

**UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
**Campus de Rio Claro (SP)**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO DE ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NA FAZENDA CARA PRETA – SANTA  
RITA DO PASSA QUATRO – SP.**

**MARÍLIA COSTA MIRANDA**

Orientador: Chang Hung Kiang  
Coorientador: Elias Hideo Teramoto

Rio Claro – SP  
2009

**UNESP - UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
**Campus de Rio Claro (SP)**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO DE ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NA FAZENDA CARA PRETA – SANTA  
RITA DO PASSA QUATRO – SP.**

MARÍLIA COSTA MIRANDA

Orientador: Chang Hung Kiang  
Coorientador: Elias Hideo Teramoto

*Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP,  
campus de Rio Claro, como parte das exigências para  
o cumprimento da disciplina Trabalho de Conclusão  
de Curso no ano letivo de 2009”*

Rio Claro – SP  
2009

551.49 Miranda, Marília Costa  
M672s Simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas na fazenda Cara Preta - Santa Rita do Passa Quatro - SP / Marília Costa Miranda. - Rio Claro : [s.n.], 2009  
42 f. : il., figs., gráfs., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Chang Hung Kiang  
Co-Orientador: Elias Hideo Teramoto

1. Água Subterrânea. 2. Hidrogeologia. 3. Modelagem numérica. 4. Sistema aquífero Guarani. 5. Modelo conceitual. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP  
Campus de Rio Claro/SP

## AGRADECIMENTOS

*Devo sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang, pela oportunidade e confiança em minha capacidade para o desenvolvimento deste trabalho.*

*Aos geólogos Elias Hideo Teramoto e Didier Gastmans, por toda ajuda e paciência despendidas durante este ano, e pelos ensinamentos que, sem dúvida, serão levados pelo o resto de minha vida. À todos que trabalham no LEBAC, que de alguma forma me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho, em especial à Cris Wiechmann, Felipe Ferroni e Andresa Oliva.*

*Ao amigo e “parceiro de TCC”, Eder, pela ajuda, por todas as discussões hidrogeológicas e principalmente pelo companheirismo.*

*Agradeço às minhas queridas amigas Jú, Sá, Pepe, Mari, Lari e Joaquina, aos meninos, Zanão, “Brãno”, Jorginho “Mamute”, “Arara”; e aos futuros engenheiros ambientais Malu e Kadu, meus verdadeiros amigos, que têm um espaço reservado em meu coração; estes cinco anos só foram tão especiais pois vocês estavam sempre presentes!*

*Às antigas companheiras de república Fe, Cris e Flá, muito queridas e que já deixam saudades pelos anos de convivência. Outro agradecimento à Clá e a Mari (Bio), amigas que me aguentaram falando durante todas as longas horas de viagem até São José.*

*À Natinha, pela amizade sem tamanho, e seu pai, Sérgio Pontremolez, por terem me introduzido à Geologia, esta ciência apaixonante da qual ainda sou apenas admiradora e aprendiz.*

*Um agradecimento especial e com muito carinho ao meu namorado Rafael Zendonadi, o Zen, por todo amor, companheirismo, ajuda e paciência durante este ano.*

*Aos meus pais, Fátima e João, e à minha irmã, Luiza, por seu amor incondicional, apoio e incentivo em mais esta etapa de minha vida. A eles devo todo agradecimento do mundo.*

## RESUMO

O termo *modelo* refere-se a uma representação simplificada da realidade. A utilização de modelos em Hidrogeologia pode trazer benefícios, como a melhor compreensão sobre o comportamento de um sistema de fluxos, bem como elaborar previsões diante de cenários diversos. Os modelos numéricos de fluxo de água subterrânea, objeto deste estudo, consistem na aproximação de um conjunto de equações diferenciais que descrevem o escoamento de água no meio poroso. Neste contexto, foram realizadas simulações numéricas para uma sub-bacia localizada na Fazenda Cara-Preta, Município de Santa Rita do Passa Quatro - SP. O aquífero presente na área é composto por rochas da Formação Pirambóia, e constitui parte do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Foi elaborado um modelo conceitual a partir de estudos anteriores no local para a representação da sub-bacia em linguagem computacional. Neste modelo conceitual, foram considerados as condições de contorno e os aspectos hidrogeológicos da área, como espessura da camada aquífera, nível d'água, condutividade hidráulica e recarga. Foram então realizadas simulações no *software* Visual Modflow®. O modelo foi discretizado em duas camadas e dividido em 200 linhas e colunas. Foram determinados valores de condutividade hidráulica de  $1,55 \cdot 10^{-7}$  m/s e  $2,2 \cdot 10^{-6}$  m/s, e valores de recarga por precipitação variando de 200 a 180 mm. O modelo elaborado possui representatividade frente às condições reais, confirmando a consistência do modelo conceitual.

## **ABSTRACT**

The term *model* refers to any representation of a real system. The use of models in Hydrogeology can be valuable predictive tools for management of groundwater resources. The numeric models of groundwater flow, object of this study, consist on a set of differential equations that describe the water flow in the porous medium. In this context, numeric simulations were made for a sub-basin located at Cara Preta farm – Santa Rita do Passa Quatro – SP. The aquifer at the local is composed by rocks of Pirambóia Formation, which is part of Guarani Aquifer System. It was developed a conceptual model from previous studies in the area, and from that, simulations were made through the software Visual Modflow®. The conceptual model established previously was considered consistent through the results of simulation.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>i</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>iv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>1</b>
<b>3. CONCEITUAÇÃO GERAL</b> .....	<b>2</b>
3.1 Modelos .....	<b>2</b>
3.1.1 Modelos Físicos .....	2
3.1.2 Modelos Analógicos .....	2
3.1.3 Modelos Matemáticos .....	3
3.1.3.1 Modelos Analíticos .....	3
3.1.3.2 Modelos Numéricos .....	3
3.2 Conceitos básicos de escoamento em meio poroso.....	5
3.3 Elementos do Modelo Matemático .....	7
3.4 Etapas de Elaboração de um Modelo Matemático de Fluxo .....	10
3.5 Pacote Computacional Utilizado.....	12
<b>4. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO</b> .....	<b>13</b>
4.1 Levantamento Bibliográfico .....	13
4.2 Modelo Hidrogeológico Conceitual.....	13
4.3 Dados de Entrada no <i>Software</i> .....	13
4.4 Simulações Numéricas de Fluxo.....	14
<b>5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>14</b>
5.1 Localização .....	14
5.2 Geomorfologia .....	14
5.3 5.3 Vegetação e Clima.....	15
5.4 Geologia Regional.....	16
5.4.1 Origem e Evolução da Bacia do Paraná.....	16
5.4.2 Sistema Aquífero Guarani (SAG) .....	17
5.5 Geologia Local.....	20

<b>6. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA LOCAL</b> .....	22
6.1 Geologia Local.....	23
6.2 Superfície Potenciométrica.....	25
6.3 Eletrofácies .....	27
6.4 Condutividade Hidráulica.....	29
6.5 Dados Pluviométricos e Fluviométricos.....	29
<b>7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO</b> .....	31
7.1 Modelo Conceitual .....	31
7.2 Condições de Contorno .....	32
7.3 Configurações do Domínio Simulado .....	33
<b>8. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	34
8.1 Distribuição dos Valores de Condutividade Hidráulica e Recarga.....	34
8.2 Balanço de Fluxo .....	36
8.3 Correlação entre os Valores de Carga Hidráulica.....	37
8.4 Potenciometria Gerada pela Simulação.....	37
<b>9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	40
<b>10. REFERÊNCIAS</b> .....	42

## 1. INTRODUÇÃO

Recursos hídricos são essenciais para a sustentabilidade de sociedades. Possuem valor social e econômico e sua disponibilidade e usos podem influenciar no desenvolvimento de sociedades. O manejo sustentável destes recursos representa um dos maiores problemas atuais, e o uso de modelos de simulação numérica constitui uma ferramenta de grande utilidade para subsidiar seu gerenciamento adequado (HINKELMANN, 2005).

O termo “modelo” refere-se a uma representação simplificada da realidade. Em algumas áreas na hidrogeologia, a utilização de modelos, elaborados a partir de um sistema hidrogeológico real, pode trazer grandes benefícios, como a melhor compreensão sobre o comportamento de um sistema de fluxos (FETTER, 2001).

É importante ressaltar que por se tratar de uma versão simplificada da realidade, não existe um único modelo possível para um dado sistema hidrogeológico. Variadas propostas para a simplificação do sistema real levam a diferentes modelos, ou seja, se aproximam da realidade de maneiras variadas (BEAR *et al.* 1992).

A partir desta proposta, a simulação numérica de um aquífero inserido no contexto de uma microbacia hidrográfica localizada na Fazenda Cara Preta (Município de Santa Rita do Passa Quatro – SP) contribui para o entendimento da dinâmica dos fluxos de água, bem como lança bases para a avaliação de possíveis impactos decorrentes de mudanças do uso do solo dentro do ciclo hidrológico.

Para a realização das simulações numéricas, foi utilizado o *software* Visual Modflow 3.1<sup>®</sup> (Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2002).

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho consiste na realização de simulações numéricas de fluxo de água subterrânea, a partir de dados da área de estudo levantados em trabalhos anteriores e, assim, aprimorar o conhecimento do sistema hidrogeológico local.

Para que o objetivo principal seja alcançado, deve ser levada em consideração a elaboração de um *modelo conceitual* como uma importante etapa do trabalho. O modelo conceitual consiste na definição “verbal” das características relevantes que compõem o sistema, bem como os processos que nele ocorrem e as propriedades do meio (BEAR, 1992).

### 3. CONCEITUAÇÃO GERAL

Este capítulo destina-se à apresentação da fundamentação teórica relativa ao presente trabalho, que envolve a conceituação básica para a realização de simulações numéricas de fluxo e mecanismos de fluxo de água subterrânea no meio poroso.

#### 3.1 Modelos

Como já citado anteriormente, modelos podem ser definidos como uma versão simplificada de um sistema real, obtidos através de simulações que se aproximem de relações existentes em sistemas reais. Esta simplificação é feita através de um conjunto de suposições que expressem a natureza do sistema e suas características mais relevantes para o problema em questão (BEAR, 1992).

Os modelos são ferramentas largamente utilizadas nos diversos ramos da Ciência e particularmente nas Engenharias. Nas Ciências da Terra, os modelos se aplicam com maior frequência na área de Hidrogeologia.

Existem basicamente três tipos de modelagem na hidrogeologia: modelos físicos, analógicos e matemáticos.

##### 3.1.1 Modelos Físicos

Os *modelos físicos* simulam o fluxo de água subterrânea diretamente, em escala reduzida, como por exemplo, através de caixas de areia (*sank tank models*). Um dos problemas encontrados neste tipo de modelo é a representação em escala de laboratório de uma situação real, uma vez que os fenômenos observados em campo encontram-se em diferentes condições das laboratoriais (WANG & ANDERSON, 1982). Outro exemplo de modelagem física são os modelos de fluxo viscoso, nos quais um fluido viscoso entre duas placas paralelas simulam intrusões salinas.

##### 3.1.2 Modelos Analógicos

Os *modelos analógicos*, não mais utilizados na hidrogeologia, baseavam-se em leis da física, tais como o fluxo de correntes elétricas em um meio resistivo ou o fluxo de calor em um sólido, fazendo uma analogia destes com o fluxo d'água em meio subterrâneo (WANG & ANDERSON, 1982).

### 3.1.3 Modelos Matemáticos

Para Wang & Anderson (1982), os *modelos matemáticos* consistem em conjuntos de equações diferenciais parciais que governam os sistemas hidrogeológicos, representando-os matematicamente. Por ser o tipo de modelo que apresenta a abordagem mais versátil para os problemas hidrogeológicos (SPITZ E MORENO, 1996), estes passaram a ser o tipo de modelagem mais utilizada desde seu surgimento, no final do século XIX, ganhando força a partir da popularização e desenvolvimento de computadores mais complexos, uma vez que a solução para este tipo de modelo requer o processamento de um grande número de dados.

Segundo Alberto (2005), a modelagem matemática tem como objetivo auxiliar a determinação da distribuição das propriedades hidráulicas do meio e de suas condições de contorno, visando uma aproximação mais apurada dos dados simulados com os dados observados em campo.

Conforme o meio de solução das equações citadas anteriormente, os modelos matemáticos são divididos em duas categorias diferentes: os modelos analíticos e os modelos numéricos.

#### 3.1.3.1 Modelos Analíticos

Os modelos analíticos resultam numa solução direta de equações diferenciais parciais (MASSMANN & HAGLEY, 1995), assumindo que o meio é homogêneo e isotrópico quanto às suas propriedades, portanto possuem formulações de natureza contínua e descrevem o fenômeno para qualquer parte do domínio. Tal fato os torna muito simplistas e inadequados para situações complexas, mais comuns na natureza, fazendo com que a credibilidade do modelo seja muito baixa nessas situações.

#### 3.1.3.2 Modelos Numéricos

Os modelos numéricos resultam em soluções aproximadas, através da simulação em intervalos discretos. Assim, quanto menor o intervalo discreto do modelo, maior sua aproximação com a solução analítica e a real. Podem ser utilizadas quando os valores de parâmetros do meio apresentam mudança espacial no domínio do modelo (ZHENG & BENNETT, 1995).

Os métodos numéricos traduzem equações diferenciais parciais em equações algébricas, e o domínio do modelo é discretizado por *grids* ou malhas de nós, criando-se uma rede intrincada de equações com incógnitas a serem solucionadas, permitindo assim, que problemas relacionados à heterogeneidade, anisotropia e contornos irregulares do domínio sejam sanados (WANG & ANDERSON, 1982).

Os métodos mais utilizados são o *método das diferenças finitas* (MDV) e o *método dos elementos finitos* (MEF). Em ambos os casos, o domínio que compreende a área de estudo é interpretado como um sistema tridimensional de grades de nós, com diferença básica quanto à forma da malha estabelecida que, enquanto no primeiro método (MDV) é retangular, com as linhas de malha sempre ortogonais umas às outras; no segundo método (MEF), pode ser tanto regular como irregular, com elementos quadriláteros ou retangulares. (ALBERTO, 2005) (Figura 1).

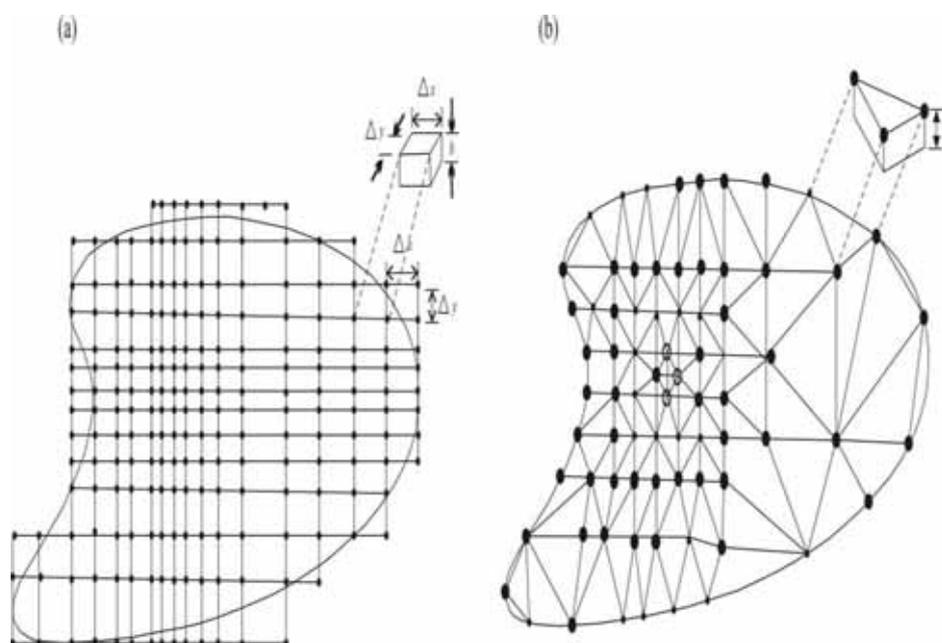


Figura 1: Representações dos *grids* do método de *elementos finitos*, com nós centrados na malha (a) e método de *diferenças finitas* (b) onde :

- (a)  $\Delta x$  é o espaçamento da direção  $x$ ,  $\Delta y$  é o espaçamento da direção  $y$  e  $b$  é a espessura do aquífero.
- (b)  $b$  é a espessura do aquífero.

Além desses, outros métodos utilizados na hidrogeologia são o método dos elementos de contorno, método dos volumes finitos e método dos elementos analíticos (WENDLAND, 2003).

