

PROGRAMA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DOS RECURSOS  
HÍDRICOS - PROÁGUA NACIONAL  
Acordo de Empréstimo Nº 7420-BR  
Banco Mundial

**AVALIAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS E  
PROPOSIÇÃO DE MODELO DE GESTÃO COMPARTILHADA  
PARA OS AQUÍFEROS DA CHAPADA DO APODI, ENTRE OS  
ESTADOS DO RIO GRANDE DO NORTE E CEARÁ.**



**Relatório Final - RF  
Volume III**

**Hidrogeologia**

## **República Federativa do Brasil**

Luiz Inácio Lula da Silva

Presidente

## **Ministério do Meio Ambiente**

Izabella Mônica Vieira Teixeira

Ministra

## **Agência Nacional de Águas**

### **Diretoria Colegiada**

Vicente Andreu – Diretor-Presidente

Dalvino Troccoli Franca

João Gilberto Lotufo Conejo

Paulo Lopes Varella Neto

Paulo Rodrigues Vieira

## **Superintendência de Implementação e Programas e Projetos (Coordenação)**

Ricardo Medeiros de Andrade

Humberto Cardoso Gonçalves

## **Superintendência de Outorga e Fiscalização**

Francisco Lopes Viana

Flávia Gomes de Barros

## **Gerência de Águas Subterrâneas**

Fernando Roberto de Oliveira

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso

Flávio Soares do Nascimento

Marco Vinicius Castro Gonçalves

## **Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização**

Carlos Alberto Martins (SEMARH/RN)

Elmo Marinho de Figueiredo (SEMARH/RN)

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso (ANA)

Fernando Roberto de Oliveira (ANA)

Flávio Soares do Nascimento (ANA)

Hilda Renck Teixeira (ANA)

João Lucio Faria de Oliveira (COGERH/CE)

Liduína de Carvalho Costa (SRH/CE)

Luiz Amisterdan Alves de Oliveira (SRH/CE)

Marcelo Augusto de Queiróz (CAERN/RN)

Napoleão Quesado Jr.(COGERH/CE)

Nelson César Fernandes Santos (IGARN/RN)

Nelson Paiva Raulino de Souza (FUNCEME/CE)

Paula Stein (SEMARH/RN)

Paulo Miranda Pereira (COGERH/CE)

Vera Maria Lucas Ribeiro (SEMARH/RN)

Victor Ygor Bonfim de Melo (SRH/CE)

Zulene Almada Teixeira (COGERH/CE)

**Consórcio PROJETEC/TECHNE (Coordenação Geral)**

João Guimarães Recena

Luiz Alberto Teixeira

Antonio Carlos de Almeida Vidon

**Gerência do Contrato**

Marcelo Casiuch

**Membros da Equipe Técnica Executora**

João Manoel Filho (Coordenador)

Admilson da Penha Pachêco

Benjamim Bley de Brito Neves

Carla Maria Salgado Vidal

Cristiana Coutinho Duarte

Edilton Carneiro Feitosa

Joaquim Mota

José do Patrocínio Tomáz Albuquerque

José Geilson Alves Demetrio

Maria Marlúcia Freitas Santiago

Marivaldo Gonçalves da Silva

Nelson da Franca Ribeiro dos Anjos

Nivaneide Alves de Melo

Paulo de Melo da Cunha Pedrosa

Roberto Kirchheim

Tiago Siqueira de Miranda

Carlos Danilo Câmara de Oliveira

Diogo Feitosa Setubal

Francisco Edjânio Rodrigues Ferreira

Pedro Vinícius de Souza

Rodrigo Holanda Ribeiro

# **AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA**

**PROGRAMA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS**

**Acordo de Empréstimo N° 7420-BR**

**Banco Mundial**

**AVALIAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS E  
PROPOSIÇÃO DE MODELO DE GESTÃO COMPARTILHADA  
PARA OS AQUÍFEROS DA CHAPADA DO APODI, ENTRE OS  
ESTADOS DO RIO GRANDE DO NORTE E CEARÁ.**

**Volume III  
Hidrogeologia**

**Novembro 2010**

Agência Nacional de Águas – ANA  
Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco B, L e M  
CEP: 70610-200 , Brasília – DF  
PABX: 2109-5400 / 2109-5252  
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Equipe:  
Agência Nacional de Águas – ANA  
Superintendência de Implementação de Programas e Projetos – SIP (Coordenação)  
Superintendência de Outorga e Fiscalização - SOF

Elaboração e execução:  
Consórcio PROJETEC-TECHNE

Todos os direitos reservados  
É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada a fonte.

Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Proposição de Modelo de Gestão Compartilhada para os Aquíferos da Chapada do Apodi, entre os Estados do Rio Grande do Norte e Ceará.

Vol. III – Hidrogeologia.

Brasília: ANA, SIP, 2010.

1. Recursos hídricos
2. Chapada do Apodi
  - I. Projeto Proágua Nacional
  - II. Agência Nacional de Águas
  - III. Consórcio PROJETEC-TECHNE.

## SUMÁRIO

<b>Apresentação .....</b>	<b>18</b>
<b>4 – CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DOS AQUÍFEROS .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 – Cadastro de usuários e de fontes potenciais de contaminação... 23</b>	
<b>4.2 – Tratamento Estatístico dos Dados .....</b>	<b>24</b>
4.2.1 – Propriedade do terreno e eficiência operacional dos poços .....	24
4.2.2 – Regime efetivo de funcionamento dos poços .....	25
4.2.3 – Disponibilidade instalada .....	25
4.2.4 – Produção de água subterrânea.....	26
4.2.4.1 – Produção global.....	26
4.2.4.2 – Produção de água no aquífero Jandaíra .....	28
4.2.4.3 – Produção de água no aquífero Açú .....	28
4.2.4.4 – Vazão informada.....	29
4.2.5 – Variação dos Níveis de água .....	32
4.2.5.1 – Níveis no Aquífero Jandaíra .....	32
4.2.5.2 – Níveis no Aquífero Açú .....	33
4.2.6 – Principais usuários de água subterrânea.....	39
4.2.7 – Principais proprietários de poços .....	40
4.2.8 – Outorgas de água .....	43
4.2.9 – Profundidade dos poços .....	53
<b>4.3 – Índice de concentração de poços.....</b>	<b>55</b>
<b>4.4 – Redes de Monitoramento .....</b>	<b>57</b>
<b>4.5 – Realização de Campanhas de Medição de Níveis de Água .....</b>	<b>62</b>
<b>4.6 – Elaboração de mapas potenciométricos: .....</b>	<b>63</b>
4.6.1 – Mapa potenciométrico da primeira campanha .....	64
4.6.2 – Mapa potenciométrico da segunda campanha .....	68
4.6.3 – Diferenças de cargas entre as duas campanhas .....	70
<b>4.7 – Balanço hídrico .....</b>	<b>73</b>
4.7.1 – Dados e Métodos Utilizados .....	73
4.7.1.1 – Evapotranspiração Potencial .....	76
4.7.1.2 – Precipitações .....	76
4.7.1.3 – Precipitação média (P) .....	79
4.7.1.4 – Deflúvios (R).....	81
4.7.1.5 – Fluxo básico (I).....	81
4.7.2. – Resultados obtidos .....	82

4.7.2.1 – Síntese do Balanço Hídrico no Setor A1) .....	82
4.7.2.2 – Síntese do Balanço Hídrico no Setor A2 – Bacia do Mata Fresca (1325 km <sup>2</sup> ).....	85
4.7.2.3 – Síntese do Balanço Hídrico no Setor A3 .....	89
<b>4.8 – Sondagens e poços exploratórios.....</b>	<b>93</b>
4.8.1 – Características Técnicas dos Poços .....	93
4.8.2 – Perfis litológicos e construtivos .....	95
<b>4.9 – Execução de testes de aquíferos.....</b>	<b>95</b>
<b>4.10 – Interpretação dos resultados dos testes de aquíferos e avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos .....</b>	<b>97</b>
4.10.1 - Teste do aquífero Açú em Baraúna .....	97
4.10.1.1 - Vazão do poço produtor .....	98
4.10.1.2 - Difusividade do aquífero .....	99
4.10.1.3 - Evolução temporal do rebaixamento no aquífero Açú .....	101
4.10.1.4 - Evolução do nível de água no aquífero Jandaíra .....	102
4.10.1.5 - Propriedades hidráulicas do Açú em Baraúna.....	107
4.10.2 - Teste do aquífero Açú em Mossoró.....	110
4.10.2.1 – Descrição do teste .....	110
4.10.2.2 – Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos .....	111
4.10.3 – Testes do aquífero Açú em Vertentes Santa Cruz.....	112
4.10.3.1 – Localização dos Poços .....	114
4.10.3.2 - Execução dos testes .....	115
4.10.4 – Teste do aquífero Jandaíra em Furna de Pedra .....	119
4.10.4.1 – Curva do poço bombeado .....	119
4.10.4.2 – Curva do poço de observação.....	123
<b>4.11 – Elaboração de modelos conceituais .....</b>	<b>127</b>
<b>4.12 – Aplicação de modelos computacionais .....</b>	<b>127</b>
<b>4.13 – Avaliação da recarga .....</b>	<b>132</b>
4.13.1 – Estimativa da recarga a partir de dados hidrológicos .....	132
4.13.2 – Estimativa da recarga a partir de ensaios de infiltração.....	132
4.13.3 – Estimativa da recarga com base na variação do nível potenciométrico .....	140
<b>4.14 – Avaliação das Reservas, Potencialidades e Disponibilidades..</b>	<b>141</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>153</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 4.1</b> – Distribuição global dos poços cadastrados quanto à propriedade do terreno em setembro de 2002 e em setembro de 2009. ....	23
<b>Tabela 4.2</b> – Distribuição por aquífero dos poços cadastrados quanto à propriedade do terreno em 2009. ....	24
<b>Tabela 4.3</b> – Regime de funcionamento informado para 630 dos 1440 poços cadastrados na área de estudo (setembro 2009). ....	25
<b>Tabela 4.4</b> - Produção global de água inferida para os poços cadastrados na área de estudo (setembro 2009) e situação do funcionamento (em regime médio de 11 horas/dia) com base em dados informados de 536 poços. ....	26
<b>Tabela 4.5</b> – Produção de água subterrânea por aquífero na área do Projeto, estimada para o ano de 2009. ....	27
<b>Tabela 4.6</b> – Estatística descritiva da vazão informada no aquífero Jandaíra .	29
<b>Tabela 4.7</b> – Frequência da vazão informada no aquífero Jandaíra. ....	29
<b>Tabela 4.8</b> – Estatística descritiva da vazão informada no aquífero Açú. ....	30
<b>Tabela 4.9</b> – Frequência da vazão informada no aquífero Açú. ....	30
<b>Tabela 4.10</b> – Estatística descritiva da profundidade do nível estático do aquífero Jandaíra no trimestre agosto–outubro de 2009 em 260 poços da rede de monitoramento. ....	31
<b>Tabela 4.11</b> - Tabela dos intervalos de classe de profundidade dos níveis estáticos do aquífero Jandaíra no período de agosto-outubro 2009. ....	33
<b>Tabela 4.12</b> – Relação dos 20 (vinte) principais usuários de água subterrânea na área de estudo. ....	38
<b>Tabela 4.13</b> – Relação dos 20 (vinte) maiores proprietários de poços na área de estudo. ....	41
<b>Tabela 4.14</b> – Situação geral dos pedidos de outorga para água superficial na área do projeto. Fontes: COGERH (março 2009); SEMARH (agosto 2009) ....	42
<b>Tabela 4.15</b> – Situação geral dos pedidos de outorga para água subterrânea na área do projeto. Fontes: COGERH (março 2009); SEMARH (agosto 2009) ....	43
<b>Tabela 4.16</b> - Estatística descritiva da profundidade dos poços do aquífero Jandaíra. ....	51
<b>Tabela 4.17</b> - Frequência de profundidade dos poços no aquífero Jandaíra ....	51
<b>Tabela 4.18</b> - Estatística descritiva da profundidade dos poços do aquífero Açú. ....	52

<b>Tabela 4.19-</b> Tabela de frequência de profundidade dos poços no aquífero Açú	52
<b>Tabela 4.20</b> – Estatística descritiva do Índice de Concentração de Poços na Área do Projeto	54
<b>Tabela 4.21</b> – Frequência do Índice de poços por km <sup>2</sup> na área de estudo	54
<b>Tabela 4.22</b> – Estágios do índice de concentração de poços na área do projeto (2009)	55
<b>Tabela 4.23</b> – Número de amostras de água por aquífero coletadas na 1ª campanha (setembro 2009) e número previsto para a 2ª campanha (janeiro de 2010).	58
<b>Tabela 4.24</b> – Valores médios mensais das profundidades do nível estático do aquífero Jandaíra entre agosto 2009 e janeiro 2010 e variação média do nível estático em relação a janeiro de 2010, nos poços indicados.	61
<b>Tabela 4.25</b> – Frente Leste, de fluxo subterrâneo aberto em agosto 2009.	65
<b>Tabela 4.26</b> – Frente Norte, de fluxo subterrâneo aberto em agosto 2009.	66
<b>Tabela 4.27</b> – Resumo estatístico dos valores medidos de profundidade do nível estático nas duas campanhas de medição na Chapada do Apodi	68
<b>Tabela 4.28</b> – Evapotranspiração potencial média diária em 9 postos pluviométricos de interesse na região do Projeto Apodi (segundo Hargreaves)	75
<b>Tabela 4.29</b> – Estações pluviométricas da região do Baixo Jaguaribe e Chapada do Apodi levantadas no Portal Hidroweb da ANA.	76
<b>Tabela 4.30</b> – Pesos dos polígonos de Thiessen para cálculo da chuva média sobre o setor A1: Bacia do Jaguaribe – CE (518 km <sup>2</sup> ).	77
<b>Tabela 4.31</b> - Resumo do balanço hídrico 1979-2008 no Setor A1 – Bacia do Jaguaribe (518 km <sup>2</sup> ).	80
<b>Tabela 4.32</b> – Estatística descritiva da chuva e recarga médias no Setor A1	80
<b>Tabela 4.33</b> – Frequência de chuva e recarga no Setor A1 – Bacia Jaguaribe.	81
<b>Tabela 4.34</b> – Probabilidade de ocorrência da chuva e da recarga médias anuais (mm e m <sup>3</sup> /s) do balanço hídrico (1979-2008) no Setor A1 – Bacia do Jaguaribe – CE (518 km <sup>2</sup> ).	83
<b>Tabela 4.35</b> - Resumo do balanço hídrico 1979-2008 no Setor A2 – Bacia do Riacho Mata Fresca (1325 km <sup>2</sup> ).	83
<b>Tabela 4.36</b> – Estatística descritiva da chuva e recarga médias no Setor A2	84

<b>Tabela 4.37</b> – Frequência de chuva e recarga no Setor A2 – Mata Fresca.....	85
<b>Tabela 4.38</b> – Probabilidade de ocorrência da chuva e da recarga médias anuais (mm e m <sup>3</sup> /s) do balanço hídrico (1979-2008) no Setor A2 – Bacia do Jaguaribe – CE (1325 km <sup>2</sup> ).....	85
<b>Tabela 4.39</b> - Resumo do balanço hídrico 1979-2008 no Setor A3 – Bacia do Apodi (695 km <sup>2</sup> ).....	87
<b>Tabela 4.40</b> – Estatística descritiva da chuva e recarga médias no Setor A3 - Bacia do Apodi - RN (695 km <sup>2</sup> ).....	87
<b>Tabela 4.41</b> – Frequência de chuva e recarga no Setor A3 – Bacia Apodi (695 km <sup>2</sup> ).....	88
<b>Tabela 4.42</b> – Probabilidade de ocorrência de chuva e de recarga médias anuais (mm e m <sup>2</sup> /s) do balanço hídrico (1979-2008) no Setor A3 – Bacia do Apodi RN (695 km <sup>2</sup> ).....	90
<b>Tabela 4.43</b> – Probabilidade de recarga anual (m <sup>2</sup> /s) nas 3 subáreas e na área total do Projeto. ....	90
<b>Tabela 4.44</b> – Matriz distância entre os 3 (três) poços do aquífero Açú e o poço observado no Aquífero Jandaíra em Baraúna durante o teste do poço P4.....	96
<b>Tabela 4.45</b> – Valores dos parâmetros característicos do modelo de 1 aquífero e 2 aquíferos no Sistema Aquífero Apodi obtidos dos poços P4 e P2 de Baraúna.....	103
<b>Tabela 4.46</b> - Caracterização da zona de admissão de água dos poços P2 e P4 de Baraúna, no Aquífero Açú, justificando a validade do modelo M1 (Hantush & Jacob,1955).....	104
<b>Tabela 4.47</b> – Matriz das distâncias entre os poços P11, P12 e P12A (sigla CAERN) .....	108
<b>Tabela 4.48</b> – Bomba submersa EBARA BP6 para poços de 6” usada no primeiro teste do aquífero Aquífero Quebradas em Vertentes Santa Cruz ..	113
<b>Tabela 4.49</b> – Parâmetros hidráulicos do aquífero Jandaíra em Furna de Pedra: .....	124
<b>Tabela 4.50</b> – Coordenadas dos pontos onde deverão ser executados poços para instalação de sensores para monitoramento automático de nível, temperatura e condutividade elétrica da água do aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi.....	128
<b>Tabela 4.51</b> – Recarga avaliada por setor de bacia hidrográfica na área do Projeto, a partir do balanço hídrico (1979 – 2008). ....	130
<b>Tabela 4.52</b> – Resultados dos testes de infiltração realizados em campo com infiltrômetro de duplo anel. ....	132

<b>Tabela 4.53</b> – Resultados dos testes de condutividade hidráulica realizados no Laboratório de Mecânica de Solos da Universidade Federal do Ceará. ....	133
<b>Tabela 4.54</b> – Estatística descritiva da taxa de infiltração, da condutividade hidráulica horizontal e vertical e da razão Kv/Kh em m/dia. ....	134
<b>Tabela 4.55</b> – Precipitação média mensal (mm) e percentual do total anual de chuva na área do Projeto Apodi no período de 1979 a 2008. ....	138
<b>Tabela 4.56</b> – Áreas de ocorrência e isópacas do Aquífero Jandaíra por setor de bacia hidrográfica na área de estudo. ....	140
<b>Tabela 4.57</b> – Áreas de ocorrência e isópacas do aquífero Açú por setor de bacia hidrográfica na área de estudo. ....	140
<b>Tabela 4.58</b> – Estatística descritiva das vazões informadas em 2009. ....	143
<b>Tabela 4.59</b> – Intervalos de vazão informada e respectivos valores de porosidade efetiva inferida em cada intervalo. ....	143
<b>Tabela 4.60</b> – Intervalos de zoneamento do índice de carstificação da Formação Jandaíra superior (calcário 1), obtido do estudo geofísico por eletrorresistividade e porosidade efetiva inferida em cada faixa. ....	144
<b>Tabela 4.61</b> – Cálculo das reservas permanentes do Aquífero Jandaíra baseado na porosidade efetiva inferida a partir do zoneamento das vazões informadas e do índice de carstificação, cujos valores se inserem dentro das faixas de vazão informada. ....	148
<b>Tabela 4.62</b> – Reservas por aquífero e por setor de bacia hidrográfica no Estado do Ceará. ....	149
<b>Tabela 4.63</b> – Reservas por aquífero e por setor de bacia hidrográfica no Estado do Rio Grande do Norte. ....	150

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 4.1</b> – Distribuição das fontes potenciais de contaminação cadastradas nas categorias de Fenóis + BTEX, Metais Pesados, Matéria Orgânica e Agrotóxicos. ....	23
<b>Figura 4.2</b> – Produção de água subterrânea do aquífero Açú em Mossoró no período de 1991-2003 (Fonte: CAERN). ....	28
<b>Figura 4.3</b> – Histograma de distribuição de frequência da vazão informada no aquífero Jandaíra, com ajuste de curva lognormal de distribuição de probabilidade. ....	29
<b>Figura 4.4</b> – Histograma de distribuição de frequência da vazão informada no aquífero Açú, com ajuste de curva lognormal de distribuição de probabilidade. ....	30

