

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**ESTIMATIVA DA RECARGA DA BACIA SEDIMENTAR DO
RIO DO PEIXE ATRAVÉS DA MODELAGEM MATEMÁTICA
DO FLUXO SUBTERRÂNEO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JULIO CÉSAR SEBASTIANI KUNZLER

CAMPINA GRANDE - PB

2007

JULIO CÉSAR SEBASTIANI KUNZLER

**ESTIMATIVA DA RECARGA DA BACIA SEDIMENTAR DO RIO DO
PEIXE ATRAVÉS DA MODELAGEM MATEMÁTICA DO FLUXO
SUBTERRÂNEO**

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao
Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Civil e Ambiental – Área de Concentração
Engenharia Hidráulica para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Civil e
Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Hans Dieter Max Schuster

CAMPINA GRANDE - PB

AGOSTO de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

K96e

2007 Kunzler, Júlio César Sebastiani.

Estimativa da recarga da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe através da modelagem matemática do fluxo subterrâneo / Júlio César Sebastiani Kunzler. — Campina Grande, 2007.

79f. : il

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Hans Dieter Max Schuster.

1. Recarga de aquíferos. 2. Modelagem Hidrogeológica. 3. Água Subterrânea. I. Título.

CDU- 556.332.6(043)

**ESTIMATIVA DA RECARGA DA BACIA SEDIMENTAR DO RIO DO
PEIXE ATRAVÉS DA MODELAGEM MATEMÁTICA DO FLUXO
SUBTERRÂNEO**

JULIO CÉSAR SEBASTIANI KUNZLER

Dissertação Aprovada em 02 de Agosto de 2007



PROF. Dr. HANS DIETER MAX SCHUSTER

ORIENTADOR



PROF. Dr. JOSÉ GEÍLSON ALVES DEMÉTRIO

EXAMINADOR



PROF. Phd. VAJAPEYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN

EXAMINADOR

CAMPINA GRANDE

AGOSTO DE 2007

À memória de minha mãe,
Tereza Sebastiani Kunzler

AGRADECIMENTO

Agradeço, em primeiro lugar ao professor Hans Dieter Max Schuster pela orientação e paciência para com minha pessoa e pelo apoio e companheirismo ao longo do desenvolvimento da dissertação.

À FINEP, por ter financiado o projeto “Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro”, e, com isso, oportunizado o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também ao CNPq-CTHidro, pela concessão da bolsa para realização do estudo.

A CPRM, pela oportunidade de desenvolver este trabalho conjuntamente e apoio.

Aos companheiros de atividade Roseniltom (Maracuxá) e Kiosthenes (o Grego) pelo auxílio nos t

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o intuito de se estimar a recarga anual à bacia sedimentar do rio do Peixe, no estado da Paraíba, e também o comportamento da bacia frente à cenários de exploração.

Para a elaboração do estudo foi utilizado como ferramenta o *software MODFLOW* para a simulação do sistema aquífero. Os dados de campo, utilizados aqui foram coletados pela equipe formada por CPRM-UFPG, em um total de 7 campanhas, realizadas na bacia ao longo de dois anos.

O *software* citado, através do pacote *PEST*, foi utilizado na calibração das condutividades hidráulicas, em regime estacionário e do coeficiente de armazenamento, em regime transitório e durante a estação seca na bacia, uma vez que não havia dados de testes de bombeamento no local de estudo, e por último da recarga do sistema, também em regime transitório, mas durante a estação chuvosa, na seqüência cronológica de realização.

Os valores determinados para a recarga no período entre novembro de 2005 e maio de 2006 e entre novembro 2006 e maio de 2007 e simulações de cenários hipotéticos de bombeamento em 200 poços distribuídos na bacia, durante 180 dias mostram que o sistema apresenta superávit hídrico, já que o uso das águas subterrâneas na região é bastante restrito, praticamente se resumindo ao abastecimento de pequenos núcleos de população, geralmente localizados na área rural.

ABSTRACT

This study was carried out with the intention to verify the annual recharge to the sedimentary basin of Rio do Peixe, in the state of Paraíba, and to verify the behavior of the water level when various sceneries of exploitation are considered.

For the elaboration of the study, the program MODFLOW was used as a tool for the system simulation and the calibration of the recharge. The field data used in the study had been collected in the whole basin by the group formed by CPRM-UFCG in 7 campaigns during two years.

In the numerical model the calibration of the hydraulic conductivities, the specific yield coefficients and the recharge rates of the study area were done by the automatic parameter estimation program PEST, since there were no pumping test data available.

Hypothetical simulations with an assumed daily pumping rate over 180 days in nearly 200 wells distributed over the basin show that the recharge values are much higher than supposed the water exploitation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivos Gerais	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Fluxo Subterrâneo em Meio Poroso.....	3
2.2 Modelos Matemáticos e o Método de Diferenças Finitas	6
2.3 Métodos de Estimativa da Recarga.....	9
2.4 Trabalhos Anteriores Realizados na Área.....	12
2.4.1 Estudos Geológicos da Região	12
2.4.2 Estudos Hidrogeológicos da Região	15
3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	17
3.1 Caracterização da Área de Estudo.....	17
3.1.1 Localização e Ocupação.....	17
3.2 Clima	18
3.3 Relevo.....	19
3.4 Hidrografia	20
3.5 Geologia	21
3.6 Tipo de Solos, Uso do Solo e Vegetação	23
3.6.1 Tipos de Solos	23
3.6.2 Vegetação.....	23
3.6.3 Uso do Solo	23
3.7 Utilização das Águas Subterrâneas na Área.....	24

4	METODOLOGIA	25
4.1	Área de Estudo e Domínio do Modelo	25
4.2	Modelo Matemático Utilizado	25
4.3	Etapas da Modelagem	26
4.3.1	Definições dos Objetivos do Processo de Modelagem	27
4.3.2	Elaboração do Modelo Conceitual´	28
4.3.3	Esquematização do Modelo.....	37
4.3.4	Calibração do Modelo	37
4.3.5	Verificação do Modelo.....	40
4.3.6	Aplicação do Modelo Matemático.....	40
4.4	Estimativa da Transmissividade	43
4.4.1	Testes de Bombeamento	43
4.4.2	Testes de Produção	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	Calibração do Modelo	47
5.1.1	Calibração de Condutividade Hidráulica	47
5.1.2	Calibração de Coeficiente de Armazenamento, S_y	52
5.1.3	Calibração da Recarga	55
5.2	Quantificação da Recarga	58
5.2.1	Vazão do Aquífero na Saída da Sub-Bacia de Sousa para a Sub-Bacia de Pombal	61
5.3	Verificação do Modelo.....	62
5.4	Simulação de Cenários Hipotéticos de Exploração do Aquífero	63
5.4.1	Balanço Hídrico	66
5.5	Análise da Transmissividade.....	66
6	DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	68
7	RECOMENDAÇÕES.....	71
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estratigrafia do furo Lagoa do Forno (Correia, 2007).	14
Figura 2.2 - Mapa do topo do embasamento do cristalino (Françolin, 1992).	14
Figura 3.1 - Localização da área de estudo.	17
Figura 3.2 - Imagem SRTM com o relevo da região e a delimitação da bacia sedimentar.	20
Figura 3.3 - Hidrografia da região, estações pluviométricas e os limites da bacia sedimentar.	21
Figura 3.4 - Mapa das formações geológicas da bacia sedimentar do rio do Peixe, (CPRM-UFCG, 2005).....	22
Figura 3.5a, b - Paisagens da região no fim da época das chuvas (maio de 2006).....	23
Figura 3.6a - Poço tubular profundo; b - Poço amazonas da região. Ambos utilizados para o abastecimento de pequenos núcleos e ou propriedades rurais.	24
Figura 3.7a - Poço com catavento, típico da região; b - poço utilizado para abastecimento de Poço José de Moura.....	24
Figura 4.1 - Fluxograma das etapas realizadas na modelagem (Anderson e Woessner, 1992; apud:Cabral e Demétrio, 1997).	27
Figura 4.2 - Condições de contorno utilizadas no modelo e discretização da malha.	30
Figura 4.3 - Topografia inserida no modelo, gerada a partir de imagens SRTM.....	31
Figura 4.4 - Topografia da base do modelo utilizando informação de Françolin (1992).	31
Figura 4.5 - Diferença em metros [m] entre as cotas, obtidas com GPS Geodésico e imagem <i>SRTM</i>	32
Figura 4.6 - Correlação feita entre os dados de imagens SRTM e nivelados em campo.....	33
Figura 4.7 - Histograma de chuvas entre janeiro de 2005 e maio de 2007.	34
Figura 4.8 - Variação dos níveis potenciométricos coletados nas 7 campanhas (21 poços com todas as medições).....	35
Figura 4.9 - Etapas seguidas na calibração do modelo.	38
Figura 5.1 - Localização dos poços de observação na bacia, com as respectivas elevações de cargas hidráulicas para o mês de agosto de 2005.....	48
Figura 5.2 - Mapa potenciométrico observado em agosto de 2005, com algumas linhas de fluxo.....	48
Figura 5.3 - Zonas utilizadas para a calibração, de acordo com a geologia da bacia.	49

Figura 5.4 - Figura mostrando valores calculados versus observados para agosto de 2005 (sem a sub-bacia Pombal). Em vermelho calculado e azul observado.	49
Figura 5.5 - Diagrama de dispersão (<i>Scatter Diagram</i>) obtido na calibração estacionária para 61 poços usados nesta calibração.	51
Figura 5.6 - Diagrama de dispersão (<i>Scatter Diagram</i>) entre h calc (nov-05) e h obs*(nov-05).	54
Figura 5.7 - Mapa potenciométrico calculado para novembro de 2005, após a calibração de S_y	55
Figura 5.8 - Diagrama de dispersão obtido na calibração da recarga entre os meses de novembro e maio.	55
Figura 5.9 - Mapa potenciométrico calculado para maio de 2006, após a calibração da recarga.	58
Figura 5.10 - Vazão lateral calculada por <i>WATER BUDGET</i> na saída do sub-bacia Sousa para sub-bacia Pombal.	61
Figura 5.11 - Rebaixamento causado pelo bombeamento (regime estacionário $Q=250$ $m^3/dia/poço$).	63
Figura 5.12 - Rebaixamento causado pelo bombeamento (estacionário $Q=500$ $m^3/dia/poço$).	64
Figura 5.13 - Rebaixamento causado por 180 dias de bombeamento (transiente $Q=250$ $m^3/dia/poço$).	65
Figura 5.14 - Mapa residual entre mapa potenciométrico com e sem bombeamento (transiente $Q=500$ m^3/dia).	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Tabela com dados relevantes dos municípios que estão inseridos parcial ou totalmente na bacia, (IBGE, 2006; CPRM-UFMG, 2005).....	18
Tabela 3.2 - Estações pluviométricas com dados de precipitação (mm) na bacia (ANA, 2006).	19
Tabela 3.3 - Valores médios de temperaturas registrados na região, PDRH-BRP (2000).....	19
Tabela 4.1 - Número de poços com medição de nível, equipe responsável e tipo de poço com nível medido.	34
Tabela 4.2 - Poços utilizados na verificação do modelo e nos quais foram medidos níveis nas 7 campanhas (vide as carga hidráulicas das 7 campanhas na figura 4.7).....	36
Tabela 4.3 – Poços com teste de produção analisados.....	44
Tabela 5.1 - Valores de K calibrados.	50
Tabela 5.2 - Esquema de correção dos dados para a calibração do coeficiente de armazenamento, S_y	53
Tabela 5.3 - Valores de coeficiente de armazenamento, S_y , calibrados.....	54
Tabela 5.4 - Dados corrigidos de carga hidráulica para a calibração da recarga.	56
Tabela 5.5 - Valores de recarga calibrados para o período entre os meses de novembro de 2005 e maio de 2006.	57
Tabela 5.6 - Calibração da recarga para o período entre novembro de 2006 e maio de 2007.	57
Tabela 5.7 - Valores de recarga calibradas através do <i>PEST</i> durante o período chuvoso entre novembro de 2005 e maio de 2006.	59
Tabela 5.8 -Valores de recarga calibradas através do <i>PEST</i> durante o período chuvoso entre novembro de 2006 e maio de 2007.	60
Tabela 5.9 - Comparação de níveis das cargas hidráulicas calculadas versus observadas em todas as 05 campanhas de coleta pela modelagem em regime transitório de 650 dias duração.	62
Tabela 5.10 - Volumes ($\times 10^6 \text{ m}^3$) de água de recarga, bombeamento e superávit, regime transiente (180dias).	66
Tabela 5.11 - Volumes ($\times 10^6 \text{ m}^3$) de água de recarga, bombeamento e superávit, regime estacionário.	66
Tabela 5.12 – Resultados da transmissividades máximas e mínimas com base na capacidade específica.	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A irregularidade na distribuição, tanto temporal quanto espacial, das chuvas e os grandes índices de evaporação dos reservatórios de águas superficiais torna imprescindível o conhecimento das condições da disponibilidade hídrica da região semi-árida brasileira.

Dentre os recursos hídricos que devem ter sua ocorrência, regime e disponibilidades conhecidas estão as águas subterrâneas da região, visto que, em alguns locais, assumem importância crucial para o desenvolvimento.

Este trabalho foi realizado com o intuito de se conhecer melhor o comportamento hidrogeológico de uma das maiores reservas de água subterrâneas do interior do Estado da Paraíba, a bacia sedimentar do rio do Peixe, localizada no sertão do estado, em uma região com cidades importantes como Sousa e Cajazeiras, que estão entre as maiores do estado.

O trabalho foi desenvolvido com o auxílio de um programa para a simulação do fluxo subterrâneo, o amplamente utilizado *MODFLOW*, (McDonald e Harbaugh,1988), e que é hoje, possivelmente, o programa mais utilizado no mundo para os estudos de modelagem de águas subterrâneas.

É importante salientar que a utilização de um modelo numérico para a simulação do comportamento do fluxo ou transporte de massa em um aquífero não garante o perfeito entendimento deste, pois um bom modelo requer muitos dados de campo, observações, testes e tempo para verificar sua validade.

Assim pode-se dizer que também faz parte deste trabalho, de forma direta e indireta, os dados coletados pela equipe CPRM-UFPA nas diversas campanhas de medição de níveis estáticos na área de estudo e outros trabalhos realizados na bacia no decorrer do andamento do projeto intitulado “Estudo do Comportamento Hidrogeológico da Bacia Sedimentar do rio do Peixe”, o qual faz parte da rede de estudo financiada pela FINEP que leva o nome “Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro”.

A seguir são descritos os objetivos gerais e específicos deste trabalho, desenvolvido para esta bacia com auxílio do programa supra citado.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são: estabelecer um modelo matemático mais representativo possível das condições de campo para a determinação da recarga e simulação da bacia sedimentar do Rio do Peixe, no sertão paraibano e apresentação da dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia civil e ambiental pela UFCG.

1.2.1 Objetivos Gerais

Em linhas gerais, essa dissertação tem por objetivo a verificação do comportamento hidrogeológico, no que tange à recarga, da bacia sedimentar do rio do Peixe, Estado da Paraíba, sendo que, neste trabalho, para que estes objetivos sejam atingidos, são utilizados modelos matemáticos para simulação de aquíferos, informações de campo coletadas em campanhas realizadas pela UFCG-CPRM, além de outras ferramentas que possam auxiliar nos estudos.

1.2.2 Objetivos Específicos

No que tange aos objetivos específicos, pode-se dizer que são os seguintes:

- Δ Estabelecer um modelo matemático para a simulação da bacia sedimentar do rio do Peixe, com a calibração dos parâmetros hidrodinâmicos da área, através do modelo;
- Δ Quantificar a recarga aportada à bacia citada acima, através da calibração desta e da simulação do sistema, visando estabelecer valores de disponibilidade hídrica subterrânea da área;
- Δ Fornecer subsídios a futuros trabalhos na região.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fluxo Subterrâneo em Meio Poroso

Aqui é apresentada uma pequena revisão sobre o fluxo subterrâneo no aquífero que é caracterizado por: (1) a porosidade n (2) a condutividade hidráulica, K e (3) o coeficiente de armazenamento, S .

A água subterrânea sempre se move de áreas de alto potencial para áreas de baixo potencial. Embora o conceito de potencial envolva pressão, gravidade e energia cinética, na prática, mede-se a altura da água acima de um determinado datum de referência nos poços construídos como piezômetros.

A lei de Darcy descreve o fluxo laminar de água em um cilindro de comprimento L e área de seção A preenchido por meio poroso de condutividade hidráulica K . A vazão da saída Q é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico ao longo do seu percurso, Dh/DL e ao fator de proporcionalidade, que é a condutividade hidráulica, K , expressa em comprimento por tempo $[L/T]$:

$$Q = A K \frac{Dh}{DL} \quad [L^3/T] \quad (2.1)$$

E dividindo a expressão pela área A , vem:

$$q = - K \frac{Dh}{DL} \quad [L/T] \quad (2.2)$$

Onde $q = Q/A$ é a descarga específica (ou a velocidade de Darcy ou a velocidade aparente).