No presente trabalho, adotou-se o método das diferenças finitas, no qual as incógnitas citadas anteriormente são representadas por pontos discretos no domínio do

modelo simulado, denominados nós. Os nós representam cargas hidráulicas, e seus valores são considerados constantes em todo o domínio representado por eles. Os nós encontram-se dentro de células, ou nas intersecções entre quadrículas delimitadas por uma malha previamente definida, que podem ter espaçamento constante ou irregular entre as linhas.

### 3.2. Conceitos básicos de escoamento em meio poroso

O fluxo de água subterrânea é um fenômeno controlado por leis da física e da termodinâmica, visando equilibrar variações espaciais de energia potencial. Devido à esta variação, a água flui de regiões de maior energia para regiões de menor energia. (FETTER, 1994).

Alguns fatores externos, tais como a gravidade, pressão externa (tanto pressão atmosférica, como pressão proveniente de rochas sobrepostas à camada aquífera) e atração molecular, também exercem influência sobre o fluxo.

A partir de uma série de experimentos com tubos preenchidos com areia, em 1856, Darcy estabeleceu os fundamentos básicos que regem o fluxo de água subterrânea, que obedece a seguinte relação:

$$Q = -K.A. \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

Sendo  $Q$  a descarga (volume de água que aflui de uma dada seção),  $K$  a condutividade hidráulica (constante),  $A$  a seção transversão de onde a água flui e  $dh/dl$ , o gradiente hidráulico. A constante  $K$  (condutividade hidráulica), estabelecida por Darcy, depende de características intrínsecas da rocha que constitui o aquífero e do líquido contido nos poros destas rochas, demonstrada pela seguinte expressão:

$$K = k \cdot \frac{g}{\nu} \quad k = \text{permeabilidade (L}^2\text{)}$$
$$\nu = \text{viscosidade cinemática do líquido (L}^2\text{/T)} \quad (2)$$
$$g = \text{aceleração da gravidade}$$

A velocidade linear média é expressa por:

$$v = -K/n_e \cdot dh/dl \quad (3)$$

Hubert, em 1940 (*apud* WANG & ANDERSON, 1982) esclarece o conceito de Carga Hidráulica ( $\Phi$ ) e sua relação com a Lei de Darcy, a partir dos princípios básicos desta: o potencial Hidráulico Subterrâneo em um dado ponto corresponde à energia necessária para que uma unidade de massa de água seja transportada de uma elevação de referência até este ponto, pela equação abaixo:

$$\Phi = \frac{P}{\rho_w} + g(z - z_{ref}) \quad (4)$$

Onde P é o potencial de pressão,  $\rho_w$  é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade, z é o potencial de elevação e  $z_{ref}$  a elevação de referência.

Considerando  $z_{ref}$  igual a 0, e h como função da elevação z, tem-se a expressão:

$$h = \frac{P}{\rho_w} + z \quad (5)$$

Sendo h a carga total,  $P/\rho_w$ , o potencial de pressão e z, o potencial de elevação.

Considerando as premissas acima e o princípio de conservação de massa, em função das coordenadas espaciais tridimensionais ( $h = h(x, y, z)$ ), onde  $dh/dl$  é a variação da carga em relação à posição no espaço, é possível expressar a *Equação Geral do Fluxo*, para meios porosos não confinados, em um Volume Elementar Representativo (VER – Figura 2), pela equação 6 (WANG & ANDERSON, 1982), conhecida como Equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

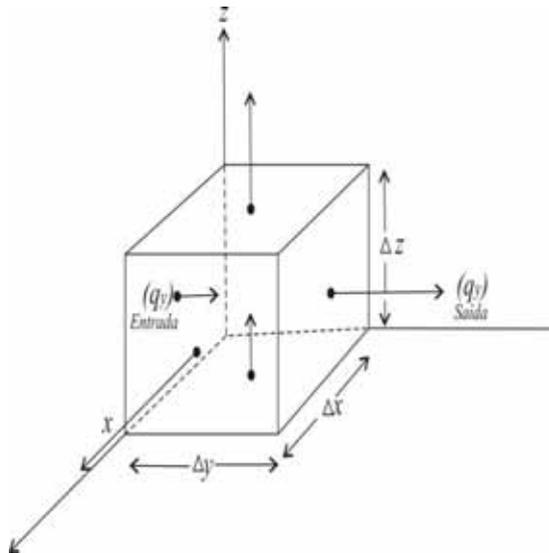


Figura 2: Volume Elementar Representativo (VER).

Ao se considerar a possibilidade de armazenamento de água no interior do VER e a possibilidade de recarga e descarga no mesmo, obtém-se a Equação de Boussinesq, para meios porosos não confinados e homogêneos, expressa pela equação 7 (FETTER, 1994):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = Ss \frac{dh}{dt} \quad (7)$$

Sendo  $Ss$  o armazenamento específico.

### 3.3 Elementos do Modelo Matemático

Para Bear (1992), um modelo matemático completo consiste nos seguintes elementos:

- ✓ Definição da geometria do domínio considerado, e seus limites;
- ✓ Equação ou equações de balanço de massas;
- ✓ Equações que relacionem o fluxo d'água com outras variáveis existentes no problema;
- ✓ Equações que definam o comportamento dos fluidos e sólidos envolvidos,
- ✓ Equações que expressem as condições iniciais do sistema considerado (para problemas transitórios);

- ✓ Condições de contorno, que descrevam a interação do domínio simulado com seu meio.

Ainda segundo o mesmo autor, as equações devem ser expressas em termos de variáveis dependentes selecionadas problema em questão, que por sua vez, dependem dos dados disponíveis em cada caso. O modelo matemático deve, portanto, conter as mesmas informações pré-estabelecidas pelo modelo conceitual, mas expressas como um conjunto de equações passíveis de soluções analíticas e numéricas.

A determinação das condições de contorno é necessária para que seja obedecida a equação de Laplace, que governa o fluxo estacionário em um aquífero isotrópico e homogêneo. A solução para a equação de Laplace requer que as condições de contorno existam para demarcar uma área do aquífero, gerando uma resposta exata para todos os valores de fluxo (WANG & ANDERSON. 1982).

Embora representem elementos físicos, tais como falhas geológicas e rios, as condições de contorno são representadas no modelo através de equações matemáticas, que explicitam certos parâmetros específicos conhecidos no modelo.

Segundo Wang & Anderson (1982), existem diferentes tipos de condições de contorno, a saber:

- *Carga hidráulica especificada* para as superfícies que estão dentro dos limites da região do fluxo (Condições de Dirichlet), expressa matematicamente por:

$$H(x,y,z,t)=\text{especificado} \quad (8)$$

A carga hidráulica em certos pontos do domínio tem seu valor conhecido e, portanto, servem como referência para a solução do modelo, exemplificado por Reilly *et al* (2001) como rios e lagos que possuam valores de carga hidráulica conhecida e ligação com o aquífero (Figura 3).

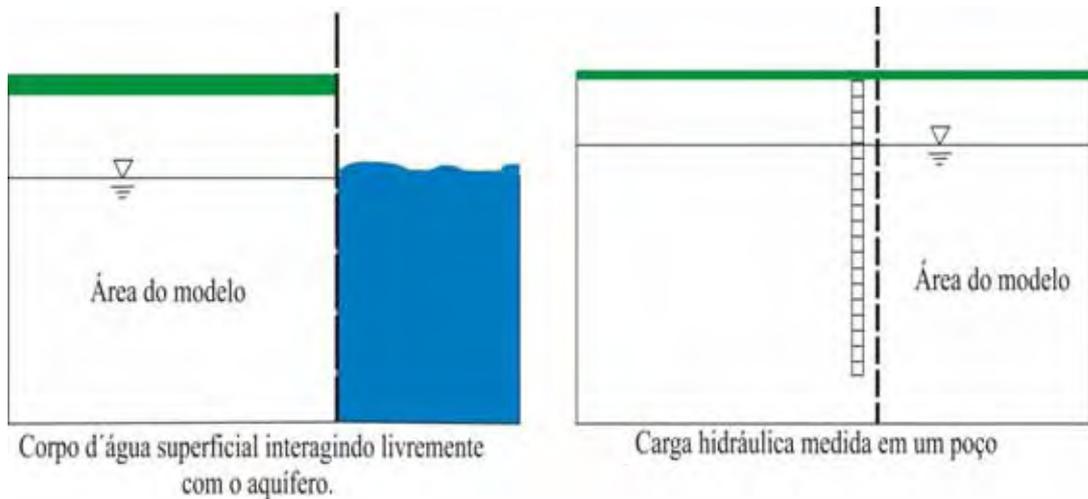


Figura 3: Condição de carga hidráulica especificada. Modificado de Spitz & Moreno (1996).

- O *fluxo especificado* para ao longo das superfícies dentro dos limites da região do fluxo (Condição de Neumann), expresso por:

$$\frac{dh(x,y,z,t)}{dn} = 0 \text{ especificado} \quad (9)$$

Neste tipo de condição de contorno, o fluxo especificado pode ser nulo ou não. Aplica-se quando existe um contorno impermeável, uma linha de fluxo, ou seja, onde inexistia fluxo transversal ao contorno (Figura 4).

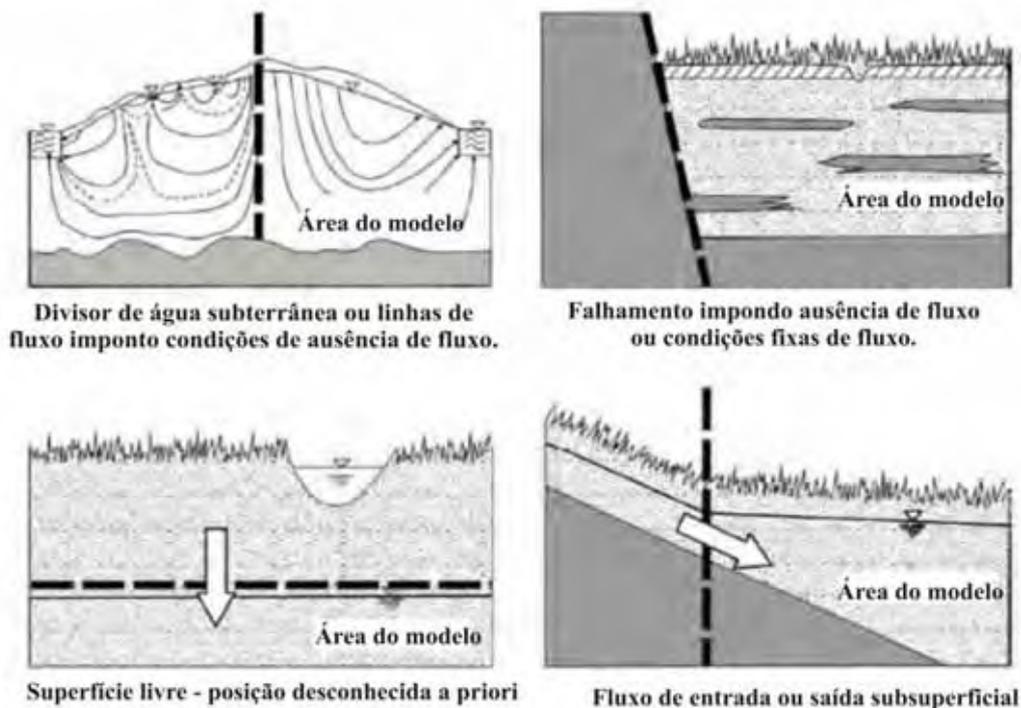


Figura 4: Exemplos de condição de fluxo especificado. (SPITZ & MORENO, 1996)

- *Condição de fluxo dependente da carga* (condição de Cauchy), representada matematicamente pela equação:

$$\frac{dh}{dn} + ch = 0 \text{ especificado} \quad (10)$$

Um exemplo comumente usado para este tipo de contorno é aquele no qual existe uma camada semipermeável separando dois aquíferos, ou um aquífero e um corpo de água superficial.

### **3.4 Etapas de Elaboração de um Modelo Matemático de Fluxo**

Os Protocolos para Aplicação de Modelos Matemáticos (PAMMs) estabelecem etapas a serem seguidas para o processo de modelagem matemática. Estes PAMMs são propostos por diversos autores, tais como Bear (1992), Wang & Anderson (1982) e Spitz e Moreno (1996), com algumas diferenças metodológicas entre si, porém com 3 grandes etapas estabelecidas. São elas Preparação, Calibração e Aplicação. A Figura 5 ilustra uma versão simplificada das etapas dos PAMMs, segundo Bear (1992) e Spitz e Moreno (1996).

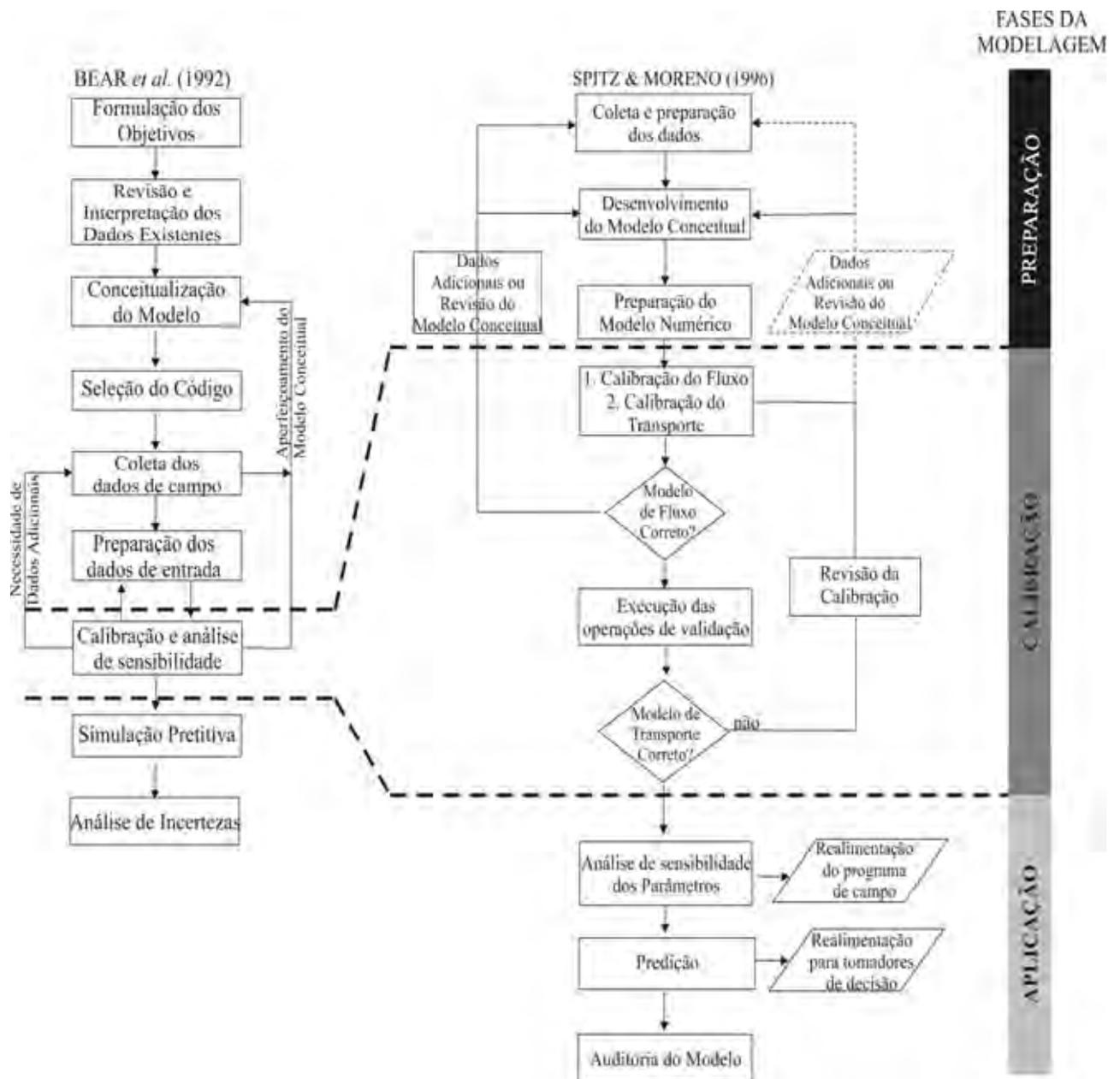


Figura 5: Etapas de elaboração de um modelo matemático. Adaptado de Alberto (2005).

A primeira etapa consiste na compilação e preparação dos dados pré-existentes, a partir de um objetivo proposto.

A segunda etapa é representada pela formulação de modelo hidrogeológico conceitual norteado pelo levantamento de informações relevantes existentes, tais como aquelas relacionadas aos aspectos geológicos, propriedades hidráulicas e potenciométrica da área a ser simulada.

A partir do modelo conceitual proposto, é possível realizar a seleção do código computacional (*software*), optando-se pelo que se considera mais adequado ao problema em questão.