<b>Figura 4.5</b> – Histograma de frequência da profundidade dos níveis estáticos medidos na rede de monitoramento de 260 poços do aquífero Jandaíra no trimestre agosto-outubro de 2009. ....	32
<b>Figura 4.6</b> – Evolução da profundidade média dos níveis estáticos medidos em 122 poços do aquífero Jandaíra, na região de Baraúna, no período de 2003 a 2007 (Fonte: SEMARH, 2009).....	34
<b>Figura 4.7</b> – Evolução da profundidade dos níveis dinâmicos em 122 poços do aquífero Jandaíra, na região de Baraúna, no período de 2003 a 2005 (Fonte: SEMARH, 2009).....	35
<b>Figura 4.8</b> – Evolução dos níveis estáticos em 17 poços do aquífero Açú em Mossoró, no período de 1991 a 2005 (Fonte: CAERN, 2009).....	36
<b>Figura 4.9</b> - Evolução dos níveis dinâmicos para 20 poços do aquífero Açú em Mossoró, no período de 1991 a 2005 (Fonte: CAERN, 2009).....	37
<b>Figura 4.10</b> – Percentuais de uso e produção de cada uso dos 20 maiores usuários de água subterrânea.....	39
<b>Figura 4.11</b> – Distribuição entre públicos e privados dos 20 maiores proprietários de poços na área de estudo. ....	40
<b>Figura 4.12</b> – Distribuição percentual do número de poços e do percentual de produção, com os respectivos usos para os 20 maiores proprietários de poços. ....	40
<b>Figura 4.13</b> – Distribuição dos pedidos de outorga entre públicos e privados de água superficial nos municípios de Quixeré e Limoeiro do Norte.....	43
<b>Figura 4.14</b> – Distribuição dos pedidos de outorga de água subterrânea entre públicos e privados nos municípios de Quixeré, Limoeiro do Norte, Mossoró e Baraúna.....	44
<b>Figura 4.15</b> – Situação dos pedidos de outorga de água subterrânea em Jaguaruana (COGERH, março 2009). ....	45
<b>Figura 4.16</b> – Usos indicados nos pedidos de outorga de água no município de Jaguaruana – CE (COGERH, março 2009).....	45
<b>Figura 4.17</b> – Tipos de manancial de superfície e subterrâneos dos pedidos de outorga de água no município de Quixeré – CE (COGERH, março 2009).....	46
<b>Figura 4.18</b> – Situação dos pedidos de outorga no município de Quixeré em março de 2009 no município de Quixeré- CE; <b>a)</b> para água superficial; <b>b)</b> para água subterrânea (COGERH, março 2009). ....	47
<b>Figura 4.19</b> – Usos dos pedidos de outorga de água superficial e subterrânea no município de Quixeré – CE (COGERH, março 2009).....	47

<b>Figura 4.20</b> – Vazões outorgadas nos municípios de Baraúna e Mossoró- RN. .....	48
<b>Figura 4.21</b> – Situação dos pedidos de outorga de água nos municípios de Baraúna e Mossoró- RN, até 24 de agosto de 2009. ....	48
<b>Figura 4.22</b> – Outorgas concedidas por tipo de uso da água no município de Mossoró RN, até 24 de agosto de 2009; a) água subterrânea; b) água superficial (SEMARH, 2009).....	49
<b>Figura 4.23</b> – Outorgas concedidas por tipo de uso da água no município de Mossoró- RN, até 24 de agosto de 2009 (SEMARH, 2009).....	50
<b>Figura 4.24</b> – Outorgas concedidas por tipo de uso da água no município de Baraúna RN, até 24 de agosto de 2009 (SEMARH, 2009). ....	50
<b>Figura 4.25</b> – Histograma de profundidade dos poços do aquífero Jandaíra. .	51
<b>Figura 4.26</b> – Histograma de profundidade dos poços do aquífero Açú.....	53
<b>Figura 4.27</b> – Histograma de frequência do índice de concentração de poços por km <sup>2</sup> na área do projeto, com ajuste de lei lognormal.....	54
<b>Figura 9.28</b> – Mapa de distribuição das faixas do índice de concentração de poços em 2009.....	56
<b>Figura 4.29</b> – Mapa de distribuição das Fontes Potenciais de Contaminação.	59
<b>Figura 4.30</b> - Potenciometria do aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi em agosto 2009.....	64
<b>Figura 4.31</b> – Potenciometria do aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi em Janeiro 2010.....	67
<b>Figura 4.32</b> – Histograma de distribuição normal de frequência dos dados interpolados de <b>variação do nível estático</b> $\Delta H$ do aquífero Jandaíra entre agosto 2009 e janeiro de 2010 em escala da área do projeto.....	68
<b>Figura 4.33</b> – Histogramas ilustrativos da distribuição de frequência (assimétrica tipo lognormal) das profundidades dos níveis estáticos na rede de monitoramento de 260 poços no aquífero Jandaíra entre agosto de 2009 e janeiro de 2010.....	69
<b>Figura 4.34</b> – Variação $\Delta H$ de carga hidráulica entre a potenciometria de agosto 2009 e janeiro 2010 na área do projeto.....	70
<b>Figura 4.35</b> – Mapa de distribuição das bacias hidrográficas que controlam a drenagem superficial e subterrânea na área do projeto. ....	72
<b>Figura 4.36</b> .- Polígonos de Thiessen ilustrando a distribuição das áreas de influência dos postos pluviômetros da região sobre a área do Projeto Apodi. .	78

<b>Figura 4.37</b> – Histogramas de frequência da chuva e da recarga anual no <b>Setor A1</b> , com curvas de densidade de probabilidade ajustadas: a) distribuição normal ajustada à chuva média; b) distribuição de Weibull ajustada à recarga média. ....	82
<b>Figura 4.38</b> – Histogramas de frequência da chuva e da recarga anual no <b>Setor A2</b> , com as respectivas curvas de densidade de probabilidade normal ajustadas: a) para a chuva média; b) para a recarga média. ....	86
<b>Figura 4.39</b> – Histogramas de frequência com distribuição normal; a) chuva; b) recarga no <b>Setor A3</b> , bacia do Apodi.....	89
<b>Figura 4.40</b> – Localização dos poços de pesquisa perfurados no aquífero Jandaíra em Sítio Furna de Pedra (Baraúna-RN) e em Sítio Formigueiro (Jaguaruana-CE).....	92
<b>Figura 4.41</b> – Localização dos poços de pesquisa perfurados no aquífero Açú em Vertentes-Santa Cruz. ....	92
<b>Figura 4.42</b> – Distribuição dos poços utilizados no teste hidrodinâmico realizado por superposição de escoamento no aquífero Açú em Baraúna. ....	95
<b>Figura 4.43</b> – Capacidade específica observada com vazão variável no poço P4 de Baraúna, e curva projetada para vazão constante de 148,9 m <sup>3</sup> /h. ....	97
<b>Figura 4.44</b> – Variação da carga potenciométrica do aquífero Açú no poço P2: a) com o bombeamento simultâneo dos poços P3 e P4 (regime operacional vigente); b) com o poço P4 paralisado; c) com o poço P4 novamente ligado. .	98
<b>Figura 4.45</b> – Gráfico da variação da carga de pressão ( $P/\gamma$ ) do aquífero Açú no poço P2, mostrando a resposta desse poço à parada da bomba do poço P4 (situado a 1050 m de distância) após um intervalo de tempo de 4 horas. ....	99
<b>Figura 4.46</b> – Curva observada de variação do rebaixamento no poço P2 de Baraúna exibindo a curva de ajuste da tendência de evolução temporal desse rebaixamento com o funcionamento simultâneo dos poços P3 e P4. ....	99
<b>Figura 4.47</b> – Variação de carga hidráulica do aquífero Jandaíra registrada no poço de observação P2A com oscilações diárias produzidas pelo bombeamento de um poço produtor situado a 23 m de distância, utilizado para irrigação. ....	100
<b>Figura 4.48</b> – Correlação litológica entre os perfis dos poços P4 e P2 do aquífero Açú em Baraúna. ....	101
<b>Figura 4.49</b> – Superposição da curva de tendência de rebaixamento observada no P2 à família de curvas $H(u,\beta)$ do modelo M2 de Hantush (1960) para um aquífero confinado e dois aquíferos. ....	102

<b>Figura 4.50</b> – Superposição da curva de tendência de rebaixamento observada no P2 à família de curvas $W(u, \beta)$ do modelo M1 Hantush & Jacob (1955) para um aquífero confinado e um aquífero adotado.....	104
<b>Figura 9.50</b> – Perfil litológico e construtivo do poço P4 de Baraúna perfurado pela ITAÍ (2001), mostrando que o segundo aquífero (modelo M2) pode ser descartado e adotado o modelo M1.....	106
<b>Figura 4.51</b> – Perfil litológico e construtivo do poço P2 de Baraúna perfurado pela CPRM- Serviço Geológico do Brasil. CPRM 04 MO-15-RN (1979). Perfil litológico descrito pela PLANAT (1979).....	107
<b>Figura 4.52</b> – Localização do sítio de execução do teste do aquífero Açú em Mossoró usando os poços P12A e P12 do Hotel Thermas e incluindo (como superposição de escoamento) o efeito da paralisação de um terceiro poço (P11) localizado a cerca de 700 m ao sul. ....	108
<b>Figura 4.53</b> – Curvas de rebaixamento dos poços P12 e P12A exibindo resposta à paralisação do poço P11 após 10 horas de bombeamento no P12A. ....	109
<b>Figura 4.54</b> – Seção ilustrativa dos poços usados nos testes de aquífero Açú em Vertentes Santa Cruz. Poço bombeado ANA1439 e observados ANA 1438 e ANA 1437.....	111
<b>Figura 4.55</b> – Localização dos poços no teste do aquífero Açú no Sítio Vertentes-Santa Cruz.....	112
<b>Figura 4.56</b> – Distribuição da carga de pressão no poço PO1 (ANA 1437) entre os dias 26/09/09 e 04/10/09, indicando uma oscilação diurna de $\pm 3,36$ cm. ....	114
<b>Figura 4.57</b> - Distribuição da carga de pressão no poço PO3 (poço com lama) entre os dias 26/09/09 e 04/10/09, indicando uma variação de +115 cm na carga hidráulica.....	114
<b>Figura 4.58</b> – Curvas monolog de rebaixamento versus tempo obtidas no segundo e terceiro testes de bombeamento realizados no poço ANA 1439. .	116
<b>Figura 4.59</b> – Registros da carga de pressão no poço ANA 1437 em Vertentes Santa Cruz. ....	117
<b>Figura 4.60</b> – Curva de rebaixamento registrada no poço bombeado P1-FP no sítio Furna de Pedra, em zona cárstica do aquífero Jandaíra.....	118
<b>Figura 4.61</b> - Curva de rebaixamento registrada no poço bombeado P1-FP no sítio Furna de Pedra, em zona cárstica do aquífero Jandaíra.....	119
<b>Figura 4.62</b> – Gráfico de diagnóstico semi-log do poço bombeado P1-FP no teste de aquífero realizado no carst de Furna de Pedra, município de Baraúna – RN.....	120

<b>Figura 4.63</b> – Gráfico de diagnóstico log-log do poço bombeado P1-FP no teste de aquífero realizado no carst de Furna de Pedra, município de Baraúna – RN. ....	121
<b>Figura 4.64</b> – Curva de rebaixamento do poço de observação PO1-FP, a 50 m do poço bombeado no carst de Furna de Pedra (ajuste do modelo de Jacob, 1946). ....	122
<b>Figura 4.65</b> – Gráfico de diagnóstico semi-log do poço observado PO1-FP no teste de aquífero realizado no carst de Furna de Pedra, município de Baraúna – RN. ....	123
<b>Figura 4.66</b> – Gráfico de diagnóstico log-log do poço de observação PO1-FP no teste de aquífero realizado no carst de Furna de Pedra, município de Baraúna – RN. ....	123
<b>Figura 4.67</b> – Curva de rebaixamento do poço de observação PO1-FP, a 50 m do poço bombeado no carst de Furna de Pedra (ajuste do modelo de Theis, 1935). ....	124
<b>Figura 4.68</b> – Mapa de distribuição da rede proposta de monitoramento automático nas zonas de exploração do aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi, definidas em função do balanço de entrada (recarga) menos saída por bombeamento de poços existentes. ....	129
<b>Figura 4.69</b> – Mapa da taxa de infiltração ( $F_c$ de Horton) em m/dia obtida de testes de campo realizados com infiltrômetro de duplo anel na área do Projeto. ....	135
<b>Figura 4.70</b> – Mapa de condutividade hidráulica horizontal ( $K_h$ ) em m/dia obtida através de ensaios no Laboratório de Mecânica de Solos da Universidade Federal do Ceará usando amostras de solo coletadas na área do Projeto nos pontos de medida de infiltração. ....	136
<b>Figura 4.71</b> – Distribuição espacial da condutividade hidráulica vertical ( $K_v$ ) obtida através de ensaios no Laboratório de Mecânica de Solos da Universidade Federal do Ceará usando amostras de solo coletadas na área do Projeto nos pontos de medida de infiltração. ....	137
<b>Figura 4.72</b> – Mapa de isópacas do aquífero Jandaíra .....	141
<b>Figura 4.73</b> – Mapa de isópacas do aquífero Açú .....	142
<b>Figura 4.74</b> – Histograma de frequência do índice de carstificação .....	144
<b>Figura 4.75</b> – Zoneamento das vazões informadas sobre o mapa de feições cársticas para inferir valores da porosidade efetiva. ....	145
<b>Figura 4.76</b> – Zoneamento do índice de carstificação sobre o mapa de feições cársticas para inferência da porosidade efetiva .....	146

# **Apresentação**

Neste terceiro volume do Relatório Final são descritos os serviços correspondentes ao levantamento, confecção e interpretação do cadastro de usuários de água subterrânea bem como à *Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos*, cujo objetivo é o reconhecimento das principais características quantitativas dos recursos hídricos do Sistema Aquífero Apodi, como base para o adequado planejamento do uso desses recursos. Os referidos serviços incluem:

- ✓ **Cadastramento de usuários, pontos de água e potenciais fontes de contaminação:** apresenta e descreve os dados de 1440 poços cadastrados na área de estudo, incluindo localização, características técnicas, situação operacional, regime de funcionamento, infra-estrutura hídrica associada com o poço e fontes potenciais de contaminação.
- ✓ **Tratamento estatístico dos dados cadastrados:** descreve os aspectos ligados à propriedade, situação do funcionamento e produção global dos poços. Trata ainda do regime efetivo de funcionamento e da distribuição das unidades produtoras. São apresentadas por município e por aquífero estatísticas descritivas de profundidade dos poços, vazão informada, e qualidade da água.
- ✓ **Zoneamento do índice de concentração de poços:** foi avaliado por km<sup>2</sup> e tem a sua distribuição espacial apresentada em um mapa ilustrativo.
- ✓ **Eleição da rede de poços para o monitoramento quantitativo:** descreve os critérios usados na seleção da rede de monitoramento que contempla 28 poços no aquífero Açú e 260 poços no aquífero Jandaíra, para monitoramento dos níveis de água.
- ✓ **Nivelamento dos pontos d'água selecionados:** descreve a situação do nivelamento da rede de poços de monitoramento quantitativo até 29 de setembro de 2009.
- ✓ **Eleição da rede de poços para o monitoramento qualitativo:** aborda os critérios usados na escolha da rede de 100 poços para o monitoramento de qualidade de água, da forma mais abrangente possível em termos de distribuição espacial e tendo em conta as potenciais fontes de contaminação de captações identificadas na área de estudo.
- ✓ **Campanhas de medição dos níveis de água:** trata das medições levadas a efeito numa rede de 260 pontos de água no aquífero Jandaíra. A rede 40 poços de observação de níveis de água programada para o aquífero Açú, não foi implantada pela PETROBRÁS, como previsto nos Termos de Referência, razão pela qual as observações ficaram restritas ao aquífero Jandaíra. A primeira campanha aconteceu no período de 15 de julho a 15 de outubro, durante a fase em que ainda estavam sendo instalados os tubos guia para acesso dos medidores. A segunda campanha foi desenvolvida no período de 15 de janeiro a 30 de janeiro de 2010.
- ✓ **Elaboração de mapas potenciométricos:** são apresentados os mapas potenciométricos do aquífero Jandaíra elaborados a partir dos dados medidos nas duas campanhas acima referidas.

- ✓ **Balanço hídrico:** apresenta resultados de balanços hídricos realizados com dados mensais e dados diários para a zona oeste da bacia Potiguar e balanço hídrico para a área de estudo, com dados pluviométricos disponíveis no período dos 30 anos mais recentes.
- ✓ **Execução de testes de aquífero:** descreve os testes de aquífero realizados, que foram 4 (quatro) no aquífero Açú e um no aquífero Jandaíra.
- ✓ **Interpretação dos resultados dos testes de aquífero e avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos:** os resultados de dois testes efetuados no aquífero Açú confinado foram interpretados pelos métodos de Hantush & Jacob (1955) e Hantush (1960) que contemplam sistemas aquíferos semiconfinados com um e dois aquíferos, respectivamente. Dois outros testes foram realizados no aquífero Aquífero Quebradas, na zona de afloramento, no Sítio Vertentes Santa Cruz, cerca de 3 km a SE da cidade de Quixeré, no Ceará. A interpretação, conduzida pelo método de Jacob (1946), somente permitiu avaliar parâmetros físicos de transporte, isto é, condutividade hidráulica e transmissividade, pois nenhuma reação foi registrada nos poços de observação. O teste no aquífero Jandaíra, realizado em Furna de Pedra, cerca de 6 km ao norte de Baraúna, foi também interpretado pelo método de Jacob (1946). Nos testes do aquífero Açú semiconfinado e no teste do aquífero Jandaíra, foi possível estimar a difusividade hidráulica, que inclui os parâmetros hidráulicos fundamentais de transporte e de armazenamento.
- ✓ **Elaboração de modelos conceituais:** o modelo existente, numérico regional de 3 (três) camadas (MODFLOW 2000) da zona oeste da Bacia Potiguar, com área de 13000 km<sup>2</sup> (Manoel Filho *et al.* 2003), pode ser usado como base para o desenvolvimento de um modelo local correspondente à área do Projeto Apodi (2585 km<sup>2</sup>).
- ✓ **Aplicação de modelos computacionais:** a aplicação de modelos de fluxo foi inicialmente imaginada para avaliar rebaixamentos máximos permissíveis (**RMP**) em zonas de exploração do aquífero (**ZEA**). Porém, como se verá adiante, ao invés de um **RMP** decidiu-se prever uma **VMP** (**vazão máxima permissível**) avaliada através de um balanço de entrada-saída em cada **ZEA**.
- ✓ **Avaliação da recarga:** a avaliação da recarga potencial foi feita a partir da execução de medições diretas de infiltração numa rede de 40 pontos, conforme previsto nos termos de referência. Além disso, outras estimativas foram feitas a partir do balanço hídrico setorial, com diferentes probabilidades, nos três setores de bacias hidrográficas existentes na área do projeto.
- ✓ **Avaliação de reservas, potencialidades e disponibilidades:** essas avaliações foram feitas para a Área do Projeto, usando metodologia sugerida pela CTAF e que consiste em um zoneamento baseado no cruzamento de diferentes “layers”. Como subsídio para a Gestão Compartilhada, essas avaliações foram segmentadas por aquífero e por Estado, usando os mapas de isópacas dos aquíferos, vazões informadas, índice de carstificação e estruturas cársticas.

## **4 – CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DOS AQUÍFEROS**

#### 4.1 – Cadastro de usuários e de fontes potenciais de contaminação

O cadastro de usuários de água subterrânea envolveu o levantamento de 1440 poços, dentre os quais se encontram 1325 tubulares (92%); 63 amazonas (também chamados escavados ou cacimbas) representando 4,4% dos poços e finalmente, 52 poços mistos (poço tubular perfurado no interior de um poço amazonas) constituindo 3,6% das unidades levantadas.