O princípio básico do fluxo é a lei de continuidade (ou conservação da massa), que é expressa através das vazões de entrada e saída em um volume representativo (Anderson e Woessner, 1992).

$$Q_{saída} - Q_{entrada} = \frac{DV}{Dt} \quad (2.3)$$

Sendo $Q_{saída}$ = vazão que sai do sistema, $Q_{entrada}$ = vazão que entra no sistema, DV = o volume de água retirado ou adicionado e Dt = intervalo de tempo.

A vazão define-se como:

$$Q = qA = \frac{DV}{Dt} = KAi = K \frac{3/4h}{3/4} \quad (2.4)$$

Onde q = vazão específica, i é o gradiente hidráulico $\frac{3/4h}{3/4}$ e A = área da seção. Inseridas na equação de continuidade (2.3) as vazões específicas q_x , q_y , q_z para as três direções x,y,z chega-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3/4q_x}{3/4} + \frac{3/4q_y}{3/4} + \frac{3/4q_z}{3/4} \right) Dx Dy Dz = \frac{DV}{Dt} \quad (2.5)$$

A definição do coeficiente de armazenamento específico é:

$$S_s = - \frac{DV}{Dh Dx Dy Dz} \quad (2.6)$$

Onde Dx , Dy e Dz = três dimensões do volume representativo, Dh = variação da carga hidráulica e S_s = coeficiente de armazenamento específico.

Então:

$$\frac{DV}{Dt} = - S_s \frac{Dh}{Dt} Dx Dy Dz \quad (2.7)$$

A equação de continuidade escreve-se agora:

$$\frac{3/4q_x}{3/4} + \frac{3/4q_y}{3/4} + \frac{3/4q_z}{3/4} = - S_s \frac{3/4h}{3/4}, \quad W \quad (2.8)$$

Onde W representa os diversos termos de sumidouro ou fonte, tais como recarga, evaporação e bombeamento.

Aplicando a lei de Darcy em componentes nas três direções x, y, z :

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Onde K_x, K_y e K_z são os componentes principais do tensor simétrico da condutividade hidráulica, \vec{K} , nas direções x, y, z e $\partial h / \partial x, \partial h / \partial y, \partial h / \partial z$ os gradientes hidráulicos nas direções x, y, z , respectivamente.

Finalmente, obtém-se a equação geral para o fluxo subterrâneo no meio poroso anisotrópico e não-homogêneo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (2.10a)$$

Ou expressa pelo operador diferencial Nabla, ∇ :

$$\nabla \cdot (\vec{K} \nabla h) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (2.10b)$$

Para resolver a equação de fluxo é preciso conhecer as condições de contorno, as quais podem ser dos três tipos seguintes:

1. $h = h_1$ carga hidráulica especificada no contorno do domínio (condição de Dirichlet)
2. $-T \nabla h \cdot \vec{n} = q_1$ fluxo especificado no contorno do domínio (condição de Neumann)
3. $-T \nabla h \cdot \vec{n} = t(h_1 - h)$ fluxo dependendo da carga hidráulica (condição de Cauchy)

Onde T = transmissividade, h_1 = carga hidráulica no aquífero e h' = carga hidráulica num aquífero superior e/ou inferior, q_1 = fluxo especificado, t = condutância e \vec{n} = vetor unitário ortogonal ao contorno.

A velocidade real de deslocamento de uma partícula é dada pela divisão da vazão específica, q , pela porosidade efetiva, n_{ef} , do meio poroso.

$$\mathbf{C}_v = \frac{\mathbf{q}}{n_{ef}} = - \frac{[K]}{n_{ef}} \mathbf{\bar{e}}_h \quad (2.11)$$

Onde o gradiente hidráulico é definido como: $\mathbf{\bar{e}}_h = \frac{\partial h}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial h}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial h}{\partial z} \mathbf{k} \quad (2.12)$

2.2 Modelos Matemáticos e o Método de Diferenças Finitas

Os modelos são ferramentas que visam aproximar ao máximo as condições físicas reais de campo e são fundamentais para o planejamento e previsão de situações reais.

Quanto ao tipo os modelos podem ser tanto físicos quanto matemáticos, porém os modelos físicos são mais utilizados para estudos em laboratório, enquanto que os modelos matemáticos são utilizados, na prática, para a modelagem de aquíferos (Cabral e Demétrio, 1997).

Os modelos matemáticos se dividem em analíticos e numéricos, sendo que os primeiros utilizam soluções analíticas para a resolução de problemas simplificados, enquanto que os modelos numéricos lançam mão de soluções numéricas para a aproximação da solução das equações diferenciais parciais que regem o fluxo de água subterrânea.

Dentre os modelos numéricos se destacam os modelos que usam diferenças finitas e elementos finitos para resolver as equações diferenciais e, sendo o mais utilizado o que usa diferenças finitas para a simulação do fluxo.

A modelagem numérica é utilizada para a resolução das equações de fluxo, de forma aproximada, uma vez que os sistemas aquíferos geralmente não são homogêneos e não apresentam contornos bem definidos, ou seja, onde os métodos analíticos não resolvem com precisão as equações.

Entre os métodos numéricos utilizados para resolver a equação diferencial de fluxo, o Método de Diferenças Finitas é mais usado por causa da disponibilidade do programa *MODFLOW* através do *United States Geological Survey (USGS)*.

O *MODFLOW* utilizando Método de Diferenças Finitas para a resolução da equação geral do fluxo subterrâneo oferece muitas opções para tratar todas as situações hidrogeológicas importantes e, além disso, suas versões com pré e pós-processadores tem interface amigável e é fácil de manejar pelo usuário.

No *MODFLOW*, em cada célula deve ser obedecido o balanço de massa, ou seja, o somatório do fluxo que entra na célula deve ser igual ao somatório do fluxo que sai mais a variação do armazenamento nesta.

$$\sum Q_i = S_s \frac{Dh}{Dt} \cdot DV \quad (2.13)$$

Sendo, $\sum Q_i$ a soma das vazões horizontais e verticais que entram e saem da célula, S_s um equivalente ao armazenamento específico, Dh/Dt a variação da carga hidráulica pelo tempo e DV o volume.

O Método de Diferenças Finitas envolve o processo de discretização da área do modelo, que transforma o problema físico contínuo em um problema discreto, com um número finito de células (ou nós) na qual a carga hidráulica deve ser determinada.

O domínio do modelo é discretizado por uma malha formada por quadrados ou retângulos de dimensão Δx e Δy e seu contorno é definido com as respectivas condições de contorno. Em cada nó, a expressão matemática do problema é aproximada por uma expressão em diferenças finitas em relação aos nós adjacentes.

Com a utilização da diferença central para o gradiente hidráulico, as primeiras derivadas das cargas hidráulicas nas direções x e y são:

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} \frac{h_{i+1/2,j} - h_{i-1/2,j}}{\Delta x} \quad \cdot \quad \frac{\Delta h}{\Delta y} \frac{h_{i,j+1/2} - h_{i,j-1/2}}{\Delta y} \quad (2.14)$$

E as segundas derivadas nas direções x e y são:

$$\frac{\Delta^2 h}{\Delta x^2} \frac{h_{i-1,j} - 2h_{i,j} + h_{i+1,j}}{(\Delta x)^2}, \quad \frac{\Delta^2 h}{\Delta y^2} \frac{h_{i,j-1} - 2h_{i,j} + h_{i,j+1}}{(\Delta y)^2} \quad (2.15)$$

E a aproximação para o termo de tempo no instante n e $n+1$ é

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (2.16)$$

Aplicando as derivadas para um aquífero confinado bidimensional, homogêneo e isotrópico como, por exemplo, (Cabral e Demétrio, 1997):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{W}{T} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.17)$$

Obtém-se a equação de fluxo subterrâneo expressa em diferenças finitas.

$$\frac{h_{i-1,j} - 2h_{ij} + h_{i+1,j}}{(Dx)^2} + \frac{h_{i,j-1} - 2h_{ij} + h_{i,j+1}}{(Dy)^2} - \frac{W}{T} = \frac{S}{T} \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{Dt} \quad (2.18)$$

Onde, $h = h(x, y, t^*)$ é a carga hidráulica nas células contíguas à célula calculada e $T = KB$ é a transmissividade sendo b a espessura do aquífero.

O problema bidimensional mostrado na equação (2.18) é definido como problema conhecido como método da solução explícita (colocando $t^* = t$) que mostra estabilidade apenas na modelagem estacionária e no caso não estacionário obtém-se apenas uma solução quando a razão for menor que um determinado valor, pois a equação considera o fluxo constante entre o intervalo t e $t + Dt$. Para problema bidimensional esta razão é definida como:

$$\frac{TDt}{S[(Dx)^2 + (Dy)^2]} < 0,25 \quad (2.19)$$

Na prática, a equação (2.18) é apresentada com o método da solução implícita (colocando $t^* = t + \alpha t$) por causa deste problema de estabilidade. Em geral, a carga hidráulica $h = h(x, y, t^*)$ é substituída nesta equação pela carga hidráulica média entre $h(t)$ e $h(t + \alpha t)$ ou seja $\alpha := 0,5$ devido ao chamado esquema de Crank-Nicholson definido por:

$$h_{i,j}(t^*) = (1 - \alpha)h_{i,j}(t) + \alpha h_{i,j}(t + Dt) \quad (2.20)$$

Sendo $\alpha = 0$ a solução explícita, e $\alpha = 1$ a solução totalmente implícita.

A solução do modelo é a solução de um sistema das equações lineares e é feita geralmente por vários diferentes processos iterativos oferecidos pelo próprio MODFLOW, até

que seja encontrado um valor mínimo na variação da carga hidráulica, de maneira que podemos dizer que o modelo convergiu para uma solução.

2.3 Métodos de Estimativa da Recarga

Sabe-se que para o gerenciamento sustentável de recursos das águas subterrâneas, a taxa de recarga obtida pelo aquífero é a grandeza hidrogeológica mais importante, porém a que apresenta maior incerteza em sua estimativa, em virtude da falta de dados fundamentais para sua determinação, como por exemplo, dados de coeficientes de armazenamento espacializados em um aquífero. Não obstante, pouco é conhecido sobre a quantidade de recarga necessária para sustentar aquíferos explorados, porque ela não pode ser medida diretamente numa grande escala espacial. Mesmo depois de tantos anos de pesquisa, existem vários métodos diferentes que podem ser aplicados, dependendo das condições do aquífero.

Para uma exploração racional e sustentável das águas subterrâneas, as taxas de retirada e de recarga devem ser conhecidas para se gerenciar o regime de bombeamento até, no máximo, o limite da disponibilidade hídrica, sendo que esta depende da recarga e das características do próprio aquífero.

Nas regiões semi-áridas, a evapotranspiração potencial normalmente ultrapassa as taxas médias de precipitação, o que significa que apenas em situações favoráveis a água precipitada é suficiente para a recarga. A recarga dos aquíferos é irregular tanto no espaço quanto no tempo e a observação e as análises dos processos dinâmicos na maioria dos aquíferos são limitadas. Estes fatores junto com a variação na topografia, da cobertura vegetal, dos tipos de solo e de outros elementos hidrológicos dificultam o monitoramento e a medição do processo de recarga.

Devido a esta complexidade inerente de tratar o problema de recarga, os vários métodos existentes, podem ser mais ou menos confiáveis para fazer uma boa estimativa da recarga da água subterrânea, dependendo dos parâmetros que são utilizados na estimativa e das características do aquífero.

Os atuais métodos de recarga em uso classificam-se em 04 grupos (*Arbeitskreis Grundwasserneubildung, 1977; Simmers, 1997; UNEP/DEWA/UNESCO, 2002*):

- I. Medidas Diretas
- II. Balanços Hídricos
- III. Métodos Darcianos

IV. Métodos de Traçadores

Grupo I. O método deste grupo utiliza o emprego de um lisímetro, onde a recarga é medida diretamente pela medição do peso da coluna de solo com área superficial de 1 m². Outro método direto é a medição do teor da umidade do solo em diferentes profundidades pela sonda de nêutron (*Neutron Probe*) e/ou refractometria no domínio de tempo (*Time-Domain Refractometry, TDR*). Estes valores podem ser utilizados na estimativa do valor de recarga.

Grupo II. No grupo de balanços hídricos encontra-se a maioria dos métodos aplicados. O método do balanço de umidade de solo, (*Soil Moistures Budgets*) utiliza dados meteorológicos disponíveis em uma estação, fórmulas empíricas de evaporação e outras, tais como capacidade de campo, ponto de murcha e espessura da zona de raízes para estabelecer um modelo numérico baseado em um algoritmo iterativo para cada intervalo de tempo Δt de modo que:

$$q(t + \Delta t) = q(t) + (P - ET_{real} - R - Es) \Delta t \quad (2.21)$$

Onde q := umidade de solo, P = precipitação, ET_{real} = evatranspiração real, R = percolação ou recarga e Es = deflúvio ou escoamento superficial.

O método da flutuação do nível de água (*Water Table Rise Method*) é o método que indica claramente o efeito da recarga depois de ter aplicado a correção do efeito da pressão atmosférica. Se o coeficiente de armazenamento, S_y , for conhecido e, também, os fluxos de entrada e saída da bacia, a flutuação de nível d'água pode ser transformada em volume d'água. A estimativa do balanço hídrico de aquífero pode ser determinado no intervalo de tempo, Δt , pela fórmula:

$$R = S_y \frac{Dh}{\Delta t} - \frac{(Q_{entra} - Q_{saida})}{A} + \frac{Q_{poços}}{A} \quad [L/T] \quad (2.22)$$

Onde Q_{entra} e Q_{saida} = fluxos laterais atravessando o domínio, $Q_{poços}$ = taxas de bombeamento, S_y = coeficiente de armazenamento do aquífero freático (*Specific Yield*), Δh = variação da carga hidráulica e A = área do aquífero.

O método da análise de hidrograma de uma estação fluviométrica (*River Baseflow Method*) é baseado na pressuposição de que o fluxo basal separado do hidrograma do rio representa o fluxo efluente do aquífero ou a recarga R , sem considerar uma taxa possível de escoamento subterrâneo que sai do aquífero sem fluir ao rio. A condição necessária é que o perímetro do aquífero seja aproximadamente igual à área de drenagem da bacia. A recarga é encontrada subtraindo-se da precipitação a água liberada por evapotranspiração e escoamento superficial.

$$R = P - ET_{real} - Es \quad [L/T] \quad (2.23)$$

Onde R = recarga, P = precipitação, ET_{real} = evapotranspiração real e Es = escoamento superficial.

O método da Precipitação-Recarga (*Rainfall-Recharge Relationship*) expressa a quantidade da recarga como uma percentagem da taxa de precipitação, onde é considerada relação linear entre chuva e infiltração, sendo possível estimar uma taxa de recarga.

O método da análise da curva de recessão do rio ou nascente (*Spring or River Flow Recession Curves*) interpreta a curva exponencial da depleção, na qual a constante associada com o tempo de depleção será determinada. Junto com o conhecimento estimado do volume armazenado do aquífero drenado, a constante de recessão permite uma estimativa da recarga.

$$Q(t) = Q_0 \exp(-\alpha t) \quad [L^3/T] \quad (2.24)$$

Onde $Q(t)$ = vazão no tempo t , Q_0 = vazão no tempo t_0 e $[\alpha]$ = constante de recessão.

Grupo III. Todos os métodos Darcianos estimam o fluxo a partir do gradiente da carga e da condutividade hidráulica. Por isso, estes métodos requerem uma determinação exata das duas quantidades na área onde o fluxo será determinado. A recarga pode ser estimada quando a condutividade hidráulica de duas seções do aquífero é conhecida, bem como sua área e suas cargas hidráulicas. Na zona não-saturada, uma taxa de recarga pontual, mas não areal, pode ser simulada pela solução numérica da equação de Richard.

Na zona saturada, a taxa de recarga distribuída sobre a área pode ser estimada através do modelo de fluxo subterrâneo no procedimento de calibração do modelo. É importante lembrar que a transmissividade e a recarga não podem ser calibradas simultaneamente.

Grupo IV. Os métodos de traçadores usam substâncias dissolvidas injetadas no ciclo hídrológico. Elas são capazes de traçar o movimento de água no subsolo durante longos períodos de tempo e são utilizadas para estimar o tempo de percurso e residência (métodos radioativos de trítio e trítio-hélio 3), indicar a fração de mistura das águas de origens diferentes (métodos dos isótopos estáveis de deutério e oxigênio (^{18}O)) e estimar fluxos verticais através do traçador conservativo de cloreto (método do balanço de cloreto) de modo que:

$$R = \frac{(P - E_s) Cl_P}{Cl_R} \quad [\text{L/T}] \quad (2.25)$$

Onde Cl_P = concentração de cloreto na precipitação, Cl_R = concentração de cloreto na água subterrânea, P = precipitação, E_s = escoamento superficial e R = recarga.

