

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**

Julio César Sebastiani Kunzler

Orientador: Prof. Dr. Hans Dieter Max Schuster

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

CAMPINA GRANDE - PB

AGOSTO de 2007

**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 trabalhos, amizade e parceria.

Aos colegas, Marcos, Gracieli Louise, Gustavo, Mosefran, Allan e Valterlin, pelo companheirismo e parceria nos estudos.

Aos professores Eduardo, Márcia, Carlos, Janiro, Srinivasan, Ricardo e Anemarie pelo conhecimento que me foi passado.

Aos funcionários do laboratório, Ismael, Haroldo, Raul, Vera, Alrezinha e Lindimar.

Aos demais amigos que foram feitos ao longo da estada aqui em Campina Grande, Leandro, Hilmária, Alcidney, Luciano, Romero, Edley, Olaf, Domingos, Emanuel e muitos outros.

Aos colegas de laboratório, Paulo, Laércio, João, Whelsson, Alcigeimes, Myrla, Simone, Renato, Francisco, Fernanda, Suzana, Daiane, Isabel, Roberta e Rafael, pela parceria desenvolvida neste período.

À Márcia, pelo apoio nas horas difíceis.

Enfim agradeço a todos aqueles que fizeram, de uma forma ou de outra, parte da caminhada seguida neste trabalho.

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-UFCG, 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 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 | 26 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.1 | Área de Estudo e Domínio do Modelo..... | 26 |
| 4.2 | Modelo Matemático Utilizado | 26 |
| 4.3 | Etapas da Modelagem..... | 27 |
| 4.3.1 | Definições dos Objetivos do Processo de Modelagem | 28 |
| 4.3.2 | Seleção de Dados de Campo | 29 |
| 4.3.3 | Modelo Conceitual | 35 |
| 4.3.4 | Calibração do Modelo | 38 |
| 4.3.5 | Verificação do Modelo..... | 40 |
| 4.3.6 | Aplicação do Modelo Matemático..... | 41 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 44 |
| 5.1 | Calibração do Modelo..... | 44 |
| 5.1.1 | Calibração de Condutividade Hidráulica | 44 |
| 5.1.2 | Calibração de Coeficiente de Armazenamento, S_y | 49 |
| 5.1.3 | Calibração da Recarga..... | 52 |
| 5.2 | Quantificação da Recarga | 55 |
| 5.2.1 | Vazão do Aquífero na Saída da Sub-Bacia de Sousa para a Sub-Bacia de Pombal | 58 |
| 5.3 | Verificação do Modelo | 59 |
| 5.4 | Simulação de Cenários Hipotéticos de Exploração do Aquífero | 60 |
| 5.4.1 | Balanço Hídrico | 63 |
| 6 | DISCUSSÃO E CONCLUSÃO | 65 |
| 7 | RECOMENDAÇÕES | 68 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 69 |

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 do 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 3.5 a, b - Paisagens da região no fim da época das chuvas (maio de 2006). | 24 |
| Figura 3.6a - Poço tubular profundo; b - Poço amazonas da região. Ambos utilizados para o abastecimento de pequenos núcleos e ou propriedades rurais. | 25 |
| Figura 3.7a - Poço com catavento, típico da região; b - poço utilizado para abastecimento de Poço José de Moura. | 25 |
| Figura 4.1- Fluxograma das etapas realizadas na modelagem (Anderson e Woessner, 1992; apud: Cabral e Demétrio, 1997). | 28 |
| Figura 4.2 - Topografia inserida no modelo, gerada a partir de imagens SRTM. | 29 |
| Figura 4.3- Topografia da base do modelo utilizando informação de Françolin (1992). | 30 |
| Figura 4.4 - Diferença em metros [m] entre as cotas, obtidas com GPS Geodésico e imagem SRTM. | 31 |
| Figura 4.5 - Correlação feita entre os dados de imagens SRTM e nivelados em campo. | 31 |
| Figura 4.6 - Histograma de chuvas entre janeiro de 2005 e maio de 2007. | 32 |
| Figura 4.7 - Variação dos níveis potenciométricos coletados nas 7 campanhas (21 poços com todas as medições). | 33 |
| Figura 4.8 - Condições de contorno utilizadas no modelo e discretização da malha. | 37 |
| 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. | 45 |
| Figura 5.2 - Mapa potenciométrico observado em agosto de 2005. Em azul equipotenciais e em vermelho, linhas de fluxo. | 45 |
| Figura 5.3 - Zonas utilizadas para a calibração, de acordo com a geologia da bacia. | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.4 - Figura mostrando valores calculados versus observados para agosto de 2005 (sem a sub-bacia Pombal). Em vermelho calculado e azul observado. | 46 |
| Figura 5.5 - Diagrama de dispersão (<i>Scatter Diagram</i>) obtido na calibração estacionária para 61 poços usados nesta calibração. | 48 |
| Figura 5.6 - Diagrama de dispersão (<i>Scatter Diagram</i>) entre h calc (nov-05) e h obs*(nov-05). | 51 |
| Figura 5.7 - Mapa potenciométrico calculado para novembro de 2005, após a calibração de S_y | 52 |
| Figura 5.8 - Diagrama de dispersão obtido na calibração da recarga entre os meses de novembro e maio. | 52 |
| Figura 5.9 - Mapa potenciométrico calculado para maio de 2006, após a calibração da recarga. | 55 |
| Figura 5.10 - Vazão lateral calculada por <i>WATER BUDGET</i> na saída do sub-bacia Sousa para sub-bacia Pombal. | 58 |
| Figura 5.11 - Rebaixamento causado pelo bombeamento (regime estacionário $Q=250$ $m^3/dia/poço$). | 61 |
| Figura 5.12 - Rebaixamento causado pelo bombeamento (estacionário $Q=500$ $m^3/dia/poço$). | 61 |
| Figura 5.13 - Rebaixamento causado por 180 dias de bombeamento (transiente $Q=250$ $m^3/dia/poço$). | 62 |
| Figura 5.14 - Mapa residual entre mapa potenciométrico com e sem bombeamento (transiente $Q=500$ m^3/dia). | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 - Tabela com dados relevantes dos municípios que estão inseridos parcial ou totalmente na bacia, (IBGE, 2006; CPRM-UFCG, 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. | 33 |
| 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). | 34 |
| Tabela 5.1 - Valores de K calibrados. | 47 |
| Tabela 5.2 - Esquema de correção dos dados para a calibração do coeficiente de armazenamento, S_y | 50 |
| Tabela 5.3 - Valores de coeficiente de armazenamento, S_y , calibrados. | 51 |
| Tabela 5.4 - Dados corrigidos de carga hidráulica para a calibração da recarga. | 53 |
| Tabela 5.5 - Valores de recarga calibrados para o período entre os meses de novembro de 2005 e maio de 2006. | 54 |
| Tabela 5.6 Calibração da recarga para o período entre novembro de 2006 e maio de 2007. | 54 |
| Tabela 5.7 - Valores de recarga calibradas através do <i>PEST</i> durante op período chuvoso entre novembro de 2005 e maio de 2006. | 56 |
| Tabela 5.8--Valores de recarga calibradas através do <i>PEST</i> durante op período chuvoso entre novembro de 2006 e maio de 2007. | 57 |
| 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. | 60 |
| Tabela 5.10 - Volumes ($\times 10^6 \text{ m}^3$) de água de recarga, bombeamento e superávit, regime transiente (180dias). | 64 |
| Tabela 5.11 Volumes ($\times 10^6 \text{ m}^3$) de água de recarga, bombeamento e superávit, regime estacionário. | 64 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A irregularidade na distribuição, temporal e 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 e 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. 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:

- Estabelecer um modelo matemático para a simulação da bacia sedimentar do rio do Peixe, com a calibração dos parâmetros hidrodinâmicos para a área, através do modelo;
- 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;
- 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 do comprimento L e área de seção A preenchido com meio poroso de condutividade hidráulica K . A vazão da saída Q é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico ao longo do seu percurso, $\Delta h/\Delta L$ e o fator de proporcionalidade é a condutividade hidráulica, K , expressa em comprimento por tempo [L/T]:

$$Q = A \cdot K \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad [\text{L}^3/\text{T}] \quad (2.1)$$

e dividindo a expressão pela área A , vem:

$$q = -K \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad [\text{L}/\text{T}] \quad (2.2)$$

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

O princípio básico de 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).

$$Q_{saída} - Q_{entrada} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.3)$$

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

A vazão define-se como

$$Q = qA = \frac{\Delta V}{\Delta t} = KAi = K \frac{\partial h}{\partial l} \quad (2.4)$$

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

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.5)$$

A definição do coeficiente de armazenamento específico é

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (2.6)$$

onde Δx , Δy e Δz = três dimensões do volume representativo, Δh = variação da carga hidráulica e S_s = coeficiente de armazenamento específico.

Então

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.7)$$

A equação de continuidade escreve-se agora:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm W \quad (2.8)$$

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 = componentes principais do tensor simétrico da condutividade hidráulica, $\bar{\bar{K}}$, nas direções x, y, z e $\partial h / dx, \partial h / dy, \partial h / dz$ 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:

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

ou expressa pelo operador diferencial Nabla, ∇ :

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

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

1. $h = h_1$ carga hidráulica especificada no contorno do domínio (condição de Dirichlet)
2. $-T \cdot \nabla h \cdot \vec{n} = q_1$ fluxo especificado no contorno do domínio (condição de Neumann)
3. $-T \cdot \nabla h \cdot \vec{n} = \tau(h' - h)$ 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, τ = 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.

$$\vec{v} = \frac{\vec{q}}{n_{ef}} = -\frac{[K]}{n_{ef}} \vec{\nabla}h \quad (2.11)$$

onde o gradiente hidráulico é definido como: $\vec{\nabla}h = \frac{\partial h}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial h}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial h}{\partial z} \vec{k}$ (2.12)

2.2 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 que o mais utilizado é 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.

$$\sum Q_i = S_s \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \right) \Delta V \quad (2.13)$$

Sendo, $\sum Q_i$ a soma das vazões horizontais e verticais que entram e saem da célula, S_s um equivalente ao armazenamento específico, $\Delta h/\Delta t$ a variação da carga hidráulica pelo tempo e ΔV 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:

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

e as segundas derivadas nas direções x e y são:

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

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

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

e 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..

$$\frac{h_{i-1,j} - 2h_{ij} + h_{i+1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j-1} - 2h_{ij} + h_{i,j+1}}{(\Delta y)^2} - \frac{W}{T} = \frac{S}{T} \left(\frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} \right) \quad (2.18)$$

onde, $h = h(x, y, t^*)$ é a carga hidráulica nas células contíguas à célula calculada e $T = K \cdot b$ 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. Para problema bidimensional esta razão é definida como:

$$\frac{T\Delta t}{S[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]} < 0,25 \quad (2.19)$$

Na prática, a equação (2.18) é apresentada com o método da solução implícita (colocando $t^* = t + \Delta t$) 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 $h(t + \Delta t)$ ou seja $\theta = 0,5$ devido ao chamado esquema de Crank-Nicholson definido por:

$$h_{i,j}(t^*) = (1 - \theta)h_{i,j}(t) + \theta \cdot h_{i,j}(t + \Delta t) \quad (2.20)$$

sendo $\theta = 0$ a solução explícita, e $\theta = 1$ 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 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 utilizam 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:

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

onde θ = 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 d'água (*Water Table Rise Method*) é o método que indica claramente o efeito da recarga depois 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:

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

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 bem conhecida taxa de precipitação e baseada numa considerada relação linear entre chuva e infiltração, é 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 $\alpha [T^{-1}]$ = constante de recessão.

Grupo III. Todos os métodos Darcianos estimam o fluxo a partir do gradiente da carga hidráulica e da condutividade hidráulica. Por isso, estes métodos requerem uma determinação exata das duas quantidades na escala 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 hidrológico. Elas são capazes de traçar o movimento d'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 de cloreto) de modo que:

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

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), Françaolin e Szamatari (1987; *apud* CPRM-UFCG, 2005) e Françaolin (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 de profundidade, após passar pelas três litologias do local, ainda denominadas A, B e C.

A figura 2.1 mostra 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.

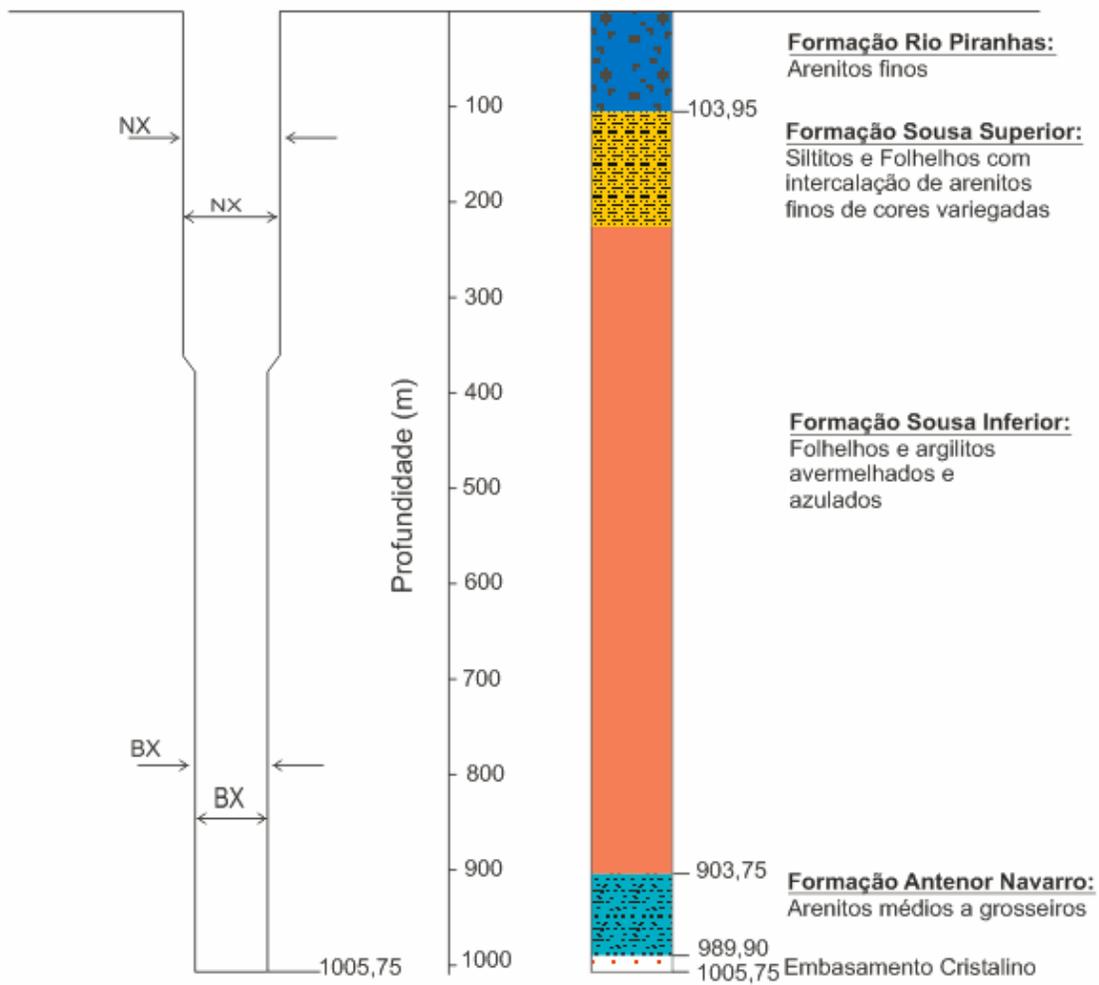


Figura 2.1 Estratigrafia do furo Lagoa do Forno (Correia, 2007).

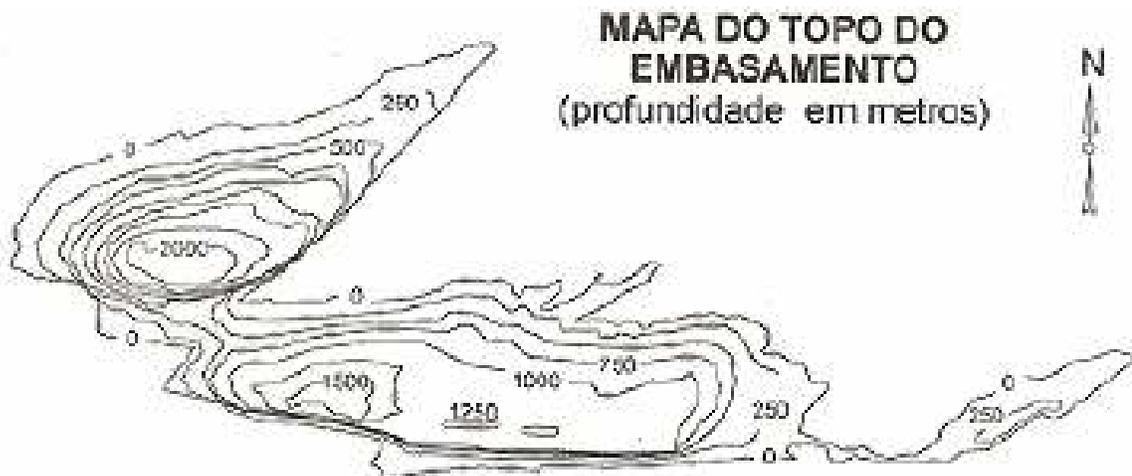


Figura 2.2 Mapa do topo do embasamento do cristalino (Françolin, 1992).

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.

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 área da bacia sedimentar do Rio do Peixe, indicando que seus sistemas aquíferos são dispostos da maneira expressa a seguir;

Superior ao cristalino está acondicionado 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 suas duas partes, a superior e a inferior. A superior é composta pelos siltitos e folhelos micáceos e calcíferos.

Próximo ao furo stratigráfico 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 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. 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 sua dissertação de mestrado. A síntese de suas análises estão expostas abaixo.

- O escoamento na Bacia Rio do Peixe se faz de seus limites para o seu interior;
- 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;
- Em torno da cidade de Antenor Navarro, existe uma depressão potenciométrica causada pela exploração por poços tubulares que abasteciam a cidade;
- Na região em torno da cidade de Sousa a potencimetria 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 e 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.

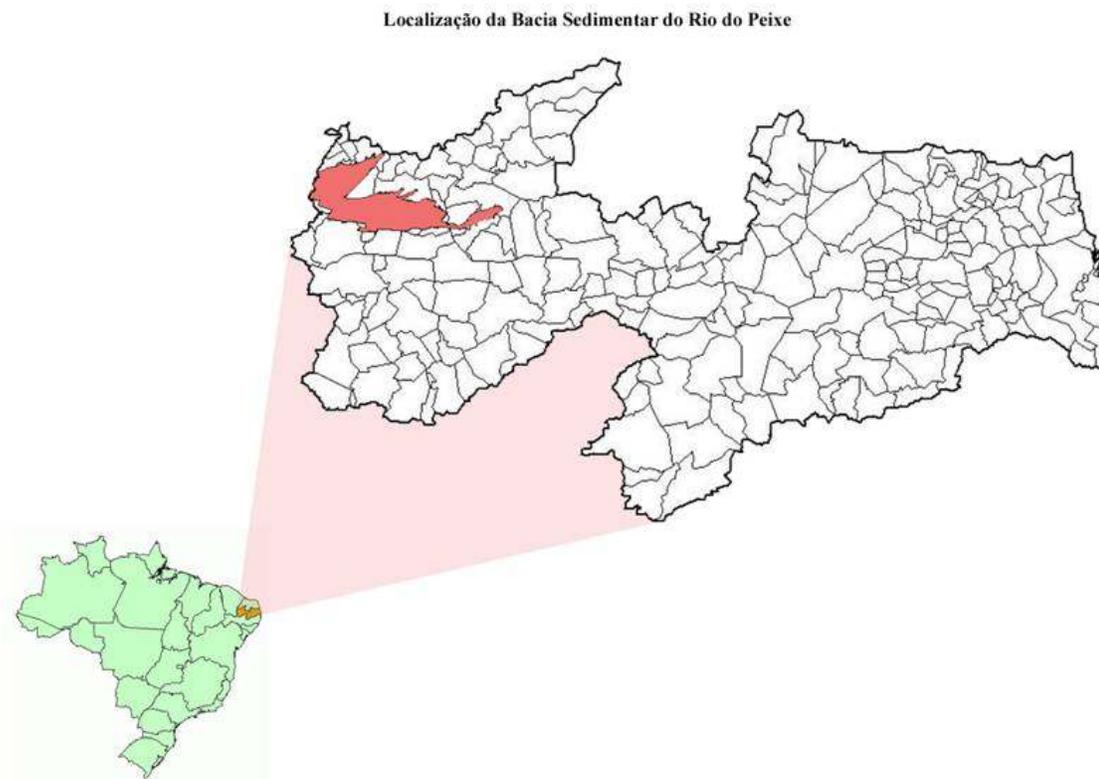


Figura 3.1 - Localização da área de estudo.