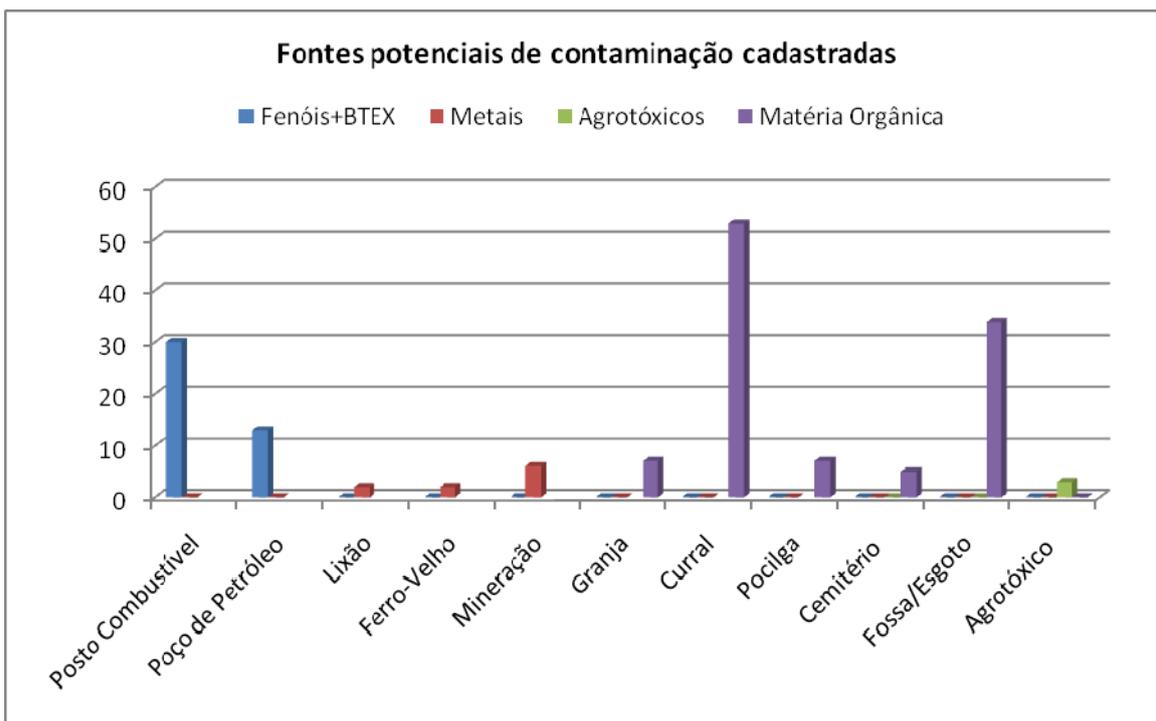
Como fontes potenciais de contaminação foram cadastrados 30 (trinta) postos de combustível, 12 (doze) poços de petróleo e uma Estação Coletora de Campo de Petróleo (Campo do Pajeú), 5 (cinco) cemitérios, 2 (dois) lixões a céu aberto (Baraúna e Quixeré), 2 (dois) ferros-velhos; 2 (duas) usinas de reciclagem e 106 (cento e seis) fontes de matéria orgânica (granjas, pocilgas, currais, fossas e efluentes de esgotos domésticos) e ainda 3 (três) depósitos de adubos e defensivos agrícolas.

Portanto, para as 4 (quatro) categorias de contaminantes ilustradas na **figura 4.1**, foram identificados: i) 43 pontos passíveis de contaminação por Fenóis e BTEX; ii) 10 (dez) pontos por metais pesados; iii) 3 (três) pontos por agroquímicos; iv) 106 pontos por matéria orgânica. Maiores detalhes sobre essas fontes serão apresentados no estudo de vulnerabilidade e risco potencial de contaminação dos aquíferos da área de estudo.

Com o objetivo de caracterizar a situação atual da exploração de água subterrânea e de avaliar a vulnerabilidade e os riscos de contaminação dos aquíferos em decorrência das intensas atividades antrópicas (urbanização, mineração, agricultura irrigada) praticadas na área de estudo, foi realizado um recenseamento dos poços existentes.

A ficha utilizada no levantamento das informações de campo segue o modelo sugerido nos Termos de Referência, conforme o padrão adotado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil para o CADASTRO DA INFRA-ESTRUTURA HÍDRICA DO NORDESTE (**anexo A4.1**).

As informações encontram-se **sistematizadas em uma base de dados ACCESS** (.mdb) que inclui os cadastros de usuários e de fontes de contaminação, a qual é fornecida com um instalador e apenas em meio digital, conforme acordado com a CTAF, não constando, portanto, do **ANEXO II** do Relatório Final. O Instalador é uma interface mais fácil para visualizar consultas pré-elaboradas. Ele funciona em sistemas de 32 e 64 bits. Além disso tem compatibilidade com o Office 2003, 2007 e 2010 (.mdb).



**Figura 4.1** – Distribuição das fontes potenciais de contaminação cadastradas nas categorias de Fenóis + BTEX, Metais Pesados, Matéria Orgânica e Agrotóxicos.

## 4.2 – Tratamento Estatístico dos Dados

### 4.2.1 – Propriedade do terreno e número de poços em operação

**Distribuição global:** para fins comparativos a distribuição dos poços cadastrados quanto à propriedade do terreno e quanto à situação operacional, nos anos de 2002 e 2009, são mostradas na **tabela 4.1**. Observa-se que, em 7 (sete) anos, houve um aumento de 70% no número de poços existentes, que passou de 846 para 1440. Aumento ainda mais significativo (cerca de 88%) ocorreu na participação do setor privado na propriedade dos poços, que passou de 634 em 2002 para 1195 em 2009.

**Tabela 4.1** – Distribuição global dos poços cadastrados quanto à propriedade do terreno em setembro de 2002 e em setembro de 2009.

Ano	Poços Existentes			Operação	Não Instalados	Paralisados	Abandonados ou desativados
	% Públicos	% Privados	Na área	%	%	%	%
set/02	25	75	846	56	11	17	16
set/09	16	84	1440	67	10	12	11

A exploração de água subterrânea na área registrou um acréscimo de 7% no número de poços em operação, cujo percentual passou de 56% em 2002 (473 poços) para 63% em 2009 (908 poços). Ao mesmo tempo ocorreu uma redução no percentual de poços abandonados ou desativados, que passou de 16% para 11%.

**Distribuição por aquífero:** a distribuição, por aquífero, quanto à propriedade do terreno e situação operacional é mostrada na **tabela 1.2**. De 40 poços cadastrados no aquífero Açú 57% (23 poços) foram construídos em terrenos públicos e 43% (17 poços) em propriedades privadas. No aquífero Jandaíra, dentre 1398 poços cadastrados, 84% (1174 poços) se encontram em terrenos particulares e 16% (224 poços) em terrenos públicos.

Quanto à situação operacional, foram identificados em funcionamento no aquífero Jandaíra somente 56% dos poços contra 46% no aquífero Açú. O índice de poços desativados (abandonados) chega a 16% no aquífero Jandaíra e 20% no aquífero Açú.

**Tabela 4.2** – Distribuição por aquífero dos poços cadastrados quanto à propriedade do terreno em 2009.

Aquífero	Poços Existentes			Operação	Não Instalados	Paralisados%	Abandonados ou desativados
	Públicos	Privados	Na área				
Jandaíra	25% (350)	75 % (1048)	100% (1398)	56% (783)	11% (154)	17 % (237)	16% (224)
Açú	57% (23)	43% (17)	100% (40)	46% (18)	9% (4)	25 % (10)	20% (8)
Aluvião		100% (2)	100% (2)	100 % (2)			

#### 4.2.2 – Regime efetivo de funcionamento dos poços

O número de horas por dia de funcionamento dos poços (regime de bombeamento) informado em 630 poços (44% dos 1440 cadastrados) varia de 1 a 24 horas/dia, como pode ser visto na **tabela 4.3**, na qual também se observa que o regime operacional mais frequente (para 19,8% dos poços) corresponde a 12 horas/dia.

Portanto, para fins de estimativa da produção de água subterrânea na região, o regime operacional adotado é de 11 horas/dia, uma vez que o valor da média ponderada é de 11,26 horas/dia.

#### 4.2.3 – Disponibilidade instalada

Teoricamente a *disponibilidade instalada* é a produção global supondo todos os poços existentes em operação em regime de 24 horas/dia. Com os dados atuais (**tabela 4.4**) essa capacidade, para os 1440 poços, seria da ordem de 26 m<sup>3</sup>/s, equivalente a uma lâmina de 314,4 mm/ano sobre os 2608 km<sup>2</sup> da área do projeto.

## 4.2.4 – Produção de água subterrânea

### 4.2.4.1 – Produção global

A **produção global** de água subterrânea inferida com base nas vazões informadas e no regime médio de funcionamento dos poços é mostrada na **tabela 4.4**. Levando em conta as frequências das diferentes faixas de vazão dos poços, chega-se à conclusão de que a *disponibilidade efetiva* atual oriunda dos poços existentes em operação é de 7,71 m<sup>3</sup>/s (666144 m<sup>3</sup>/d), ou seja, essa é a descarga que se acha atualmente em uso proveniente de todos os poços existentes captando o sistema aquífero Apodi.

**Tabela 4.3** – Regime de funcionamento informado para 630 dos 1440 poços cadastrados na área de estudo (setembro 2009).

Intervalo j do regime (h/dia)	Número de poços (n <sub>j</sub> )	Peso (w <sub>j</sub> = n <sub>j</sub> /N)	Produto (R <sub>e</sub> *w <sub>j</sub> )
0<R <sub>e</sub> ≤1	60	0,095238	0,10
1<R <sub>e</sub> ≤2	27	0,042857	0,09
2<R <sub>e</sub> ≤3	23	0,036508	0,11
3<R <sub>e</sub> ≤4	24	0,038095	0,15
4<R <sub>e</sub> ≤5	28	0,044444	0,22
5<R <sub>e</sub> ≤6	23	0,036508	0,22
6<R <sub>e</sub> ≤7	5	0,007937	0,06
7<R <sub>e</sub> ≤8	62	0,098413	0,79
8<R <sub>e</sub> ≤9	14	0,022222	0,20
9<R <sub>e</sub> ≤10	51	0,080952	0,81
10<R <sub>e</sub> ≤11	3	0,004762	0,05
11<R <sub>e</sub> ≤12	124	0,196825	2,36
12<R <sub>e</sub> ≤13	1	0,001587	0,02
13<R <sub>e</sub> ≤14	5	0,007937	0,11
14<R <sub>e</sub> ≤15	13	0,020635	0,31
15<R <sub>e</sub> ≤16	9	0,014286	0,23
16<R <sub>e</sub> ≤17	6	0,009524	0,16
17<R <sub>e</sub> ≤18	16	0,025397	0,46
18<R <sub>e</sub> ≤19	3	0,004762	0,09
19<R <sub>e</sub> ≤20	52	0,08254	1,65
20<R <sub>e</sub> ≤21	1	0,001587	0,03
21<R <sub>e</sub> ≤22	2	0,003175	0,07
22<R <sub>e</sub> ≤24	78	0,12381	2,97
<b>Soma</b>	<b>630</b>	<b>1</b>	<b>11,26</b>

N = número total de poços da amostra.=630

R<sub>e</sub>= regime de bombeamento informado em horas por dia.

n<sub>j</sub> = frequência absoluta ou número de poços no intervalo de classe.

w<sub>j</sub> = n<sub>j</sub>/N = fator de ponderação determinado pela frequência do regime de bombeamento.

Na **tabela 4.3** o regime médio de funcionamento dos poços, ponderado pela frequência do número de horas de bombeamento, nos  $j$  intervalos de classe, é dado pela expressão:

$$\bar{R}_e = \sum_{j=1}^{23} R_{ej} \times w_j$$

**Tabela 4.4** - Produção global de água inferida para os poços cadastrados na área de estudo (setembro 2009) e situação do funcionamento (em regime médio de 11 horas/dia) com base em dados informados de 536 poços.

Produção global estimada para 2009					
$a < Q \leq b$ m <sup>3</sup> /h	FA	FR	np09	Q m <sup>3</sup> /d	Q m <sup>3</sup> /s
0 < Q ≤ 1	10	0,01865672	26	287	0,003322
1 < Q ≤ 3	21	0,0391791	55	1810	0,020949
3 < Q ≤ 5	31	0,05783582	81	4453	0,051539
5 < Q ≤ 10	39	0,07276119	102	11205	0,129688
10 < Q ≤ 20	33	0,06156716	86	18963	0,219479
20 < Q ≤ 50	92	0,17164179	240	132164	1,529676
50 < Q ≤ 80	171	0,31902985	447	393045	4,549132
80 < Q ≤ 100	88	0,1641791	230	252836	2,926343
100 < Q ≤ 150	38	0,07089552	99	163769	1,895475
150 < Q ≤ 200	10	0,01865672	26	57463	0,665081
200 < Q ≤ 250	3	0,00559701	8	21549	0,24941
	<b>536</b>		<b>1400</b>	<b>1057543</b>	<b>12,24008</b>
Distribuição da produção global com a situação operacional informada					
Poços	Existentes	Operando	Não Instalados	Paralisados	Abandonados
Número	1400	<b>938</b>	140	<b>168</b>	<b>154</b>
Percentual	100	<b>67</b>	10	<b>12</b>	<b>11</b>
Vazão m <sup>3</sup> /s	<b>12,24</b>	<b>8,20</b>	<b>1,22</b>	<b>1,47</b>	<b>1,35</b>

$a < Q \leq b$  intervalo de classe da vazão em metros cúbicos por hora

FA – frequência absoluta (número de poços com vazão menor ou igual à indicada no intervalo de classe)

FR – frequência relativa (FA/536)

np09 = 1400\*FR = número de poços estimado para 2009, com vazão no intervalo de classe correspondente ao dos dados informados

Q (m<sup>3</sup>/d) = vazão em metros cúbicos por dia

Q (m<sup>3</sup>/s) = vazão em metros cúbicos por segundo.

Assim sendo, a produção global de água e o regime operacional para os 1400 poços cadastrados são estimados a partir dos dados obtidos em campo na amostra de 536 poços, levando em conta as frequências de vazão e a situação operacional informada.

#### 4.2.4.2 – Produção de água no aquífero Jandaíra

A **produção de água** estimada no aquífero Jandaíra para o ano de 2009 é apresentada na **tabela 4.5**, tomando como referência as vazões informadas no cadastro de 1398 poços.

**Tabela 4.5** – Produção de água subterrânea por aquífero na área do Projeto, estimada para o ano de 2009.

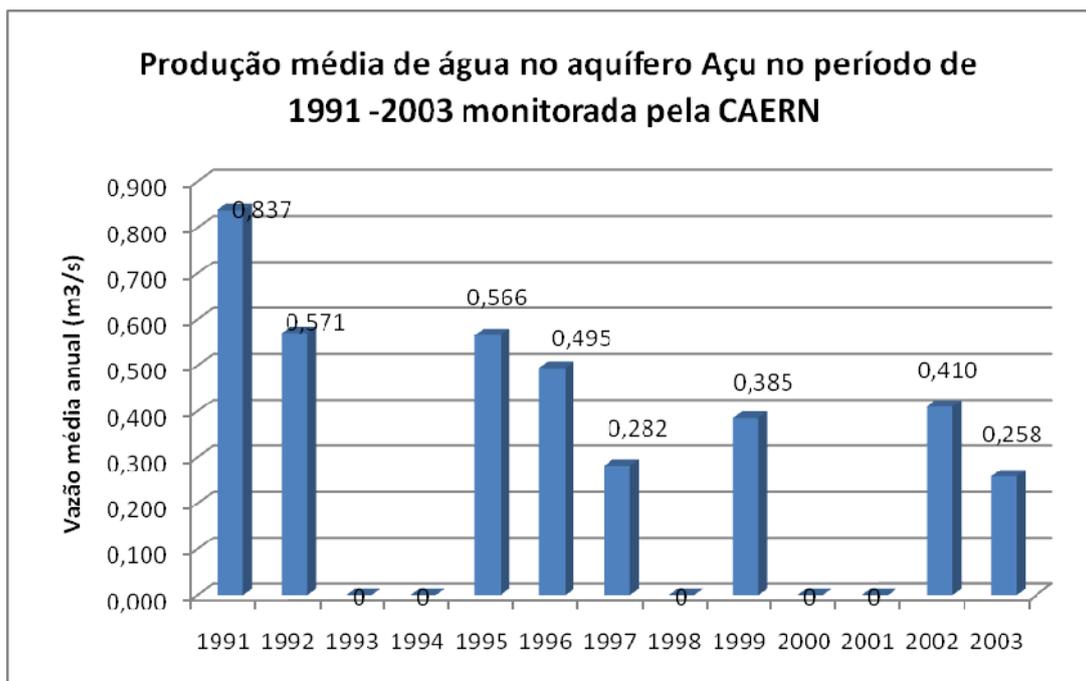
Produção Estimada por Aquífero para 2009		Existentes	Operação	Não Instalados	Paralisados	Abandonados ou desativados
Jandaíra	Porcentagem	(100)	(56)	(11)	(17)	(16)
	Número de poços	1398	783	154	237	234
	<b>Produção m<sup>3</sup>/s</b>	<b>11,82</b>	<b>6,62</b>	<b>1,30</b>	<b>2,01</b>	<b>1,89</b>
Açu	Porcentagem	(100)	(46)	(9)	(25)	(20)
	Número de poços	40	18	4	10	8
	<b>Produção m<sup>3</sup>/s</b>	<b>0,42</b>	<b>0,19</b>	<b>0,04</b>	<b>0,11</b>	<b>0,08</b>

De acordo com as estimativas de produção de água subterrânea para 2009 apresentadas na **tabela 4.5**, a previsão de 6,62 m<sup>3</sup>/s (80,0 mm/ano) no aquífero Jandaíra considerando 783 poços em operação corresponde a uma vazão média de 8,45 l/s ou 30,44 m<sup>3</sup>/h por poço, em regime de 11 horas/dia. Já no aquífero Açu, a produção de 0,42 m<sup>3</sup>/s para 18 poços em operação corresponde a uma vazão média de 23,3 l/s ou 84 m<sup>3</sup>/h por poço, em regime contínuo de bombeamento.

#### 4.2.4.3 – Produção de água no aquífero Açu

A evolução histórica da produção no Aquífero Açu (expressa em termos de médias anuais em m<sup>3</sup>/s), segundo registros da CAERN no período de 1991 – 2003 é mostrada na **figura 4.2**.

Faltam registros nos anos de 1993, 1994, 1998, 2000 e 2001. No período considerado houve uma redução significativa na produção de água, que passou de 0,837 m<sup>3</sup>/s para 0,258 m<sup>3</sup>/s. Essa redução ocorreu pelo fato da CAERN ter abandonado ou desativado 10 poços depois da chegada de água proveniente da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, sendo 5 (cinco) devido a problemas de contaminação por hidrocarbonetos e 5 (cinco) por dificuldades operacionais produzidas por obstruções de tubulações causadas por incrustações de carbonato de cálcio.



**Figura 4.2** – Produção de água subterrânea do aquífero Açú em Mossoró no período de 1991-2003 (Fonte: CAERN).

A produção de água subterrânea estimada do Açú para 2009 em Mossoró é de 0,385 m<sup>3</sup>/s obtida de 11 poços existentes em operação. Somando-se 0,031 m<sup>3</sup>/s de 2 (dois) poços operantes em Baraúna, chega-se a uma estimativa de 0,416 m<sup>3</sup>/s para o aquífero Açú na região.

Atualmente a CAERN enfrenta problemas de falta água em Mossoró e não parece haver uma política bem definida de investimento prevista para ampliação do sistema através de novos poços, posto que já se encontra na ordem do dia um novo projeto de adução de água superficial, desta vez do Açude Santa Cruz, localizado 10 km ao sul de Apodi e cerca de 90 km de Mossoró.