2.4 Trabalhos Anteriores Realizados na Área

2.4.1 Estudos Geológicos da Região

Os primeiros estudos geológicos desenvolvidos na área datam, pelo menos, do fim da primeira década do século vinte, porém uma “densidade” maior de estudos ocorre a partir da década de 1960 (CPRM-UFCG, 2005).

O início dos estudos mais significativos realizados na bacia sedimentar do Rio do Peixe, data da década de 60, com os trabalhos de Costa (1964 *apud* CPRM-UFCG, 2005), Almeida (1967 *apud* CPRM-UFCG, 2005), Albuquerque (1971 *apud* CPRM-UFCG, 2005), que tratam do contexto geológico regional e dão início a discussão a respeito do processo de formação da bacia sedimentar. Outros autores que se propuseram a explicar o processo de formação da bacia são Lima Filho (1991), Françolin e Szamatari (1987; *apud* CPRM-UFCG, 2005) e Françolin (1992), além de outros.

Já os estudos geológicos de caráter local são iniciados pouco mais tarde, em face de muitos motivos como surgimento de imagens aerofotogramétricas da região e de mapa plani-altimétricos em escala de 1:100.000 ou superiores, (CPRM-UFCG, 2005).

Braun (1969, *apud* CPRM-UFCG, 2005) elabora o primeiro mapa geológico do local, onde são descritas três formações geológicas distintas, além dos aluviões. Essas três formações são chamadas pelo autor de: A, basal (psamítica); B, média (pelítica) e C, superior e também psamítica.

Seguindo recomendação de Braun (*op. cit.*), em 1970 foi realizado o furo estratigráfico de Lagoa do Forno, o qual atinge o embasamento cristalino a uma profundidade de 989,90m, após passar pelas três litologias do local, ainda denominadas A, B e C.

A figura 2.1 apresenta um esquema mostrado por Correia (2007) da estratigrafia do furo de lagoa do forno.

Mabessone (1972, *apud* CPRM-UFCG, 2005) descreve as litoestratigrafias das formações Sousa, Antenor Navarro e rio Piranhas mais detalhadamente, em outros pontos da bacia.

Os estudos de Lima Filho (1991) e Françolin (1992) citam a divisão da bacia sedimentar em dois grabens ou duas sub-bacias secundárias, sendo chamadas pelo segundo autor de sub-bacia Brejo das Freiras e de Sousa, a qual apresenta um prolongamento denominado sub-bacia de Pombal.

Françolin (*op. Cit*) também apresenta uma figura onde descreve, a partir de informações gravimétricas, dos dados do furo Lagoa do Forno e dos mergulhos das camadas, medidos em superfície, a profundidade do embasamento.

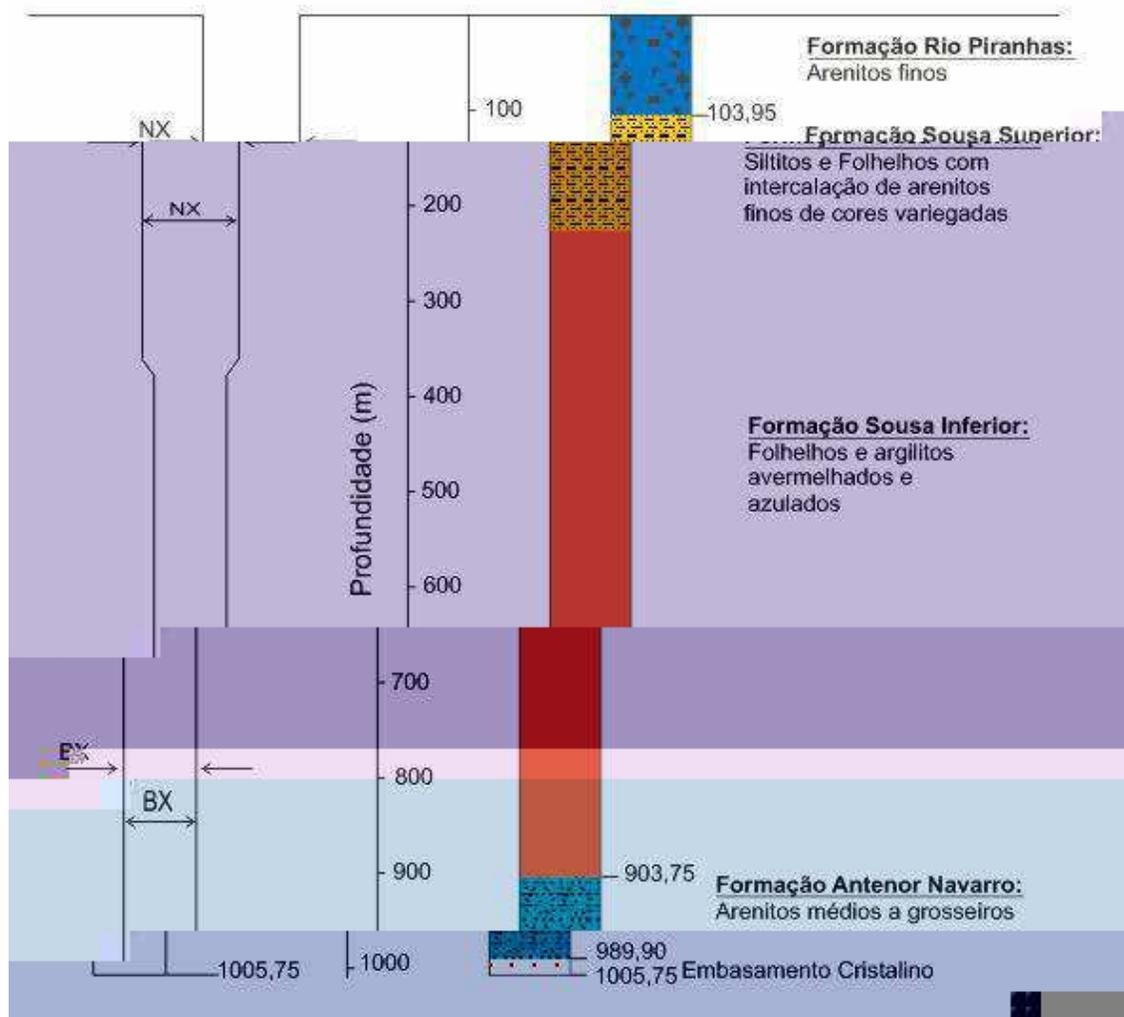


Figura 2.1 - Estratigrafia do furo Lagoa do Forno (Correia, 2007).



Figura 2.2 - Mapa do topo do embasamento do cristalino (Françolin, 1992).

2.4.2 Estudos Hidrogeológicos da Região

Os estudos, que de alguma forma abordam a hidrogeologia da região são apenas quatro. Alguns desses estudos são comentados abaixo.

O primeiro foi realizado por Albuquerque (1971 *apud* CPRM-UFCG, 2005) que identificou as unidades aquíferas aluvial e Antenor Navarro. O autor indica a possibilidade de o fluxo seguir a direção dos falhamentos geológicos ao longo da bacia.

Albuquerque (*op cit*) também relata a incapacidade, devido à falta de dados, de se fazer um mapa potenciométrico e a falta de dados sobre vazão dos poços e características hidrodinâmicas destes.

Em seu estudo sobre as águas subterrâneas no estado da Paraíba, Albuquerque (1984) discute acerca da bacia sedimentar do Rio do Peixe, indicando que seus sistemas aquíferos são dispostos da maneira expressa a seguir;

Superior ao cristalino está condicionada a formação Antenor Navarro, do tipo confinado, aflorando apenas nas bordas da bacia, podendo, segundo o autor, nem chegar a aflorar, configurando-se assim os arenitos expostos nestes locais um membro da formação Sousa superior.

Acima da formação Antenor Navarro encontra-se a formação Sousa, dividida em duas partes, a superior e a inferior.

Próximo ao furo estratigráfico de Lagoa do Forno encontra-se aflorante a formação Rio Piranhas, formada por arenitos médios e grosseiros. Esta formação encontra-se sobreposta às duas já mencionadas e é considerada, pelo autor, do tipo livre.

Por último encontram-se os aluviões, de composição predominantemente síltica e argilosa, sendo considerado um aquífero com potencial fraco.

Albuquerque (*op cit*) apresenta um mapa piezométrico que indica um escoamento, na sub-bacia de Brejo das Freiras convergindo para o açude Pilões, sendo este abastecido de águas subterrâneas, pois sua cota de fundo encontra-se abaixo das linhas equipotenciais. Segundo o autor, o açude Pilões constitui-se em um dos pontos de saída das águas subterrâneas da bacia, juntamente com o escoamento de base do rio do Peixe e Piranhas.

Também é levantada a hipótese de que as águas subterrâneas na sub-bacia de Sousa não saiam à superfície na confluência dos rios Piranhas e Peixe, podendo extravasar apenas na sub-bacia de Pombal, sendo difícil saber em virtude da influência do açude de São Gonçalo.

Quanto à quantificação do potencial e reservas do aquífero é salientado que não é possível saber a respeito, em virtude de não serem conhecidos parâmetros hidrodinâmicos como o coeficiente de armazenamento e a parcela do escoamento dos rios que é oriunda dos aquíferos em questão.

Albuquerque (1986) faz uma análise detalhada sobre o furo estratigráfico lagoa do forno e sobre o Plano Integrado de Aproveitamento dos Recursos Hídricos do Nordeste-PLIRHINE.

Com relação às características hidrodinâmicas do sistema são destacados os mesmos aspectos de seu trabalho de 1984. A síntese de suas análises está exposta abaixo.

Δ O escoamento na Bacia do Rio do Peixe se faz de seus limites para o seu interior;

Δ A influência do embasamento cristalino como fronteira impermeável se faz clara na área entre as sub-bacias de Brejo das Freiras e Sousa, a partir do estrangulamento da bacia o escoamento se faz para a sub-bacia Sousa;

Δ Em torno da cidade de Antenor Navarro, existe uma depressão potenciométrica, causada pela exploração por poços tubulares que abasteciam a cidade;

Δ Na região em torno da cidade de Sousa a potenciometria revela um paralelismo de suas linhas em relação às barreiras impermeáveis na direção do distrito (na época) de Aparecida.

Sobre os parâmetros hidrodinâmicos, o autor destaca apenas que os valores de condutividade hidráulica (K) e transmissividade (T) são baixos.

3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Caracterização da Área de Estudo

3.1.1 Localização e Ocupação

A área de estudo está, quase que na sua totalidade, inserida no Estado da Paraíba, abrangendo uma área de pouco mais de 1300 km² ao longo de 12 municípios, sendo estes pertencentes à área estudada de forma integral ou parcial. Destes 12, 11 estão situados no Estado da Paraíba e 1 no Ceará sendo que oito possuem sua sedes municipais dentro do local estudado.

Os municípios em território paraibano e que fazem parte da área de estudo são: Aparecida, Cajazeiras, Marizópolis, Poço José de Moura, Pombal, Santa Helena, São Domingos do Pombal, São João do Rio do Peixe, Sousa, Triunfo e Uiraúna. No Ceará está Umari.

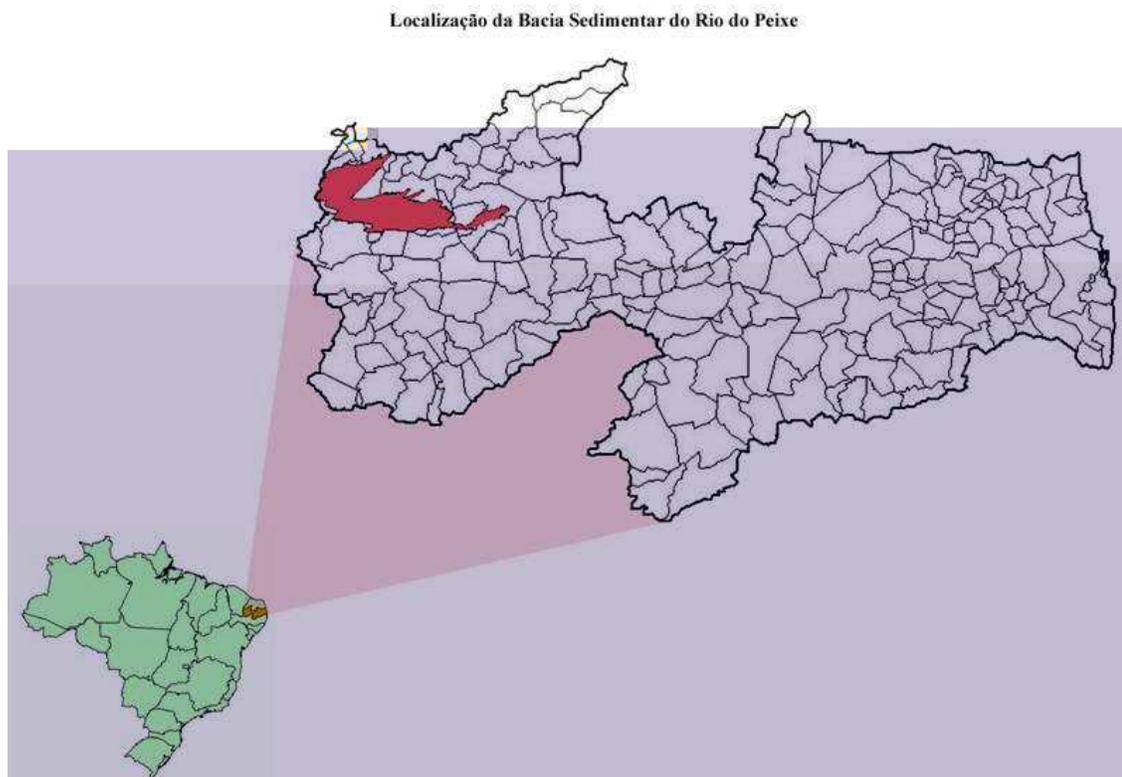


Figura 3.1 - Localização da área de estudo.

A tabela 3.1 mostra a população dos municípios da bacia e o número de poços cadastrados em seu território.

Tabela 3.1 - Tabela com dados relevantes dos municípios que estão inseridos parcial ou totalmente na bacia, (IBGE, 2006; CPRM-UFCG, 2005).

Município	
-----------	--

Tabela 3.2 - Estações pluviométricas com dados de precipitação (mm) na bacia (ANA, 2006).

Estação/Mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média Anual
Uiraúna	146	108	153	160	88	38	13	8	2	4	10	34	764
Barra do Juá	129	103	156	158	116	53	14	10	2	5	7	34	787
Açude Pilões	179	152	197	163	104	29	9	6	3	6	8	40	896
Antenor Navarro	185	145	202	149	90	51	17	6	1	6	14	31	897
São Gonçalo	167	151	239	152	108	40	19	8	3	8	16	53	964
Sousa	148	112	219	126	98	45	19	7	1	8	8	59	850
Cajazeiras	213	157	242	167	93	40	17	5	3	4	12	51	1004
Aparecida	128	101	193	119	92	35	17	9	5				

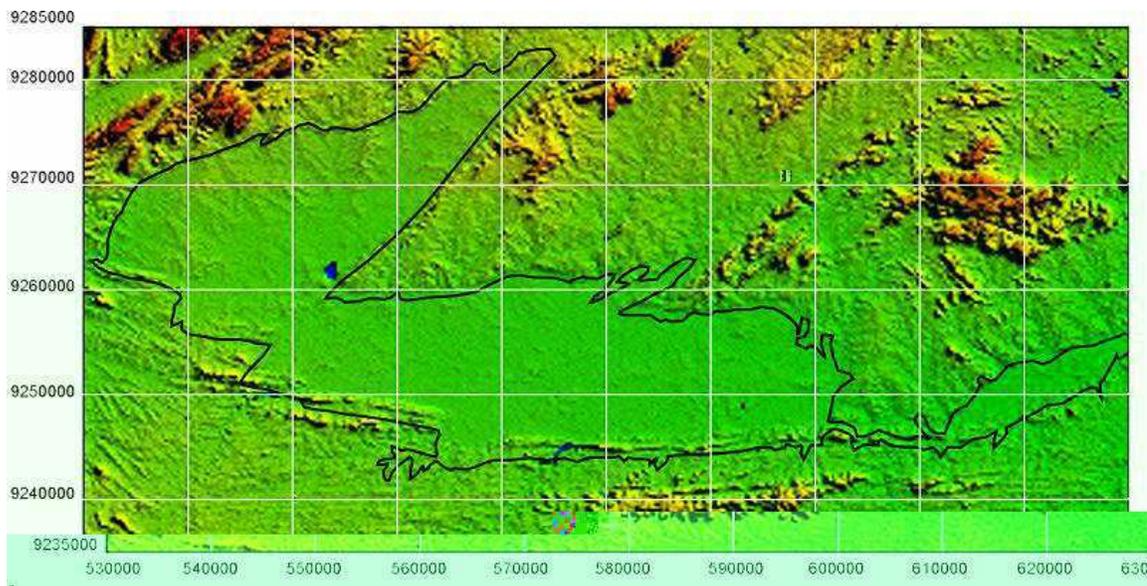


Figura 3.2 - Imagem SRTM com o relevo da região e a delimitação da bacia sedimentar.