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 | Área (Km ²) | Habitantes | Número de poços | Número de poços tubulares |
|---------------------------------|-------------------------|------------|-----------------|---------------------------|
| Aparecida | 229 | 5894 | 3 | 3 |
| Cajazeiras | 586 | 54715 | - | - |
| Marizópolis | 64 | 5618 | 8 | 5 |
| Poço José de Moura | 98 | 3529 | 13 | 13 |
| Pombal | 889 | 31954 | 3 | 3 |
| Santa Helena | 169 | 6170 | 43 | 39 |
| São Domingos do Pombal | 474 | 2498 | 23 | 21 |
| São João do Rio do Peixe | 210 | 17661 | 51 | 45 |
| Sousa | 842 | 62635 | 101 | 85 |
| Triunfo | 295 | 9053 | 47 | 44 |
| Uiraúna | 223 | 13681 | 29 | 26 |
| Umari | 264 | 7435 | 7 | 6 |
| Total | | 220843 | 328 | 290 |

A população total dos municípios é estimada em 220.843 habitantes (IBGE, 2006), resultando em uma densidade demográfica de cerca de 51 hab/km² dentro do limite dos municípios (área total de 4343 km², incluindo áreas externas à área estudada).

3.2 Clima

A área de estudo está totalmente inserida na região semi-árida nordestina e apresenta duas estações bem definidas, uma seca e outra chuvosa. A estação chuvosa vai de janeiro até maio, sendo o resto do ano predominantemente seco.

A região em que está localizada a bacia apresenta grande variabilidade espacial e temporal das precipitações.

Os valores da precipitação média, obtida por média aritmética, mostram uma precipitação média anual de 862 mm, com os postos considerados no cálculo e sua localização mostrados na tabela 3.2.

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 | 7 | 10 | 21 | 737 |
| Média | 162 | 129 | 200 | 149 | 99 | 41 | 16 | 7 | 3 | 6 | 11 | 40 | 862 |
| % da precipitação | 18,8 | 14,9 | 23,2 | 17,3 | 11,4 | 4,8 | 1,8 | 0,9 | 0,3 | 0,7 | 1,2 | 4,7 | |

A temperatura média anual fica em torno de 27° C, considerando a média das estações de São Gonçalo e Coremas, (PDRH/BRP, 2000).

A evapotranspiração potencial do local é de cerca de 1900 mm para as mesmas estações descritas no parágrafo anterior.

As médias mensais de temperatura e evaporação em tanque classe A, nas duas estações acima citadas podem ser visualizadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Valores médios de temperaturas registrados na região, PDRH-BRP (2000).

| Estação/mês | Jan | fev | mar | abr | mai | jun | jul | ago | set | out | Nov | dez | Média |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|
| Coremas T (°C) | 28.6 | 27 | 27.2 | 26.8 | 26.6 | 25.4 | 25.5 | 26.3 | 27.6 | 28.3 | 28.8 | 28.7 | 27.2 |
| São Gonçalo T (°C) | 27.3 | 26.5 | 26.1 | 25.9 | 23.4 | 25.1 | 26.2 | 26.3 | 25.6 | 28.8 | 27.8 | 27.9 | 26.4 |
| Coremas ETP (mm) | 272 | 215 | 204 | 182 | 183 | 182 | 220 | 272 | 300 | 333 | 319 | 311 | Total 2993 |
| São Gonçalo ETP (mm) | 301 | 214 | 196 | 170 | 183 | 176 | 216 | 275 | 315 | 345 | 334 | 333 | Total 3057 |

3.3 Relevo

O relevo da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe caracteriza-se por ser uma planície com altitude média em torno de 230 m, situada abaixo do nível do embasamento cristalino que a circunda, e que forma zonas mais íngremes ao longo do contorno da bacia sedimentar do Rio do Peixe.

Regionalmente a região de Sousa está localizada em uma zona deprimida limitada pelas serras que se elevam ao sul e a oeste, respectivamente nos limites dos estados de Pernambuco e Ceará (Correia, 2007).

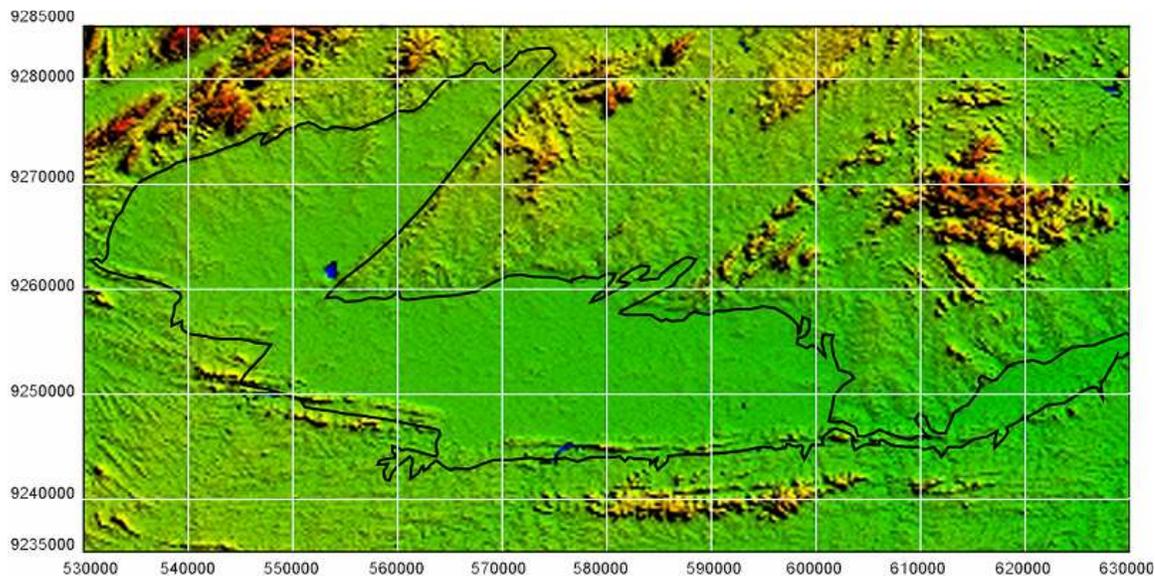


Figura 3.2 - Imagem do SRTM com o relevo da região e a delimitação da bacia sedimentar.

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.

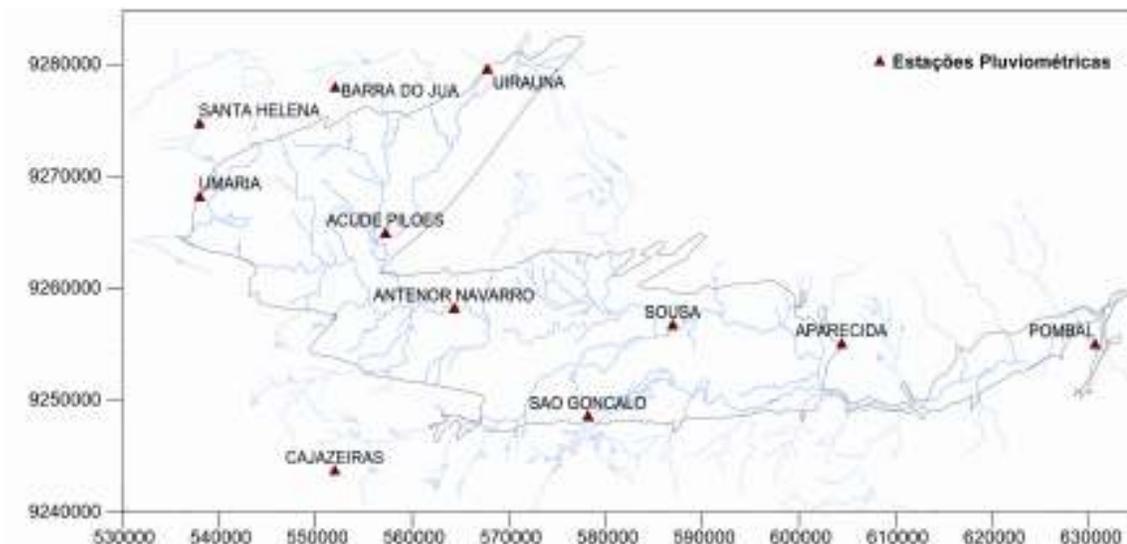


Figura 3.3 - Hidrografia da região, estações pluviométricas e os limites da bacia sedimentar.

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 Mabesoone (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.

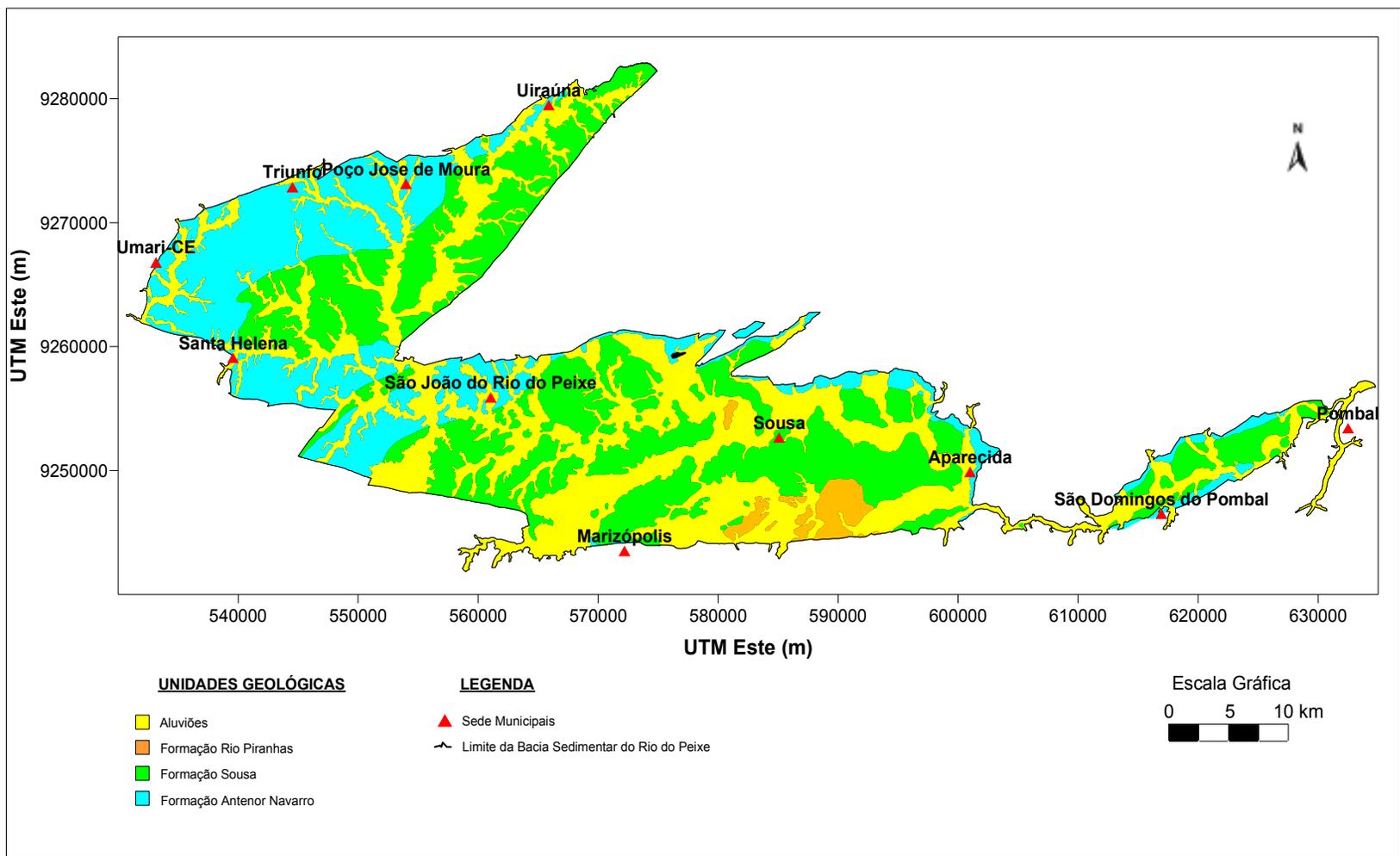


Figura 3.4 - Mapa das formações geológicas da bacia sedimentar do rio do Peixe, (CPRM-UFCEG, 2005).

Estudos feitos por Albuquerque (1971), Brito Neves e Santos (1984), Ponte 1992 entre outros, citados em CPRM-UFCG (2005) indicam que as bacias sedimentares brasileiras, dentre elas a do rio do Peixe, guardam herança geológica do pré-cambriano nordestino.

3.6 Tipo de Solos, Uso do Solo e Vegetação

3.6.1 Tipos de Solos

De acordo com SUDENE, (1972, apud CPRM-UFCG, 2005) os principais solos da região são: Solonetz solodizado, solos litólicos eutróficos, solos aluviais eutróficos, vertisol, podzóico 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, 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 3.5 a, 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 esta delimitada 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 utilizadas nas 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.

$$r = \sum_{i=1}^N (h_i^o - h_i)^2 \quad 3.1$$

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).

- Definição dos objetivos da modelagem;
- Elaboração do modelo conceitual, com base nos conhecimentos que se possui;
- Escolha do tipo de modelo matemático;
- Definição do pacote computacional a ser utilizado para efetuar a modelagem;
- Esquematização do modelo, com definição da malha, informações utilizadas para a calibração entre outras. Nesta etapa está incluída a incorporação dos dados de campo;
- 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;
- Verificação do modelo 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;
- Apresentação dos resultados;
- Verificação de longo prazo.

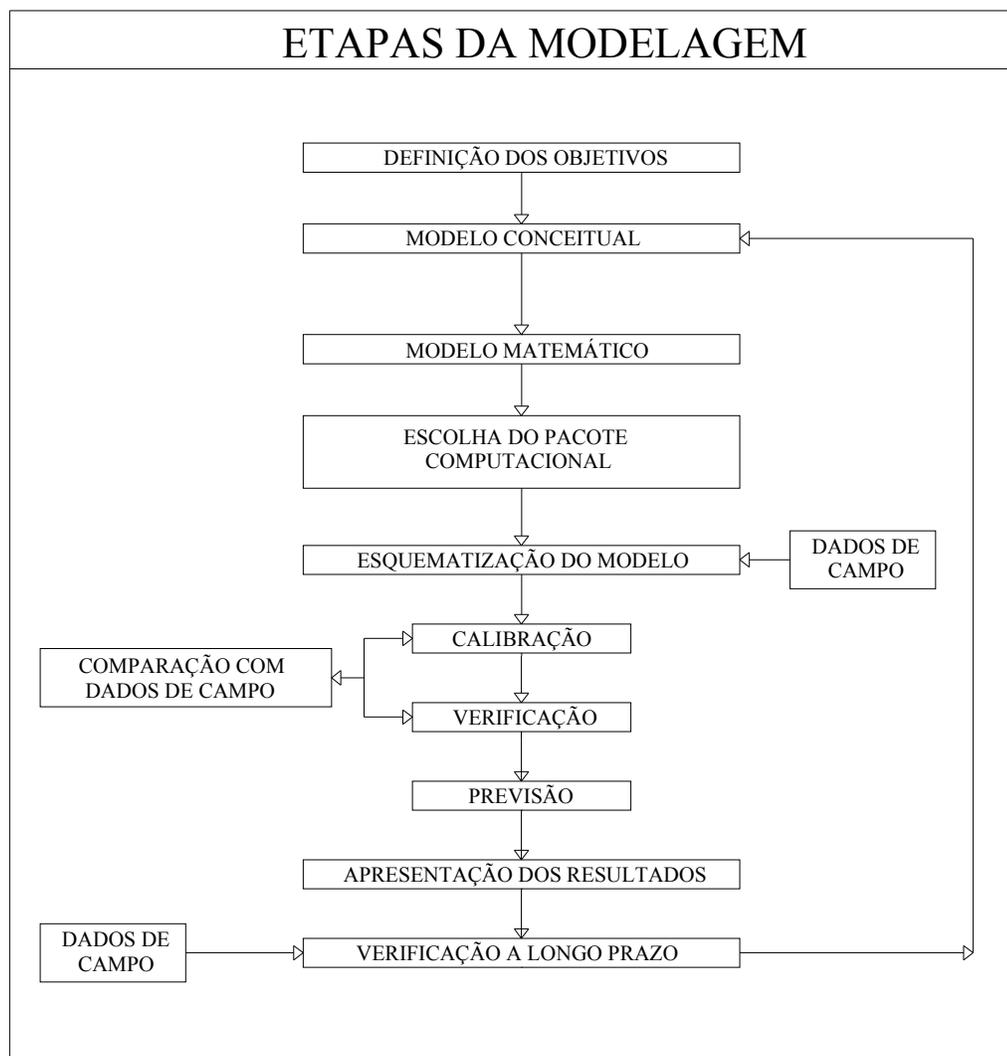


Figura 4.1- Fluxograma das etapas realizadas na modelagem (Anderson e Woessner, 1992; apud:Cabral e Demétrio, 1997).

A seguir são discutidas as etapas da modelagem seguidas neste trabalho e como foram desenvolvidas.

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 determinar a recarga aportada ao aquífero no período em que foram coletados dados de nível estático.

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 Seleção de Dados de Campo

A elaboração do modelo conceitual foi feita com base em informações existentes em alguns trabalhos anteriores realizados na área (Françolin, 1992, Albuquerque 1984, Lima Filho, 1991) e também com os dados coletados em campo em campanhas feitas pelas equipes da CPRM e UFCG durante a execução projeto, entre agosto de 2005 e maio de 2006.

Estes dados coletados nas sete campanhas de monitoramento também foram utilizados na calibração e verificação do modelo.

Não foi feito levantamento em campo de dados de topografia e base do aquífero. Estes foram obtidos com o uso de imagens de satélite (SRTM) e do mapa da profundidade do cristalino elaborado por Françolin (1992), respectivamente.

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 base da área modelada.

