

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**MAPA DE FLUXO TRIDIMENSIONAL DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS E TRAJETÓRIA DE PARTÍCULAS  
AEROPORTO DE REGISTRO-SP**

Andréa Segura Franzini

**Orientador: Prof. Dr. Alberto Pacheco  
co-Orientadora: Monalisa Horwath**

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2005/02)**

**SÃO PAULO  
2005**

TF  
F837  
AS.e

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Estudo da Eficiência de Métodos de Remoção Física  
de Contaminantes Através de Modelagem  
Matemática, Utilizando o Software Visual ModFlow**

**Andréa Segura Franzini**

Monografia de Trabalho de Formatura



**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Alberto Pacheco

Prof. Dr. Luiz Carlos Kauffman Marasco Ferrari

Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

São Paulo

2005

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900018041

**MAPA DE FLUXO TRIDIMENSIONAL DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS E TRAJETÓRIA DE PARTÍCULAS  
AEROPORTO DE REGISTRO-SP**

Andréa Segura Franzini



**Orientador: Prof. Dr. Alberto Pacheco (GSA-IGc)**  
**Co-orientadora: Monalisa Horvath**

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA**  
**(TF/05-02)**

**SÃO PAULO**  
**2005**

**Aos meus queridos pais  
E minha filha**

---

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>i</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>1</b>
<b>3. MÉTODO</b> .....	<b>2</b>
3.1. Fundamentação Teórica .....	2
3.2. Softwares Utilizados .....	2
3.3. Trabalho de Campo .....	3
3.4. Análise dos Trabalhos de Diagnóstico Ambiental .....	3
3.5. Elaboração do Modelo Matemático de Fluxo .....	3
3.6. Elaboração da Trajetória de Partículas .....	4
3.7. Resultados .....	4
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>5</b>
4.1. Trabalhos Prévios .....	5
4.2. Modelos Matemáticos em Hidrogeologia .....	5
4.3. Condição Inicial .....	6
4.4. Condição de Contorno .....	6
4.5. Trajetória de Partículas .....	7
<b>5. ESCOLHA DO APLICATIVO</b> .....	<b>7</b>
5.1. Histórico do Aplicativo .....	8
<b>6. DESCRIÇÃO DA ÁREA</b> .....	<b>8</b>
6.1. Localização .....	8
6.2. Clima e Condições Meteorológicas .....	9
6.3. Águas Superficiais .....	10
6.4. Geomorfologia .....	10
<b>7. GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	<b>11</b>
7.1. Proterozóico .....	11
7.2. Mesozóico .....	14
7.3. Cenozóico .....	14

---

---

7.4. Quaternário .....	15
<b>8. HIDROGEOLOGIA REGIONAL.....</b>	<b>16</b>
<b>9. HISTÓRICO DO DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA ÁREA .....</b>	<b>17</b>
<b>10. MODELO CONCEITUAL DA ÁREA .....</b>	<b>19</b>
10.1. Unidades Litológicas .....	19
10.2. Condição Inicial .....	19
10.3. Condições de Contorno.....	22
10.4. Fluxo da Água Subterrânea.....	24
10.5. Recarga.....	24
10.6. Condutividade Hidráulica.....	24
<b>11. MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>26</b>
11.1. Domínio e Discretização do Modelo .....	26
11.2. Condições de Contorno.....	26
11.3. Parâmetros Hidrogeológicos .....	28
11.4. Calibração do Modelo.....	28
11.5. Análise de Sensibilidade .....	28
<b>12. TRAJETÓRIA DE PARTÍCULAS.....</b>	<b>31</b>
<b>13. RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>14. LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....</b>	<b>33</b>
<b>15. CONCLUSÕES.....</b>	<b>34</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>36</b>

## **TABELAS**

- 8.1.** Características Hidrodinâmicas dos Aquíferos – Região Sul do Estado de São Paulo
  - 8.2.** Parâmetros Hidrogeológicos dos Aquíferos
  - 8.3.** Resumo das Características dos Poços de Monitoramento
  - 10.2.1.** Características Construtivas dos Poços de Monitoramento
  - 11.5.1.** Resultados Obtidos na Análise de Sensibilidade
-

---

## **FIGURAS**

- 6.1.** Localização do Município de Registro
- 7.1.** Mapa Geológico
- 10.1.1.** Perfil Litológico dos Poços de Monitoramento
- 10.1.2.** Seção Geológica Local
- 10.2.1.** Topografia e Localização dos Poços de Monitoramento
- 10.4.1.** Mapa Potenciométrico Conceitual (março/2005)
- 11.1.1.** Malha e Domínio do Modelo Matemático
- 11.3.1.** Propriedades de Armazenamento e Condutividade Hidráulica do Aquífero
- 11.4.1.** Modelo de Fluxo Calibrado
- 12.1.** Trajetória de Partículas

## **ANEXO FOTOGRÁFICO**

---

---

## AGRADECIMENTOS

Há muito que agradecer pois, muito mais do que o conhecimento adquirido que se pode representar em um papel, a elaboração desse trabalho vai além. Representa um amadurecimento e mudanças de pontos de vista.

Desde o início encontrei amigos, pessoas especiais que por um motivo ou outro me ajudaram a chegar aqui.

Primeiramente agradeço aos meus pais pelo apoio, dedicação e amor que sempre me deram.

Ao Departamento Aeroviário do Estado de São Paulo, DAESP, na pessoa da Arquiteta Mika Saito, por conceder as informações da área para a elaboração desse estudo e principalmente pela ajuda e atenção dadas. Profissional ética, competente e uma pessoa maravilhosa que pude conhecer por meio deste.

Pela orientação, ao Professor Alberto Pacheco e a Geóloga e amiga Monalisa Horvath pela paciência, disciplina e organização que me faltam.

Aos amigos que estiveram sempre presentes ou em alguma fase de minha vida e um abraço especial aos que participaram desta etapa conclusiva: minha irmã Maisa, Raquel, Jaque, Germano, Jair, Thiago (Ritinha), Juscelino, Fabrício, Theo, Carlinhos, Júnior, Norbert e dona Telma.

Aos professores e funcionários do Instituto de Geociências que convivem conosco diariamente compartilhando essa nossa segunda casa.

E por último e não menos importante, minha filha Júlia, sol da minha vida!

---

## RESUMO

O município de Registro localiza-se na região do Vale do Ribeira, sul do Estado de São Paulo, no eixo São Paulo-Curitiba. Desde de 2003 o aeroporto de Registro está sob a administração do Departamento Aeroviário do Estado de São Paulo (DAESP), que vem trabalhando para sua re-adequação às legislações vigentes e possa ser reaberto servindo como alternativa de acesso para a região.

O trabalho apresentado teve como objetivo avaliar o sistema aquífero onde está inserido o aeroporto de Registro, utilizando modelagem matemática tridimensional, de forma a contribuir para o entendimento do fluxo subterrâneo local e avaliar os caminhos preferenciais de possíveis contaminações na água subterrânea em pontos pré-estabelecidos.

As informações necessárias para a modelagem matemática foram obtidas por meio de integração entre informações regionais publicadas em literatura e estudos ambientais realizados no aeroporto, fornecidos pelo DAESP.

Como resultado do trabalho verificou-se que a área do aeroporto apresenta um fluxo radial que converge para as drenagens próximas. As trajetórias de partículas simuladas pelo modelo matemático seguem aproximadamente nas direções N e NW, atingindo as nascentes mais próximas num período entre 6 e 8 anos.

---

## ABSTRACT

The municipality of Registro is placed in the Valley of Ribeira region, south of São Paulo State, between São Paulo and Curitiba. Since 2003 the airport of Registro is under administration from the Airport Department from the State of São Paulo (DAESP) which has been working for its readequation the current legislation and might be reopen serving as alternative of acces to this region.

The objective of the presented work, was to evaluate the aquifer sistem where the Registro Airport is inserted, using tridimensional mathematic modelling, aiming to contribute for the understanding of the local ground water flow and evaluate the preferencial ways of possible contamination on the ground water in pre established points.

The necessary information for the mathematic modelling were obtained by integration of regional informations published in literature and enviromental studies made at the airport, provided throug DAESP.

As result of the work was verified that the airport area presents a radial flow that converges to the closest drainages. The trajectories of the particles simulated in the mathematic model follows approximately to North and Northwest, reaching the closest nascent in a period between 6 and 8 years.

---

## **1. INTRODUÇÃO**

A região do Vale do Ribeira no sul do Estado de São Paulo está geograficamente posicionada entre as capitais dos Estados de São Paulo e Paraná. O tráfego aéreo entre essas duas cidades aumentou muito nos últimos anos e não há uma opção de pouso entre as duas metrópoles.

O aeroporto do município de Registro, o único pavimentado do Vale do Ribeira, esteve interdito por 20 anos. Em 2003 o Departamento Aeroviário do Estado de São Paulo, DAESP, conseguiu recursos para iniciar obras de re-adequação e por solicitação dos órgãos competentes vem realizando estudos de diagnósticos dos impactos ambientais.

Os estudos realizados visam entender o meio ambiente e meio antrópico em que o empreendimento está inserido e avaliar quais impactos diretos e indiretos esse poderá causar. Esse entendimento, além de necessário para se obter as licenças de instalação e operação de uma obra, é importante para a elaboração de um projeto de monitoramento e prevenção de acidentes ambientais.

As pesquisas sobre o aeroporto avaliaram o meio ambiente circundante de forma geral: fauna, vegetação, ar, solo e águas. A compilação desses trabalhos, contendo informações de solo, águas subterrâneas e superficiais, juntamente com informações de literatura possibilitou elaborar um modelo matemático de fluxo de água subterrânea.

Os modelos matemáticos aplicados à hidrogeologia permitem, além de sistematizar informações de campo, compreender o comportamento dos aquíferos e das substâncias transportadas pelos mesmos. Podem também ser utilizados na previsão de cenários futuros. Neste contexto, no que tange ao sistema aquífero local e utilizando modelagem matemática, este trabalho visa oferecer uma pequena contribuição ao planejamento ambiental relevante ao projeto de ampliação do Aeroporto da cidade de Registro.

## **2. OBJETIVOS**

Este trabalho objetiva avaliar o sistema aquífero onde está inserido o aeroporto de Registro, utilizando modelagem matemática tridimensional de fluxo, de forma a contribuir para entendimento do fluxo subterrâneo local e evidenciar os caminhos preferenciais de possíveis contaminações na água subterrânea em pontos pré-estabelecidos.

---

### **3. MÉTODO**

Para o desenvolvimento desse estudo, foram necessárias análises de dados bibliográficos, que, em conjunto com informações obtidas por pesquisa de campo e trabalhos de investigação ambiental local, forneceram as bases para a elaboração do modelo matemático de fluxo da área.

As etapas necessárias para esse desenvolvimento foram: fundamentação teórica, pesquisa de campo, familiarização com os softwares utilizados, desenvolvimento de modelo conceitual, elaboração do modelo matemático, calibração do modelo, apresentação dos resultados obtidos.

#### **3.1. Fundamentação Teórica**

A fundamentação teórica é baseada na consulta e compilação de informações existentes na literatura disponível em bibliotecas e na internet sobre os temas a serem abordados: modelagem matemática tridimensional de fluxo de águas subterrâneas, geologia e hidrogeologia da região do vale do Ribeira de Iguape.

#### **3.2. Softwares Utilizados**

O software utilizado para simulação do fluxo das águas subterrâneas foi o Visual MODFLOW (GUIGUER e FRANZ, Waterloo Hydrogeologic Inc.1996), que inclui pré e pós-processadores desenvolvidos para o modelo MODFLOW, anteriormente elaborado por McDONALD E HARBAUGH (1989) do Serviço Geológico Americano (USGS).

Além do MODFLOW, o Visual MODFLOW também incorpora o programa MODPATH, igualmente desenvolvido pelo USGS, que calcula a trajetória de partículas hipotéticas lançadas no aquífero, tanto no sentido do fluxo, de montante para jusante, como em sentido contrário.

Foram também utilizados os softwares Autocad 12, Spring 4.2 para digitalizar o mapa base e interpolar as curvas de nível e CorelDraw 10 para confecção das figuras.

---

### **3.3. Trabalho de Campo**

Uma etapa de campo foi realizada para melhor compreensão da área. Este estudo permitiu a caracterização do entorno, das condições operacionais do aeroporto, do uso e ocupação do solo, e foi feito o reconhecimento de corpos d'água superficiais, potenciais receptores das águas subterrâneas.

### **3.4. Análise dos Trabalhos de Diagnóstico Ambiental**

Os trabalhos de diagnóstico ambiental existentes na área estudada foram organizados e compilados de forma a serem integrados ao material levantado na literatura. Sendo as unidades hidrológicas e estratigráficas definidas pela interpretação dos perfis litológicos das sondagens e poços de monitoramento instalados na área e mapa geológico regional.

Foram também realizadas pesquisas sobre os poços de produção existentes no entorno com sua localização, características construtivas e parâmetros hidrogeológicos junto ao cadastro existente no Departamento de Água e Esgoto, DAEE, do Estado de São Paulo, de modo a complementar as informações existentes.

### **3.5. Elaboração do Modelo Matemático de Fluxo**

A construção do modelo matemático de fluxo estacionário, que apresenta características que não variam ao longo do tempo, consistiu em traduzir o modelo conceitual da área em uma linguagem compreensível pelo programa de modelagem. Assim sendo, o modelo matemático deve representar, da melhor forma possível, o sistema hidrogeológico real.

Os elementos para definição do modelo matemático foram:

- Modelo conceitual da área: elaborado a partir de compilação de dados existentes em literatura, estudo dos mapas topográfico e geológico regional e da análise de dados existentes em diagnósticos ambientais que forneceram informações sobre a geologia e hidrogeologia local.
- Condição inicial: representa a distribuição tridimensional da carga hidráulica no momento inicial da simulação.
- Condições de Contorno: são estabelecidas de modo que se resolva adequadamente a equação diferencial parcial de fluxo da água subterrânea.