A etapa seguinte, da *calibração*, objetiva a verificação e correlação entre valores observados em campo e valores calculados pelo *software*. Os processos de calibração de validação tornam-se sem sentido quando fatores significantes do sistema natural são excluídos ou ignorados do modelo. Os valores inseridos no modelo são alterados e verificados a cada mudança, tanto manualmente (*trial-and-error*), como automaticamente, até que se obtenha o ajuste mais próximo entre os valores medidos e os valores simulados (SPITZ E MORENO, 1996).

A *aplicação* do modelo visa demonstrar o grau de dependência dos resultados obtidos frente à determinados parâmetros de entrada do modelo, permitindo esboçar o grau de incertezas contidos nos mesmos; uma vez que estas incertezas são decorrentes do fato de não ser possível adotar os valores reais e a distribuição real de certos parâmetros.

### **3.5 Pacote Computacional Utilizado**

Adotou-se o pacote computacional MODFLOW®, escrito originalmente em linguagem FORTRAN 77 e desenvolvido por McDonald & Harbaugh (1988). O MODFLOW® é composto de códigos, em forma modular, que solucionam os problemas de fluxo tridimensionalmente, em diferenças finitas implícitas, com bloco de nó centrado.

Para este trabalho, foi utilizado o Visual MODFLOW®, uma interface gráfica do MODFLOW®, desenvolvida pela empresa canadense Waterloo Hydrogeologic Inc, que permite a visualização gráfica do modelo, possibilitando a elaboração e simulação de problemas em tempo reduzido.

O MODFLOW® 3.1, versão utilizada neste trabalho, apresenta de 5 algoritmos de solução numérica: SOR (Slice-Successive Overrelaxation), SIP (Strongly Implicit Procedure), LMG (Algebraic MultGrid), PCG2 (Conjugated Gradient) e WHS (Bi-Conjugated Stabilized Gradient), sendo este último o utilizado para este trabalho.

## **4. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO**

### **4.1 Levantamento Bibliográfico**

Pesquisa e levantamento bibliográfico a respeito de temas relevantes ao trabalho, com ênfase aos aspectos e conhecimentos geológicos, hidrogeológicos e fisiográficos da área de estudo, em escala regional e local.

Em relação ao aparato técnico para realização deste trabalho, foi realizado o levantamento bibliográfico dos conceitos necessários a respeito de modelos matemáticos numéricos. Tais informações foram extraídas de autores diversos, destacando-se os trabalhos de Wang & Anderson (1982), Bear (1992), Spitz e Moreno (1996), Fetter (2001).

### **4.2 Modelo Hidrogeológico Conceitual**

Nesta etapa os dados adquiridos durante as campanhas de investigação feitas anteriormente na área foram organizados em relação à geologia e à hidrogeologia local. Levantamentos geofísicos e hidrogeológicos prévios realizados na área de estudo anteriormente por Romualdo (2006) e Sato (2007) norteiam a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo.

Através de ensaios geofísicos (método da Sondagem Elétrica Vertical - SEV), foi possível distinguir diferentes tipos litológicos e obter sobre a profundidade do nível d'água do lençol freático, permitindo identificar os sentidos de fluxo locais.

Além destes, foram analisados dados pluviométricos e vazão da área durante o período de Janeiro de 2006 a Dezembro de 2008

### **4.3 Dados de entrada no *software***

A partir do modelo hidrogeológico conceitual estabelecido, foram feitos ajustes para sua tradução ao modelo matemático no ambiente do *software* a ser utilizado, bem como foram preparados os dados de entrada contendo informações referentes às propriedades hidráulicas e espaciais dos diferentes elementos do domínio a ser simulado.

#### **4.4 Simulações Numéricas de Fluxo**

A partir da definição do Modelo Conceitual foram determinadas as condições de contorno do Modelo Matemático, a configuração geral do mesmo, tais como o número de camadas e o número de elementos discretos do modelo. Deste modo, a partir da representação do Modelo Conceitual concebido no software Visual MODFLOW 3.1® foram realizadas simulações em regime permanente e posteriormente, sua calibração.

A calibração do modelo foi realizada por meio de adequações sucessivas nos parâmetros de entrada até a existência de uma relação satisfatória entre os valores de carga hidráulica mensuradas e vazões mensuradas e aquelas calculadas pela simulação.

### **5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

#### **5.1 Localização**

A área de estudo situa-se na porção nordeste do Estado de São Paulo, no Município de Santa Rita do Passa Quatro (Figura 6). Trata-se de uma sub-bacia de 423,7 ha, que faz parte da bacia hidrográfica do rio Moji- Guaçu (UGRHI 9). Encontra-se em uma região com ecossistema de eucalipto, localizada na Fazenda Cara Preta, com uma área de aproximadamente 735 km<sup>2</sup>. Localiza-se a aproximadamente 240 km da capital, sendo a Via Anhanguera a principal via de acesso.

#### **5.2 Geomorfologia**

A geomorfologia local é caracterizada por Cuestas Basálticas, que predominam sobre a Depressão Periférica (ALMEIDA, 1964). As Cuestas apresentam um relevo com escarpas abruptas de um lado e caimento suave do outro; litologicamente se constituem por arenitos das formações Botucatu e Pirambóia e por basaltos da Formação Serra Geral, formando escarpas com mais de 100 metros de desnível (MASSOLI, 1981). O reverso de cuesta é constituído por arenitos da Formação Botucatu, capeados por sedimentos cenozóicos da Formação Santa Rita do Passa Quatro, e se caracteriza por relevo baixo e uniforme.

A Depressão Periférica na área está representada pelos sedimentos da Formação Corumbataí, e apresenta altitudes variando entre 540 m a 760 m. Esta unidade

geomorfológica mostra-se bastante suave, constituindo elevações de pequenas dimensões, com encostas pouco inclinadas (MASSOLI, 1981).



Figura 6: Mapa de localização da área. A área circulado em vermelho corresponde ao local de estudo.

Os cursos de drenagens passam predominantemente pelos arenitos das formações Botucatu e Pirambóia, escavando vales profundos próximos às cabeceiras, dando lugar à sedimentação que geram planícies de inundação, quando próximos do nível de base, representado pelo rio Mogi-Guaçu (MASSOLI, 1981).

### 5.3 Vegetação e Clima

Segundo Massoli (1981), a vegetação constitui-se por cerrados principalmente, além de uma reserva florestal e pequenas áreas cobertas de matas naturais ao longo do Rio Mogi-Guaçu. A N-NW da Serra de São Simão, grandes áreas estão sendo reflorestadas através do plantio de eucaliptos.

De acordo com IBGE (2002), o clima da região encaixa-se na Zona de Clima Tropical Brasil Central, caracterizado como Clima Sub-Quente úmido, no qual as

temperaturas médias variam entre 16° e 18° em pelo menos um mês do ano. Além disso, apresenta três meses secos no ano. Dados históricos de pluviosidade do SIGRH (Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo), mostram que a estação chuvosa na área inicia-se em Setembro, perdurando até Março, com valores médios mensais entre 230 mm a 430 mm; enquanto que de Abril a Agosto os valores médios mensais situam-se entre 20 mm a 60 mm.

## 5.4 Geologia Regional

### 5.4.1 Origem e Evolução da Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná, na qual está inserida a área de estudo, localiza-se no continente sulamericano, ocupando uma área aproximada de 1.5 milhões de quilômetros quadrados na parte meridional do Brasil, estendendo-se também para Argentina, Paraguai e Uruguai. Possui formato alongado na direção NNE-SSW, tendo sua geometria definida pelos limites erosivos relacionados em grande parte à história geotectônica meso-cenozóica do continente (MILANI *et al.* 2007) (FIGURA 7).



Figura 7: Mapa de localização da Bacia do Paraná na América do Sul (Modificado de MILANI *et al.* 1994)

A implantação da Bacia do Paraná deu-se na forma de depressões alongadas na direção NE-SW, segundo a trama do substrato pré-cambriano. Seu registro magmático-sedimentar abrange rochas com idades que vão desde o Ordoviciano até o Cretáceo, sendo reconhecidas seis unidades de ampla escala ou Supersequências (MILANI *et al.* 2007), limitados por três discordâncias regionais expressivas. De acordo com Milani *et al.* (2007), estas sequências são: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo), e Bauru (Neocretáceo). Para este mesmo autor, as três primeiras supersequências relacionam-se a oscilações do nível do mar no Paleozóico, definindo ciclos transgressivo-regressivos, enquanto que as três últimas representam pacotes de sedimentos continentais com rochas ígneas associadas.

Na área de estudo são reconhecidas rochas sedimentares pertencentes às sequências Gondwana II e III, representadas pelas unidades litoestratigráficas dos Grupos Passa Dois e São Bento, no qual há a presença de rochas ígneas da Fm. Serra Geral.

A Formação Pirambóia é, para Caetano-Chang (1997), uma unidade composta por diferentes associações de fácies de duna, interduna e de lençóis de areia e fácies fluviais. Em relação às unidades inferiores, apresentam maior granulometria, com grãos subarredondados a arredondados. A erosão causada pela abrasão eólica que se seguiu no Mesozóico foi responsável pela formação de uma superfície sobre a qual se depositaram extensos campos de dunas (MILANI *et al.* 2007) da Formação Botucatu, constituída predominantemente por arenitos de granulação fina a média de alta esfericidade e bem selecionados; que por sua vez, foram sucedidas pelo magmatismo Serra Geral, marcando a ruptura do megacontinente Gondwana. A última sequência a ser depositada na Bacia do Paraná deu-se em condições semi-áridas, mais úmidas nas margens e desérticas no interior, representadas pelo Grupo Bauru.

#### **5.4.2 Sistema Aquífero Guarani (SAG)**

Das unidades descritas acima, as formações Pirambóia e Botucatu se destacam por constituírem um importante reservatório de águas, o Sistema Aquífero Guarani.

Localizado no Continente Sul-americano, o SAG foi definido como sendo constituído pelo conjunto de rochas sedimentares mesozóicas continentais clásticas que ocorrem nas bacias do Paraná e Chacoparanaense, limitado em sua base por uma discordância regional permo-eotriássica e, no topo, pelos derrames basálticos da

Formação Serra Geral. LEBAC (2008) considera espessuras de 200 a 800 m para esse pacote arenoso, com distribuição em uma área de 1.087.879,15 km<sup>2</sup> (LEBAC, 2008).

O mapa geológico simplificado do SAG, representado na Figura 8, apresenta sua abrangência na América Latina, uma vez que ocupa parte importante dos territórios da Argentina, Paraguai, Uruguai e Brasil.

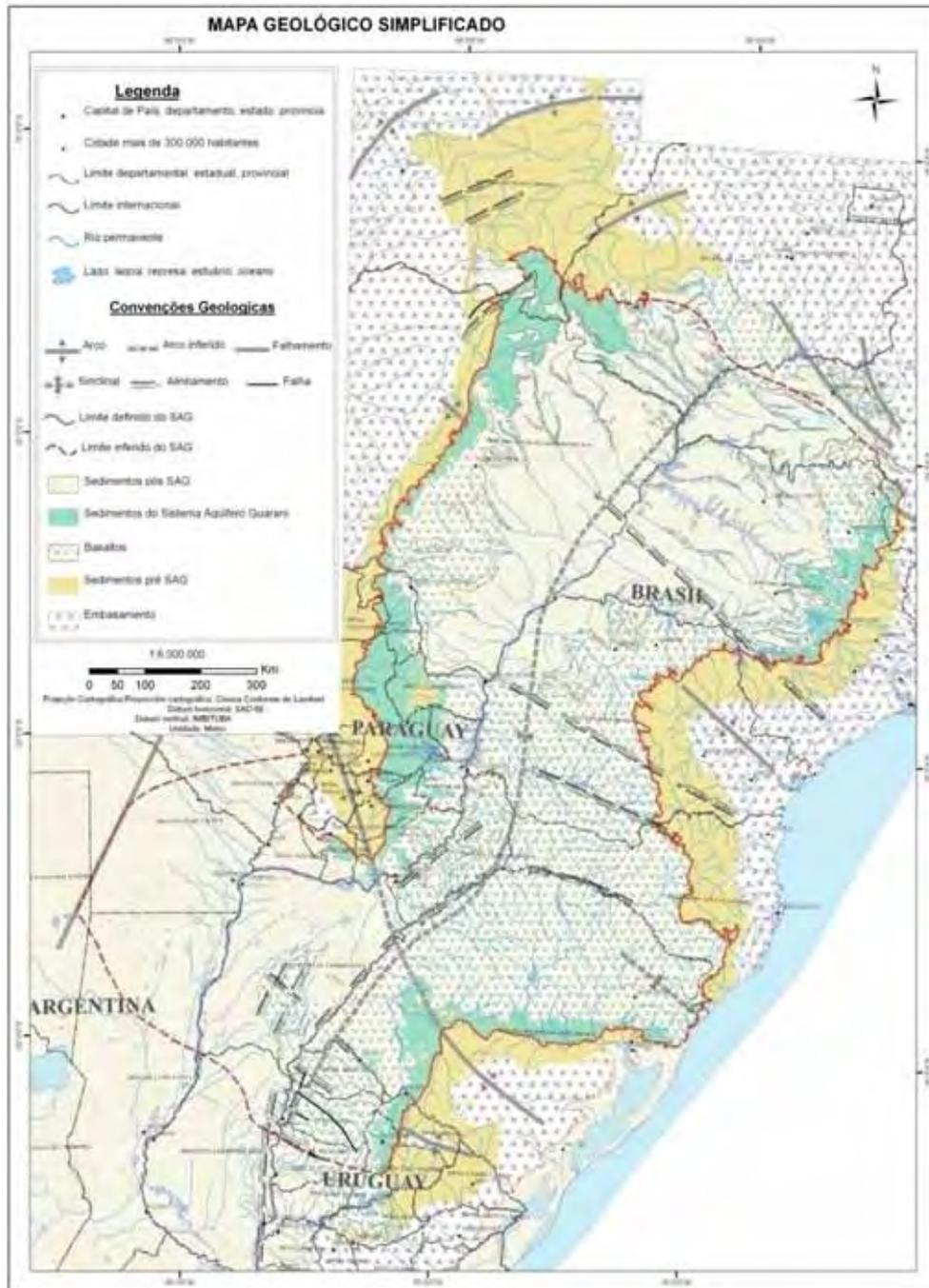


Figura 8: Mapa simplificado do Sistema Aquífero Guarani. Adaptado de LEBAC (2008).

Segundo LEBAC (2008), regionalmente, a partir das zonas de recarga até as áreas de descarga, o fluxo das águas subterrâneas do SAG apresenta um *trend* regional

que direciona o fluxo de norte para sul, acompanhando o eixo da Bacia do Paraná, a partir da confluência entre os estados de Paraná e Mato Grosso do Sul (BR) e o território paraguaio.

Este padrão de fluxo das águas subterrâneas do SAG é fortemente influenciado pelo quadro tectono-sedimentar da Bacia do Paraná e sua evolução, conforme já apontado por Araújo et al. (1995 e 1999), principalmente pelo Arco de Ponta Grossa que, segundo estes autores, divide o sistema aquífero em dois domínios potenciométricos.

O soerguimento proeminente da porção leste da bacia, em seu compartimento norte, possibilitou a erosão das sequências sedimentares e a formação de zonas de recarga para o aquífero, com fluxo radial a partir de pontos mais elevados.

As principais áreas de descarga das águas do SAG estão, da mesma maneira que a recarga, associadas às faixas de afloramento. Praticamente toda a borda oeste do SAG representa uma área de descarga importante, alimentando toda a rede de drenagem formadora da bacia do Rio Paraguai, até o Departamento de San Pedro, em território paraguaio (LEBAC, 2008).

No Estado de São Paulo, o SAG ocupa cerca de 60% do território (155.800 km<sup>2</sup>) e comparece confinado por derrames de rochas basálticas em 90% de sua área de ocorrência, o que lhe confere condições de artesianismo em 80% da área (PAULA E SILVA *et al.* 2008). A espessura do aquífero varia de aproximadamente 100 m na área aflorante, até mais de 400 m, a oeste, ao longo da calha do Rio Tietê.

Segundo DAEE (2005) a condutividade hidráulica (K) do Aquífero Guarani apresenta valores médios de 2,6 m/dia para a área confinada e 3,0 m/dia para a área livre, calculados a partir da média ponderada dos valores de K das Formações Pirambóia (2,5 m/dia) e Botucatu (3,5 m/dia). Do mesmo modo, o cálculo para o coeficiente de armazenamento apresenta um valor médio de 0,17 para as porções livres. Os valores de transmissividade variam de 260m<sup>2</sup>/dia na área aflorante a 1200 m<sup>2</sup>/dia ao longo do rio Tietê, na área confinada.