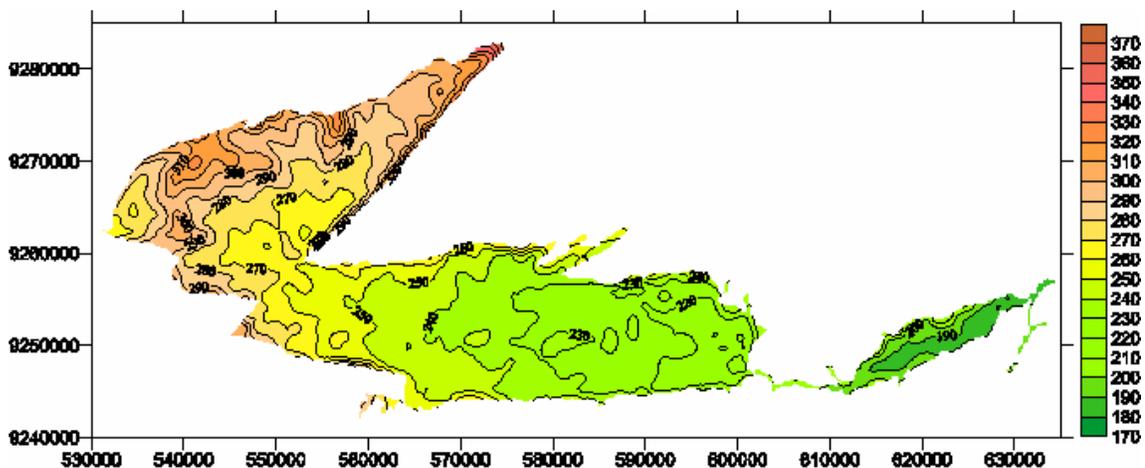
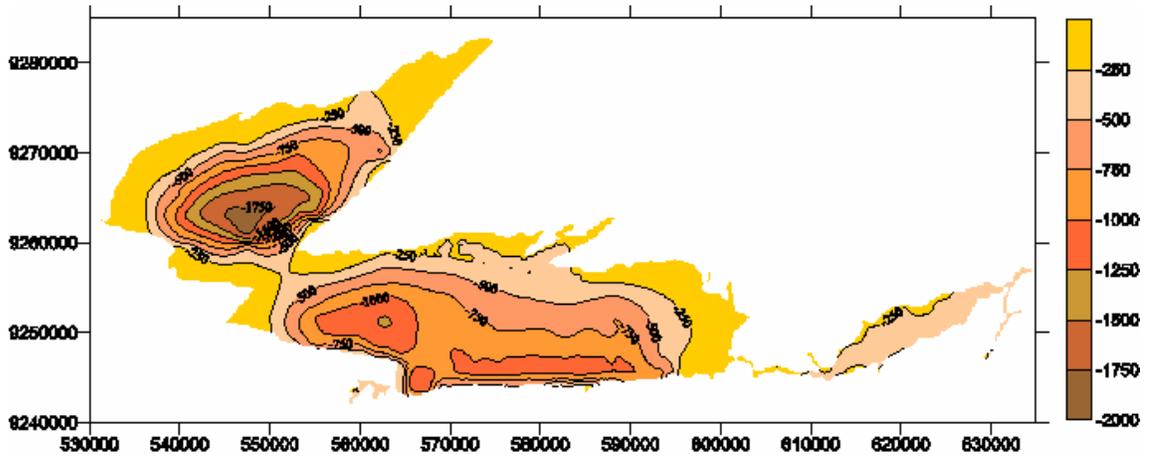


Figura 4.2 -Topografia inserida no modelo, gerada a partir de imagens SRTM.

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.



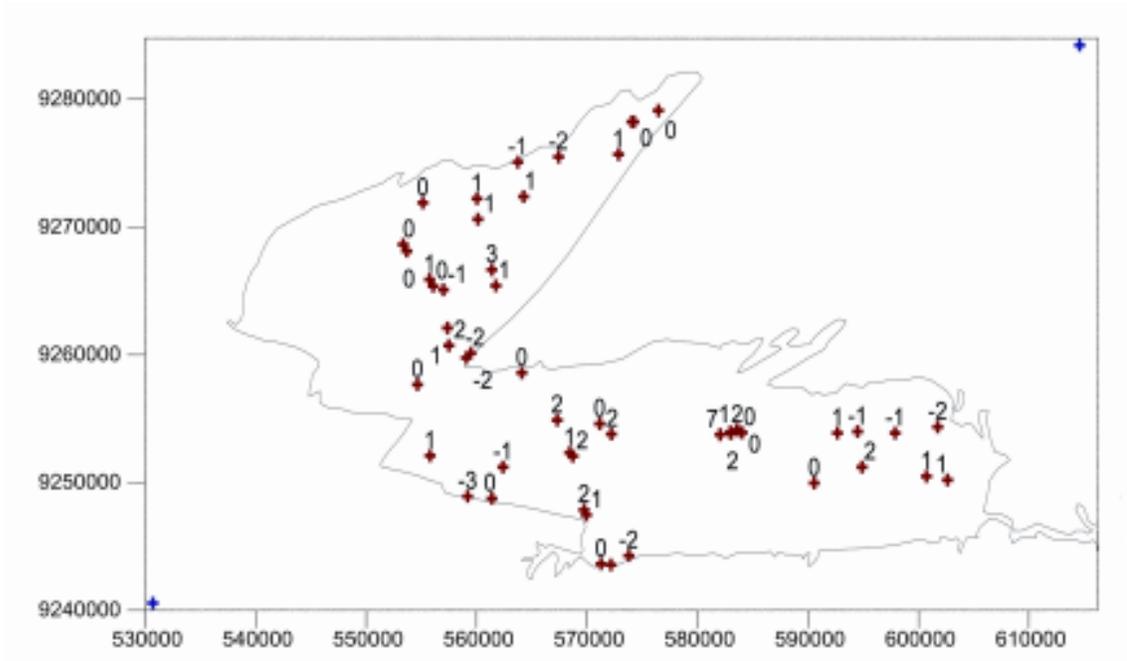


Figura 4.4 - Diferença em metros [m] entre as cotas, obtidas com GPS Geodésico e imagem SRTM.

Correlação entre Cotas Imagem SRTM versus GPS Geodésico

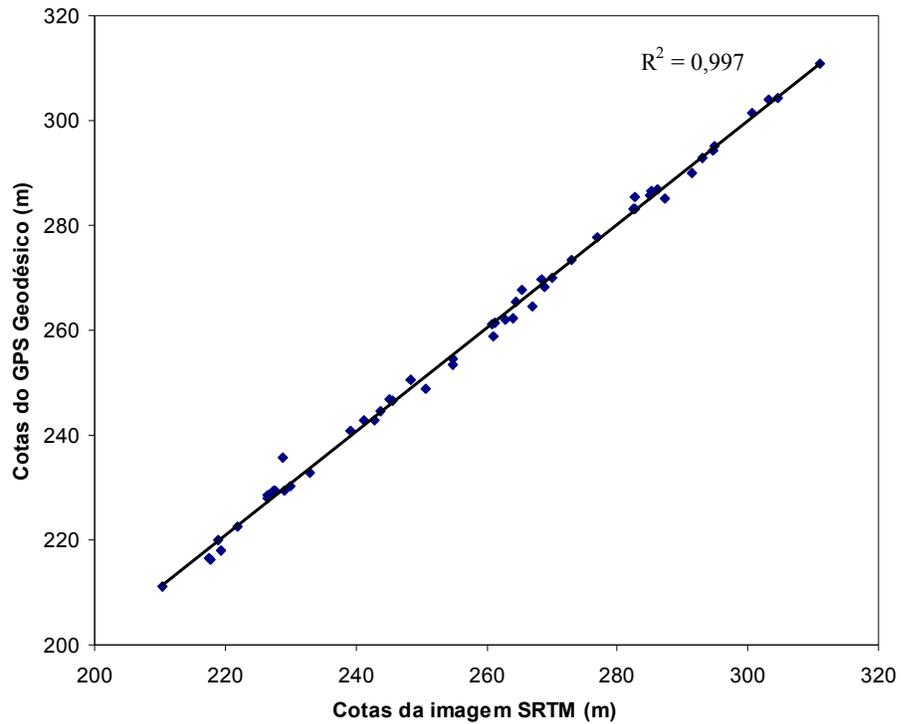


Figura 4.5 - Correlação feita entre os dados de imagens SRTM e nivelados em campo.

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.

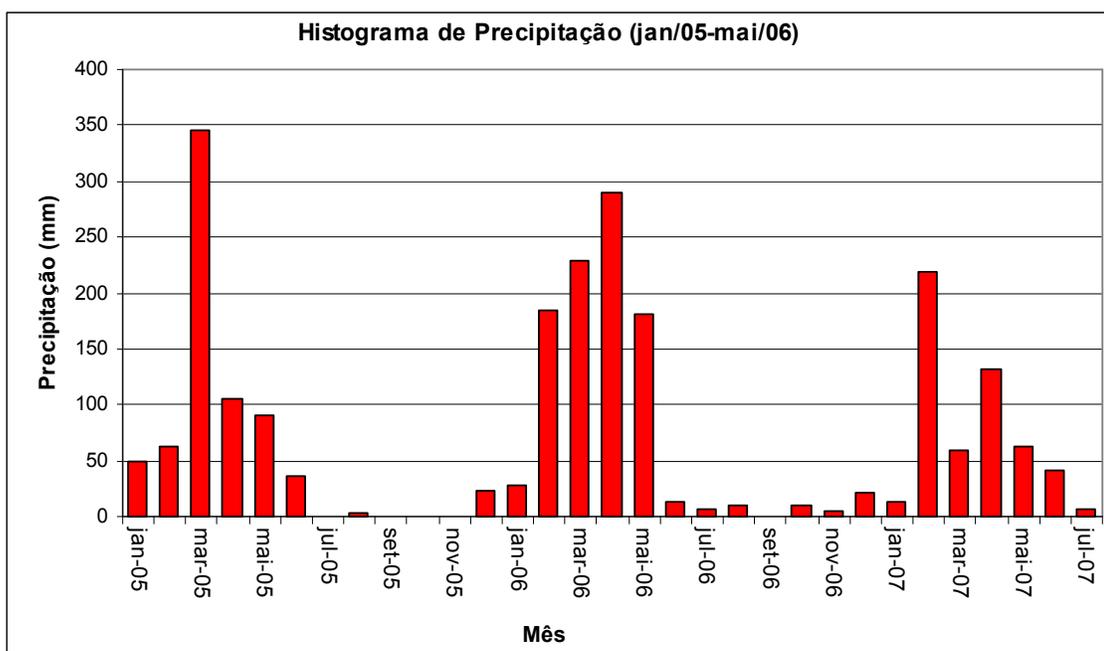


Figura 4.6 - Histograma de chuvas entre janeiro de 2005 e maio de 2007.

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 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.

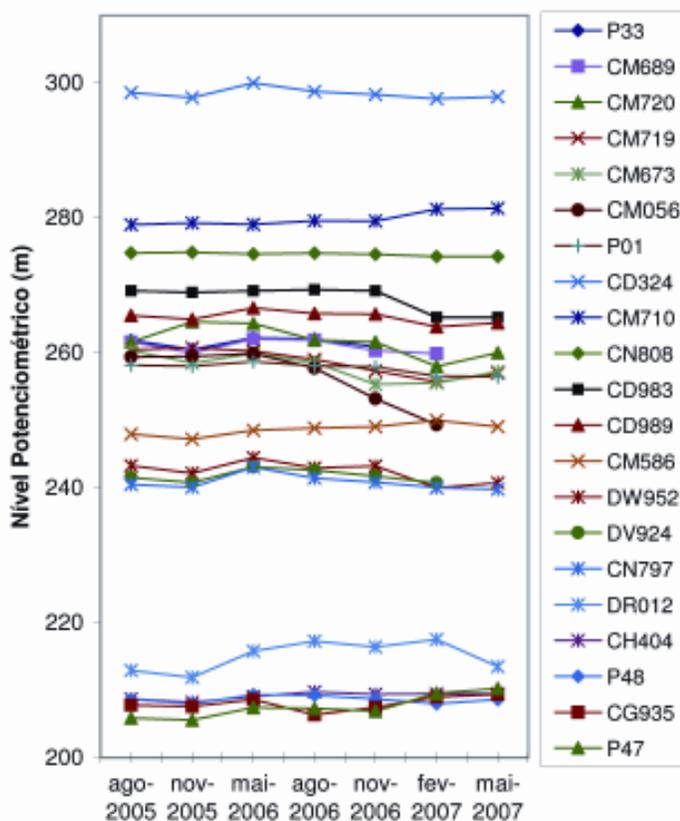


Figura 4.7 - Variação dos níveis potenciométricos coletados nas 7 campanhas (21 poços com todas as medições).

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 nos seus valores de carga hidráulica.

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 estes só foram executados no ano de 2007, depois da conclusão deste trabalho, e ainda apresentaram dados duvidosos. Pelo motivo de os testes de aquífero não terem apresentado valores plausíveis de condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, não foi possível se comprovar se os parâmetros calibrados do aquífero estavam realmente condizentes com valores de campo.

Da mesma forma, a geometria das formações ainda não é bem definida, assim como seus parâmetros hidrodinâmicos ainda não foram determinados, quando consideramos falhos os testes de bombeamento realizados em 2007. Também ainda 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 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 rio que 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.

4.3.3.1 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.

As retiradas não foram consideradas no modelo estacionário, pois, apesar da existência de cerca de 160 poços ativos ao longo da área de estudo estes estão localizados quase sempre em pequenas propriedades rurais e apresentam retiradas muito pequenas, da ordem de 5 m³/dia/poço, conforme constatado em visitas aos locais.

A recarga foi estimada, inicialmente, para a calibração das condutividades hidráulicas como constante ao longo da bacia e com um valor de 32 mm/ano a partir do balanço hídrico das estações de São Gonçalo e Sousa apresentado no PERH/PB (2006), ou seja cerca de 4% da precipitação média anual.

A figura 4.8 mostra a área de modelagem com suas condições de contorno.

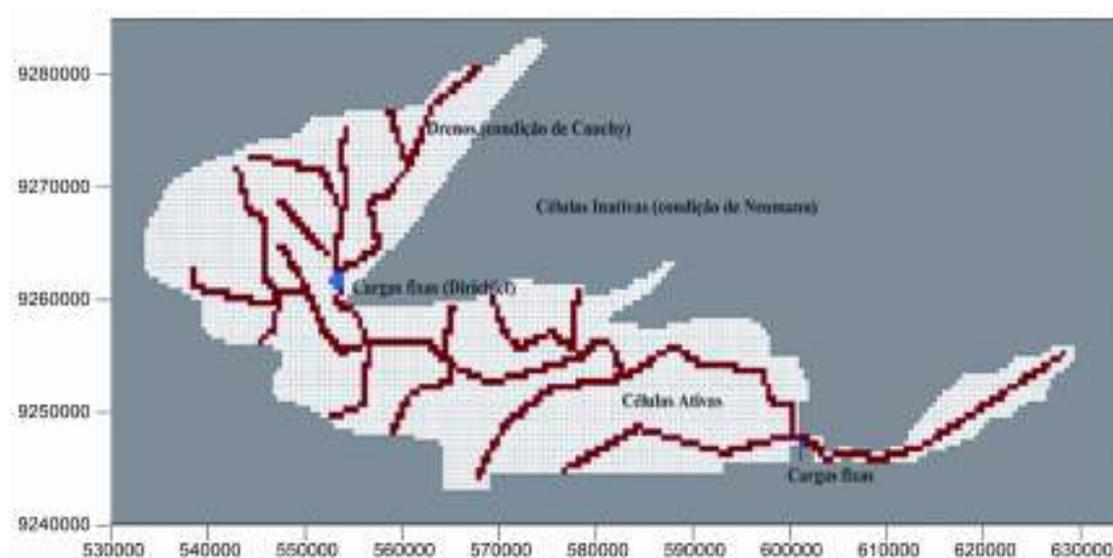


Figura 4.8 - Condições de contorno utilizadas no modelo e discretização da malha.

4.3.3.2 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 fluxograma mostrado na figura 4.9.

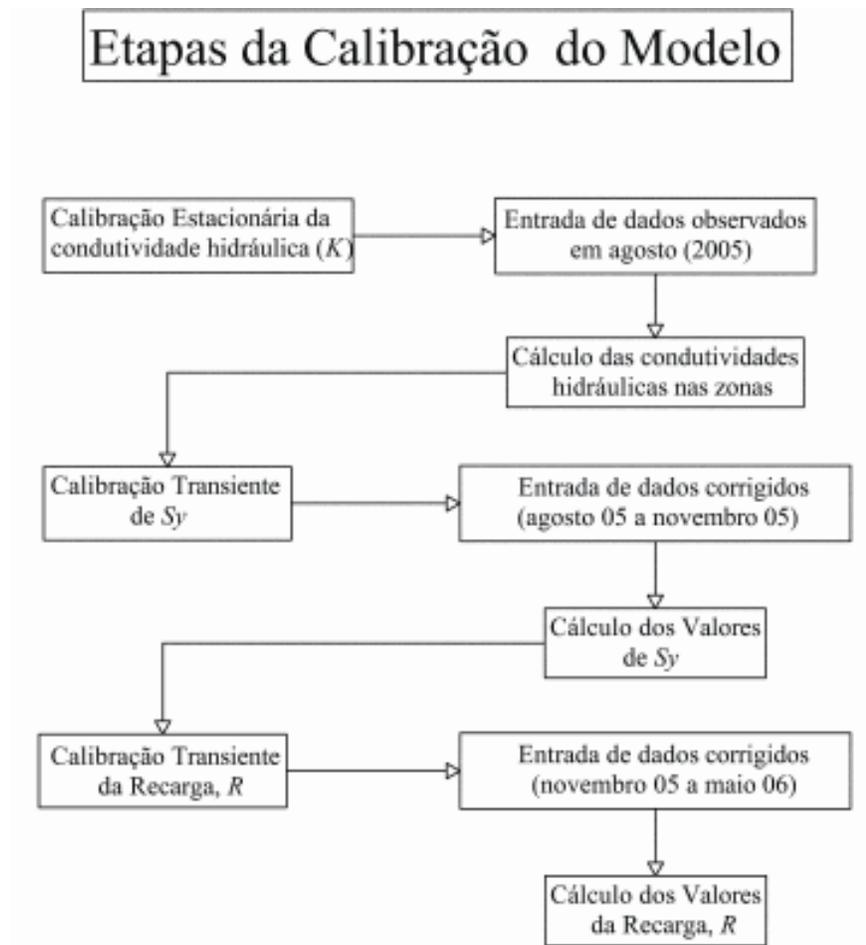


Figura 4.9 - Etapas seguidas na calibração do modelo.

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-UFCEG, 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.

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 parâmetro 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 estacionária. Isto foi feito lançando-se mão do seguinte procedimento.

As observações iniciais para a calibração transiente, de agosto de 2005, postas para o ajuste foram as mesmas calculadas pelo modelo após a calibração do modelo estacionário, (calibração da condutividade hidráulica). O período seguinte de ajuste às observações (dados de novembro de 2005) foram ajustados como sendo as cargas iniciais (calculadas pelo modelo em agosto de 2005) somadas às diferenças de nível estático medidas entre novembro e agosto de 2005.

Para a calibração foi feita uma simulação para um período de tempo de 90 dias (intervalo entre agosto e novembro de 2005), e o ajuste sendo feito no início e fim da simulação. Como os valores iniciais são coincidentes aos calculados o PEST só ajustou as variações de níveis ocorridas no intervalo. Daí a importância da utilização de cargas hidráulicas em poços coincidentes porém em tempos distintos, como já descrito.

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 feitas 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 novembro de 2006. 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 200l/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 anul explorado 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 encontram-se 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 a os procedimentos adotados em cada simulação.

4.3.6.1 Simulação de um Cenário Hipotético em Regime Transiente

➤ 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.

➤ 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

➤ 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.

➤ 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.

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 geológico da região são apresentados a seguir.

Os dados de carga hidráulica 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.

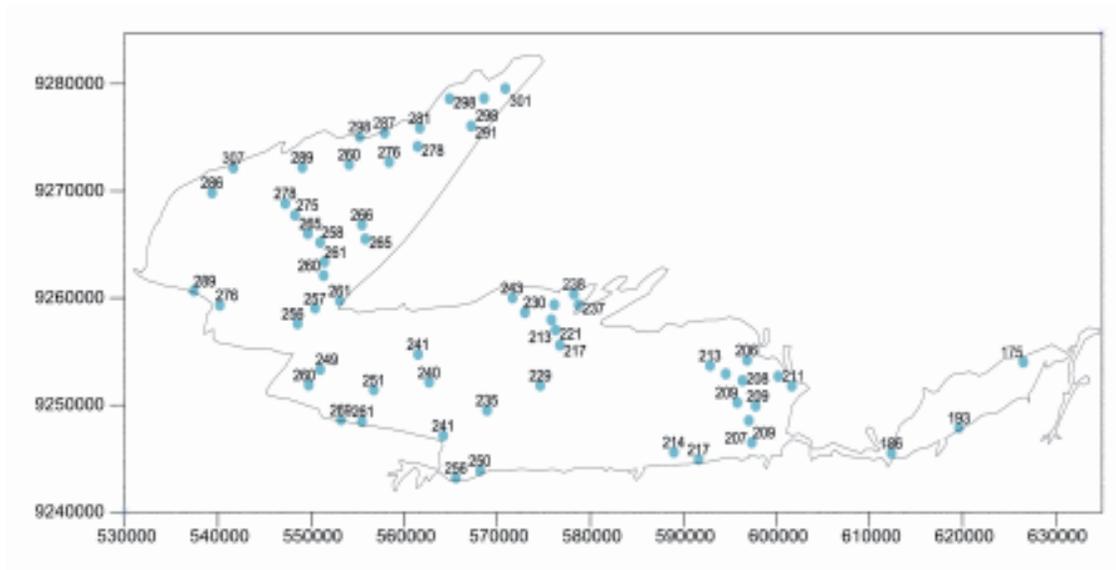


Figura 5.1 - Localização dos poços de observação na bacia, com as respectivas elevações de cargas hidráulicas para o mês de agosto de 2005.