- 
- Discretização da malha do modelo: atribui-se o valor ao centro da célula (método de diferenças finitas), que representa a unidade fundamental do modelo, extrapolando-o para toda a célula. É possível definir células de tamanhos diferentes para obter melhor nível de detalhe em áreas de interesse, uma vez que os limites do modelo extrapolam o site estudado.
  - Calibração: possibilita o ajuste dos parâmetros iniciais do modelo de forma a minimizar as incertezas ocasionadas pelas simplificações adotadas do sistema real. As condições de contorno e os parâmetros hidrogeológicos são ajustados para que as cargas hidráulicas simuladas sejam próximas das observadas. Na calibração avalia-se o parâmetro RMS, que representa a raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre as cargas calculadas e observadas.
  - Análise da sensibilidade: permite avaliar quais parâmetros hidráulicos mais afetam as cargas hidráulicas do modelo, portanto, é possível avaliar as incertezas do modelo.

### **3.6. Elaboração da Trajetória de Partículas**

A trajetória de partículas determina linhas de fluxo ou direções preferenciais que uma partícula hipotética realizaria, sendo transportada por águas subterrâneas. A movimentação é calculada com base nas cargas hidráulicas obtidas pelo modelo numérico de fluxo.

Segundo, Iritani (1999), a técnica permite acompanhar a trajetória de partículas imaginárias no aquífero, de tamanho infinitamente pequeno, movimentando-se em função apenas de processo advectivo. As soluções analíticas podem ser apresentadas em 2D e em 3D. A velocidade da partícula é calculada por meio do fluxo entre uma célula e outra em uma grade de diferenças finitas através de interpolação linear.

### **3.7. Resultados**

O resultado esperado é um mapa de fluxo para o aeroporto e uma simulação de trajetórias de partículas de pontos de interesse.

---

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. Trabalhos Prévios

Em 1856 foi estabelecida a lei de Darcy, uma fórmula que permite expressar a relação entre a condutividade hidráulica, a vazão específica e o gradiente hidráulico. Essa lei foi a base de muitos métodos de avaliação quantitativa. Outros trabalhos se seguiram nas décadas posteriores.

Forchheimer (1886) *apud* Feitosa (1997), introduziu métodos para a solução de problemas de fluxo das águas subterrâneas numa formação produtora de água limitada por um rio perene.

Por volta de 1930 avanços na teoria de fluxo em meios porosos foram obtidos através de estudos na área de engenharia de petróleo. Hubbert (1940) e Jacob (1945) *apud* Wang (1982), começam a discutir fluxo regional através de equações matemáticas.

Durante a década de 60 as relações entre as águas superficiais e subterrâneas foram melhor estabelecidas e serviram de base para a gestão da água subterrânea. Nessa época eram utilizados principalmente modelos analógicos em substituição aos modelos físicos. Na década de 70 foram substituídos por modelos computacionais mas eram necessários conhecimentos de programação, além dos processos hidrogeológicos. A partir da década de 80 a utilização de computadores tornou-se cada vez mais acessível, sendo atualmente de fácil utilização para um modelador hidrogeólogo.

### 4.2. Modelos Matemáticos em Hidrogeologia

Os modelos matemáticos representam o comportamento de aquíferos por meio das equações matemáticas que regem os processos nele atuantes, equação fundamental de fluxo e as equações fundamentais de transporte.

A equação diferencial parcial tridimensional, aplicada a um modelo matemático, que rege o fluxo da água subterrânea, considerando-se um meio heterogêneo, anisotrópico e em estado transiente, é derivada através da combinação matemática da equação de balanço de água e da lei de Darcy. Anderson & Woessner, (1992) e Cleary (1989).

De acordo com Cleary (1991), a equação de fluxo da água subterrânea é dada pela equação:

---

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W(x, y, z, t) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

onde:

$h$  → carga potenciométrica [L]

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  e  $K_{zz}$  → condutividades hidráulicas nas coordenadas  $x, y, z$  [L/T]

$S_s$  → coeficiente de armazenamento específico [1/L]

$T$  → tempo

$W$  → representa fontes ou sumidouros de água [L<sup>3</sup>/TL<sup>3</sup>]

O modelo matemático utiliza esta equação para o cálculo do fluxo em cada célula, considerando que a diferença entre o fluxo de entrada e saída representa a mudança no armazenamento.

O método numérico utilizado será o de diferenças finitas que é, de acordo com Cleary (1998), uma representação discretizada em um ponto. O método de diferenças finitas normalmente é mais utilizado, devido à facilidade de utilização para representar meio poroso.

No método de diferenças finitas se atribui o valor ao centro da célula, que representa a unidade fundamental do modelo, extrapolando-o para toda a célula.

### 4.3. Condição Inicial

Segundo Cleary (1991), quando é sabido os valores das cargas hidráulicas, essas podem ser utilizadas como condição inicial, o que torna os resultados melhores e diminui o tempo gasto para a execução do cálculo do modelo.

### 4.4. Condição de Contorno

Cabral et al. (1997) definiram quais tipos de contorno se deve buscar em uma área. Estes podem ser contornos físicos representados por falhas geológicas, corpos d'água superficiais ou rochas impermeáveis e os contornos hidráulicos que representam divisores de água e linhas de fluxo onde se consideram o fluxo perpendicular nulo.

De acordo com Anderson e Woessner (1992), as condições de contorno no modelo matemático podem ser representadas por três tipos:

- Tipo 1, de Dirichlet, carga hidráulica especificada. Caso o aquífero tenha conexão com um corpo d'água superficial onde a carga é conhecida.
- Tipo 2, de Neumann, fluxo especificado. O fluxo é especificado nulo em linhas de simetria, de correntes ou contornos impermeáveis.
- Tipo 3, de Robin ou de Cauchy, são condições mistas que são expressas em função linear da carga hidráulica e do fluxo.

#### 4.5. Trajetória De Partículas

O software MODPATH foi desenvolvido por Pollock para a U.S.G.S em 1989, sendo também de domínio público, calcula em 3D a trajetória de partículas em estado estacionário. Através dele pode-se determinar o caminho e a posição de uma partícula em um determinado tempo. Ele utiliza o esquema semi-analítico onde a componente vetorial da velocidade varia linearmente.

O programa MODPATH calcula a velocidade da partícula em cada eixo independentemente e é calculada por Anderson e Woessner, (1992), semelhante para os eixos x, y e z.

$$V_x = (1 - F_x) V_{x(i-1/2, j)} + F_x V_{x(i+1/2, j)}$$

$$F_x = (X_p - X_{(i-1/2, j)}) / \Delta X_{i,j}$$

Onde,

$X_p$  → coordenada x da partícula

$V_x, V_y, V_z$  → velocidades da partícula nos eixos

#### 5. ESCOLHA DO APLICATIVO

A escolha do aplicativo baseou-se na disponibilidade comercial, na facilidade de utilização e em sua versatilidade. Os modelos gerados a partir do programa MODFLOW permitem interpretar o fluxo da água subterrânea em três dimensões fornecendo informações sobre fluxos verticais e horizontais, taxas de exploração, adsorção, transmissividade entre outras características. Possibilitam também prever situações como rebaixamento do nível d'água, inversão de fluxo, comportamento de barreiras hidráulicas ou impactos causados por exploração.

---

Neste trabalho será utilizado o Visual MODFLOW da Waterloo Hydrogeologic Inc., Guiguer e Franz (1996), pois é um ambiente completo de modelagem para aplicações em fluxo de água subterrânea e transporte de contaminantes. O pacote integra o MODFLOW, MODPATH, Zone Budget, MT3D/RT3D e a interface gráfica WinPest.

Este programa permite calibrar manual ou automaticamente os modelos e visualizar os resultados em duas ou três dimensões em qualquer fase da construção do modelo. Em duas dimensões produz seções verticais ou plantas.

### **5.1. Histórico do Aplicativo**

O MODFLOW é um dos softwares mais utilizados atualmente para o desenvolvimento de modelos matemáticos, McDonald e Harbaugh (1988), desenvolvido pelo Serviço Geológico Americano, USGS, posto em domínio público em 1983. O código foi revisado em 1988 e 1996 por McDonald e Harbaugh, sendo aperfeiçoado o cálculo de transmissividade inter blocos e o tratamento de células secas. Em 2000 uma nova versão foi disponibilizada com mudanças na estrutura de aproximação do programa e capacidade de estimativa dos parâmetros construtivos.

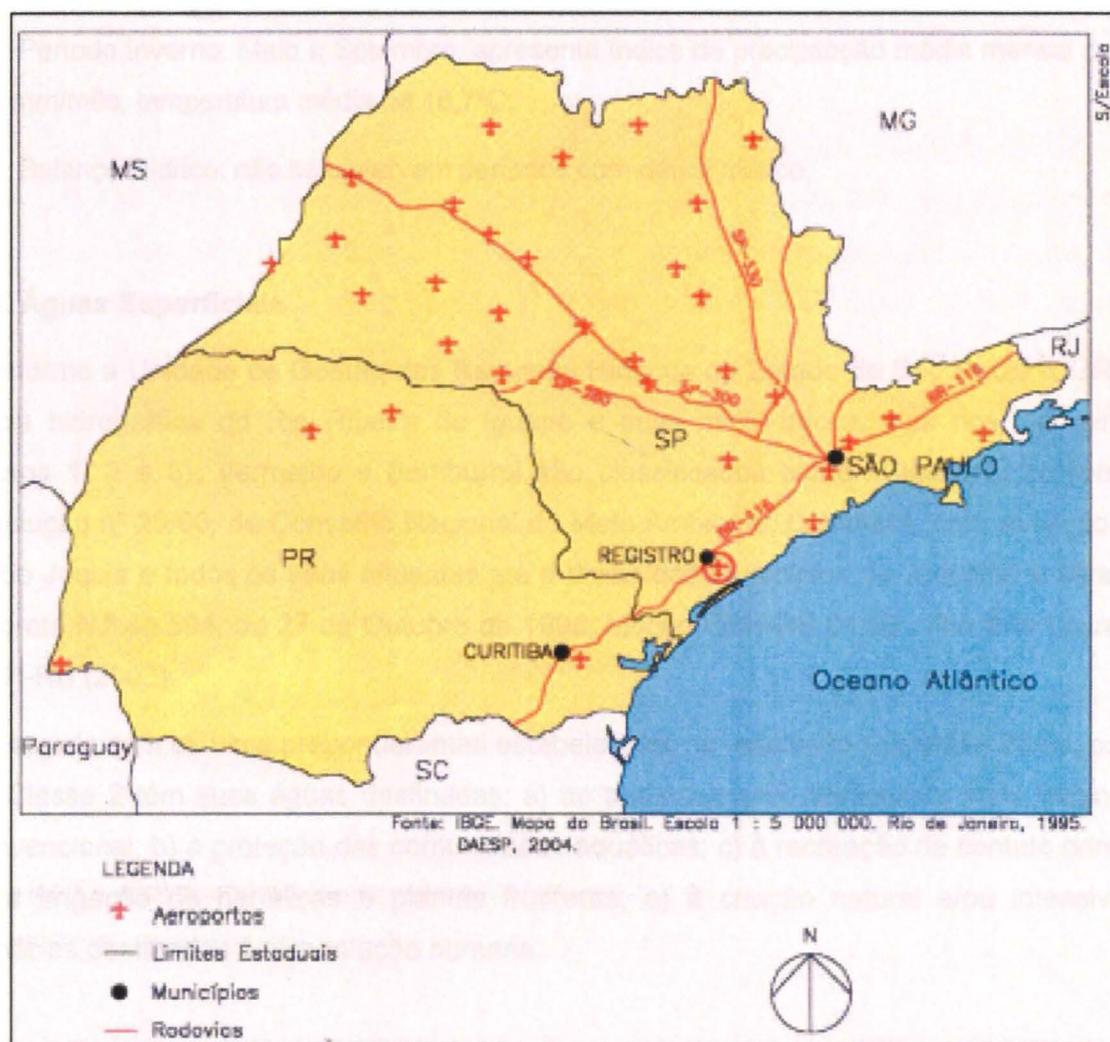
O conceito de propriedades para o bloco foi substituído por definições de propriedades para camadas, melhorias na definição da malha e as propriedades das condições de contorno podem ser definidas e multiplicadas pela matriz. Todas as versões produzem os mesmos resultados, mas as atualizações aperfeiçoaram os métodos de cálculo, de modo a facilitar a utilização do software e melhorar os tempos de respostas, Guiguer (2004).

## **6. DESCRIÇÃO DA ÁREA**

### **6.1 Localização**

O aeroporto "Katsumi Sugano", também chamado de aeroporto de Registro, está localizado na Estrada Municipal Sizesnando de Carvalho, s/ nº com acesso pela Rodovia Regis Bittencourt (BR-116), km 449 no município de Registro, Estado de São Paulo. Foi construído simultaneamente à Rodovia durante o governo do presidente Juscelino Kubitschek e inaugurado em janeiro de 1961. A **Figura 6.1.** apresenta a localização da área dentro do Estado.

**FIGURA 6.1. – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE REGISTRO**



## 6.2. Clima e Condições Meteorológicas

Segundo o Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo (1966), a Classificação Climática de Köppen, o Aeroporto de Registro está localizado em região de Clima Temperado Chuvoso e Quente - "Cfa", que apresenta a característica de inverno com total de chuva maior que 30 mm no mês mais seco, e temperaturas médias mensais maiores que 22°C no mês mais quente, e menores que 18°C no mês mais frio.