Em relação à qualidade química natural das águas, estas são classificadas como bicarbonatadas cálcicas na área aflorante; e na área confinada, bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas predominantemente, e sulfatadas-cloretadas sódicas subordinadamente. Os valores de temperatura vão de 22 a 27°C e apresentam pH de 5,4 a 9,2 na área aflorante, sendo que estes valores aumentam no sentido de confinamento (DAEE, 2005).

## 5.4 Geologia Local

O Município de Santa Rita do Passa Quatro está localizado em termos geológicos na borda leste da Bacia do Paraná, onde, segundo Massoli (1981), ocorrem as seguintes unidades: Formação Pirambóia, Formação Botucatu, Formação Serra Geral e sedimentos da Formação Santa Rita do Passa Quatro. A Figura 9 ilustra o mapa geológico com a localização da área de estudos.

A Formação Pirambóia apresenta arenitos de cores rosadas com estratificação cruzada de médio porte e granulação que varia entre as frações silte grosso e areia muito fina, esta última predominando. Observa-se no mapa que esta unidade aflora predominantemente na parte leste da área, relacionada à presença de drenagens.

A Formação Botucatu na região foi caracterizada por Massoli (1981) como arenitos de cores rosadas, avermelhadas e mais raramente amareladas, apresentando estratificação cruzada de porte médio a grande, tangencial na base. Sua granulação varia entre areias muito finas a médias, predominando as areias finas. Esta unidade aparece na parte norte da área do mapa, aflorando para NW e NE. É estimada uma espessura de até 80m para a Formação Botucatu.

Para este mesmo autor, a Formação Serra Geral, constituída por derrames basálticos, é representada por *sills* e diques de diabásio. Estes derrames são responsáveis pela sustentação das serras presentes na região. Seu contato com as formações Botucatu e Pirambóia encontra-se normalmente encoberto por colúvio. Possuem em média 80m de espessura, podendo apresentar espessuras maiores em alguns locais, chegando a atingir 120m.

Ainda segundo Massoli (1981), a Formação Santa Rita do Passa Quatro consiste em sedimentos arenosos sem estrutura, de pouca espessura (de poucos centímetros a alguns metros) e de ampla distribuição horizontal. Estes sedimentos capeiam tanto a Formação Botucatu, como a Formação Pirambóia e a Formação Serra Geral. Já os sedimentos quaternários ocorrem formando depósitos aluviais arenosos ou argilosos, junto aos principais cursos d'água na área, como os rios Mogi- Guaçu e Bebedouro.

# Mapa Geológico - Folha Luis Antônio

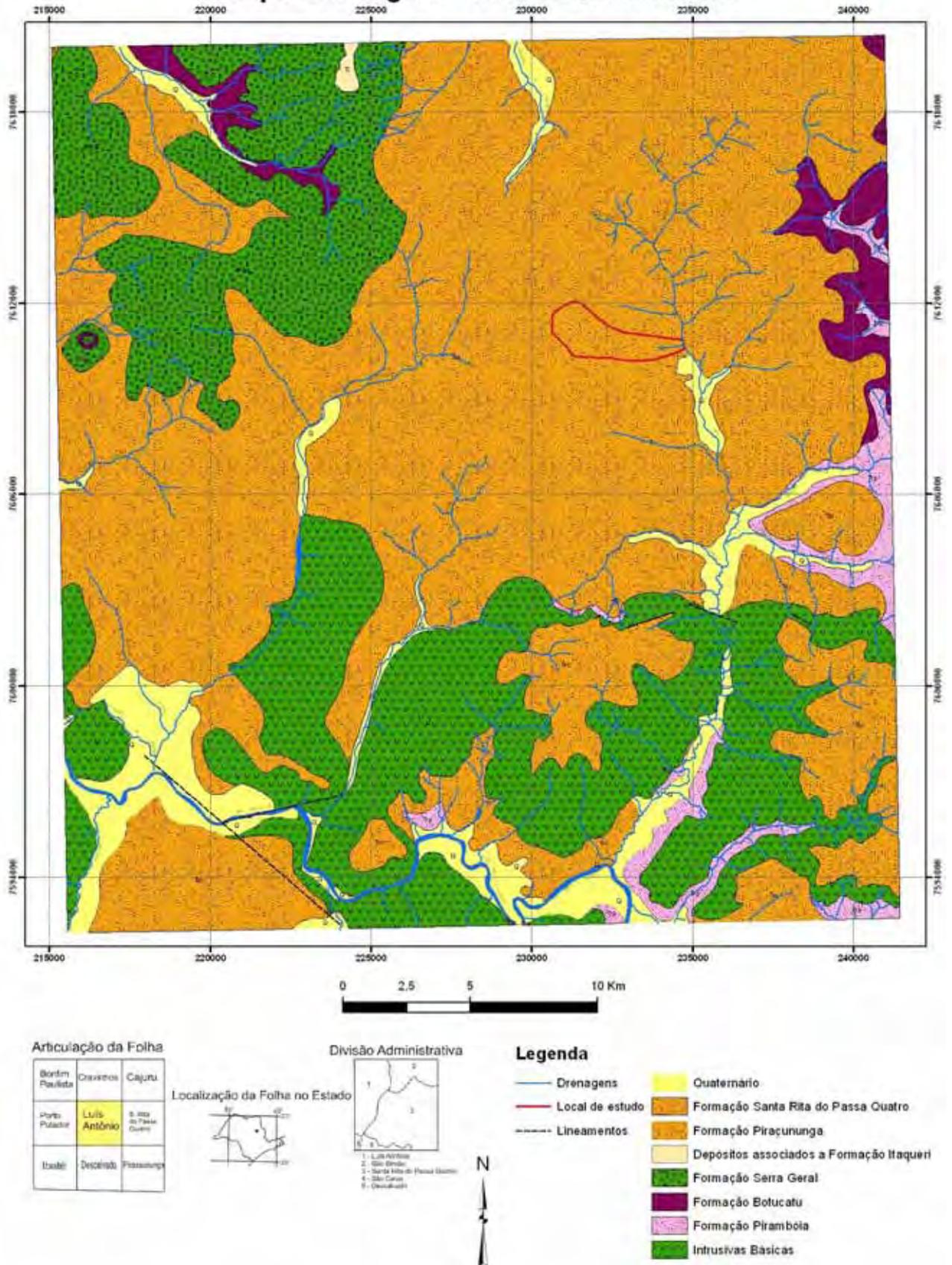


Figura 9: Mapa geológico da região estudada, com a área de estudos circulado em vermelho.

Adaptado de Instituto Geológico, IG – 1986.

## 6. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA LOCAL

A sub-bacia estudada apresenta aproximadamente 4 km<sup>2</sup>, onde observa-se a existência de um dreno que deságua no Rio Bebedouro. Os topografia varia entre as cotas 780 m a 600 m, sendo que as cotas mais altas encontram-se a leste e diminuem em direção ao rio, à oeste. O uso do solo no local é caracterizado por um agrossistema de eucaliptos.

Para o entendimento das características hidrogeológicas locais foram utilizadas informações presentes em estudos realizados anteriormente na área por Romualdo (2006). As informações presentes no trabalho do referido autor são provenientes da perfuração de poços tubulares, ensaios geofísicos (método da eletroresistividade), e caracterização petrográfica. Adicionalmente, a aquisição de informações referentes ao monitoramento pluviométrico e fluviométrico disponíveis na área, permitiu esboçar a dinâmica de fluxo local. A Figura 10 ilustra a caracterização geral do local de estudo, com a configuração da bacia e a localização dos poços CP-1 e CP-1 e dos ensaios geofísicos realizados anteriormente.

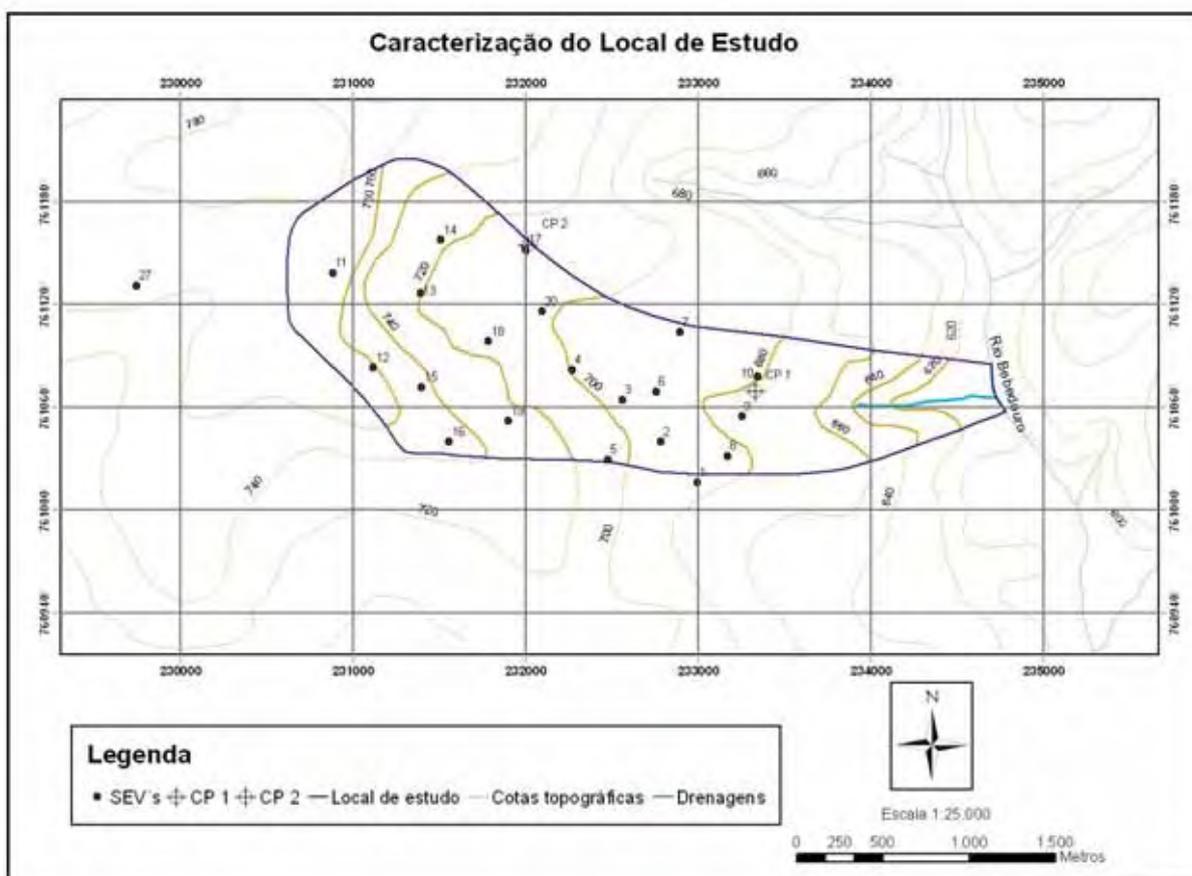


Figura 10: Caracterização geral da área de estudo.

## 6.1 Geologia Local

Localmente, as unidades geológicas presentes são Formação Serra Geral, Formação Pirambóia e Formação Santa Rita do Passa Quatro.

A Formação Serra Geral não é aflorante na área, porém sua existência é verificada através de ensaios geofísicos, a aproximadamente 110 metros de profundidade.

A Formação Pirambóia situa-se, localmente, na região de menores cotas topográficas, onde as declividades são mais acentuadas. Já a Formação Santa Rita do Passa Quatro, localizada a Norte e Nordeste da área, situa-se a cotas mais elevadas, com baixa declividade. A Figura 11 ilustra o mapa fotolitológico da área, interpretado por Romualdo (2006).

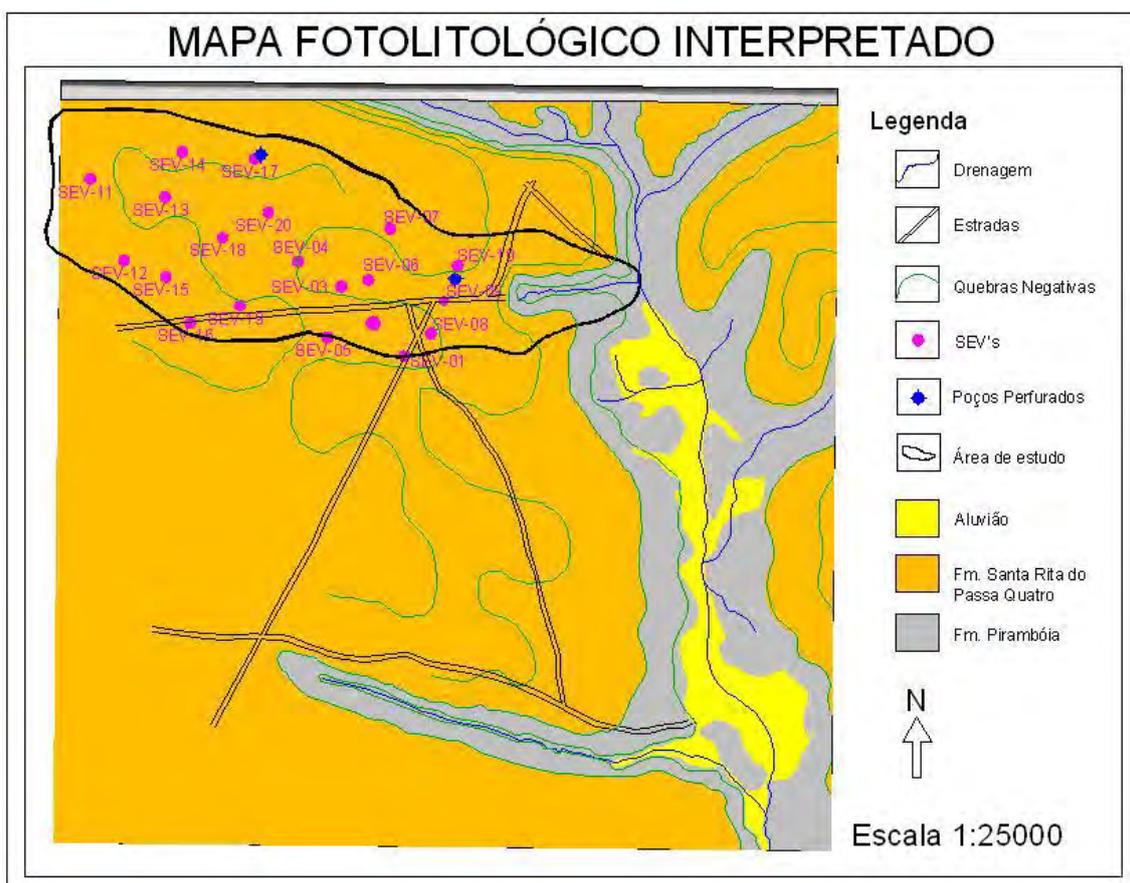


Figura 11: Mapa Fotolitológico da área de estudo (ROMUALDO, 2006).

As amostras de calha obtidas durante a perfuração de poços de monitoramento (CP-1 e CP-2) foram analisadas por Romualdo (2006), classificando-as em sua maioria como arenitos finos a médios, com níveis conglomeráticos, como é possível observar nas Figuras 12 e 13. Foram então elaborados perfis dos poços, ilustrados na Figura 14.

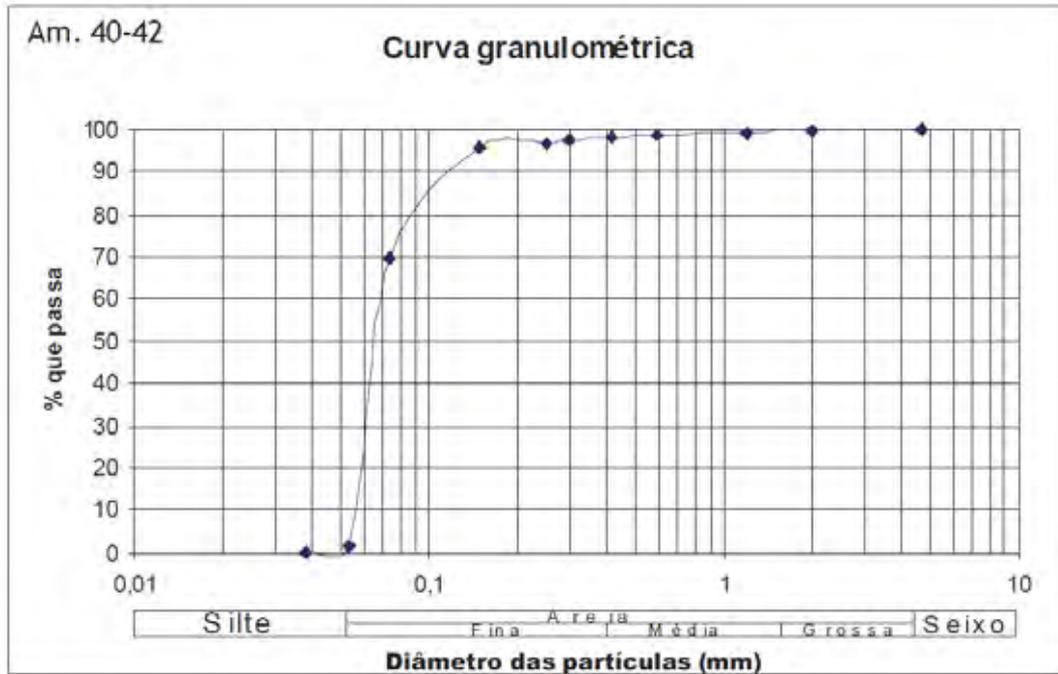


Figura 12: Curva Granulométrica – porção predominante Areia Fina (ROMUALDO, 2006).

