	71	18,40	291,40	15,8694	11,2673	0,2	570,440	10,937	219,00	7,3000
Jul	62	18,70	291,70	16,1703	10,0256	0,2	600,440	11,019	245,80	7,9290
Ago	54	19,80	292,80	17,3166	9,3509	0,2	687,330	11,419	277,90	8,9645
Set	47	23,30	296,30	21,4503	10,0816	0,2	804,220	12,000	229,20	7,6400
Out	64	23,40	296,40	21,5801	13,8113	0,2	898,110	12,500	235,60	7,6000
Nov	66	24,60	297,60	23,1917	15,3065	0,2	960,890	13,163	179,70	5,9900
Dez	72	23,70	296,70	21,9735	15,8209	0,2	982,965	13,282	190,20	6,1355

## 1997

Mês	p	G (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	σ (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	L (cal/cm <sup>2</sup> .mm)	qef/L (mm/dia)	Δ/γ	w <sub>1</sub> (m/s)	w <sub>2</sub> (m/s)	Ei (mm/dia)	Eo (mm/dia)	Eo (mm/mês)
Jan	0,4270	476,4202	0,000000119	59	5,0996	2,623	1,20	0,80	1,186	4,019	124,597
Fev	0,6527	576,5192	0,000000119	59	5,6465	2,721	1,50	1,00	2,167	4,711	131,921
Mar	0,4363	414,2627	0,000000119	59	3,9970	2,487	1,40	0,93	1,815	3,371	104,508
Abr	0,5959	424,1349	0,000000119	59	3,5029	2,409	0,90	0,60	2,081	3,086	92,578
Mai	0,5955	361,9212	0,000000119	59	2,5207	2,128	0,90	0,60	1,806	2,292	71,053
Jun	0,6675	357,7379	0,000000119	59	2,2226	2,048	1,00	0,67	1,617	2,024	60,721
Jul	0,7196	394,7138	0,000000119	59	2,3493	2,082	1,00	0,67	2,160	2,288	70,920
Ago	0,7851	477,9352	0,000000119	59	3,0753	2,210	1,20	0,80	2,802	2,990	92,693
Set	0,6367	489,9844	0,000000119	59	3,7747	2,665	1,40	0,93	4,002	3,837	115,103
Out	0,6080	532,2559	0,000000119	59	4,9448	2,679	1,40	0,93	2,735	4,344	134,668
Nov	0,4551	484,2278	0,000000119	59	4,8899	2,853	1,00	0,67	2,771	4,340	130,199
Dez	0,4620	499,2825	0,000000119	59	5,1414	2,721	1,00	0,67	2,162	4,341	134,566

**E<sub>o</sub> (mm/ano 1997) = 1263,526**

## 1998

Mês	Umidade (%)	T média mensal (°C)	T (K)	e <sub>s</sub> (mm Hg)	e <sub>a</sub> (mm Hg)	a (Albedo)	R <sub>t</sub> (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Insolação máxima diária (h)	Insolação mensal (h)	Insolação média diária (h)
Jan	71	23,90	296,90	22,2393	15,7899	0,2	976,965	13,100	196,70	6,3452
Fev	72	25,20	298,20	24,0362	17,3061	0,2	932,000	12,782	185,70	6,6321
Mar	71	24,50	297,50	23,0535	16,3680	0,2	840,220	12,200	213,90	6,9000
Abr	71	23,20	296,20	21,3212	15,1381	0,2	724,255	11,619	217,50	7,2500
Mai	69	20,40	293,40	17,9713	12,4002	0,2	618,255	11,219	205,20	6,6194
Jun	69	18,20	291,20	15,6716	10,8134	0,2	570,440	10,937	200,90	6,6967
Jul	65	18,90	291,90	16,3736	10,6428	0,2	600,440	11,019	246,80	7,9613
Ago	64	21,80	294,80	19,5838	12,5336	0,2	687,330	11,419	227,60	7,3419
Set	58	23,40	296,40	21,5801	12,5164	0,2	804,220	12,000	221,60	7,3867
Out	68	22,10	295,10	19,9453	13,5628	0,2	898,110	12,500	163,00	5,2581
Nov	72	22,00	295,00	19,8241	14,2734	0,2	960,890	13,163	160,00	5,3333
Dez	70	23,60	296,60	21,8417	15,2892	0,2	982,965	13,282	199,20	6,4258

## 1998

Mês	p	G (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	σ (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	L (cal/cm <sup>2</sup> .mm)	qef/L (mm/dia)	Δ/γ	w <sub>1</sub> (m/s)	w <sub>2</sub> (m/s)	E <sub>i</sub> (mm/dia)	E <sub>o</sub> (mm/dia)	E <sub>o</sub> (mm/mês)
Jan	0,4844	508,9312	0,000000119	59	5,2010	2,750	1,20	0,80	2,269	4,419	136,990
Fev	0,5189	504,1691	0,000000119	59	5,1579	2,943	1,10	0,73	2,366	4,450	124,597
Mar	0,5656	477,2725	0,000000119	59	4,5867	2,838	1,50	1,00	2,355	4,005	124,156
Abr	0,6240	435,9456	0,000000119	59	3,7558	2,651	1,60	1,07	2,179	3,324	99,714
Mai	0,5900	359,9621	0,000000119	59	2,5882	2,283	1,20	0,80	1,960	2,397	74,300
Jun	0,6123	339,4865	0,000000119	59	2,1100	2,025	1,40	0,93	1,710	1,978	59,335
Jul	0,7225	395,7334	0,000000119	59	2,4392	2,105	2,00	1,33	2,022	2,305	71,454
Ago	0,6430	421,2865	0,000000119	59	3,2168	2,461	1,60	1,07	2,484	3,005	93,158
Set	0,6156	480,1372	0,000000119	59	4,0507	2,679	1,80	1,20	3,196	3,818	114,552
Out	0,4206	434,6621	0,000000119	59	4,2207	2,501	1,70	1,13	2,250	3,658	113,387
Nov	0,4052	456,4248	0,000000119	59	4,6275	2,487	1,50	1,00	1,955	3,861	115,834
Dez	0,4838	511,7448	0,000000119	59	5,1998	2,707	1,10	0,73	2,304	4,419	136,977

$E_o$  (mm/ano 1998) = 1264,455

## 1999

Mês	Umidade (%)	T média mensal (°C)	T (K)	e <sub>s</sub> (mm Hg)	e <sub>a</sub> (mm Hg)	a (Albedo)	Rt (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	Insolação máxima diária (h)	Insolação mensal (h)	Insolação média diária (h)
Jan	65	24,50	297,50	23,0535	14,9848	0,2	976,965	13,100	223,00	7,1935
Fev	64	24,70	297,70	23,3306	14,9316	0,2	932,000	12,782	209,60	7,4857
Mar	71	23,50	296,50	21,7105	15,4145	0,2	840,220	12,200	187,80	6,0581
Abr	66	22,60	295,60	20,5608	13,5701	0,2	724,255	11,619	224,70	7,4900
Mai	59	19,70	292,70	17,2095	10,1536	0,2	618,255	11,219	244,60	7,8903
Jun	60	19,50	292,50	16,9971	10,1983	0,2	570,440	10,937	218,70	7,2900
Jul	61	19,70	292,70	17,2095	10,4978	0,2	600,440	11,019	226,50	7,3065
Ago	50	20,27	293,27	17,8276	8,9138	0,2	687,330	11,419	260,50	8,4032
Set	53	21,96	294,96	19,7758	10,4812	0,2	804,220	12,000	211,50	7,0500
Out	62	22,83	295,83	20,8494	12,9266	0,2	898,110	12,500	157,10	5,0677
Nov	70	23,04	296,04	21,1161	14,7812	0,2	960,890	13,163	158,70	5,2900
Dez	72	23,19	296,19	21,3083	15,3420	0,2	982,965	13,282	168,60	5,4387

## 1999

Mês	p	G (cal/cm <sup>2</sup> .dia)	σ (cal/cm2.dia)	L (cal/cm <sup>2</sup> .mm)	qef/L (mm/dia)	Δ/γ	w <sub>1</sub> (m/s)	w <sub>2</sub> (m/s)	Ei (mm/dia)	Eo (mm/dia)	Eo (mm/mês)
Jan	0,5491	545,6281	0,000000119	59	5,4117	2,838	1,00	0,67	2,836	4,741	146,956
Fev	0,5857	540,2686	0,000000119	59	5,2173	2,867	1,10	0,73	2,953	4,632	129,692
Mar	0,4966	443,6415	0,000000119	59	4,2537	2,693	1,00	0,67	2,213	3,701	114,734
Abr	0,6447	444,6228	0,000000119	59	3,6357	2,568	1,30	0,87	2,460	3,306	99,185
Mai	0,7033	400,5873	0,000000119	59	2,4669	2,198	1,20	0,80	2,482	2,472	76,619
Jun	0,6665	357,4354	0,000000119	59	2,0299	2,174	1,40	0,93	2,393	2,144	64,333
Jul	0,6631	375,0363	0,000000119	59	2,3166	2,198	1,20	0,80	2,361	2,330	72,243
Ago	0,7359	458,3390	0,000000119	59	2,9016	2,267	1,40	0,93	3,138	2,974	92,192
Set	0,5875	467,0508	0,000000119	59	3,7543	2,482	1,60	1,07	3,275	3,617	108,499
Out	0,4054	426,7309	0,000000119	59	4,0884	2,599	1,60	1,07	2,791	3,728	115,571
Nov	0,4019	454,5901	0,000000119	59	4,6334	2,628	1,30	0,87	2,229	3,971	119,125
Dez	0,4095	469,3728	0,000000119	59	4,8553	2,649	1,40	0,93	2,100	4,100	127,113

$E_o$  (mm/ano 1999) = 1266,262

<b>Ano</b>	<b>P (mm/ano)</b>	<b>ETP (mm/ano)</b>
1990	492,1	1346,8
1991	1031,0	1203,4
1992	1400,1	1170,5
1993	743,2	1260,6
1994	1200,0	1248,4
1995	1527,3	1278,8
1996	1544,5	1239,8
1997	1431,4	1263,5
1998	1436,8	1264,5
1999	1305,3	1266,3
<b>Média (mm/ano)</b>		<b>1254,3</b>
$\sigma_{anual}$ (mm/ano)		<b>46,4</b>

## **17 ANEXO B – HIDROGRAMAS E MÉTODO DE SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTOS**

### **ANEXO B1**

Características fluviométricas das estações de Ponte Raul Soares e Vespasiano.

### **ANEXO B2**

Hidrogramas típicos da estação de Ponte Raul Soares.

### **ANEXO B3**

Memória de cálculo da estação de Ponte Raul Soares.

### **ANEXO B4**

Hidrogramas típicos da estação de Vespasiano.

### **ANEXO B5**

Memória de cálculo da estação Vespasiano.

17.1 **Anexo B1**

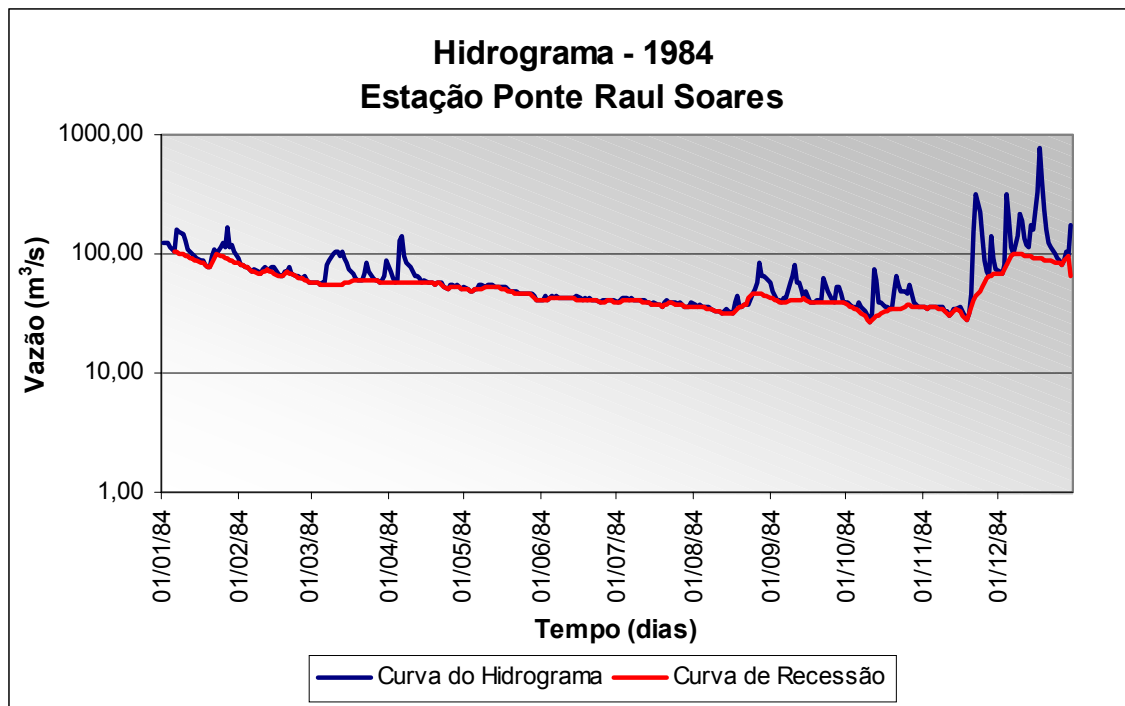
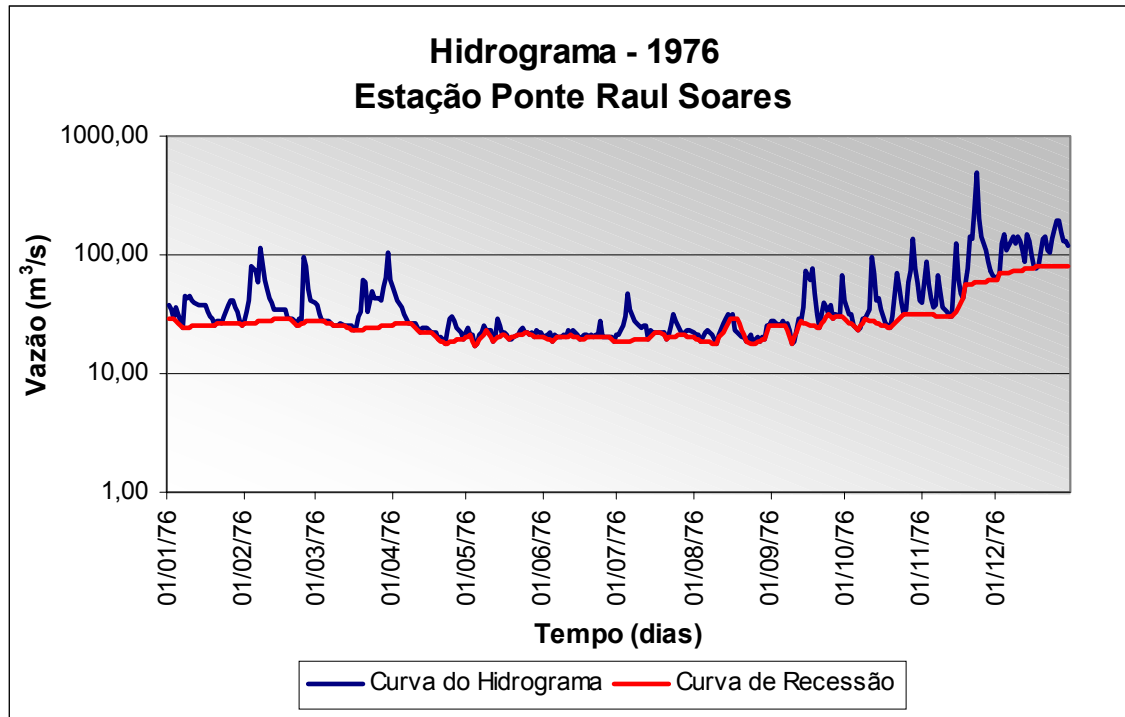
**Características das estações fluviométricas**