De acordo com os dados obtidos junto ao Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos, CTH-USP, para a Estação Meteorológica instalada no município de Registro:

- Temperatura Média do Ar: 21,7°C;
- Umidade Relativa Média: 85,9%;
- Precipitação Pluviométrica Média: 1.561,5 mm por ano; (entre 1991 e 2000)

- 
- Evaporação Média: 1.044,0 mm por ano;
  - Período Inverno: Maio a Setembro, apresenta índice de precipitação média mensal de 80,8 mm/mês, temperatura média de 18,7°C;
  - Balanço Hídrico: não se observam períodos com déficit hídrico.

### **6.3. Águas Superficiais**

Conforme a Unidade de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, UGRHI, a bacia hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape e suas micro-bacias, dos rios Carapiranga (**Fotos 1, 2 e 3**), Vermelho e Bamburral são classificados como Classe 2, conforme a resolução nº 20/86, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, com exceção para o Rio Juquiá e todos os seus afluentes até a divisa dos Municípios de Juquitiba e Miracatu. Decreto N.º 43.594, de 27 de Outubro de 1998, Moção CBH-RB 01/98, Rio São Lourenço, CBH-RB (2003).

De acordo com os usos preponderantes estabelecidos na resolução CONAMA 20/86, os rios de Classe 2 têm suas águas destinadas: a) ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário; d) à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas; e) à criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas à alimentação humana.

### **6.4. Geomorfologia**

O vale do rio Ribeira de Iguape representa uma interrupção da Serra do Mar no litoral sul de São Paulo. A abertura do vale está relacionada ao desenvolvimento do Arco de Ponta Grossa, ativo desde o Triássico, e o Alinhamento Guapiara que, por falhamentos e movimentação de blocos, estiveram ativos até o Cenozóico.

O rio Ribeira de Iguape desenvolveu-se primeiramente pelo planalto paranaense, capturando águas da superfície de erosão do Alto Iguazu através do rio Açungui, ao norte de Curitiba. Em São Paulo, a expansão da drenagem do rio Juquiá, afluente do Ribeira de Iguape, levou sua bacia a se estender até à superfície de erosão do Alto Tietê, na região sul de Embu-Guaçu.

Nas cabeceiras das drenagens o relevo se apresenta bastante recortado e na região jusante do vale o processo erosivo aplainou a topografia, restando apenas alguns morros residuais, resultando em um amplo vale compartimentado em três níveis de terraço: a alguns metros, a 25-30 m e a 50-60 m acima do nível dos rios da bacia do baixo Ribeira de Iguape.

---

Esses terraços formaram-se em ambiente fluvial, sob clima semi-árido e representam barras longitudinais, dunas subaquosas e depósitos de canais, que se situam mais juntamente ao eixo do rio.

A Província Costeira definida por Almeida (1964), onde o vale está inserido, corresponde à área drenada diretamente para o mar, constituindo o rebordo do Planalto Atlântico. É, em sua maior parte, uma região serrana contínua que, à beira-mar, cede lugar a uma seqüência de planícies de variadas origens. Em certos trechos, feições como planalto, serras e planícies litorâneas caracterizam verdadeiros degraus, constituindo uma vasta transição entre a Província Costeira e o Planalto Atlântico. Esta zona intermediária apresenta relevos entalhados pelas drenagens com feições de morros e morrotes.

## **7. GEOLOGIA REGIONAL**

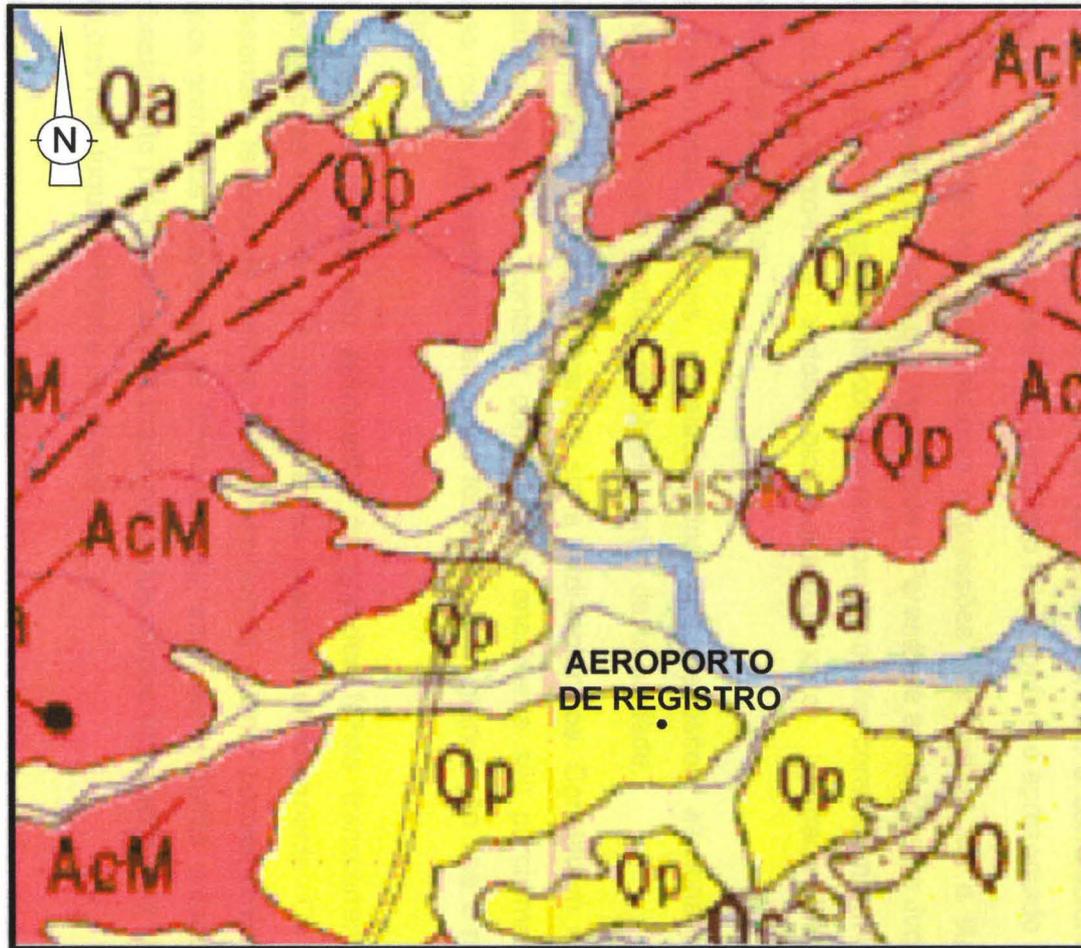
As porções central, sul e leste da região são constituídas, principalmente, por sedimentos fluviais e marinhos de idades Cenozóicas, com topografias mais aplainadas, de pequenas altitudes, predominando cotas entre 20 e 30 metros em relação ao nível do mar. Nas outras áreas o relevo mais acidentado é constituído de rochas do embasamento cristalino Pré-Cambrianas formadas por granitos e gnaisses. As principais litologias que ocorrem na região são descritas a seguir e o mapa geológico regional está reproduzido na **Figura 7.1**.

### **7.1. Proterozóico**

Pré-Cambriano Inferior – Formado por migmatitos, quartzitos e xistos. Ao sul da região estudada afloram migmatitos heterogêneos pertencentes ao Complexo Turvo Cajati, IPT (1981), que abrange várias unidades geoestratigráficas, com idades correspondentes ao ciclo brasileiro ou anteriores, com estimativas de 1.380 até 2.540 m.a. (milhões de anos). Ao norte dessa unidade ocorrem migmatitos relacionados ao Complexo Costeiro, IPT (1981), como metatexiticos de estruturas variadas, estromatíticas e oftálmicas; diatexitos e migmatitos policíclicos complexos de paleossoma xistoso, quartzítico, anfibolítico e/ou gnáissico. Estas unidades são responsáveis pela sustentação das Serras do Mar e Mantiqueira.

Observa-se também que as outras unidades mais jovens do Proterozóico situam-se sempre para NW desta unidade onde ocorrem maciços de rochas intrusivas ultrabásicas e alcalinas. As formações sedimentares recentes (Cenozóico) que se distribuem junto ao eixo dos principais rios e ao longo da faixa paralela à linha costeira recobrem as formações mais antigas.

FIGURA 7.1. MAPA GEOLOGICO REGIONAL



LEGENDA

CENOZÓICO

Qa Sedimentos aluvionares, incluindo areias inconsolidadas de granulação variável, argilas e cascalheiras fluviais.

Qi Sedimentos continentais indiferenciados, incluindo sedimentos elúvio-coluvionares de natureza areno-argilosa e depósitos variados associados a encostas.

Grupo Mar Pequeno

Qp Formação Parquera-Açu - Siltitos areno-argilosos e areias arcósianas de origem fluvial com intercalações de cascalho.

PRÉ - CAMBIANO

Suítas Graníticas Sintectônicas

AcM Complexo Costeiro - Migmatitos metatexiticos de estruturas variadas predominante estromatíticas e ofálmicas, diatexitos, incluindo Termos facoidais, ofálmicos e homofâmicos de paleossomas variados emigmatios polissíclico, complexos de pelcossoma xistoso e/ou gnáissico.

FONTE: Mapa Geológico do Estado de São Paulo - IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - SP - 1981 - Escala 1:500.000

---

Pré-Cambriano Médio a Superior – *Migmatitos, com corpos isolados de rochas básicas e ultrabásicas*. Nesta unidade de mapeamento foram agrupadas as rochas da base estrutural do Grupo Açungui, caracterizadas como migmatitos heterogêneos de estruturas variadas. Correspondente ao Complexo Embu, conforme definido pelo IPT (1981), compõe uma das unidades geológicas do Grupo acima mencionado.

A faixa de domínio das rochas do Grupo Açungui constitui a mais extensa unidade do Pré-Cambriano paulista, indo desde as divisas com o estado do Paraná até o Rio de Janeiro e, juntamente com as rochas da unidade anterior.

O Complexo Embu ocorre a partir do eixo do rio Ribeira de Iguape na altura da cidade de Sete Barras e se distribuí em extensa área à sudoeste do estado de São Paulo. Esta unidade ocorre ao norte da área estudada.

O contato desta unidade com as rochas do Pré-Cambriano Inferior acompanha o lineamento estrutural no qual se instalou parte dos eixos dos rios Juquiá e Ribeira de Iguape.

Pré-Cambriano Médio a Superior – Constituem rochas filíticas, metarenitos, ardósias e xistos. Esta unidade que ocorre a NW da região também é correlacionada com o Grupo Açungui, mais especificamente ao Complexo Pilar, conforme apresentado pelo IPT, *op cit.*.

O Complexo Pilar tem suas maiores expressões nas regiões sul e sudeste do Estado, compreendendo uma faixa que vem desde o Paraná até as regiões de Juquiá, Sete Barras e Pilar do Sul. As litologias mais comuns no Complexo Pilar constituem um conjunto de xistos, incluindo quartzo-mica xistos, biotita-quartzo xistos, granada-biotita xistos, filitos, metarenitos e ardósias.

Os sedimentos recentes correlacionados aos depósitos aluvionares das principais drenagens da região também recobrem partes desta unidade.

Pré-Cambriano Superior – Granitos sin a tardi-tectônicos. Constituem corpos alóctones a parautóctones, cujos contatos com a rocha encaixante são parcialmente concordantes. Essas rochas apresentam estruturas foliadas e têm granulação fina a média com textura porfírica.

Os principais corpos são associados às grandes falhas transcorrentes, que acabam separando as unidades de mapeamentos descritas anteriormente. Os corpos graníticos apresentam feições de contato tanto transicionais quanto parcialmente discordantes. Os corpos graníticos aparecem de forma isolada, em meio a outras unidades geológicas do embasamento pré-cambriano. A maior parte dos corpos mapeados está localizada a NW do eixo dos rios Juquiá e Ribeira de Iguape.

---

## 7.2. Mesozóico

Jurássico-Cretáceo – Esta unidade se refere ao Corpo Alcalino de Juquiá e é constituído por rochas intrusivas ultrabásicas e alcalinas. Este maciço apresenta constituição litológica variada, contendo rochas máfico-ultramáficas, álcali-saturadas. Predominam as rochas caracterizadas como olivina-piroxenitos, nefelina-sienitos. Associados ao maciço principal aparecem diques lamprofíricos e tinguaítos não individualizados. Esta unidade aparece de forma isolada na parte NE do Mapa Geológico Regional, entre os municípios de Juquiá e Registro.

## 7.3. Cenozóico

Terciário - Estão inclusos nesta unidade os sedimentos da Formação Pariqüera-Açu e os sedimentos Continentais Indiferenciados (depósitos de terraços e depósitos de material retrabalhados). As formações cenozóicas desta região do Estado de São Paulo são bastante peculiares por sua constituição, em virtude da alternância dos ambientes na interface continental-marinha. As áreas fontes de material e os paleoambientes condicionaram uma extensa variedade de depósitos que foram seguidamente retrabalhados em decorrência dessa situação ambiental. Nesta região, a complexidade do balanço tectônico e glácio-eustático, as transgressões e regressões marinhas são condicionantes importantes à formação dos depósitos sedimentares e deixam os registros dos diversos eventos que se sucederam.

*Formação Pariqüera-Açu*: Melo (1990), separa o pacote que anteriormente era denominado de Formação Pariqüera-Açu em cinco unidades: Formação Sete Barras, Formação Pariqüera-Açu propriamente dita, Depósitos de cascalhos nível superior de terraços, Depósito de cascalhos nível intermediário de terraços e Depósito colúvio-aluvionar.