#### 4.2.4.4 – Vazão informada

**Aquífero Jandaíra:** com base nas vazões informadas e respectivo regime de funcionamento em horas/dia, foram estimadas as produções diárias numa amostra de 1332 poços cadastrados. A estatística descritiva dessas informações é apresentada na **tabela 4.6**.

A vazão média informada é de 822,9 m<sup>3</sup>/dia, variando no intervalo de 24 m<sup>3</sup>/dia (1 m<sup>3</sup>/h) a 4180 m<sup>3</sup>/dia, (174 m<sup>3</sup>/h). O intervalo de confiança de 95% da média fica aproximadamente entre 800 m<sup>3</sup>/dia e 850 m<sup>3</sup>/dia.

Embora o coeficiente de variação de 0,53 (razão do desvio padrão de 438,7 contra a média de 822,9), não pareça muito alto, a dispersão dos valores é significativa. Isto porque além do desvio padrão elevado, também se nota que a faixa de variação dos valores pode ser considerada muito alta, na medida em que oscilam entre um mínimo de 24 m<sup>3</sup>/dia e um máximo de 4180 m<sup>3</sup>/dia. Em face do grande tamanho da amostra, dificilmente se poderia compreender a importância da sua dispersão com base apenas no coeficiente de variação e na comparação da média com a mediana.

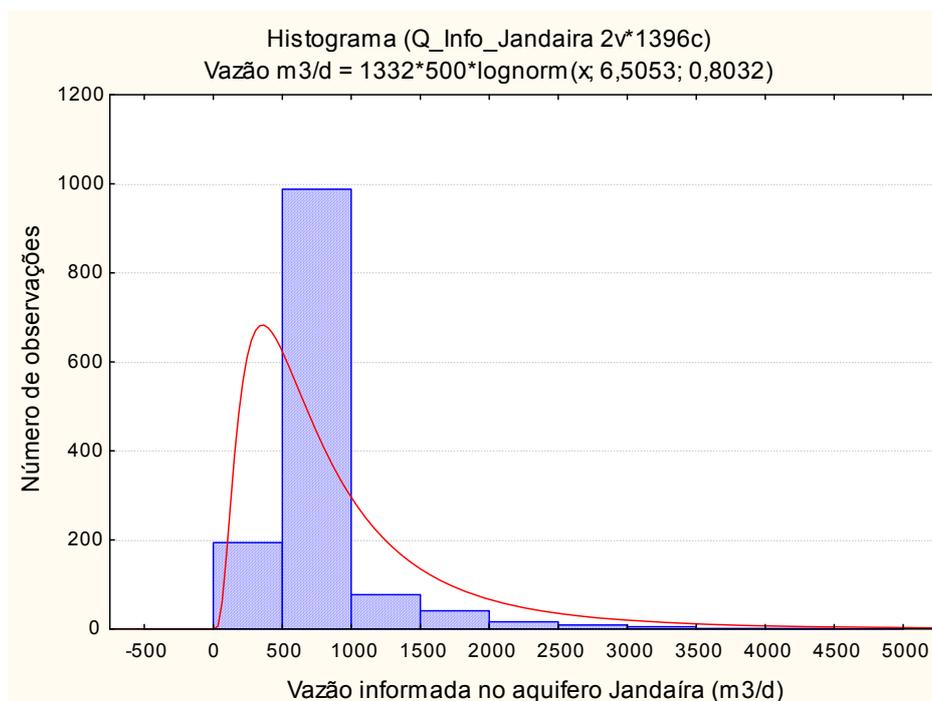
**Tabela 4.6** – Estatística descritiva da vazão informada no aquífero Jandaíra.

N-1	Média	Confiança da média		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro Padrão	Assimetria
		-95%	+95%						
1332	822,9	799,4	846,5	832,0	24	4180	438,7	12	1,9

A distribuição de frequência (**tabela 4.7**) mostra que quase 90% dos valores da vazão informada é menor ou igual a 1000 m<sup>3</sup>/dia. Esta maior frequência de baixos valores caracteriza uma assimetria positiva que pode ser observada no histograma da **figura 4.3** no qual foi feito um ajuste de curva lognormal, que embora não seja perfeito é certamente o mais provável modelo de distribuição de probabilidade da amostra analisada (curva vermelha), conforme comentado no início do presente item.

**Tabela 4.7** – Frequência da vazão informada no aquífero Jandaíra.

Intervalo de Classe	Frequência absoluta	Frequência relativa	Frequência acumulada	% Acumulado
0<Qinf<=500	197	0,1479	197	14,79
500<Qinf<=1000	990	0,7432	1187	89,11
1000<Qinf<=1500	78	0,0586	1265	94,97
1500<Qinf<=2000	41	0,0308	1306	98,05
2000<Qinf<=2500	10	0,0075	1316	98,80
2500<Qinf<=3000	12	0,0090	1328	99,70
3000<Qinf<=3500	2	0,0015	1330	99,85
3500<Qinf<=4000	1	0,0008	1331	99,92
4000<Qinf<=4500	1	0,0008	1332	100,00



**Figura 4.3** – Histograma de distribuição de frequência da vazão informada no aquífero Jandaíra, com ajuste de curva lognormal de distribuição de probabilidade.

**Aquífero Açú:** para uma amostra de apenas 18 valores é apresentada a estatística descritiva da vazão diária informada dos poços existentes em operação, cadastrados no aquífero Açú (**tabela 4.8**). A média é de 1476 m<sup>3</sup>/dia com mediana de apenas 1050 m<sup>3</sup>/dia. O coeficiente de variação é igual a 0,87 e o intervalo de confiança de 95% para a média oscila entre 837 m<sup>3</sup>/dia e 2115 m<sup>3</sup>/dia. A grande dispersão, revelada pelo desvio padrão de 1284 m<sup>3</sup>/dia e o elevado erro padrão (302 m<sup>3</sup>/dia) se devem ao pequeno tamanho da amostra.

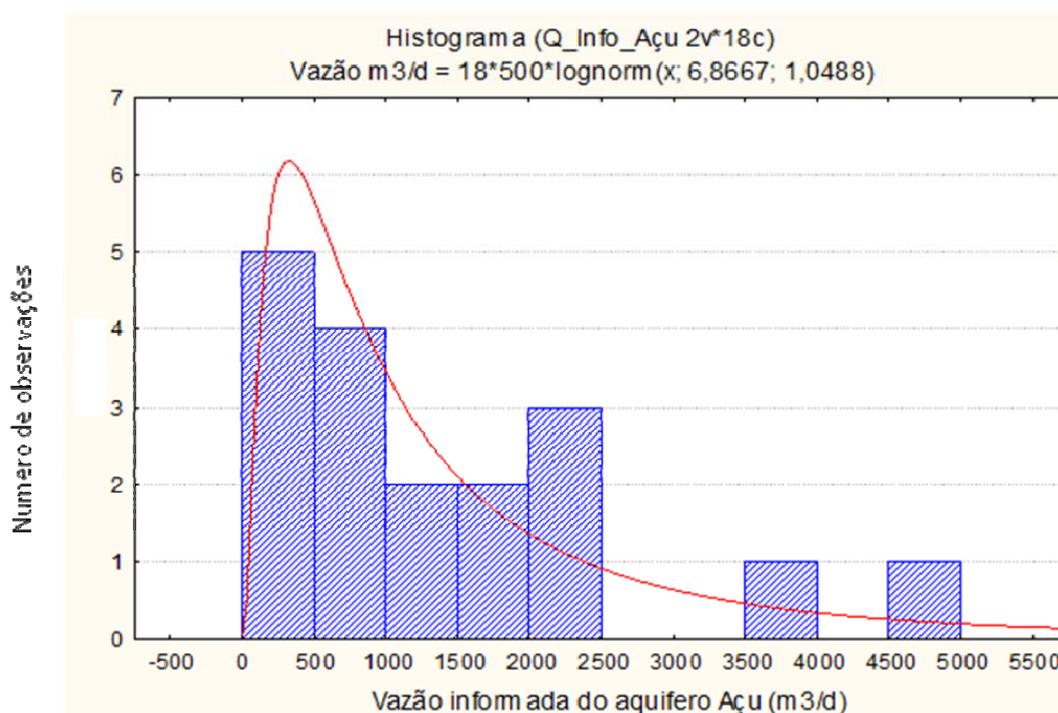
**Tabela 4.8** – Estatística descritiva da vazão informada no aquífero Açú.

N-1	Média	Confiança da média		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro Padrão	Assimetria
		-95%	+95%						
18	1476	837	2115	1050	150	4400	1284	302	1,2

A distribuição de frequência (**tabela 4.9**) e o respectivo histograma (**figura 4.4**) permitem inferir para a distribuição de probabilidade uma lei lognormal. Ressalta-se, no entanto, que inferências baseadas em amostras muito pequenas estão sujeitas a grandes incertezas.

**Tabela 4.9** – Frequência da vazão informada no aquífero Açú.

Intervalo de Classe	Frequência absoluta	Frequência relativa	Frequência acumulada	% Acumulado
0,00<Qinf<=1000	9	0,5000	9	50,00
1000<Qinf<=2000	4	0,2222	13	72,22
2000<Qinf<=3000	3	0,1667	16	88,89
3000<Qinf<=4000	1	0,0556	17	94,44
4000<Qinf<=5000	1	0,0556	18	100,00



**Figura 4.4** – Histograma de distribuição de frequência da vazão informada no aquífero Açú, com ajuste de curva lognormal de distribuição de probabilidade.

## 4.2.5 – Variação dos Níveis de Água

### 4.2.5.1 – Níveis no Aquífero Jandaíra

A ocorrência de chuvas na região, responsável pela paralisação das atividades nas fazendas até meados de julho, dificultou bastante a instalação de tubos guia para acesso aos níveis dos poços. Daí porque, na prática, a primeira campanha de medições de nível acabou se desenvolvendo entre meados de julho e meados de outubro de 2009 ou aproximadamente, entre 15 de julho e 15 de outubro, podendo ser associada com o trimestre agosto-outubro.

A estatística descritiva das medições de níveis estáticos do aquífero Jandaíra, realizadas na primeira campanha (**tabela 4.10**) indica uma profundidade média de 15,27 m e uma mediana de apenas 9,38 m. Os níveis variam entre 0,33 m e um máximo de 118 m, sendo esse último valor considerado anômalo muito provavelmente influenciado por bombeamentos.

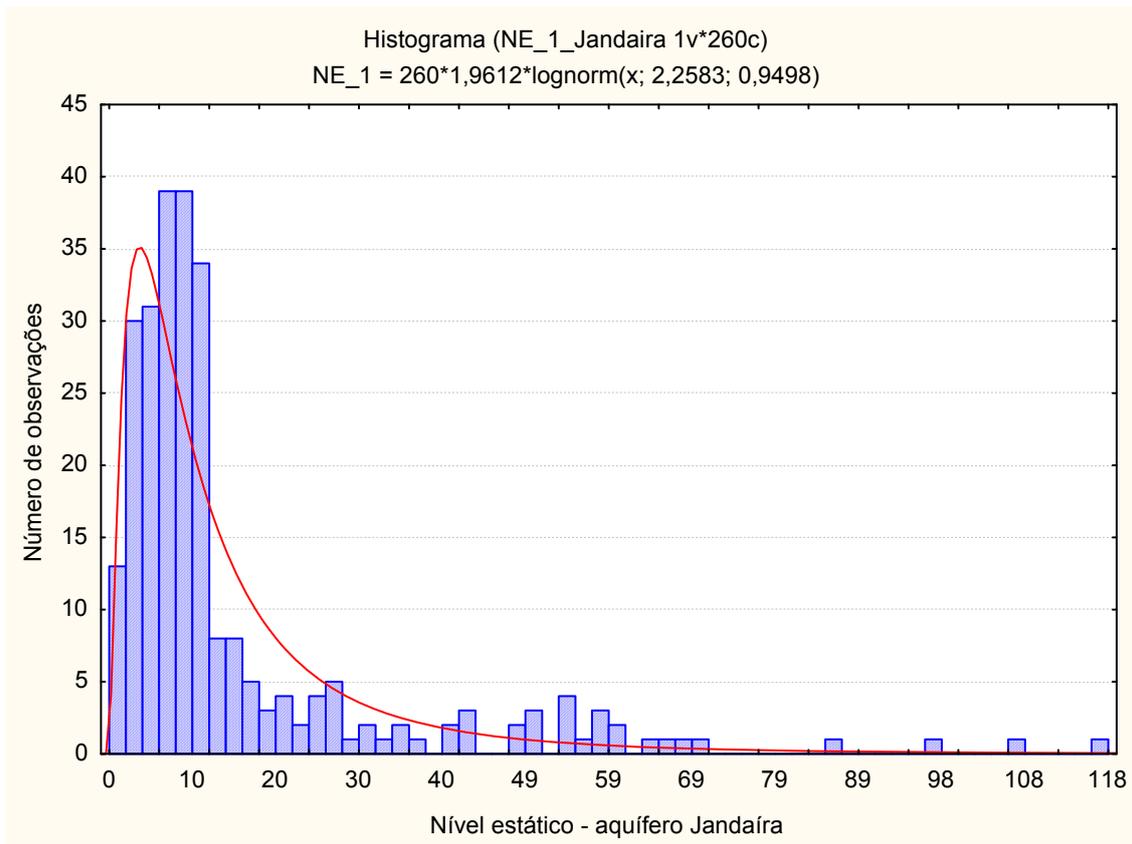
**Tabela 4.10** – Estatística descritiva da profundidade do nível estático do aquífero Jandaíra no trimestre agosto-outubro de 2009 em 260 poços da rede de monitoramento.

N Válidos	Média	Confiança da média		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro Padrão	Assimetria
		-95%	+95%						
260	15,27	13,05	17,50	9,38	0,33	118,00	18,25	1,13	2,74

A **tabela 4.11** dos intervalos de classe de frequência revela que 80,77% dos níveis são inferiores ou iguais a 20 m, havendo apenas 2% dos poços com níveis de água superiores a 70 m.

O histograma de distribuição de frequência desses níveis (**figura 4.5**), exibe uma assimetria positiva que sugere, como modelo de distribuição de probabilidade, uma lei lognormal. Essa lei revela que a profundidade do nível estático, com 50% de probabilidade é de 9,57 m. Permite ainda verificar que 5% dos poços possuem níveis estáticos inferiores a 2,01 m e 20% possuem níveis estáticos inferiores a 4,30 m. Em outras palavras: os níveis estáticos dos poços, com 95% de probabilidade, são superiores a 2,01 m e com 80% de probabilidade são maiores do que 4.30 m. Esses valores, para o trimestre agosto-outubro de 2009, se explicam pela ocorrência de chuvas bem acima da média nos anos de 2008 e 2009.

Os dados históricos disponíveis mostram a variação dos **níveis estáticos** do aquífero Jandaíra no período de 2003 a 2007, conforme monitoramento efetuado pela SEMARH (**figura 4.6**). Os registros correspondem à profundidade média dos níveis de 122 poços na região de Baraúna (28 poços em Velame; 31 em Sumidouro/Mato Alto/Catingueira; 38 em Três Veredas/Boa Água; 25 em Mata Burro/Toca da Raposa/Lagedo do Ouro). Em virtude das explorações realizadas, esses poços chegaram a apresentar uma variação média de 20 m no período de 1 (um) ano (passando de 45 m em dezembro de 2003 para 25 m em dezembro de 2004). Em janeiro de 2003 a profundidade média dos **níveis dinâmicos** (**figura 4.7**) era de 53 m e em janeiro de 2005, dois anos depois, era de 28,5 m.



Prob( $x \geq a$ )	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
Nível estático	9,57	4,30	2,38	2,00	1,36	1,05

**Figura 4.5** – Histograma de frequência da profundidade dos níveis estáticos medidos na rede de monitoramento de 260 poços do aquífero Jandaíra no trimestre agosto-outubro de 2009.

#### 4.2.5.2 – Níveis no Aquífero Açú

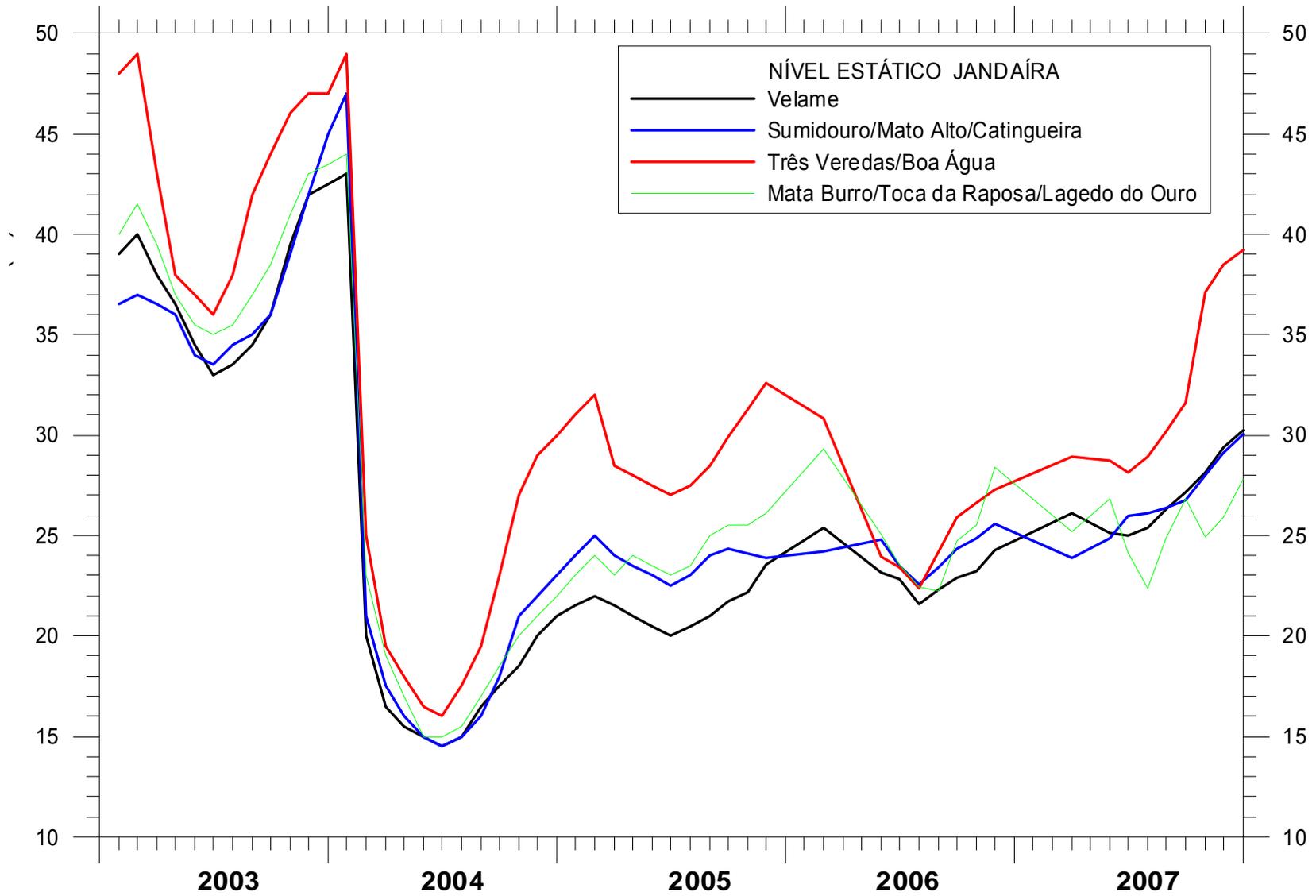
No que se refere à evolução dos níveis de água do aquífero Açú em Mossoró, no período de 15 anos compreendido entre 1991 e 2005, os dados históricos da CAERN dão conta de que os *níveis estáticos* (**figura 4.8**) para 17 poços em operação, apresentaram um rebaixamento médio de 55 m, já que passaram de 75 m para 130 m. De fato, em 1991, esses níveis situavam-se numa faixa de profundidades compreendida entre 60 m e 90 m, enquanto que em 2005 essa faixa passou para o intervalo de 110 m a 150 m.