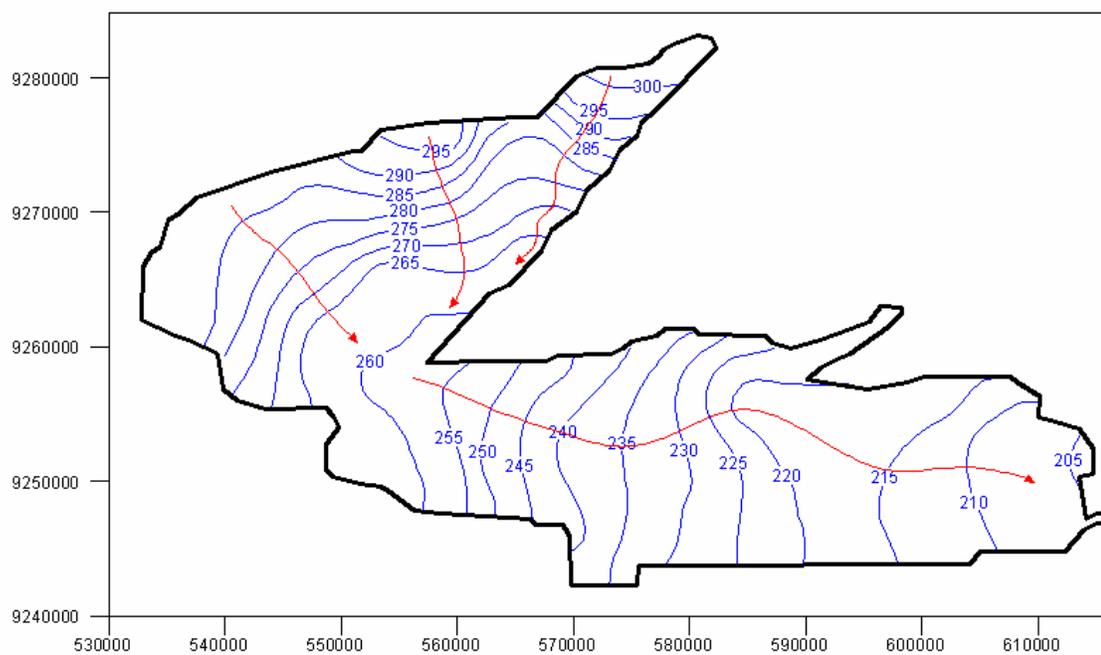


Figura 5.2 - Mapa potenciométrico observado em agosto de 2005. Em azul equipotenciais e em vermelho, linhas de fluxo.

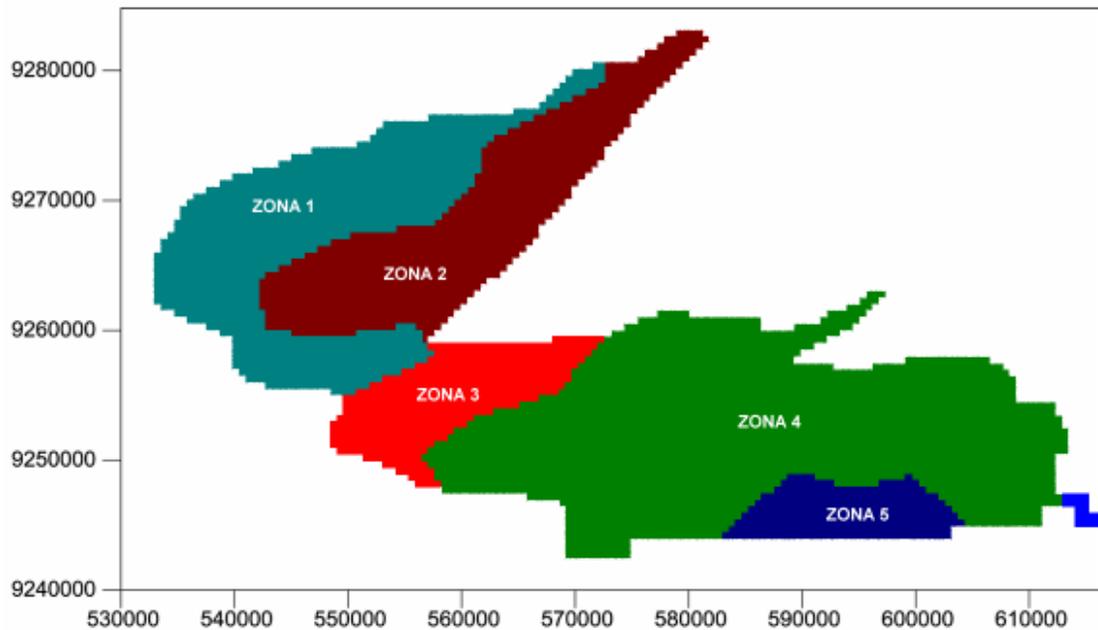


Figura 5.3 - Zonas utilizadas para a calibração, de acordo com a geologia da bacia.

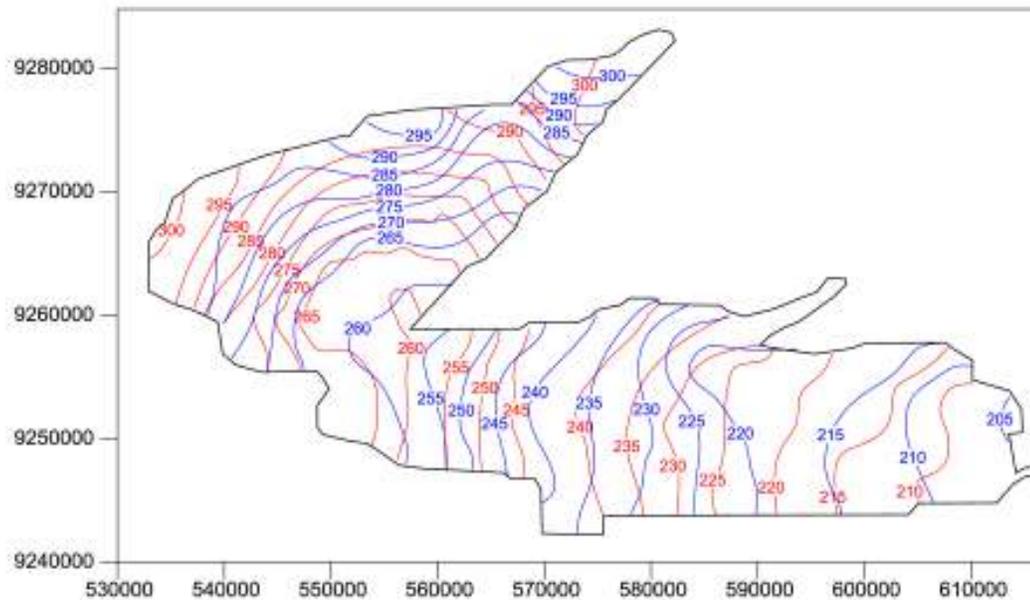


Figura 5.4 - Figura mostrando valores calculados versus observados para agosto de 2005 (sem a sub-bacia Pombal). Em vermelho calculado e azul observado.

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, muito embora as linhas equipotenciais não sejam coincidentes, apresentando alguma variação. Com base na figura 5.4 o modelo foi

considerado calibrado, 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 | <i>K</i> (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 4.3.4 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.

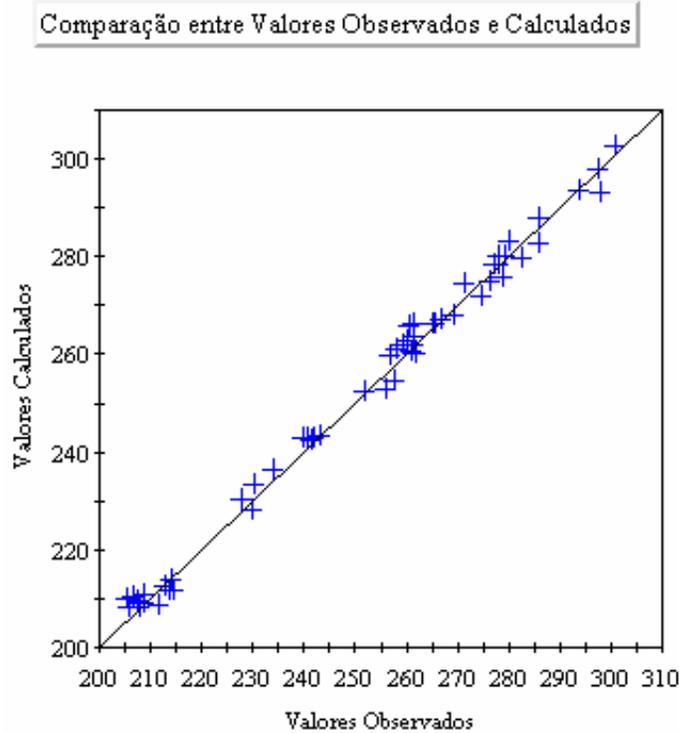


Figura 5.5 - Diagrama de dispersão (*Scatter Diagram*) obtido na calibração estacionária para 61 poços usados nesta calibração.

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 valore 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 é resultante 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 diminuição da coluna 5 da coluna 4, ou seja, carga obs* menos Δh obs.

As novas cargas hidráulicas, calculadas após a calibração de S_y , são mostradas na coluna 7 e a diferença entre as 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, porém 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 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 |
| CM020 | 276.45 | 276.15 | 0.30 | 275.30 | 275.00 | 274.79 | 0.21 |
| CM426 | 304.20 | 303.70 | 0.50 | 287.00 | 286.50 | 285.90 | 0.60 |
| CM586 | 247.95 | 247.20 | 0.75 | 261.70 | 260.95 | 260.70 | 0.25 |
| CM673 | 260.35 | 258.50 | 1.85 | 261.30 | 259.45 | 259.34 | 0.11 |
| CM689 | 261.60 | 260.00 | 1.60 | 262.00 | 260.40 | 260.33 | 0.07 |
| CN797 | 240.48 | 240.08 | 0.40 | 242.90 | 242.50 | 242.05 | 0.45 |
| DQ011 | 214.20 | 213.10 | 1.10 | 213.70 | 212.60 | 212.49 | 0.11 |
| DR012 | 212.90 | 211.90 | 1.00 | 212.60 | 211.60 | 211.52 | 0.08 |
| DV063 | 233.90 | 232.60 | 1.30 | 236.00 | 234.70 | 234.24 | 0.46 |
| DV725 | 260.98 | 260.58 | 0.40 | 256.70 | 256.30 | 255.83 | 0.47 |
| DV924 | 241.51 | 240.76 | 0.75 | 241.90 | 241.15 | 239.73 | 1.42 |
| DV932 | 245.06 | 243.46 | 1.60 | 239.70 | 238.10 | 236.25 | 1.85 |
| DW665 | 298.05 | 297.30 | 0.75 | 294.30 | 293.55 | 292.65 | 0.90 |
| DW952 | 243.25 | 242.15 | 1.10 | 243.40 | 242.30 | 242.42 | -0.12 |
| P01 | 258.15 | 258.05 | 0.10 | 261.10 | 261.00 | 260.84 | 0.16 |
| P28 | 257.55 | 256.36 | 1.19 | 254.10 | 252.91 | 252.84 | 1.07 |
| P33 | 261.85 | 260.50 | 1.35 | 260.50 | 259.15 | 259.23 | -0.08 |
| P34 | 260.35 | 259.60 | 0.75 | 262.00 | 261.25 | 261.41 | -0.16 |
| P47 | 205.86 | 205.56 | 0.30 | 208.10 | 207.80 | 207.26 | 0.54 |
| P48 | 208.65 | 208.00 | 0.65 | 208.90 | 208.25 | 208.10 | 0.15 |
| MÉDIA | | | 0.83 | | | | 0.36 |

Mesmo com alguns valores apresentando erros significativos, de quase dois metros, entre os valores calculados e observados o S_y foi considerado calibrado, visto que seria muito difícil conseguir um excelente ajuste com a quantidade de poços utilizados na calibração. Os valores de S_y são apresentados na tabela 5.3

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.

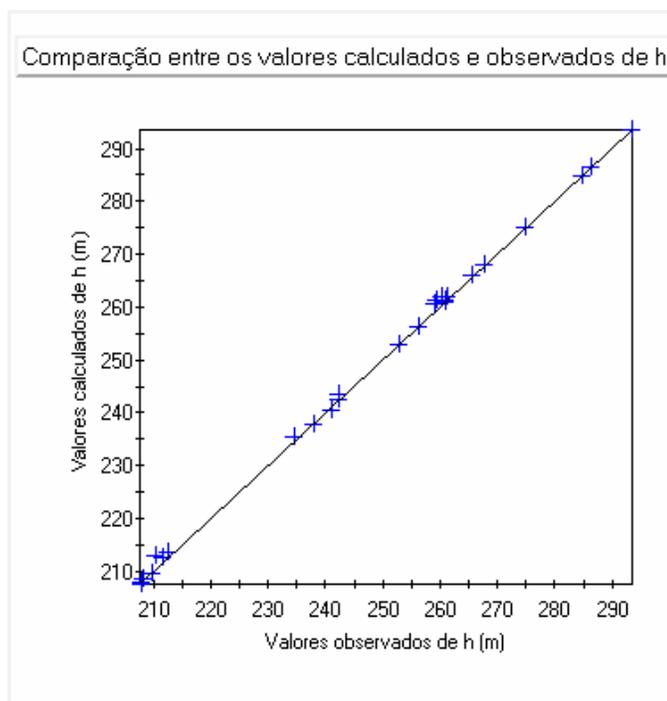


Figura 5.6 - Diagrama de dispersão (*Scatter Diagram*) entre h calc (nov-05) e h obs*(nov-05).

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 potenciométrica 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 .

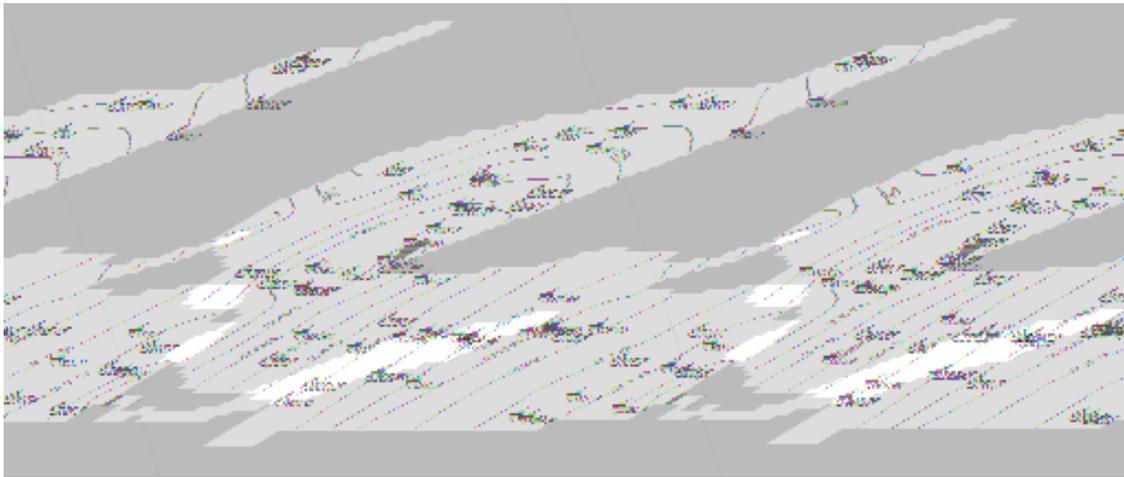


Figura 5.7 - Mapa potenciométrico calculado para novembro de 2005, após a calibração de S_y .

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).

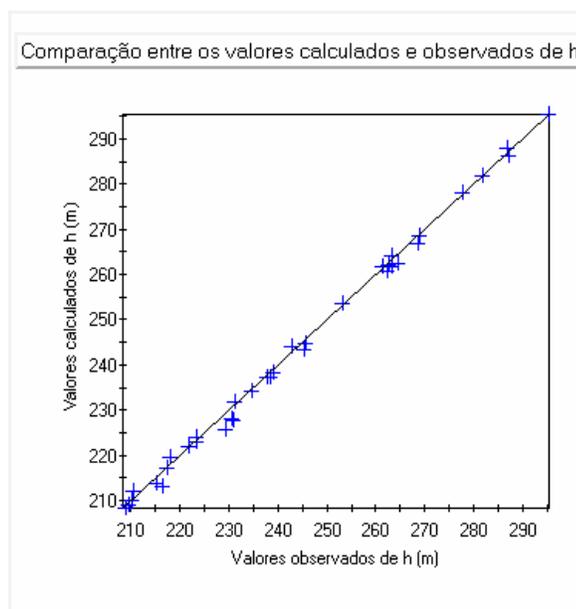


Figura 5.8 - Diagrama de dispersão obtido na calibração da recarga entre os meses de novembro e maio.

Tabela 5.4 - Dados corrigidos de carga hidráulica para a calibração da recarga.

| Poço | h obs | | h obs (ago-05 – nov-05) | h obs* | h obs* | h calc | h obs*(maio)- h calc(maio) |
|--------------|--------|--------|-------------------------------|--------|---------|---------|-------------------------------------|
| | Ago/05 | nov/05 | | nov/05 | maio/06 | maio/05 | |
| CD324 | 297.80 | 300.00 | 2.20 | 284.90 | 287.10 | 285.83 | 1.27 |
| CD350 | 278.10 | 279.00 | 0.90 | 276.80 | 277.70 | 276.55 | 1.15 |
| CD983 | 269.00 | 269.20 | 0.30 | 268.90 | 269.10 | 269.32 | -0.22 |
| CD989 | 264.90 | 266.70 | 1.70 | 267.00 | 268.70 | 268.99 | -0.29 |
| CG935 | 207.60 | 208.60 | 1.00 | 208.00 | 209.00 | 208.70 | 0.30 |
| CH404 | 208.20 | 209.10 | 0.90 | 209.80 | 210.60 | 208.17 | 2.43 |
| CH533 | 211.90 | 214.30 | 2.30 | 213.00 | 215.30 | 214.44 | 0.86 |
| CM056 | 259.50 | 259.90 | 0.40 | 263.00 | 263.50 | 262.38 | 1.12 |
| CM426 | 303.70 | 304.20 | 0.50 | 286.40 | 286.80 | 285.40 | 1.40 |
| CM586 | 247.20 | 248.50 | 1.30 | 261.40 | 262.70 | 262.10 | 0.60 |
| CM673 | 258.50 | 259.90 | 1.40 | 262.00 | 263.40 | 263.55 | -0.15 |
| CM689 | 260.00 | 262.00 | 2.00 | 262.70 | 264.70 | 264.96 | -0.26 |
| CN685 | 285.70 | 287.40 | 1.70 | 280.30 | 282.00 | 280.63 | 1.37 |
| CN797 | 240.10 | 243.10 | 3.00 | 242.50 | 245.50 | 244.75 | 0.75 |
| DR012 | 211.90 | 215.80 | 3.90 | 212.70 | 216.60 | 216.27 | 0.33 |
| DV040 | 252.20 | 256.40 | 4.20 | 233.40 | 237.70 | 233.87 | 3.83 |
| DV063 | 232.60 | 236.10 | 3.50 | 235.60 | 239.10 | 236.50 | 2.60 |
| DV072 | 232.10 | 233.90 | 1.80 | 229.60 | 231.40 | 229.12 | 2.28 |
| DV733 | 235.10 | 236.90 | 1.80 | 236.70 | 238.40 | 238.16 | 0.64 |
| DV924 | 240.80 | 243.10 | 2.30 | 240.60 | 242.90 | 239.39 | 3.51 |
| DV991 | 257.60 | 258.20 | 0.60 | 252.80 | 253.40 | 252.74 | 0.76 |
| DW689 | 296.60 | 297.60 | 1.00 | 294.40 | 295.40 | 294.49 | 0.91 |
| DW952 | 242.20 | 244.50 | 2.30 | 243.50 | 245.70 | 244.37 | 1.33 |
| P01 | 258.10 | 258.70 | 0.60 | 260.90 | 261.60 | 260.88 | 0.72 |
| P148 | 218.80 | 219.00 | 0.20 | 221.50 | 221.80 | 221.41 | 0.39 |
| P150 | 219.20 | 220.20 | 1.00 | 222.50 | 223.50 | 223.15 | 0.35 |
| P153 | 218.70 | 219.00 | 0.30 | 223.10 | 223.40 | 222.68 | 0.72 |
| P154 | 219.20 | 223.50 | 4.30 | 225.00 | 229.30 | 228.76 | 0.54 |
| P157 | 222.20 | 225.40 | 3.20 | 227.40 | 230.60 | 229.83 | 0.77 |
| P161 | 229.90 | 233.90 | 4.00 | 226.80 | 230.80 | 230.07 | 0.73 |
| P180 | 228.40 | 230.40 | 1.90 | 232.80 | 234.70 | 233.34 | 1.36 |
| P190 | 234.20 | 234.30 | 0.10 | 218.00 | 218.10 | 216.64 | 1.46 |
| P196 | 216.60 | 219.60 | 3.00 | 214.60 | 217.60 | 215.14 | 2.46 |
| P33 | 260.50 | 262.20 | 1.70 | 260.70 | 262.50 | 262.42 | 0.08 |
| P47 | 205.60 | 207.40 | 1.80 | 207.70 | 209.50 | 208.07 | 1.43 |
| P48 | 208.00 | 209.30 | 1.30 | 208.80 | 210.10 | 208.91 | 1.19 |
| MÉDIA | | | 1.80 | | | | 1.10 |

Como se pode observar na figura 5.8 e na tabela 5.4 os valores de recarga calibrados (partindo-se do pressuposto que os valores de condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento estivessem corretos) levam a valores de carga hidráulica calculados que não divergem significativamente dos valores observados (editados). Isto implica em dizer que uma vez que os valores determinados de K e S_y são corretos, os valores de recarga calibrados são próximo da realidade.