Para esta formação, que aflora na área da cidade homônima estendendo-se ao vale do Rio Jacupiranga e às vizinhanças da cidade de Registro, Melo *op. cit.* separa 3 fácies que serão brevemente caracterizadas:

- A fácies leques aluviais proximais formada por depósitos rudáceos e lamitos intercalados por conglomerados e areias de lençol em transbordamento. Esta fácies é formada junto às bordas tectonicamente ativas da bacia deposicional.
- A fácies de planície de inundação de sistema fluvial meandrante é formada por depósitos com granodecrescência ascendente, variando desde ortoconglomerados até areias, areias e argilas laminadas e argilas sem estratificação.

- 
- A fácies lacustre é formada por depósitos predominantemente argilosos e argilas cinza esverdeadas sem estratificação, originados a partir da deposição de sedimentos transportados em fluxos densos dos leques fluviais marginais aos paleo-lagos do embaciamento Pariqüera-Açu.

Nesse mesmo trabalho, Melo (1990), observou em afloramento espessura de 15 m para a formação e inferiu espessuras de até 35 m por meio de dados obtidos com Sondagem Elétrica Vertical (SEV).

*Depósitos de Terraços:* Estes terraços ocorrem ao longo do rio Ribeira de Iguape e Jacupiranga, em níveis pouco mais altos que os depósitos atuais e distribuídos ao longo das várzeas desses rios. São constituídos por cascalhos oligomíticos com matriz arenosa e clastos de quartzo e quartzito arredondados.

#### **7.4. Quaternário**

Correspondente aos aluviões que se desenvolvem atualmente nas várzeas e que acompanham as principais drenagens da região. Estão inclusos nessa unidade os sedimentos indiferenciados de deposição mista (flúvio-marinha-lacustre), remanescentes das antigas oscilações do nível do mar, que contribuíram para a alteração dos efeitos dos processos de erosão e sedimentação.

As flutuações do nível do mar que se desenvolveram na costa brasileira deixaram registros que, na região sul/sudeste, permitem identificar ou caracterizar níveis mais altos que o atua.

Na região estudada as oscilações do nível do mar no Quaternário atingiram parte das áreas de deposição dos sedimentos pré-estabelecidos promovendo remobilizações. Tais sedimentos podem ser caracterizados como:

- Sedimentos Aluvionares - são depósitos de areias inconsolidadas de granulação variável, argilas e cascalheiras fluviais que ocorrem na forma de depósitos em calha e/ou terraços. As várzeas do rio Ribeira de Iguape possuem uma diversidade granulométrica maior em relação aos outros rios. Nas várzeas deste rio há presença de camadas argilosas, siltosas e arenosas ocorrendo apenas raramente intercalações lenticulares de cascalhos. Os sedimentos arenosos predominam nas várzeas dos rios que cortam as formações marinhas.
- Sedimentos indiferenciados de deposição mista que incluem depósitos arenosos de origem marinha localmente retrabalhados por ação fluvial e/ou eólica, termos areno-siltico-argilosos de deposição flúvio-marinho-lacustre e depósitos associados a paleo-mangues. Recobrimo estes sedimentos é comum, em superfície, uma cobertura argilosa, propiciando a formação de um solo de coloração escura, com muita matéria orgânica.

## 8. HIDROGEOLOGIA REGIONAL

Existem poucas informações disponíveis em literatura sobre as características dos aquíferos da bacia do Ribeira de Iguape.

O trabalho disponível mais abrangente é o “Estudo de Águas Subterrâneas da Região Administrativa nº 2 - Santos e Litoral Paulista”, DAEE em 1979, este descreve dois sistemas aquíferos, um sistema aquífero cristalino e um sistema sedimentar, ambos caracterizados como freáticos. Nesse trabalho foram executados testes de bombeamento em 3 poços do Litoral Sul do Estado, cujos resultados estão representados na **Tabela 8.1**.

**TABELA 8.1. CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS DOS AQUÍFEROS – REGIÃO SUL DO ESTADO DE SÃO PAULO**

N.º Poço DAEE	Cidade	Profundidade (m)	Espessura Sedimentos	Transmissividade (m <sup>2</sup> /dia)		Capacidade Específica (m <sup>3</sup> /h/m)
				Rebaix	Recup	
387/6	Sete Barras	172	10	1.7	1.6	0.1
398/2	Pariqüera-Açu	115	20	5.4	4.0	0.5
398/9	Registro	100	32	1.1	1.1	0.2

Fonte: CBH-RB Comitê da Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da UGRHI 11

O mesmo estudo apresenta parâmetros estimados para os aquíferos, reproduzidos na **Tabela 8.2.**

<b>TABELA 8.2. PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICO DOS AQUÍFEROS</b>				
<b>DOMÍNIO</b>	<b>EXTENSÃO (Km)</b>	<b>ESPESSURA (m)</b>	<b>POROSIDADE EFETIVA (%)</b>	<b>RECARGA (%)</b>
Cristalino	13670	50	3	453
Sedimentar	3103	50	15	343

Fonte: CBH-RB Comitê da Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da UGRHI 11

Os dados obtidos no levantamento dos poços de produção no DAEE mostram uma espessura máxima dos sedimentos, correspondentes à formação Pariqüera-Açu, de 32 m. A **Tabela 8.3.** apresenta um resumo dos dados obtidos.

<b>TABELA 8.3. RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS CADASTRADOS NO DAEE</b>							
<b>Nº. POÇO</b>	<b>COORDENADAS</b>		<b>PROFUNDIDADE (m)</b>	<b>NÍVEL ESTÁTICO (m)</b>	<b>DESCRIÇÃO LITOLÓGICA</b>		
	<b>N/S</b>	<b>E/O</b>			<b>DE (m)</b>	<b>ATÉ (m)</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
398-0001	7275.45	210.20	150	6.45	0	32	Sedimentos argilo-arenosos
					32	150	Gnaisse fissurado
398-0003	7284.25	207.60	112	-	0	112	Embasamento Cristalino
398-0005	7285.55	212.24	120	23.0	0	13	Argilo-arenoso
					13	15	Rocha alterada
					15	120	Granito

Fonte: DAEE, maio 2005.

## **9. HISTÓRICO DO DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA ÁREA**

O DAESP tornou-se o responsável pela adequação e funcionamento do aeroporto em Janeiro de 2003 e para o Licenciamento Ambiental das obras realizou, desde então, uma série de estudos ambientais, nos quais baseia-se esse trabalho:

---

Março 2003 - Relatório de Ambiental Preliminar, RAP, realizado pela Casa da Floresta Assessoria Ambiental. Levantamento da situação geral e caracterização da obra de ampliação com relação ao entorno, uso e ocupação do solo, clima e vegetação, qualidade do ar e das águas superficiais, geologia regional, caracterização do meio biótico e os possíveis impactos causados pelo empreendimento, bem como propostas de adequação às normas construtivas e de segurança pertinentes.

Junho 2003 - Diagnóstico e Caracterização Ambiental executado pela Tecnohidro Projetos Ambientais S/C Ltda. Diagnóstico e Caracterização Ambiental relativa à existência de possíveis passivos que pudessem ocasionar contaminação do solo e das águas subterrâneas. Instalação de 6 poços de monitoramento nas imediações do galpão da empresa Banaer e tanques de abastecimento de combustíveis (**Foto 4.**), realização de ensaios de permeabilidade nos poços instalados e análise de amostras geotécnicas de solo, com o intuito de caracterizar o solo quanto a porosidade e teor de matéria orgânica.

Março de 2004 - Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental, EIA/RIMA, elaborado por CEMA Consultoria e Estudos Ambientais Ltda. Estudos mais detalhados que o RAP para avaliar os impactos causados aos meios físico, antrópico e biótico, pelo empreendimento. No que diz respeito ao solo e água, foram aventadas características das águas superficiais, uso, qualidade e classificação das mesmas, aspectos geológicos, geomorfológicos e climáticos da região.

Julho de 2004 - Caracterização Ambiental Detalhada Associada À Avaliação de Risco Toxicológico, Tecnohidro Projetos Ambientais S/C Ltda. Em trabalhos anteriores, a Tecnohidro havia encontrado concentrações de contaminantes na água subterrânea e por solicitação de órgãos ambientais, realizou um estudo complementar a fim de caracterizar melhor a contaminação existente. Nessa etapa instalaram-se mais 3 poços de monitoramento e um poço multinível nas imediações dos tanques de abastecimento.

Março de 2005 - Laudo de Passivo Ambiental, Tecnohidro Projetos Ambientais S/C Ltda. Por solicitação da CETESB, a Tecnohidro realizou uma investigação geral no aeroporto, onde foram instalados 16 poços de monitoramento distribuídos pela propriedade, com objetivos de compreender melhor o fluxo da água subterrânea e avaliar a distribuição da contaminação nas mesmas.

---

## 10. MODELO CONCEITUAL DA ÁREA

### 10.1. Unidades Litológicas

Com base nas descrições litológicas dos poços instalados, apresentadas na **Figura 10.1.1.**, foram confeccionadas seções geológicas, que visam uma melhor compreensão das unidades geológicas. O horizonte investigado compreende da superfície topográfica do local até a profundidade de 5m. A **Figura 10.1.2.** apresenta as seções geológicas, onde podemos observar do topo para a base, a unidades:

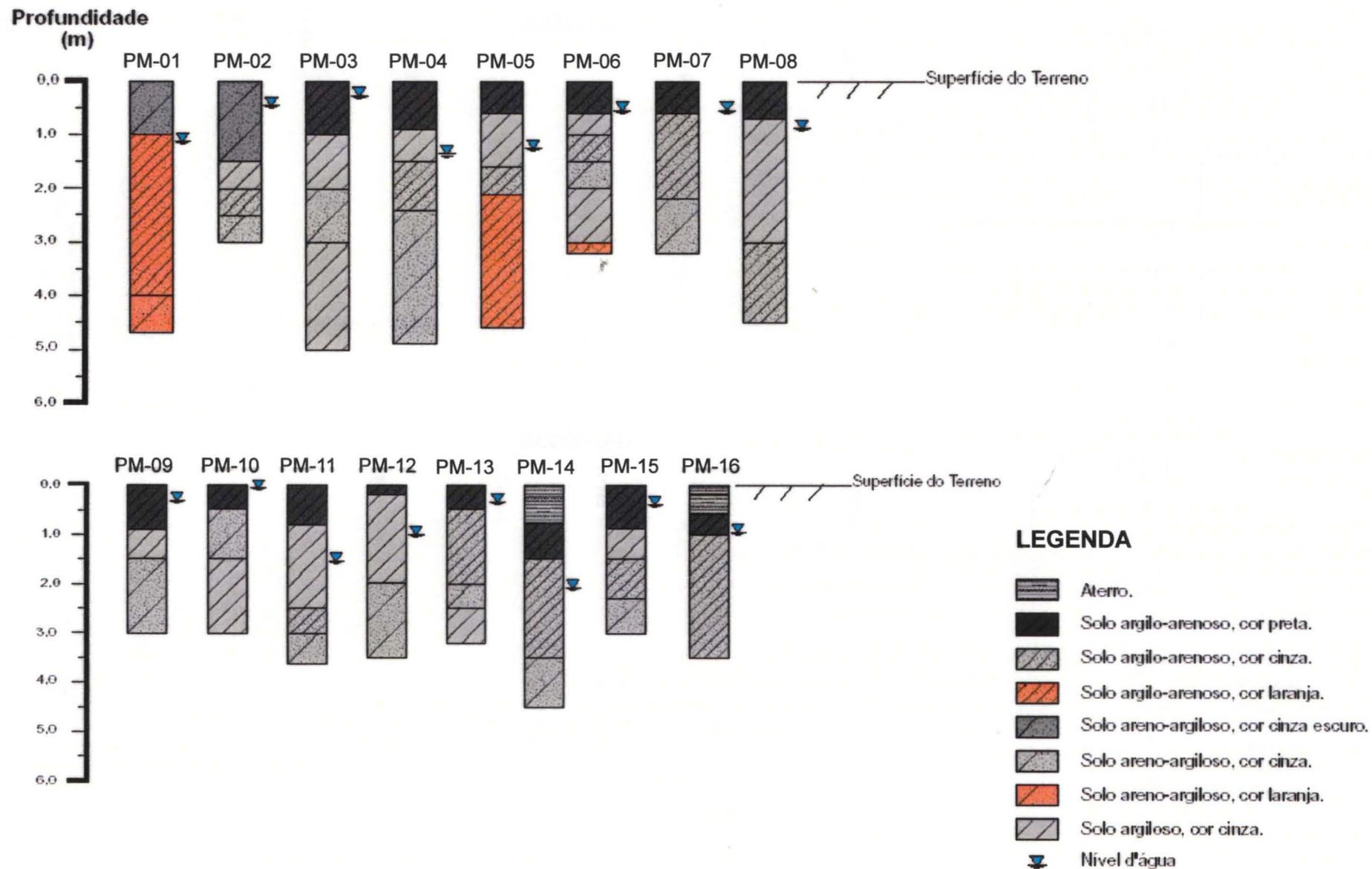
- Litologia 1: composto por argila-arenosa fina, com colorações variando em cinza, preto e localmente alaranjada. Há ocorrência local de matéria orgânica.
- Litologia 2: Areia-argilosa de coloração cinza, cinza escuro e alaranjado. A fração arenosa possui granulometria média a grossa com ocorrência de grânulos e de seixos. Localmente ocorre matéria orgânica. Predominante na porção basal do horizonte investigado.
- Litologia 3: Argila de coloração cinza. Ocorrem em lentes intercaladas nas litologias 1 e 2.

A empresa Tecnohidro em Junho 2003, apresentou valores de porosidade total de 46.3% e 6.5% de porosidade efetiva para o aeroporto, obtidas através de análise geotécnica de amostra indeformada.