3.4 Hidrografia

A bacia sedimentar faz parte, na sua totalidade, da sub bacia dos rios Apodi, Piranhas e Outros, e esta, por sua vez, integrante da bacia Atlântico, Trecho Norte/Nordeste, que recebem os códigos 37 e 3, respectivamente, (ANA, 2002).

A hidrografia da região é caracterizada pela intermitência de fluxo de água em seus cursos, sendo exceção o caso de um rio ter sua vazão regularizada pelo armazenamento de um determinado volume por um reservatório e descarga de vazão pelo mesmo (o que não ocorre na área de estudo).

O principal curso d'água que cruza a área da bacia é o rio Piranhas, que dá nome à sub-bacia. Porém o rio do Peixe é o que cobre uma área maior da bacia sedimentar, vindo da porção noroeste da bacia na direção noroeste-sudeste, e depois seguindo na direção oeste-leste até sua confluência com o rio Piranhas.

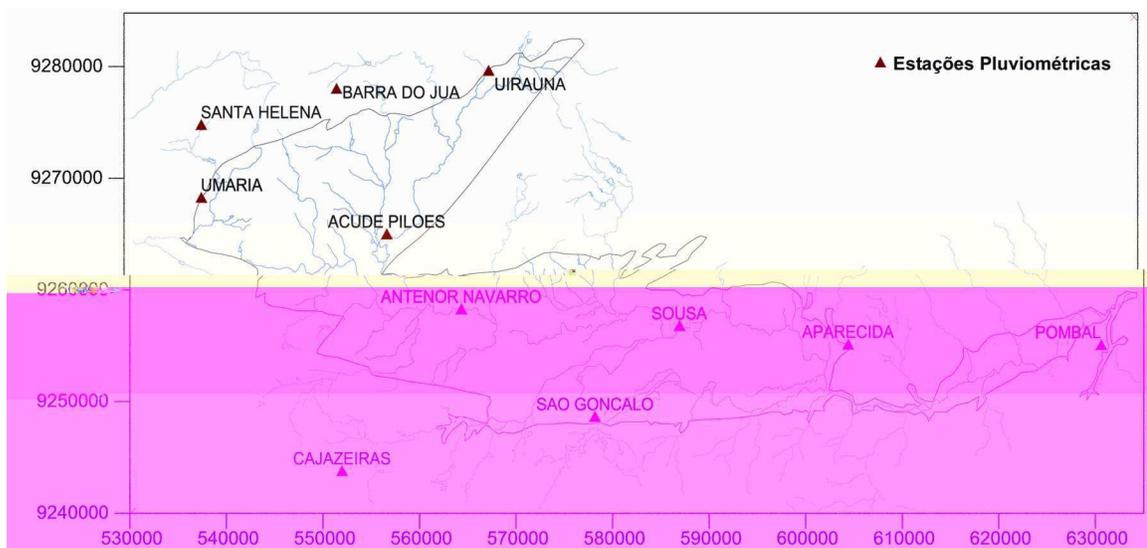


Figura 3.3 - Hidrografia da região, estações pluviométricas e os limites da bacia sedimentar.

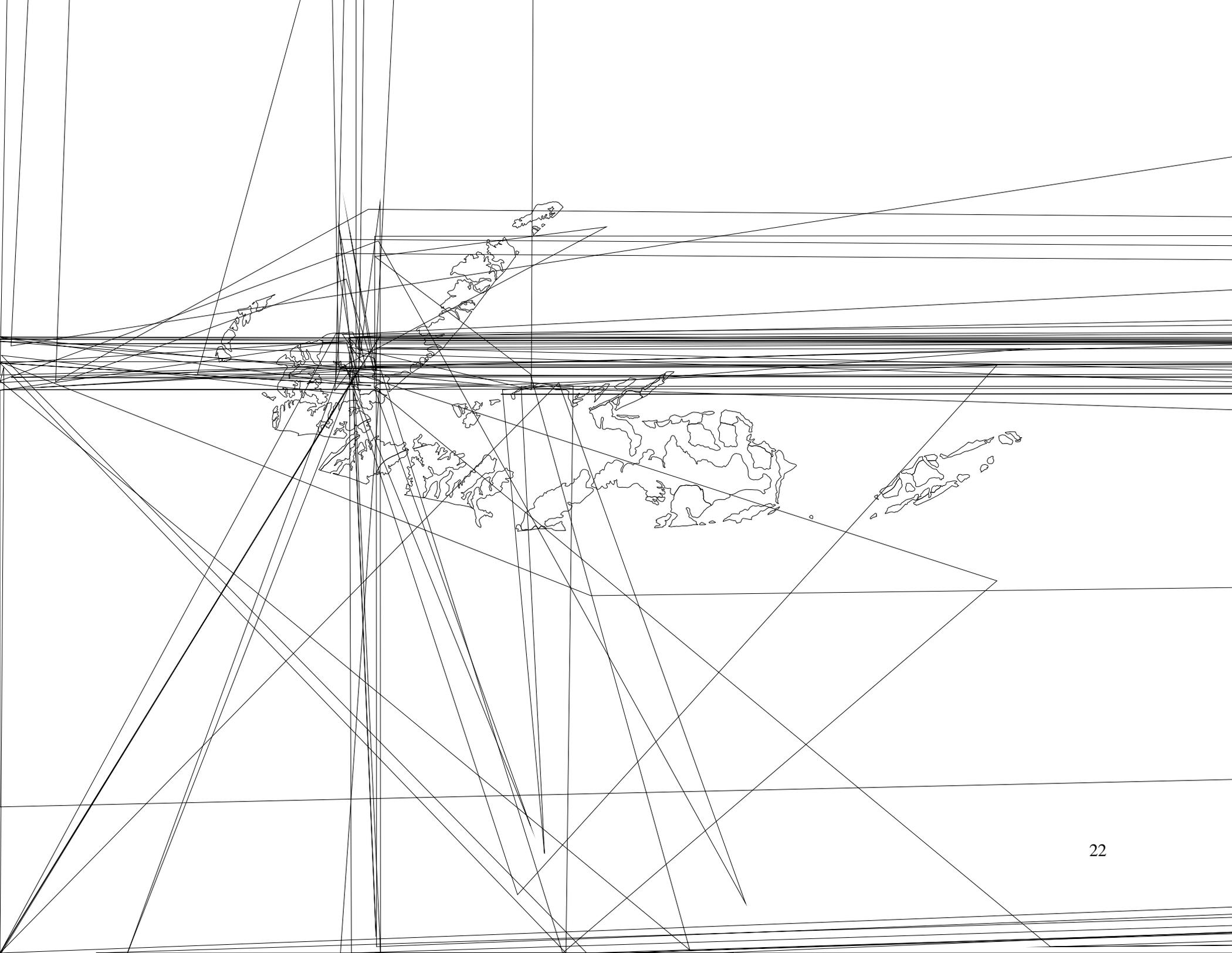
3.5 Geologia

A bacia sedimentar do Rio do Peixe é composta por três sub-bacias: Pombal, Sousa e Brejo das Freiras.

Segundo Marinho (1979) “a seqüência sedimentar é constituída por um pacote inferior arenítico, de origem fluvial, torrencial (Antenor Navarro), um pacote médio, microclástico, de origem lacustre e fluvial de correntes fracas (formação Sousa) e um pacote superior arenítico de origem fluvial (formação Piranhas)”.

A figura 3.4 mostra o mapa das formações geológicas da área de estudo.

Segundo Mabeoone (1992, *apud* CPRM-UFCG, 2005) a formação Antenor Navarro fora depositada no início da fase pré rift, tendo sido afetada por falhamento posteriormente, mas antes da sedimentação da formação Sousa. A formação Sousa teria sido depositada em ambiente continental e seria composta pela sedimentação de leques aluviais ao longo das falhas reativadas e depósitos aluviais em sítios distais.



3.6 Tipo de Solos, Uso do Solo e Vegetação

3.6.1 Tipos de Solos

De acordo com SUDENE, (1972) *in* CPRM-UFCG (2005) os principais solos da região são: Solonetz solodizado, solos litólicos eutróficos, solos aluviais eutróficos, vertisol, podzólico amarelo equivalente eutrófico, vermelho amarelo equivalente eutrófico e bruno não cálcico.

3.6.2 Vegetação

A vegetação da área é tipicamente de caatinga, caracterizada por plantas xerófitas e “ralas”, com muitos arbustos espinhosos, que se adaptam com maior facilidade as condições de deficiência hídrica de regiões semi-áridas como a da bacia sedimentar do rio do peixe.

3.6.3 Uso do Solo

As principais atividades desenvolvidas na extensão da bacia são: a agricultura de subsistência e a fruticultura irrigada em alguns perímetros como o das várzeas de Sousa. Também, como já dito antes, a área abrange os núcleos urbanos de oito municípios. As figuras 3.5 *a* e *b* mostram paisagens da região, durante a estação chuvosa.



Figura 3.5a, b - Paisagens da região no fim da época das chuvas (maio de 2006).

3.7 Utilização das Águas Subterrâneas na Área

As águas subterrâneas da bacia são utilizadas basicamente para o abastecimento de pequenos núcleos populacionais, comunidades rurais, ou propriedades isoladas. A exceção a esta regra são os poços CD 341 e P 208 que abastecem a cidade de Poço Jose de Moura e CG 943 que abastece Aparecida.

Albuquerque (1984) cita retiradas anuais da ordem de 200 a 250 mil metros cúbicos, porém esta não é uma informação confirmada.

As figuras 3.6 *a e b*, e 3.7 *a e b*, mostram alguns poços, de diferentes tipos e utilizados para fins diversos dentro da bacia (abastecimento público e particular; com bomba e catavento).

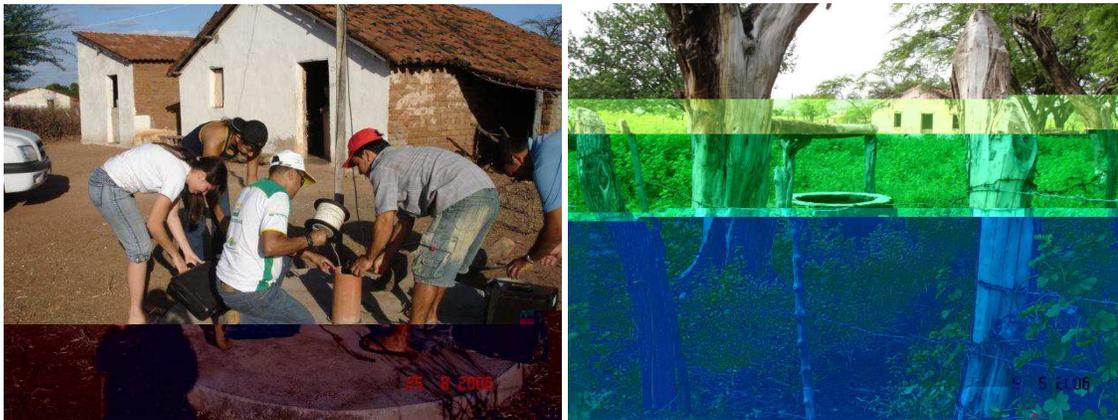


Figura 3.6a - Poço tubular profundo; b - Poço amazonas da região. Ambos utilizados para o abastecimento de pequenos núcleos e ou propriedades rurais.



Figura 3.7a - Poço com catavento, típico da região; b - poço utilizado para abastecimento de Poço José de Moura.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de Estudo e Domínio do Modelo

A área de estudo está localizada, como já descrito no item 3.1.1, no sertão paraibano, e abrange, de forma integral ou parcial, 12 municípios, sendo 11 paraibanos e um cearense. O domínio do modelo abrange toda a área da bacia sedimentar do rio do peixe, sendo esse delimitado pelas coordenadas UTM 529000E e 9284500S e 636000E e 9239500S na extremidade superior esquerda e inferior direita, respectivamente.

Em todas as bordas limítrofes da área de estudo há afloramento do embasamento cristalino.

A área total a ser modelada é de cerca de 1300 km², englobando a totalidade da bacia sedimentar do rio do peixe, incluindo suas três sub-bacias, Brejo das Freiras, Sousa e Pombal. Esta última, devido à carência de dados e à sua área reduzida não foi considerada na calibração do modelo.

4.2 Modelo Matemático Utilizado

Para a elaboração deste trabalho, foi utilizado, para a realização da modelagem do fluxo subterrâneo na área, o programa *PMWIN*, ou *Processing Modflow for Windows* (Chiang e Kinzelbach, 2003), o qual é um pré e pós-processador do *MODFLOW*, (McDonald e Harbaugh, 1988), amplamente utilizado em todo o mundo.

O programa acima citado utiliza o método de diferenças finitas para a resolução da equação de fluxo subterrâneo (ver item 2.2), uni, bi e tridimensional e é caracterizado por uma variedade de itens integrados, que são utilizados para simular, integradamente, diversas características do sistema tais como: recarga (*Recharge*), drenos e rios (*Drain e River*), evapotranspiração (*Evapotranspiration*) e poços (*Well*), entre outros.

A discretização do modelo é feita em uma malha, formada por células quadradas ou retangulares, podendo ser dividida em vários tamanhos, tanto horizontal quanto verticalmente, porém com as camadas verticais devendo ser contínuas em todo o domínio do modelo.

Suporta um número máximo de 200 camadas e 250000 células por camada.

Para a calibração automática dos parâmetros foi utilizado o programa *PEST* (*Parameter Estimation*), (Doherty et al, 1994), o qual vem incorporado ao *PMWIN*. O *PEST* estima

automaticamente os parâmetros utilizando o método dos mínimos quadrados, de maneira que o valor de r seja mínimo.

$$r = \sum_{i=1}^N (h_i^o - h_i)^2 \quad (4.1)$$

Onde h^o são os valores observados, h são os valores calculados, r é o resíduo quadrático e N o número de observações.

4.3 Etapas da Modelagem

A seqüência seguida na modelagem, coincide com as etapas de modelagem apresentadas na literatura e descritas abaixo. A figura 4.1. apresenta um exemplo desse fluxograma, (Anderson e Woessner, 1992 *apud* Cabral e Demétrio ,1997).

- Δ Definição dos objetivos da modelagem;
- Δ Elaboração do modelo conceitual, com base nos conhecimentos que se possui;
- Δ Escolha do tipo de modelo matemático;
- Δ Definição do pacote computacional a ser utilizado para efetuar a modelagem;
- Δ Esquematização do modelo, com definição da malha, informações utilizadas para a calibração entre outras. Nesta etapa está incluída a incorporação dos dados de campo;
- Δ Calibração do modelo, feita de maneira que este represente o mais fielmente possível a situação real, encontrada em campo. Nesta etapa há a comparação com os dados obtidos em campo;
- Δ Verificação do modelo, que consiste na averiguação do modelo para uma situação diferente da qual foi calibrado, ou seja, em outro período e com outros dados. Também há a análise se existe a concordância com os dados coletados;
- Δ Apresentação dos resultados;
- Δ Verificação de longo prazo.