A figura 5.9 mostra o mapa potenciométrico gerado pelo *MODFLOW* após a calibração da recarga, *R*.

A variância também se mostrou aceitável após a calibração, chegando ao valor de 2,20m.

A tabela 5.5 mostra os valores de recarga calibrados para este período. É importante salientar que estas taxas de recarga foram determinadas para um período de calibração de seis meses.

Tabela 5.5 -Valores de recarga calibrados para o período entre os meses de novembro de 2005 e maio de 2006.

| Sub-bacia | Formação | Zona | Recarga (m/dia) | Recarga (mm/dia) |
|-------------------|-----------------|------|----------------------|------------------|
| Brejo das Freiras | Antenor Navarro | 1 | $6,58 \cdot 10^{-4}$ | 0,658 |
| Brejo das Freiras | Sousa | 2 | $1,19 \cdot 10^{-4}$ | 0,119 |
| Sousa | Antenor Navarro | 3 | $1,34 \cdot 10^{-4}$ | 0,134 |
| Sousa | Sousa | 4 | $1,82 \cdot 10^{-4}$ | 0,182 |
| Sousa | Piranhas | 5 | $3,16 \cdot 10^{-4}$ | 0,316 |

Tabela 5.6 Calibração da recarga para o período entre novembro de 2006 e maio de 2007.

| Sub-bacia | Formação | Zona | Recarga (m/dia) | Recarga (mm/dia) |
|-------------------|-----------------|------|----------------------|------------------|
| Brejo das Freiras | Antenor Navarro | 1 | $4,28 \cdot 10^{-4}$ | 0,428 |
| Brejo das Freiras | Sousa | 2 | $1,01 \cdot 10^{-4}$ | 0,101 |
| Sousa | Antenor Navarro | 3 | $1,27 \cdot 10^{-4}$ | 0,127 |
| Sousa | Sousa | 4 | $1,40 \cdot 10^{-4}$ | 0,140 |
| Sousa | Piranhas | 5 | $2,27 \cdot 10^{-4}$ | 0,227 |

Para confirmação dos valores e período da calibração da recarga foi feita uma nova calibração, com os dados de novembro de 2006 e maio de 2007.

Os valores encontrados nesta nova calibração são mostrados na tabela 5.6 e, em função de este período ter apresentado uma precipitação menor que o período da primeira calibração, são menores que os valores da tabela 5.5, porem mantém a ordem de grandeza e a mesmas zonas onde ocorrem as recargas em ordem decrescente.

Cabe ressaltar que apesar de a calibração ter sido feita entre os meses de novembro a maio, esta deve ser entendida como o volume, ou lâmina, de água infiltrada durante o período,

já que, na verdade, o período chuvoso começa entre janeiro e fevereiro de cada ano e não em novembro, porém não havia dados para a calibração neste período.

Como se pode observar o local com maior recarga é a formação Antenor Navarro, na sub-bacia de Brejo das Freiras, com uma taxa média de $6,58 \cdot 10^{-4}$ m/dia, o que resulta em uma recarga anual de 118 mm. Este valor representa cerca de 12,5 % da precipitação na área, registrada no período, acima das percentagens verificadas nas outras formações e ou sub-bacias.

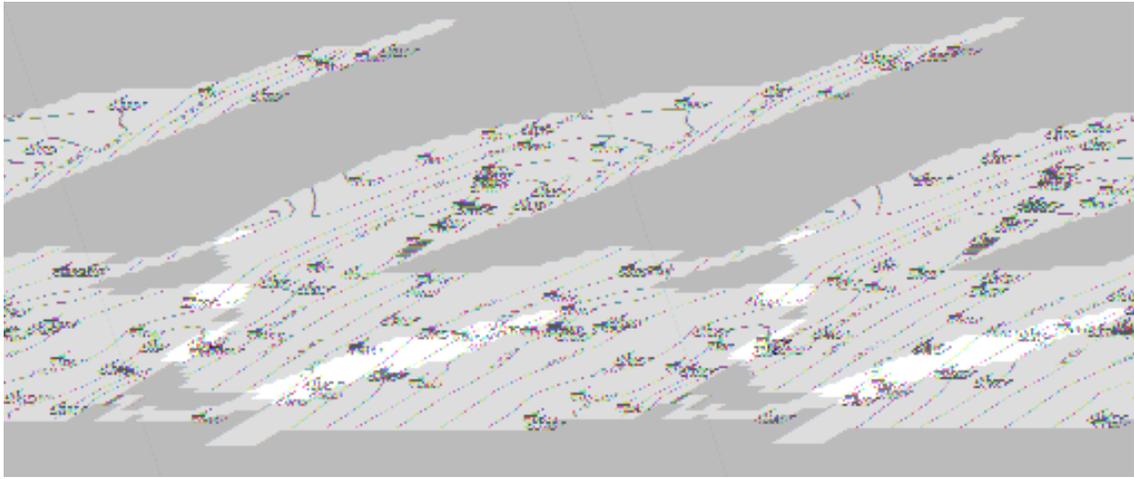


Figura 5.9 - Mapa potenciométrico calculado para maio de 2006, após a calibração da recarga.

5.2 Quantificação da Recarga

A quantificação da recarga, feita com o uso do pacote *WATER BUDGET*, apresentou valores distintos para as diversas zonas em que essa foi calibrada, porém não muito discrepantes entre si.

Como se pode observar na tabela 5.7, a região que apresenta maior volume de recarga é a chamada formação Antenor Navarro na sub-bacia de Brejo das Freiras com um volume total anual da ordem de 33,8 milhões de m³.

Esta recarga contribui, em grande parte para o escoamento lateral que penetra na zona da formação Sousa, também sub-bacia de brejo das Freiras.

Esta por sua vez apresentou uma recarga de 10,8 milhões de m³, além de receber água da formação Antenor Navarro. Boa parte da água que esta formação recebe escoo para a sub-bacia de Sousa, e o restante, de acordo com o modelo matemático, vai para o açude de Pilões, indo ao encontro do que Albuquerque (1984) já havia dito, ou seja, que o açude Pilões era uma das saídas das águas subterrâneas nesta sub-bacia.

Para a formação Antenor Navarro, na sub-bacia de Sousa, limitada a uma pequena área no início desta, foi encontrado um valor de recarga de 3,7 milhões de m³, para o período novembro de 2005 a maio de 2006.

Outra pequena área de que é composta esta sub-bacia é onde está localizada a formação Rio Piranhas, na porção sudeste da bacia, na qual entrou um volume total de 2,8 milhões de m³ no período de novembro de 2005 a maio de 2006.

A maior parte da sub-bacia de Sousa é preenchida pela formação homônima e, conseqüentemente onde há o maior volume de recarga, chegando a um total de 18,3 milhões de m³.

Em termos de lâmina de recarga as cinco zonas, na ordem, Antenor Navarro (BJ); Sousa (BJ); Antenor Navarro (S); Sousa (S) e Rio Piranhas (S), apresentaram, respectivamente, 118, 21, 24, 33 e 57 mm. Ainda em se tratando de lâmina, o valor médio de recarga ao longo da bacia foi de 50,5 mm entre novembro de 2005 e maio de 2006.

Tabela 5.7 -Valores de recarga calibradas através do *PEST* durante op período chuvoso entre novembro de 2005 e maio de 2006.

| Sub-Bacia | Formação | Área das Sub-Bacias (km²) | Volume da Recarga (10⁶ m³/ano) | Lâmina de Recarga (mm/ano) |
|-------------------|-----------------|---|---|-----------------------------------|
| Brejo das Freiras | Antenor Navarro | 285,5 | 33,8 | 118 |
| | Sousa | 236,0 | 5,06 | 21 |
| Sousa | Antenor Navarro | 112,5 | 2,71 | 24 |
| | Rio Piranhas | 69,5 | 3,95 | 57 |
| | Sousa | 563,0 | 18,4 | 33 |
| | | Total = 1266,5 | Total = 64,0 | Média = 50,5 |

Tabela 5.8--Valores de recarga calibradas através do *PEST* durante o período chuvoso entre novembro de 2006 e maio de 2007.

| Sub-Bacia | Formação | Área das Sub-Bacias (km²) | Volume da Recarga (10⁶ m³/ano) | Lâmina de Recarga (mm/ano) |
|-------------------|-----------------|---|---|-----------------------------------|
| Brejo das Freiras | Antenor Navarro | 285,5 | 22,0 | 77 |
| | Sousa | 236,0 | 4,3 | 18 |
| Sousa | Antenor Navarro | 112,5 | 2,58 | 23 |
| | Rio Piranhas | 69,5 | 2,83 | 41 |
| | Sousa | 563,0 | 14,08 | 25 |
| | | Total = 1266,5 | Total = 45,8 | Média = 36,1 |

Os valores das lâminas de recarga mostram que há uma significativa recarga nos arenitos da formação Antenor Navarro, sub-bacia de Brejo das Freiras, em relação às demais zonas onde foi feita a calibração.

Outra zona com recarga maior do que a média da bacia é a composta de arenitos e denominada formação Rio Piranhas, na sub-bacia de Sousa.

Quanto aos volumes de recarga verificados nas duas calibrações estes são maiores na formação Antenor Navarro, sub-bacia Brejo das Freiras, em virtude de sua área e taxa de recarga serem elevadas. Já a formação Sousa na sub-bacia homônima apresenta um volume elevado de recarga, devido, principalmente a sua grande área, pois apresenta baixas taxas de recarga.

A formação Rio Piranhas, que apresenta uma taxa de recarga maior que a média ao longo da bacia não apresenta volume significativo de recarga, pois sua área fica restrita a uma pequena parte da sub-bacia de Sousa.

Deve-se atentar para o fato de que as campanhas de medição de níveis piezométricos deveriam ser realizadas em intervalos de tempo mais curtos assim como deveriam ser feitas coletas de níveis sempre nos mesmos poços medidos na campanha anterior (o que não foi feito para as campanhas consideradas na calibração, e que levou a calibração com um número reduzido de poços).

5.2.1 Vazão do Aquífero na Saída da Sub-Bacia de Sousa para a Sub-Bacia de Pombal

A curva de vazão na saída da sub-bacia de Sousa para sub-bacia Pombal foi calculada pelo programa *WATER BUDGET* do *PMWIN* e foi utilizada para a verificação do volume anual que sai, por troca horizontal desta sub-bacia (ou da área do aquífero considerada na calibração) para a sub-bacia de Pombal.

A recarga de total de 50,5 mm utilizada nesta simulação foi distribuída percentualmente à taxa de precipitação de 972 mm em unidades de 10 dias para cada barra no histograma de precipitação. Assim o total da recarga disponível da bacia é representado pela diferença entre o volume de recarga calibrado, $64,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, menos a vazão da saída da sub-bacia Sousa de $1,15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (ver equação 2.22), ou seja, a recarga providencia um volume de água para o período 2005-06 de $62,85 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ como disponibilidade hídrica.

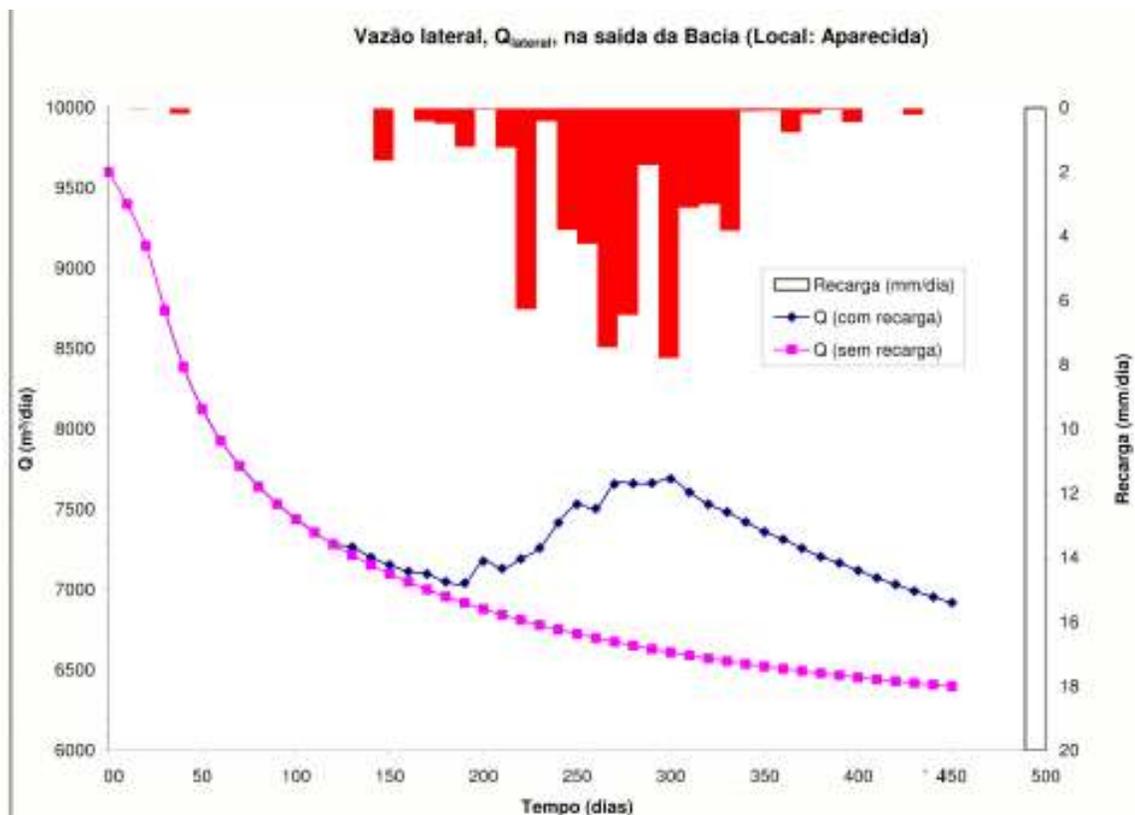


Figura 5.10 - Vazão lateral calculada por *WATER BUDGET* na saída do sub-bacia Sousa para sub-bacia Pombal.

5.3 Verificação do Modelo

A verificação ou validação do modelo foi feita com a simulação do modelo, em regime transitório, com a observação do diagrama de cargas calculadas *versus* cargas observadas para todos os 21 poços com dados de potenciometria em todas as campanhas de medição.

Este critério mostrou que a calibração foi satisfatória, dada as simplificações na concepção do modelo que tiveram de ser adotadas, seja pela falta de conhecimento acerca de propriedades do aquífero como sua geometria ou pela falta de dados coletados, (influência de açudes, por exemplo).

Assim procurou-se avaliar as variâncias para todos os períodos juntamente com o erro médio absoluto cometido nos mesmos. A tabela 5.9 apresenta a evolução da variância e dos erros nas 7 campanhas.

Neste caso os dois poços com erros maiores (CD 324 e CM 586) estão localizados, respectivamente na borda da sub-bacia de Brejo das Freiras e na divisão entre Sousa e Brejo das Freiras, locais que apresentaram maiores discrepâncias entre as cargas calculadas e observadas. Os demais poços não apresentam discrepâncias significativas.

O poço CD 324 havia sido desconsiderado na calibração estacionária por estar inserido em uma área limítrofe da bacia, onde, aparentemente os poços apresentam níveis bem mais elevados em relação aos outros poços à medida que se vai avançando para o interior da bacia.

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.

| | Agosto-05 | | Novembro-06 | | Maio-06 | | Agosto-06 | | Novembro-06 | | Fevereiro-07 | | Maio-07 | |
|---------------|-----------|-------|-------------|-------|---------|-------|-----------|-------|-------------|-------|--------------|-------|---------|-------|
| | Calc | Obs | Calc | Obs | Calc | Obs | Calc | Obs | Calc | Obs | Calc | Obs | Calc | Obs |
| CM710 | 274.4 | 280.8 | 274.0 | 281.0 | 274.8 | 280.8 | 274.3 | 281.3 | 273.9 | 281.3 | 274.2 | 281.4 | 274.3 | 281.3 |
| CN808 | 272.7 | 274.6 | 272.3 | 274.7 | 273.1 | 274.4 | 272.6 | 274.6 | 272.3 | 274.4 | 272.5 | 274.3 | 272.7 | 274.3 |
| CD983 | 268.2 | 265.6 | 268.1 | 265.4 | 268.7 | 265.6 | 268.1 | 265.7 | 268.1 | 265.6 | 268.3 | 265.3 | 268.3 | 265.3 |
| CD989 | 266.3 | 264.7 | 266.2 | 264.1 | 266.7 | 265.8 | 266.2 | 265.0 | 266.2 | 264.9 | 266.4 | 263.9 | 266.4 | 264.4 |
| CM720 | 265.6 | 260.0 | 265.4 | 263.0 | 265.9 | 262.8 | 265.5 | 260.3 | 265.4 | 260.0 | 265.6 | 258.0 | 265.6 | 260.0 |
| CM719 | 264.8 | 258.5 | 264.6 | 258.8 | 265.2 | 258.3 | 264.7 | 257.0 | 264.6 | 255.3 | 264.8 | 255.7 | 264.9 | 257.0 |
| CM689 | 262.0 | 260.7 | 261.9 | 259.1 | 262.4 | 261.1 | 261.9 | 261.0 | 261.9 | 259.4 | 262.1 | 259.9 | 262.1 | x |
| CM673 | 261.3 | 259.5 | 261.2 | 257.7 | 261.9 | 259.0 | 261.2 | 257.7 | 261.2 | 254.5 | 261.4 | 255.5 | 261.5 | 257.2 |
| P33 | 260.7 | 260.6 | 260.7 | 259.3 | 260.9 | 261.0 | 260.7 | 260.9 | 260.7 | 259.7 | 260.7 | x | 260.7 | x |
| P01 | 261.4 | 256.6 | 261.0 | 256.6 | 261.7 | 257.2 | 261.2 | 256.6 | 260.9 | 256.4 | 261.2 | 256.6 | 261.3 | 256.5 |
| CM056 | 263.8 | 256.0 | 263.2 | 256.1 | 264.3 | 256.5 | 263.6 | 254.4 | 263.1 | 249.8 | 263.4 | 249.3 | 263.7 | x |
| DW952 | 244.9 | 240.6 | 244.7 | 239.5 | 245.2 | 241.8 | 244.8 | 240.3 | 244.6 | 240.6 | 244.9 | 240.0 | 245.1 | 240.7 |
| P48 | 209.4 | 208.3 | 208.9 | 207.7 | 210.0 | 209.0 | 209.0 | 209.0 | 208.8 | 208.4 | 209.6 | 208.0 | 209.8 | 208.6 |
| CN797 | 243.1 | 240.4 | 242.9 | 240.0 | 243.2 | 243.0 | 243.0 | 241.3 | 242.7 | 240.7 | 243.2 | 240.1 | 243.2 | 239.8 |
| CH404 | 211.0 | 209.0 | 210.0 | 208.5 | 212.3 | 209.4 | 210.4 | 210.0 | 209.7 | 209.7 | 211.3 | 209.5 | 211.9 | 209.5 |
| P47 | 208.3 | 208.9 | 207.7 | 208.6 | 209.1 | 210.5 | 207.9 | 210.4 | 207.6 | 209.9 | 208.5 | 209.6 | 208.8 | 210.3 |
| DV924 | 242.7 | 241.0 | 241.1 | 240.3 | 244.3 | 242.6 | 242.0 | 242.1 | 240.7 | 241.2 | 242.5 | 240.7 | 243.7 | x |
| CG935 | 208.1 | 208.5 | 208.0 | 208.3 | 208.3 | 209.3 | 208.0 | 207.0 | 208.0 | 208.2 | 208.2 | 209.0 | 208.2 | 209.4 |
| DR012 | 212.6 | 214.6 | 212.5 | 213.6 | 213.0 | 217.5 | 212.6 | 219.0 | 212.5 | 218.1 | 213.0 | 217.5 | 213.0 | 213.5 |
| ERRO A | 2,88 | | 2,69 | | 2,84 | | 3,22 | | 3,68 | | 4,12 | | 3,27 | |
| VAR | 10,76 | | 8,99 | | 11,65 | | 17,71 | | 22,66 | | 24,86 | | 12,74 | |

5.4 Simulação de Cenários Hipotéticos de Exploração do Aquífero

Os resultados da análise do impacto da consideração do aumento do bombeamento mostraram que o sistema alcança os níveis de cargas hidráulicas mais baixos no fim da estação seca, na simulação estacionária.