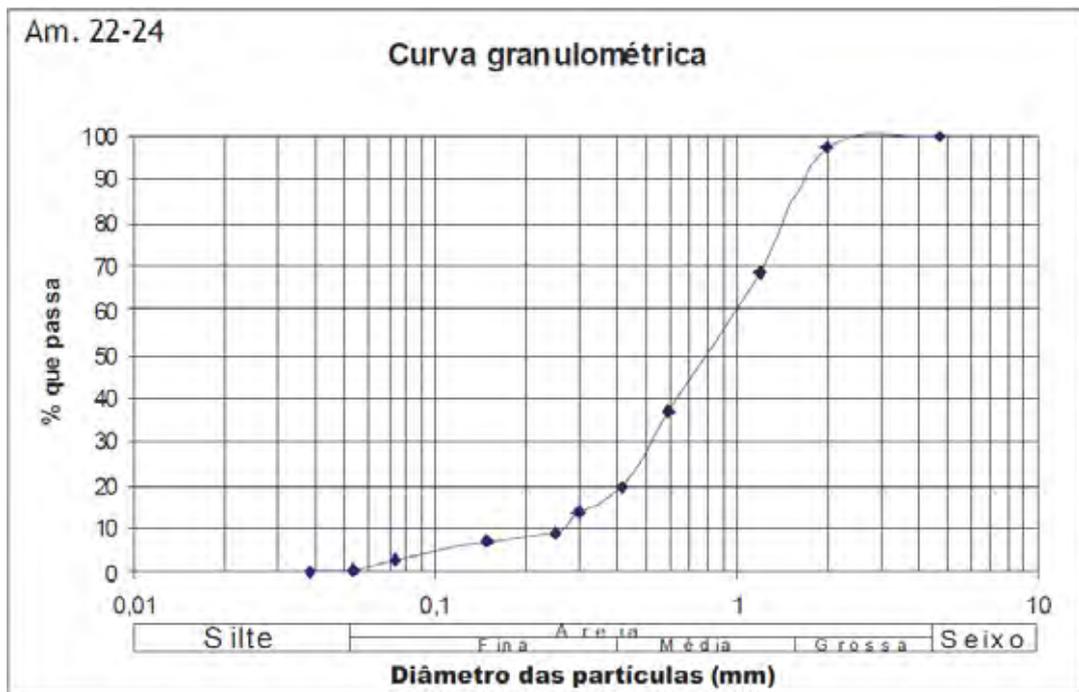


Figura 13: Curva Granulométrica – porção predominante Areia Média (ROMUALDO, 2006).

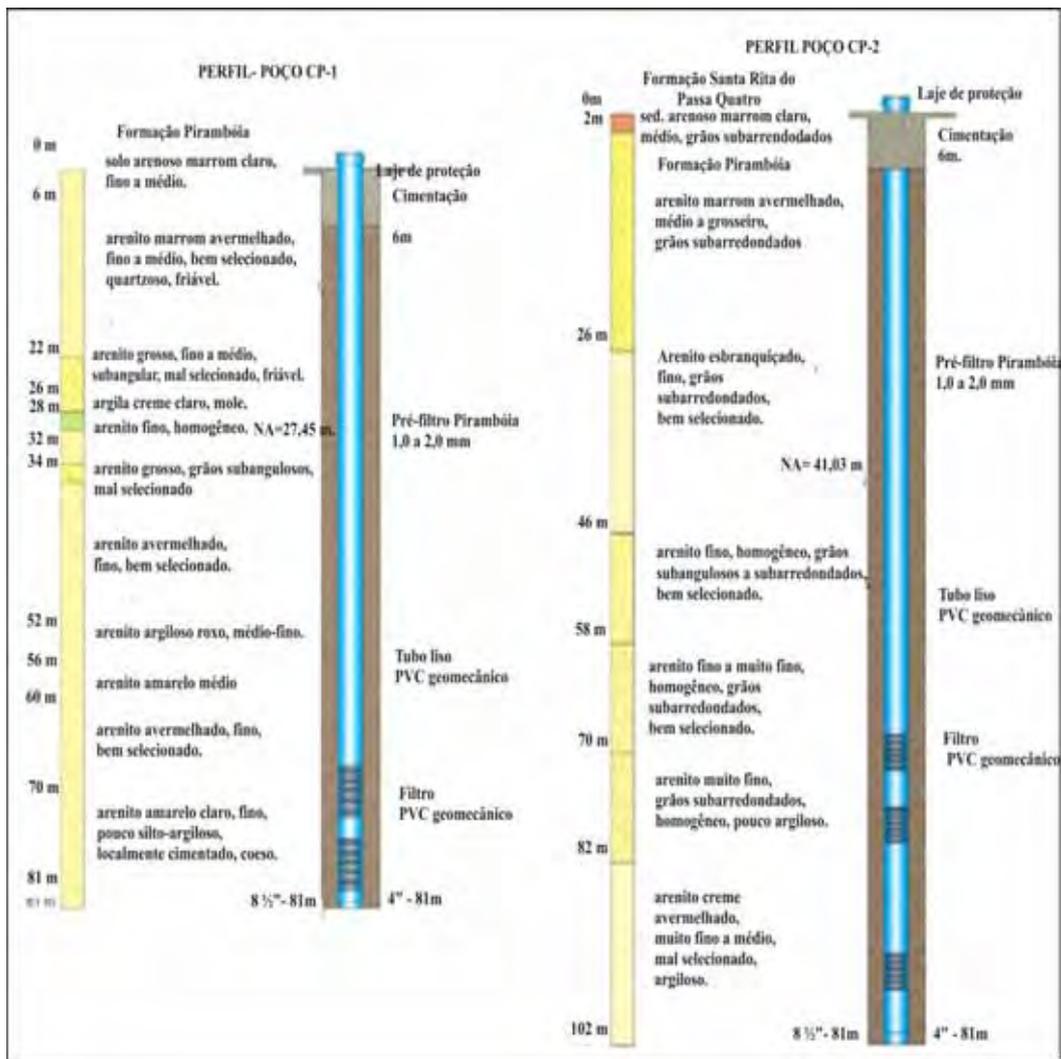


Figura 14: Descrição das amostras de calha obtidas durante a perfuração dos poços de monitoramento CP-1 e CP-2 (ROMUALDO, 2006).

## 6.2 Superfície Potenciométrica

Através de ensaios geofísicos (Sondagem Elétrica Vertical – SEV), foram obtidas as profundidades do nível de água do lençol freático em cada SEV. Assim, observou-se que, em geral, o fluxo de água subterrânea correlaciona-se com a topografia, orientado a partir das cotas altas (NW e SW) para as cotas baixas (SE), em direção ao Rio Bebedouro. A superfície do lençol freático situa-se entre as cotas 630,4 m e 692,7 m.

A figura 15 ilustra o Mapa Potenciométrico elaborado a partir integração dos dados de Romualdo (2006) – SEV’s de número 1 a 20-, Sato (2007) – SEV 27- e valores de nível da água nos rios (Tabela 1), identificados em locais onde as drenagens

interceptam cotas topográficas. Os tons mais escuros no mapa representam as maiores profundidades do nível d'água.

Tabela 1. Modificada de Romualdo (2006) e Sato (2007).

SEV	Leste(km)	Norte (km)	Altitude (m)	Prof NA (m)	Cota NA (m)
1	232993	7610159	670,997	26,520	644,477
2	232779	7610397	674,527	25,390	649,137
3	232561	7610641	676,513	25,060	651,453
4	232268	7610816	682,718	30,950	651,768
5	232474	7610293	687,705	32,490	655,215
6	232757	7610690	672,185	23,190	648,995
7	232891	7611035	677,590	29,490	648,100
8	233167	7610314	661,271	30,720	630,551
9	233251	7610545	659,048	28,550	630,498
10	233343	7610775	666,321	28,280	638,041
11	230882	7611383	744,821	52,060	692,761
12	231115	7610829	738,743	56,770	681,973
13	231389	7611263	705,724	58,680	647,044
14	231508	7611575	706,833	42,020	664,813
15	231396	7610716	724,142	53,100	671,042
16	231557	7610397	730,392	59,113	671,279
17	231998	7611519	701,740	41,510	660,230
18	231784	7610984	699,346	57,790	641,556
19	231900	7610519	707,162	58,560	648,602
20	232092	7611157	696,631	56,770	639,861
27	229744	7611308	753,640	78,410	675,230
Rio	234096	7610606	620,000		620,000
Rio	234893	7610418	600,000		600,000
Rio	235327	7610312	600,000		600,000
Rio	234343	7611662	620,000		620,000
Rio	233714	7611703	640,000		640,000
Rio	232851	7611916	660,000		660,000

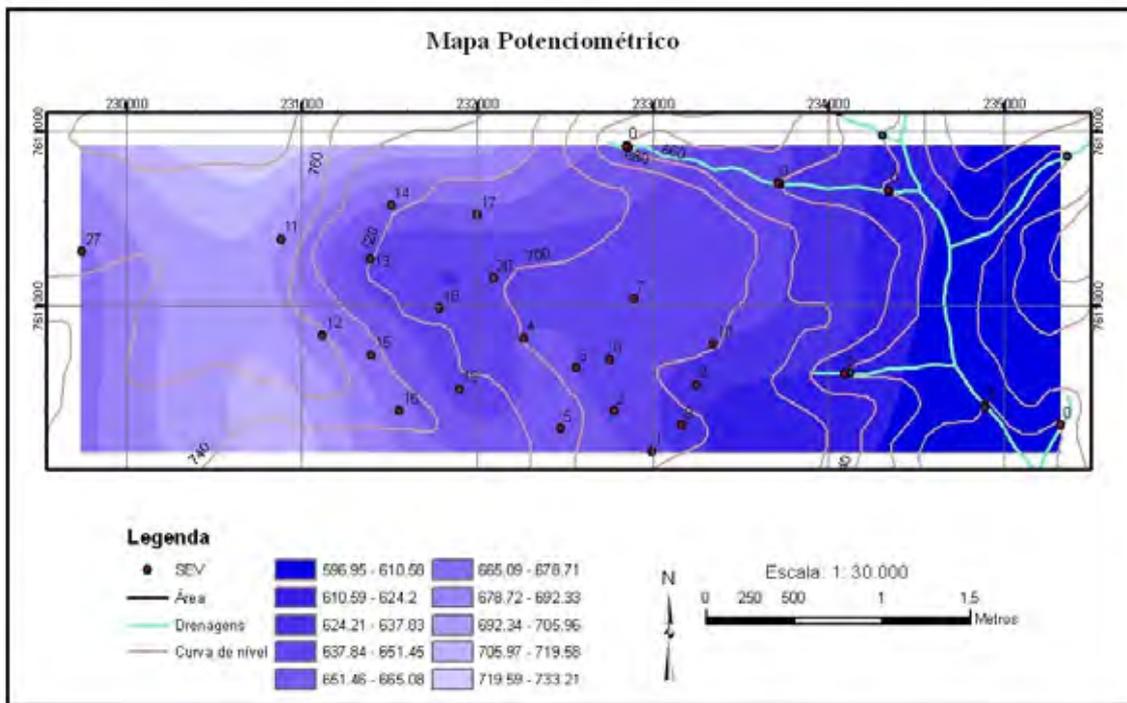


Figura 15: Mapa Potenciométrico da área.

### 6.3 Eletrofácies

A área é caracterizada por Romualdo (2006) por quatro eletrofácies principais. Num primeiro nível, apresentando resistividade média a alta, estão os sedimentos arenosos da Formação Santa Rita do Passa Quatro. O segundo nível apresenta resistividade alta, e corresponde a possíveis níveis de cascalhos e sedimentos arenosos grosseiros da Formação Pirambóia. É importante ressaltar que o nível d'água subterrâneo encontra-se após este nível de cascalhos, indicando que o aquífero é representado por sedimentos da Formação Pirambóia. Após este nível, a resistividade diminui novamente, indicando a presença de sedimentos mais finos, saturados. O quarto nível identificado apresenta elevada resistividade, e relaciona-se à presença de rochas intrusivas básicas. A Figura 16 representa um perfil geoeletrico e a Figura 17, uma seção geoeletrica cortando a área na direção NW-SE a partir da direção da drenagem, confeccionados por Romualdo (2006).

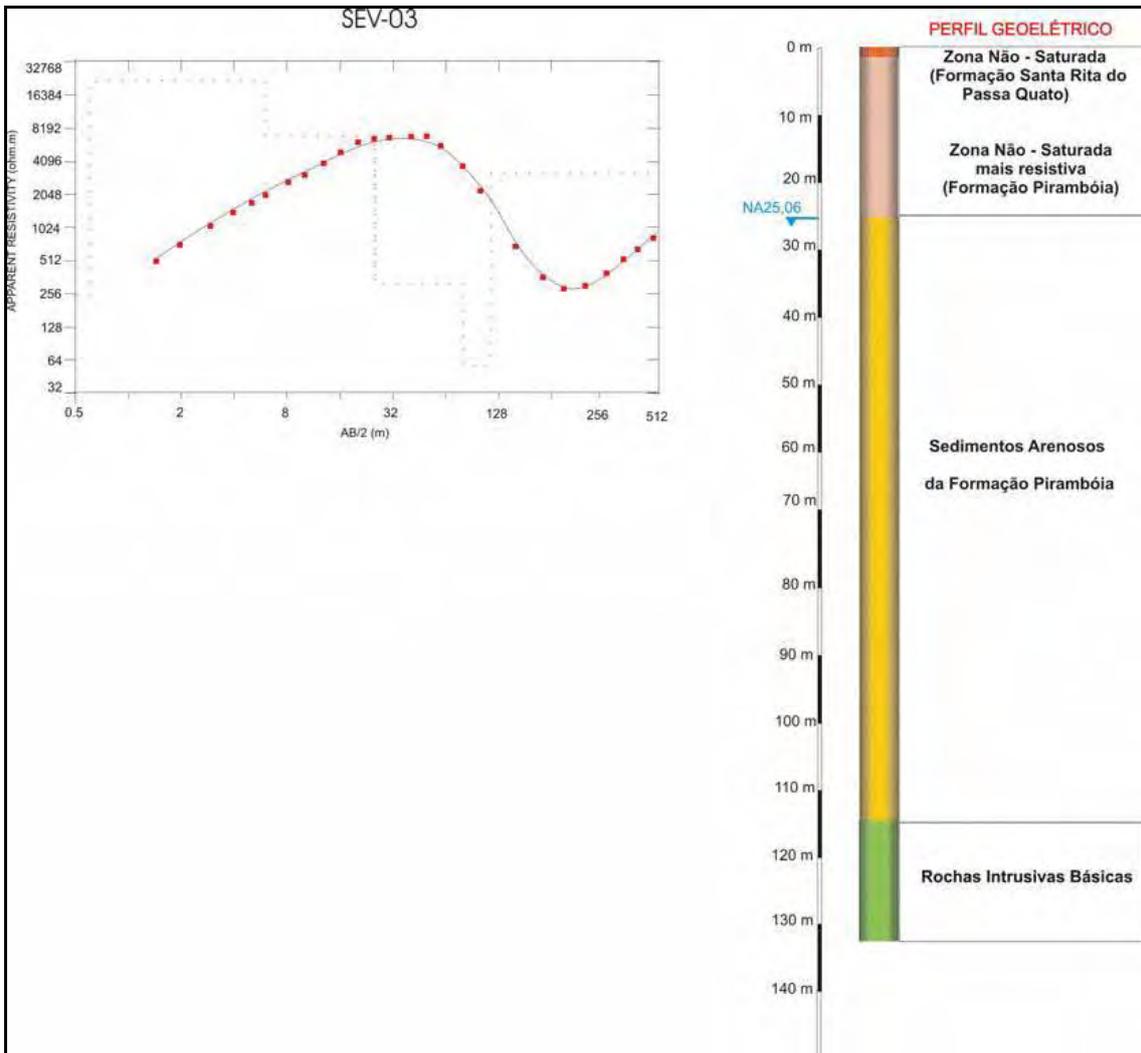


Figura 16: Perfil Geométrico (ROMUALDO, 2006).