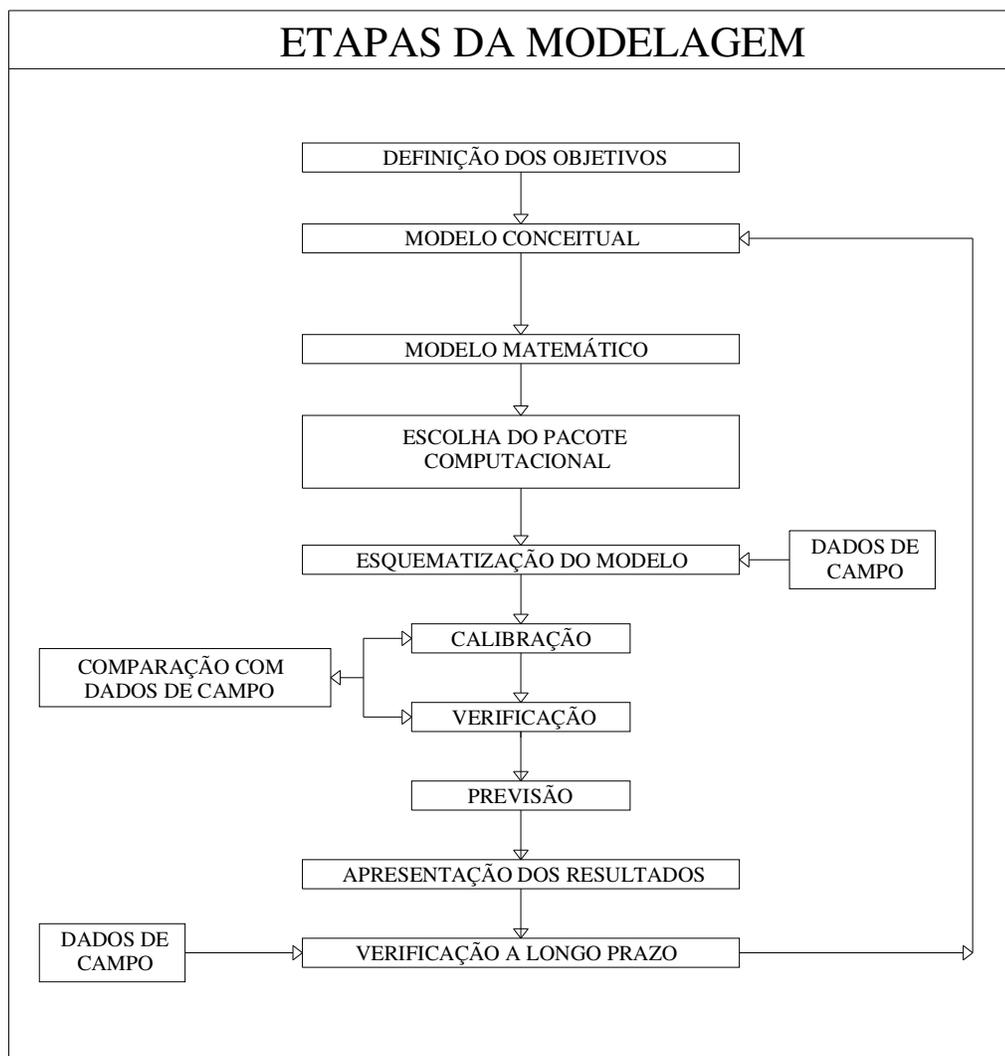


Figura 4.1 - Fluxograma das etapas realizadas na modelagem (Anderson e Woessner, 1992; apud: Cabral e Demétrio, 1997).

A seguir são discutidas as etapas da modelagem seguidas neste trabalho e como foram desenvolvidas. A escolha do modelo matemático e do pacote computacional já havia sido realizada, sendo o *MODFLOW* e o *PMWIN* utilizados.

4.3.1 Definições dos Objetivos do Processo de Modelagem

O objetivo da utilização do modelo numérico para a simulação do fluxo hídrico subterrâneo na bacia sedimentar do rio do Peixe é, como já citado, determinar a recarga aportada ao aquífero no período em que foram coletados dados de nível estático, ou seja entre

agosto de 2005 e junho de 2007, e verificar o comportamento deste frente à cenários de exploração.

Para que estes objetivos sejam atingidos, primeiramente devem ser calibradas, em regime estacionário as condutividades hidráulicas do aquífero. A seguir, em regime transitório, e no período seco, deve ser calibrado o coeficiente de armazenamento S_y para finalmente se determinar a recarga.

Com estes objetivos sendo alcançados espera-se que o trabalho sirva como uma abordagem inicial para futuros trabalhos no local.

4.3.2 Elaboração do Modelo Conceitual

O modelo conceitual foi proposto de acordo com as informações existentes, descritas anteriormente. A seguir são apresentadas as principais características do modelo conceitual.

A área a ser modelada é a totalidade da bacia sedimentar, ou seja, cerca de 1300 km², inclusive a sub-bacia de Pombal.

A hidrografia, que apresenta regime intermitente foi representada por drenos conforme trabalhos indicados para esta condição (Carvalho Filho e Cota, 2003; PROASNE, 2003). A utilização do pacote *Drain* impõe uma mudança em relação ao pacote *RIVER*, pois esse extingue o fluxo quando o nível do aquífero ficar abaixo do nível do rio, ou seja, não permite fluxo do rio para o aquífero. Em seu estudo PROASNE (2003) mostra que a água que deixa de ser contabilizada na recarga do aquífero com a utilização de drenos é muito pequena diante da recarga por percolação da superfície.

Próximo à divisa das sub-bacias de Brejo das Freiras e Sousa o rio do Peixe é represado pelo açude Pilões, o maior reservatório localizado no interior da bacia sedimentar do rio do peixe, representado por condição de carga hidráulica especificada.

As unidades litológicas consideradas são as seguintes: embasamento cristalino, circundando a área a ser modelada e uma única unidade de fluxo da qual fazem parte as formações Antenor Navarro, Sousa e rio Piranhas.

Todas as formações são consideradas integradas, sem camadas confinantes entre elas.

A simplificação dos diversos sistemas aquíferos em uma única camada, deve-se a fatores como: a falta de conhecimento sobre a geometria vertical das formações; falta de estudos dos parâmetros hidrogeológicos entre as formações como transmissividade; maior complexidade do modelo com maior número de parâmetros a se determinar por calibração e,

conseqüentemente, aumento da incerteza dos resultados; análise preliminar com modelo tridimensional simplificado, baseado em informações de França (1992), mostrou resultados semelhantes aos encontrados com o modelo areal proposto aqui.

Cabe ressaltar que, originalmente se tentou utilizar o modelo tridimensional exatamente com a geometria apresentada por França, op cit, porém por ter sido verificada uma difícil convergência deste modelo, além das incertezas geradas pela calibração de muitos parâmetros, este não foi desenvolvido plenamente.

4.3.2.1 Condições de Contorno

As condições de contorno utilizadas são do tipo internas e externas. No primeiro caso estão a hidrografia, a recarga e reservatórios entre outras características da área, já o segundo item diz respeito aos limites da bacia, que podem apresentar fluxo especificado, carga hidráulica especificada e fluxo dependente da carga hidráulica.

Neste estudo as condições de contorno do modelo identificadas e adotadas para a modelagem foram as seguintes.

Condições externas: todas as células externas a bacia sedimentar são do tipo fluxo especificado, ou condição de Neumann, neste caso nulo, pois ao redor de toda a bacia há o afloramento do cristalino, implicando assim na inexistência de fluxo nestas células contíguas a bacia. Assim todas as células que circundam o modelo são inativas, com exceção da saída da bacia.

Condições internas: a hidrografia foi representada pelo pacote *Drain* do *MODFLOW*. Este pacote é indicado para a representação de rios intermitentes, como no caso de regiões semi-áridas. A taxa de fluxo para o dreno é calculada segundo a expressão $Q = Cd * (h - d)$, onde Q é o fluxo [L^3T^{-1}], Cd é a condutância hidráulica equivalente do dreno [LT^{-1}], h é a carga hidráulica na célula do dreno [L] e d a elevação do dreno [L]. Esta é a condição do tipo fluxo dependente da carga hidráulica, ou condição de Cauchy.

O açude de pilões foi representado pela condição de contorno de carga hidráulica especificada, ou condição de Dirichlet. As variações sazonais de nível não são consideradas aqui com esta condição de contorno.

Outro local com a condição de potencial de carga especificada, ou condição de Dirichlet, é a saída da bacia, próximo a cidade de Aparecida.

A topografia foi conseguida através de imagens *SRTM* (*Shuttle Radar Topographic Mission*), com pontos coletados em intervalos de 90 metros. Os pontos foram rearranjados no *SURFER* de maneira a ficarem coincidentes com a malha adotada no modelo (500 x 500 m).

As figuras 4.2 e 4.3 mostram a topografia e a profundidade da área modelada.

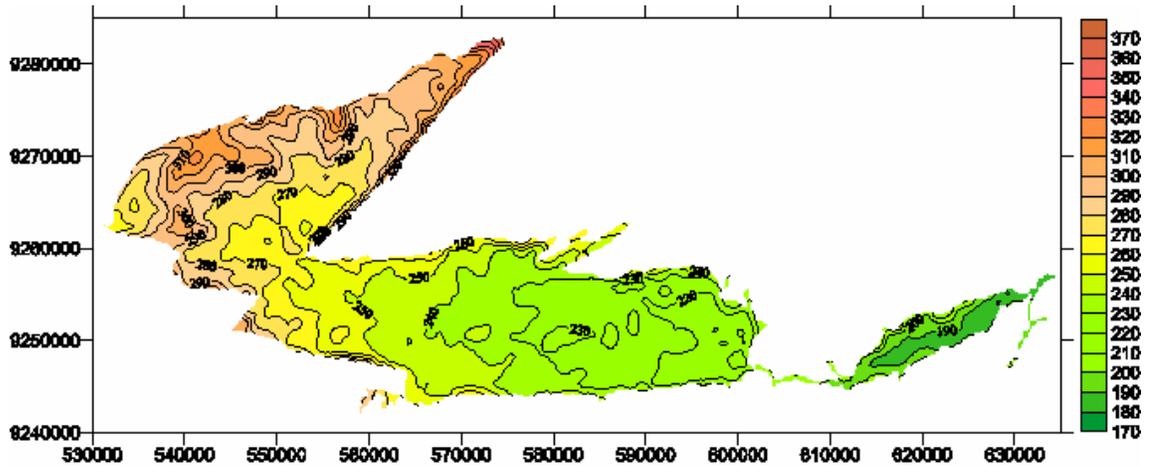


Figura 4.3 - Topografia inserida no modelo, gerada a partir de imagens SRTM.

A malha do topo do embasamento cristalino, determinado com o mapa de isópacas de Françaolin (1992), foi conseguida com a utilização dos pacotes *FIELD INTERPOLATOR* e *DIGITIZER*, do *PMWIN*, onde foram postos alguns pontos e interpolados os valores, resultando em uma malha de pontos compatível com a discretização do modelo.

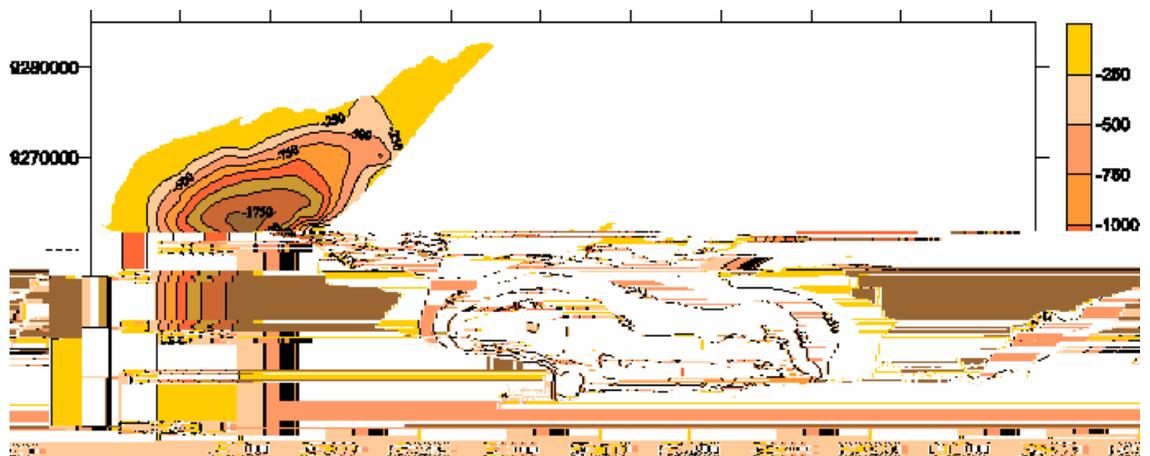


Figura 4.4 - Topografia da base do modelo utilizando informação de Françaolin (1992).

A cota dos poços foi determinada de duas maneiras: a primeira foi o nivelamento de parte dos poços (52 no total) feita pela equipe da CPRM com *GPS Geodésico* de alta precisão

com erro vertical de, no máximo 10 centímetros; o restante dos poços teve suas cotas extraídas de imagens *SRTM*.

A alternativa de se utilizar imagens *SRTM* foi feita com o argumento de que, em uma análise de correlação entre os valores obtidos pelo GPS nos 52 poços e os obtidos com as imagens, apresentaram um coeficiente de correlação elevado, de 0,997.

O erro máximo subestimado pelas imagens foi de 7,25 metros e superestimado 2,92 metros, mostrando que mesmo com uma boa correlação os valores ainda apresentam incertezas.

Esta suposição também se baseia no fato de que, quando plotamos as discrepâncias entre a elevação conseguida através das imagens e do *GPS* Geodésico (figura 4.4) observamos que os maiores erros estão nas bordas da bacia, além da região nas proximidades da cidade de Sousa.

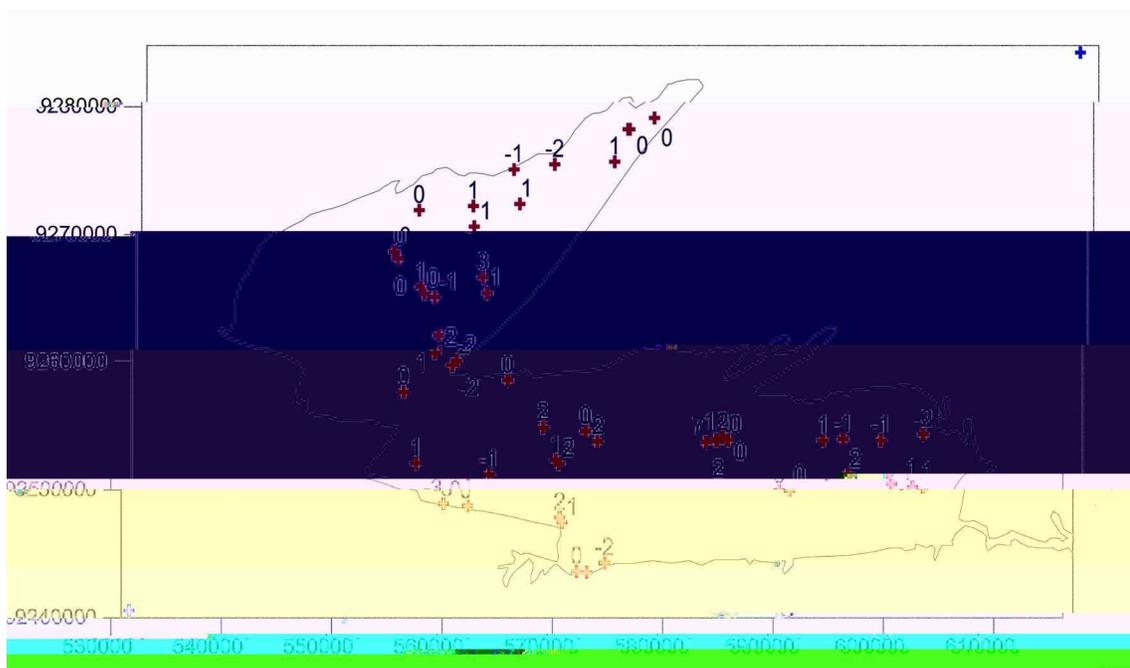


Figura 4.5 - Diferença em metros [m] entre as cotas, obtidas com GPS Geodésico e imagem *SRTM*.

Correlação entre Cotas Imagem SRTM versus GPS Geodésico

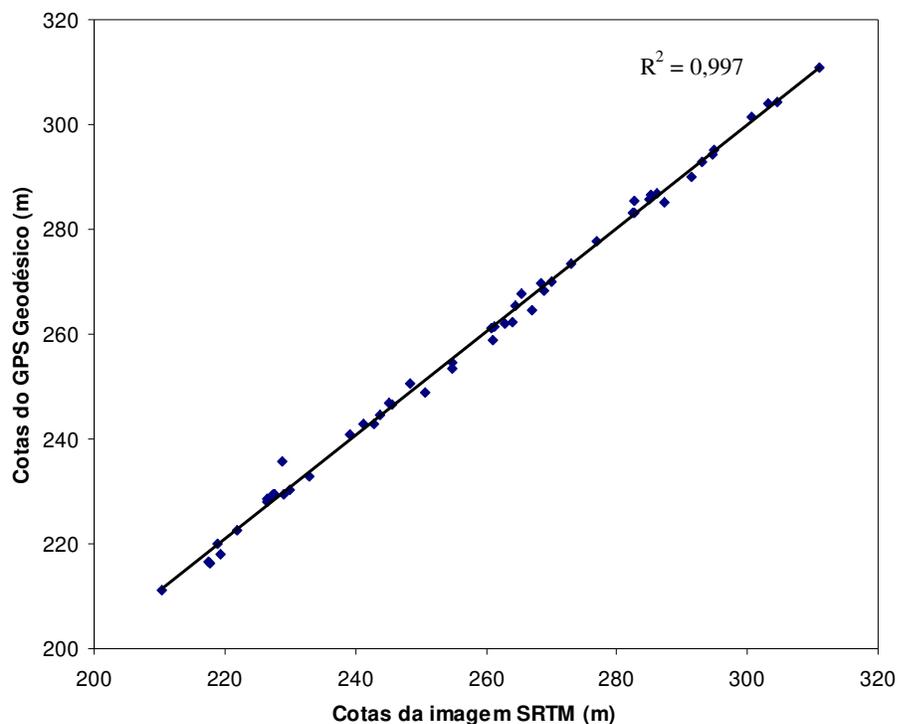


Figura 4.6 - Correlação feita entre os dados de imagens SRTM e nivelados em campo.