A seguir são descritas as quatro situações consideradas com poços ativados com uma taxa de bombeamento hipotética elevada.

- Estacionário com poços bombeando 250 m³/dia

Este caso mostra um rebaixamento dos níveis potenciométricos da ordem de 1 a 2 metros, apresentando variação maior nas bordas da bacia, chegando a rebaixar cerca de 5 metros em alguns locais desta.

A figura 5.11 mostra a o rebaixamento causado pelo aumento das taxas de exploração do aquífero com poços ligados e retirando 250 m³/dia cada um.

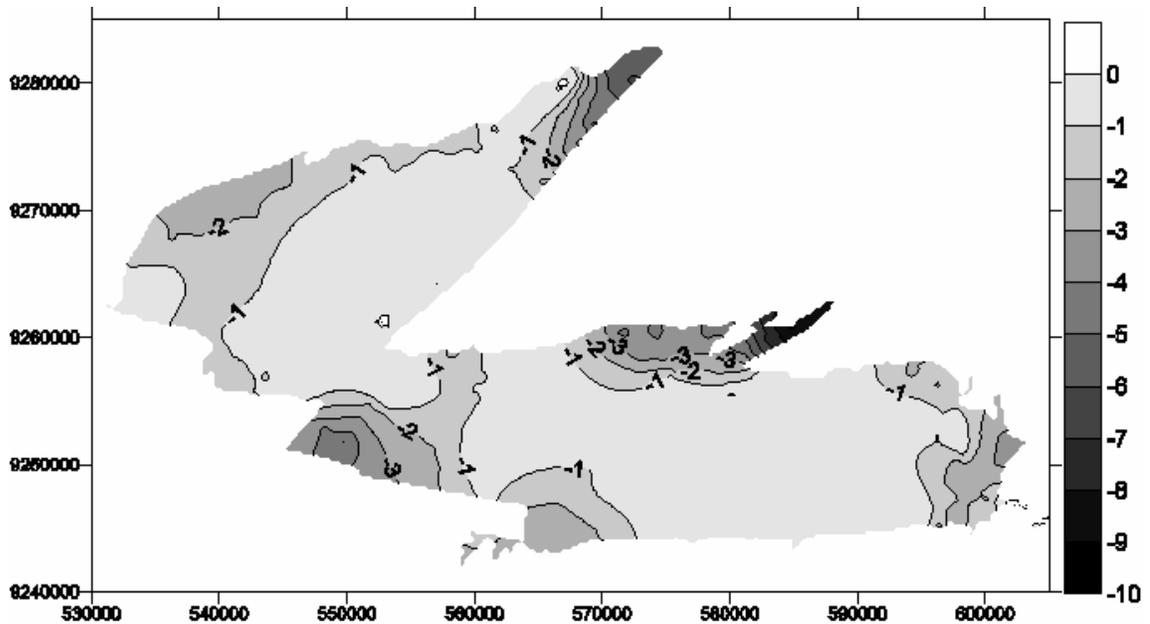


Figura 5.11 - Rebaixamento causado pelo bombeamento (regime estacionário $Q=250 \text{ m}^3/\text{dia/poço}$).

➤ Estacionário com poços Bombeando $500 \text{ m}^3/\text{dia}$

Este caso aumenta bastante o rebaixamento, sendo esta variação, em relação à situação anterior nas bordas da bacia, onde o nível pode ser rebaixado em até 12 a 13 metros.

No centro da bacia, no entanto, os níveis de potencimetria não se mostram tão diferentes daqueles encontrados para a situação anterior.

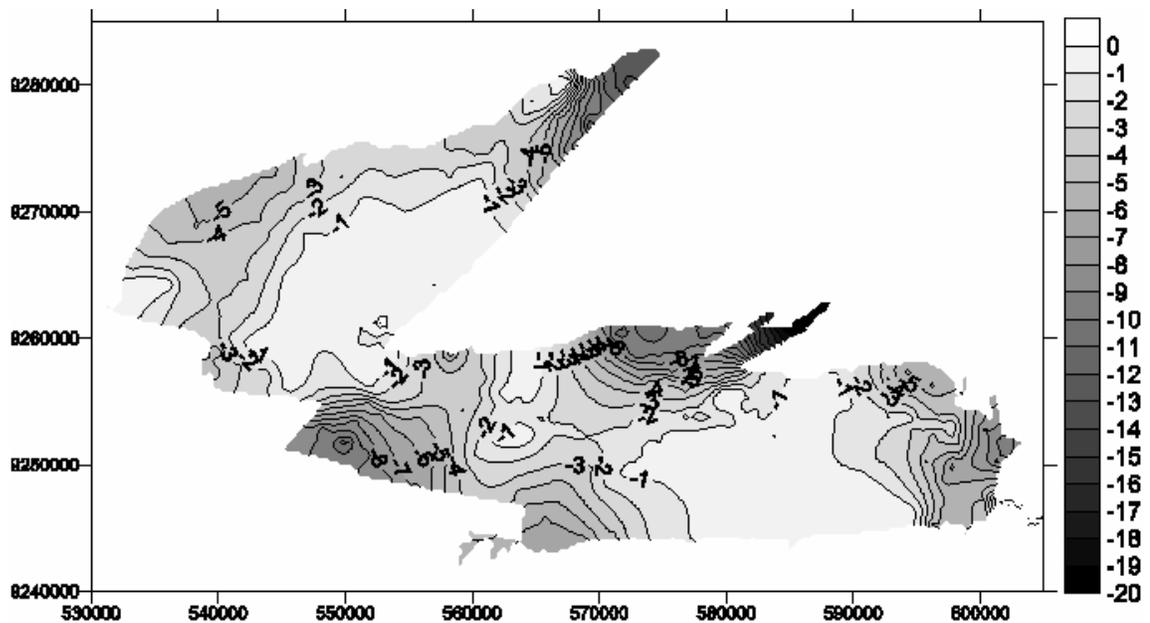


Figura 5.12 - Rebaixamento causado pelo bombeamento (estacionário $Q=500 \text{ m}^3/\text{dia/poço}$).

➤ Transiente com Poços Bombeando $250 \text{ m}^3/\text{dia}$

Esta simulação, de 180 dias, apresenta valores de rebaixamento do nível potenciométrico muito pequeno, da ordem de 0 a 1 metro em quase toda a bacia, atingindo um máximo de cerca de 4 metros em um local isolado, próximo a Uiraúna.

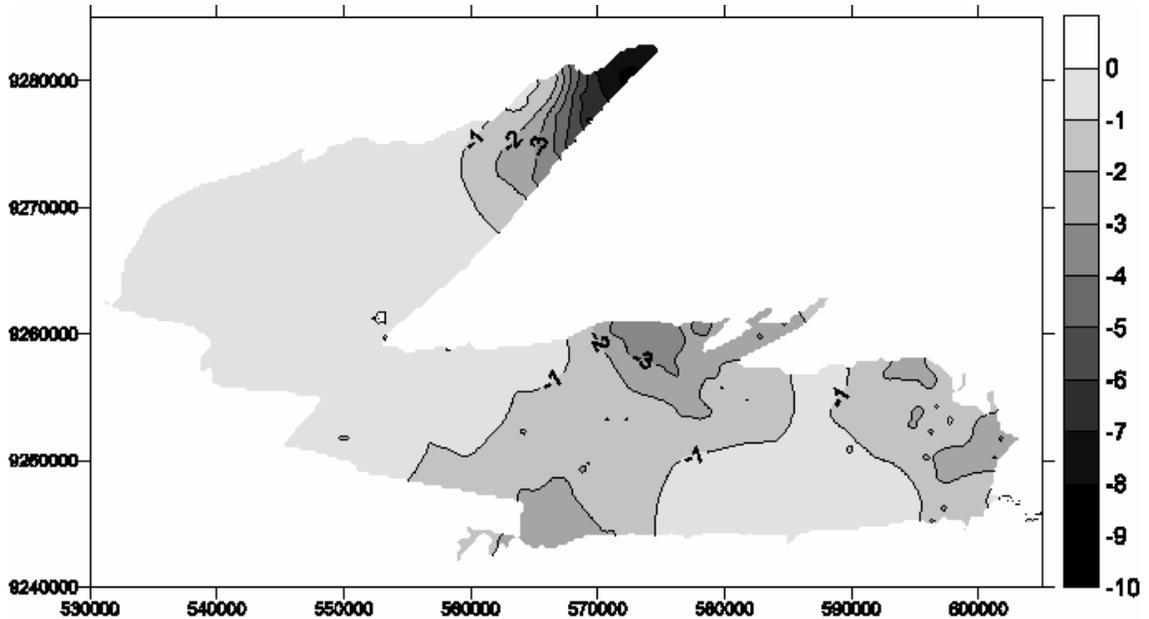


Figura 5.13 - Rebaixamento causado por 180 dias de bombeamento (transiente $Q=250 \text{ m}^3/\text{dia}/\text{poço}$).

➤ Transiente com Poços Bobeando $500 \text{ m}^3/\text{ano}$

Nesta consideração a variação das cargas hidráulicas em relação a situação sem poços se mostrou bastante pequena, em geral apresentando valores menores que 1 metro na sub-bacia de Brejo das Freiras e entre 0 e 6 metros na sub-bacia de Sousa.

A maior variação no entanto registradas próximo a cidade de Uiraúna atingindo cerca de 15 metros neste local.

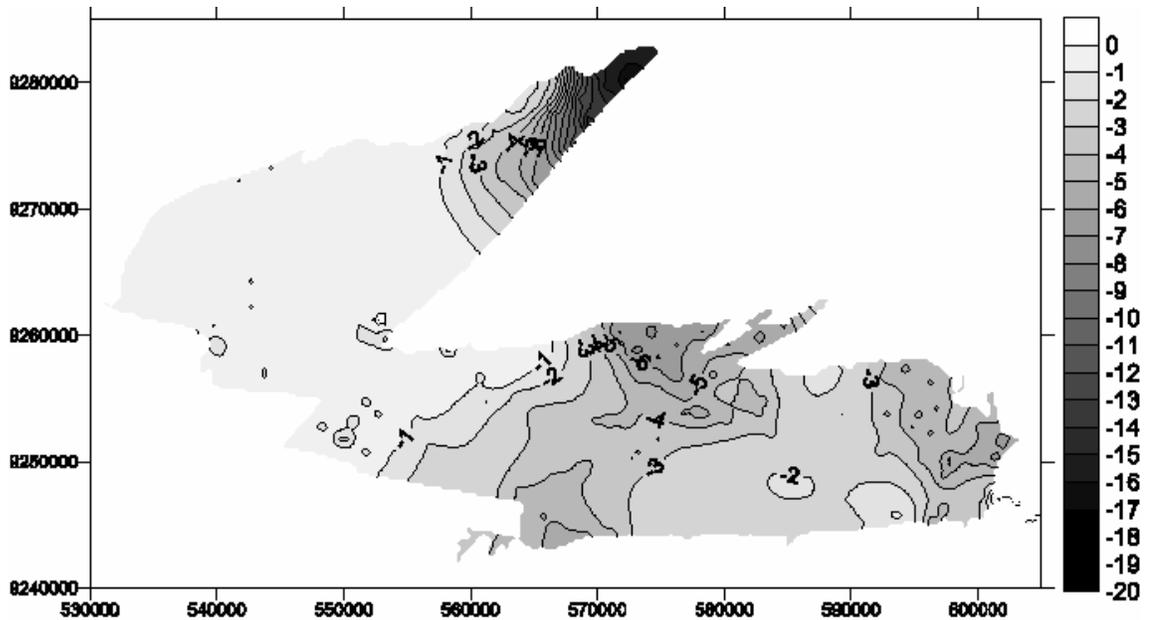


Figura 5.14 - Mapa residual entre mapa potenciométrico com e sem bombeamento (transiente $Q=500$ m^3/dia).

5.4.1 Balanço Hídrico

De acordo com as duas calibrações de recarga realizadas com auxílio do *PEST* e as medições de flutuação de níveis de água nos poços de observação durante os dois anos de estudo, a recarga média da bacia é 50,5 mm no período entre novembro de 2005 e maio de 2006, ou seja, $64,0 \cdot 10^6 m^3$. A recarga média estimada para o ano de 2007 é 36,1 mm entre novembro de 2006 e maio de 2007, ou seja, $45,8 \cdot 10^6 m^3$. O valor de recarga deve ser diminuído pela taxa de fluxo lateral, de cerca de $1,15 \cdot 10^6 m^3/ano$ na saída da sub-bacia de Sousa (perto da cidade de Aparecida) para a sub-bacia de Pombal, no ano de 2006 e $0,96 \cdot 10^6 m^3/ano$, no ano de 2007. Então, a recarga corrigida é $62,85 \cdot 10^6 m^3$ no ano de 2006 e $44,84 \cdot 10^6 m^3$ no ano de 2007.

Os volumes de água dos 194 poços bombeados durante 180 dias calculam-se $8,73 \cdot 10^6 m^3/ano$ com a taxa de bombeamento de $250 m^3/dia$ e $17,46 \cdot 10^6 m^3/ano$ com a taxa de bombeamento de $500 m^3/dia$. Então o superávit no ano de 2006 é $54,12 \cdot 10^6 m^3$ para $Q_{poço} = 250 m^3/dia$ e $45,39 \cdot 10^6 m^3$ para $Q_{poço} = 500 m^3/dia$ e no ano de 2007 o superávit é $36,11 \cdot 10^6 m^3$ para $Q_{poço} = 250 m^3/dia$ e $27,38 \cdot 10^6 m^3$ para $Q_{poço} = 500 m^3/dia$, respectivamente.

Tabela 5.10 - Volumes ($\times 10^6 \text{ m}^3$) de água de recarga, bombeamento e superávit, regime transiente (180dias).

| Ano | Recarga (mm) | Volume de Recarga | Volume de Saída | Volume de Bombeamento (Q=250 m ³ /d) | Volume de Superávit (Q=250 m ³ /d) | Volume de Bombeamento (Q=500 m ³ /d) | Volume de Superávit (Q=500 m ³ /d) |
|------|--------------|-------------------|-----------------|---|---|---|---|
| 2006 | 50,50 | 64,00 | 1,15 | 8,73 | 54,12 | 17,46 | 45,39 |
| 2007 | 36,10 | 45,80 | 0,96 | 8,73 | 44,01 | 17,46 | 27,28 |

Tabela 5.11 Volumes ($\times 10^6 \text{ m}^3$) de água de recarga, bombeamento e superávit, regime estacionário.

| Ano | Recarga (mm) | Volume de Recarga | Volume de Saída | Volume de Bombeamento (Q=250 m ³ /d) | Volume de Superávit (Q=250 m ³ /d) | Volume de Bombeamento (Q=500 m ³ /d) | Volume de Superávit (Q=500 m ³ /d) |
|------|--------------|-------------------|-----------------|---|---|---|---|
| 2006 | 50,50 | 64,00 | 1,15 | 17,46 | 45,39 | 34,92 | 27,93 |
| 2007 | 36,10 | 45,80 | 0,96 | 17,46 | 27,28 | 34,92 | 9,73 |

6 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi estabelecer um modelo matemático para a simulação da bacia sedimentar do Rio do Peixe com a calibração dos parâmetros hidrodinâmicos e, através desta, se determinar a recarga do sistema, considerada como uma reserva renovável e disponível para a gestão hídrica da bacia.

Quanto à calibração, as condutividades hidráulicas calibradas nas 5 zonas consideradas resultaram em valores razoáveis de cargas hidráulicas calculadas, quando estas são comparadas com as cargas observadas. A comparação dos valores da condutividade hidráulica calibrada na tabela 5.1 mostra que o arenito da formação Antenor Navarro da sub-bacia de Brejo de Freiras possui uma condutividade hidráulica duas vezes maior que a da formação Sousa, a qual é principalmente composta por folhelhos. No entanto, a formação Antenor Navarro da sub-bacia Sousa (a região que, suspeita-se, faça parte da formação Sousa na verdade) mostra uma condutividade 3 vezes menor que o valor do Antenor Navarro da sub-bacia Brejo das Freiras. A maior condutividade hidráulica da bacia (duas vezes maior que a formação Antenor Navarro) é encontrada na formação Rio Piranhas composto por arenito e que é geologicamente mais jovem que a formação Sousa e Antenor Navarro. Como já foi dito a calibração ainda é passível de melhorias, porém estas implicariam em se conceber um modelo mais complexo, com uma maior discretização horizontal e, principalmente, vertical.

A calibração do coeficiente de armazenamento foi feita com os dados de cargas hidráulicas medidas em agosto e novembro de 2005 durante a época seca. Esta calibração, em teoria seria melhor se houvesse mais poços com medição contínua para o ajuste pelo *PEST*. A técnica de calibração, porém, foi executada corretamente, dentro das possibilidades. Os valores do coeficiente de armazenamento calibrado apresentados na tabela 5.3 não mostram claramente uma relação com a litologia, apenas que a formação Antenor Navarro possui um coeficiente de armazenamento ou porosidade efetiva 10 a 100 vezes maior que o da formação Sousa. Relativamente pequeno é o coeficiente da formação Rio Piranhas.

O processo de calibração da recarga foi realizado com dados de nível coletados na época da chuva, entre novembro de 2005 e maio de 2006 e, a segunda vez, entre novembro de 2006 e maio/junho de 2007, distribuídos em todas as zonas de calibração.

Assim, considerando-se que as calibrações dos valores de condutividade hidráulica e de coeficiente de armazenamento chegaram a valores representativos do comportamento hidrodinâmico da bacia, a calibração da recarga também chegou a valores plausíveis, pois

havia quantidade suficiente de dados para o ajuste. A primeira recarga média no ano 2005-2006 determinada através da calibração foi de 50,5 mm ou cerca de 5% da precipitação média total (1018 mm) e a segunda recarga calibrada no ano 2006 – 2007 foi de 36,1 mm ou 6% da precipitação média total (595 mm). As taxas de recarga apresentadas nas tabelas 5.7 e 5.8 mostram claramente um valor significativamente maior de recarga nas áreas da formação de arenito Antenor Navarro da sub-bacia Brejo das Freiras (zona 1) em relação às áreas das zonas 2, 3, 4 e 5. A zona 5 de arenito da sub-bacia Rio de Piranhas, obtém-se a metade da recarga da zona 1 mas ainda 2 vezes maior que a das zonas de folelhos 2, 3 e 4) .