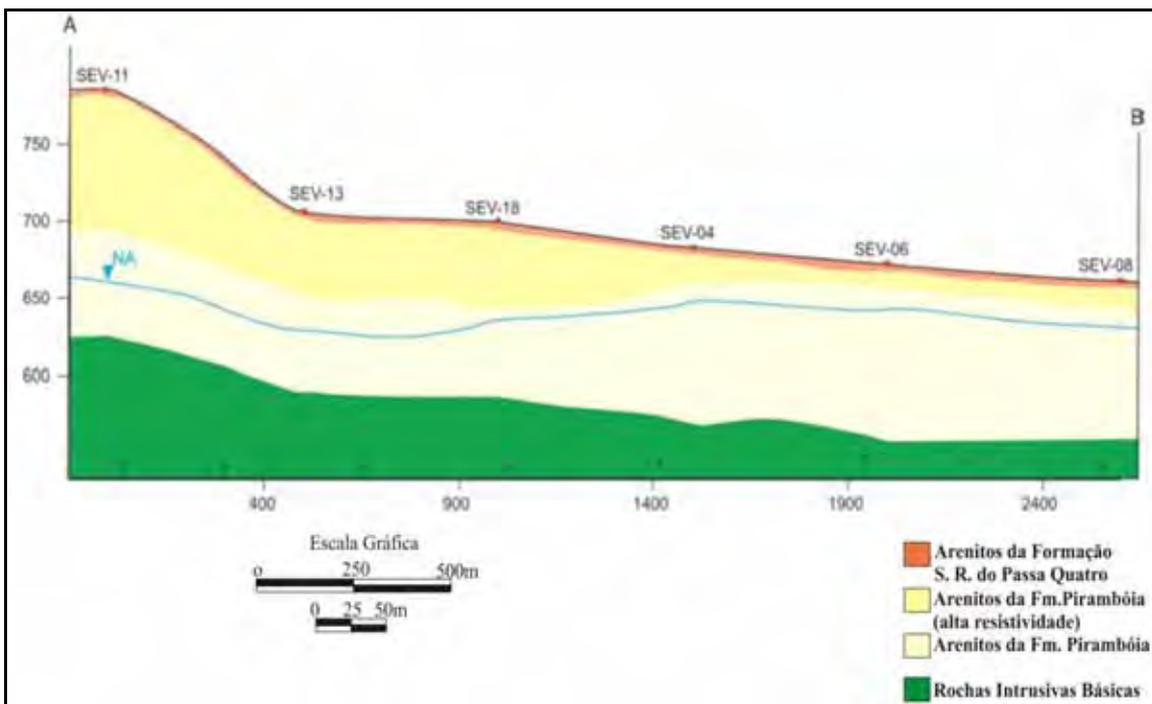


Figura 17: Seção Geométrica (ROMUALDO, 2006).

## 6.4 Condutividade Hidráulica

Por meio da interpretação de ensaios de bombeamento efetuados nos poços perfurados na área de estudo por Romualdo (2006), foram obtidos os valores de  $9,21 \cdot 10^{-5}$  cm/s para o poço CP-1 e  $1,39 \cdot 10^{-4}$  cm/s para o poço CP-2.

## 6.5 Dados Pluviométricos e Fluviométricos

A avaliação da quantidade de precipitação representa uma informação importante para as simulações numéricas de fluxo de água subterrânea, uma vez que a sua avaliação permite inferir a quantidade de recarga proveniente diretamente da chuva, reguladoras do fluxo de água subterrânea. Dados da quantidade de precipitação na bacia do Rio Mogi-Guaçu nos anos de 1939 a 1971 na cidade de Américo Brasiliense (SIGRH) indicam que os valores médios de precipitação durante o ano encontram-se em torno dos 105 mm, considerando que os períodos de maior precipitação iniciam-se nos meses de Setembro e Outubro e perduram até o mês de Março. A Figura 18 ilustra o gráfico com os valores anuais de precipitação durante este período.



Figura 18: Valores anuais médios de precipitação na bacia do Rio Mogi-Guaçu de 1939 a 1971 (SIGRH).

Foram recuperados dados pluviométricos diários e vazão do rio Bebedouro, em uma estação pluviométrica local, dos anos de 2006, 2007 e 2008. Nos meses com maior intensidade de chuvas, os valores médios diários de precipitação atingem valores pontuais acima dos 140 mm. Já nos meses de seca, os valores diários de precipitação são, em média, de 20 mm. Na figura 19 é possível observar a diferença na ocorrência e

volume das chuvas entre Março, considerado como o fim da estação chuvosa e maio, quando se inicial o período de seca.

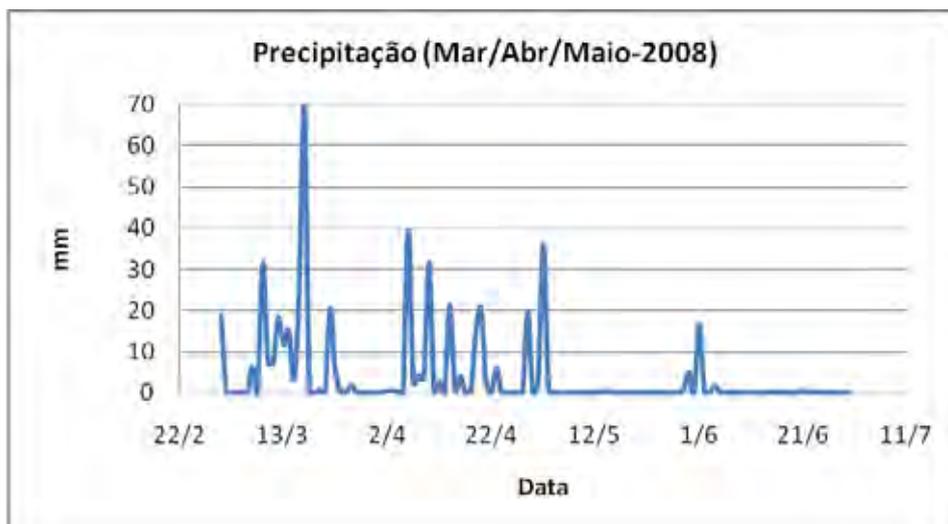


Figura 19: Precipitação nos meses de Março, Abril e Maio de 2008.

Em geral, os valores de vazão no rio acompanham as variações na quantidade de precipitação. Observa-se um aumento na vazão do rio de imediato quando há ocorrência de chuva, como é possível perceber no gráfico da Figura 20.

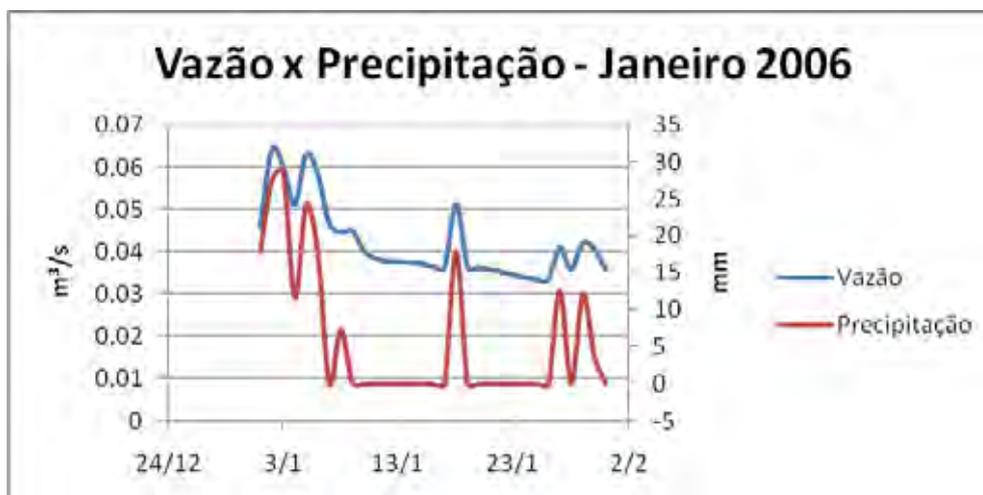


Figura 20: Vazão e Precipitação na área durante o mês de Janeiro de 2006.

Assim como a vazão, a profundidade no nível d'água no lençol freático também sofre variação conforme os níveis pluviométricos. Neste caso, é preciso considerar que existe um atraso de tempo entre o evento de chuva e a infiltração da água no aquífero, o que faz com que a variação do nível do lençol freático não seja imediata, como no caso da vazão. Esta relação pode ser observada nos gráficos da Figura 21 (para o poço CP-1) e Figura 22 (para o poço CP-2).

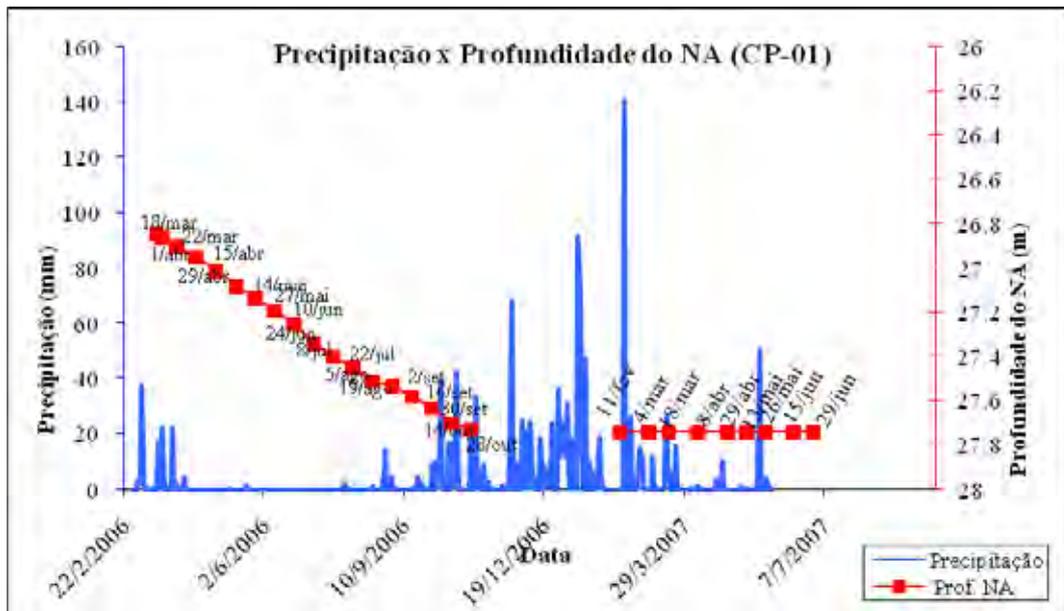


Figura 21: Gráfico de Precipitação x Profundidade do Nível d'água no Poço 1.

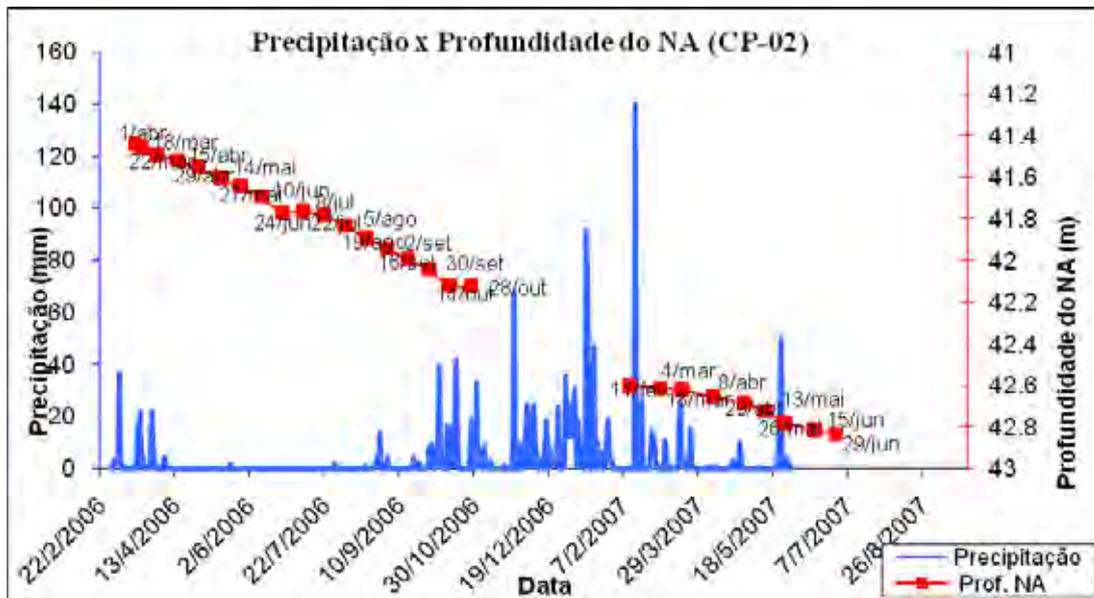


Figura 22: Gráfico de Precipitação x Profundidade do Nível d'água no Poço 2.

## 7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO

### 7.1 Modelo Conceitual

A partir da caracterização hidrogeológica da área, estabeleceu-se um modelo conceitual para a área a ser simulada.

O perfil geométrico apresentado por Romualdo (2006) divide a área em quatro eletrofácies diferentes, sendo que a segunda camada apresenta resistividade alta, e

corresponde a possíveis níveis de cascalhos e sedimentos arenosos grosseiros da Formação Pirambóia, ainda insaturados. O nível d'água subterrâneo encontra-se após este nível de cascalhos, indicando que o aquífero é representado por sedimentos da Formação Pirambóia

A camada aquífera apresenta espessura que varia entre 54,22 m a 92,51 m e o nível d'água encontra-se entre 56,77 e 26,52 m de profundidade, com fluxo das águas subterrâneas orientado a partir das cotas altas (regiões Noroeste e Sudoeste) para as cotas baixas (região Sudeste). O alto potenciométrico localizado nas regiões Noroeste e Sudoeste direciona o fluxo regional para Sudeste em direção ao Rio Bebedouro. Trata-se de um aquífero livre, que apresenta conexão com a rede de drenagem presente na área.

A base impermeável do aquífero no local é representada por rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral, entre 117,9 m e 101,66 m de profundidade.

Os valores de condutividade hidráulica utilizados inicialmente foram aqueles oferecidos por Romualdo (2006) por meio da interpretação de ensaios de bombeamento efetuados nos poços perfurados na área. Assim, foram estabelecidas duas zonas diferentes de condutividade hidráulica, a primeira correspondente ao poço CP-2, com  $1,39 \cdot 10^{-4}$  cm/s e a segunda, ao poço 1, de  $9,21 \cdot 10^{-5}$  cm/s. A diferença entre os valores de condutividade hidráulica também foi balizada pela descrição de Romualdo (2006) sobre distribuição das unidades geológicas em superfície, apresentadas no mapa Fotolitológico da Figura 11, no qual observa-se que a Formação Pirambóia aflora somente nos arredores da drenagem, enquanto que o restante da área é capeada pelos sedimentos da Formação Santa Rita do Passa Quatro.

Foram também adotadas diferentes zonas para delimitação das taxas de recarga na área, obedecendo as cotas topográficas. Os valores estipulados inicialmente para as zonas foram obtidos a partir dos dados pluviométricos diários dos anos de 2006 a 2008, apresentados anteriormente, e os valores finais foram obtidos após as simulações.

## 7.2 Condições de Contorno

Devido à existência de um rio limitando a porção leste da área, foram estabelecidos dois tipos de condição de contorno para a mesma.

Enquanto o rio consiste em uma condição de *carga hidráulica especificada* (Condição de Dirichlet), o restante da área foi limitada pela condição de *fluxo nulo*

(Condição de Newmann) como um contorno impermeável, ou seja, onde inexistente fluxo transversal ao contorno.

A linha laranja, juntamente com a porção do rio limitada por esta, ilustram a delimitação da área simulada a partir das condições de contorno, na Figura 23.