Para a determinação dos períodos utilizados para a calibração do coeficiente de armazenamento e da recarga (estação seca e chuvosa, respectivamente), foram analisados os histogramas de precipitação registrados na bacia durante o período que tiveram dados de nível estático coletados e a conseqüente variação dos níveis piezométricos nos poços no decorrer das campanhas de medição.

A figura 4.6 apresenta os histogramas entre janeiro de 2005 e junho de 2007. A média histórica, para todos os meses pode ser visualizada na tabela 3.2.

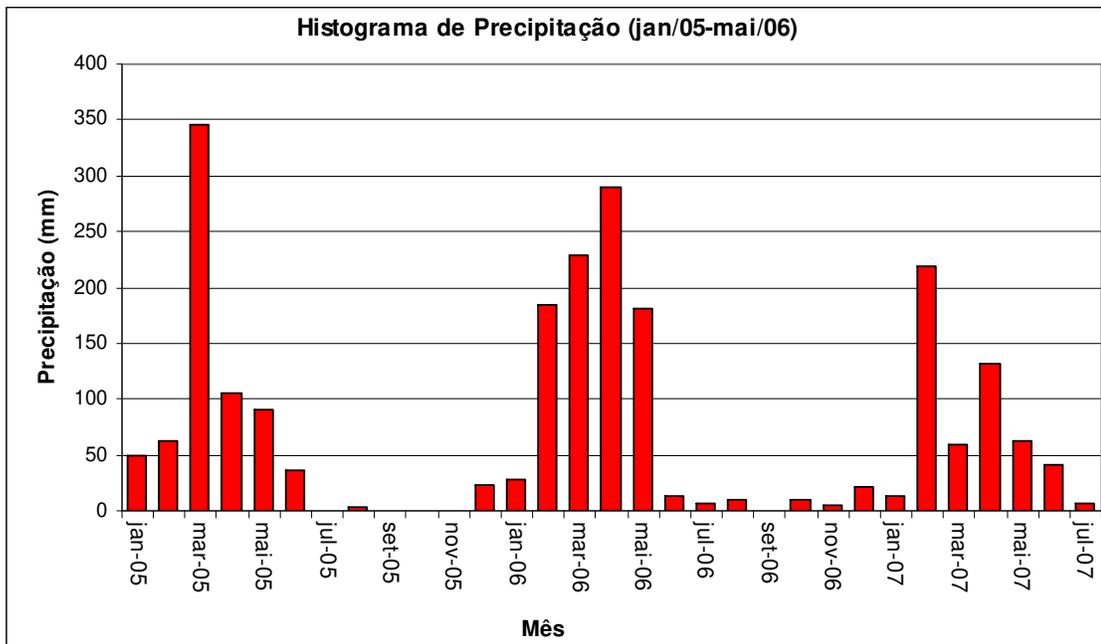


Figura 4.7 - Histograma de chuvas entre janeiro de 2005 e maio de 2007.

O total de poços que tiveram seus níveis estáticos coletados chegou a 163, sendo 127 tubulares e 36 amazonas. Os poços amazonas foram desconsiderados para a modelagem.

Todos os poços utilizados com sua localização, níveis estáticos, cotas e data das medições são apresentados no anexo I.

Na tabela 4.1 é mostrado o número de poços com dados de nível estático coletados no decorrer das sete campanhas de monitoramento.

Tabela 4.1 - Número de poços com medição de nível, equipe responsável e tipo de poço com nível medido.

Campanha	Equipe Responsável	Nº de pontos coletados	Poços Amazonas	Poços Tubulares
Agosto 05	CPRM	71	0	71
Novembro 05	CPRM	95	23	72
Maio 06	CPRM/UFCG	88	12	76
Agosto 06	UFCG	133	22	111
Novembro 06	UFCG	145	29	116
Fevereiro 07	UFCG	150	33	117
Maio/Junho 07	UFCG	149	36	112
TOTAL		163	36	127

A figura 4.7 mostra um gráfico confeccionado com os dados dos 21 poços que tiveram seus níveis estáticos medidos nas sete campanhas realizadas na área.

Nele observamos que boa parte dos poços segue um padrão de comportamento atingindo os menores valores de níveis estáticos medidos (cargas hidráulicas maiores) ao final

da estação chuvosa (maio) e os maiores valores de níveis estáticos (cargas menores) ao final da estação seca (novembro), muito embora este comportamento não aconteça em todos os poços.

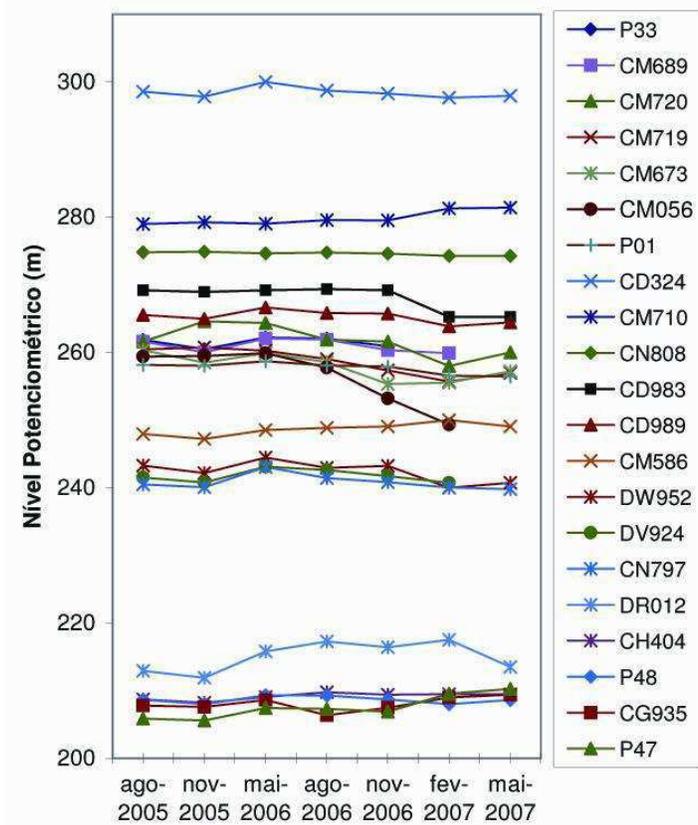


Figura 4.8 - Variação dos níveis potenciométricos coletados nas 7 campanhas (21 poços com todas as medições).

O comportamento da carga hidráulica nos poços no decorrer de um período de 21 meses (as sete campanhas de monitoramento) mostra que grande parte dos poços com medições em todas as campanhas tem uma relação direta entre a precipitação e o aumento de seu valor.

Infelizmente não se pode definir quão rápido se dá o aumento na carga hidráulica com o início das chuvas, pois as medições foram efetuadas em intervalos de no mínimo dois meses. Após este período os poços já mostram claramente uma recarga devido à precipitação, bem como rebaixamento devido ao fim do período de chuvas.

Os poços que não seguiram o padrão de aumento de carga hidráulica com as chuvas e diminuição com o fim destas podem ter uma resposta bem mais lenta de recarga ou ainda se situarem em uma porção confinada do aquífero.

Mesmo assim optou-se por uma calibração dos valores de S_y e de recarga coincidentes com a época seca e chuvosa, respectivamente.

Os 21 poços que tiveram medições de nível estático em todas as campanhas estão descritos na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Poços utilizados na verificação do modelo e nos quais foram medidos níveis nas 7 campanhas (vide as carga hidráulicas das 7 campanhas na figura 4.7).

Poço	Latitude	Longitude	Sub-bacia	Formação
CD324	9275209	555213	Brejo das Freiras	Antenor Navarro
CM710	9268385	547566	Brejo das Freiras	Antenor Navarro
CN808	9267846	548280	Brejo das Freiras	Antenor Navarro
CD983	9266905	555448	Brejo das Freiras	Sousa
CD989	9265598	555824	Brejo das Freiras	Sousa
P33	9259686	546157	Brejo das Freiras	Antenor Navarro
CM689	9263421	551446	Brejo das Freiras	Sousa
CM720	9265563	550024	Brejo das Freiras	Sousa
CM719	9265264	550972	Brejo das Freiras	Sousa
CM673	9262184	551331	Brejo das Freiras	Sousa
CM056	9257623	548543	Brejo das Freiras	Antenor Navarro
P01	9259076	550440	Brejo das Freiras	Antenor Navarro
CM586	9253333	550961	Sousa	Antenor Navarro
DW952	9254747	561497	Sousa	Antenor Navarro
DV924	9247127	564197	Sousa	Sousa
CN797	9252128	562685	Sousa	Sousa
DR012	9245362	590399	Sousa	Rio Piranhas
CH404	9250237	595800	Sousa	Sousa
P48	9252298	596323	Sousa	Sousa
CG935	9246474	597321	Sousa	Sousa
P47	9249920	597735	Sousa	Sousa

Nas campanhas também foram coletadas amostras para a determinação de outros parâmetros, físicos, químicos e biológicos, porém estes não foram utilizados neste estudo.

Inicialmente estava previsto a execução de testes de aquífero, porém não foram executados a tempo de terem seus dados utilizados na modelagem. Desta maneira, os dados dos testes de aquífero serão utilizados aqui apenas para discussão se os valores encontrados na calibração, do coeficiente de armazenamento e da condutividade hidráulica condizem com os valores dos testes ou não.

Outra maneira de se verificar a consistência dos dados calibrados de condutividade hidráulica é a análise dos testes de produção feitos na bacia, que permitem a estimativa da transmissividade com base na capacidade específica. Esta análise está exposta mais adiante, no item 4.4.2.

Da mesma forma, a geometria das formações ainda não é bem definida, assim como seus parâmetros hidrodinâmicos ainda não foram determinados. Também não há consenso entre os pesquisadores quanto à geologia da área.

Por isso o modelo conceitual foi elaborado, como é descrito a seguir, de maneira simplificada.

4.3.3 Esquematização do Modelo

A esquematização do modelo foi feita com base nas informações coletadas em campo e conseguidas por outros métodos como imagens de satélite, trabalhos anteriores na área e etc.

Todos os dados incorporados nesta etapa como topo e base do modelo, hidrografia entre outros estão descritos anteriormente (ver item 4.3.2).

Abaixo é descrita a discretização do modelo.

Discretização

A malha foi discretizada, horizontalmente, de forma regular, com as células possuindo dimensão de 500 x 500 m em todo o domínio do modelo.

No plano vertical o modelo foi dividido apenas em uma camada, ou uma única unidade hidroestratigráfica, de acordo com a definição dada para esta por Anderson e Woessner (1992).

A discretização da malha também pode ser observada na figura 4.8.

4.3.4 Calibração do Modelo

A calibração do modelo foi realizada tanto no regime permanente quanto no regime transitório. A seguir é apresentada, detalhadamente, a metodologia utilizada para a calibração do modelo, seguindo o cronograma mostrado na figura 4.9.

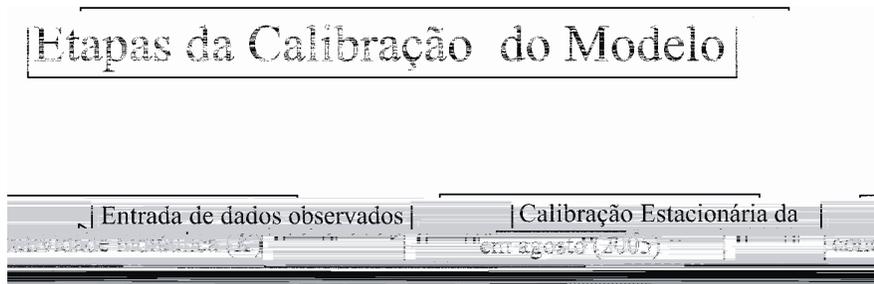


Figura 4.9 - Etapas seguidas na calibração do modelo.

4.3.4.1 Calibração no Regime Permanente

No regime permanente foram calibradas as condutividades hidráulicas para cinco zonas onde havia dados de carga hidráulica.

As zonas para calibração de K , foram definidas de acordo com o mapa das formações geológicas da bacia (CPRM-UFCG, 2005) e com as sub-bacias em que é subdividida a bacia sedimentar do Rio do Peixe (Françolin, 1992).

Foi admitido que, para cada formação geológica, que consta no mapa citado acima a condutividade seria constante não sendo estas áreas subdivididas em um número maior de zonas de calibração, sendo calibrado, portanto um único valor de K para cada formação em cada uma dessas áreas.

Os dados de cargas hidráulicas utilizadas nesta calibração foram medidos em agosto de 2005, pela equipe da CPRM.

A técnica de calibração utilizada consistiu em ajustar os valores de condutividade hidráulica, com o auxílio do *PEST* (Doherty et al, 1994) de maneira que os valores das cargas hidráulicas calculadas nos poços com medição aproximassem ao máximo possível os valores medidos em campo, durante a simulação em regime permanente.

4.3.4.2 Calibração no Regime Transitório

No regime transitório foram calibrados o coeficiente de armazenamento, S_y , e a recarga, R . O primeiro foi calibrado com a utilização dos poços com medições de nível estático em agosto e novembro de 2005, período que não apresentou precipitações significativas ao longo da bacia e, portanto sem recarga. Foram utilizados somente os poços com as duas medições, para que a calibração fosse realizada somente pelo ajuste da variação de nível nos poços.

Dessa maneira o pacote *Recharge* foi desativado para este período e, considerando as condutividades hidráulicas calibradas, foi possível realizar a calibração do coeficiente de armazenamento sem a interferência dessa.

Isto foi feito porque, sendo que não há recarga no período e as condutividades hidráulicas estando calibradas, a equação do fluxo depende exclusivamente do coeficiente de armazenamento, S_y .

A entrada de dados de carga observada para esta medição foi feita de maneira à calibração transiente não apresentar valores errôneos devido aos erros existentes na calibração esta

Da mesma maneira que a calibração do coeficiente de armazenamento, a calibração da recarga também foi realizada no regime transiente, porém entre os meses de novembro de 2005 e maio de 2006, período coincidente com a época chuvosa na bacia.

Para verificar a eficiência da calibração da recarga feita para o período 2005/2006 foi feita uma nova calibração, entre novembro de 2006 e maio de 2007.

A técnica utilizada na estimativa da recarga foi a mesma utilizada para a calibração do S_y , com auxílio do *PEST* para a sua determinação de maneira a se obter as menores diferenças entre cargas hidráulicas observadas e calculadas ao final do período simulado.

Em outras palavras, podemos dizer que a calibração do coeficiente de armazenamento e da recarga foram feitos de maneira a se equiparar as flutuações de níveis potenciométricos observados aos calculados.

4.3.5 Verificação do Modelo

A verificação da calibração do modelo foi feita com a execução do modelo entre os meses de agosto de 2005 e junho de 2007. Para a análise da qualidade da calibração quantitativa foram utilizados os vinte e um poços com medições nas sete campanhas.

4.3.6 Aplicação do Modelo Matemático

A aplicação do modelo consistiu em se fazer à verificação do volume anual da recarga para a bacia sedimentar do rio do Peixe, sendo esta igual à chamada reserva renovável e disponível para gestão hídrica da bacia e também em se verificar o seu comportamento quando considerado que os poços localizados em sua área e em funcionamento pudessem apresentar volumes de bombeamento entre 250 e 500 m³/dia/poço.

A primeira parte da aplicação do modelo diz respeito à determinação, através da recarga calibrada do modelo, da máxima disponibilidade a ser explorada do aquífero sem prejuízo deste sofrer perdas de suas reservas permanentes.

Assim esta etapa da modelagem foi realizada através da utilização da sub-rotina do *MODFLOW*, *WATER BUDGET*, para a determinação dos volumes aportados anualmente à bacia.

Também foi calculada a vazão na saída da sub-bacia de Sousa para a sub-bacia de Pombal, a qual foi subtraída dos volumes de recarga determinados da maneira descrita acima e chegou-se à recarga total do aquífero sem considerar a sub-bacia de Pombal.

Para avaliar o comportamento do aquífero frente a um aumento das retiradas de água, foram realizadas simulações do aquífero considerando retiradas anuais do sistema.

As simulações de exploração foram feitas para quatro situações de retiradas, sendo a primeira igual a um volume total anual de 8.730.000 m³ (250 m³/dia/poço, durante 180 dias nos 194 poços existentes e em funcionamento na região), suficiente para abastecer cerca de 240.000 habitantes, ou seja, a população atual dos municípios localizados na bacia considerando um consumo per capita igual a 200 l/hab/dia. Neste primeiro caso é considerado que a água só será utilizada durante a estação seca.

A segunda retirada considerada foi igual a 15.460.000 m³ (500 m³/dia/poço, durante 180 dias), nos 194 poços existentes e em funcionamento na região. Neste caso a simulação também foi realizada em regime transiente para a estação seca.

A terceira situação foi considerada com taxa de bombeamento de 250 m³/dia/poço, porem em regime estacionário, ou seja, as águas subterrâneas seriam utilizadas durante todo o ano para o abastecimento das cidades. O volume resultante anual explotado neste caso é igual a 15.460.000 m³.