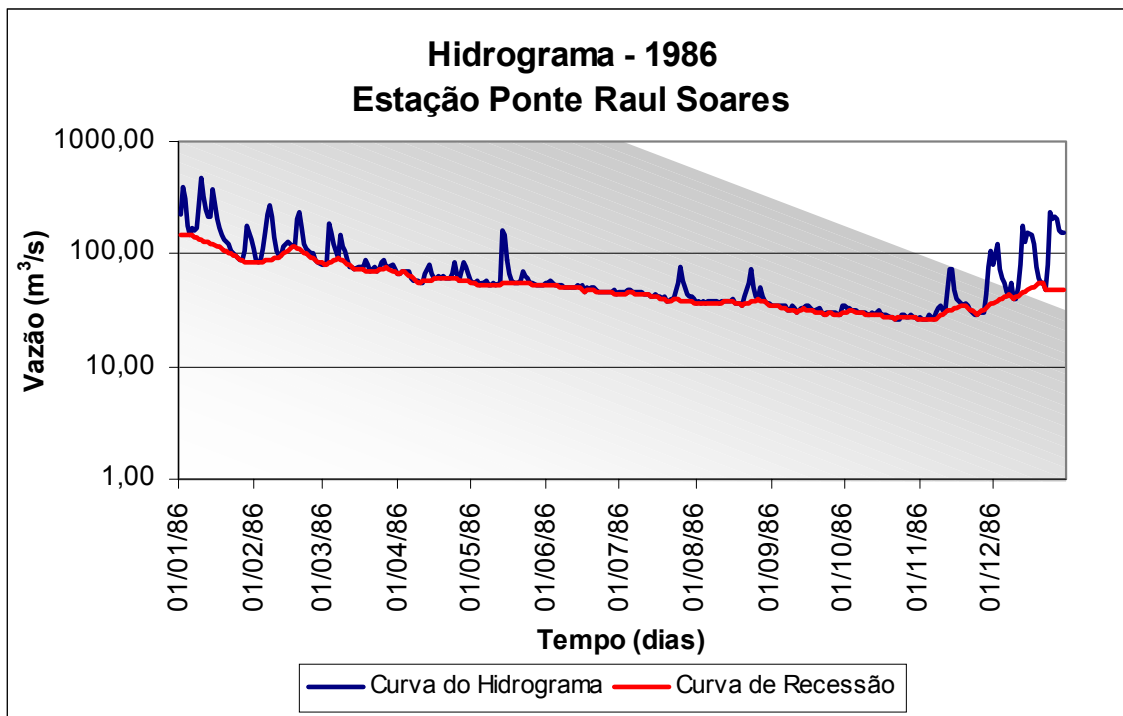
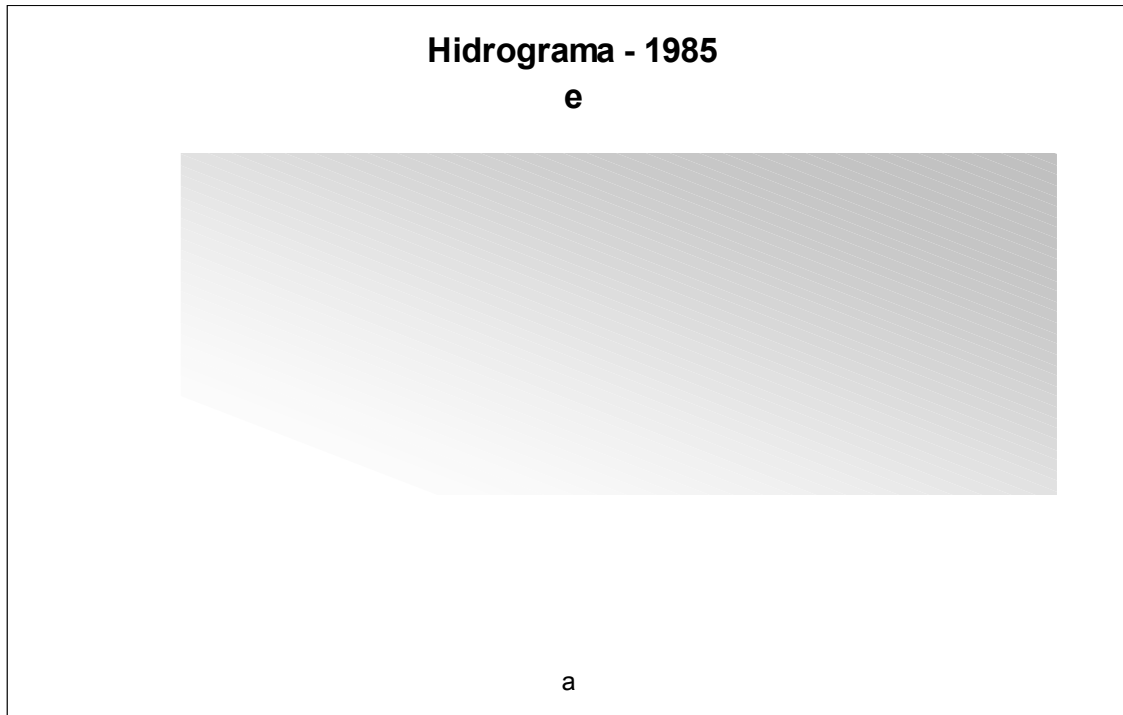
<b>Dados da Estação Fluviométrica</b>	
Código	41340000
Nome	Ponte Raul Soares
	PRM 9 3 7 8

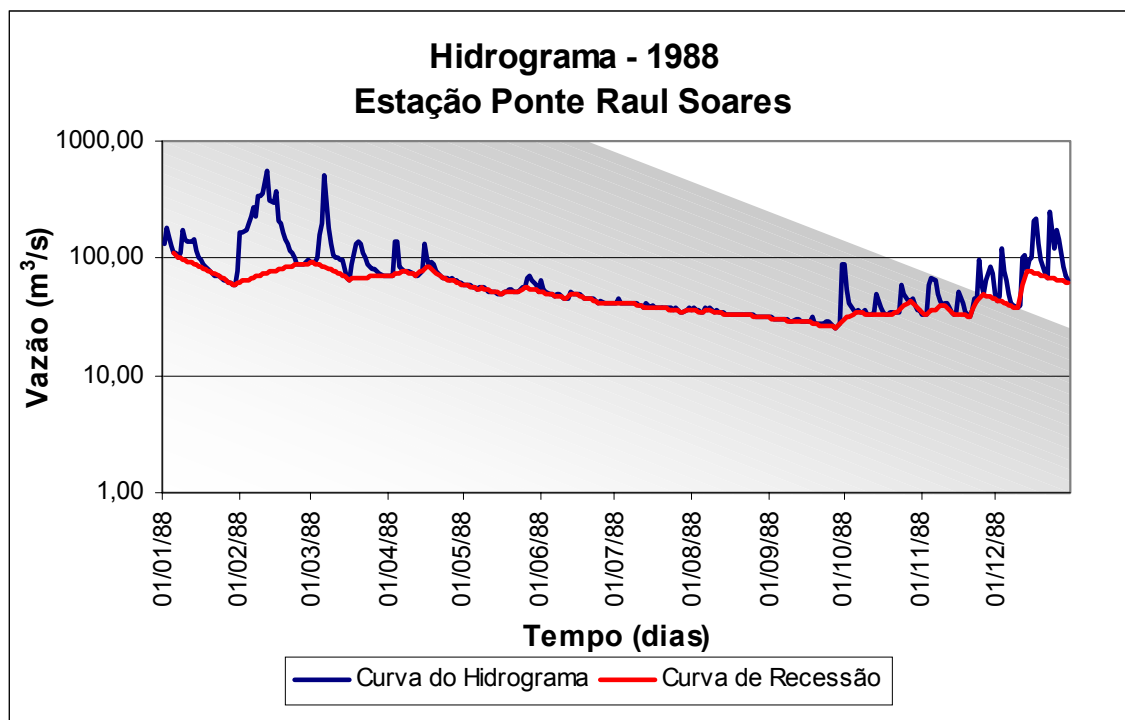
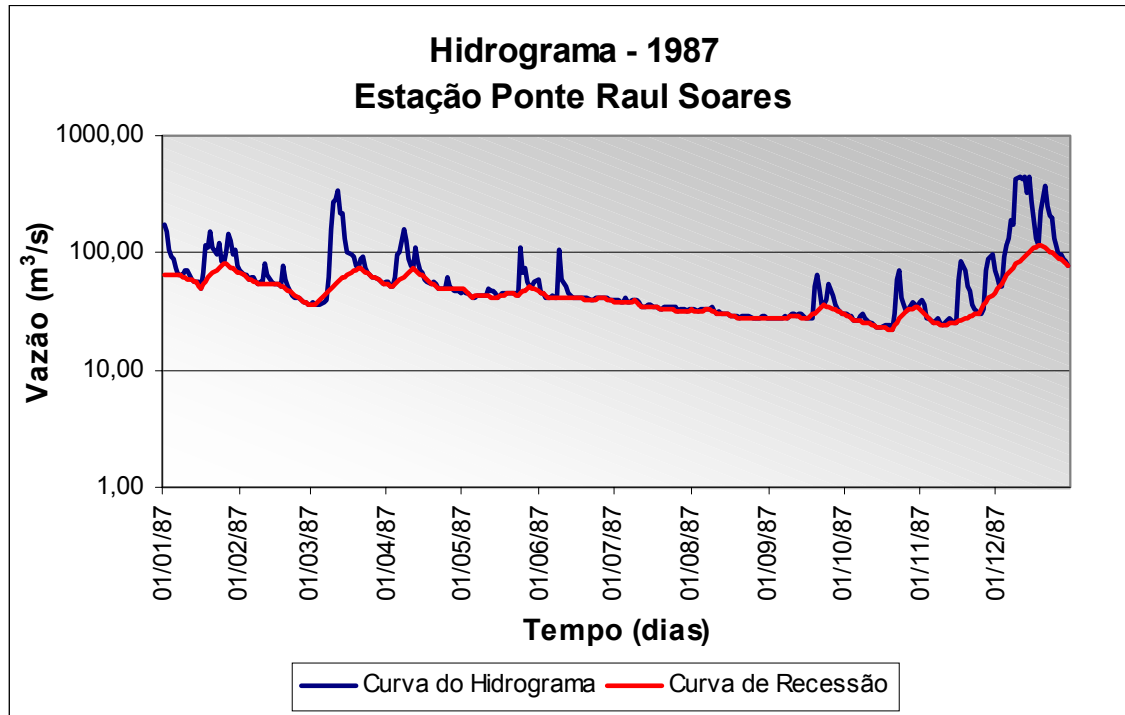
<b>Dados da Estação Fluviométrica</b>	
Código	41250000
Nome	Vespasiano
Código Adicional	-
Bacia	Rio São Francisco (4)
Sub-bacia	Rios São Francisco e das Velhas
Rio	Ribeirão da Mata
Estado	Minas Gerais
Município	Vespasiano
Responsável	ANA
Operadora	CPRM
Latitude	-19:41:14
Longitude	-43:55:14
Altitude (m)	674
Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	676

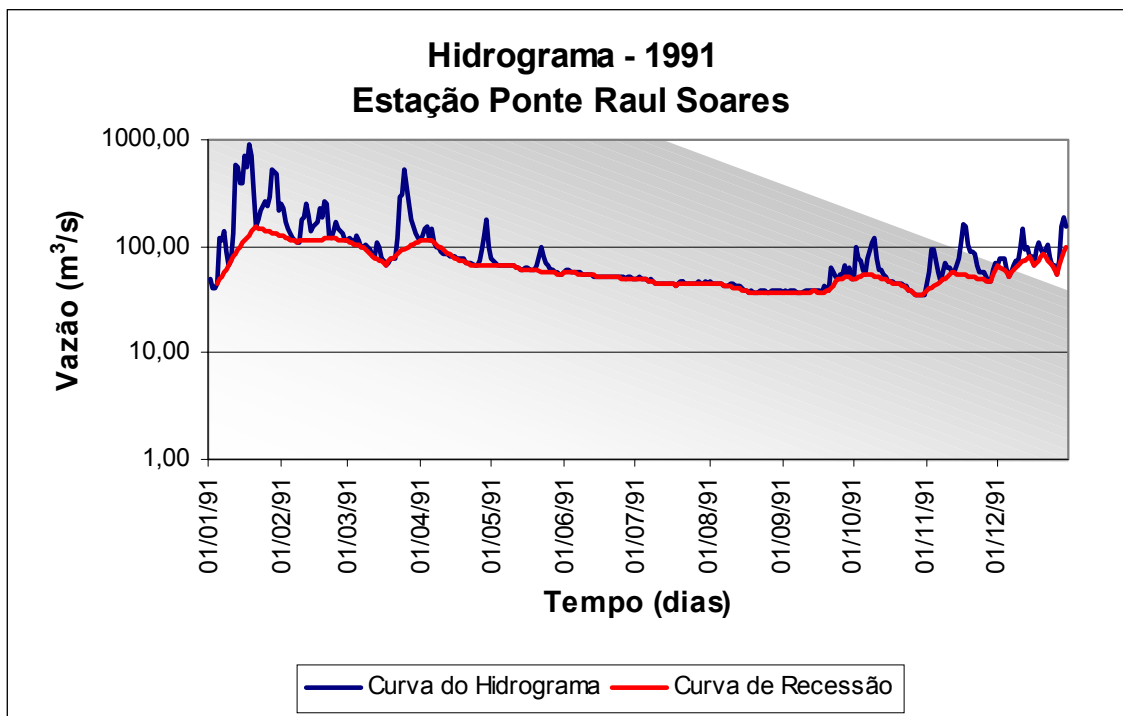
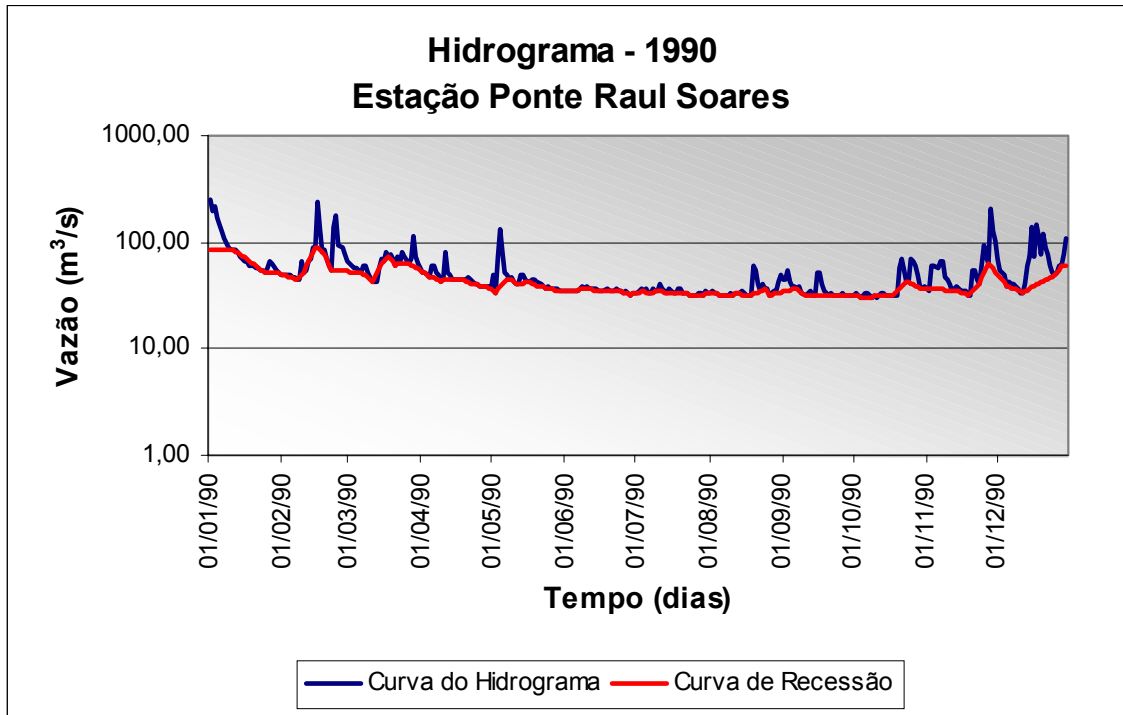
17.2 **Anexo B2**

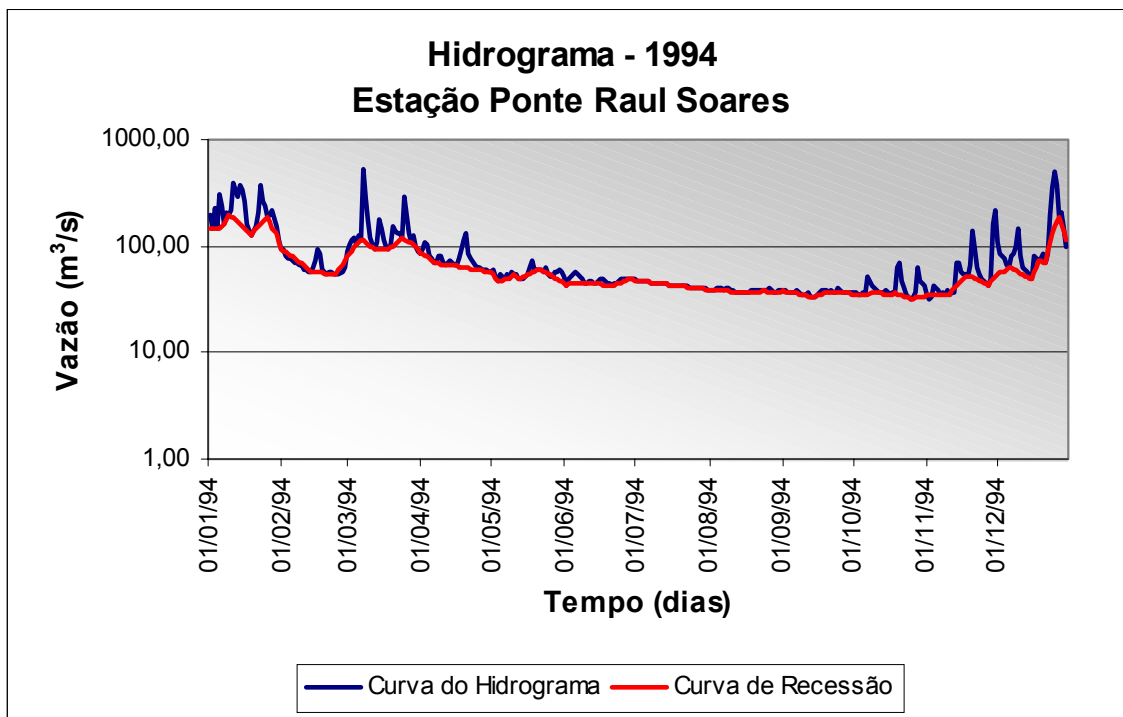
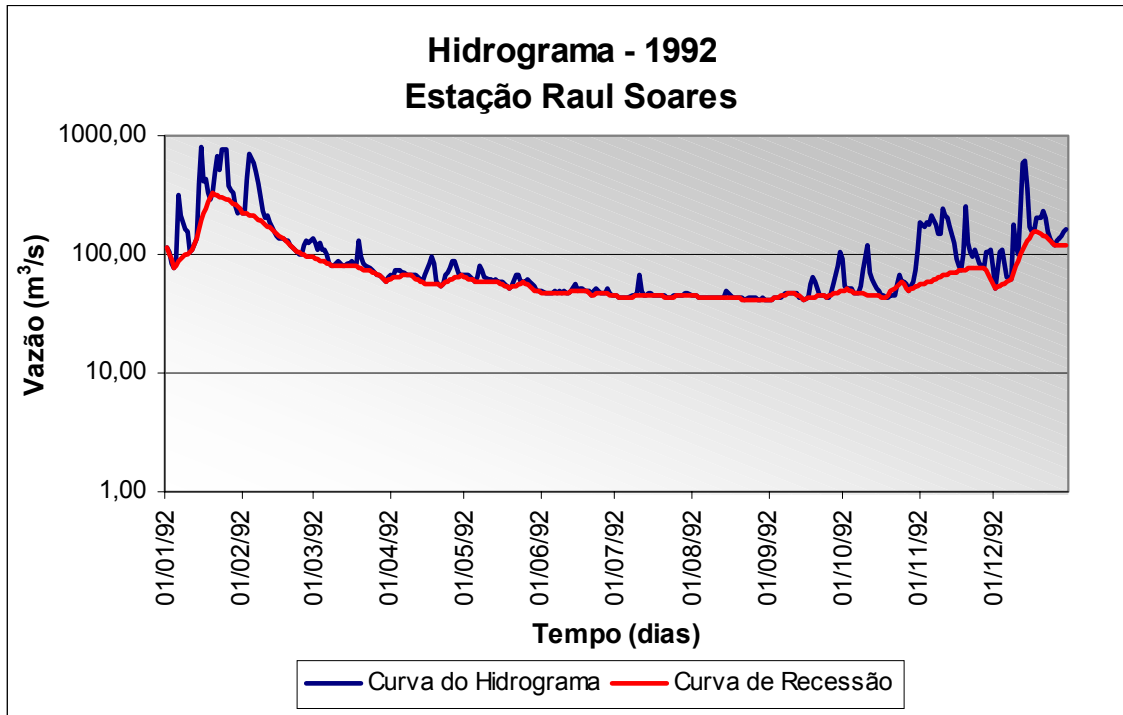
**Hidrogramas típicos da estação de Ponte Raul Soares.**