A etapa da verificação do modelo por meio de uma simulação de 650 dias mostra a eficácia e estabilidade do modelo para simulações transitórias apresentadas na tabela 5.9, visto que os erros nos períodos de observação que se sucediam a partir de agosto de 2005 não aumentavam significativamente e não surgiu nenhuma discrepância nos dados. Desta forma é possível afirmar que o modelo apresenta uma boa confiabilidade para a simulação do aquífero.

Tendo em vista que o modelo foi considerado estável para a simulação em regime estacionário e transitório, seguiu-se assim a simulação de um caso hipotético, do efeito do bombeamento do aquífero, onde foi simulado, em regime estacionário e transitório de 180 dias duração (período seco anual), um bombeamento em 194 poços existentes na bacia com taxas de 250 e 500 m³/dia/poço. Esta simulação mostrou um impacto maior, quando tratamos de rebaixamento de níveis piezométricos na situação com o regime estacionário, quando comparado à simulação transitória.

Em linhas gerais a simulação mostra que o aquífero não apresenta rebaixamentos significativos, decorrentes das retiradas simuladas, como pode ser visto na figuras 5.9, atingindo os maiores valores nas bordas da bacia, principalmente na extremidade superior da sub-bacia de Brejo das Freiras, próximo ao município de Uiraúna.

De posse dos resultados obtidos com o modelo conclui-se que o modelo obteve uma satisfatória calibração estacionária (condutividades hidráulicas), principalmente quando consideramos a complexidade e a falta de consenso acerca da geologia e da geometria da área de estudo que inviabilizaram a confecção de um modelo conceitual multicamadas.

Tanto o coeficiente de armazenamento quanto a recarga podem ser considerados como calibrados, pois durante este processo não se verificaram discrepâncias significativas e as variâncias não foram altas, considerando os dados editados, como descrito no processo de calibração.

Muito embora a calibração seja considerada satisfatória, esta deve ser verificada com valores de transmissividade determinados em campo, pois não existe uma única solução para a calibração, tendo em vista que a recarga e o coeficiente de armazenamento também são parâmetros calibrados.

7 RECOMENDAÇÕES

Quanto às recomendações estas são as seguintes.

A primeira recomendação que é feita diz respeito à confecção de um novo modelo, com discretização vertical em várias camadas (3 ou 4), para satisfazer a geologia da área de estudo. Assim, à medida que se tiver o conhecimento das propriedades geométricas, tais como dados mais confiáveis a respeito das espessuras e profundidades das respectivas camadas através de novas perfurações e levantamento geofísico, e hidrodinâmicas através da perfuração de poços tubulares mais profundos e vários testes de bombeamento, podem ser incorporados a um novo modelo conceitual de modo que os resultados sejam ainda melhores.

Outro ponto que pode ser considerado em um novo modelo são os aluviões, o que não foi feito neste trabalho, e devem contribuir significativamente nos recursos hídricos da região.. Estes podem ser incorporados de forma que se poderão incorporar uma nova camada superior a contribuir para a recarga da área.

O terceiro ponto a ser analisado futuramente é a verificação dos parâmetros calibrados com dados de testes de bombeamento que venham a ser executados em breve na área de estudo, já que até o presente momento não foram determinados os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero através de ensaios de campo.

Também se recomenda uma verificação do modelo com um número de dados maior, à medida que forem incorporados novos dados de campo, de futuras medições de níveis estáticos nos poços em locais onde a rede de observação é escassa.

Por último recomenda-se o monitoramento sistemático das cargas hidráulicas do sistema, com campanhas regulares e medições sempre nos mesmos poços, de maneira que haja o mínimo possível de poços diferentes de uma campanha para outra. Estas medições devem ser efetuadas no maior número de pontos possível.

Seria necessário instalar alguns medidores automáticos com memória em pontos estratégicos para medir a flutuação contínua do nível de água e, assim, possibilitar uma análise mais consistente do processo de recarga em função da precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J do P. T. 1984. *Os Recursos de Água Subterrânea do Trópico Semi-Árido do Estado da Paraíba*. Dissertação de mestrado, UFPB, Campina Grande.
- ALBUQUERQUE, J do P. T. 1986. *O Sistema Aqüífero Rio do Peixe*. 4º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Brasília, anais, p.194-207, 1986.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2002. *HIDRO, versão 1.0.8*. Disponível para *Download* em <http://hidroweb.ana.gov.br>.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2006. *Hidroweb - Sistema de Informações Hidrológicas*. Disponível em, <http://hidroweb.ana.gov.br>, acessado em várias datas diferentes no decorrer de 2006.
- ANDERSON, M. P. e WOESSNER, W. W. 1992. *Applied Groundwater Modelling, Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press. Inc., San Diego, USA, 381p.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. 2000. *Hidrogeo - Sistema de Informações Georreferenciadas de Energia e Hidrologia, versão 1.1*. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ARBEITSKREIS GRUNDWASSERNEUBILDUNG DER FACHSEKTION HYDROGEOLOGIE DER DEUTSCHEN GEOLOGISCHEN GESELLSCHAFT (1977): *Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate*. Geologisches Jahrbuch, C19, p3–98, Hannover-Germany.
- CABRAL J. J. da S. S. e DEMÉTRIO, J. G. 1997. *Aplicação de Modelos em Hidrogeologia*. In: FEITOSA, F. e MANOEL FILHO, J. 1997. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicação*. Fortaleza. CPRM, LABHID-UFPE. p 367-388. il.
- CARVALHO FILHO, C. A. de e COTA, S. D. S. 2003. *Análise de Sensibilidade para o Parâmetro Condutância na Condição de Contorno de Tipo 3 do Modelo MODFLOW*. Revista Brasileira de Águas Subterrâneas, nº17.

CHIANG, W. H. e KINZELBACH, W. 2003. *3D-Grondwater Modeling With PMWIN. A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Polution*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 346 pp.

CORREIA, L. C. 2007. *Levantamento dos Aspectos Hidrogeológicos da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe*. Dissertação de mestrado em andamento. UFPE.

CPRM-UFMG. 2005. *Comportamento Hidrogeológico da Bacia Sedimentar do Rio do Peixe, Relatório Síntese com Análise Bibliográfica*. Universidade Federal de Campina Grande-Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

DOHERTY, J.; BREBBER, L. e WHITE, P. 1994. *PEST – Model Independent Parameter Estimation. User's Manual. Watermark Computing*. Austrália.

FRANÇOLIN, J. B. 1992. *Analyse Structurale du Bassin du Rio do Peixe*. Tese de doutorado, Université de Rennes, Rennes, FR.

LIMA FILHO, M. F. 1991. *Evolução Tectono-Sedimentar da Bacia do Rio do Peixe (PB)*. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife.

LINS, F.A.P.L. 1987. *Geofísica Aplicada ao Estudo de Arcabouço Tectônico de Bacias Sedimentares Entre as Bacias Potiguar e do Rio do Peixe*. Dissertação de mestrado, UFPE, Recife.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2006. *Estimativas de população nas cidades brasileiras*. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>, acessado em 10/10/2006.

MARINHO, A. G. da S. 1979. *História Cenozóica da Bacia de Sousa*. Dissertação de mestrado, UFPE, Recife.

McDONALD, M. G. e HARBAUGH, A. W. 1988. *A Modular three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. U. S. Geological Survey, Open-file report 83-875, Chapter A1.

PDRH. 2000. *Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba-Bacia do Rio do Peixe*. Grupo Gestor de Recursos Hídricos-Secretária de Planejamento do Estado da Paraíba. João Pessoa, PB.

PERH. 2006. *Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba*. Resumo Executivo e Atlas, Governo do Estado da Paraíba.

SIMMERS, I, (Editor) 1997. *Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas*. A.A. Balkema-Rotterdam, Holanda, 227 p.

UNEP/DEWA/UNESCO. 2002. *A Survey of Methods for Analysing Groundwater Recharge in Arid and Semi-arid Regions*. 70p, Nairobi, Kenya.

ANEXO I

POÇOS MONITORADOS PELA EQUIPE CPRM-UFCG

| REDE COOPERATIVA DE PESQUISA - CONVENIO FINEP-CPRM-UFCG | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|--------|--------------|-----------------------|----|--------------------|------------|-------|------|-------|------|-----------|----------|--------|
| COMPORTAMENTO DAS BACIAS SEDIMENTARES DA REGIAO SEMI-ARIDA DO NORDESTE BRASILEIRO - BACIA DO RIO DO PEIXE | | | | | | | | | | | | | | |
| DADOS DE LOCALIZAÇÃO, SUB-BACIAS, AQUIFERO CAPTADO, HIDRODINAMICOS | | | | | | | | | | | | | | |
| N. do ponto | UTM(N) | UTM(E) | Tipo | Município | UF | Litologia local | Aquífero | Cota | 8/05 | 11/05 | 5/06 | 8/06 | 11/06 | 02/07 |
| | | | | | | | | | NE | NE | NE | NE | NE | |
| R11 | 9264120 | 543043 | - | | | | | 274.4 | | | | | 4.30 | 4.63 |
| R12 | 9264996 | 541072 | - | | | | | 277.1 | | | | | 5.78 | 5.92 |
| R13 | 9265794 | 543469 | - | | | | | 282.8 | | | | | 3.1 | 2.75 |
| P111 | 9257081 | 539998 | Amazonas | Santa Helena | PB | Aluviões | Aluviões | 285.5 | 2.3 | | 1.35 | 2.00 | 2.2 | |
| P112 | 9257735 | 539968 | Amazonas | Santa Helena | PB | Aluviões | Aluviões | 283.9 | 3.2 | | 1.08 | 1.00 | 0.98 | |
| P114 | 9259977 | 538779 | Amazonas | Santa Helena | PB | Aluviões | Aluviões | 284.2 | 1.75 | | 1.27 | 1.55 | 1.8 | |
| P131 | 9267800 | 543883 | Amazonas | Triunfo | PB | Aluviões | Aluviões | 288.7 | 1.65 | | 0.02 | 0.10 | 0.35 | |
| P133 | 9269988 | 543091 | Amazonas | Triunfo | PB | Aluviões | Aluviões | 302.9 | 2.9 | | 0.99 | 1.60 | 2.45 | |
| P146 | 9253974 | 582823 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 223.6 | 5.2 | 2.66 | 3.3 | 3.90 | 4.9 | |
| P151 | 9254868 | 581870 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 224.9 | 4.5 | 0.32 | 0.6 | 1.45 | 1.63 | |
| P158 | 9253958 | 578199 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 227.4 | 5.4 | | | 4.40 | liminad | |
| P159 | 9253672 | 577645 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 228.1 | 6 | 1.67 | 3.95 | 4.92 | 5.6 | |
| P163 | 9253661 | 573694 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 231 | 6.2 | | 4.8 | 4.85 | 4.89 | |
| P164 | 9253265 | 572887 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 232.2 | 6.2 | | 5.21 | 5.40 | 7.3 | |
| P165 | 9253245 | 572899 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 232 | 5.5 | 4.18 | 5.46 | bomb | liminad | |
| P172 | 9254465 | 565467 | Amazonas | S. J. do Rio do Peixe | PB | Aluviões | Aluviões | 241.9 | 6.9 | 0.6 | 3.7 | 6.85 | 6.92 | |
| P174 | 9253942 | 565650 | Amazonas | S. J. do Rio do Peixe | PB | Aluviões | Aluviões | 243 | 4.1 | 2.75 | 3.53 | 3.90 | 4.2 | |
| P176 | 9253877 | 566120 | Amazonas | S. J. do Rio do Peixe | PB | Aluviões | Aluviões | 241 | 3 | | 3 | 3.05 | 3.35 | |
| P177 | 9253643 | 566527 | Amazonas | S. J. do Rio do Peixe | PB | Aluviões | Aluviões | 240.2 | 2.2 | 0.1 | 1.36 | 1.75 | 1.95 | |
| P185 | 9246509 | 584400 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 223 | 0 | 0 | 3.75 | 0.00 | 0 | |
| P192 | 9244377 | 587724 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 232.9 | 2.7 | 0 | 0 | 0.50 | 0.42 | |
| P198 | 9253861 | 589395 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 218.9 | 4.6 | 0.34 | 3.26 | 4.08 | 4.6 | |
| P201 | 9256541 | 579207 | Amazonas | Sousa | PB | Aluviões | Aluviões | 228.4 | 6.05 | 4.65 | 4.75 | 5.72 | 6.01 | |
| P215 | 9252549 | 566595 | Amazonas | S. J. do Rio do Peixe | PB | Aluviões | Aluviões | 240 | 5.75 | | 4.47 | 4.85 | 7.03 | |
| P224 | 9268141 | 537065 | Amazonas | Umari-CE | CE | Aluviões | Aluviões | 285.2 | 3.65 | 0.77 | 1.57 | 2.00 | 2.77 | |
| P245 | 9277590 | 564272 | Amazonas | Uiraúna | PB | Aluviões | Aluviões | 290.8 | 4.05 | | 2.18 | 2.86 | 3.83 | |
| R1 | 9266246 | 549304 | Amazonas | Sousa | PB | | | 266.0 | | | | 5.10 | 5.31 | |
| R3 | 9246846 | 596900 | Amazonas | Sousa | PB | | | 210.8 | | | | 3.00 | 2.9 | |
| R5 | 9248682 | 580308 | Amazonas | Sousa | PB | | | 226.9 | | | | 2.80 | 2.45 | |
| R6 | 9247614 | 580707 | Amazonas | Sousa | PB | | | 228.0 | | | | 1.56 | 1.93 | |
| R7 | 9246842 | 580309 | Amazonas | Sousa | PB | | | 228.8 | | | | 2.00 | 2.22 | |
| R8 | 9246104 | 579420 | Amazonas | Sousa | PB | | | 230.3 | | | | 2.30 | 2.5 | |
| R9 | 9245098 | 576571 | Amazonas | Sousa | PB | | | 235.6 | | | | 2.00 | 2.2 | |
| R14 | 9260580 | 569549 | Amazonas | | | | | 257.1 | | | | | 7.37 | |
| R15 | 9259622 | 546155 | Amazonas | | | | | 264.1 | | | | | 4.18 | |
| CH076 | 9250783 | 616216 | Amazonas | S. D. do Pombal | PB | Aluviões | Aluviões | 199.5 | 3.45 | 2.43 | 1.53 | 3.17 | 3.1 | |
| CD011 | 9275360 | 568024 | Poço tubular | Uiraúna | PB | Coberturas | Sousa | 304 | | 3.95 | | 2.98 | 3.56 | 4.19 |
| CD030 | 9278812 | 568600 | Poço tubular | Uiraúna | PB | Aluviões | Sousa | 304.5 | 6.75 | | 6.88 | 6.81 | 7.15 | 6.87 |
| CD113 | 9256900 | 573000 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 238.8 | | 7.15 | 20 | 15.8 | 20.80 | 19.37 |
| CD324 | 9275209 | 555213 | Poço tubular | Poco de jose de moura | PB | Aluviões | A. Navarro | 302.1 | 3.65 | 4.4 | 2.2 | 3.49 | 3.95 | 4.43 |
| CD345 | 9272605 | 554089 | Poço tubular | Poco de jose de moura | PB | Aluviões | A. Navarro | 285 | 24.6 | 24 | | bomb | 13.22 | 17.05 |
| CD350 | 9270950 | 554176 | Poço tubular | Poco de jose de moura | PB | Aluviões | A. Navarro | 285.5 | | 8.8 | 7.87 | 9.28 | 9.20 | 9.45 |
| CD417 | 9276334 | 561675 | Poço Tubular | Uiraúna | PB | Coberturas | A. Navarro | 289.4 | | | 7.45 | bomb | fecha do | echadd |
| CD479 | 9276042 | 567177 | Poço tubular | Uiraúna | PB | Aluviões | Sousa | 288.1 | | | 8.2 | obstruido | | |
| CD480 | 9276196 | 567210 | Poço tubular | Uiraúna | PB | Aluviões | Sousa | 298.1 | 7.5 | | | 7.34 | 8.11 | 8.77 |
| CD983 | 9266905 | 555448 | Poço tubular | Poco de jose de moura | PB | Arenitos-Folhelhos | Sousa | 281.8 | 16.2 | 16.45 | 16.2 | 16.1 | 16.20 | 16.55 |
| CD989 | 9265598 | 555824 | Poço tubular | Poco de jose de moura | PB | Arenitos-Folhelhos | Sousa | 268.9 | 4.2 | 4.8 | 3.1 | 3.92 | 4.00 | 5.05 |
| CG875 | 9251771 | 601651 | Poço tubular | Aparecida | PB | Arenitos | A. Navarro | 216.8 | 5.5 | | 7.8 | 8.21 | 8.90 | echadd |
| CG935 | 9246474 | 597321 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 213.1 | 4.6 | 4.8 | 3.8 | 6.06 | 4.95 | 4.1 |
| CG940 | 9248540 | 597012 | Poço tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 210.9 | 4.25 | | | 15.6 | bomb | bomb. |
| CG941 | 9248408 | 597290 | Poço tubular | Sousa | PB | | | 210.3 | | | | 3.4 | 3.55 | 3.7 |
| CG963 | 9252676 | 600162 | Poço tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 214.4 | 6.85 | | 5.95 | 5.88 | 6.40 | 6.34 |
| CH014 | 9245473 | 612320 | Poço tubular | S. D. do Pombal | PB | Coberturas | A. Navarro | 193.7 | 7.55 | | 4.05 | | | bomb. |
| CH024 | 9247856 | 619619 | Poço tubular | S. D. do Pombal | PB | Granitos | Cristalino | 196.4 | 3.5 | | 2.82 | | 3.45 | 4.14 |
| CH039 | 9248721 | 617656 | Poço tubular | S. D. do Pombal | PB | Aluviões | Sousa | 190.8 | | 7.15 | 5.55 | 5.93 | bomb. | 6.77 |
| CH404 | 9250237 | 595800 | Poço tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 220.3 | 11.3 | 11.8 | 11 | 10.3 | 10.60 | 10.84 |
| CH454 | 9256564 | 592930 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 225.1 | | | 1.28 | 1 | 5.38 | 2.58 |
| CH527 | 9254225 | 596814 | Poço tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 216.8 | 11 | | | 10.8 | 10.12 | 10.17 |
| CH533 | 9253701 | 592865 | Poço tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 215.9 | 3.2 | 4.8 | 2.45 | 3.71 | bomb. | 5.43 |
| CH646 | 9258682 | 572964 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluvião | Sousa | 240.4 | 10.2 | | | 9.37 | bomb. | 11.82 |
| CH663 | 9260419 | 578212 | Poço tubular | Sousa | PB | Arenitos | A. Navarro | 241.6 | 3.4 | | 1 | 3.48 | 4.80 | 5.7 |