### 10.2. Condição Inicial

A condição inicial utilizada consiste nos valores de cargas hidráulicas calculadas utilizando as cotas topográficas dos poços de monitoramento, ajustadas com base no mapa topográfico importado no modelo matemático e a medida de nível d'água dos poços de monitoramento após a instalação. A **Tabela 10.2.1.** apresenta as características construtivas dos poços e os valores de carga hidráulica obtidos.

**FIGURA 10.1.1. PERFIL LITOLÓGICO DOS POÇOS DE MONITORAMENTO**



**FIGURA 10.1.2. SEÇÃO GEOLÓGICA LOCAL**

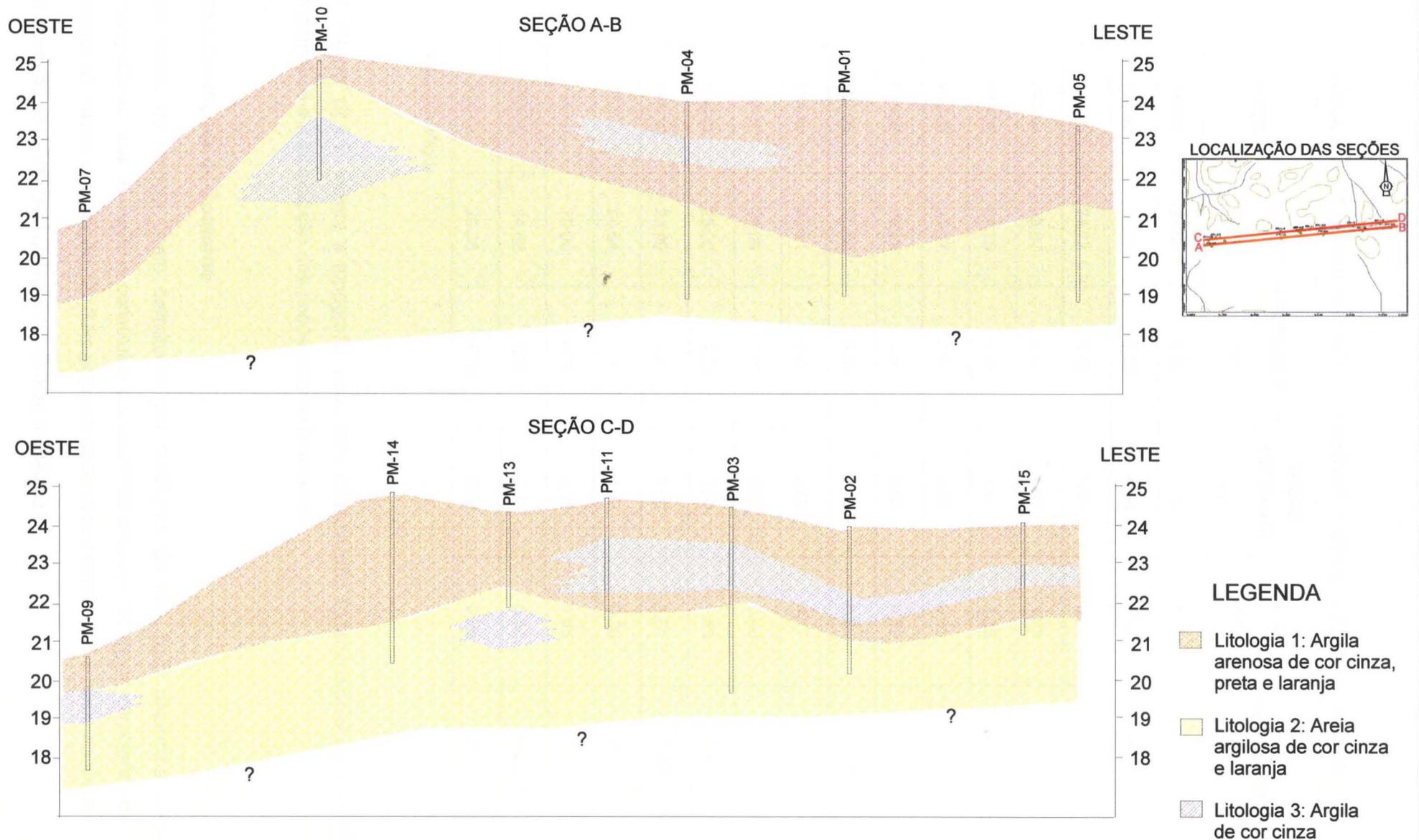


TABELA 10.2.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO					
POÇO	COTAS (m)	PROFUNDIDADE (m)	SEÇÃO FILTRANTE (m)	N.A. (m)	CARGA HIDRÁULICA (m)
PM-01	23.88	5,00	4,00	1,12	22.76
PM-02	23.54	4,00	4,00	0,46	24.08
PM-03	24.72	5,00	5,00	0,28	24.44
PM-04	23.67	5,00	4,00	1,33	22.34
PM-05	23.75	4,50	4,00	1,25	22.50
PM-06	24.47	3,50	3,50	0,53	23.94
PM-07	20.98	3,50	3,50	0,55	20.43
PM-08	20.06	5,00	5,00	0,89	19.17
PM-09	20.61	3,00	3,00	0,17	20.44
PM-10	25.00	3,00	3,00	0,40	24.6
PM-11	25.00	3,50	3,00	1,53	23.47
PM-12	23.99	3,50	3,00	1,01	22.98
PM-13	24.64	3,50	3,50	0,36	24.28
PM-14	25.00	4,50	4,00	1,05	23.95
PM-15	24.60	3,00	3,00	0,40	24.20
PM-16	20.28	4,00	4,00	0,95	19.33

N.A. - nível d'água

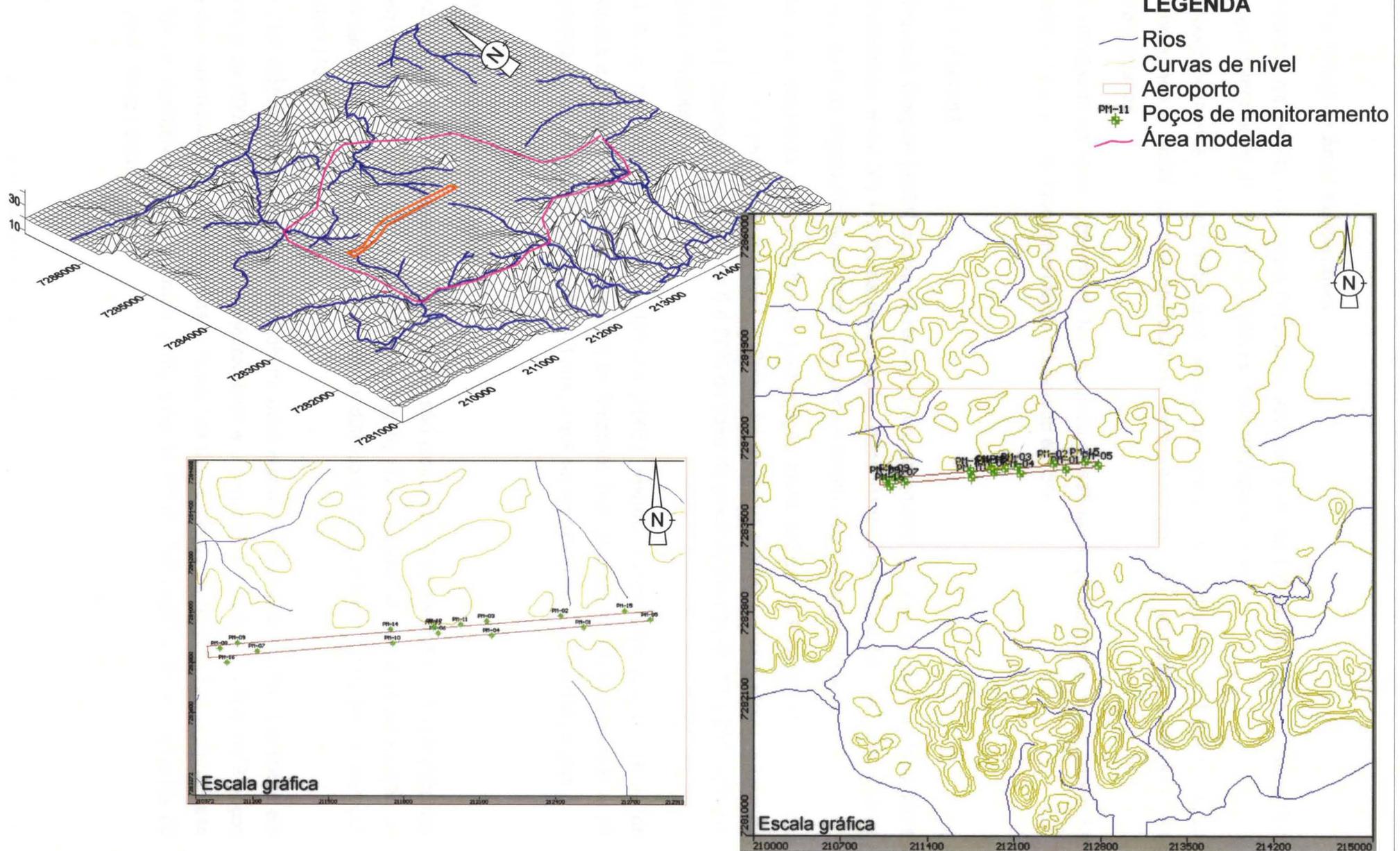
A **Figura 10.2.1.** mostra a topografia local, uma interpolação tridimensional da superfície topográfica e a localização dos poços de monitoramento.

### 10.3. Condições de Contorno

Os limites do modelo foram delimitados por condições de não fluxo determinadas pela topografia do local. A região é constituída por inúmeros divisores de água, caracterizados por morros alinhados. A condição não fluxo pode ser observada a norte, leste e oeste do modelo.

A condição rio foi utilizada no limite sul da área modelada.

FIGURA 10.2.1. TOPOGRAFIA E LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS



---

#### 10.4. Fluxo da Água Subterrânea

Baseado na medida das cargas hidráulicas apresentadas na **Tabela 10.2.1.** foi elaborado o mapa potenciométrico conceitual, representado na **Figura 10.4.1.**

Topograficamente o Aeroporto está sobre um divisor de águas e o fluxo da água subterrânea é radial, as direções de fluxo convergem para as nascentes existentes nas proximidades.

A velocidade da água subterrânea foi calculada, baseada na Lei de Darcy, como sendo 33 m/ano e o gradiente hidráulico médio observado é 0.5%

#### 10.5. Recarga

Segundo Guiguer (2004) a taxa de recarga é um parâmetro difícil de se obter e usualmente encontra-se entre 5% e 20% da precipitação, dependendo de alguns fatores como uso do solo, tipos de vegetação, superfície topográfica e material de cobertura do solo.

Na área estudada a taxa média de precipitação anual obtida na Estação Meteorológica, CTH-USP, no período entre 1991 e 2000, foi de 1540 mm/ano, deste modo a recarga estimada baseada nas taxas de 5 e 20% do valor da precipitação são de 77 e 308 mm/ano, respectivamente.

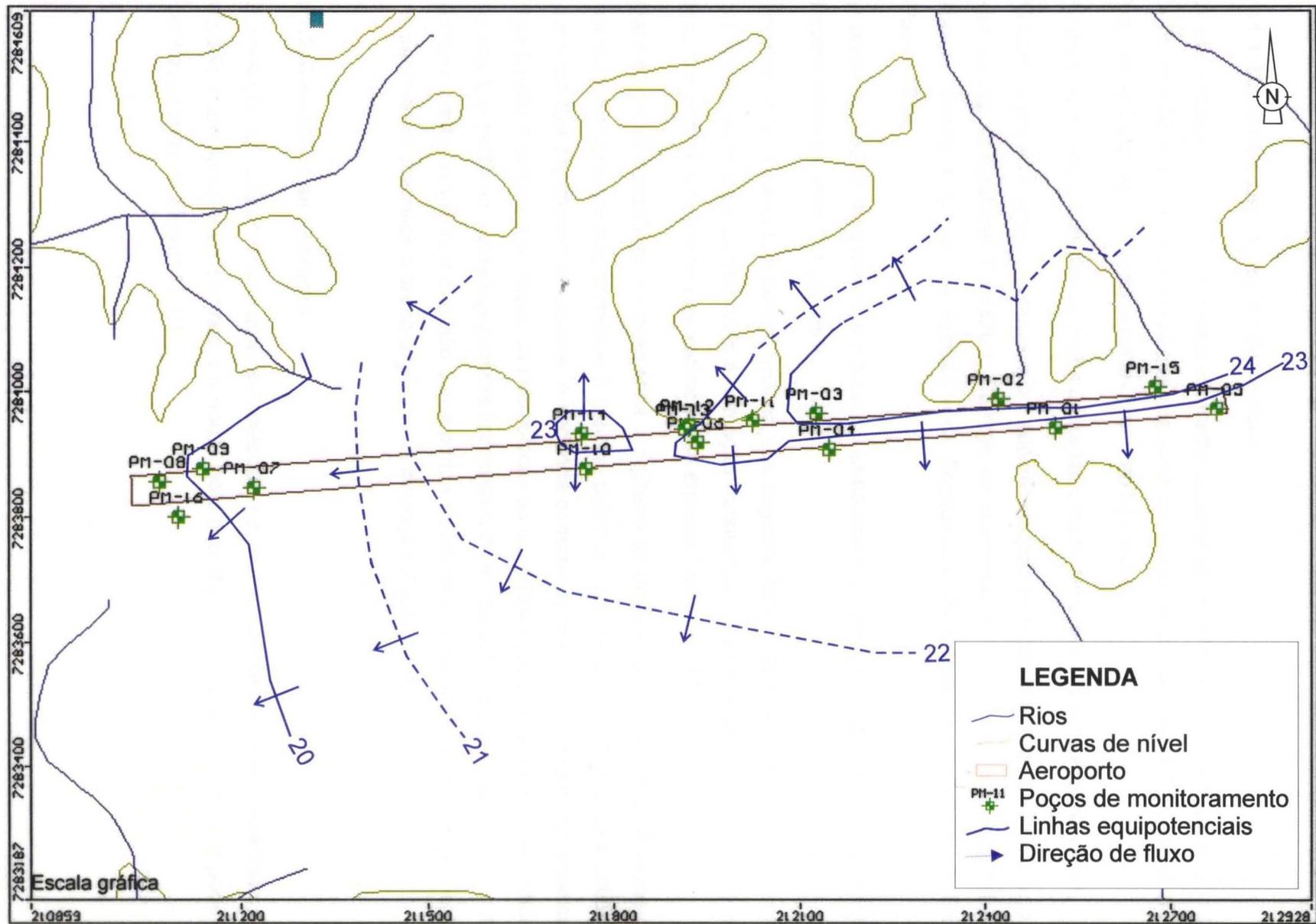
O Plano Nacional de Recursos Hídricos (2005), resume informações sobre a Bacia do Ribeira e Litoral Sul Paulista, baseados no Relatório Zero da Bacia, onde apresenta taxa de recarga do aquífero sedimentar em 343 mm, o que se aproxima do valor calculado acima.