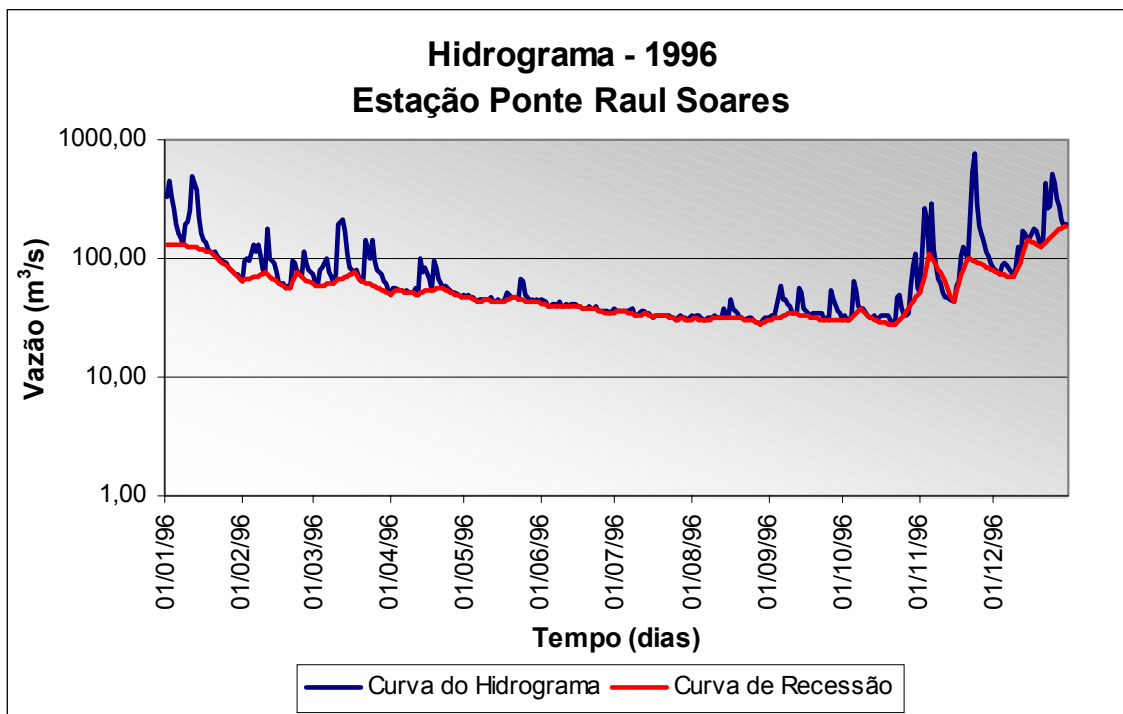
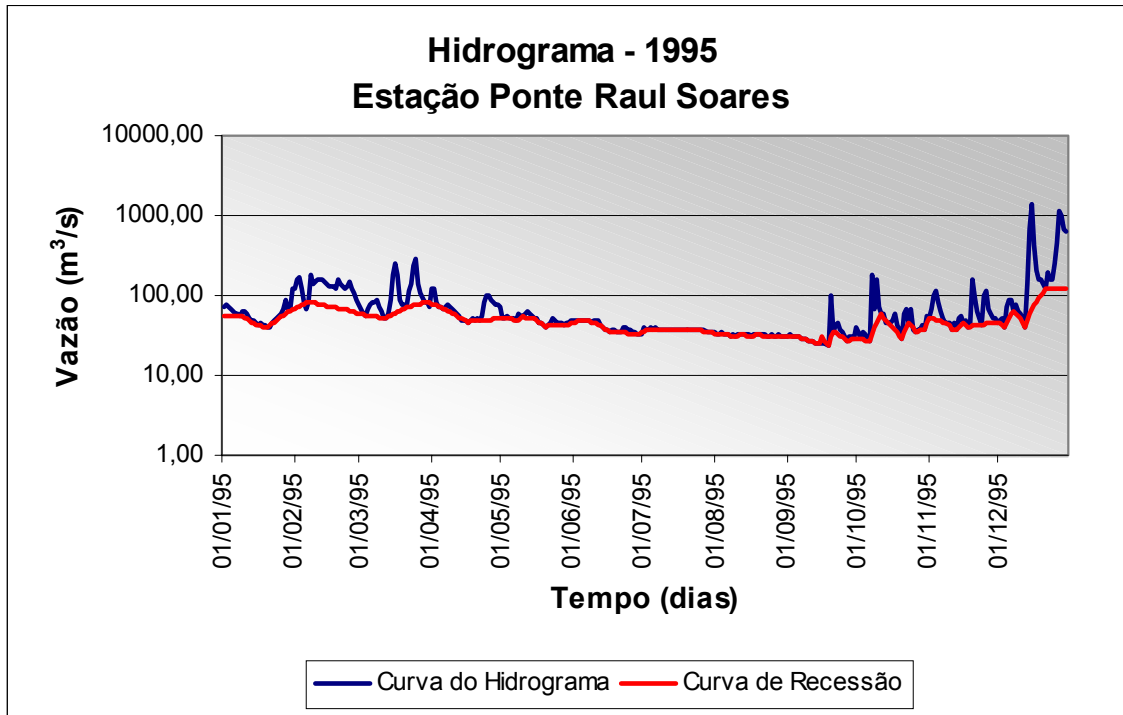


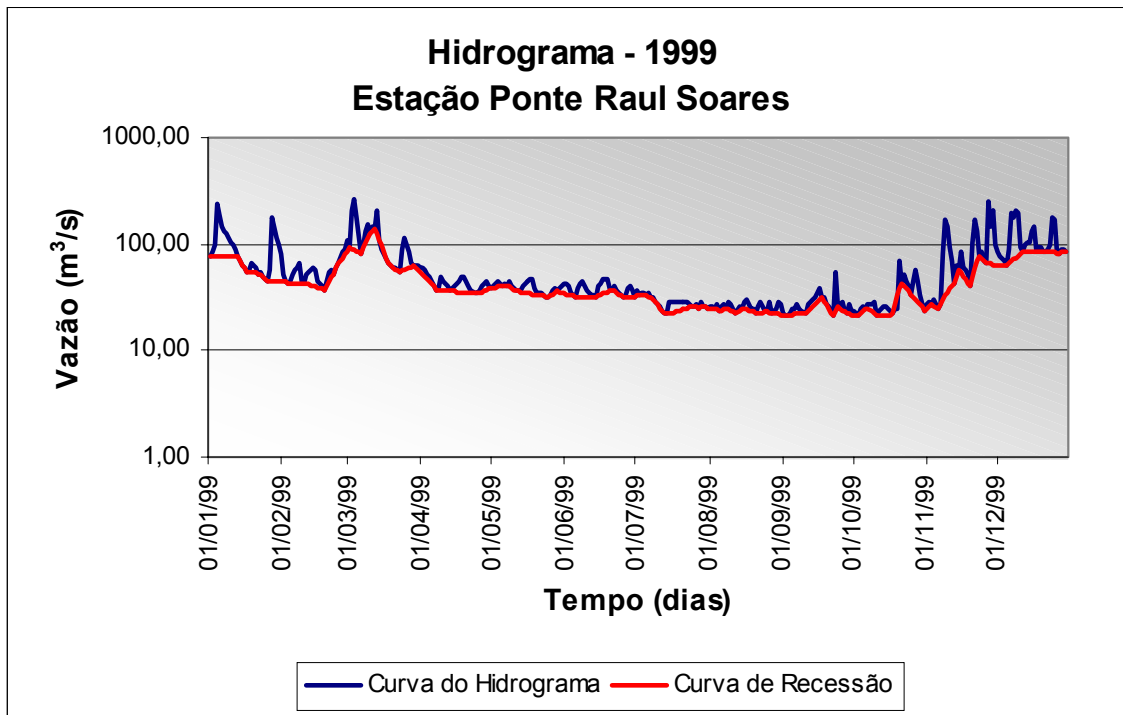
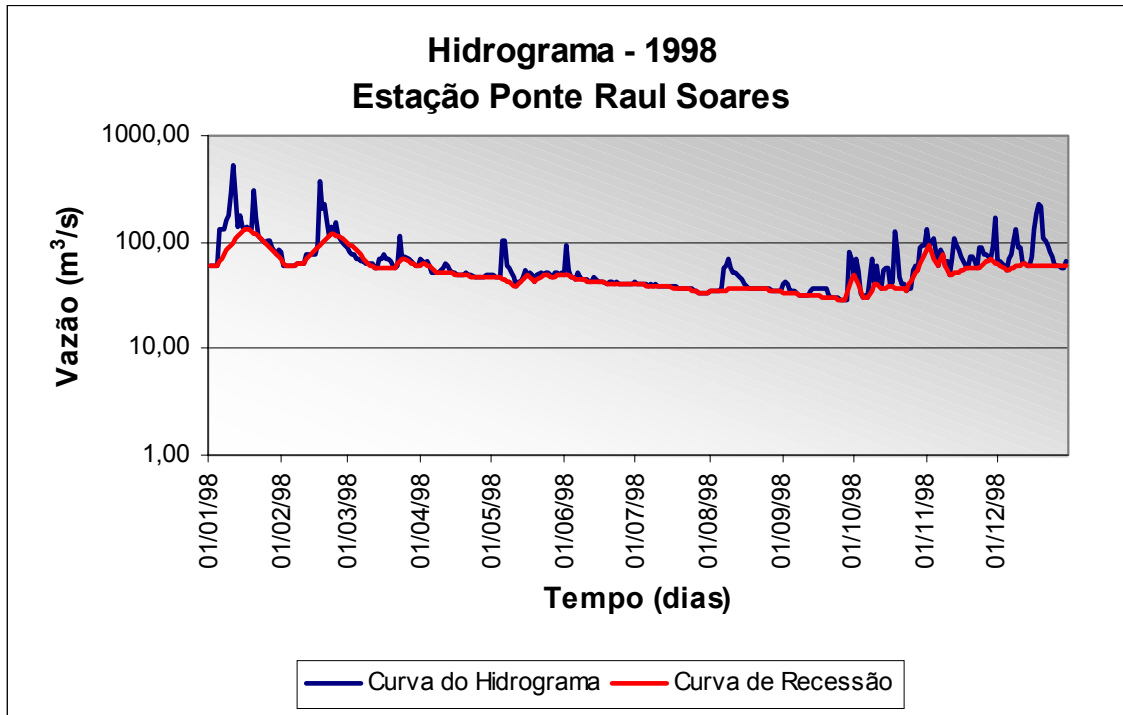


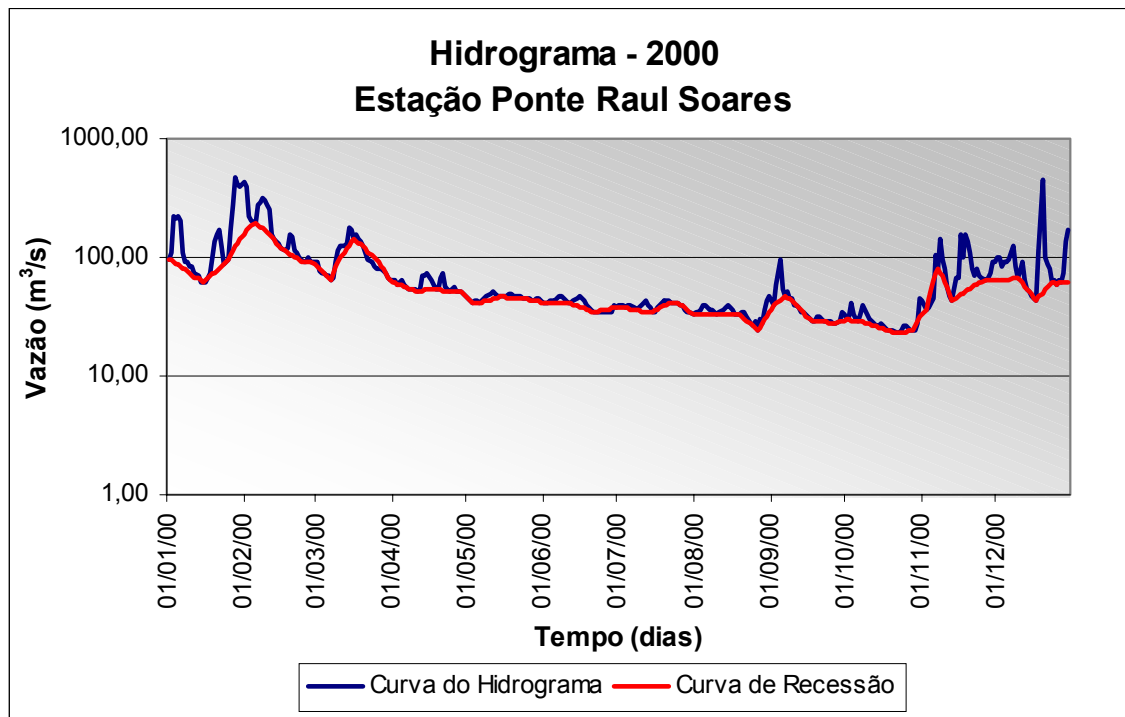












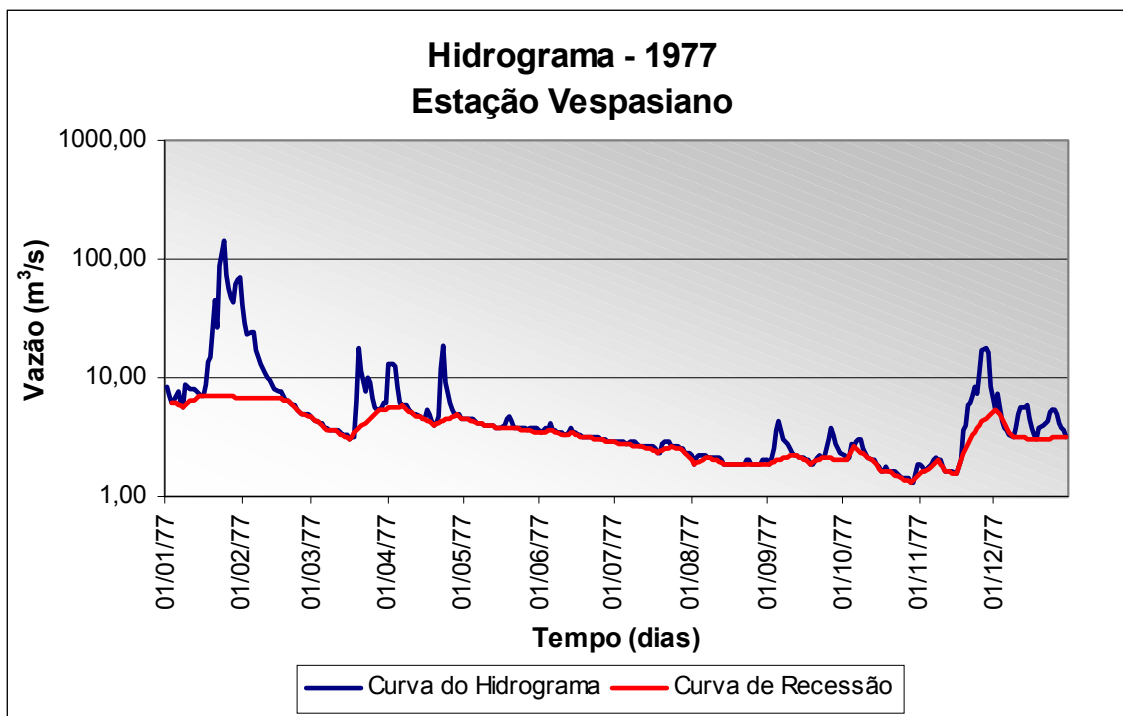
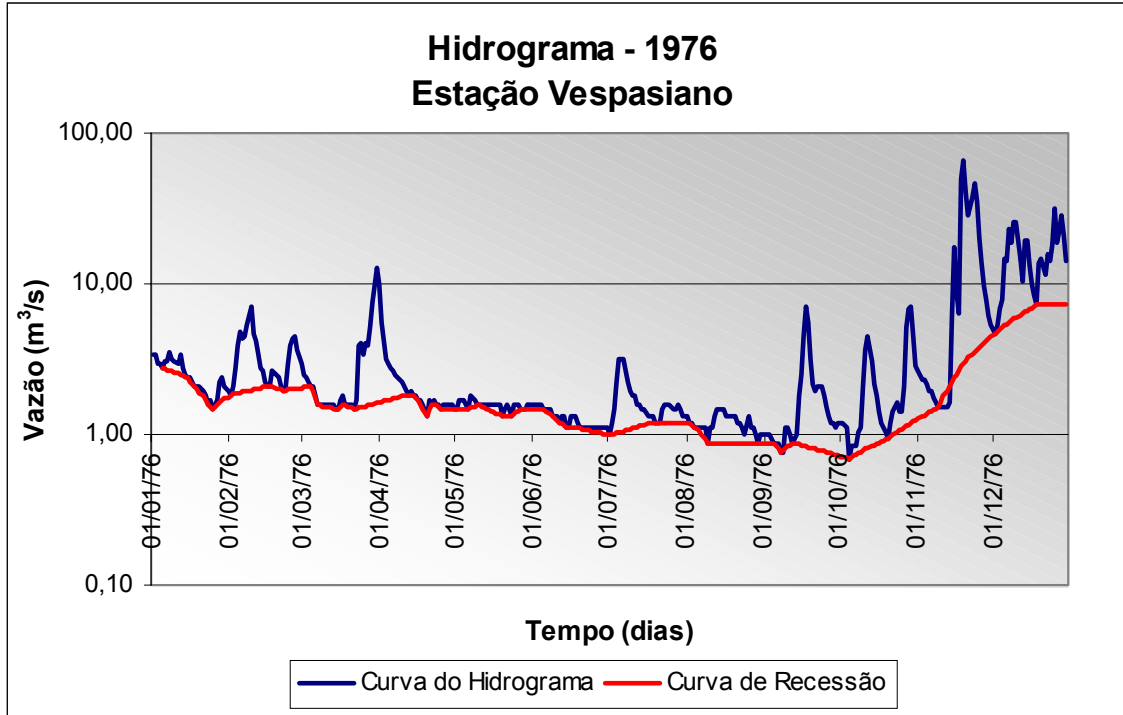
17.3 **Anexo B3**