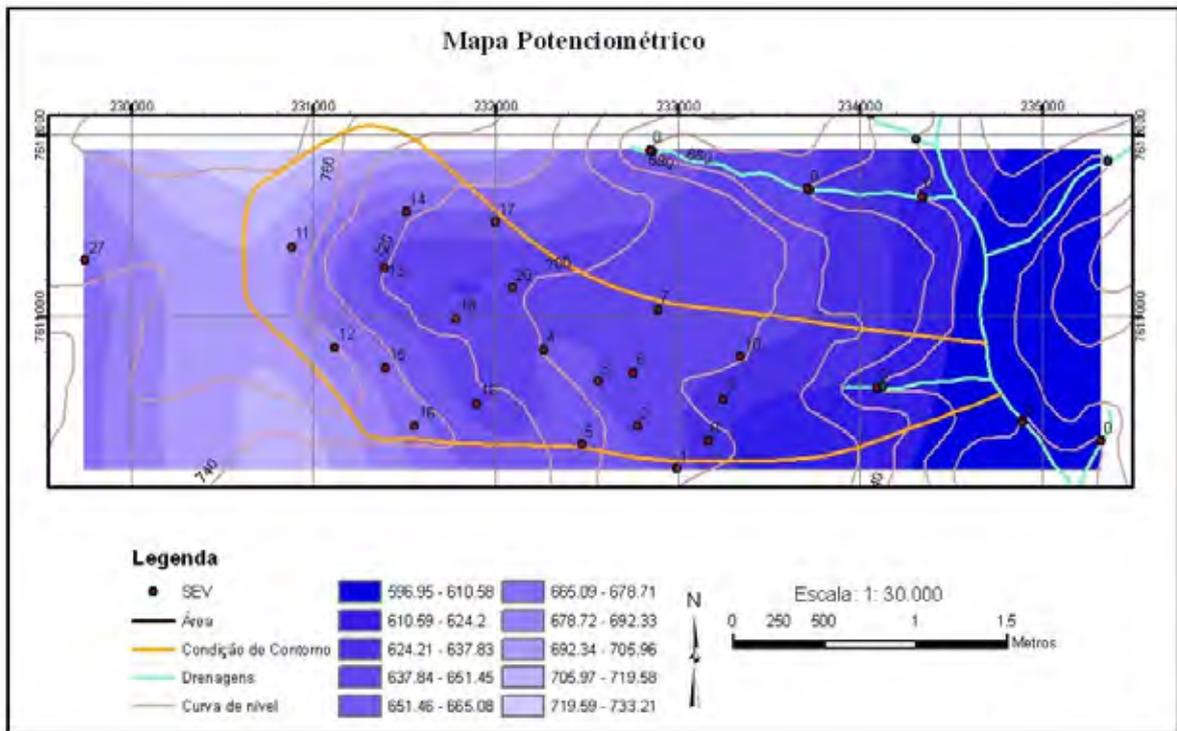


Figura 23: Condições de contorno impostas para a área.

### 7.3 Configurações do Domínio Simulado

A área simulada possui aproximadamente 4 km<sup>2</sup>, e foi discretizada em 2 camadas, como forma de representação de possíveis heterogeneidades litológicas. A área foi dividida em 200 linhas e 200 colunas, com espaçamento regular entre elas. As linhas apresentam 9,79 m entre si, e as colunas, 21,37 m. O total de células ativas é de 64.395 para as duas camadas.

Também foram representados na área os 2 poços de observação (CP-1 e CP-2). A configuração adotada para o modelo está representada na Figura 24.

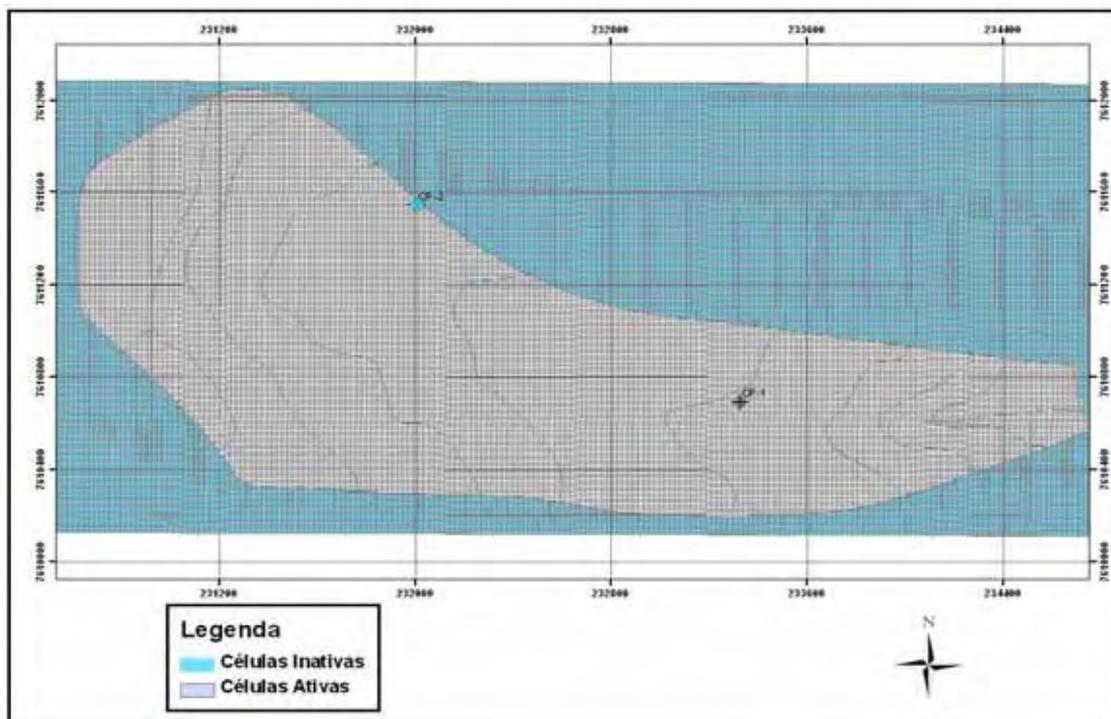


Figura 24: Configuração da área simulada com a malha de diferenças finitas de espaçamento regular.

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 8.1 Distribuição de Valores de Condutividade Hidráulica e Recarga

Como já explicitado anteriormente no modelo conceitual, foram estipuladas inicialmente duas zonas de diferentes condutividade hidráulica. A zonas foram delimitadas espacialmente de forma que acompanhassem as linhas de fluxo de carga hidráulica.

Após simulações em condição de regime permanente (*steady state*), foram determinados valores de condutividade hidráulica de  $1,55 \times 10^{-7}$  m/s para a primeira zona, enquanto que a segunda, mais próxima ao rio, apresenta condutividade de  $2,2 \times 10^{-6}$  m/s. Estes valores representam as condutividades hidráulicas na direção vertical, e são 10 vezes menores que os valores da direções horizontais, equivalentes entre si.

Na Figura 25 observa-se as duas zonas estabelecidas para o modelo.

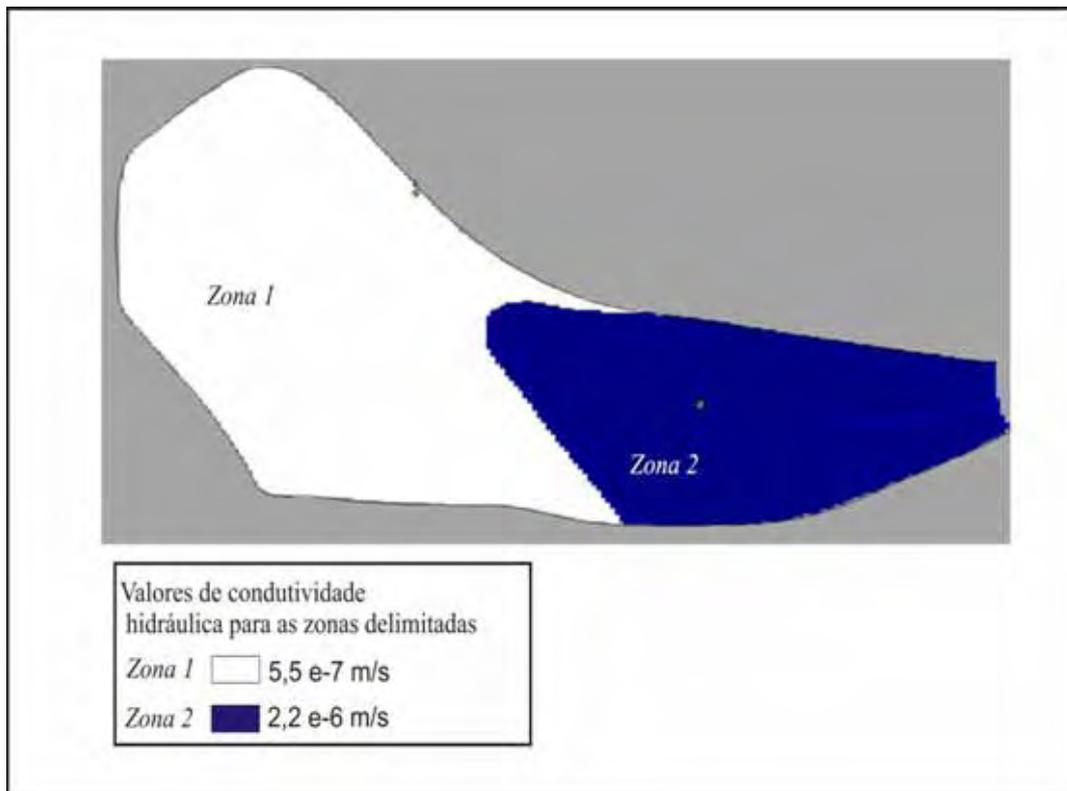


Figura 25: Distribuição dos valores de condutividade hidráulica obtidos.

Assim como os valores de condutividade hidráulica, foram estabelecidas zonas de diferentes valores de recarga por precipitação. Neste caso, foram estipuladas quatro zonas diferentes, e os valores para cada uma delas foram obtidos através das simulações.

Deste modo, é possível observar na Figura 26 as diferentes zonas, distinguidas pelas cores azul claro, azul escuro, verde e branco, e suas respectivas taxas de precipitação. Observa-se que os valores decrescem conforme a topografia, variando de 200 mm nas cotas mais altas a 180 mm nas cotas inferiores, próximas ao rio.

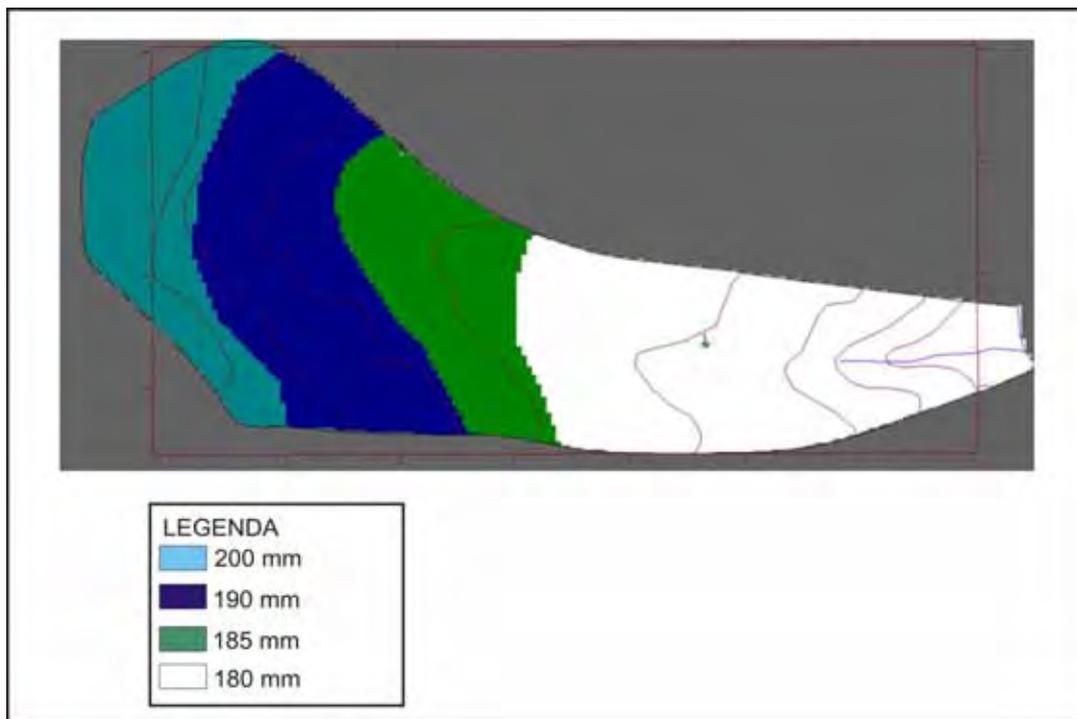


Figura 26: Distribuição dos valores de recarga por precipitação com melhor resposta na simulação.

## 8.2 Balanço de Fluxo

Um dos critérios de calibração do modelo foi o valor de descarga no ponto de saída da bacia, utilizando-se o valor de fluxo de base de 1175 m<sup>3</sup>/dia, obtido através dos dados de vazão estudados. Com o resultado final das simulações, atingiu-se o valor de 1178 m<sup>3</sup>/ dia, considerado como satisfatório.

A somatória de entrada de água na bacia é de 2085, 154 m<sup>3</sup>/dia, que corresponde à recarga por precipitação (2045,632 m<sup>3</sup>/dia) e uma pequena participação de recarga pela drenagem (39,52 m<sup>3</sup>/dia). O valor total de saída do modelo é de 2111, 648 m<sup>3</sup>/dia, que consiste na saída de água tanto da drenagem como do rio. O Gráfico da Figura 27 representa o balanço hidráulico do modelo.

Admitindo-se um valor de  $S_s$  (coeficiente de armazenamento) de 0,20, o volume total de água estimado no aquífero no interior da bacia é de 44976522,8 m<sup>3</sup>. Deste modo, o volume de água que circula por fluxo local representa 0,05% do montante total de água presente na bacia.

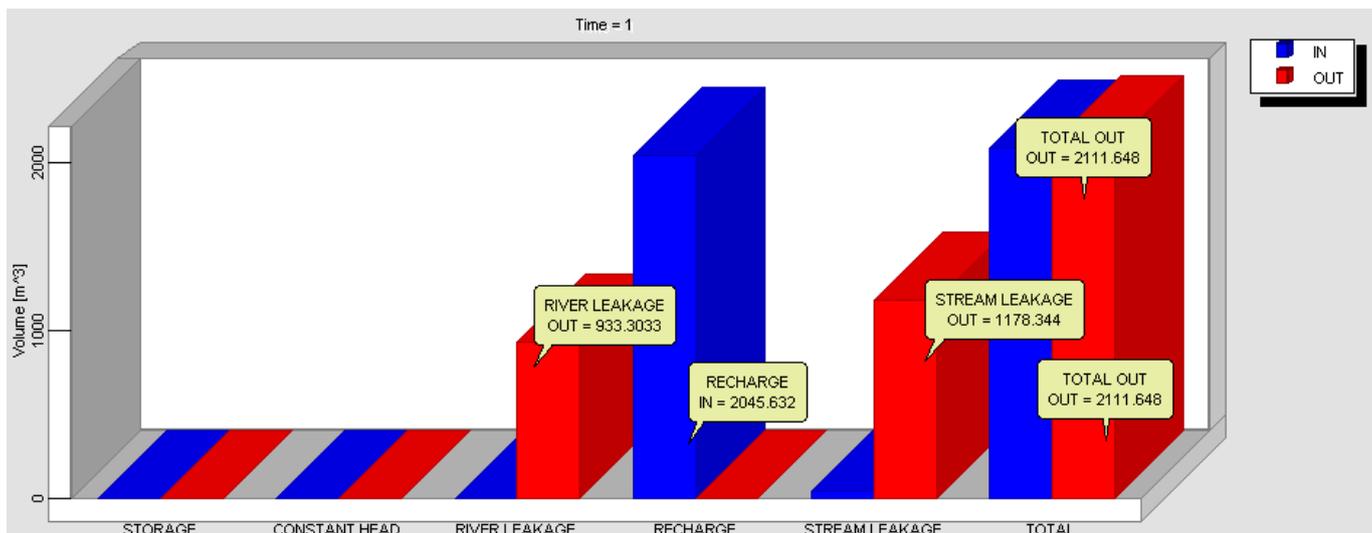


Figura 27: Balanço Hidráulico do modelo.

### 8.3 Correlação entre os Valores de Carga Hidráulica

O segundo critério de calibração utilizado foi a verificação dos valores de carga hidráulica reais e os calculados para o modelo. A tabela seguinte mostra os valores reais de carga dos poços e aqueles obtidos pelas simulações.

Tabela 2: Valores de Carga Hidráulica para os poços CP-1 e CP-2

POÇO	Carga Hidráulica Observada (m)	Carga Hidráulica Calculada (m)
CP-1	652,55	652,65
CP-2	678,97	679,93

### 8.4 Potenciometria Gerada pela Simulação

A Figura 28 ilustra a distribuição de carga hidráulica na primeira camada, gerada pela simulação.