No mesmo período, os *níveis dinâmicos* para 20 poços em operação, que oscilavam entre 65 m e 135 m, com média de 100 m, em 1991 (**figura 4.9**), passaram a oscilar entre 110 m e 200 m, com uma média de 155 m em 2005, configurando, portanto, um rebaixamento de 55 m em 15 anos.

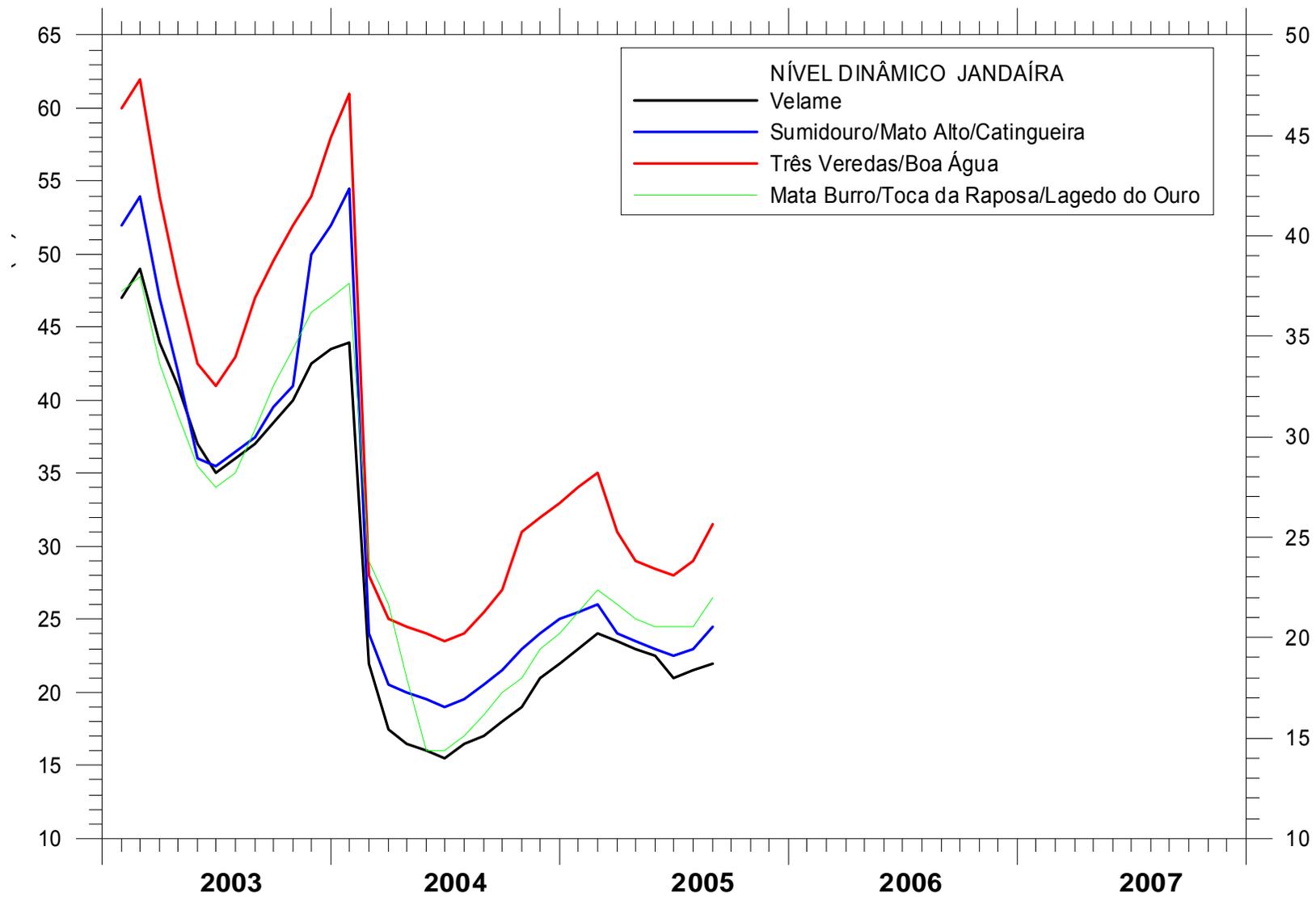
Como se nota, tanto os dados de níveis estáticos quanto os de níveis dinâmicos do aquífero Açú em Mossoró configuram um *rebaixamento médio de 55 m* na superfície potenciométrica desse aquífero entre 1991 e 2005. Esse rebaixamento ocorreu em consequência dos bombeamentos praticados nos poços destinados ao abastecimento de água de Mossoró.

**Tabela 4.11-** Tabela dos intervalos de classe de profundidade dos níveis estáticos do aquífero Jandaíra no período de agosto-outubro 2009.

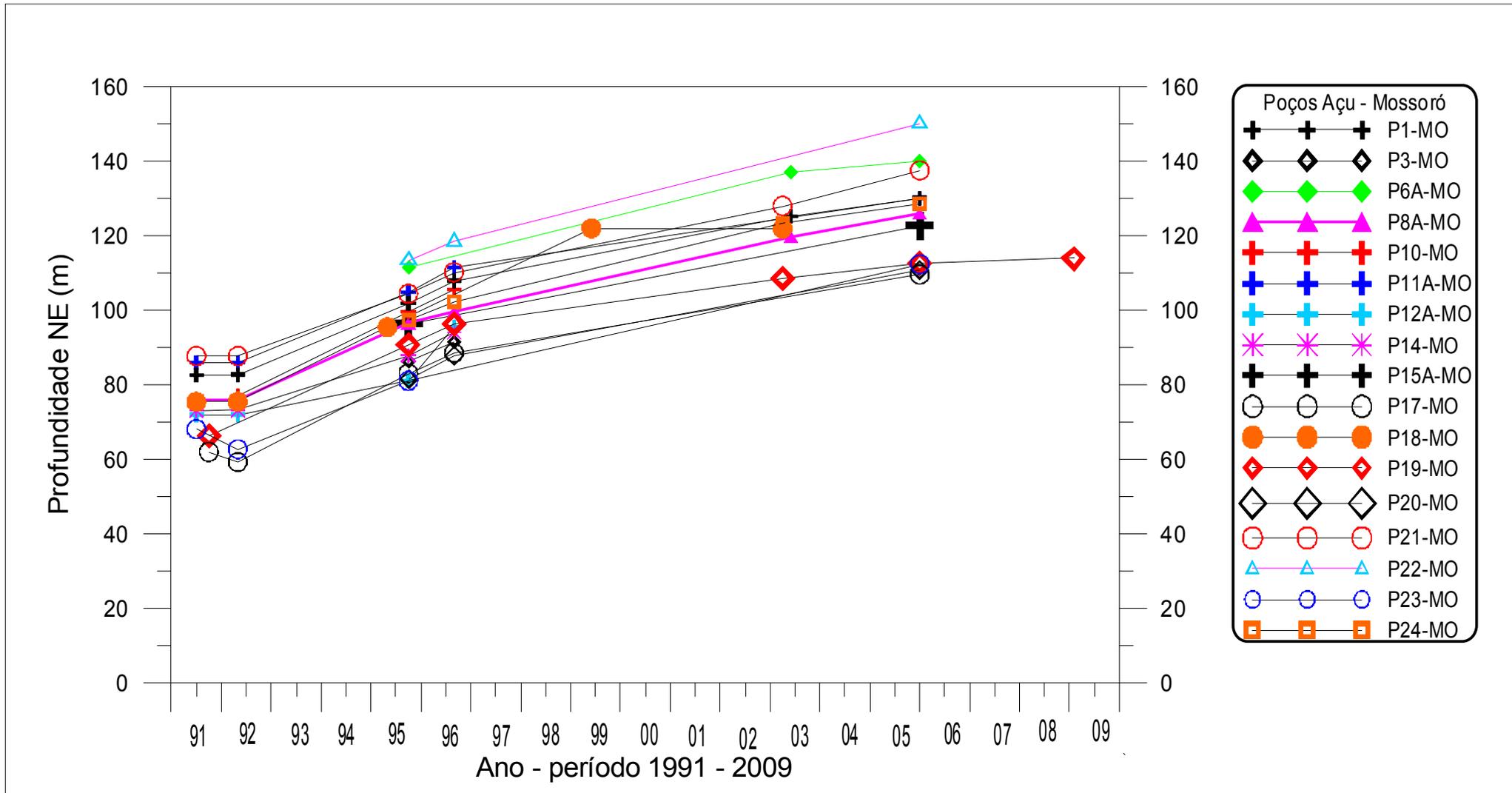
Classe	Frequência	Frequência acumulada	Porcentagem	Porcentagem acumulada
$0 \leq x < 5$	48	48	18,46	18,46
$5 \leq x < 10$	95	143	36,54	55,00
$10 \leq x < 15$	56	199	21,54	76,54
$15 \leq x < 20$	11	210	4,23	80,77
$20 \leq x < 25$	10	220	3,85	84,62
$25 \leq x < 30$	6	226	2,31	86,92
$30 \leq x < 35$	4	230	1,54	88,46
$35 \leq x < 40$	3	233	1,15	89,62
$40 \leq x < 45$	4	237	1,54	91,15
$45 \leq x < 50$	2	239	0,77	91,92
$50 \leq x < 55$	5	244	1,92	93,85
$50 \leq x < 60$	7	251	2,69	96,54
$60 \leq x < 65$	2	253	0,77	97,31
$65 \leq x < 70$	2	255	0,77	98,08
$70 \leq x < 75$	1	256	0,38	98,46
$75 \leq x < 80$	0	256	0,00	98,46
$80 \leq x < 85$	0	256	0,00	98,46
$85 \leq x < 90$	1	257	0,38	98,85
$90 \leq x < 95$	0	257	0,00	98,85
$95 \leq x < 100$	1	258	0,38	99,23
$100 \leq x < 105$	0	258	0,00	99,23
$105 \leq x < 110$	1	259	0,38	99,62
$110 \leq x < 115$	0	259	0,00	99,62
$115 \leq x < 120$	1	260	0,38	100,00



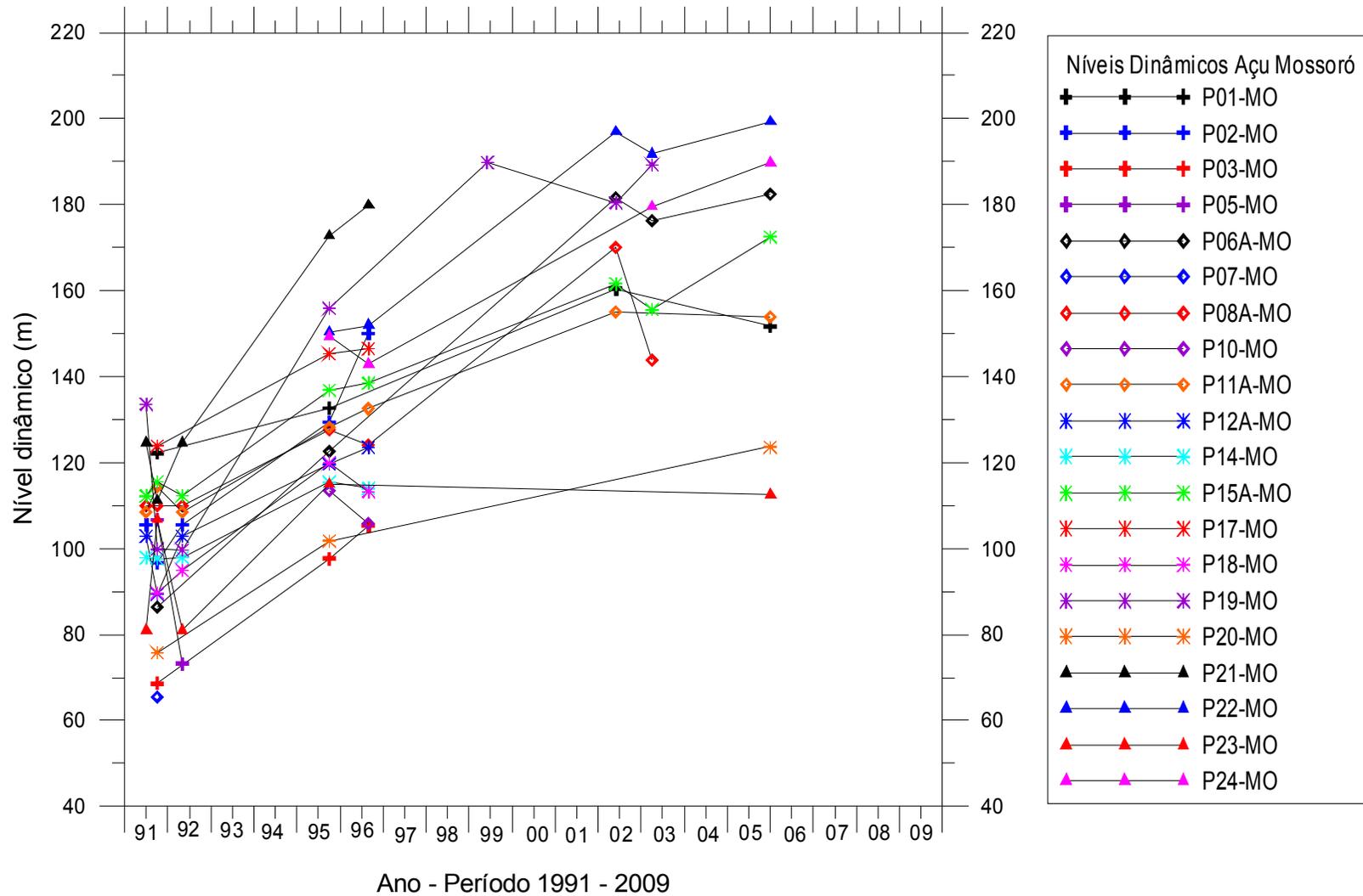
**Figura 4.6** – Evolução da profundidade média dos níveis estáticos medidos em 122 poços do aquífero Jandaíra, na região de Baraúna, no período de 2003 a 2007 (Fonte: SEMARH, 2009).



**Figura 4.7** – Evolução da profundidade dos níveis dinâmicos em 122 poços do aquífero Jandaíra, na região de Baraúna, no período de 2003 a 2005 (Fonte: SEMARH, 2009).



**Figura 4.8** – Evolução dos níveis estáticos em 17 poços do aquífero Açu em Mossoró, no período de 1991 a 2005 (Fonte: CAERN, 2009).



**Figura 4.9-** Evolução dos níveis dinâmicos para 20 poços do aquífero Açu em Mossoró, no período de 1991 a 2005 (Fonte: CAERN, 2009).

#### 4.2.6 – Principais usuários de água subterrânea

A relação dos 20 (vinte) principais usuários de água subterrânea da área é mostrada na **tabela 4.12**.

**Tabela 4.12** – Relação dos 20 (vinte) principais usuários de água subterrânea na área de estudo.

Ordem	Nome	Aquífero	Vazão (m³/h)	Número Poços	Média por poço (m³/h)	Uso
1	DEL MONT	Jandaíra	4720	44	107	Fruticultura irrigada
2	CAERN (11 Mossoró + 2 Baraúna)	Açu	1499	13	115	Abastecimento urbano
3	Faz. Mossoró	Jandaíra	1440	24	60	Carcinicultura
4	Aquarium Aquicultura do Brasil LTDA	Jandaíra	910	10	91	Carcinicultura
5	Hidrotec Marine	Jandaíra	790	13	61	Carcinicultura
6	Fazenda Fruta Cor - João Texeira JR	Jandaíra	780	4	195	Fruticultura irrigada
7	Wildemar Vieira	Jandaíra	730	10	73	Carcinicultura
8	PH Prod. E Dist. de Frutas LTDA	Jandaíra	690	13	53	Fruticultura irrigada
9	Ivanildo P. Figueiredo	Jandaíra	685	12	57	Fruticultura irrigada
10	JS Sallouti	Jandaíra	614	16	38	Fruticultura irrigada
11	Odilon Xavier Batista	Jandaíra	580	8	73	Fruticultura irrigada
12	Airlon Gonçalves de Souza	Jandaíra	540	5	108	Fruticultura irrigada
13	Antônio Solon Nunes	Jandaíra	480	6	80	Fruticultura irrigada
14	Aldivan Isoares	Jandaíra	470	13	36	Fruticultura irrigada
15	Carlos Matsumoto	Jandaíra	464	18	26	Fruticultura irrigada
16	Alberto Fernandes Farias	Jandaíra	450	5	90	Fruticultura irrigada
17	Evandro Mendes	Jandaíra	440	5	88	Fruticultura irrigada
18	Antonio Avelino de Moraes	Jandaíra	400	4	100	Fruticultura irrigada
19	José Ricardo C. de Medeiros	Jandaíra	400	4	100	Fruticultura irrigada
20	Faz. Agrícola Famosa	Jandaíra	400	5	80	Fruticultura irrigada
	TOTAL		17372	232	81	

Na referida tabela são indicados por aquífero, a vazão horária bombeada, o número de poços, a vazão média por poço e os usos.

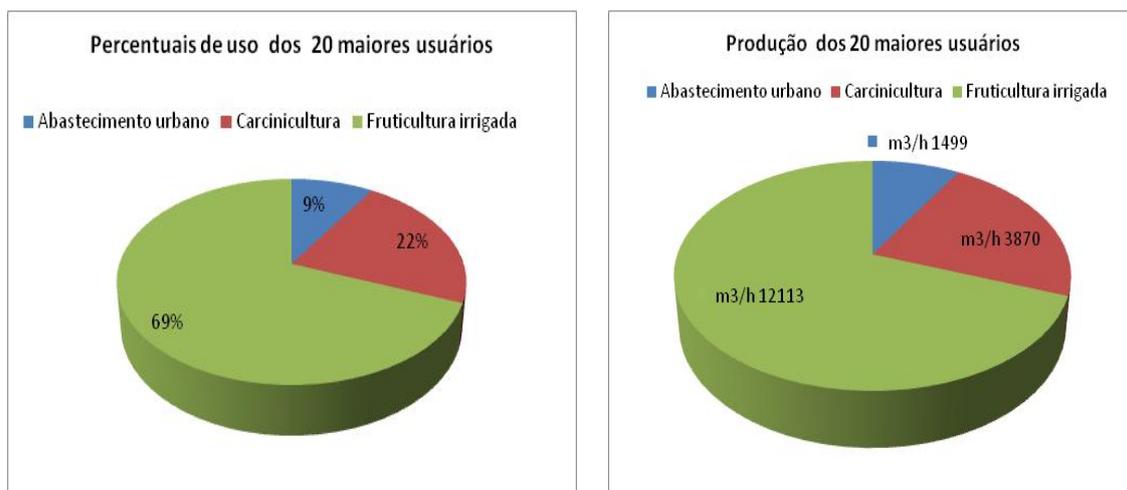
No **aquífero Jandaíra**: 95% dos maiores usuários de água subterrânea (19/20) captam águas do aquífero Jandaíra. O maior usuário é a Empresa Del Mont que dispõe de 44 poços com capacidade instalada de 4720 m³/h e vazão média por poço, de 107 m³/h, usado na fruticultura irrigada. Além da Del Mont, exercem essa mesma atividade 14 (quatorze) outros usuários. Em conjunto os 15 usuários de água subterrânea para a irrigação de frutas tropicais, utilizam 162 poços com uma produção horária de 12113 m³. Os 4 (quatro) usuários restantes utilizam 57 poços com uma produção total de 3870 m³/h (22%) usada na carcinicultura.

Os 19 usuários do aquífero Jandaíra captam uma descarga total de 4,44 m<sup>3</sup>/s, 1,08 m<sup>3</sup>/s de 57 poços para uso na carcinicultura e 3.36 m<sup>3</sup>/s de 162 poços para uso na fruticultura irrigada.

No **aquífero Açu**: dentre os grandes usuários, as águas do aquífero Açu são captadas apenas pela CAERN, para abastecimento urbano de água em Mossoró (11 poços) e Baraúna (2), com produção total de 0,42 m<sup>3</sup>/s.