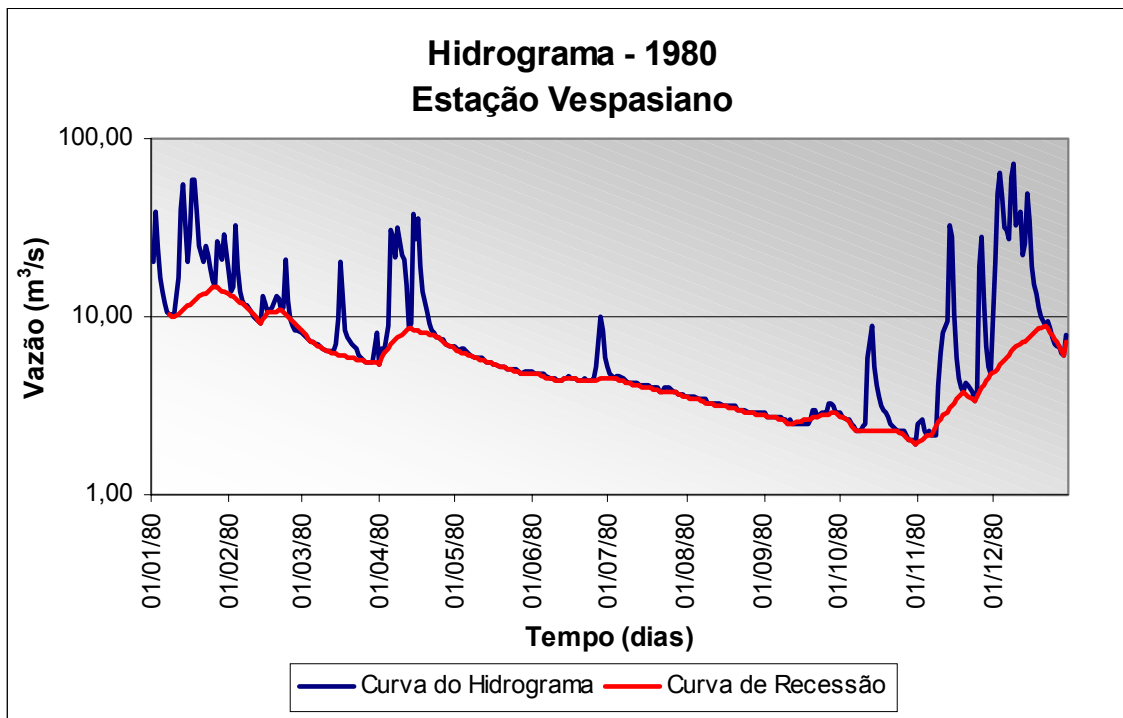
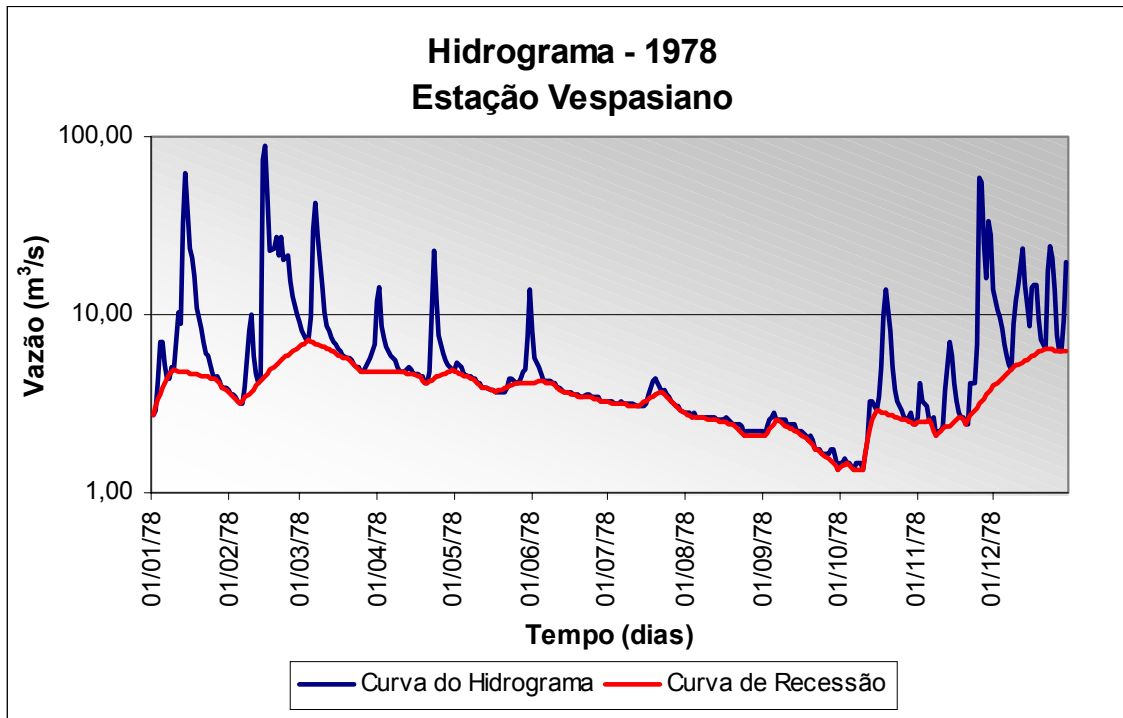
**Memória de cálculo da estação de Ponte Raul Soares**

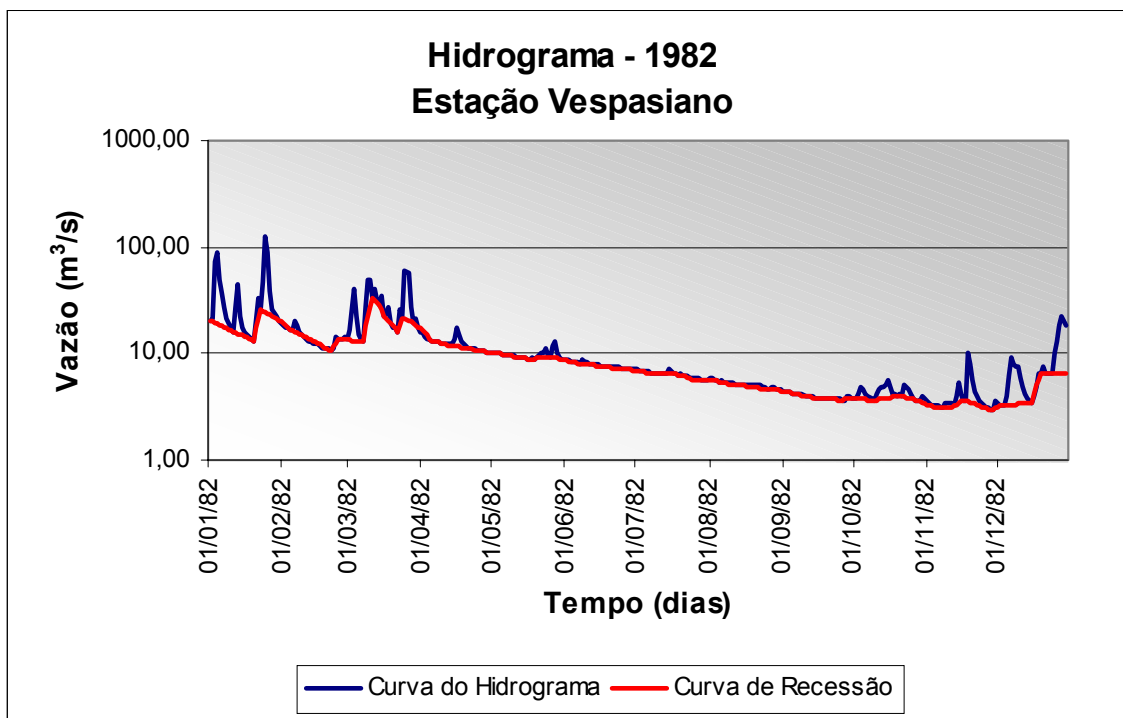
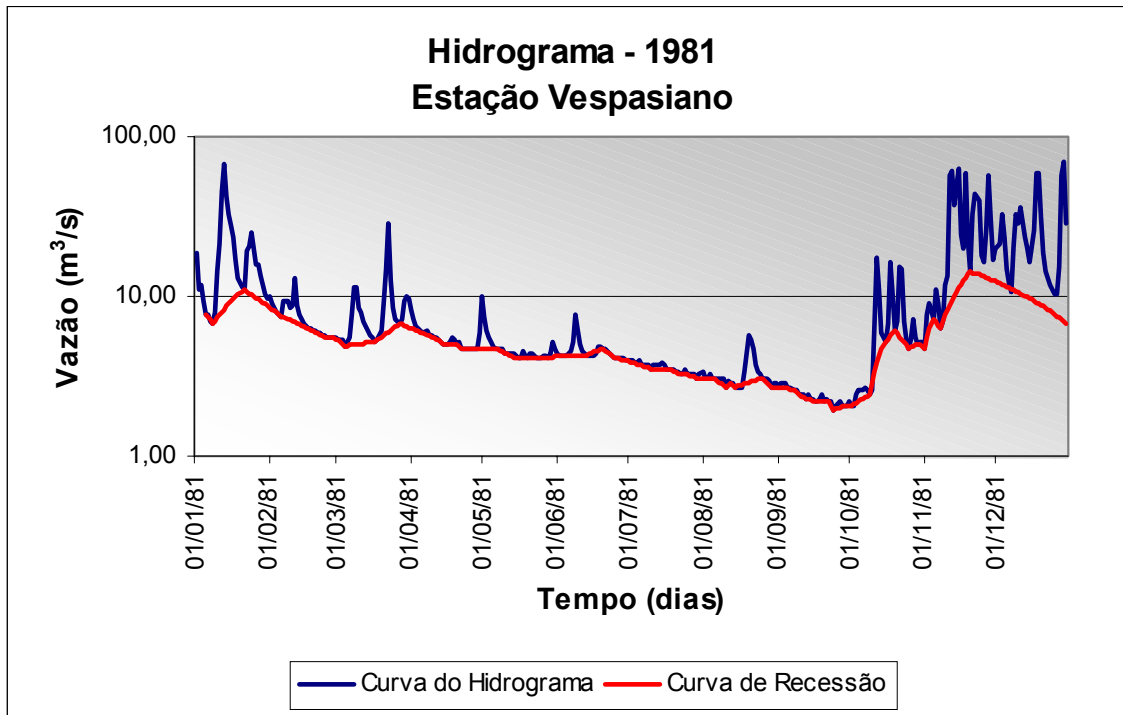
ANO	Vazão média anual em m <sup>3</sup> /s	Vazão média diária em m <sup>3</sup> /s	Vazão total anual m <sup>3</sup> /ano	Vazão de base média anual em m <sup>3</sup> /s	Vazão de base média diária em m <sup>3</sup> /s	Vazão de base total anual (m <sup>3</sup> /ano)
1976	16.196,20	44,25	1.399.351.680,00	10.850,60	29,65	937.491.840,00
1984	25.266,00	69,03	2.182.982.400,00	19.100,07	52,19	1.650.246.048,00
1985	48.942,30	134,09	4.228.614.720,00	36.159,40	99,07	3.124.172.160,00
1986	26.909,30	73,72	2.324.963.520,00	20.177,15	55,28	1.743.305.760,00
1987	23.926,40	65,55	2.067.240.960,00	16.874,75	46,23	1.457.978.400,00
1988	27.463,20	75,04	2.372.820.480,00	19.153,50	52,33	1.654.862.400,00
1990	19.287,80	52,84	1.666.465.920,00	15.805,65	43,30	1.365.608.160,00
1991	35.019,30	95,94	3.025.667.520,00	24.061,10	65,92	2.078.879.040,00
1992	40.100,40	109,56	3.464.674.560,00	28.869,10	78,88	2.494.290.240,00
1994	29.155,20	79,88	2.519.009.280,00	23.121,65	63,35	1.997.710.560,00
1995	29.421,20	80,61	2.541.991.680,00	17.928,75	49,12	1.549.044.000,00
1996	30.117,80	82,29	2.602.177.920,00	21.531,95	58,83	1.860.360.480,00
1998	24.641,70	67,51	2.129.042.880,00	19.837,80	54,35	1.713.985.920,00
1999	20.865,70	57,17	1.802.796.480,00	16.020,35	43,89	1.384.158.240,00
2000	27.567,08	75,32	2.381.795.309,38	21.162,53	57,82	1.828.442.338,42
<b>Média</b>			<b>2.447.306.353,96 m<sup>3</sup>/ano</b>	<b>Média</b>		<b>1.789.369.039,09 m<sup>3</sup>/ano</b>
Área de drenagem da estação	4780	km <sup>2</sup>				
Q/A (total)*	0,511989	m/ano				
Q/A (base)*	0,374345	m/ano				
Área de estudo	47	km <sup>2</sup>				
Escoamento total	511,989	mm/ano				
Escoamento de base	<b>374,345</b>	mm/ano				
Escoamento superficial	<b>137,644</b>	mm/ano				

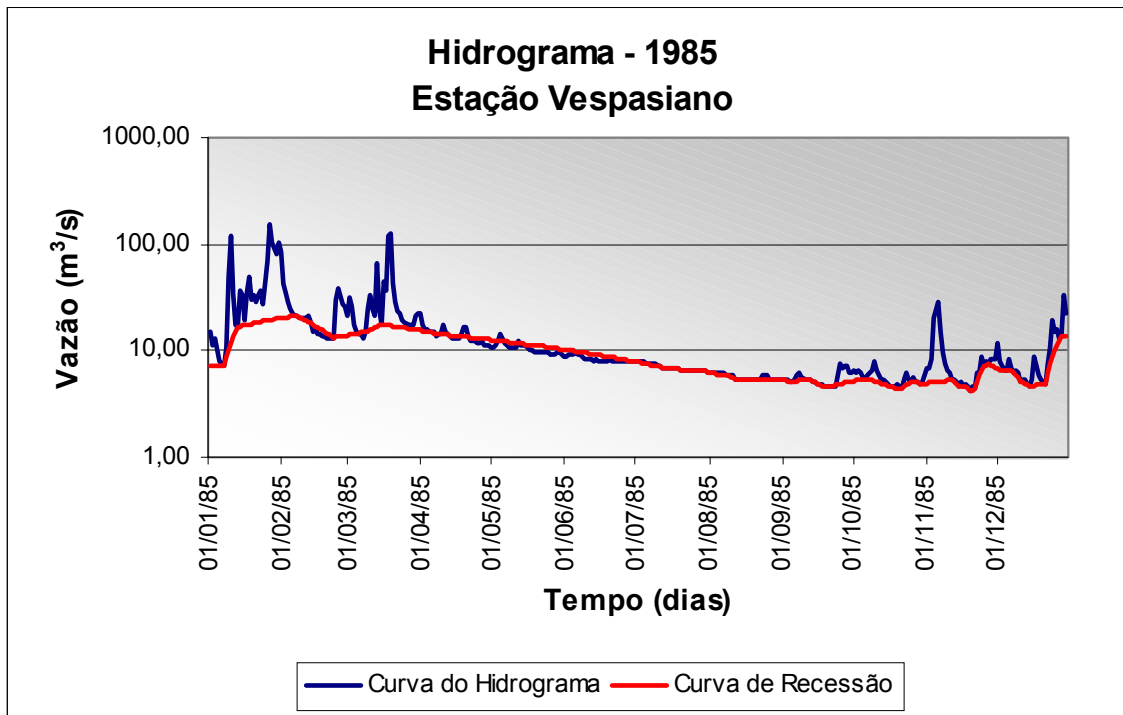
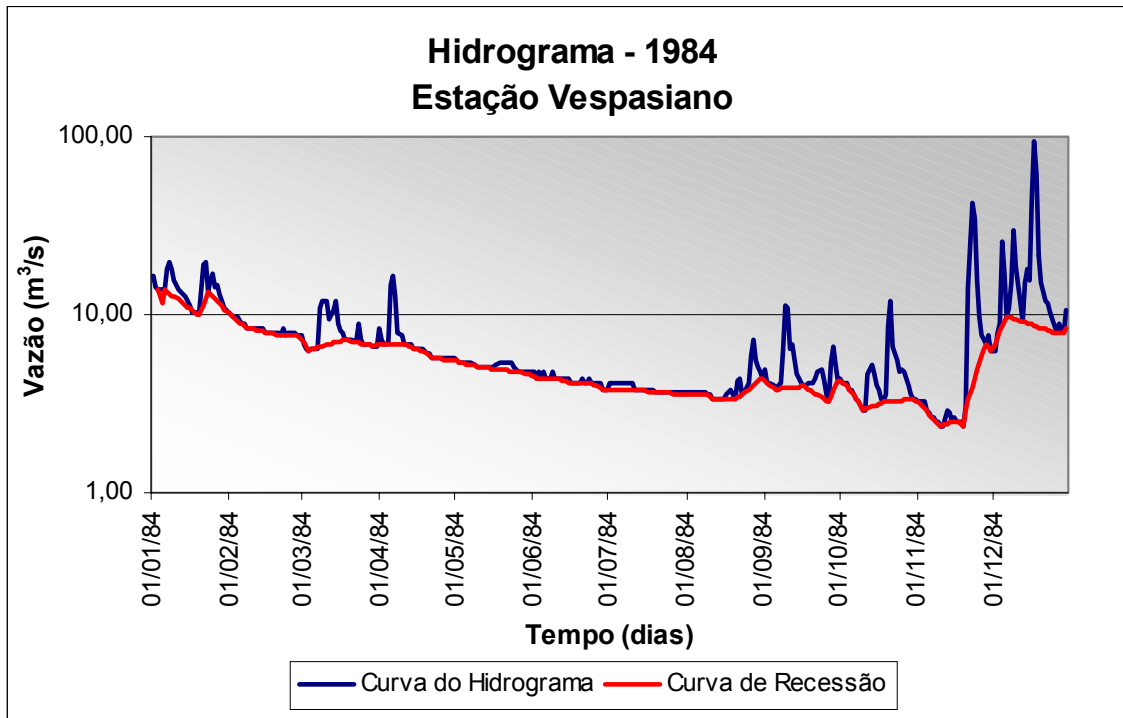
17.4 **Anexo B4**