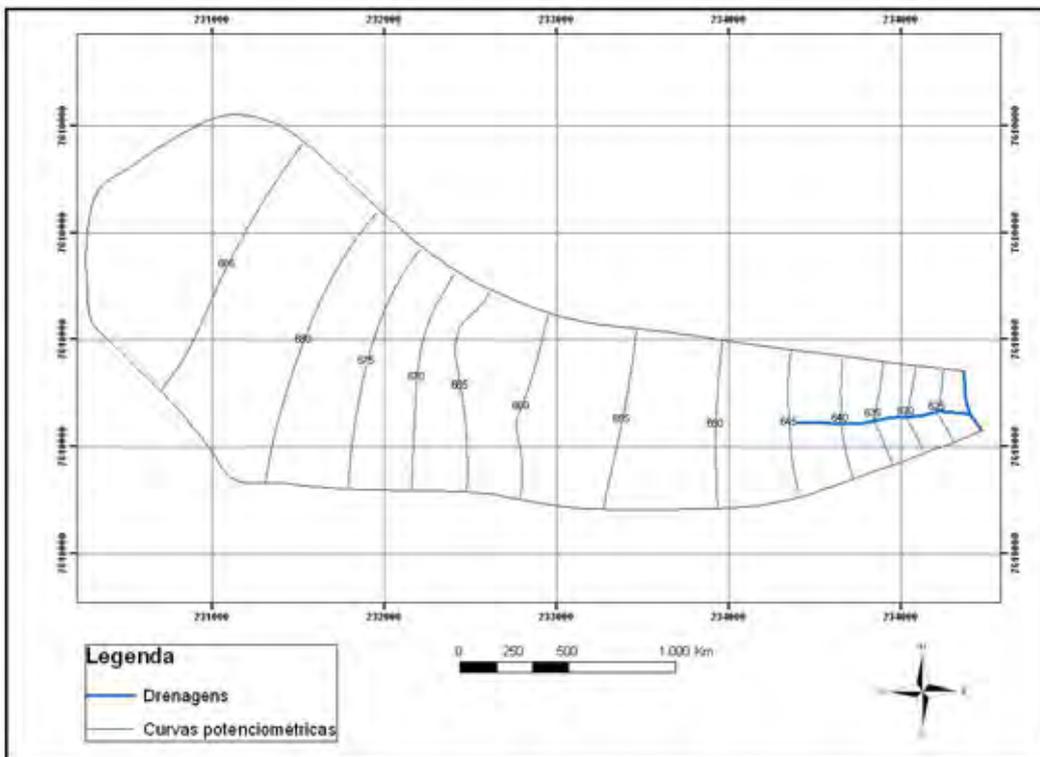


Figura 28: Mapa Potenciométrico gerado pela simulação.

Para melhor ilustração da configuração final do modelo obtido pelas simulações, é possível visualizá-lo em três dimensões. A Figura 29 mostra a configuração obtida como resultado das simulações, na qual observa-se as curvas potencimétricas calculadas (linhas brancas), a superfície potencimétrica (em azul claro), as duas camadas litológicas diferenciadas (separadas pela superfície em azul escuro), a base impermeável do aquífero (em verde) e os poços de monitoramento CP-1 e CP-2 (em vermelho).

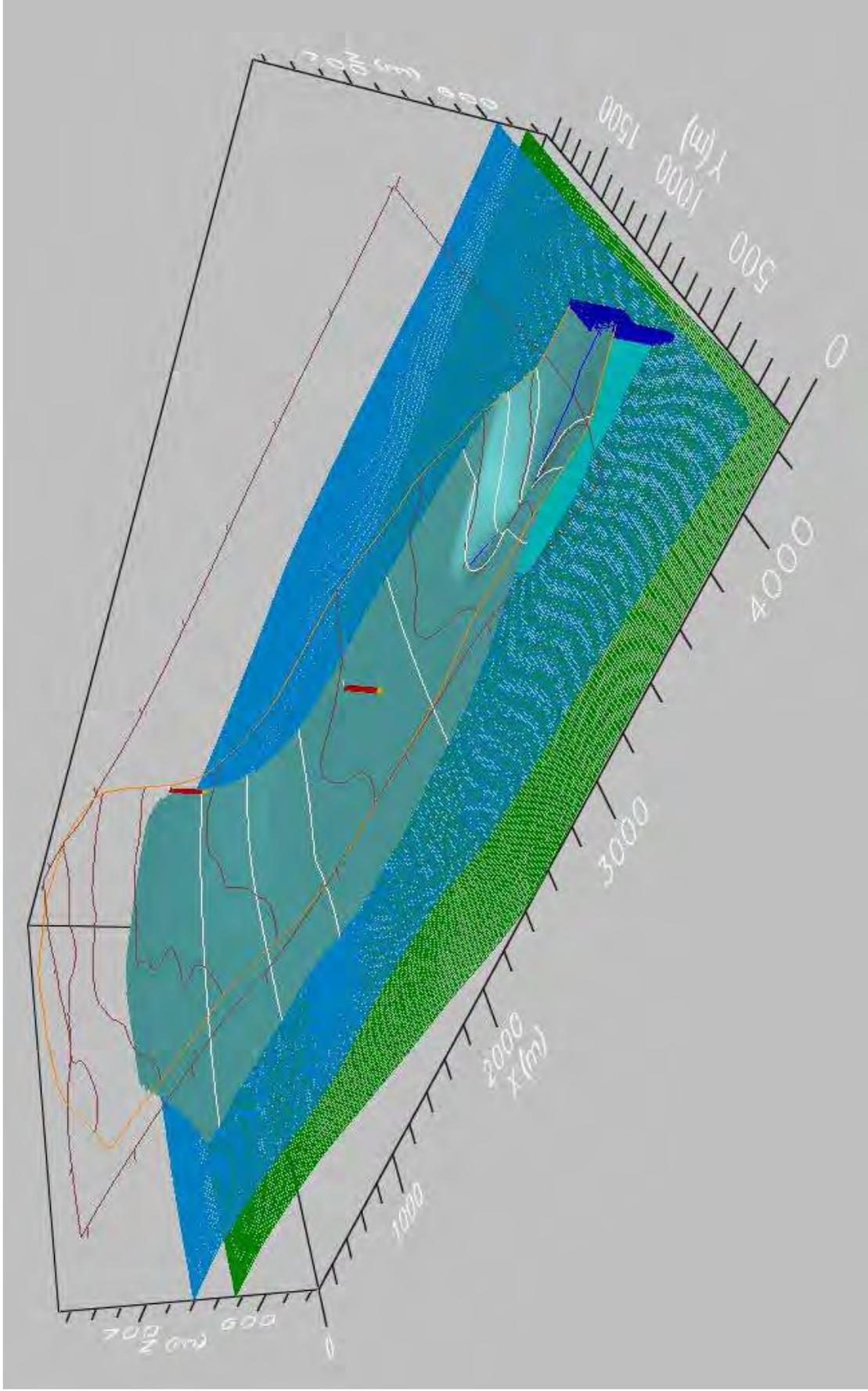


Figura 29: Visualização em 3-D do domínio simulado.

## 9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A base de informações de cunho geológico e hidrogeológico necessárias para a realização das simulações numéricas de fluxo de água subterrânea na Fazenda Cara Preta provêm de estudos anteriores realizados na área por Romualdo (2006) e Sato (2007). A partir da perfuração de poços de monitoramento e de levantamentos geofísicos (método da Sondagem Elétrica Vertical), somados a trabalhos de campo, os autores ofereceram boa base para o entendimento das características hidrogeológicas do local. Assim, foi possível elaborar um modelo conceitual, considerando os seguintes aspectos:

- A camada aquífera é representada por sedimentos da Formação Pirambóia. Apresenta espessura que varia entre 54,22 m a 92,51 m e o nível d'água encontra-se entre 56,77 e 26,52 m de profundidade, com fluxo das águas subterrâneas orientado a partir das cotas altas (regiões Noroeste e Sudoeste) para as cotas baixas (região Sudeste).
- Trata-se de um aquífero livre, que apresenta conexão com a rede de drenagem presente na área.
- A base impermeável do aquífero no local é representada por rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral, entre 117,9 m e 101,66 m de profundidade.
- Foram estabelecidas duas zonas diferentes de condutividade hidráulica, com base nos valores obtidos por meio da interpretação de ensaios de bombeamento efetuados nos poços perfurados na área e pela descrição de Romualdo (2006) sobre distribuição das unidades geológicas em superfície.
- Foram também adotadas diferentes zonas para delimitação das taxas de recarga na área, obedecendo as cotas topográficas.

De posse do modelo conceitual, foram realizadas simulações numéricas para a obtenção de um modelo compatível com os dados oferecidos. Adotou-se uma configuração para o modelo, que foi discretizado em duas camadas e dividido em 200 linhas e 200 colunas, com base nas condições de contorno estabelecidas.

Após simulações em condição de regime permanente (*steady state*), foram determinados valores de condutividade hidráulica, divididos por duas zonas. A primeira zona apresentou  $1,55 \times 10^{-7}$  m/s, enquanto que a segunda, mais próxima ao rio, apresentou condutividade de  $2,2 \times 10^{-6}$  m/s. Assim como os valores de condutividade

hidráulica, foram estabelecidas zonas de diferentes valores de recarga por precipitação. Neste caso, foram estipuladas quatro zonas diferentes, e os valores para cada uma delas variam de 200 mm nas cotas mais altas a 180 mm nas cotas inferiores, próximas ao rio.

Um dos critérios de calibração do modelo foi o valor de descarga no ponto de saída da bacia, utilizando-se o valor de fluxo de base de 1175 m<sup>3</sup>/dia, obtido através dos dados de vazão estudados. Com o resultado final das simulações, atingiu-se o valor de 1178 m<sup>3</sup>/ dia, considerado como satisfatório.

O segundo critério de calibração utilizado foi a verificação dos valores de carga hidráulica reais e os calculados para o modelo. Para o poço CP-1 o valor observado era de 652, 55 m, e foi obtido o valor de 652, 65 m. Já para o poço CP-2, o valor observado era de 678, 97m, e foi obtido o valor de 679, 93. Tanto os valores de fluxo de base quanto os valores de carga hidráulica obtidos pelas simulações são muito próximos aos valores reais.

A partir da análise dos resultados obtidos, é possível afirmar que o modelo elaborado possui representatividade frente às condições reais. Tanto o modelo conceitual quanto as condições de contorno serviram como uma boa base de representação da área, e a partir destas, foi possível obter bons resultados de simulação.

O balanço de massa resultante da simulação indicou que o volume total de água que entra por recarga é descarregado em sua totalidade através da drenagem e do rio. Contudo, este volume de água representa uma parcela pouco significativa em relação ao volume total de água presente no interior da bacia (0,05%). Isto demonstra a possível existência de um regime de fluxo regional responsável pela maior parte do influxo de água na bacia. Este fato é coerente, uma vez que a bacia estudada faz parte de um sistema maior (Aquífero Guarani).

Este modelo representa uma visão simplificada da realidade e, portanto, é possível que a aquisição de informações adicionais, tais como novos ensaios geofísicos e novos poços, esclareça algumas incertezas em relação ao modo como se dá a entrada d'água na bacia. Esta recomendação assegura a elaboração de um modelo conceitual dotado de maior representatividade, dado a importância desta bacia, que representa uma área de recarga do Sistema Aquífero Guarani.

## 10. REFERÊNCIAS

ALBERTO, M. C. *Fluxo da Água Subterrânea em Sistema Encosta-Rio, Município de Paulínia (SP): Caracterização Hidrogeológica e Simulação Numérica*. 2005. 117f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Universidade Estadual Paulista (UNES). Rio Claro. 2005.

ALMEIDA, F. F. M., 1964. *Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista*. In: SÃO PAULO. INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO. Geologia do Estado de São Paulo. São Paulo. P. 241- 254. (Boletim, 41).

ARAUJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTER, P.E. *Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; Mapas Hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacaurémbo*. Mapas, Curitiba: UFPR-Petrobras, 1995. 4 mapas, colorido. Escala 1:5.000.000. Texto Explicativo, 16p.

ARAUJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTER, P.E. *Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA*. Hydrogeology Journal, Heidelberg, v. 7, p. 317-336, 1999.

BEAR, J., BELJIN, M. S. & ROSS, R. R. 1992. *Fundamentals of ground-water modeling*. Environmental Protection Agency Technology Support Project. EPA report EPA/540/S-92/005. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

CAETANO-CHANG, M.R.; *A Formação Pirambóia no centro-leste do estado de São Paulo*. 1997. 196p. Tese (Livre Docência em Geologia) Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 1997.

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica; IG – Instituto Geológico; IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; CPRM – Serviço Geológico do Brasil. *Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo, 2005. Escala 1: 1.000.000. Nota explicativa. Rocha, G (Org.)

FETTER, C.W. *Applied Hydrogeology*. 4 Ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

- HINKELMANN, H. 2005. *Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques for Modeling Hydro- and Environmental Systems*. Berlin, Germany. Ed. Springer. 2005. 320 p. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics (vol. 21).
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Mapa de Clima do Brasil*. Rio de Janeiro, 2002. 1 mapa, color. Escala 1: 5.000.000.
- IG – Instituto Geológico. *Folha Geológica de Luis Antônio*. Folha SF. 23- V – C – IV – 2. São Paulo, 1986. Escala 1: 50.000. Freitas, R. O. (Org.).
- LEBAC. 2008. *Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani*. Chang, H. K, Gastmans, D. (Org.). Rio Claro. 2008. 127p.
- MASSOLI, M. 1981. *Geologia do Município de Santa Rita do Passa Quatro*. SP. Rev. IG, São Paulo 2(2): 35-45.
- MASSMANN, J. W., HAGLEY, M. T. 1995. *A Comparison of model and Parameter Uncertainties on Groundwater Flow and Solute Transport Predictions*. In: Kadi, A. I. E, *Groundwater Models for Resources Analysis and Management*. Lewis, London, pp. 3-24.
- McDONALD, M. G.; HARBAUGH, B. R. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. *Techniques of Groundwater of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, Book 6, Chapter A1. Washington: US Government Printing Office, 1988.
- MILANI, E. J., FRANÇA, A. B., SCHNEIDER, R. 1994. *Bacia do Paraná*. Bol. Geociências da Petrobrás, 8 (1), p. 69-82.
- MILANI, E. J., 2004. *Comentários Sobre a Origem e Evolução da Bacia do Paraná*. In: GEOLOGIA DO CONTINENTE SUL-AMERICANO - Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Cap. XVI. Beca Ed. , São Paulo, p. 264- 279.
- MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. *Bacia do Paraná*. In: Boletim de Geociências da Petrobrás. Maio/Nov.2007. v. 15. p. 265-287.
- PAULA E SILVA, F., CHANG, H. K., CAETANO-CHANG, M. R., SINELLI, O. 2008. *Arcabouço geológico e hidrofácies do Sistema Aquífero Guarani, no município de Ribeirão Preto (SP)*. Revista Brasileira de Geociências, 38(1): 56-67.

REILLY, T. E. *System and Boundary Conceptualization in Ground- Water Flow Simulation. Techniques of Water-Resources Investigation in the U.S Geological Survey.* Applications of Hydraulics, Book 3: Chapter A-8, Reston, Virginia, USA, 2001.

ROMUALDO, D. B. *Caracterização Hidrogeológico na Fazenda Cara Preta, Município de Santa Rita do Passa Quatro – SP.* 2006. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

SATO, B. H. *Mapeamento Geológico de Subsuperfície das rochas Intrusivas no Aquífero Livre das sub-bacias do Córrega Paulicéia e do Ribeirão Bebedouro, Município de Santa Rita do Passa Quatro – SP.* 2007. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia). Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro.

SPITZ , K. & MORENO, J. *A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling.* New York . John Wiley & Sons, 461 p. New York, 1996.

TERAMOTO, E. H. 2004. *Simulação Numérica de Fluxo como Subsídio ao Entendimento da Dinâmica Hidrogeológica em Área Localizada no Município de Paulínia – SP.* Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia). Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2004.

TERAMOTO, E. H. 2007. *Caracterização Hidrogeológica e Simulação Numérica de Fluxo em uma Região Situada no Distrito Industrial de Paulínia – SP.* Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rio Claro, 2007.

WANG, H. F., ANDERSON, M. P. *Introduction to Groundwater Modelling: Finite Difference and Finite Element Methods.* San Diego, California, USA: Academic Press Limited 237 p. 1982.

WATERLOO HIDROGEOLOGY, Inc. *Visual MODFLOW version 3.1* Canada. 2002.

WENDLAND, E. C. *Modelos Matemáticos e Métodos Numéricos em Águas Subterrâneas.* Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional: Notas em Matemática Aplicada, v. 3, 95 p. São Carlos – SP. 2003.

ZHENG, C. & BENNET, G. D. *Applied Contaminant Transport Modeling: Theory and Practice*. Van Nostrand Reinhold, International Thomson Publishing, Inc., 440p., New York. 1995.

*Fontes Eletrônicas:*

[www.sigrh.sp.gov.br](http://www.sigrh.sp.gov.br) (último acesso em 9 de dezembro de 2009).