Em conjunto esses 20 (vinte) maiores usuários possuem uma disponibilidade efetiva instalada de 4,86 m<sup>3</sup>/s, explotável de 232 poços, que representam 26% dos 907 poços existentes em operação e extraem 59% da disponibilidade efetiva instalada de 7,71 m<sup>3</sup>/s.

As descargas médias por poço dos diferentes usuários variam de 25 m<sup>3</sup>/h a 195 m<sup>3</sup>/h.

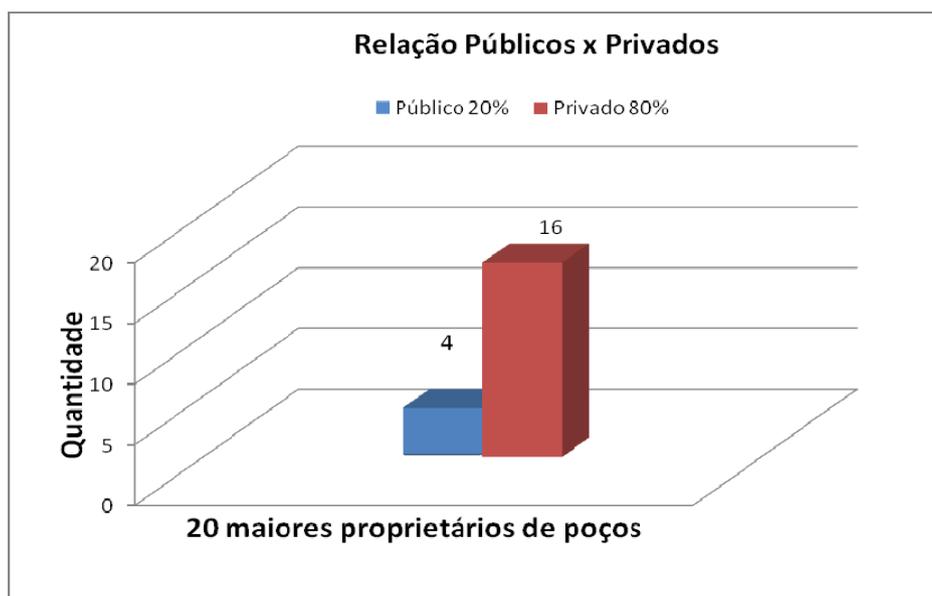


**Figura 4.10** – Percentuais de uso e produção de cada uso dos 20 maiores usuários de água subterrânea.

Os percentuais de uso e de produção de água pelos 20 principais usuários são mostrados na **figura 4.10**, na qual se observa que 69% da água (12113 m<sup>3</sup>/h) é usada na fruticultura irrigada; 22% (3870 m<sup>3</sup>/h) na carcinicultura e 9% (1499 m<sup>3</sup>/h) no abastecimento urbano.

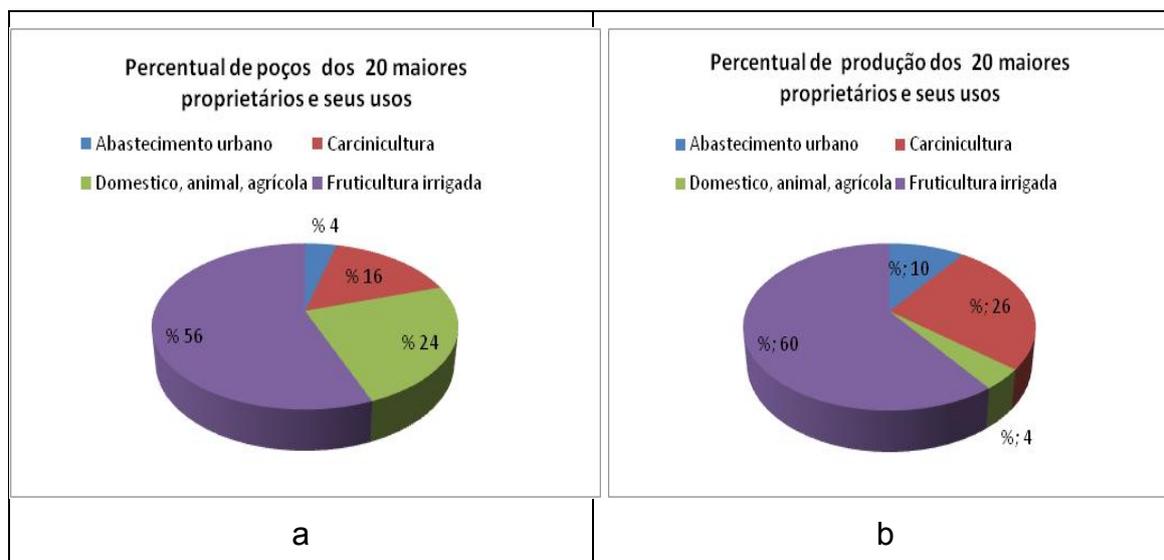
#### 4.2.7 – Principais proprietários de poços

Dentre os 20 (vinte) maiores proprietários de poços listados na **tabela 4.8**, 4 (20%) pertencem ao setor público e 16 proprietários (80%) ao setor privado (**figura 4.11**).



**Figura 4.11** – Distribuição entre públicos e privados dos 20 maiores proprietários de poços na área de estudo.

Os proprietários públicos, com 28% dos poços (98), respondem por 14% da produção (2039 m<sup>3</sup>/h) enquanto que os proprietários privados, com 72% dos poços (206) utilizam 12787 m<sup>3</sup>/h que representam 86% da produção. A distribuição dos poços, nos diferentes usos é vista na **figura 4.12a** e a distribuição da produção nos diferentes usos é ilustrada na **figura 4.12b**.



**Figura 4.12** – Usos das águas subterrâneas pelos 20 maiores proprietários de poços. a) Distribuição percentual do número de poços e respectivos usos; b) distribuição do percentual de produção, nos diferentes usos.

Na fruticultura irrigada são utilizados 56% dos poços os quais produzem 60% da descarga total; na carcinicultura 16% dos poços fornecem 26% da descarga; 24% dos poços fornecem água para o consumo doméstico e animal, consumindo 4% da descarga e finalmente, 4% dos poços servem ao abastecimento urbano, com uma descarga equivalente a 10% do total.

Vale notar que o número de poços não é um indicador significativo para a tomada de decisão, se não estiver acompanhado da vazão média por poço. Isso é mostrado pelo exemplo das Prefeituras de Baraúna e Mossoró, que

mesmo ocupando, respectivamente, o 2º e 3º lugares na lista de maiores proprietários de poços, estão fora da lista dos 20 principais usuários, conforme tabelas 4.12 e 4.13.

**Tabela 4.13**– Relação dos 20 (vinte) maiores proprietários de poços na área de estudo.

Ordem	Nome	Número de Poços	Vazão (m³/h)	Média por poço (m³/h)	Uso	Aquífero	Propriedade
1	DEL MONT	44	4720	107	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
2	Prefeitura Municipal de Baraúna	38	264	7	Doméstico, animal e agricultura	Jandaíra	Comunitário
3	Prefeitura Municipal de Mossoró	35	186	5	Doméstico, animal e agricultura	2 Açú 33 Jandaíra	Comunitário
4	Faz. Mossoró	24	1440	60	Carcinicultura	Jandaíra	Particular
5	CAERN	13	1499	65	Abastecimento urbano	Açú	Comunitário
6	Carlos Matsumoto	18	464	26	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
7	JS Sallouti	16	614	38	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
8	Nolem	16	170	11	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
9	Masatoshi Otani	15	376	25	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
10	Myuki Kitayama	14	220	16	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
11	Hidrotec Marine	13	790	61	Carcinicultura	Jandaíra	Particular
12	PH Prod. E Dist. de Frutas LTDA	13	690	53	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
13	Aldivan Isoares	13	470	36	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
14	Ivanildo P. Figueiredo	12	685	57	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
15	Prefeitura Municipal de Quixeré	12	80	7	Doméstico, animal e agricultura	Jandaíra	Comunitário
16	Wilson Galdino de Andrade	11	350	32	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
17	Francisco Raimundo Santiago Bessa	11	N/D	N/D	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
18	Aquarium Aquicultura do Brasil LTDA	10	910	91	Carcinicultura	Jandaíra	Particular
19	Wildemar Vieira	10	730	73	Carcinicultura	Jandaíra	Particular
20	Wilson Galdino	10	158	16	Fruticultura irrigada	Jandaíra	Particular
<b>TOTAIS</b>		<b>348</b>	<b>14816</b>				

#### 4.2.8 – Outorgas de água

As informações disponíveis sobre outorga de água na área de estudo fornecidas pelo Sistema de Outorga e Licença (SOL) da SRH/COGERH/CE contemplam principalmente os municípios de Jaguaruana, Quixeré, Limoeiro do Norte e Tabuleiro do Norte no Estado do Ceará e os municípios de Baraúna e Mossoró, no Rio Grande do Norte, segundo os dados da SEMARH/RN. Esses 6 (seis) municípios cobrem 99% da área do projeto. Nos municípios restantes (Aracati, Russas e Dix-Sept Rosado), que ocupam apenas 1% do território inexistem dados de outorga dentro área do projeto.

Levando em conta os valores médios dos dados constantes dos processos de outorga da COGERH/CE (março 2009), o regime médio de funcionamento estimado é de 9,98 horas/dia, como sugerido pela equação abaixo:

$$15,3 \frac{\text{hora}}{\text{dia}} \times 6,4 \frac{\text{dia}}{\text{semana}} \times \frac{9,3 \text{ meses}}{365 \text{ dias}} \times \frac{4 \text{ semanas}}{\text{mês}} = 9,98 \text{ h / dia}$$

A média obtida para esse regime com base na análise dos dados informados no cadastro dos poços foi de 11,26 horas/dia (**tabela 4.3**). Portanto, o confronto desses valores permite adotar na estimativa das vazões de outorga um regime de 10 horas/dia para os mananciais explotados pelo setor privado. Para os mananciais explotados pelo setor público e destinados ao abastecimento humano de água, o regime médio considerado será de 20 horas/dia.

Na área do projeto, a situação geral dos pedidos de outorga, por município, é apresentada na **tabela 4.14** para água superficial e na **tabela 4.15** para água subterrânea.

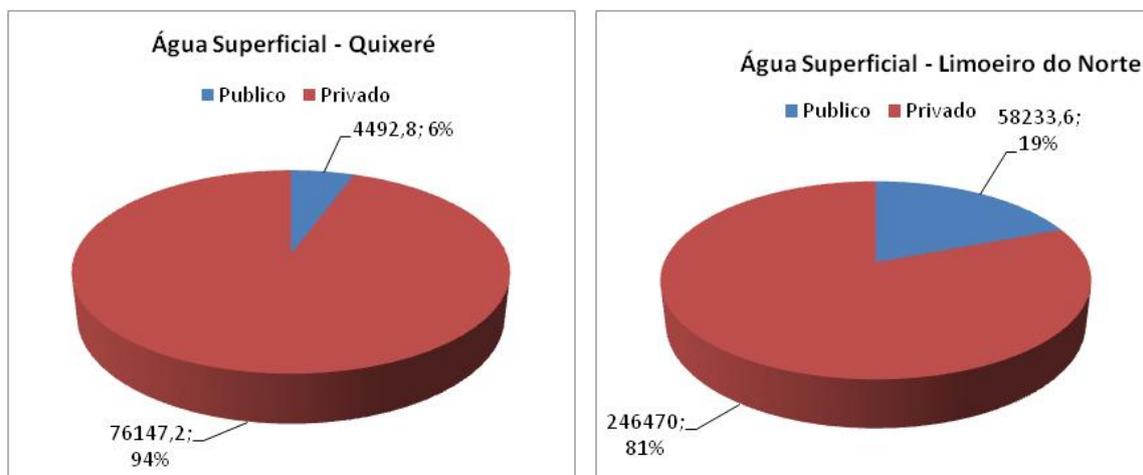
**Tabela 4.14** – Situação geral dos pedidos de outorga para água superficial na área do projeto. Fontes: COGERH (março 2009); SEMARH (agosto 2009).

Município	Número outorgas	Vazão m³/dia	População 2008	m³/hab.dia	Público (m³/dia)		Privado (m³/dia)	
					Valor	%	Valor	%
Jaguaruana	0	0	30965	0,00	0	0	0	0
Quixeré	46	80640	18652	4,32	4492,8	6	76147,2	94
Limoeiro do Norte	13	304704	53289	5,72	58233,6	19	246470,4	81
Tabuleiro do Norte	7	67860	29369	2,31	0	0	67860	100
Mossoró	24	21564	234390	0,09	0	0	21564	100
Baraúna	0	0	23098	0,00	0	0	0	0

A **tabela 4.14** mostra que, através de 90 processos de outorga, as vazões per capita de água superficial constantes dos pedidos, ficam restritas, aos municípios de Limoeiro do Norte (5,72 m³/hab.dia), Quixeré (4,32 m³/hab.dia) e Tabuleiro do Norte (2,31 m³/hab.dia) no Estado do Ceará, e ao município de Mossoró (0,09 m³/hab.dia), no Rio Grande do Norte. Não existem pedidos de outorga de água superficial nos municípios de Jaguaruana (CE) e Baraúna (RN). Dos volumes diários outorgados, apenas 6% (4492,8 m³/dia) em Quixeré e 19% (58233,6 m³/dia) em Limoeiro do Norte, são para o setor público. O restante das vazões dos pedidos de outorga se destina ao setor privado dos municípios, tendo como distribuição: 94% (76147,2 m³/dia) para Quixeré; 81%

(246470,4 m<sup>3</sup>/dia) para Limoeiro do Norte; 100% (67860 m<sup>3</sup>/dia) para Tabuleiro do Norte e 100% (21564 m<sup>3</sup>/dia) para Mossoró.

A distribuição entre pedidos de outorga públicos e privados para Quixeré e Limoeiro do Norte (únicos municípios da área de estudo onde existem essa diferenciação, pode ser vista na **figura 4.13**.



**Figura 4.13** – Distribuição dos pedidos de outorga entre públicos e privados de água superficial nos municípios de Quixeré e Limoeiro do Norte.

Os pedidos de outorga de **água subterrânea** na área do projeto, até as datas indicadas na **tabela 4.15**, somam 396. As vazões per capita, são de 0,27 m<sup>3</sup>/hab.dia, em Jaguaruana; 2,69 m<sup>3</sup>/hab.dia, em Quixeré; 0,08 m<sup>3</sup>/hab.dia, em Limoeiro do Norte; 0,02 m<sup>3</sup>/hab.dia, em Tabuleiro do Norte; 0,70 m<sup>3</sup>/hab.dia, em Mossoró e 3,07 m<sup>3</sup>/hab.dia, em Baraúna.

**Tabela 4.15** – Situação geral dos pedidos de outorga para água subterrânea na área do projeto. Fontes: COGERH (março 2009); SEMARH (agosto 2009).

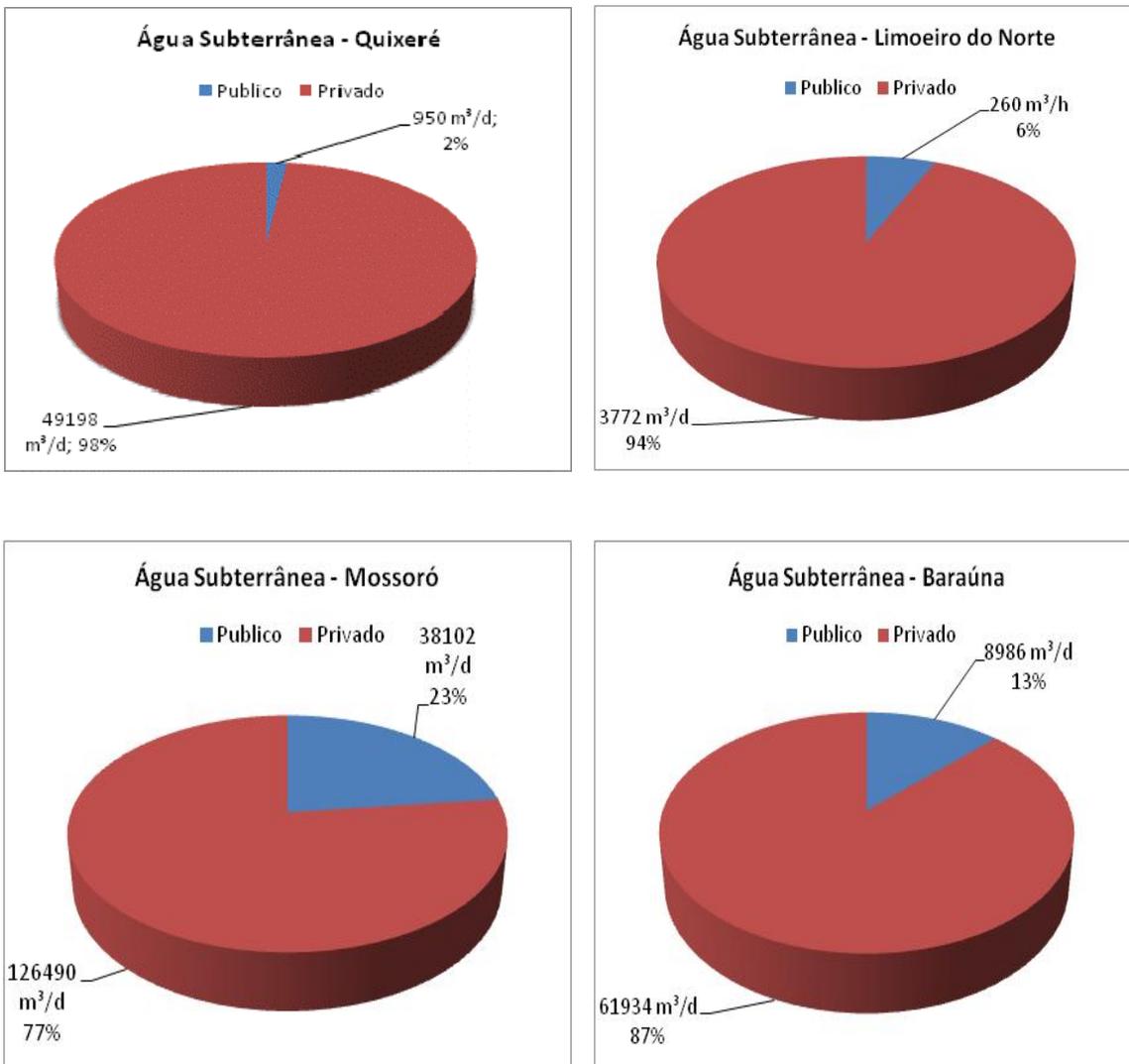
Município	Número outorgas	Vazão m <sup>3</sup> /dia	População 2008	m <sup>3</sup> /hab.dia	Público (m <sup>3</sup> /dia)		Privado (m <sup>3</sup> /dia)	
					Valor	%	Valor	%
Jaguaruana	20	8334	30965	0,27	0	0	8334	100
Quixeré	109	50148	18652	2,69	950	2	49198	98
Limoeiro do Norte	11	4032	53289	0,08	260	6	3772	94
Tabuleiro do Norte	3	504	29369	0,02	0	0	504	100
Mossoró	111	164592	234390	0,70	38102	23	126490	77
Baraúna	396	70920	23098	3,07	8986	13	61934	87

Os volumes diários estimados, com base nos regimes médios operacionais adotados, são, respectivamente de:

- Para o setor público: 2% (950 m<sup>3</sup>/dia) em Quixeré e 6% (260 m<sup>3</sup>/dia) em Limoeiro do Norte; 23% (38102 m<sup>3</sup>/dia) em Mossoró e 13% (8986 m<sup>3</sup>/dia) em Baraúna.
- Para o setor privado: 100% (8334 m<sup>3</sup>/dia) em Jaguaruana; 98% (49198 m<sup>3</sup>/dia) em Quixeré; 94% (3772 m<sup>3</sup>/dia) em Limoeiro do Norte; 100%

(504 m<sup>3</sup>/dia) em Tabuleiro do Norte; 77% (126490 m<sup>3</sup>/dia) em Mossoró e 87% (61934 m<sup>3</sup>/dia) em Baraúna.