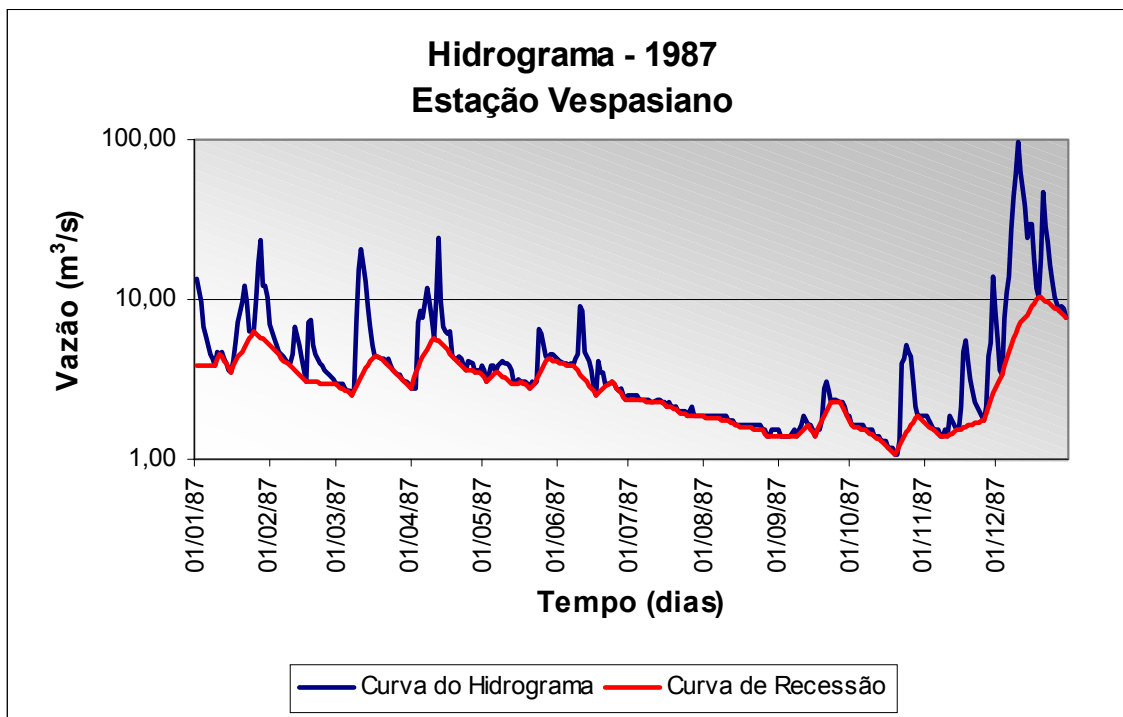
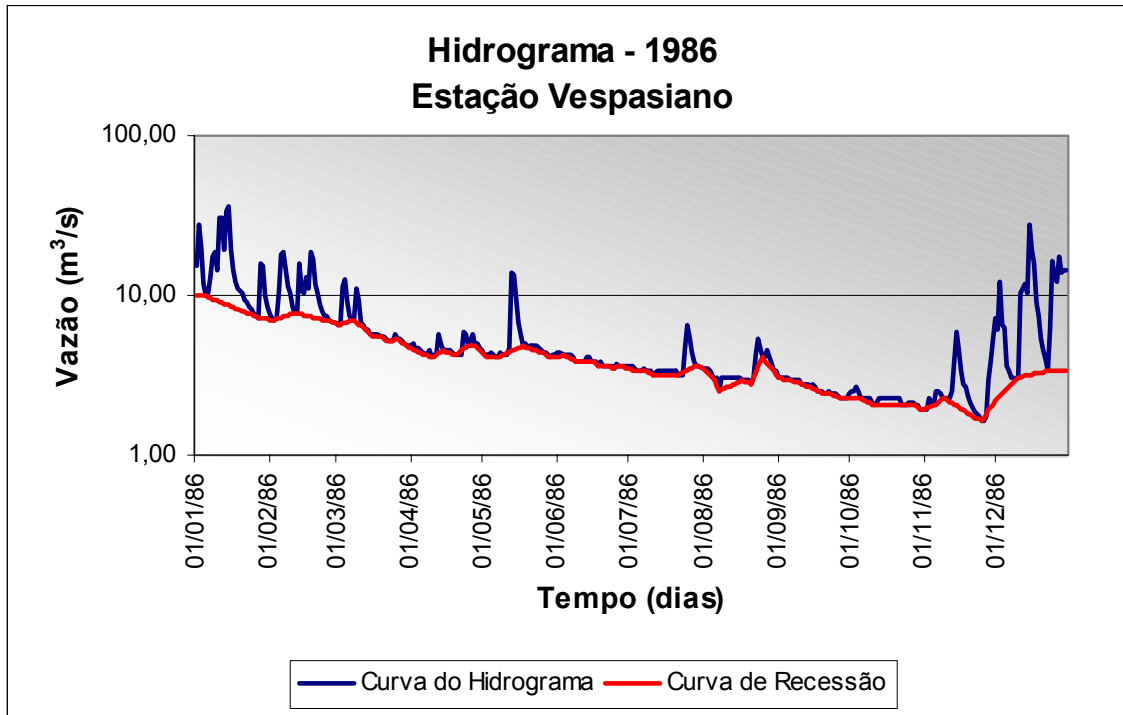
**Hidrogramas típicos da estação de Vespasiano**

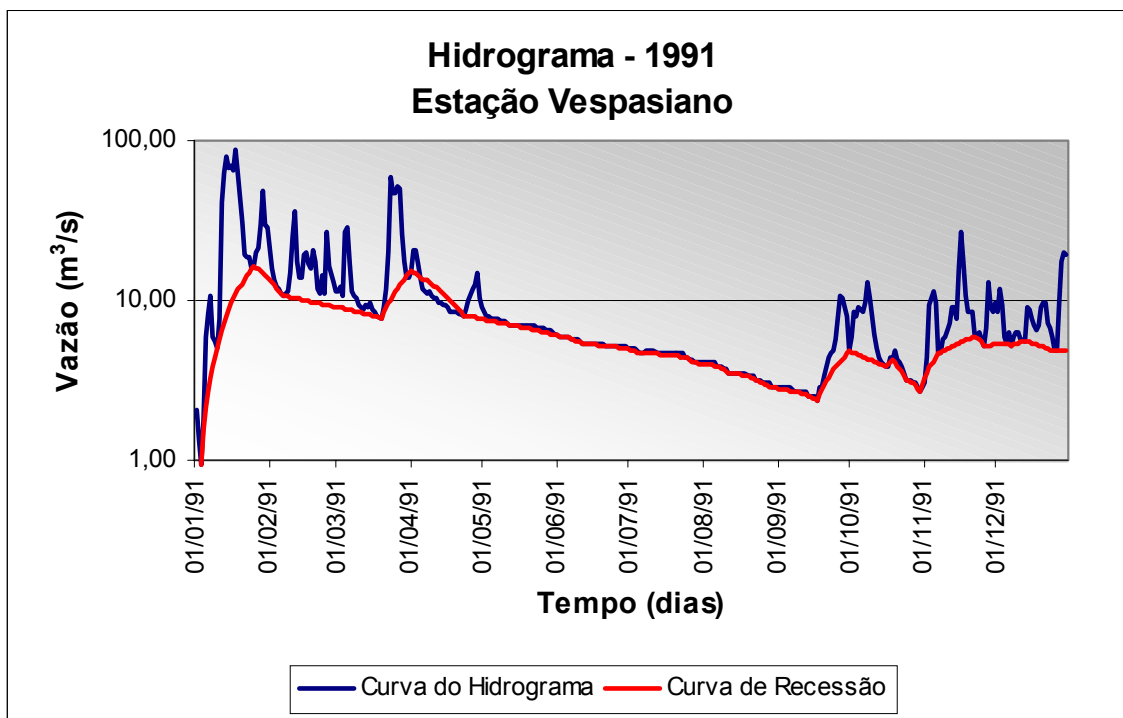
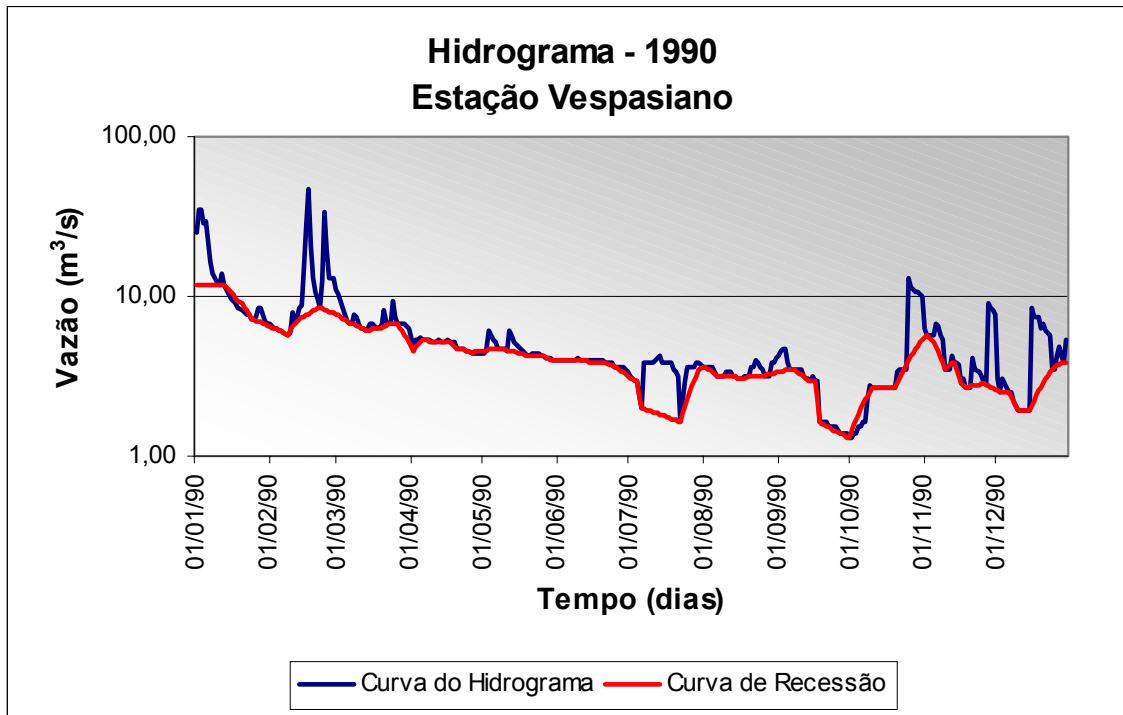


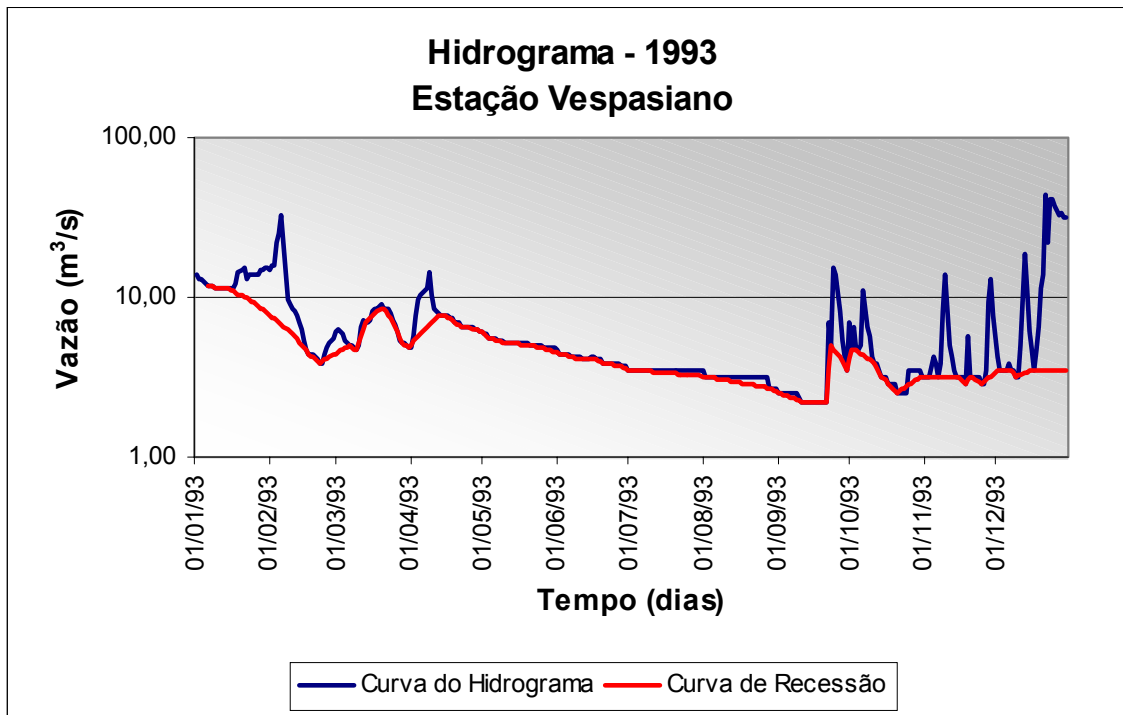
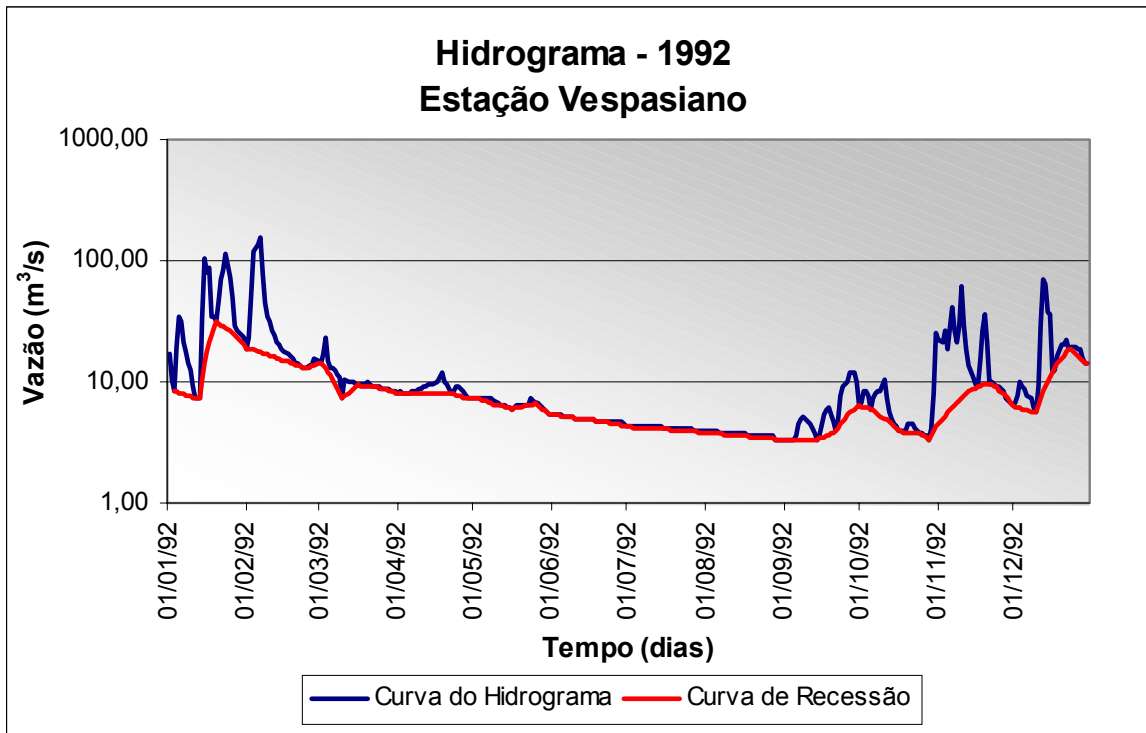