#### 10.6. Condutividade Hidráulica

Por convenção adotou-se que as unidades são isotrópicas nos eixos x e y e anisotrópicas em relação ao eixo z. De modo que  $K_x=K_y=0,1K_z$  pois, assume-se que a sedimentação de camadas arenosas e argilosas imprimem condutividade hidráulica inferior no sentido vertical, Iritani (1999).

Foram efetuados pela empresa Tecnohidro duas etapas de testes de vazão. A primeira em Junho de 2003 em 5 poços de monitoramento e a segunda em Julho de 2004 em 3 poços adicionais instalados. A condutividade hidráulica média obtida foi de  $K=1.38E-3$  cm/s. Esse valor de condutividade foi utilizada como valor inicial de calibração para as camadas do modelo matemático.

FIGURA 10.4.1. MAPA POTENCIOMÉTRICO CONCEITUAL (MARÇO/2005)



---

## 11. MODELO MATEMÁTICO

### 11.1. Domínio e Discretização do Modelo

A discretização do modelo consiste em malha quadrática de 40 m x 40 m na área modelada e 20 m x 20 m na área proximal que compreende o aeroporto. Apresenta 122 linhas, 177 colunas e 3 camadas (layers) resultando em 64782 células.

O domínio e a discretização da malha utilizadas podem ser observadas na **Figura 11.1.1**.

O topo da primeira camada corresponde à superfície topográfica obtida através da digitalização das cartas topográficas, Registro I, Córrego do Quilombo, Rio Bamburral e Bamburral de Baixo, escala 1:10.000, da Secretaria de Economia e Planejamento do Estado de São Paulo, 1989.

A base do modelo matemático é o topo do embasamento cristalino e foi considerado como impermeável assumindo fluxo zero.

Há apenas uma camada aquífera, freática, que segundo Melo (1990) tem aproximadamente 30 m de espessura e corresponde à formação Pariqüera-Açu, semelhante ao observado no levantamento dos poços de abastecimento do entorno feito no DAEE.

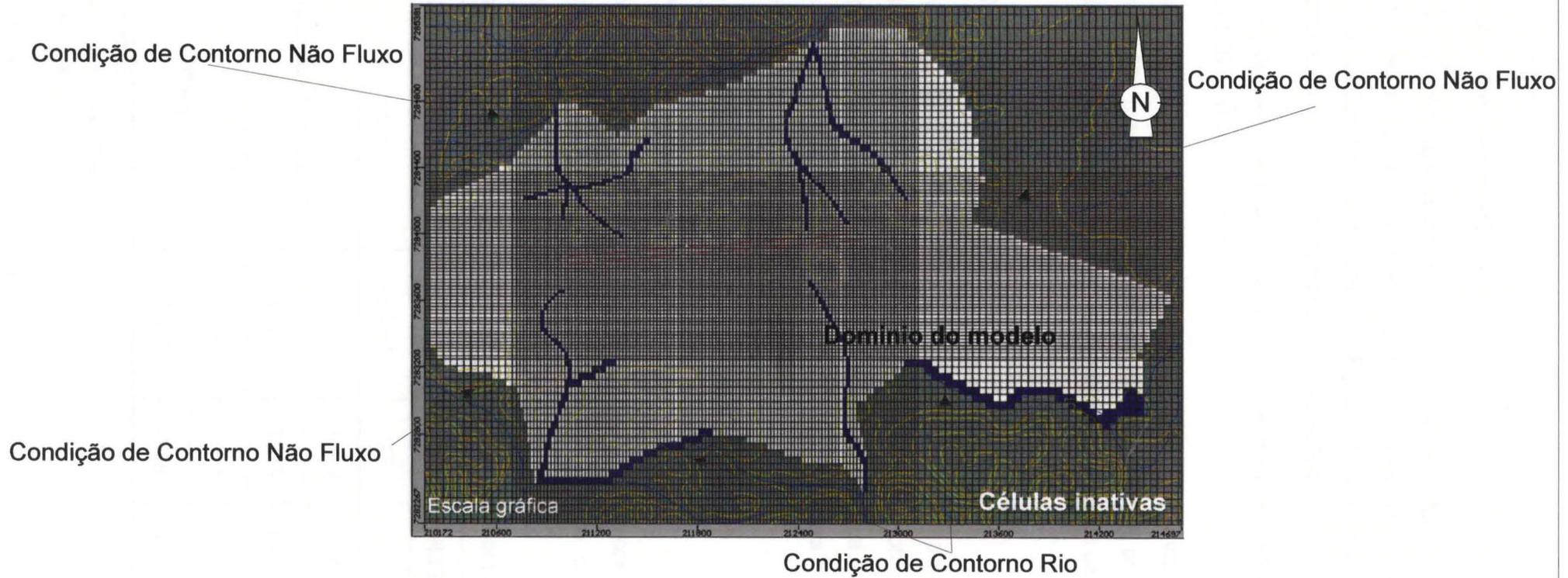
Para efeito de simplificação matemática o aquífero foi dividido em 3 camadas. A primeira camada corresponde aos primeiros 5 metros, sobre os quais existem informações obtidas por meio das sondagens realizadas. A segunda constitui apenas uma camada matemática, cuja função é corrigir a limitação da interpolação da superfície topográfica, sem esse artifício os rios que estão em cotas topográficas inferiores a 20 m ficariam representados no topo do embasamento cristalino, o que não corresponde a realidade. A terceira camada, representa os sedimentos arenosos a areno-argilosos da formação Pariqüera-Açu.

### 11.2. Condições de Contorno

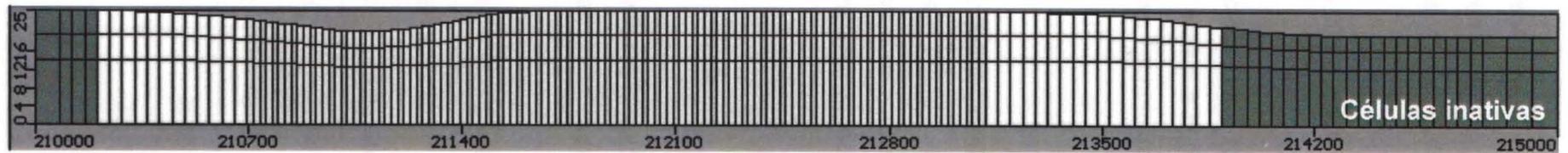
A condição de contorno tipo dois, estabelecida no modelo conceitual, é representada no modelo matemático a sul por rios e a norte, leste e oeste por condição não fluxo e podem ser observadas na **Figura 11.1.1**.

**FIGURA 11.1.1. MALHA E DOMÍNIO DO MODELO MATEMÁTICO**

A) discretização horizontal



B) discretização vertical



### 11.3. Parâmetros Hidrogeológicos

Os parâmetros hidrogeológicos foram baseados nas informações das sondagens, ensaios realizados no aeroporto e valores obtidos em literatura. Esses valores foram ajustados durante a calibração do modelo. A **Figura 11.3.1.** apresenta as propriedades de armazenamento e condutividade hidráulica do aquífero.

Os valores de condutividade hidráulica  $K_x=K_y$  variam de 0,01 cm/s a 0,00001 cm/s e o  $K_z$  varia de 0,001 a 0,000001 cm/s.

O coeficiente de armazenamento ( $S_s$ ) é 0,00001 1/m, a vazão específica 0,2 e taxa de recarga de 300 mm/ano foram ajustados por calibração. A porosidade efetiva é 6,5% e a porosidade total é 43% obtidos através do ensaio geotécnico pela empresa Tecnohidro.

### 11.4. Calibração do Modelo

As propriedades hidráulicas foram ajustadas de forma a aproximar o máximo possível os valores de carga hidráulica calculados pelo modelo aos observados em campo. Após a calibração do modelo, por inúmeros ajustes dos parâmetros em tentativa e erro, obteve-se valores para RMS Normalizado 9,4% e RMS 0,5m. A **Figura 11.4.1.** apresenta o modelo de fluxo juntamente com o gráfico de calibração.

### 11.5. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade consiste em recalculando o modelo com os parâmetros hidrológicos, modificados em 50% maiores e 50% menores a fim de se observar as respostas de calibração.

A **Tabela 11.5.1.** apresenta os valores de resíduos obtidos com a análise de sensibilidade.

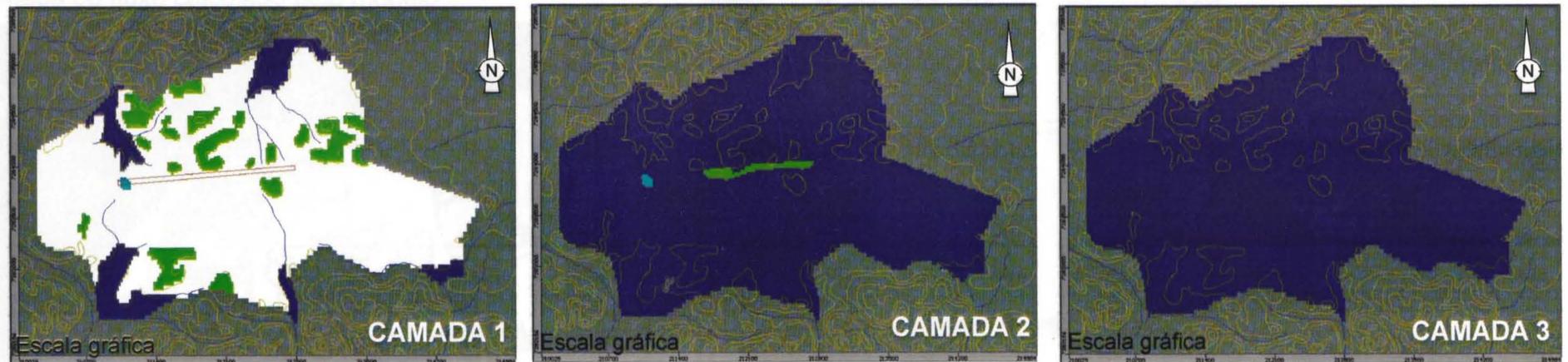
TABELA 11.5.1. RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE					
Parâmetro	Varição	ME	MAE	RMS	%Resíduo
Condutividade Hidráulica (K)	1,5 K	-1.004	1.08	1.186	21.84
	0.5 K	3.375	3.375	3.501	64.48
Recarga	1,5 R	1.901	1.901	1.984	35.53
	0.5 R	-1.69	1.69	1.83	33.7