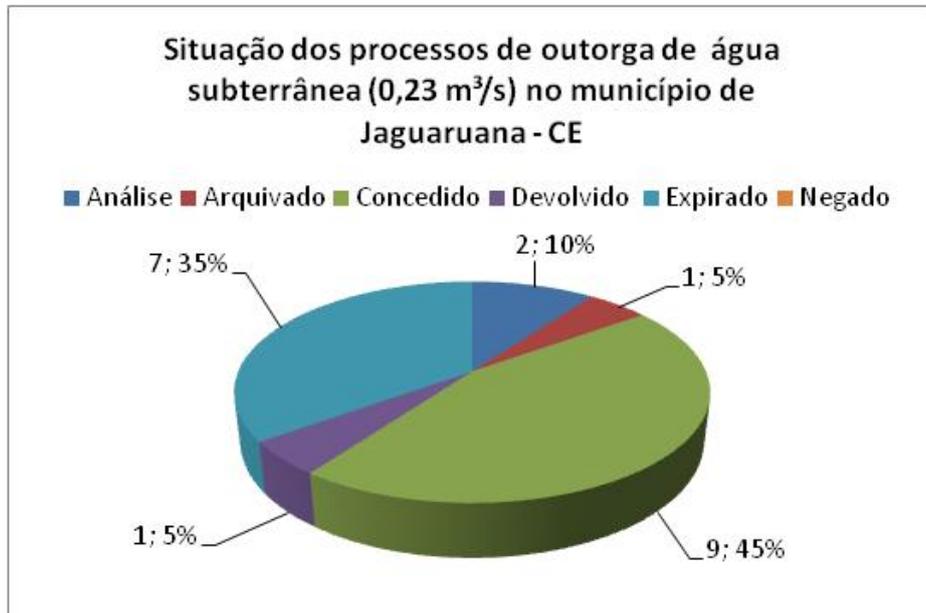
A comparação entre as vazões diárias de outorga de água subterrânea entre usuários públicos e privados é ilustrada na **figura 4.14**.



**Figura 4.14** – Distribuição dos pedidos de outorga de água subterrânea entre públicos e privados nos municípios de Quixeré, Limoeiro do Norte, Mossoró e Baraúna.

**Município de Jaguaruana:**

**Situação dos pedidos em março de 2009:** No município de Jaguaruana, como já visto, não existe outorga para água superficial na área do projeto e para água subterrânea a situação dos 20 processos em março de 2009 indicava: 10% (2) devolvidos; 9 (45%) concedidos; 7 (35%) expirados; 1 (5%) arquivado e 1 (5%) devolvido, como ilustrado na **figura 4.15**.



**Figura 4.15** – Situação dos pedidos de outorga de água subterrânea em Jaguaruana (COGERH, março 2009).

**Usos** : os usos constantes dos pedidos de outorga no município de Jaguaruana são indicados na **figura 4.16**.

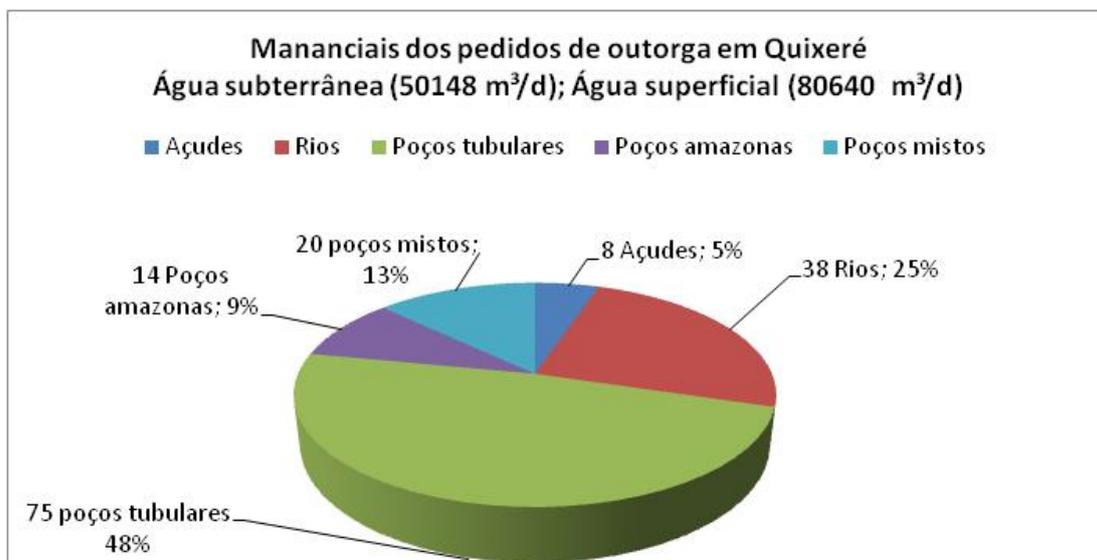


**Figura 4.16** – Usos indicados nos pedidos de outorga de água no município de Jaguaruana – CE (COGERH, março 2009).

### **Município de Quixeré**

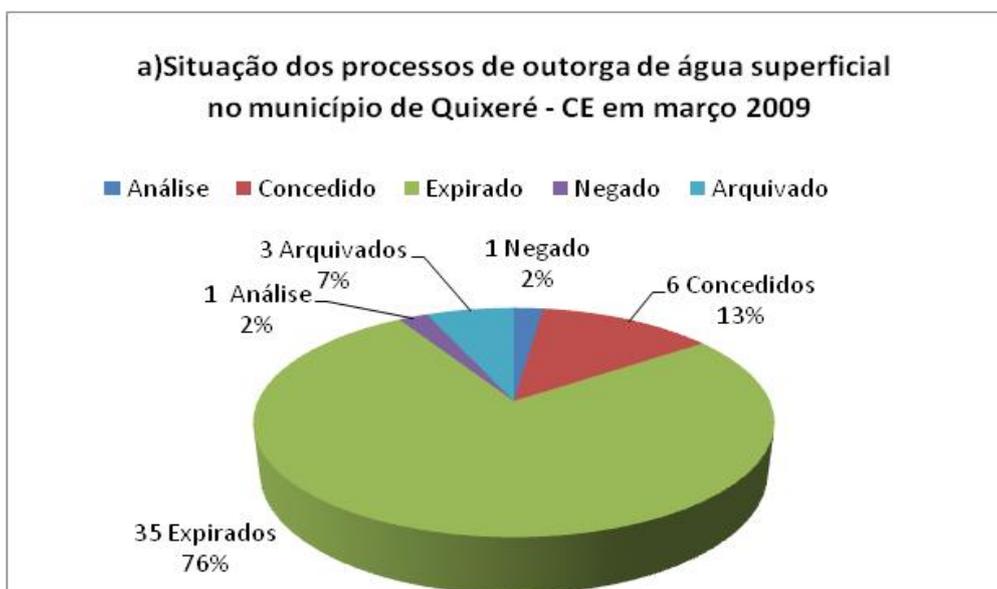
**Mananciais dos pedidos de outorga:** os mananciais dos pedidos de outorga no município de Quixeré incluem 46 captações de água superficial, com vazão de 80640 m<sup>3</sup>/dia e 109 captações de água subterrânea, com vazão de 50148 m<sup>3</sup>/dia. As captações de superfície constam de 8 açudes (5%) e 38 captações em rios (25%). As captações de água subterrânea são representadas por 75

poços tubulares (48%), 14 poços amazonas (9%) e 20 poços mistos (13%) como mostra a **figura 4.17**.



**Figura 4.17** – Tipos de manancial de superfície e subterrâneos dos pedidos de outorga de água no município de Quixeré – CE (COGERH, março 2009).

**Situação dos processos de outorga:** os registros, para água superficial (**figura 4.18a**) classificam 35 processos (76%) como expirados; 6 processos (13%) concedidos; 3 processos (7%), arquivados; 1 processo (2%) negado e 1 processo (2%) em análise. Para água subterrânea (**figura 4.18b**) os dados revelam a existência de 50 processos (46%) expirados; 31 (28%) arquivados e 28 (26%) concedidos.

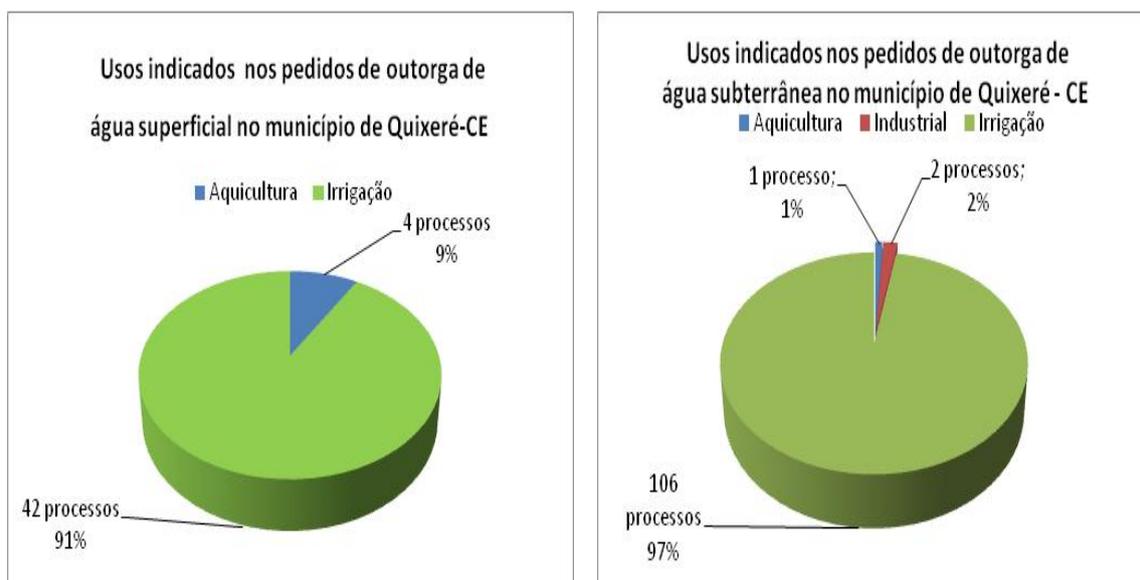




**Figura 4.18** – Situação dos pedidos de outorga no município de Quixeré em março de 2009 no município de Quixeré- CE; **a)** para água superficial; **b)** para água subterrânea (COGERH, março 2009).

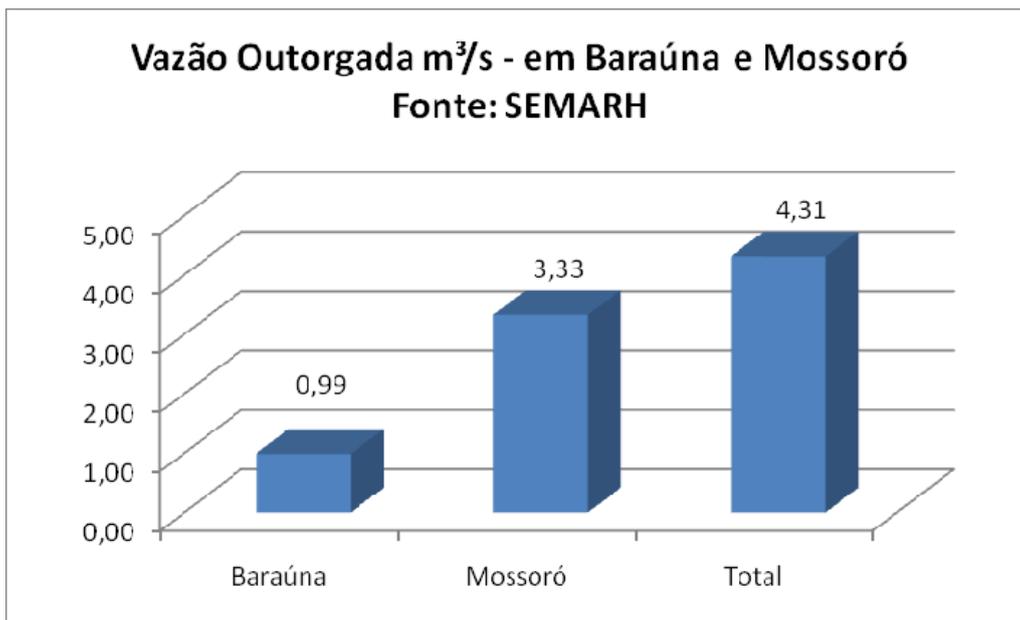
**Usos:** Quanto aos usos no município de Quixeré, que 95% (106) dos pedidos de outorga se destinam ao uso de água para irrigação, ficando os 5% restantes destinados a aquicultura (3%) e ao uso industrial (2%).

Nas 46 outorgas de água superficial 91% (42) dos pedidos são de água para irrigação e 9% para aquicultura. Nas 109 outorgas de água subterrânea, 97% (106) dos pedidos são para irrigação; 2 (2%) para a indústria e 1 (1%) para aquicultura (**figura 4.19**).



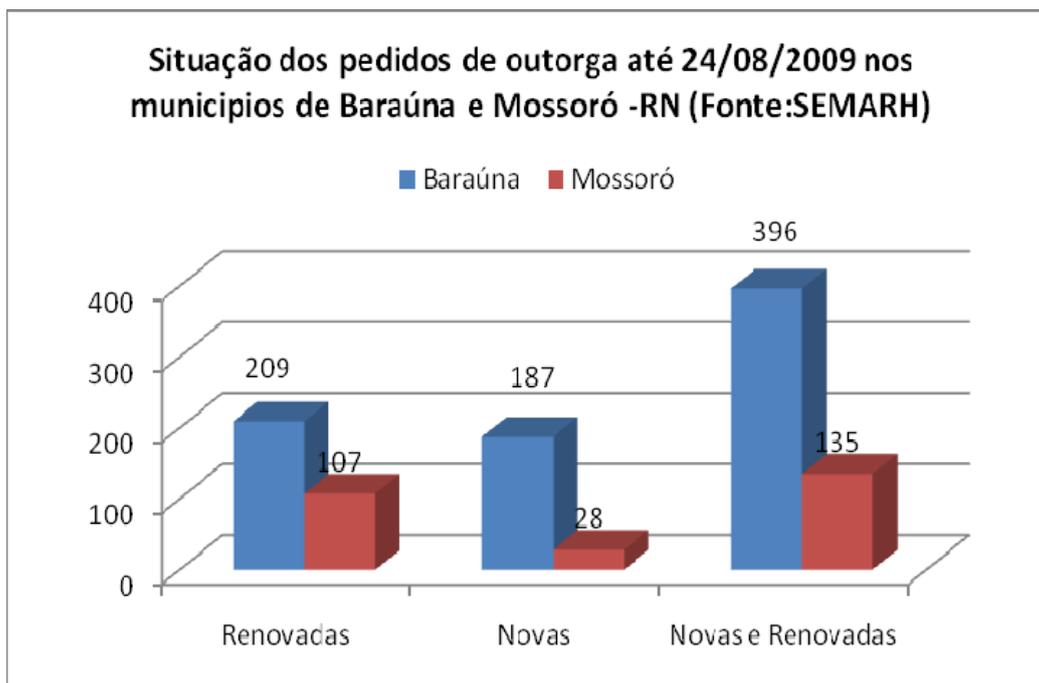
**Figura 4.19**– Usos dos pedidos de outorga de água superficial e subterrânea no município de Quixeré – CE (COGERH, março 2009).

No Estado do Rio Grande do Norte, as outorgas de água na área do Projeto contemplam os municípios de Baraúna e Mossoró, respectivamente com descargas de 0,99 m<sup>3</sup>/s e 3,33 m<sup>3</sup>/s totalizando 4,31 m<sup>3</sup>/s (**figura 4.20**).



**Figura 4.20** – Vazões outorgadas nos municípios de Baraúna e Mossoró- RN.

A situação dos pedidos (**figura 4.21**) no que se refere ao andamento dos processos parece bastante satisfatória, pois, como mostram os dados da SEMARH, até 24 de agosto de 2009 entre novos e renovados haviam, com tramitação concluída, 396 pedidos em Baraúna e 135 pedidos em Mossoró.

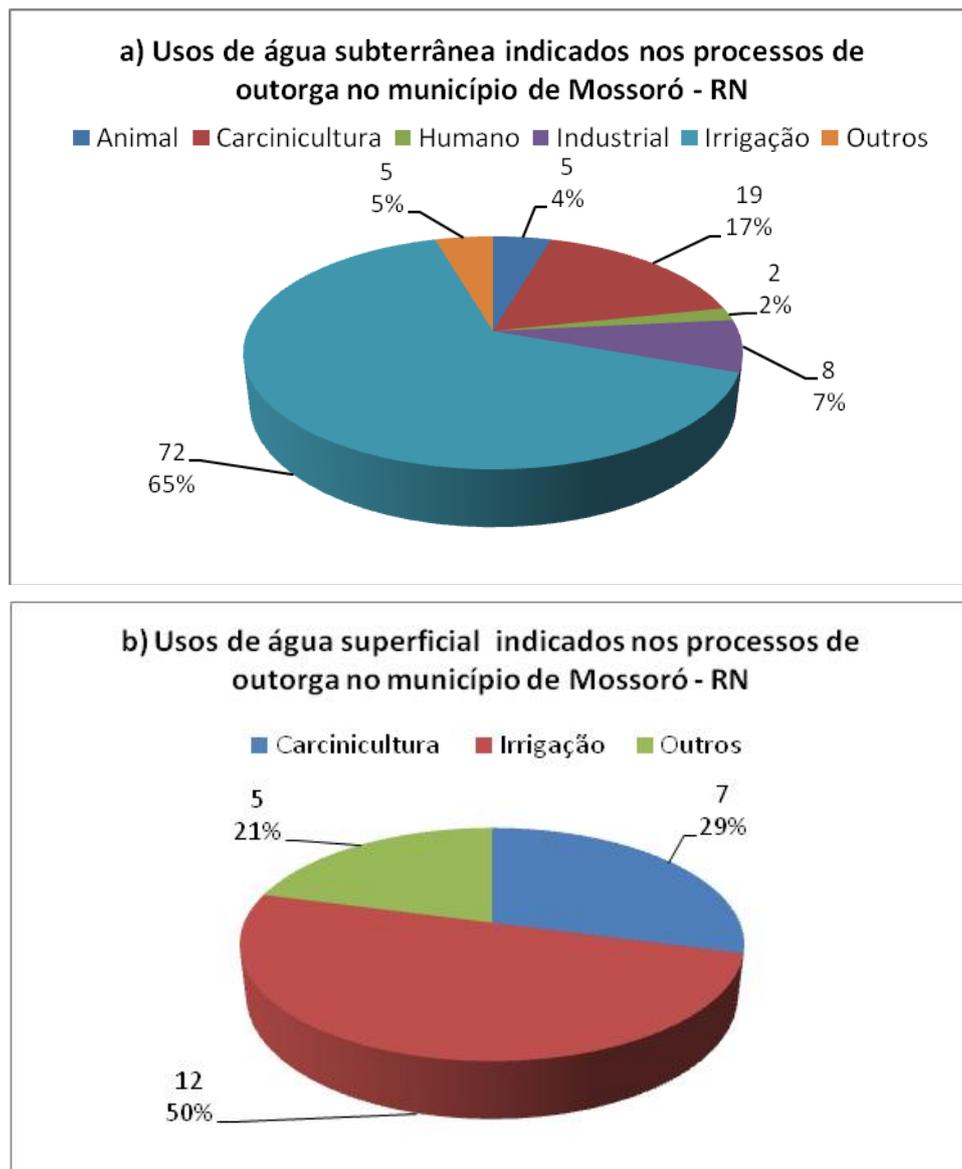


**Figura 4.21** – Situação dos pedidos de outorga de água nos municípios de Baraúna e Mossoró- RN, até 24 de agosto de 2009.