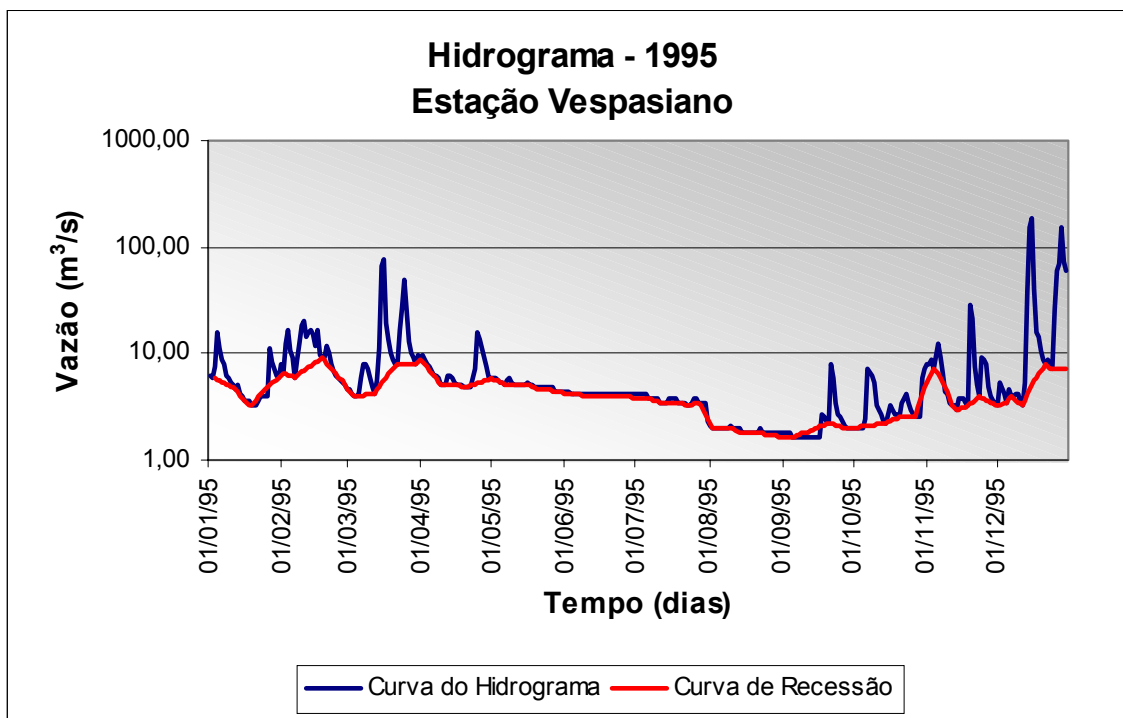
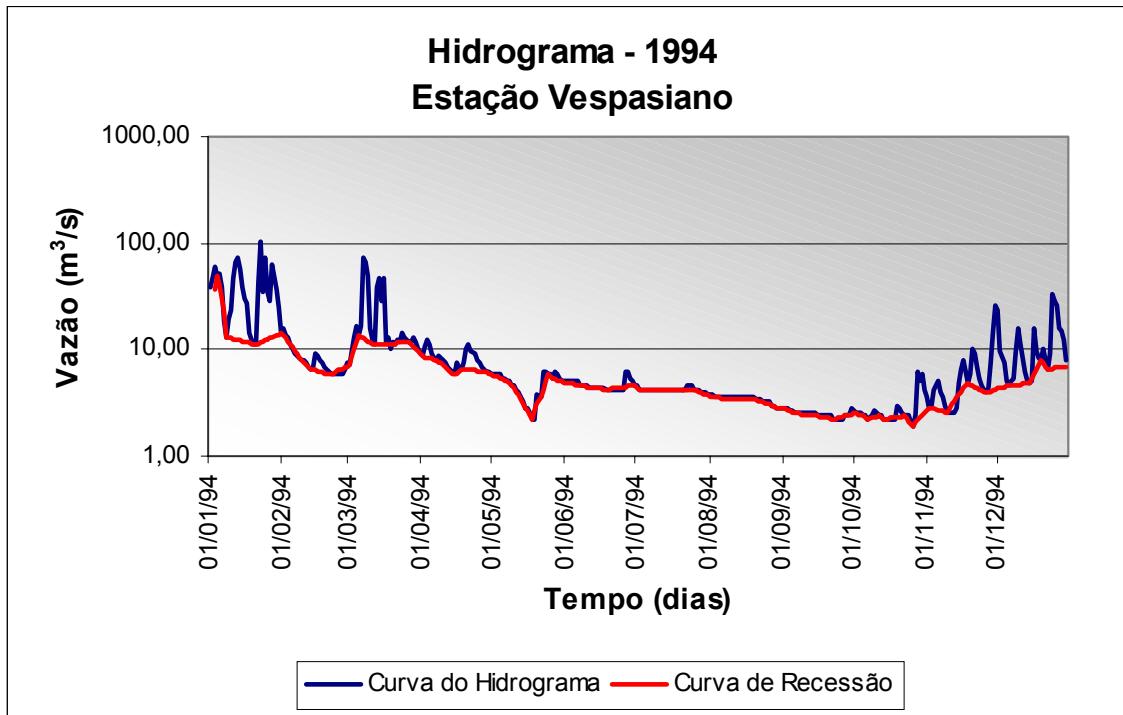


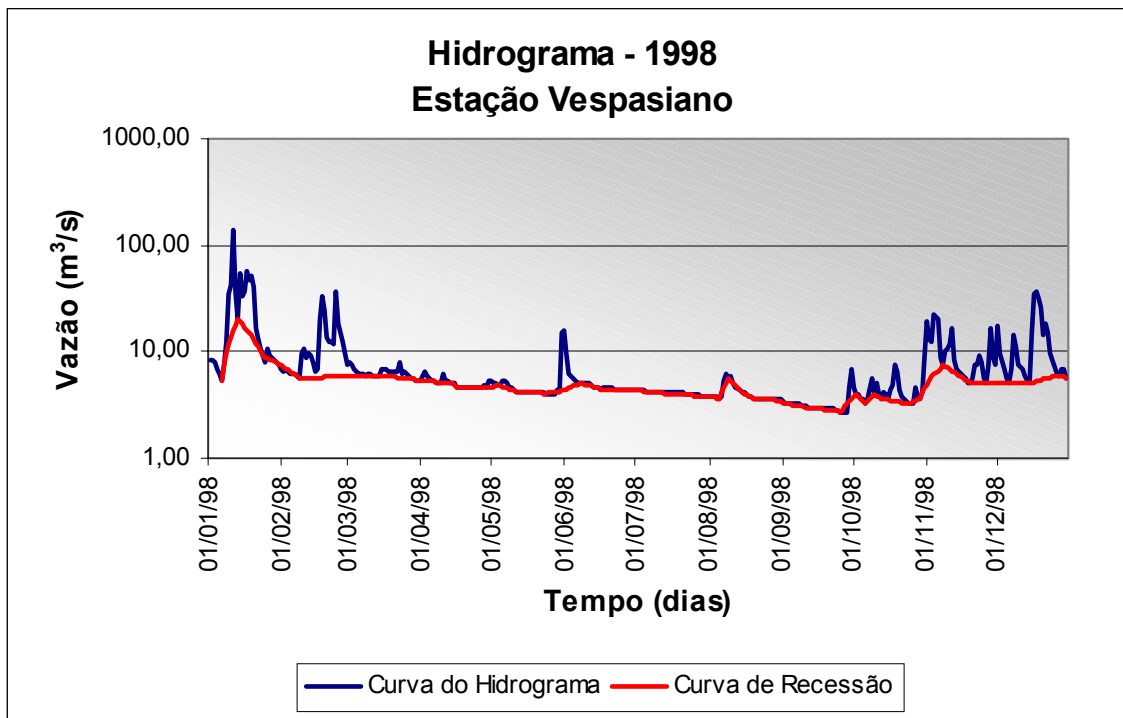
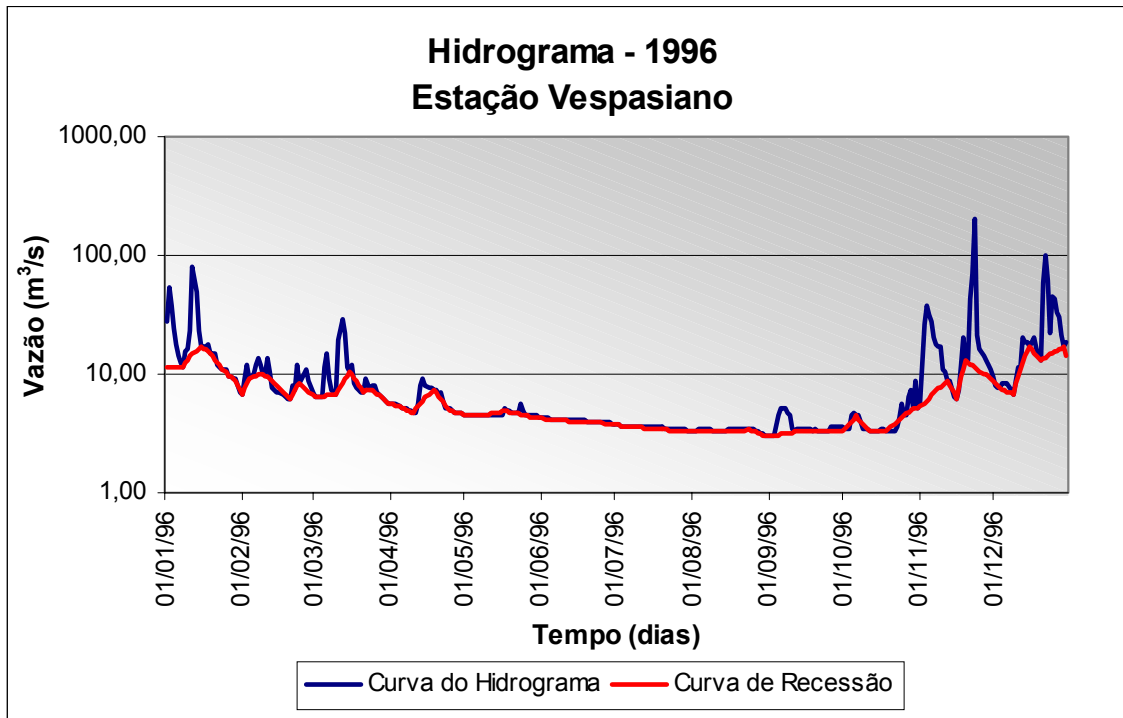


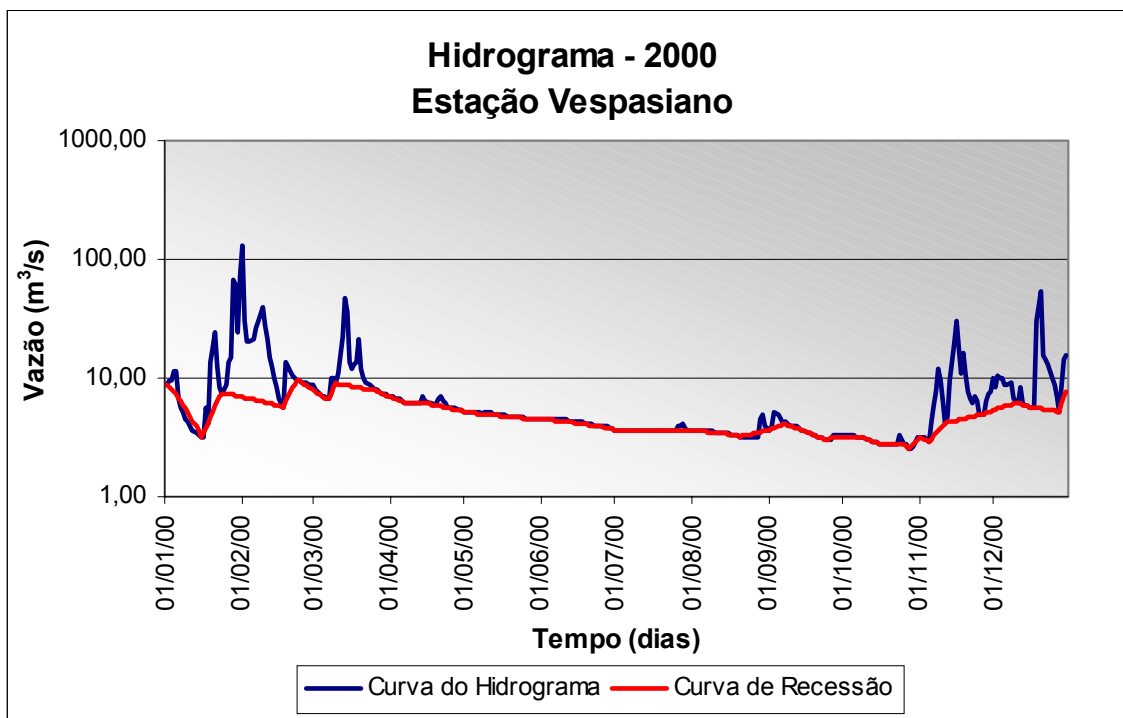
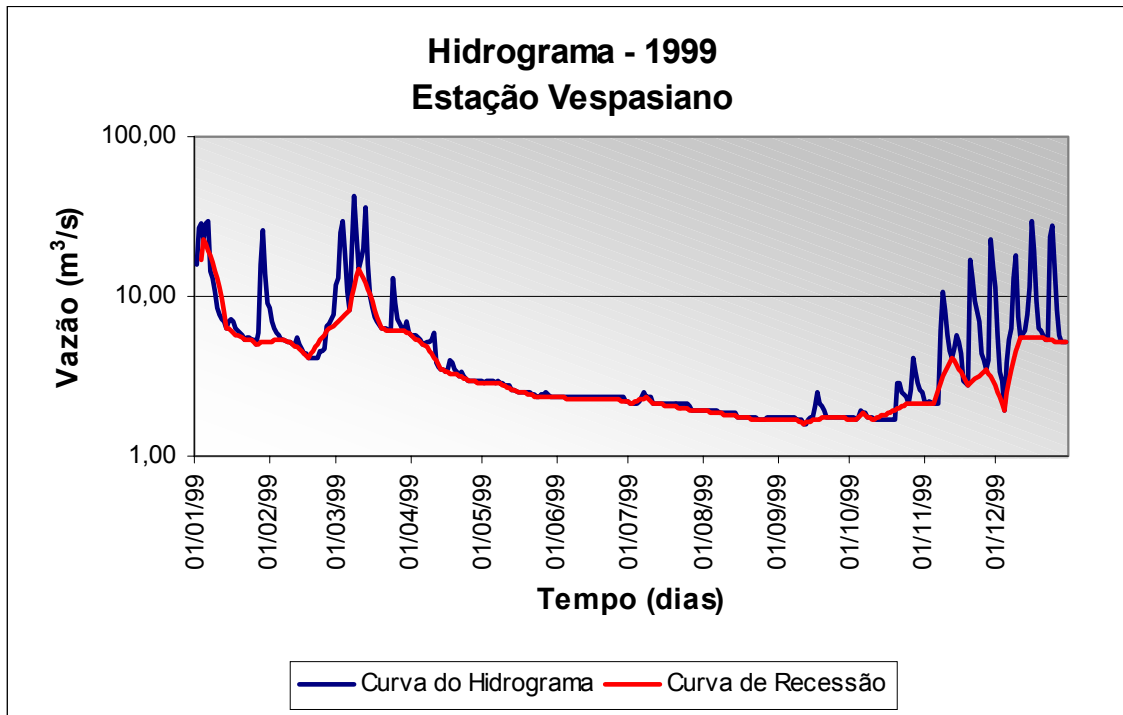












17.5 **Anexo B5**

**Memória de cálculo da estação de Vespasiano**

ANO	Vazão média anual em m <sup>3</sup> /s	Vazão média diária em m <sup>3</sup> /s	Vazão total anual m <sup>3</sup> /ano	Vazão de base média anual em m <sup>3</sup> /s	Vazão de base média diária em m <sup>3</sup> /s	Vazão de base total anual (m <sup>3</sup> /ano)
1976	1.541,03	4,21	133.144.992,00	688,39	1,88	59.477.241,60
1977	2.399,05	6,57	207.277.920,00	1.297,69	3,56	112.120.416,00
1978	2.619,57	7,18	226.330.848,00	1.377,74	3,77	119.036.736,00
1980	3.529,95	9,64	304.987.680,00	2.021,38	5,52	174.647.232,00
1981	3.555,32	9,74	307.179.648,00	2.020,90	5,54	174.605.328,00
1982	4.188,84	11,48	361.915.776,00	3.287,99	9,01	284.081.904,00
1984	2.739,87	7,49	236.724.768,00	2.077,02	5,67	179.454.096,00
1985	5.137,39	14,08	443.870.496,00	3.555,76	9,74	307.217.664,00
1986	2.152,07	5,90	185.938.848,00	1.524,04	4,18	131.676.624,00
1987	2.006,92	5,50	173.397.888,00	1.165,42	3,19	100.691.856,00
1990	2.106,84	5,77	182.030.976,00	1.628,66	4,46	140.715.792,00
1991	3.743,35	10,26	323.425.094,40	2.335,09	6,40	201.752.121,60
1992	4.910,46	13,42	424.263.744,00	2.914,40	7,96	251.804.160,00
1993	2.496,16	6,84	215.668.224,00	1.674,16	4,59	144.646.992,00
1994	3.521,74	9,65	304.278.336,00	2.181,75	5,98	188.502.768,00
1995	2.989,97	8,19	258.333.408,00	1.544,54	4,23	133.448.256,00
1996	3.505,16	9,58	302.845.824,00	2.340,46	6,39	202.215.312,00
1998	2.907,10	7,96	251.173.440,00	1.868,14	5,12	161.407.296,00
1999	1.940,96	5,32	167.698.944,00	1.402,80	3,84	121.201.920,00
2000	2.906,88	7,94	251.154.570,59	1.810,58	4,95	156.434.042,28
			<b>Média</b> 263.082.071,25 m <sup>3</sup> /ano		<b>Média</b>	167.256.887,87 m <sup>3</sup> /ano

Área de drenagem da estação	676	km <sup>2</sup>
Q/A (total)*	0,389175	m/ano
Q/A (base)*	0,247421	m/ano
Área de estudo	47	km <sup>2</sup>
Escoamento total	389,175	mm/ano
Escoamento de base	247,421	mm/ano
Escoamento superficial	141,753	mm/ano

## **18 ANEXO C – MEDIÇÕES OBTIDAS ATRAVÉS DA REDE DE MONITORAMENTO**

### **ANEXO C1**

Medições da calha Parshal instalada no córrego do Cafundó.

### **ANEXO C2**

Medições da régua linimétrica instalada no córrego José Maria.

### **ANEXO C3**

Medições da régua linimétrica instalada na surgência do Tadinho.

### **ANEXO C4**

Medições do balde graduado utilizado na córrego Carrapato.

### **ANEXO C5**

Medições da cota de nível d'água através de monitoramento em piezômetros.