ME: Resíduo médio

MAE: Resíduo da média absoluta

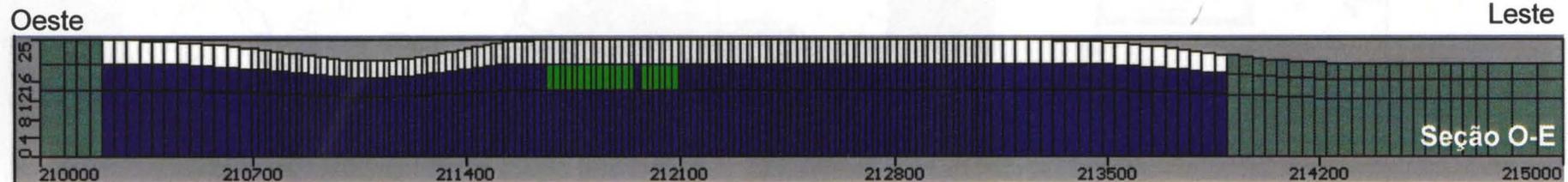
RMS: Desvio padrão

**FIGURA 11.3.1. PROPRIEDADES DE ARMAZENAMENTO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO AQÜÍFERO**



**LEGENDA**

-  Rios
-  Curvas de nível
-  Aeroporto

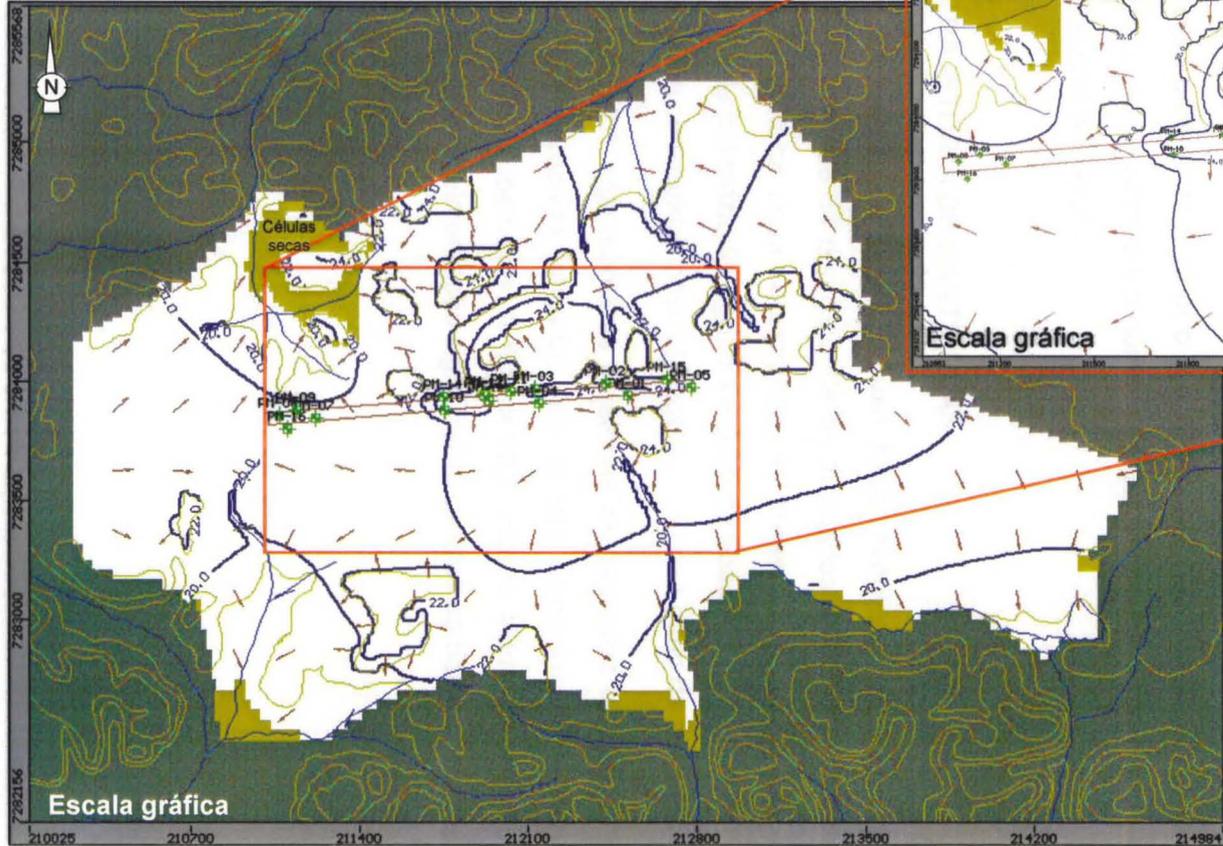


Valores dos parâmetros de armazenamento do aquífero e condutividade hidráulica

Zona	Condutividade hidráulica na direção x (cm/s)	Condutividade hidráulica na direção y (cm/s)	Condutividade hidráulica na direção z (cm/s)	Coefficiente de Armazenamento (1/m)	Vazão específica	Porosidade efetiva	Porosidade total
1	0,0001	0,0001	0,00001	0,00001	0,2	0,065	0,43
2	0,007	0,007	0,0007	0,00001	0,2	0,065	0,43
3	0,00001	0,00001	0,000001	0,00001	0,2	0,065	0,43
4	0,01	0,01	0,001	0,00001	0,2	0,065	0,43

**FIGURA 11.4.1. MODELO DE FLUXO CALIBRADO**

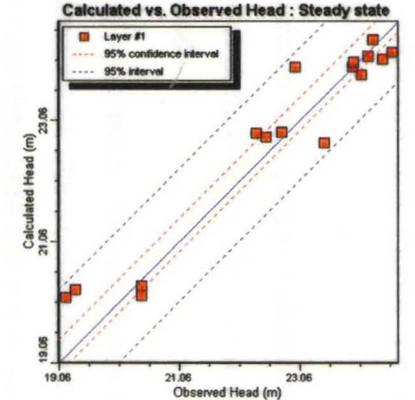
**A) Mapa de fluxo calculado pelo modelo**



**LEGENDA**

- Rios
- Curvas de nível
- Aeroporto
- PM-11 Poços de monitoramento
- Linhas equipotenciais
- Direção de fluxo

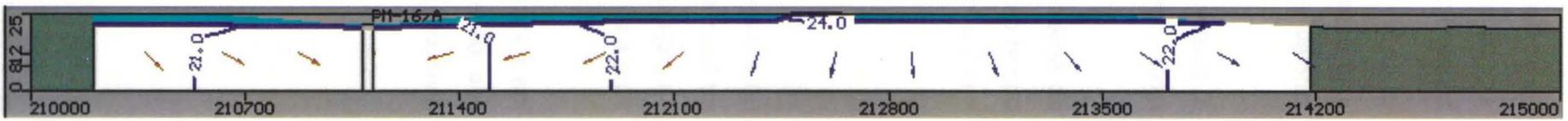
**C) Gráfico de calibração**



Num. of Data Points : 16  
 Max. Residual : 0.972 (m) at PM-08/A  
 Min. Residual : 0.013 (m) at PM-06/A  
 Residual Mean : 0.112 (m)  
 Abs. Residual Mean : 0.39 (m)

Standard Error of the Estimate : 0.129 (m)  
 Root Mean Squared : 0.512 (m)  
 Normalized RMS : 9.428 (%)  
 Correlation Coefficient : 0.964

**B) Seção Oeste-Leste**



---

Foi observado que os parâmetros de condutividade hidráulica e recarga provocam mudanças significativas no cálculo das cargas hidráulicas.

Ao aumentar o valor da condutividade hidráulica em 50% os valores de carga hidráulica calculados pelo modelo tornam-se todos menores que os valores observados em campo. Quando a condutividade hidráulica é diminuída em 50%, todos os valores calculados tornam-se maiores que os observados.

Com o aumento do valor de recarga os valores das cargas hidráulicas calculadas pelo modelo ficam maiores que os observados em campo e ao diminuir a recarga os valores calculados diminuem em relação aos observados.

Dada as características do aquífero, nível d'água raso, freático e bastante permeável, é possível verificar que o modelo é bastante sensível às alterações desses parâmetros. Com isso é importante garantir uma determinação mais detalhada dos mesmos na área.

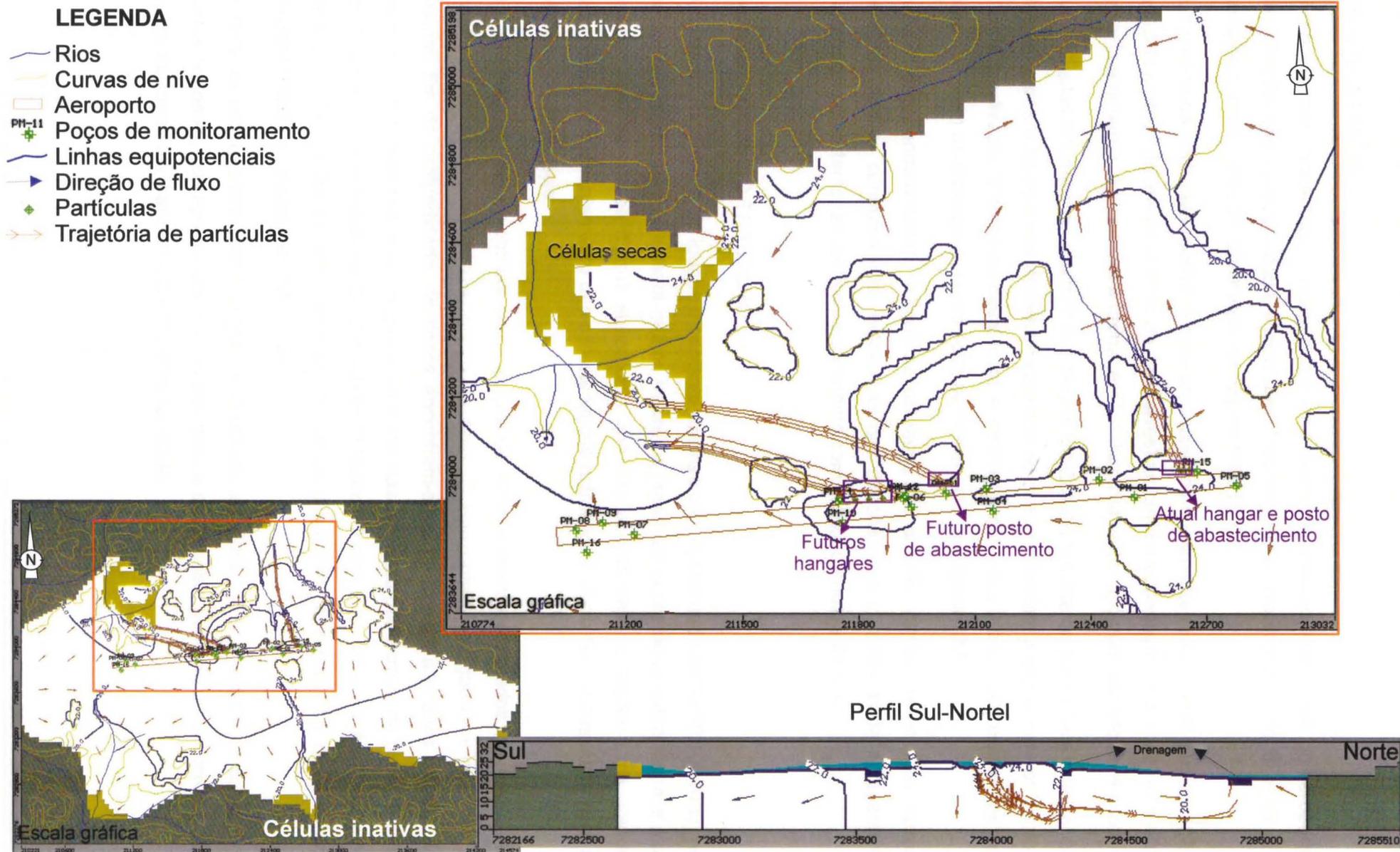
Foram feitas análises de sensibilidade no grid do modelo, reduzindo a malha na área de interesse para 10 m x 10 m o que não ocasionou mudança no RMS, aumentando o tempo de execução de cálculo e o número de células secas. Com o grid reduzido para 5 m x 5 m o modelo não convergiu.

## 12. TRAJETÓRIA DE PARTÍCULAS

Após a obtenção do mapa de fluxo, foram simuladas trajetórias de partículas lançadas no aquífero, partindo de pontos onde as atividades antrópicas representam risco potencial de contaminação da água subterrânea. As áreas selecionadas foram: a atual localização da empresa de pulverização agrícola e área de abastecimento das aeronaves (**Foto 4**) e a área onde serão construídos novos hangares e o novo pátio de abastecimento (**Foto 5**).

A **Figura 12.1.** representa as trajetórias de partículas obtidas, onde se pode observar em planta que partículas lançadas nos pontos selecionados, caminhariam em direção aos corpos d'água superficiais. A **figura 12.1.** mostra ainda uma seção vertical onde é possível observar uma movimentação significativa dessas partículas na direção vertical.

FIGURA 12.1. TRAJETÓRIA DE PARTÍCULAS



---

### 13. RESULTADOS

O modelamento matemático mostra que a área de estudo tem um fluxo radial do aeroporto em direção aos corpos d'água superficiais (nascentes) localizados a norte e a sul do aeroporto, como pode ser observado na **Figura 11.4.1**.

A trajetória de partículas mostra que na área utilizada atualmente (empresa de pulverização agrícola e posto de abastecimento de aeronaves) as partículas seguem na direção noroeste, aproximadamente, e alcançam a drenagem localizada a norte, após um período de 6 anos.

As partículas lançadas no aquífero nos pontos localizados a oeste da pista (nova localização dos hangares e do posto de abastecimento das aeronaves) tendem a seguir para os corpos d'água localizados a noroeste deste local, e demoram entre 6 e 8 anos, aproximadamente, para atingirem as drenagens, como pode ser observado na **Figura 12.1**.

Apesar das condutividades hidráulicas utilizadas na direção vertical serem dez vezes menores que as condutividades hidráulicas nas direções x e y, estas ainda apresentam valores altos, portanto, as partículas caminham com facilidade nessa direção.

### 14. LIMITAÇÕES DO TRABALHO

A bacia do Rio Ribeira de Iguape é bastante extensa com aproximadamente 16.700 Km<sup>2</sup>, no entanto, a região não apresenta muitos trabalhos regionais sobre água subterrânea e sua relação com os corpos d'água superficiais que são abundantes na região. Uma grande dificuldade foi o levantamento das características hidráulicas ( $S_s$  e  $S_y$ ), necessários para a elaboração do modelo.

As informações locais, obtidas pelos poços de monitoramento instalados na área, são insuficientes, considerando a extensão da área. O horizonte investigado se restringe a apenas 5m de profundidade, os poços encontram-se praticamente alinhados na direção leste-oeste em duas faixas ao longo da pista. Apenas um dado geotécnico, de porosidades, foi analisado. Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados na área leste do aeroporto. Dessa forma, extrapolou-se os dados para toda a região, os quais foram posteriormente ajustados por calibração.

A falta de um levantamento topográfico detalhado da área levou a adotar as cotas das cartas regionais, que apresentam curvas topográficas espaçadas, gerando uma discretização pobre da superfície, dado ao caráter plano da região.

---

## 15. CONCLUSÕES

Após a análise dos dados e informações obtidos, bem como, da elaboração do modelo matemático de fluxo, podemos concluir que:

É escassa a quantidade de informações hidrogeológicas precisas do vale do rio Ribeira de Iguape, embora esta seja uma região extensa.

O mapa de fluxo obtido através de modelagem é condizente ao elaborado conceitualmente, apresentando um desvio padrão de 9,4%.

A velocidade da água subterrânea calculada foi de 33m/ano, considerando o meio arenoso.