| REDE COOPERATIVA DE PESQUISA - CONVENIO FINEP-CPRM-UFMG | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|--------|--------------|-----------------------|----|--------------------|-------------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|-----------|-----------|
| COMPORTAMENTO DAS BACIAS SEDIMENTARES DA REGIAO SEMI-ARIDA DO NORDESTE BRASILEIRO - BACIA DO RIO DO PEIXE | | | | | | | | | | | | | | |
| DADOS DE LOCALIZAÇÃO, SUB-BACIAS, AQUIFERO CAPTADO, HIDRODINAMICOS | | | | | | | | | | | | | | |
| N. do pt | UTM(N) | UTM(E) | Tipo | Município | UF | Litologia local | Aquífero | Cota | 8/05 | 11/05 | 5/06 | 8/06 | 11/06 | 02/07 |
| | | | | | | | | | NE | NE | NE | NE | NE | NE |
| CD417 | 9276334 | 561675 | Poço Tubular | Uiraúna | PB | Coberturas | A. Navarro | 289.4 | | | 7.45 | bomb. | fechado | fechado |
| CD479 | 9276042 | 567177 | Poço tubular | Uirauna | PB | Aluviões | Sousa | 288.1 | | | 8.2 | | obstruído | |
| CD480 | 9276196 | 567210 | Poço tubular | Uirauna | PB | Aluviões | Sousa | 298.1 | 7.5 | | | 7.34 | 8.11 | 8.77 |
| CD983 | 9266905 | 555448 | Poço tubular | Poco de jose de moura | PB | Arenitos-Folhelhos | Sousa | 281.8 | 16.2 | 16.45 | 16.2 | 16.06 | 16.20 | 16.55 |
| CD989 | 9265598 | 555824 | Poço tubular | Poco de jose de moura | PB | Arenitos-Folhelhos | Sousa | 268.9 | 4.2 | 4.8 | 3.1 | 3.92 | 4.00 | 5.05 |
| CG875 | 9251771 | 601651 | Poço tubular | Aparecida | PB | Arenitos | A. Navarro | 216.8 | 5.5 | | 7.8 | 8.21 | 8.90 | fechado |
| CG935 | 9246474 | 597321 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 213.1 | 4.6 | 4.8 | 3.8 | 6.06 | 4.95 | 4.1 |
| CG940 | 9248540 | 597012 | Poço tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 210.9 | 4.25 | | | 15.6 | bomb. | bomb. |
| CG941 | 9248408 | 597290 | Poço tubular | Sousa | PB | | | 210.3 | | | | 3.4 | 3.55 | 3.7 |
| CG963 | 9252676 | 600162 | Poço tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 214.4 | 6.85 | | 5.95 | 5.88 | 6.40 | 6.34 |
| CH014 | 9245473 | 612320 | Poço tubular | S. D. do Pombal | PB | Coberturas | A. Navarro | 193.7 | 7.55 | | 4.05 | | | bomb. |
| CH024 | 9259365 | 540177 | Poço tubular | S. D. do Pombal | PB | Granitos | Cristalino | 196.4 | 3.5 | | 2.82 | | 3.45 | 4.14 |
| CH039 | 9248721 | 617656 | Poço tubular | S. D. do Pombal | PB | Aluviões | Sousa | 190.8 | | 7.15 | 5.55 | 5.93 | bomb. | 6.77 |
| CH404 | 9250237 | 595800 | Poço tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 220.3 | 11.3 | 11.8 | 10.95 | 10.26 | 10.60 | 10.84 |
| CH454 | 9256564 | 592930 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 225.1 | | | 1.28 | 1 | 5.38 | 2.58 |
| CH527 | 9254225 | 596814 | Poço tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 216.8 | 10.95 | | | 10.75 | 10.12 | 10.17 |
| CH533 | 9253701 | 592865 | Poço tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 215.9 | 3.2 | 4.8 | 2.45 | 3.71 | bomb. | 5.43 |
| CH646 | 9258682 | 572964 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluvião | Sousa | 240.4 | 10.2 | | | 9.37 | bomb. | 11.82 |
| CH663 | 9260419 | 578212 | Poço tubular | Sousa | PB | Arenitos | A. Navarro | 241.6 | 3.4 | | 1 | 3.48 | 4.80 | 5.7 |
| CM019 | 9259499 | 540306 | Poço tubular | Santa helena | PB | Aluviões | A. Navarro | 279.2 | 7.2 | | | 9.77 | 18.30 | 9 |
| CM020 | 9259365 | 540177 | Poço tubular | Santa helena | PB | Aluviões | A. Navarro | 282 | 5.55 | 5.85 | | 5.67 | 5.95 | 9.25 |
| CM027 | 9260428 | 537915 | Poço tubular | Santa helena | PB | Cobert.aren. | Cristalino | 290.2 | 7.4 | | | 7.01 | 8.20 | obst abe. |
| CM029 | 9260685 | 537396 | Poço tubular | Santa helena | PB | Cobert.aren. | A. Navarro | 295.6 | 7.1 | | | 6.8 | 7.00 | 7.33 |
| CM054 | 9257750 | 548180 | Poço tubular | Santa helena | PB | Arenitos | A. Navarro | 281.5 | | 23.15 | | 23.45 | 23.65 | bomb. |
| CM056 | 9257623 | 548543 | Poço tubular | Santa helena | PB | Arenitos | A. Navarro | 279.6 | 23.6 | 23.55 | 23.13 | 25.25 | 29.80 | 30.28 |
| CM426 | 9272256 | 541632 | Poço tubular | Triunfo | PB | Aluvião | A. Navarro | 322.9 | 15.5 | 16 | 15.53 | 16.1 | bomb. | 18 |
| CM441 | 9269203 | 543032 | Poço tubular | Triunfo | PB | | A. Navarro | | | | | | | 24.6 |
| CM462 | 9272778 | 544641 | Poço tubular | Triunfo | PB | Coberturas | A. Navarro | 310.7 | | 4.5 | 5.27 | 4.69 | 5.00 | 5.2 |
| CM465 | 9266615 | 543615 | Poço tubular | Triunfo | PB | Arenitos | A. Navarro | 291.4 | | 16.4 | | 16.6 | 16.74 | 16.78 |
| CM542 | 9251880 | 549733 | Poço tubular | Santa helena | PB | Cobert.aren. | A. Navarro | 273.9 | 13.75 | | 12.7 | | 14.38 | 13.15 |
| CM567 | 9253366 | 555616 | Poço tubular | Santa helena | PB | Cobert.aren. | Sousa | 255.7 | | 5.85 | | 5.54 | 5.82 | 6.07 |
| CM586 | 9253333 | 550961 | Poço tubular | Santa helena | PB | Cobert.aren. | A. Navarro | 269.2 | 20.55 | 21.4(2 2.10.2 005) | 20 | 19.65 | 19.45 | 19.2 |
| CM592 | 9254933 | 551761 | Poço tubular | Santa helena | PB | Arenitos | A. Navarro | 259.6 | | | | 11.1 | 10.69 | 10.43 |
| CM657 | 9260512 | 551578 | Poço tubular | Triunfo | PB | Arenitos-Folhelhos | Sousa | 266.5 | | 5.85 | | 5.95 | 6.40 | 6.65 |
| CM673/r4 1 | 9262184 | 551331 | Poço tubular | Triunfo | PB | Arenitos-Folhelhos | Sousa | 264.5 | 5 | 6.85 | 5.48 | 6.79 | 10.03 | 8.96 |
| CM689 | 9263421 | 551446 | Poço tubular | Triunfo | PB | Cobert.aren. | Sousa | 261.3 | 0.6 | 2.2 | 0.16 | 0.31 | 1.86 | 1.42 |
| CM708 | 9268916 | 547216 | Poço tubular | Triunfo | PB | Cobert.aren. | A. Navarro | 294.4 | 16.9 | | 16.95 | 16.96 | 15.40 | 17.62 |
| CM710 | 9268385 | 547566 | Poço tubular | Triunfo | PB | Cobert.aren. | A. Navarro | 296.1 | 15.25 | 15 | 15.2 | 14.67 | 14.73 | 14.8 |
| CM713 | 9263931 | 551242 | Poço tubular | Triunfo | PB | Coberturas | Sousa | 265.8 | | | 5.7 | 10.43 | 6.10 | 10.7 |
| CM719 | 9265264 | 550972 | Poço tubular | Triunfo | PB | Aluviões | Sousa | 266.2 | 7.75 | 7.45 | 7.95 | 9.2 | 10.87 | 10.52 |
| CM720 | 9265563 | 550024 | Poço tubular | Triunfo | PB | Cobert.argilosa. | Sousa | 268.5 | 8.5 | 5.5 | 5.73 | 8.22 | 8.50 | 10.5 |
| CN685 | 9271203 | 546774 | Poço Tubular | Triunfo | PB | Coberturas | A. Navarro | 295.4 | | 10.5 | 8.78 | 10.37 | 9.31 | 9.18 |
| CN797 | 9252128 | 562685 | Poço tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Coberturas | Sousa | 244.4 | 4 | 4.4 | 1.4 | 3.07 | 3.67 | 4.35 |
| CN799 | 9251851 | 562964 | Poço tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Coberturas | Sousa | 241.7 | 3.1 | | 1.5 | 6.47 | 3.90 | 3.69 |
| CN808 | 9267846 | 548280 | Poço tubular | Triunfo | PB | Cobert.aren. | A. Navarro | 295.9 | 21.3 | 21.2 | 21.47 | 21.33 | 21.50 | 21.63 |
| CN813 | 9267349 | 548925 | Poço tubular | Triunfo | PB | Cobert.aren. | A. Navarro | 285.3 | | | 8.45 | 9.01 | 9.70 | 10.84 |
| CN922 | 9273013 | 549833 | Poço tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | | | 244 | | | | 17.34 | 21.02 | 29.6 |
| CO682 | 9252788 | 625380 | Poço tubular | S. D. do Pombal | PB | Arenitos | A. Navarro | 198.3 | | 17.55 | | 17.95 | bomb. | 17.97 |
| CO686 | 9254025 | 626488 | Poço tubular | S. D. do Pombal | PB | Aluviões | A. Navarro | 185.1 | 10 | | 9.5 | bomb | 10.16 | 11.04 |
| DQ011 | 9245573 | 588992 | Poço tubular | Sousa | PB | Arenitos | Rio Piranha | 218.4 | 4.5 | 5.6 | | 3.97 | 3.00 | 3.24 |
| DQ081 | 9247445 | 591325 | Poço tubular | Sousa | PB | Arenitos | Rio Piranha | 222.6 | | 5.2 | 5.4 | 5.1 | 6.35 | 6.44 |
| DQ968 | 9255632 | 576710 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 228.9 | 12 | | 4.68 | 5.97 | 7.05 | 7.55 |
| DR003 | 9244898 | 591641 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluviões | Rio Piranha | 221.2 | 4.7 | | 0.98 | 3.26 | 3.75 | 2.3 |
| DR012 | 9245362 | 590399 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluviões | Rio Piranha | 221.4 | 6.8 | 7.8 | 3.9 | 2.45 | 3.30 | 3.9 |
| DV072 | 9260077 | 571623 | Poço tubular | Sousa | PB | Folhelhos | Sousa | 252 | 8.9 | | | 7.78 | 9.30 | 10.4 |
| DV040 | 9244200 | 571325 | Poço tubular | Marizópolis | PB | Aluviões | A. Navarro | 266.9 | | 10.3 | 6 | 6.89 | 8.40 | 9.27 |
| DV062 | 9249544 | 569166 | Poço tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Coberturas | Sousa | 240.6 | | 9.7 | 2.83 | | 5.50 | 6.49 |
| DV063 | 9249510 | 568885 | Poço tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Aluvião | Sousa | 239.4 | 4.3 | 5.6 | 2.1 | 3.33 | 4.10 | 6.32 |
| DV069 | 9249590 | 569252 | Poço tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Aluviões | Sousa | 240.9 | | 10.45 | 4.83 | 6.86 | | 9.35 |
| DV072 | 9248783 | 573953 | Poço tubular | Marizópolis | PB | Aluviões | Sousa | 234 | | 2.3 | 0.5 | 1.71 | 2.20 | 2.54 |
| DV084 | 9260892 | 584808 | Poço tubular | Sousa | PB | | | 241.5 | | | | 11.73 | 7.13 | 8.7 |
| DV087 | 9252946 | 594571 | Poço tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 214 | 7.9 | | | 3.71 | 5.00 | bomb. |
| DV641 | 9259367 | 576100 | Poço tubular | Sousa | PB | Cristalino | Sousa | 245.3 | 16.7 | | 16.53 | | | 15.5 |

| REDE COOPERATIVA DE PESQUISA - CONVENIO FINEP-CPRM-UFMG | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|--------|--------------|-----------------------|----|-----------------|--------------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|---------|------------|
| COMPORTAMENTO DAS BACIAS SEDIMENTARES DA REGIAO SEMI-ARIDA DO NORDESTE BRASILEIRO - BACIA DO RIO DO PEIXE | | | | | | | | | | | | | | |
| DADOS DE LOCALIZAÇÃO, SUB-BACIAS, AQUIFERO CAPTADO, HIDRODINAMICOS | | | | | | | | | | | | | | |
| N. do pt | UTM(N) | UTM(E) | Tipo | Município | UF | Litologia local | Aquífero | Cota | 8/05 | 11/05 | 5/06 | 8/06 | 11/06 | 02/07 |
| | | | | | | | | NE | NE | NE | NE | NE | NE | NE |
| DW667 | 9279394 | 565667 | Poço tubular | Uirauna | PB | Aluviões | A. Navarro | 298.2 | | 2.4 | | 1.74 | 2.65 | 3.29 |
| DW689 | 9279477 | 565893 | Poço tubular | Uirauna | PB | Aluviões | A. Navarro | 298.9 | | 3.8 | 2.8 | 6.85 | 7.20 | 7.6 |
| DW718 | 9257043 | 576254 | Poço tubular | Sousa | PB | Cobert.aren. | Sousa | 232.9 | 11.75 | | | 16.19 | 17.38 | 18.79 |
| DW900 | 9251399 | 556748 | Poço tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Folhelhos | Sousa | 260 | 8.9 | | | 5.02 | 10.88 | 5.04 |
| DW901 | 9250968 | 556472 | Poço tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Folhelhos | Sousa | 262.1 | 6.2 | 6.2 | | 6 | 6.10 | 6.1 |
| DW952 | 9254747 | 561497 | Poço tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Coberturas | Sousa | 247.8 | 7.2 | 8.3 | 6 | 7.5 | 7.22 | 7.83 |
| P01 | 9259076 | 550440 | Poço Tubular | Santa Helena | PB | Arenitos | A. Navarro | 261.8 | 5.15 | 5.25 | 4.6 | 5.21 | 5.40 | 5.25 |
| P03A | 9259784 | 553103 | Poço Tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Brecha | Cristalino | 262.7 | 1.8 | 1.35 | | 1.44 | 1.82 | 2.81 |
| P09 | 9265317 | 551174 | Poço Tubular | Triunfo | PB | Aluviões | Sousa | 266.2 | | | 5 | | 6.17 | 6.5 |
| P110/cm4 85 | 9258314 | 544094 | Poço tubular | Santa Helena | PB | Aluviões | Aluviões | 270.7 | | 7.8 | 2.65 | 6.49 | 7.94 | 7.81 |
| P148 | 9253980 | 582599 | Poço Tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 223 | | 4.85 | 4.61 | 4.38 | 4.75 | 5.2 |
| P153 | 9253279 | 580515 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 226.6 | | 8 | 7.73 | 8.15 | 8.28 | 8.4 |
| P154 | 9253762 | 578619 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 229.1 | | 10.1 | 5.81 | 6.9 | 8.00 | 9.38 |
| P157 | 9253952 | 578161 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 227.5 | | 5.85 | 2.63 | | 6.11 | 6.7 |
| P16 | 9269956 | 539381 | Poço Tubular | Umari-CE | CE | Aluviões | A. Navarro | 297 | 10.6 | | 11.3 | 11.62 | 10.90 | 11.17 |
| P160 | 9253819 | 577587 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 227.7 | | 5.4 | | | 4.65 | 5.7 |
| P161 | 9253608 | 576638 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 228.9 | | 5.8 | 1.83 | 3.48 | 8.37 | 5.8 |
| P166 | 9253118 | 572119 | Poço Tubular | Sousa | PB | Folhelhos | Sousa | 235 | | 7.2 | | 7.64 | 7.66 | 8.43 |
| P17 | 9267873 | 536382 | Poço Tubular | Umari-CE | CE | Cobert.aren. | A. Navarro | 283.1 | | | 10.42 | 1.6 | 10.45 | 11.1 |
| P180 | 9253138 | 570759 | Poço Tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Aluviões | Sousa | 236.6 | | 8.2 | 6.25 | 7.85 | 8.25 | 9.2 |
| P181 | 9249708 | 585372 | Poço Tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 233.4 | | | | 9.98 | bomb. | fechado |
| P190 | 9244165 | 584328 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluviões | o Piranh-Cri | 239 | | 0.2 | 0.11 | 1.47 | 0.20 | bomb. |
| P194 | 9245989 | 587890 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluviões | Rio Piranhas | 223 | | | | 0 | 0.00 | 0 |
| P196 | 9250968 | 589813 | Poço Tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 227.9 | | 12.7 | 9.7 | 7.39 | 8.44 | 9.3 |
| P20 | 9259438 | 576113 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluvião | A. Navarro | 241.6 | 18.9 | | 18.45 | 19.2 | 18.77 | 15.85 |
| P213 | 9272897 | 544391 | Poço Tubular | Triunfo | PB | Coberturas | A. Navarro | 307.8 | | 2.55 | | 2.16 | 2.40 | 2.77 |
| P217 | 9253176 | 565232 | Poço Tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Aluviões | Sousa | 241 | | 5.75 | | 5.42 | 5.60 | 5.89 |
| P225 | 9268992 | 538220 | Poço Tubular | Umari-CE | CE | Antenor Navarro | A. Navarro | 296.6 | | 16.6 | | 14.98 | fechado | 16.4 |
| P227 | 9254496 | 583287 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 223.3 | | | 3.71 | 4.2 | 4.82 | bomb. |
| P243 | 9275302 | 557808 | Poço Tubular | Uiraúna | PB | Aluviões | A. Navarro | 290.5 | | 3.4 | | bomb | 9.60 | 9.65 |
| P247 | 9272408 | 565418 | Poço Tubular | Uiraúna | PB | Aluviões | Sousa | 296.5 | | 2.4 | | 1.38 | 2.40 | 3.6 |
| P28 | 9248438 | 555456 | Poço Tubular | S. J. do Rio do Peixe | PB | Aluviões | Sousa | 264.5 | 3.8 | 5.18(2 2.10,2 005) | | 4.26 | 5.43 | 5.36 |
| P33 | 9259686 | 546157 | Poço Tubular | Triunfo | PB | Aluviões | A. Navarro | 264.5 | 3.85 | 5.2 | 3.47 | 3.63 | 4.80 | fechado |
| P47 | 9249920 | 597735 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 214.1 | 5.2 | 5.5 | 3.65 | 3.75 | 4.17 | 4.54 |
| P48 | 9252298 | 596323 | Poço Tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 213 | 4.65 | 5.3 | 4 | 4.05 | 4.60 | 5.02 |
| P61 | 9251815 | 574614 | Poço Tubular | Sousa | PB | Coberturas | Sousa | 236 | 7.2 | | | 7 | fechado | fechado |
| P79 | 9279707 | 570883 | Poço Tubular | Uiraúna | PB | Aluvião | Sousa | 311.3 | 10 | | 3.05 | 1.81 | 2.41 | 2.38 |
| P80 | 9280199 | 572478 | Poço Tubular | Uiraúna | PB | Aluvião | Sousa | 321.6 | | | 9.29 | 2.15 | 3.17 | 20.60(Liq) |
| P84 | 9275999 | 561659 | Poço Tubular | Uiraúna | PB | Coberturas | A. Navarro | 286.3 | 5 | | | 4.7 | 4.72 | 4.8 |
| P85/cd412 | 9274255 | 561457 | Poço Tubular | Uiraúna | PB | Aluvião | Sousa | 283 | 5 | | | 8.27 | 11.80 | 5.75 |
| P89 | 9275574 | 557866 | Poço Tubular | Uiraúna | PB | Coberturas | A. Navarro | 291 | 4.25 | | | 3.84 | 3.90 | 4.1 |
| P91 | 9258002 | 575810 | Poço Tubular | Sousa | PB | Aluviões | Sousa | 233 | 20 | | | 13.52 | 15.00 | 20.53 |
| P93 | 9272800 | 558400 | Poço Tubular | Poço Jose de Moura | PB | Aluviões | Sousa | 281.8 | 6 | | | 10 | 4.25 | 4.5 |
| P94 | 9272302 | 549040 | Poço Tubular | Triunfo | PB | Aluviões | A. Navarro | 292 | 3.5 | 7 | | 13.29 | 7.00 | 7.24 |
| R2 | 9255266 | 626128 | Poço Tubular | Sousa | PB | | | | | | | | 2.17 | |
| R4 | 9249210 | 582287 | Poço Tubular | Sousa | PB | | | 223.8 | | | | | 4.50 | 4.3 |
| R10 | 9262132 | 544938 | Poço Tubular | | | | | 266.8 | | | | | 2.74 | 3.6 |
| P11 | 9266109 | 549671 | | | PB | Cobert.aren. | Sousa | 271.3 | 6.8 | | | | fechado | fechado |
| R16 | 9252018 | 601421 | | | | | | 215.3 | | | | | | 8.53 |
| R17 | 9252110 | 574560 | | | | | | 233.3 | | | | | | 6.1 |
| R18 | 9251832 | 575494 | | | | | | 233.3 | | | | | | 8.47 |
| R19 | 9273346 | 553965 | | | | | | 289.8 | | | | | | 11.69 |