A última consideração levou em conta uma exploração à taxa de 500 m³/dia/poço em regime estacionário, totalizando um volume anual de 30.920.000 m³, suficiente para abastecer toda a população dos municípios da bacia e ainda suprir outras demandas como irrigação, por exemplo.

As vazões retiradas do aquífero, descritas no parágrafo anterior, foram aplicadas de maneira uniforme a todos os 194 poços localizados dentro da área de estudo e que se encontram instalados e em funcionamento (instalados e com bombas, ver tabela 3.1), de acordo com o cadastro geral realizado pela CPRM.

A seguir são descritas as duas situações, ou cenários, consideradas para a simulação transiente e as duas situações para o regime estacionário, e os procedimentos adotados em cada simulação.

4.3.6.1 Simulação de um Cenário Hipotético em Regime Transiente

Δ Simulação Com Poços Bombeando 250 m³/dia

Nesta primeira situação foi aplicada uma taxa de bombeamento nos poços da área de 250 m³/dia/poço, que foram considerados ativados para a estação seca e desativados para a estação chuvosa.

O procedimento para a simulação resume-se a executar o modelo com dois períodos de simulação, o primeiro seco e o segundo chuvoso.

No primeiro período a recarga foi considerada igual a zero e a taxa de bombeamento igual a 250 m³/dia, enquanto que no segundo os poços foram desativados e as recargas utilizadas foram os valores encontrados na calibração.

Δ Simulação Com Poços Bombeando 500 m³/dia

Aqui foi utilizado um procedimento idêntico ao descrito para a primeira situação. A única diferença refere-se à taxa de bombeamento dos poços quando ativados, considerada agora igual a 500 m³/dia.

4.3.6.2 Simulação de um Cenário Hipotético em Regime Estacionário

Δ Simulação Com Poços Bombeando 250 m³/dia

Neste caso o modelo foi executado para o regime estacionário, e consideradas taxas de bombeamento de 250m³/dia em cada poço.

A recarga utilizada para esta simulação foi a recarga calibrada para o período de novembro a maio, porém adaptada de maneira a apresentar este volume para um intervalo de um ano. Em outras palavras como a recarga foi calibrada para um período de 6 meses o valor encontrado na calibração foi dividido por 2 para que representasse o mesmo volume de recarga, só que anualmente.

Δ Simulação Com Poços Bombeando 500 m³/dia

Esta situação considerada teve as mesmas características da situação descrita anteriormente (situação três), com a única diferença sendo a taxa de bombeamento, aumentada para 500 m³/dia/poço.

4.4 Estimativa da Transmissividade

4.4.1 Testes de Bombeamento

Na fase final do projeto de estudo da bacia sedimentar foram realizados três testes de aquífero, para se determinar a transmissividade e o coeficiente de armazenamento, sendo dois no sítio Serrote dos Estrela, município de Sousa e um na fazenda Santo Antonio, em Santa Helena.

A metodologia de Cooper Jacob foi utilizada para interpretação dos testes por pesquisadores da CPRM, porém os resultados mostram inconsistências nos, decorrentes, possivelmente, de falhas do equipamento ou operação durante sua realização.

Diante disso foi utilizada a alternativa de se estimar a transmissividade com base na capacidade específica.

4.4.2 Testes de Produção

Para a estimativa da transmissividade foram utilizados dados de testes de poço realizados pela Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba, CDRM-PB.

Os dados dos poços analisados são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Poços com teste de produção analisados.

Dados de Localização					
UTM E	UTM N	Nº Poço	Cadastro CPRM	Município	Formação
570883	9279707	01	P 79	Uiraúna	Qal/Ks
545042	9262454	02	CM 472	Santa Helena	Qal/Ks
540064	9259020	03	CM 022	Santa Helena	Qal/Kan
549609	9255705	04	?	Santa Helena	Qal/Kan
566643	9244993	05	DV 936	S. J. do Rio do Peixe	Qal/Ks
567267	9243387	06	?	S. J. do Rio do Peixe	Qal/Ks
576710	9255641	07	DQ 968	Sousa	Qal/Ks
584893	9252101	08	?	Sousa	Qal/Ks
582549	9250986	09	?	Sousa	Qal/Ks
597244	9253232	10	CH 412	Aparecida	Qal/Ks
625088	9252029	11	CO 683	Pombal	Qal/Ks
618020	9249140	12	CH 061	Pombal	Qal/Ks
625380	9252788	13	CO 682	Pombal	Qal/Ks

Obs. Qal: Quaternário aluvial; Ks: Cretáceo Sousa; Kan: Cretáceo Antenor Navarro

A análise feita dos testes de produção foi executada com o um programa escrito em MATLAB[®], por Bradbury e Rothschild (1985) e modificado por McLin (2005). Este algoritmo segue as seguintes premissas.

O rebaixamento total, s_T , em um dado poço apresenta dois termos, conforme descrito a seguir.

$$s_T = s_F + s_W = BQ + CQ^n \quad (4.2)$$

Onde s_T é o rebaixamento total no poço; s_F o rebaixamento devido à perda de carga na formação aquífera; s_W o rebaixamento devido à perda na entrada do poço; B um coeficiente de perda da formação [T/L^2]; C um coeficiente de perda do poço [T^2/L^5], n um expoente que varia entre 1 e 3, e Q é a vazão do poço.

Com $n = 2$ e a eficiência do poço E dada pela equação a abaixo.

$$E = 100(s_F / s_T) \quad (4.3)$$

O coeficiente de perda C , pode ser escrito da seguinte forma.

$$C = \frac{100 s_T}{Q^2} \left(\frac{1}{E} - 1 \right) \quad (4.4)$$

O rebaixamento, devido à perda na formação aquífera, é calculado pela aproximação de Jacob como:

$$s_F = BQ = \frac{Q}{4\pi T} \frac{\bar{u}}{r_p} \frac{2,25Tt}{r_p^2 S} + 2pA \quad (4.5)$$

Sendo T , transmissividade [L^2/T]; S , coeficiente de armazenamento; t , tempo de duração do bombeamento [T]; r_p , raio efetivo do poço [L] e p , fator adimensional que considera a penetração parcial do poço no aquífero, definido por:

$$p = \frac{\bar{u}D - L}{L} \frac{\bar{u}D}{r_w} - G \frac{L}{D} \quad (4.6)$$

Onde D é a espessura do aquífero [L]; L , o comprimento do filtro do poço [L] e G , uma função da razão de L/D , que é definida por um polinômio (Bradbury e Rothschild, 1985):

$$G = a + b(L/D) + c(L/D)^2 + d(L/D)^3 \quad (4.7)$$

Sendo os valores dos coeficientes: $a = 2,948$, $b = -7,363$, $c = 11,447$ e $d = -4,675$.

Substituindo 4.3.1 em 4.3.4 resulta a equação abaixo.

$$T = \frac{Q}{4\pi(s_T - s_w)} \frac{\bar{u}}{r_w} \frac{2,25Tt}{r_w^2 S} + 2pA \quad (4.8)$$

Os dados de entrada necessários, para a execução do programa são: vazão (Q), rebaixamento total (s_T), tempo de bombeamento (t), comprimento do filtro do poço (L), coeficiente de armazenamento (S), espessura do aquífero (D) e o coeficiente de perda do poço (C).

Os dois últimos parâmetros são opcionais, sendo que o seu não fornecimento não permite a estimativa de um único valor de T , e sim de uma faixa de valores, para diversas eficiências do poço e penetrações do mesmo no aquífero.

Não foi possível a determinação de um único valor de T , mas sim de valores de T máximo e mínimo, por conta da incerteza de alguns dados de entrada, como eficiência do poço e comprimento do filtro.

Assim estes valores foram utilizados apenas como uma verificação de ordem de grandeza dos valores de T dos locais onde foram executados os testes.

O algoritmo utilizado na análise dos testes de produção encontra-se no Anexo II deste trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o modelo matemático, quanto à calibração dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, condutividade hidráulica K , Coeficiente de armazenamento, S_y , e recarga R , bem como o balanço hídrico do aquífero em quatro cenários de exploração de suas águas.

5.1 Calibração do Modelo

Para a avaliação da calibração do modelo são utilizados dois critérios, um quantitativo e outro qualitativo. O primeiro é a análise matemática da calibração, através da avaliação do erro médio absoluto, da variância e do erro médio quadrático, enquanto o segundo é a condição de que as equipotenciais calculadas devem ser próximas aos valores observados, sem divergências significativas.

Estes dois critérios foram utilizados na calibração do modelo, em regime estacionário, neste estudo, e têm seus resultados apresentados na forma de um mapa observado versus calculado (critério qualitativo) e nos índices matemáticos que medem o grau de representatividade do modelo (quantitativa).

Para a calibração transiente foram analisados apenas os diagramas de dispersão, ou *scatters diagrams*, e as variâncias apresentadas ao final da execução do *PEST*.

5.1.1 Calibração de Condutividade Hidráulica

Os parâmetros de condutividades hidráulicas, calibrados de acordo com as zonas propostas a partir do mapa com as formações geológicas da região são apresentados a seguir.

Os dados de cargas hidráulicas utilizados nesta calibração são apresentados na figura 5.1.

Na figura 5.2 é apresentado o mapa potenciométrico observado para agosto de 2005 e utilizado para a calibração da condutividade hidráulica.

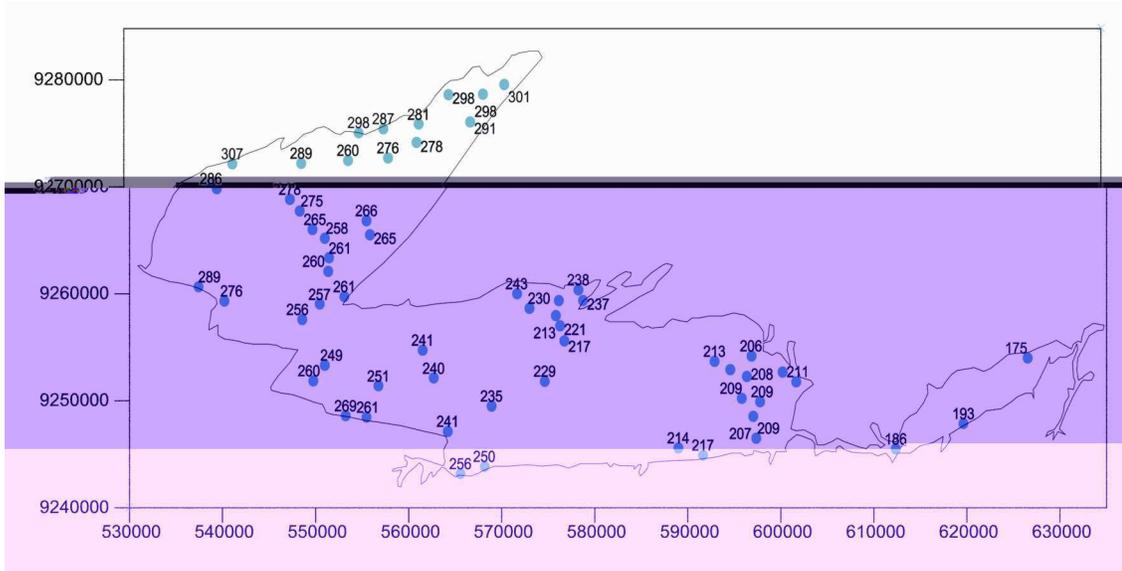


Figura 5.1 - Localização dos poços de observação na bacia, com as respectivas elevações de cargas hidráulicas para o mês de agosto de 2005.

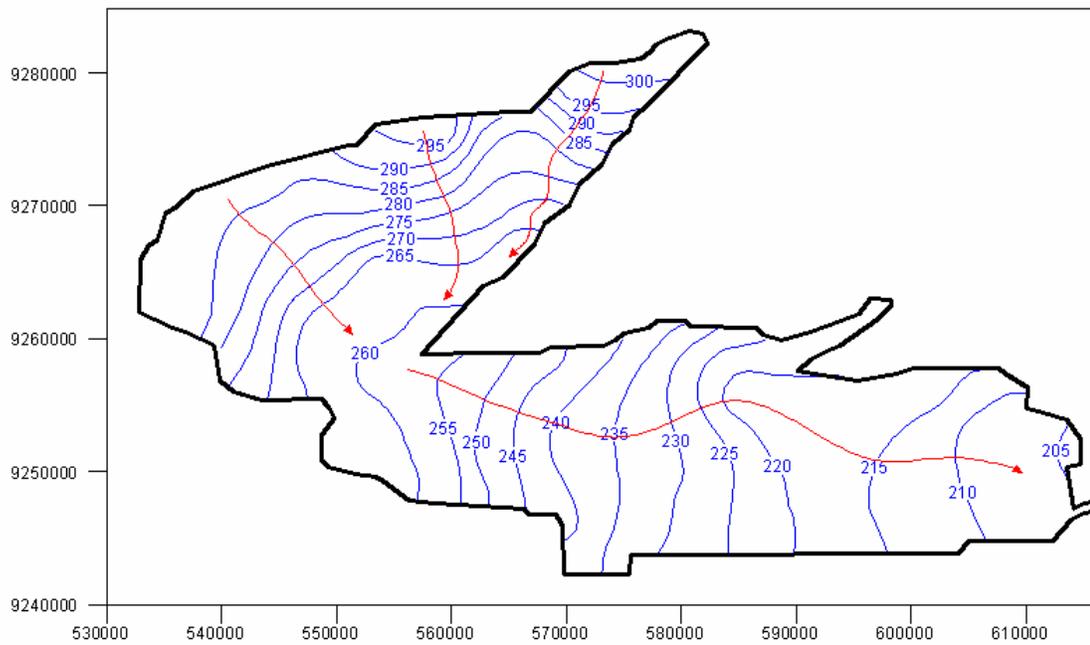


Figura 5.2 - Mapa potenciométrico observado em agosto de 2005, com algumas linhas de fluxo.

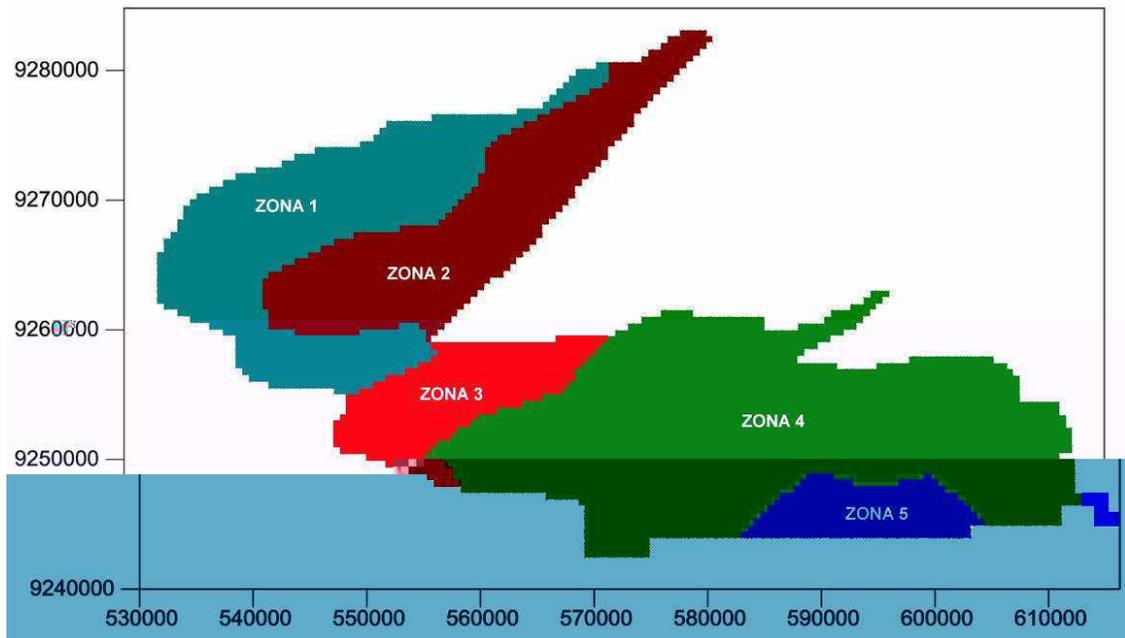


Figura 5.3 - Zonas utilizadas para a calibração, de acordo com a geologia da bacia.