18.1 **Anexo C1**

**Medições da calha Parshall instalada no córrego do Cafundó**

<b>Calha Parshall: Córrego do Cafundó</b>							
<b>Período: Maio de 2002</b>							
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de vazão em m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Régua cm</b>	<b>Vazão m<sup>3</sup>/h</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua - cm</b>		<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	07:00	22	13.5	17:00	22	13.5	TEMPO NORMAL
02	07:00	23	14.5	17:00	23	14.5	
03	07:00	23	14.5	17:05	22	13.5	
04	07:00	23	14.5	17:00	23	14.5	
05	07:05	23	14.5	17:05	23	16.0	
06	07:10	23	14.5	17:00	23	14.5	
07	07:20	25	15.0	17:00	25	14.5	Choveu na última noite.
08	07:00	24	14.5	16:50	24	15.0	
09	07:00	23	13.5	16:40	24	14.0	Tempo normal.
10	06:40	25	15.0	17:00	25	15.0	Tempo normal.
11	07:00	25	15.0	17:00	25	15.0	
12	06:50	24	15.0	17:00	25	15.0	
13	07:00	25	15.0	17:05	25	15.0	
14	06:55	25	15.0	17:00	25	15;0	
15	07:00	25	15.0	17:00	25	15.0	
16	06:50	25	15.0	17:00	25	15:0	
17	06:55	25	15.0	17:00	25	15.0	
18	06:50	25	15.0	16:55	25	15.0	
19	07:00	25	15.0	17:00	25	15.0	
20	06:50	24	14.0	17:10	24	14.0	
21	07:00	24	14.0	17:00	24	14.0	Choveu na última noite.
22	07:00	26	14.0	17:05	26	14.0	
23	07:00	25	14.0	17:00	25	13.5	
24	07:00	23	14.0	17:00	23	14.0	
25	07:10	23	14.0	17:05	23	14.0	
26	07:00	23	14.0	17:00	23	14.0	
27	07:05	23	14.0	16:50	22	13.5	
28	07:00	23	14.0	17:05	23	14.0	
29	07:10	22	13.5	16.50	22	13.5	
30	07:00	22	13.5	17:00	22	13.5	
31	07:10	21	13.0	17:05	20	12.0	

<b>Calha Parshall: Córrego do Cafundó</b>							
<b>Período: Junho de 2002</b>							
<b>Alturas diárias de nível d'água- Valores de vazão em m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Réguas cm</b>	<b>Vazão m<sup>3</sup>/h</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Réguas -</b>		<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	07:00	20	13	17:00	20	13	
02	07:00	20	13	17:10	20	13	
03	07:10	20	13	17:00	20	13	
04	07:00	20	13	17:05	20	13	
05	07:10	20	13	17:10	20	13	
06	07:00	20	13	17:00	20	13	
07	07:00	20	13	17:05	20	13	
08	07:00	20	13	17:10	20	13	
09	07:15	20	13	17:15	20	13	
10	07:00	21	13.3	17:10	20	13	
11	07:10	21	13	17:10	21	13.3	
12	07:00	21	13.3	17:05	21	13.3	
13	07:10	21	13.3	17:00	21	13.3	
14	07:10	21	13.3	17:00	21	13.3	
15	06:50	21	13.3	17:10	21	13.3	
16	07:00	23.5	14.8	17:00	23.5	14.8	
17	07:05	23.5	14.8	17:05	23.5	14.8	
18	07:00	21	13.3	17:20	21	13.2	
19	07:00	21	13.3	17:10	21	13.3	
20	07:00	21	13.3	17:15	21	13.3	
21	07:00	21	13.3	17:00	21	13.3	
22	07:10	21	13.3	17:10	21	13.3	
23	07:15	21	13.3	17:20	21	13.3	
24	07:45	21	13.3	17:30	21	13.3	
25	07:10	21	13.3	17:15	21	13.3	
26	07:00	20	13.0	17:10	20	13.3	
27	07:00	19	12.5	17:00	19	12.5	
28	07:05	19	12.5	17:05	19	12.5	
29	07:00	19	12.5	17:00	19	12.5	
30	07:00	18	12.0	16:40	18	12.0	

<b>Calha Parshall: Córrego do Cafundó</b>							
<b>Período: Julho de 2002</b>							
<b>Alturas diárias de nível d'água- Valores de vazão em m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Régua cm</b>	<b>Vazão m<sup>3</sup>/h</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua - cm</b>		<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	07:00	18	12.0	17:00	18	12.0	
02	07:05	17	12.0	17:00	17	12.0	
03	07:00	17	12.0	17:10	17	12.0	
04	07:10	17	12.0	17:20	17	12.0	
05	06:40	17	12.0	17:10	17	12.0	
06	07:10	17	12.0	17:00	17	12.0	
07	07:00	17	12.0	17:00	17	12.0	
08	07:18	17	12.0	17:00	17	12.0	
09	06:35	17	12.0	17:00	17	12.0	
10	06:45	17	12.0	17:05	15	11.0	
11	07:00	16	11.0	17:00	17	11.0	
12	07:00	17	11.0	17:05	17	11.0	
13	07:05	16	11.0	17:00	16	11.0	
14	07:10	16	11.0	17:05	16	11.0	
15	07:00	16	11.0	17:00	16	11.0	
16	07:00	16	11.0	17:00	16	11.0	
17	07:05	16	11.0	17:00	16	11.0	
18	07:00	16	11.0	17:05	16	11.0	
19	07:00	16	11.0	17:00	16	11.0	
20	07:05	16	11.0	17:00	16	11.0	
21	07:00	16	11.0				
22	08:10	16	11.0				
23	08:00	14.9	10.6				
24	08:05	15	10.5				
25	08:00	15	10.5				
26	08:15	14.5	10.5				
27	08:10	14.6	10.5				
28	08:20	14.5	10.5				
29	08:30	14.5	10.5				
30	08:40	14	10.0				
31	08:20	13	9.9				

<b>Calha Parshall: Córrego do Cafundó</b>							
<b>Período: Agosto de 2002</b>							
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de vazão em m<sup>3</sup>/h</b>							
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Réguas cm</b>	<b>Vazão m<sup>3</sup>/h</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Réguas -</b>		<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	07:00	18	12.0	17:00	18	12.0	
02	07:05	17	12.0	17:00	17	12.0	
03	07:00	17	12.0	17:10	17	12.0	
04	07:10	17	12.0	17:20	17	12.0	
05	06:40	17	12.0	17:10	17	12.0	
06	07:10	17	12.0	17:00	17	12.0	
07	07:00	17	12.0	17:00	17	12.0	
08	07:18	17	12.0	17:00	17	12.0	
09	06:35	17	12.0	17:00	17	12.0	
10	06:45	17	12.0	17:05	15	11.0	
11	07:00	16	11.0	17:00	17	11.0	
12	07:00	17	11.0	17:05	17	11.0	
13	07:05	16	11.0	17:00	16	11.0	
14	07:10	16	11.0	17:05	16	11.0	
15	07:00	16	11.0	17:00	16	11.0	
16	07:00	16	11.0	17:00	16	11.0	
17	07:05	16	11.0	17:00	16	11.0	
18	07:00	16	11.0	17:05	16	11.0	
19	07:00	16	11.0	17:00	16	11.0	
20	07:05	16	11.0	17:00	16	11.0	
21	07:00	16	11.0				
22	08:10	16	11.0				
23	08:00	14.9	10.6				
24	08:05	15	10.5				
25	08:00	15	10.5				
26	08:15	14.5	10.5				
27	08:10	14.6	10.5				
28	08:20	14.5	10.5				
29	08:30	14.5	10.5				
30	08:40	14	10.0				
31	08:20	13	9.9				

<b>Calha Parshall: Córrego do Cafundó</b>						
<b>Período: Setembro de 2002</b>						
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores em vazão em m<sup>3</sup>/h</b>						
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Régua cm</b>	<b>Vazão m<sup>3</sup>/h</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua -</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	08:00	13	9.5			
02	08:15	13	9.5			
03	08:15	13	9.5			
04	08:15	13	9.5			
05	08:15	13	9.5			
06	08:15	13	9.5			
07	08:20	13	9.5			
08	08:20	13	9.5			
09	08:20	13	9.5			
10	08:15	14	9.6			
11	08:15	14	9.6			
12	08:10	14	9.6			
13	08:05	14	9.6			
14	08:20	15	9.7			
15	08:15	15	9.7			
16	08:15	15	9.7			
17	08:05	15	9.7			
18	08:20	15	9.7			
19	08:10	16	11			
20	08:10	16	11			
21	08:05	18	12			<b>Choveu nos últimos dias.</b>
22	08:00	18	12			
23	08:15	18	12			
24	08:10	30	14			<b>Está chovendo há dois dias.</b>
25	08:40	55	26			
26	09:10	55	26			
27	08:30	55	26			
28	08:30	55	26			
29	08:15	60	30			
30	07:50	60	30			

<b>Calha Parshall : Córrego do Cafundó</b>						
<b>Período: Outubro de 2002</b>						
<b>Alturas Diárias de Nível D'água - Valores em vazão em m<sup>3</sup>/h</b>						
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Régua cm</b>	<b>Vazão m<sup>3</sup>/h</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua -</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	07:00	60	30.0			
02	07:30	60	30.0			
03	07:10	60	30.0			
04	07:50	60	30.0			
05	08:00	55	30.0			
06	08:20	55	30.0			
07	08:10	55	30.0			
08	08:00	55	30.0			
09	07:10	55	30.0			
10	07:40	55	30.0			
11	07:00	55	30.0			
12	07:10	53	29.0			
13	07:00	50	28.0			
14	08:10	50	28.0			
15	08:20	50	28.0			
16	08:00	48	27.0			
17	07:00	48	27.0			
18	07:30	45	26.0			
19	07:30	45	26.0			
20	07:30	45	26.0			
21	08:00	45	26.0			
22	07:00	45	26.0			
23	07:10	46	27.0			
24	07:10	46	27.0			
25	07:10	45	26.0			
26	07:10	45	26.0			
27	07:15	45	26.0			
28	07:15	45	26.0			
29	07:15	45	26.0			
30	07:10	45	26.0			
31	07:15	45	26.0			

18.2 **Anexo C2**

**Medições da régua linimétrica instalada no córrego José Maria**

<b>Régua de Medição: Córrego do Moinho (José Maria)</b>					
<b>Período: Maio de 2002</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
01					<b>TEMPO NORMAL</b>
02	07:50	12.0	17:40	12.0	
03	07:50	12.0	17:40	12.0	
04	07:30	12.0	17:30	12.0	
05	07:55	11.0	17:50	11.0	
06	07:45	11.0	17:50	10.0	<b>Choveu na última noite.</b>
07	07:55	13.0	17:50	11.0	<b>TEMPO NORMAL</b>
08	07:50	11.0	17:45	10.5	
09	07:50	12.0	17:35	12.0	
10	17:45	12.0	17:40	12.0	<b>TEMPO NORMAL</b>
11	07:40	12.0	17:50	12.0	
12	07:55	12.0	17:45	10.0	
13	07:45	11.5	17:50	12.0	
14	07:50	12.0	17:40	11.0	
15	07:55	12.0	17:50	11.0	
16	07:50	12.0	17:35	11.0	
17	07:35	11.0	17:50	11.0	
18	07:30	11.0	17:30	11.0	
19	07:40	11.0	17:50	11.0	
20	07:20	11.5	17:45	11.5	
21	07:30	11.5	17:50	11.5	
22	07:50	20.0	17:45	14.0	<b>Choveu na última noite.</b>
23	07:50	15.0	17:45	12.0	<b>Choveu na última noite.</b>
24	07:50	11.5	17:40	11.5	
25	07:45	11.5	17:50	11.5	
26	08:00	11.5	17:50	11.5	
27	07:50	11.0	17:35	11.5	
28	07:45	11.5	17:30	11.5	
29	07:50	11.5	17:40	11.5	
30	07:50	11.5	17:40	11.5	
31	07:50	11.5	17:50	11.5	

<b>Régua de Medição: Córrego do moinho (José Maria)</b>					
<b>Período: Junho de 2002</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	08:10	10.5	17:50	11.5	Há um desvio de água acima da medida de 13 cm de profundidade por 50 cm de largura, para abastecer o moinho de José Perdigão.
02	08:00	11.5	17:40	11.5	
03	07:50	11.5	17:50	11.5	
04	07:55	11.5	17:55	11.5	
05	08:00	11.5	17:50	11.5	
06	07:45	12.0	17:45	11.5	
07	07:50	11.5	17:50	11.5	
08	08:00	11.0	17:40	11.0	
09	07:45	11.0	17:45	11.0	
10	07:30	11.0	17:50	11.0	
11	07:40	11.0	17:50	11.0	
12	07:40	9.5	17:55	10.0	
13	07:50	9.5	18:00	9.5	
14	07:55	9.5	17:50	9.5	
15	07:55	9.5	17:50	9.5	
16	07:20	9.0	17:30	9.5	
17	07:40	9.5	17:40	9.5	
18	07:45	9.5	17:50	9.5	
19	07:40	9.5	17:35	9.5	
20	07:30	9.5	17:40	9.5	
21	07:35	9.5	17:30	9.5	
22	07:40	9.5	17:50	9.5	
23	07:45	9.5	17:55	9.5	
24	08:00	9.5	17:50	9.5	
25	07:40	9.5	17:40	9.5	
26	07:40	9.0	17:45	9.0	
27	07:45	8.0	17:40	8.0	
28	07:25	8.0	17:50	8.0	
29	07:30	8.0	17:35	8.0	
30	07:45	8.0	17:55	8.0	

<b>Régua de Medição: Córrego do moinho (José Maria)</b>					
<b>Período: Julho de 2002</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	07:40	8.0	17:35	8.0	
02	07:45	8.0	17:40	8.0	
03	07:35	8.0	17:45	8.0	
04	07:40	8.0	17:50	8.0	
05	07:35	8.0	17:40	8.0	
06	07:40	6.5	17:35	7.0	
07	07:45	9.0	17:40	8.0	
08	07:50	7.0	17:55	8.0	
09	07:45	7.0	17:45	8.0	
10	07:40	7.5	17:50	8.0	
11	07:45	7.0	17:35	8.0	
12	07:40	7.0	17:40	8.0	
13	07:45	7.0	17:45	7.0	
14	07:50	7.0	17:50	7.0	
15	07:55	7.0	17:45	7.0	
16	07:50	7.0	17:40	7.0	
17	07:55	7.0	17:50	7.0	
18	07:45	7.0	17:55	7.0	
19	07:50	7.0	17:50	7.0	
20	07:45	7.0	17:45	7.0	
21	07:50	6.0			
22	08:45	5.5			
23	08:30	5.9			
24	06:40	6.0			
25	06:50	6.0			
26	08:50	6.0			
27	09:00	6.0			
28	08:55	6.0			
29	9:05	6.0			
30	09:20	6.0			
31	07:45	6.0			

<b>Régua de Medição: Córrego do moinho (José Maria)</b>					
<b>Período: Agosto de 2002</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	07:40	8.0	17:35	8.0	
02	07:45	8.0	17:40	8.0	
03	07:35	8.0	17:45	8.0	
04	07:40	8.0	17:50	8.0	
05	07:35	8.0	17:40	8.0	
06	07:40	6.5	17:35	7.0	
07	07:45	9.0	17:40	8.0	
08	07:50	7.0	17:55	8.0	
09	07:45	7.0	17:45	8.0	
10	07:40	7.5	17:50	8.0	
11	07:45	7.0	17:35	8.0	
12	07:40	7.0	17:40	8.0	
13	07:45	7.0	17:45	7.0	
14	07:50	7.0	17:50	7.0	
15	07:55	7.0	17:45	7.0	
16	07:50	7.0	17:40	7.0	
17	07:55	7.0	17:50	7.0	
18	07:45	7.0	17:55	7.0	
19	07:50	7.0	17:50	7.0	
20	07:45	7.0	17:45	7.0	
21	07:50	6.0			
22	08:45	5.5			
23	08:30	5.9			
24	06:40	6.0			
25	06:50	6.0			
26	08:50	6.0			
27	09:00	6.0			
28	08:55	6.0			
29	9:05	6.0			
30	09:20	6.0			
31	07:45	6.0			

<b>Régua de Medição: Córrego do moinho (José Maria)</b>					
<b>Período: Setembro de 2002</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	08:40	9.0			Choveu nas últimas 12 h.
02	08:40	9.0			Alterações para valor a mais nas medições por ter acontecido desvio no local nos dias de 01/09 a 06/09.
03	08:45	9.0			
04	08:45	9.0			
05	08:45	9.0			
06	08:45	9.0			
07	08:45	11.0			Choveu mais de 6 h no dia anterior.
08	08:45	11.0			
09	08:45	10.0			
10	08:45	10.0			
11	08:45	10.0			
12	08:50	10.0			
13	08:40	10.0			
14	08:40	8.0			
15	08:35	8.0			
16	08:50	8.0			
17	08:55	8.0			
18	08:50	8.0			
19	08:45	8.0			
20	08:45	8.0			
21	08:50	9.0			Choveu nos últimos dias.
22	08:45	9.0			
23	08:40	9.0			
24	09:00	7.0			
25	09:00	7.0			
26	08:30	7.0			
27	08:00	8.0			
28	08:40	8.0			
29	09:00	7.0			
30	09:20	6.0			

<b>Régua de Medição: Córrego do Moinho (José Maria)</b>					
<b>Período: Outubro de 2002</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO Régua</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
01	07:45	8.0			
02	08:20	8.0			
03	07:50	8.0			
04	08:30	8.0			
05	08:40	8.0			
06	08:50	8.0			
07	08:50	8.0			
08	08:30	8.0			
09	07:50	7.0			
10	08:20	7.0			
11	07:40	7.0			
12	07:30	7.0			
13	07:40	6.0			
14	08:45	6.0			
15	09:00	6.0			
16	08:40	6.0			
17	07:35	6.0			
18	08:00	6.0			
19	08:20	6.0			
20	08:00	6.0			
21	08:10	6.0			
22	09:00	6.0			
23	09:00	7.0			
24	09:00	7.0			
25	09:00	7.0			
26	08:50	7.0			
27	09:00	6.0			
28	09:00	6.0			
29	09:00	6.0			
30	09:00	6.0			
31	09:00	6.0			

18.3 **Anexo C3**

**Medições da régua linimétrica instalada na surgência do Tadinho**

<b>Régua de Medição: Surgência do Tadinho</b>					
<b>Período: Junho de 2001</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm.</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>ANOTAÇÕES</b>
01					
02					
03					
04					
05					
06					
07					
08					
09					
10					
11					
12	32		32		<b>Início das medições.</b>
13	32		32		
14	32		32		
15	32		32		
16	32		32		
17	32		32		
18	32		32		
19	32		32		
20	32		32		
21	32		32		
22	32		32		
23	32		32		
24	32		32		
25	32		32		
26	32		32		
27	32		32		
28	32		32		
29	32		32		
30	32		32		

<b>Réguas de Medição: Surgência do Tadinho</b>					
<b>Período: Julho de 2001</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm.</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>ANOTAÇÕES</b>
01	32		32		
02	31,5		31,5		
03	31,5		31,5		
04	31,5		31,5		
05	31,5		31,5		
06	31,5		31,5		
07	31,5		31,5		
08	31,5		31,5		
09	31,5		31,5		
10	31,5		31,5		
11	31,5		31,5		
12	31,5		31,5		
13	31,5		31,5		
14	31,5		31,5		
15	31,5		31,5		
16	31		31		
17	31		31		
18	31		31		
19	31		31		
20	31		31		
21	31		31		
22	31		31		
23	31		31		
24	31		31		
25	31		31		
26	31		31		
27	31		31		
28	31		31		
29	31		31		
30	31		31		
31	31		31		