Há influência direta da variação da recarga e da permeabilidade nas cargas hidráulicas calculadas pelo modelo.

A trajetória de partículas confirmou o conceito de que a água subterrânea alimenta as drenagens locais.

O Aeroporto de Registro encontra-se sobre um divisor de águas, sendo que a água subterrânea alimenta as nascentes próximas, o que mostra a necessidade de atenção ao monitoramento da qualidade da água subterrânea.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB´SÁBER, A.N. *Os Domínios Morfoclimáticos da América do Sul: Primeira Aproximação*. Geomorfologia. São Paulo, 1977. n.52, p.1-22.

ALMEIDA, F.F.M de. Carneiro, C.D.R. *Origem e Evolução da Serra do Mar*. Revista Brasileira de Geociências, v. 28, n. 2. p. 135-150. 1998.

ANDERSON, M.P. & WOESSNER, W.W. 1992. *Applied Groudwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, San Diego, EUA. 1998. 381p.

CABRAL. J. *Movimento das Águas Subterrâneas*. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.(Coord.) *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza: CPRM; LABHID-UFPE, 1997. Cap. 3, p. 35–51.

CASA DA FLORESTA ASSESSORIA AMBIENTAL. *Relatório Ambiental Preliminar: Recuperação do Aeroporto de Registro*. Casa da Floresta. 2003.

CBH-RB. Comitê da Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul. *Relat.Zero*. 2003.  
<<http://sigrh.sp.gov.br/sigrh/ftp/relatorios/CRH/CBH-B/R0/index.html>>

CEMA CONSULTORIA E ESTUDOS AMBIENTAIS. *Estudos de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental.EIA/RIMA*. CEMA.2004.

CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS. *Dados Climáticos da Estação Meteorológica - F4-005 – Registro*. CTH-USP. 2003

CLEARY, R.W. *Águas Subterrâneas*. In *Engenharia Hidrológica*. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989. vol. 2, cap 5, p.292-404.

---

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo*. CETESB. 2002. São Paulo.

DAEE. Banco de Dados Fluviométricos do Estado de São Paulo (atualizados até 1997), FCTH, 1998.

DAEE. Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo, CD-ROM, FCTH, São Paulo, 1998.

FEITOSA, F.A.C. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. CPRM/LABHID-UFPE. Fortaleza. 1997. 412 p.

FETTER, C.W. *Applied Hydrogeology*, 4Th ed. Prentice Hall. New Jersey, EUA. 2001. 598p.

GUIGUER, N; FRANZ, T. *Visual ModFlow 4.1 - User's Manual*. WHI. Waterloo, Canadá. 2004. 567 p.

HASUI, Y; GIMENEZ, A.F; MELO, M.S. de. *Sobre as Bacias Tafrogênicas do Sudeste Brasileiro*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30. Anais... Recife: SBG, v. I, p. 382-392. 1978.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Pariqüera-Açu: Carta do Brasil, Folha SG-23-V-A-IV-1, Escala 1:50:000, 1971\_b*.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Registro: Carta do Brasil, Folha SG-23-V-A-IV-2, Escala 1:50:000, 1971\_a*.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, 1981a. Escala 1: 1000. 000.

---

IRITANI, M. *Modelação Matemática Tridimensional para a Proteção das Captações de Água Subterrânea*. 1999. f. 200. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

McDONALD, M.G. & HARBAUGH, A.W. *A Modular Three Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model*: Techniques of Water-Resources Investigations of the U. S. Geological Survey, Book 6, Modelling Techniques, Chapt. A1.

MELO, M.S. de. *A Formação Pariqüera-Açu e Depósitos Relacionados: Sedimentação, Tectônica e Geomorfogênese*, 1990. f. 211. Tese de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo.

MELO, M.S. de; Coimbra, A.M.; MORAES, M.C.de; FERNANDES, L.A. *Redefinição da Formação Pariqüera-Açu, Cenozóico do Estado de São Paulo*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, nº. 36, 1990, Natal. Anais...Natal: SBG., v. I, p. 324-338.

MELO, M.S. de; RICCOMINI, C.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M. de. *Geologia e Evolução das Bacias Tafrogênicas Continentais do Sudeste do Brasil*. *Revistas Brasileiras de Geociências*, 1985. v. 15, n. 3, p. 193-201.

PLANO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Consulta geral a home page oficial. Disponível em <[http://www.pnrh.cnrh-srh.gov.Br/docs/rh\\_atl\\_sud/texte/Atlântico\\_Sudeste.pdf](http://www.pnrh.cnrh-srh.gov.Br/docs/rh_atl_sud/texte/Atlântico_Sudeste.pdf)>

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Economia e Planejamento. Instituto Geográfico e Cartográfico - IGC. *Cartas topográficas: folhas Registro I, Córrego do Quilombo, Rio Bamburral e Bamburral de Baixo*. 1989. Escala 1:10.000.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO - SMA. *Proposta de Macrozoneamento do Vale do Ribeira*. São Paulo: SMA, Engecorps, 11/1996.

---

SENTELHAS, P.C. *et. al. Balanços Hídricos de 500 localidades brasileiras*. Núcleo de Monitoramento Agroclimático, Departamento de Ciências Exatas, ESALQ, USP, 2003. Disponível em: <<http://ce.esalq.usp.br>>

SOUZA, L.A.P.; TESSLER, M. G.; GALLI, V. *O Gráben de Cananéia*. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 26, n. 3, p. 139-150. 1996.

SUGUIO, K. *Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais*. São Paulo: Paulo's Com. Art. Graf. 366p. 1999.

SUGUIO, K.; TESSLER, M. G. Depósitos quaternários da planície costeira de Cananéia-Iguape. São Paulo. Publicação Especial do Instituto de Oceanografia - USP. V. 9: p. 1-33, 1992.

SUGUIO, K.; Martin, L. Geomorfologia das Restingas. In: II Simpósio de Ecossistemas Brasileiros da Costa Sul E Sudeste, Águas de Lindóia, 1990. Anais. Águas de Lindóia: 1990. v. 3, p.185-205.

TECNOHIDRO PROJETOS AMBIENTAIS. *Diagnóstico e Caracterização Ambiental: Aeroporto de Registro, SP*. São Paulo. Outubro 2003.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. FACULDADE DE GEOGRAFIA, FFLCH. LABORATÓRIO DE CARTOGRAFIA. Atlas do Estado de São Paulo. São Paulo, USP- Graf. s/d.

---

De acordo,



---

**Andréa Segura Franzini**

**Aluna**



---

**Prof. Dr. Alberto Pacheco**

**Orientador**



---

**Monalisa Horvath**

**Co-Orientadora**

---

---

## **ANEXO FOTOGRAFICO**

---



Foto 1. - Pequeno curso d'água à margem Leste da Pista de Pouso



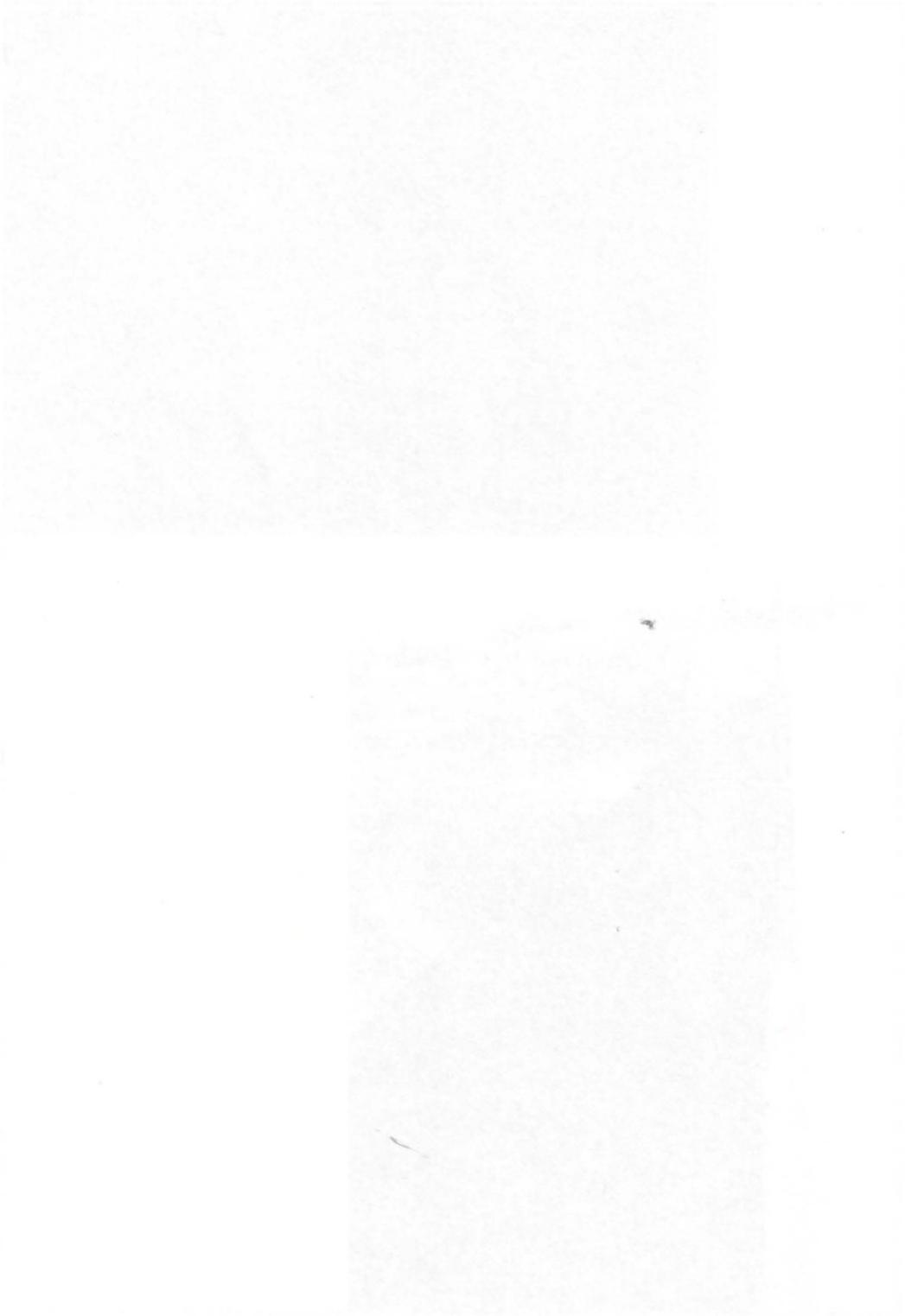
Foto 2. - Rio Carapiranga – Afluente do Ribeira de Iguape

---



Foto3 . - Detalhe da Margem do Rio Carapiranga





DOAÇÃO \_\_\_\_\_  
LGC-USP  
Data: 24/03/06



Foto 4. - Empresa de Pulverização e Área de Abastecimento Atual

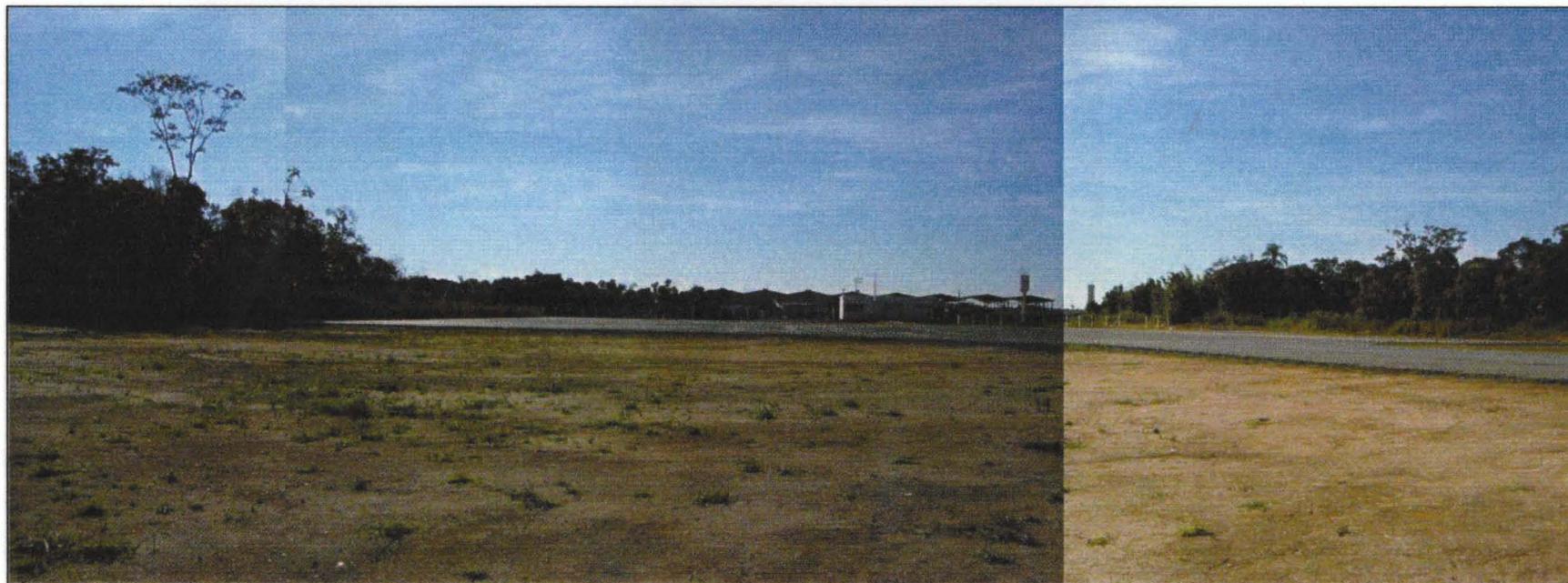


Foto 5. – Localização dos Novos Angares e Posto de Abastecimento de Combustíveis

---