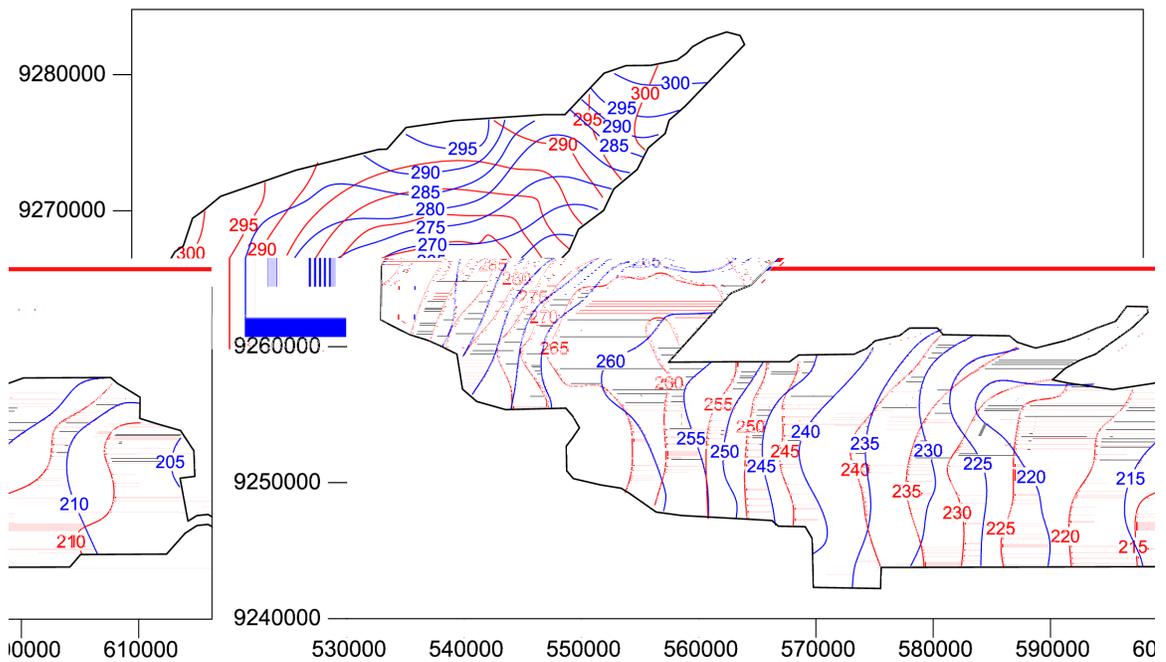


Figura 5.4 - Figura mostrando valores calculados versus observados para agosto de 2005 (sem a sub-bacia Pombal). Em vermelho calculado e azul observado.

As zonas de calibração das condutividades hidráulicas são apresentadas na figura 5.3.

A figura 5.4 mostra a superfície potenciométrica calculada e observada, para o mês de agosto de 2005, após a calibração ter sido concluída. Nela podemos observar que as direções de fluxo são praticamente as mesmas, embora as linhas equipotenciais não sejam coincidentes, apresentando alguma variação. Com base na figura 5.4 as condutividades

hidráulicas foram consideradas calibradas, uma vez que as equipotenciais calculadas apresentam mesma tendência às observadas e não há nenhuma grande singularidade que o modelo calibrado não represente. Foi considerado ainda, que a elaboração do mapa potenciométrico com base nos dados observados também não é exato, pois é utilizado processo de interpolação (automática, com o *SURFER*, ou manual) para a obtenção das curvas.

Os valores de K , calibrados são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 5.1 - Valores de K calibrados.

Sub-bacia	Formação	Zona	K (m/dia)
Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1	0,767
Brejo das Freiras	Sousa	2	0,478
Sousa	Antenor Navarro	3	0,280
Sousa	Sousa	4	0,42
Sousa	Piranhas	5	1,344

A avaliação matemática da calibração, ou calibração quantitativa, permite uma análise melhor do grau de ajuste do modelo calibrado aos pontos onde foram levantados níveis potenciométricos, pois como já citado no item 4.3, esta análise diz respeito à verificação dos resíduos entre as cargas observadas e calculadas e deve apresentar os menores valores possíveis.

Uma indicação da representatividade do modelo é dada pelo diagrama de dispersão, ou *head scatter diagram*, das cargas observadas e calculadas, o qual é mostrado na figura 5.5, e que pode ser visualizado no *PMWIN*. O diagrama de dispersão mostra que, em geral os valores de carga hidráulica observada apresentam a mesma tendência das cargas calculadas, o que implica em dizer que a calibração pode ser considerada satisfatória, embora não perfeita, caso este em que os pontos estariam sobre uma reta de 45° sem desvios, ou seja, as cargas hidráulicas calculadas seriam exatamente iguais às cargas observadas.

Obviamente a situação da calibração perfeita é extremamente difícil de ser encontrada, principalmente em áreas de maior complexidade e com um número reduzido de dados para o auxílio na elaboração do modelo, como é o caso.

Assim, com os 61 poços considerados para a calibração, sendo retirados os poços amazonas da campanha de agosto de 2005 e os poços localizados junto à borda da bacia (não se sabendo se realmente estavam inseridos na bacia ou no cristalino, tendo em vista que nesta

campanha foram coletados muitos dados de poços do cristalino), os poços na sub-bacia de Pombal e alguns poços com dados discrepantes de outros, muito próximos, chegou-se à um diagrama de dispersão apresentado na figura abaixo.

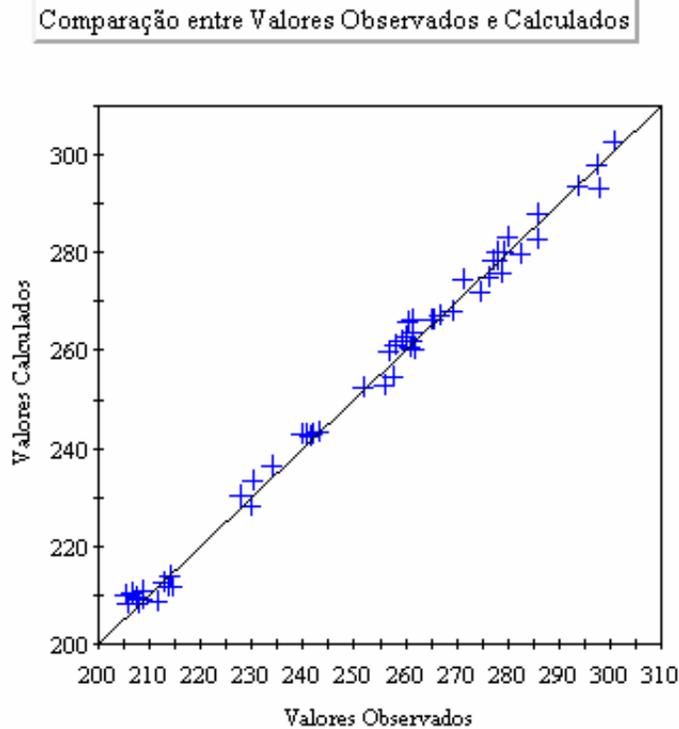


Figura 5.5 - Diagrama de dispersão (*Scatter Diagram*) obtido na calibração estacionária para 61 poços usados nesta calibração.

Abaixo são apresentados os principais parâmetros de cálculo utilizados para a verificação da calibração quantitativa do modelo no regime permanente ou estacionário.

Média dos resíduos: $MR = \frac{\sum r}{n}$, o valor de MR obtido foi igual a -0,16 m

Média absoluta dos resíduos: $RA = \frac{\sum |r|}{n}$, e seu valor foi igual a 2,18 m.

Erro médio quadrático: $RMS = \sqrt{\frac{\sum r^2}{n}}$, o qual apresentou um valor de 2,66 m.

Média normalizada: $RN = \frac{RMS}{h_{\max} - h_{\min}}$, os resultados mostram um valor de RN igual a 2,78 %.

Onde r é a diferença entre os valores calculados e observados, n é o número de poços e h_{\max} e h_{\min} são respectivamente as cargas máximas e mínimas observadas no sistema.

Apesar de o erro médio absoluto e o erro médio quadrático terem sido um pouco elevados, a média normalizada dos erros apresenta um valor baixo.

5.1.2 Calibração de Coeficiente de Armazenamento, S_y

Como já mencionado anteriormente, a calibração do coeficiente de armazenamento foi realizada com os dados de níveis potenciométricos medidos em agosto de 2005 corrigidos (editados), ou seja, como valores iniciais foram postos os valores calculados (ver tabela 5.2) pelo modelo quando o modelo foi considerado calibrado no regime permanente. Os valores postos no modelo como observados em novembro de 2005 foram iguais aos valores iniciais (calculados) mais a variação de nível estático entre as duas observações medidas em campo.

Basicamente o processo de calibração de S_y envolveu uma simulação estacionária, para que se obtivesse os valores de cargas iniciais utilizadas na simulação transiente e os dados de carga hidráulicas, postas como observadas no período inicial da calibração. Estes dados também serviram para se determinar os dados postos como observados no segundo período, já que estes são resultantes dos dados do primeiro período mais a variação de nível verificada em campo entre uma medição e outra.

A tabela 5.2 mostra o procedimento de edição dos dados para se efetuar a calibração do coeficiente de armazenamento, S_y .

As cargas hidráulicas observadas (colunas 2 e 3) são expressas pelos valores obtidos em campo. A coluna 4 mostra a variação dos níveis verificados em campo entre as campanhas de agosto e novembro de 2005.

A coluna 5 apresenta os valores de carga hidráulica, calibrada na fase estacionária e utilizados para a calibração transiente como observados (obs*). A coluna 6 é a diferença entre a coluna 5 e a coluna 4, ou seja, carga obs* menos D_h obs.

As novas cargas hidráulicas, calculadas após a calibração de S_y são mostradas na coluna 7 e a diferença entre a cargas calculadas para novembro de 2005 e as cargas obs* de agosto de 2005 estão expressas na última coluna.

Assim esperava-se que a variação de cargas (tanto as observadas quanto as utilizadas na calibração) fossem mais próximas possíveis, porem as variações de níveis calculadas e observadas apresentaram divergências. É possível que as diferenças nas variações de nível sejam decorrentes de os dados medidos em campo terem sido coletados ao longo de um

período de quase 2 meses (fim de outubro a meados de dezembro de 2005), enquanto que o período de calibração foi posto como sendo entre agosto de e novembro de 2005.

Esta explicação é bastante plausível, visto que: se o intervalo de tempo utilizado na calibração foi de três meses uma diferença um mês pra mais ou pra menos (dois meses no máximo de um poço para outro, ou medições em outubro e dezembro), podem ter efeitos consideráveis no processo de calibração.

Tabela 5.2 - Esquema de correção dos dados para a calibração do coeficiente de armazenamento, S_y .

Poço	h obs		h obs(ago)- h obs(nov)	h obs*	h obs*	h calc	h obs*(ago)- h calc(nov)
	ago/05	nov/05		ago/05	nov/05	nov/05	
CD324	298.55	297.80	0.75	285.50	284.75	284.09	0.66
CD983	269.21	268.96	0.25	268.10	267.85	267.76	0.09
CD989	265.55	264.95	0.60	266.20	265.60	266.53	0.07
CG935	207.80	207.60	0.20	208.10	207.90	207.78	0.12
CH404	208.70	208.20	0.50	210.50	210.00	209.19	0.81
CH533	213.50	211.90	1.60	212.00	210.40	211.32	-0.92

Tabela 5.3 - Valores de coeficiente de armazenamento, S_y , calibrados.

Sub-bacia	Formação	Zona	S_y
Brejo das Freiras	Antenor Navarro	1	$4,54 \cdot 10^{-2}$
Brejo das Freiras	Sousa	2	$3,67 \cdot 10^{-4}$
Sousa	Antenor Navarro	3	$2,94 \cdot 10^{-2}$
Sousa	Sousa	4	$2,94 \cdot 10^{-3}$
Sousa	Piranhas	5	$1,51 \cdot 10^{-4}$

Outra observação feita para se chegar à conclusão de que a calibração foi satisfatória foi a análise da variância, igual a 0,75, e da dispersão das cargas observadas (obs*) versus calculadas dos valores calculados para o mês de novembro de 2005. A figura 5.6 mostra o diagrama após a calibração.

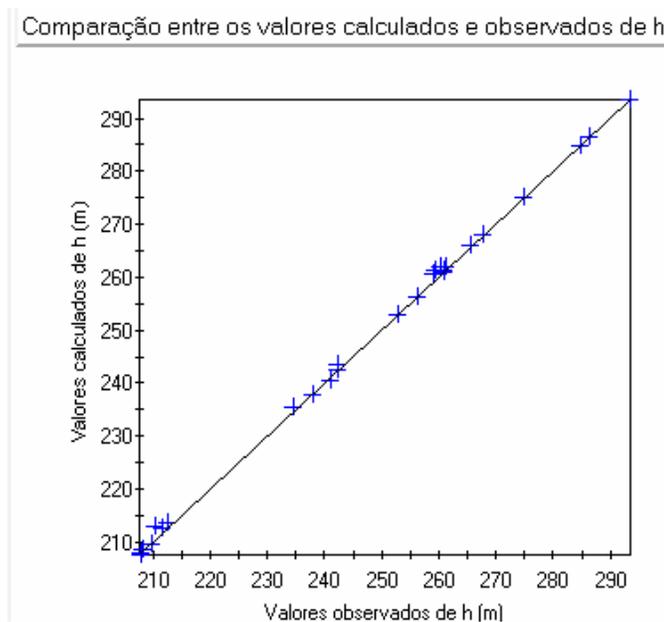


Figura 5.6 - Diagrama de dispersão (*Scatter Diagram*) entre h calc (nov-05) e h obs*(nov-05).

Como se pode observar na figura 5.6 a calibração apresenta valores satisfatórios, sem grandes dispersões das cargas hidráulicas ao longo do tempo. Isto implica em dizer que, uma vez que se entra com valores iniciais corretos de carga hidráulica, o modelo pode simular satisfatoriamente valores de potencimetry em um dado intervalo de tempo (sem recarga) com o coeficiente de armazenamento calibrado.

Abaixo é mostrado o mapa potenciométrico calculado para o mês de novembro de 2005, após a calibração de S_y .

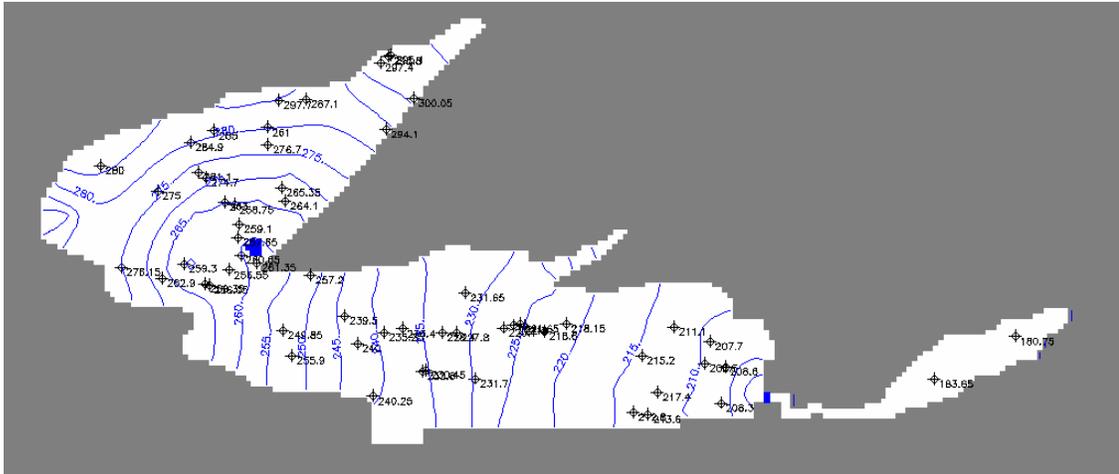


Figura 5.7 - Mapa potenciométrico calculado para novembro de 2005, após a calibração de S_y .

5.1.3 Calibração da Recarga

A calibração da recarga foi realizada pelo mesmo método da calibração do S_y , porém com dados medidos e calculados nas campanhas de novembro de 2005 e maio de 2006.

Da mesma maneira que fora feito na calibração de S_y , na calibração da recarga os dados também foram editados de maneira que os valores de recarga encontrados pelo *PEST* não fossem distorcidos para compensar os erros nas calibrações anteriores (K e S).

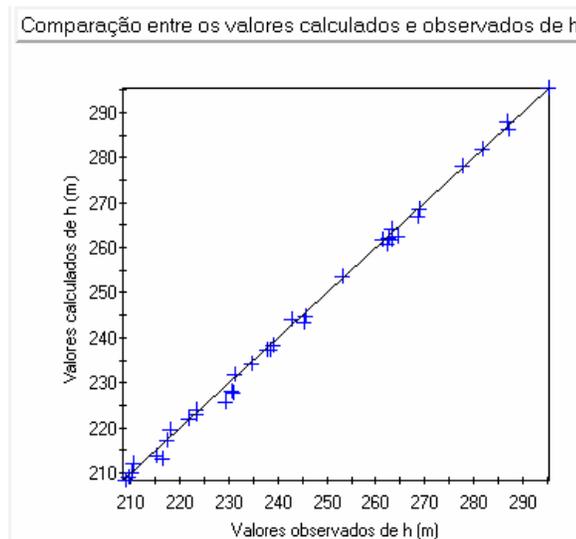


Figura 5.8 - Diagrama de dispersão obtido na calibração da recarga entre os meses de novembro e maio.