<b>Réguas de Medição: Surgência do Tadinho</b>					
<b>Período: Agosto de 2001</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm.</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>ANOTAÇÕES</b>
01	31		31		
02	31		31		
03	31		31		
04	31		31		
05	31		31		
06	31		31		
07	31		31		
08	31		31		
09	31		31		
10	31		31		
11	31		31		
12	31		31		
13	31		31		
14	31		31		
15	31		31		
16	31		31		
17	31		31		
18	31		31		
19	31		31		
20	31		31		
21	31		31		
22	31		31		
23	31		31		
24	31		31		
25	31		31		
26	31		31		
27	31		31		
28	31		31		
29	31		31		
30	31		31		
31	31		31		

<b>Réguas de Medição: Surgência do Tadinho</b>					
<b>Período: Setembro de 2001</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm.</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>ANOTAÇÕES</b>
01	31		31		
02	31		31		
03	31		31		
04	31		31		
05	31		31		
06	31		31		
07	31		31		
08	31		31		
09	31		31		
10	31		31		
11	31		31		
12	31		31		
13	31		31		
14	31		31		
15	31		31		
16	31		31		
17	31		31		
18	31		31		
19	31		31		
20	31		31		
21	31		31		
22	31		31		
23	31		31		
24	31		31		
25	31		31		
26	31		31		
27	31		31		
28	31		31		
29	31		31		
30	31		31		

<b>Réguas de Medição: Surgência do Tadinho</b>					
<b>Período: Outubro de 2001</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm.</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>ANOTAÇÕES</b>
01	31		31		
02	31		31		
03	31,5		31,5		
04	31,5		31,5		
05	31,5		31,5		
06	31,5		31,5		
07	31,5		31,5		
08	31,5		31,5		
09	31,5		31,5		
10	31,5		31,5		
11	31,5		31,5		
12	31,5		31,5		
13	31,5		31,5		
14	31,5		31,5		
15	31,5		31,5		
16	31,5		31,5		
17	31,5		31,5		
18	31,5		31,5		
19	31,5		31,5		
20	31,5		31,5		
21	31,5		31,5		
22	31,5		31,5		
23	31,5		31,5		
24	31,5		31,5		
25	31,5		31,5		
26	31,5		31,5		
27	31,5		31,5		
28	31,5		31,5		
29	31,5		31,5		
30	31,5		31,5		
31	31,5		31,5		

<b>Réguas de Medição: Surgência do Tadinho</b>					
<b>Período: Novembro de 2001</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm.</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>ANOTAÇÕES</b>
01	31,5		31,5		
02	31,5		31,5		
03	31,5		31,5		
04	31,5		31,5		
05	31,5		31,5		
06	31,5		31,5		
07	31,5		31,5		
08	31,5		31,5		
09	31,5		31,5		
10	31,5		31,5		
11	31,5		31,5		
12	31,5		31,5		
13	31,5		31,5		
14	31,5		31,5		
15	31,5		31,5		
16	31,5		31,5		
17	31,5		31,5		
18	31,5		31,5		
19	31,5		31,5		
20	31,5		31,5		
21	31,5		31,5		
22	31,5		31,5		
23	32		32		
24	32		32		
25	32		32		
26	31,5		31,5		
27	31,5		31,5		
28	31,5		31,5		
29	31,5		31,5		
30	31,5		31,5		

<b>Régua de Medição: Surgência do Tadinho</b>					
<b>Período: Dezembro de 2001</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>ANOTAÇÕES</b>
01	31,5		32		
02	32		32		Água suja pela manhã.
03	33,5		33,5		Água suja pela manhã.
04	33,5		33,5		Água suja pela manhã.
05	33,5		33,5		Água suja pela manhã.
06	33,5		33,5		
07	33,5		33,5		
08	33,5		33,5		
09	33,5		33,5		
10	33		32		
11	32		32		
12	32		32		
13	32		32		
14	32		32		
15	32		32		
16	32		32		
17	32		32		
18	32		32		
19	32		32		
20	32		32		
21	32		32		
22	32		32		
23	32		32		
24	32		32		
25	32		32		
26	32		32		
27	32		32		
28	32		32		
29	32		32		
30	32		32		
31	32		32		

<b>Réguas de Medição: Surgência do Tadinho</b>					
<b>Período: Janeiro de 2002</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>ANOTAÇÕES</b>
01	32		32		
02	32		32		
03	32		32		
04	32		32		
05	32		32		
06	32		32		
07	32		32		
08	32		32		
09	32		32		
10	32		32		
11	32		32		
12	32		32		
13	32		32		
14	32		32		
15	32		32		
16	32		32		
17	32		32		
18	32		32		
19	32		32		
20	32		32		
21	32		32		
22	32		32		
23	32		32		
24	32		32		
25	32		32		
26	32		32		
27	32		32		
28	32		32		
29	32		32		
30	32		32		

<b>Réguas de Medição: Surgência do Tadinho</b>					
<b>Período: Fevereiro de 2002</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm.</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>ANOTAÇÕES</b>
01	32		32		
02	32		32		
03	32		32		
04	32		32		
05	32		32		
06	32		32		
07	32		32		
08	32		33		
09	33		33		
10	33		33		
11	33		33		
12	33		33		
13	33,5		33,5		
14	33,5		33,5		
15	33,5		33,5		
16	33,5		33,5		
17	33,5		33,5		
18	33,5		33,5		
19	33,5		33,5		
20	33,5		33,5		
21	33,5		33,5		
22	33,5		33,5		
23	33,5		33,5		
24	33,5		33,5		
25	33,5		33,5		
26	33,5		33,5		
27	33,5		33,5		
28	33,5		34		

<b>Réguas de Medição: Surgência do Tadinho</b>					
<b>Período: Março de 2002</b>					
<b>Alturas diárias de nível d'água - Valores de altura da régua em cm.</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>ANOTAÇÕES</b>
01	33,5		34		
02	34		34		
03	34		34		
04	34		34		
05	34		34		
06	34		34		Água suja.
07	34		34		
08	34		35		
09	35		35		
10	35		35		
11	35		35		
12	35		35		
13	35		35		
14	35		35		
15	35		35		
16	35		35		
17	35,5		35,5		
18	35,5		35,5		
19	35,5		35,5		
20	35,5		35,5		
21	35,5		35,5		
22	35,5		35,5		
23	35,5		35,5		
24	35,5		35,5		
25	35,5		35,5		
26	35,5		35,5		
27	35,5		35,5		
28	35,5		35,5		
29	35,5		35,5		
30	35,5		35,5		

18.4 **Anexo C4**

**Medições do balde graduado utilizado na córrego Carrapato**

<b>Caixa de Medição: Córrego do Carrapato(Inhame Rosa)</b>					
<b>Período: Maio de 2002</b>					
<b>Medidas em volume por tempo (Balde Graduado – 20 Litros)</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Leitura em tempo (Seg.)</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>OBSERVAÇÃO</b>
01	07:35	8	17:15	8	TEMPO NORMAL
02	07:20	8	17:10	8	
03	07:15	8	17:20	8	
04	07:10	8	17:20	8	
05	07:20	8	17:20	8	
06	07:30	8	17:30	8	
07	07:40	8	17:20	8	Choveu na última noite.
08	07:25	8	17:00	10	
09	07:10	8	17:00	8	TEMPO NORMAL
10	07:00	8	17:20	8	
11	07:15	10	17:20	8	TEMPO NORMAL
12	07:20	10	17:15	10	
13	07:25	10	17:20	10	
14	07:10	10	17:10	10	
15	07:10	10	17:30	10	
16	07:00	10	17:20	10	
17	07:10	10	17:20	10	
18	07:00	10	17:10	10	
19	07:20	10	17:20	9	
20	07:00	10	17:30	10	
21	07:15	10	17:30	10	
22	07:20	9	17:20	9	Choveu na última noite
23	07:30	9	17:25	9	
24	07:20	12	17:20	12	
25	07:20	14	17:30	14	
26	07:30	10	17:10	10	
27	07:20	12	17:00	12	
28	07:25	12	17:20	12	
29	07:25	12	17:25	12	
30	07:30	12	17:20	12	
31	07:30	12	17:30	12	

<b>Caixa de Medição: Córrego do Carrapato (Inhame Rosa)</b>					
<b>Período: Junho de 2002</b>					
<b>Medidas em volume por tempo (Balde Graduado – 20 Litro)</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Leitura em tempo (Seg.)</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>OBSERVAÇÃO</b>
01	07:25	12	17:15	12	Há um desvio de água. 15 litros de água por minuto.
02	07:20	12	17:20	10	
03	07:15	12	17:15	12	
04	07:10	12	17:25	12	
05	07:15	12	17:10	12	
06	07:20	14	17:20	14	
07	07:10	14	17:10	14	
08	07:15	14	17:15	14	
09	07:20	14	17:10	14	
10	07:10	12	17:20	12	
11	07:15	14	17:25	14	
12	07:30	14	17:15	14	
13	07:20	14	17:10	14	
14	07:25	14	17:20	14	
15	07:00	16	17:25	16	
16	07:10	16	17:15	16	
17	07:15	16	17:20	16	
18	07:20	16	17:30	16	
19	07:15	16	17:20	16	
20	07:10	16	17:25	16	
21	07:05	16	17:10	16	
22	07:15	16	07:20	16	
23	07:25	17	07:35	17	
24	07:10	18	17:15	18	
25	07:20	18	17:20	18	
26	07:10	18	17:20	18	
27	07:20	18	17:15	18	
28	07:10	18	17:20	18	
29	07:15	18	17:15	18	
30	07:05	18	16:46	18	

<b>Caixa de Medição: Córrego do Carrapato (Inhame Rosa)</b>					
<b>Período: Julho de 2002</b>					
<b>Medidas em volume por tempo ( Balde Graduado - 20 Litros)</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Leitura em tempo (Seg.)</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>OBSERVAÇÃO</b>
01	07:20	18	17:15	18	
02	07:15	18	17:20	18	
03	07:15	18	17:30	18	
04	07:20	18	17:30	18	
05	07:25	18	17:15	18	
06	07:20	18	17:30	18	
07	07:15	16	17:20	18	
08	07:20	16	17:10	18	
09	07:30	16	17:30	18	
10	07:15	20	17:10	19	
11	07:30	19	17:00	18	
12	07:10	18	17:30	18	
13	07:15	18	17:15	18	
14	07:20	18	17:10	18	
15	07:25	18	17:20	18	
16	07:30	18	17:25	18	
17	07:30	18	17:15	18	
18	07:20	18	17:10	18	
19	07:30	18	17:20	18	
20	07:15	18	17:15	18	
21	07:10	18			
22	08:25	20			
23	08:20	20			
24	08:20	20			
25	08:25	20			
26	08:28	20			
27	08:30	19			
28	08:35	19			
29	08:45	19			
30	08:50	19			
31	08:50	19			

<b>Caixa de Medição: Córrego do Carrapato (Inhame Rosa)</b>					
<b>Período: Agosto de 2002</b>					
<b>Medidas em volume por tempo ( Balde Graduado - 20 Litros)</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Leitura em tempo (Seg.)</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>OBSERVAÇÃO</b>
01	07:20	18	17:15	18	
02	07:15	18	17:20	18	
03	07:15	18	17:30	18	
04	07:20	18	17:30	18	
05	07:25	18	17:15	18	
06	07:20	18	17:30	18	
07	07:15	16	17:20	18	
08	07:20	16	17:10	18	
09	07:30	16	17:30	18	
10	07:15	20	17:10	19	
11	07:30	19	17:00	18	
12	07:10	18	17:30	18	
13	07:15	18	17:15	18	
14	07:20	18	17:10	18	
15	07:25	18	17:20	18	
16	07:30	18	17:25	18	
17	07:30	18	17:15	18	
18	07:20	18	17:10	18	
19	07:30	18	17:20	18	
20	07:15	18	17:15	18	
21	07:10	18			
22	08:25	20			
23	08:20	20			
24	08:20	20			
25	08:25	20			
26	08:28	20			
27	08:30	19			
28	08:35	19			
29	08:45	19			
30	08:50	19			
31	08:50	19			

<b>Caixa de Medição: Córrego do Carrapato(Inhame Rosa)</b>					
<b>Período: Setembro de 2002</b>					
<b>Medidas em volume por tempo (Balde Graduado – 20 Litros)</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Leitura em tempo (Seg.)</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>OBSERVAÇÃO</b>
01	08:00	20			
02	08:10	20			
03	08:00	20			
04	08:00	20			
05	08:05	20			
06	08:00	20			
07	08:05	20			
08	08:05	20			
09	08:10	20			
10	08:10	20			
11	08:00	20			
12	08:30	22			
13	08:15	22			
14	08:20	24			
15	08:25	24			
16	08:30	24			
17	08:10	24			
18	08:15	24			
19	08:25	24			
20	08:20	24			<b>Choveu nos últimos dias.</b>
21	08:15	18			
22	08:10	18			
23	08:30	18			
24	07:55	26			
25	08:00	26			
26	08:00	26			
27	08:30	26			
28	08:40	20			
29	08:30	26			
30	08:30	26			

<b>Caixa de Medição: Córrego do Carrapato(Inhame Rosa)</b>					
<b>Período: Outubro de 2002</b>					
<b>Medidas em volume por tempo (Balde Graduado-20 litros)</b>					
<b>DIA</b>	<b>7 HORAS</b>	<b>Leitura em tempo (Seg.)</b>	<b>17 HORAS</b>	<b>CORREÇÃO</b>	<b>OBSERVAÇÃO</b>
01	07:20	26			
02	07:50	26			
03	07:30	26			
04	08:10	26			
05	08:20	26			
06	08:40	26			
07	08:30	27			
08	08:20	27			
09	07:30	27			
10	08:00	28			
11	07:20	28			
12	07:20	28			
13	07:20	28			
14	08:30	28			
15	08:40	28			
16	08:20	30			
17	07:20	30			
18	07:45	30			
19	07:50	30			
20	07:40	30			
21	08:00	30			
22	08:00	31			
23	07:55	31			
24	08:00	30			
25	08:00	30			
26	08:00	30			
27	08:00	30			
28	07:55	30			
29	07:55	30			
30	08:10	30			
31	07:35	30			

## 18.5 Anexo C5

### Medições da cota de nível d'água através de monitoramento em piezômetros.

Data	PZ-1	PZ-2	PZ-3A	PZ-3B	PZ-3C	PZ-4	PZ-5	PZ-6	PZ-7	PZ-8	Ppt média (mm)	Data Ppt
set-99	754,19										52,80	set-99
set-99	754,19											
out-99	754,19										75,51	out-99
mar-00	753,31	745,74									130,78	mar-00
abr-00	753,64	745,56									32,15	abr-00
mai-00	753,74	745,29									25,65	mai-00
jun-00	752,83	744,44									3,97	jun-00
jul-00	751,96	743,46									2,43	jul-00
ago-00	751,37	742,83									7,99	ago-00
set-00	750,46	741,63									52,80	set-00
out-00	749,86	740,73									75,51	out-00
nov-00	748,86	738,95									202,80	nov-00
dez-00	748,96	738,69								683,30	264,36	dez-00
dez-00	749,13	739,36								682,56		
jan-01	749,96	741,60								682,80	242,05	jan-01
jan-01	751,15	744,63								680,00		
fev-01	750,99	742,63								682,30	122,01	fev-01
fev-01	751,11	743,09								682,70		
mar-01	750,99	742,97								678,70	130,78	mar-01
mar-01	751,19	743,45								683,70		
abr-01	750,99	742,97								678,70	32,15	abr-01
mai-01	751,16	742,66								683,45	25,65	mai-01
jun-01	749,64	740,73	730,12							681,50	3,97	jun-01
jul-01	747,99	739,18	729,39	729,47	728,86					681,60	2,43	jul-01
ago-01	749,19	737,59	729,21	729,33	728,66					678,50	7,99	ago-01
set-01	747,59	736,73	727,99	727,77	727,41	744,03				688,50	52,80	set-01
out-01	746,59	736,45	728,59	728,67	728,06	744,18				681,90	75,51	out-01
nov-01	747,19	736,93	729,69	729,86	729,26	745,48	722,42			706,20	202,80	nov-01
nov-01	747,09	736,95	729,29	729,87	729,20	746,38	724,57			696,50		
dez-01	748,84	740,68	730,83	730,99	730,35	749,46	722,54	728,60		688,50	264,36	dez-01
dez-01	748,09	741,25	731,61	731,87	731,24	750,18	725,62	728,15		693,50		
dez-01	749,09	741,53	731,16	731,32	730,66	748,82	724,66	728,40	711,08	696,50		
jan-02	751,06	744,42	731,89	731,97	731,46	749,18	724,12	728,30	712,68	683,02	242,05	jan-02
fev-02	752,97	745,93	732,54	732,54	732,02	749,18	723,97	728,35	711,41	683,50	122,01	fev-02
fev-02	754,19	746,09	733,16	733,20	732,81	750,18	724,12	728,60	711,86	683,50		
fev-02	754,69	746,21	734,53	733,67	733,56	750,88	724,42	728,60	709,88	681,50		
mar-02	755,19	746,38	734,44	734,57	734,20	749,78	723,82	725,99	714,78	699,50	130,78	mar-02
abr-02	755,69	746,33	734,74	734,95	734,56	749,54	723,25	725,73	714,52	699,50	32,15	abr-02
abr-02	756,19	746,43	734,89	734,92	734,66	749,18	723,05	725,64	717,90	701,85		
mai-02	756,69	746,37	734,89	735,03	734,66	748,18	724,02	728,42	718,34	689,50	25,65	mai-02
mai-02	756,19	746,01	734,89	735,01	734,66	750,02	723,79	726,92	718,38	682,50		
jul-02	755,69	745,73	734,75	734,84	734,52	749,98	723,31	725,76	717,72	682,50	2,43	jul-02
jul-02	753,89	745,30	734,53	734,62	734,22	748,37	722,68	723,74	717,32	684,50		
ago-02	752,19	744,33	734,26	734,24	733,80	747,60	722,42	723,60	716,78	681,50	7,99	ago-02
out-02	751,36	742,15	735,72	735,67	735,61	749,18	727,00	733,10	716,94	710,82	75,51	out-02
nov-02	751,37	740,73	732,95	729,47	732,72	749,08	725,72	726,04	716,72	684,50	202,80	nov-02