### Usos em Mossoró

No município de Mossoró os usos de água subterrânea conforme dados de 111 pedidos de outorga, se distribuem entre 5% (5) consumo animal; 17% (19) carcinicultura; 2% (2) consumo humano; 7% (8) industrial; 65% (72) irrigação; 5% (5) para outros usos (**figura 4.22a**).

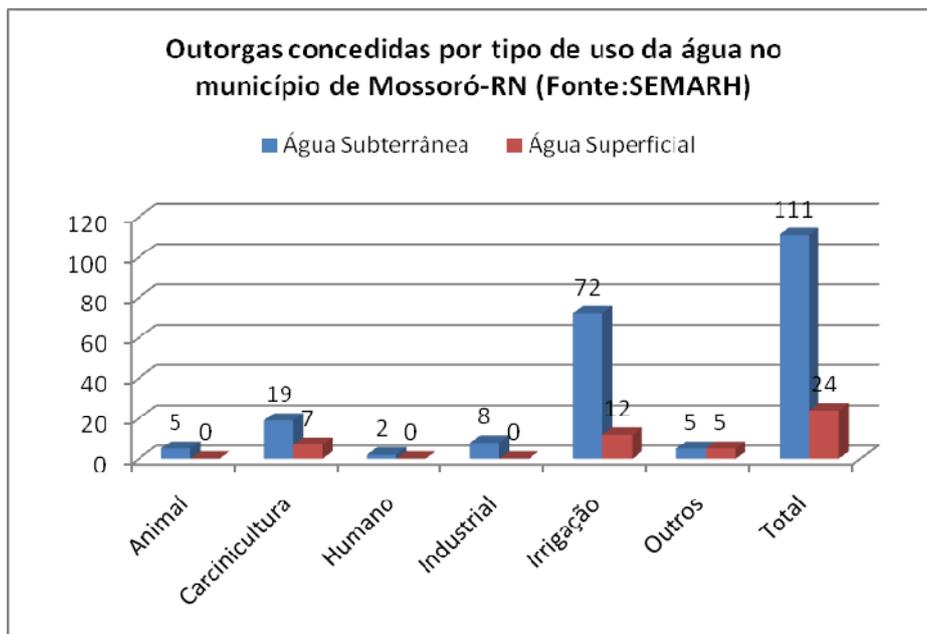
Os usos de água superficial (**figura 4.22b**) deduzidos de 24 processos, ficam restritos a três categorias: carcinicultura em 7 processos (29%); irrigação, indicada em 12 processos (50%) e finalmente classificados como outros usos, 5 processos (21%).



**Figura 4.22**– Outorgas concedidas por tipo de uso da água no município de Mossoró RN, até 24 de agosto de 2009; a) água subterrânea; b) água superficial (SEMARH, 2009).

Globalmente, no município de Mossoró (**figura 4.23**) o uso de água subterrânea predomina em 82% das outorgas concedidas, sendo destinado

para irrigação (65%), aquicultura (14%), indústria (6%), ficando os 15% restantes, distribuídos para consumo animal, humano e outros.



**Figura 4.23** – Outorgas concedidas por tipo de uso da água no município de Mossoró-RN, até 24 de agosto de 2009 (SEMARH, 2009).

#### **Usos em Baraúna**

No município de Baraúna, 100% (396) dos pedidos de outorga são para água subterrânea, sendo 99% (392) para irrigação e apenas 1% (4) para consumo animal (**figura 4.24**).



**Figura 4.24**– Outorgas concedidas por tipo de uso da água no município de Baraúna RN, até 24 de agosto de 2009 (SEMARH, 2009).

#### 4.2.9 – Profundidade dos poços

No aquífero Jandaíra, para uma amostra de 1185 poços cadastrados, a profundidade varia de 3 a 450 m, com média de 88 m, segundo a estatística descritiva da **tabela 4.16**.

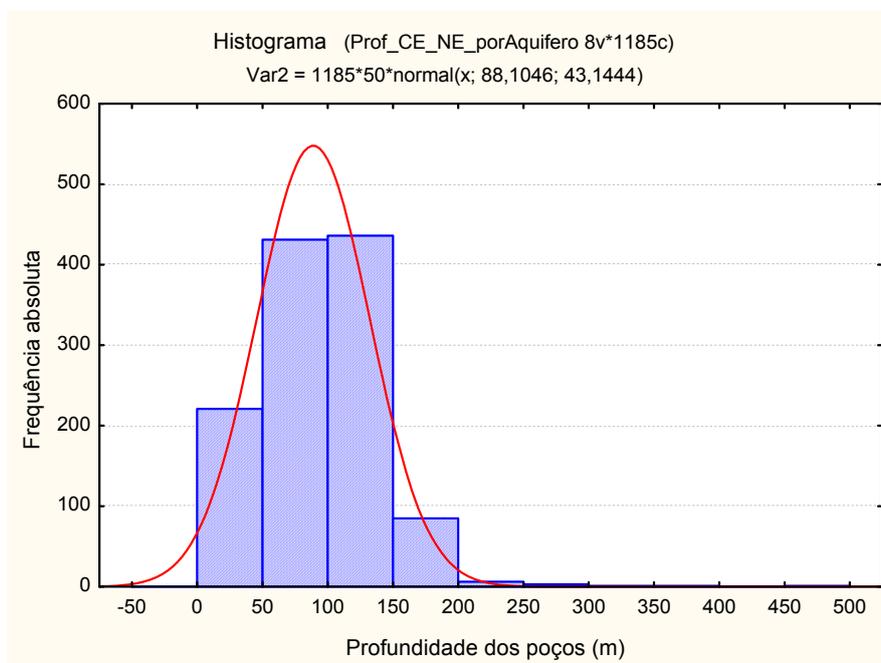
**Tabela 4.16-** Estatística descritiva da profundidade dos poços do aquífero Jandaíra.

N	Media	Confiança		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro Padrão	Assimetria
		-95%	+95%						
1185	88	85	90	90	3	450	43	1,25	1,12

Os intervalos de classe e a frequência da profundidade dos poços do aquífero Jandaíra aparecem na **tabela 4.17** e o respectivo histograma na **figura 4.25**.

**Tabela 4.17-** Frequência de profundidade dos poços no aquífero Jandaíra.

Intervalo de Classe	Frequência absoluta	Frequência relativa	Frequência acumulada	% cumulativo
0<Pf≤50	234	0,20	234	20
50<Pf≤100	616	0,52	850	72
100<Pf≤150	266	0,22	1116	94
150<Pf≤200	56	0,05	1172	99
200<Pf≤250	5	0,00	1177	99
250<Pf≤300	5	0,00	1182	100
300<Pf≤350	1	0,00	1183	100
350<Pf≤400	1	0,00	1184	100
400<Pf≤450	1	0,00	1185	100



**Figura 4.25** – Histograma de profundidade dos poços do aquífero Jandaíra.

O histograma da figura 4.25 sugere que a profundidade dos poços no Jandaíra apresenta uma distribuição de frequência normal com moda da ordem de 100m.

No aquífero Açú, a profundidade dos poços varia de 60 m a 1200 m, numa amostra de apenas 41 poços. A média é de 732 m com erro padrão de 426 m (tabela 4.18). Os intervalos de profundidade são mostrados na **tabela 4.19**.

**Tabela 4.18-** Estatística descritiva da profundidade dos poços do aquífero Açú.

N	Media	Confiança		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro Padrão	Assimetria
		-95%	+95%						
41	732	648	817	859	60	120	268	426	-1,08

Os intervalos de classe são mostrados na **tabela 4.19** e no respectivo histograma apresentado na **figura 4.26**.

**Tabela 4.19-** Tabela de frequência de profundidade dos poços no aquífero Açú.

Intervalo de Classe	Frequência absoluta	Frequência relativa	Frequência acumulada	% cumulativo
0<Pf≤100	1	0,02	1	2
100<Pf≤200	3	0,07	4	10
200<Pf≤300	0	0,00	4	10
300<Pf≤400	0	0,00	4	10
400<pf≤500	0	0,00	4	10
500<Pf≤600	9	0,22	13	32
600<Pf≤700	3	0,07	16	39
700<Pf≤800	2	0,05	18	44
800<Pf≤900	3	0,07	21	51
900<Pf≤1000	16	0,39	37	90
1000<Pf≤1100	3	0,07	40	98
1100<Pf≤1200	0	0,00	40	98
1200<Pf≤1300	1	0,02	41	100

O elevado erro padrão da estatística descritiva (**tabela 4.18**) e a fraca qualidade do ajuste da lei de Gauss ao histograma da **figura 4.26** se devem ao reduzido tamanho da amostra de profundidade dos poços do Açú.

A moda, situada no intervalo de 900 a 1000 m, se explica pelo fato de que a maioria dos valores de profundidade da amostra de poços do aquífero Açú na área do projeto, se encontra na região em torno da cidade de Mossoró, em pleno domínio da estrutura profunda conhecida como graben central da Bacia Potiguar. O segundo pico mais alto do histograma, no intervalo de 500 m a 600m, é condicionado pelos poços do Açú em Baraúna, que se encontram na Plataforma de Aracati.

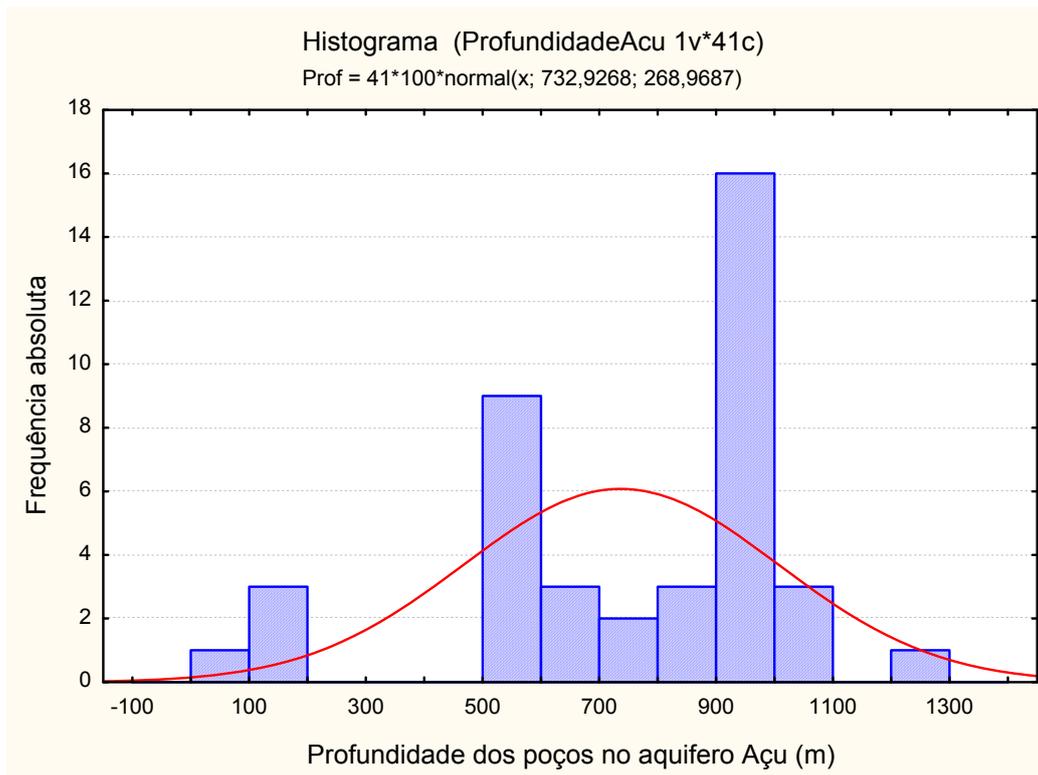


Figura 4.26 – Histograma de profundidade dos poços do aquífero Açú.

### 4.3 – Índice de concentração de poços

O índice de concentração de poços (*icp*) concebido neste trabalho tem por objetivo indicar para cada poço locado em  $(x_0, y_0)$  o número de poços vizinhos, situados em pontos  $(x, y)$ , num raio:

$$R = \sqrt{\frac{10^6 \text{ m}^2}{\pi}} = 564,19 \text{ m} \quad (4.3.1)$$

ou seja, numa área de 1 km<sup>2</sup>. Isto é feito usando um pequeno programa em VBA Excel, que calcula a distância  $R$  entre cada poço e todos os demais poços cadastrados na área do projeto, por meio da equação 4.4.2.

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} < 564,19 \text{ m} \quad (4.3.2)$$

Para cada poço  $P_0(x_0, y_0)$ , o valor do *icp* é dado pela soma dos poços  $P(x, y)$  cuja distância satisfaz a equação 4.4.2. Notar que esse índice varia no intervalo  $1 \leq icp \leq n$ , sendo  $n$  o número máximo de poços existentes para os quais a distância  $\overline{P_0P} < 564,19 \text{ m}$ , no domínio da área de estudo.

A estatística descritiva do *icp* (tabela 4.20), indica para a amostra de 1440 poços cadastrados na área de estudo, uma média de 5,1 e mediana de 5,2, com desvio padrão de 3,31 e assimetria igual a 1. Os números não inteiros refletem apenas o cálculo estatístico, já que o índice considerado é um número inteiro. A faixa de variação na área de estudo oscila no intervalo  $1 \leq icp \leq 19$ .

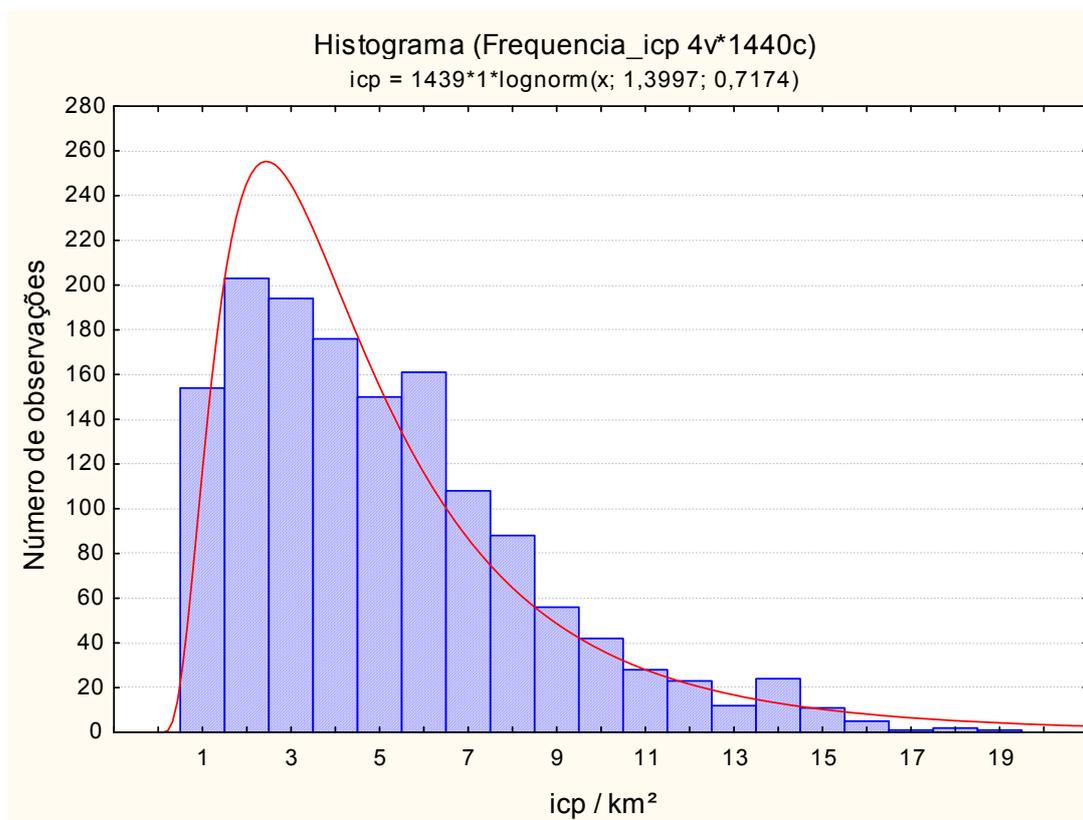
**Tabela 4.20** – Estatística descritiva do Índice de Concentração de Poços na Área do Projeto.

N-1	Media	Confiança		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Erro Padrão	Assimetria
		-95%	+95%						
1439	5,1	5	4,9	5,2	1	19	3,31	0,08	1

A distribuição de frequência do *icp* por quilômetro quadrado é ilustrada na **tabela 4.21** e no histograma lognormal da **figura 4.32**.

**Tabela 4.21**– Frequência do Índice de poços por km<sup>2</sup> na área de estudo.

Intervalo de Classe	Frequência absoluta	Frequência relativa	Frequência acumulada	% cumulativo
1 ≤ <i>icp</i> ≤ 2	358	0,2488	358	24,86
3 ≤ <i>icp</i> ≤ 4	370	0,2571	728	50,56
5 ≤ <i>icp</i> ≤ 6	311	0,2161	1039	72,15
7 ≤ <i>icp</i> ≤ 8	196	0,1362	1235	85,76
9 ≤ <i>icp</i> ≤ 10	98	0,0681	1333	92,57
11 ≤ <i>icp</i> ≤ 12	51	0,0354	1384	96,11
13 ≤ <i>icp</i> ≤ 14	36	0,0250	1420	98,61
15 ≤ <i>icp</i> ≤ 16	16	0,0111	1436	99,72
17 ≤ <i>icp</i> ≤ 18	3	0,0021	1439	99,93
19 ≤ <i>icp</i> ≤ 20	1	0,0007	1440	100,00



**Figura 4.27** – Histograma de frequência do índice de concentração de poços por km<sup>2</sup> na área do projeto, com ajuste de lei lognormal.

Para o conjunto de poços cadastrados na área, os números acumulados revelam: i) cerca de 25% da amostra (358), com até 2 poços/km<sup>2</sup>; ii) 50% (728) com até 4 poços/km<sup>2</sup>; iii) 72% (1039) com até 6 poços/km<sup>2</sup>; iv) 92% (1333) com

até 10 poços/km<sup>2</sup>. Apenas 8% dos poços (107) se encontram em setores da área com icp de mais de 10 poços/km<sup>2</sup>. Na (**tabela 4.22**), em consonância com a dinâmica de construção de poços que vem ocorrendo nos últimos anos, esses resultados são condensados em 5 (cinco) *estágios de concentração* do icp na área, para o ano de 2009:

**Tabela 4.22** – Estágios do índice de concentração de poços na área do projeto (2009).

icp/km <sup>2</sup>	Número de poços	Estágio de concentração	Porcentagem
1 a 2	358	Baixo	24,9
3 a 4	370	Regular	25,7
5 a 6	311	Médio	21,6
7 a 10	294	Elevado	20,4
11 a 19	107	Muito elevado	7,4

A distribuição espacial do nível de concentração de poços, é ilustrada no mapa da **figura 4.28**.

#### 4.4 - Redes de Monitoramento

Foram estabelecidas, a partir dos poços cadastrados, duas redes de monitoramento:

- ✓ i) *rede de monitoramento quantitativo*, para medições de níveis de água, constituída de 288 poços, sendo 28 poços no aquífero Açú nos quais é prevista a instalação de tubos guia para acessos de medidores, pela PETROBRAS e 260 poços no aquífero Jandaíra, nos quais ainda estão sendo instalados tubos guia, em paralelo com a execução de medições de nível d'água.
- ✓ ii) *rede de monitoramento qualitativo*, constituída de 102 poços, sendo 80 poços no aquífero Jandaíra 20 poços no aquífero Açú e ainda dois poços no aquífero das aluviões.

A rede de 300 poços de monitoramento quantitativo inicialmente prevista incluía, por aquífero, uma distribuição de 10 poços no Barreiras, 30 poços no Açú e 260 poços no Jandaíra. Tendo sido demonstrado que a Formação Barreiras não se manifesta como aquífero na área do Projeto, decidiu-se que a rede de observação seria composta de 40 poços no aquífero Açú e 260 poços no aquífero Jandaíra, distribuídos de forma a cobrir, o mais amplamente possível, o domínio de estudo.

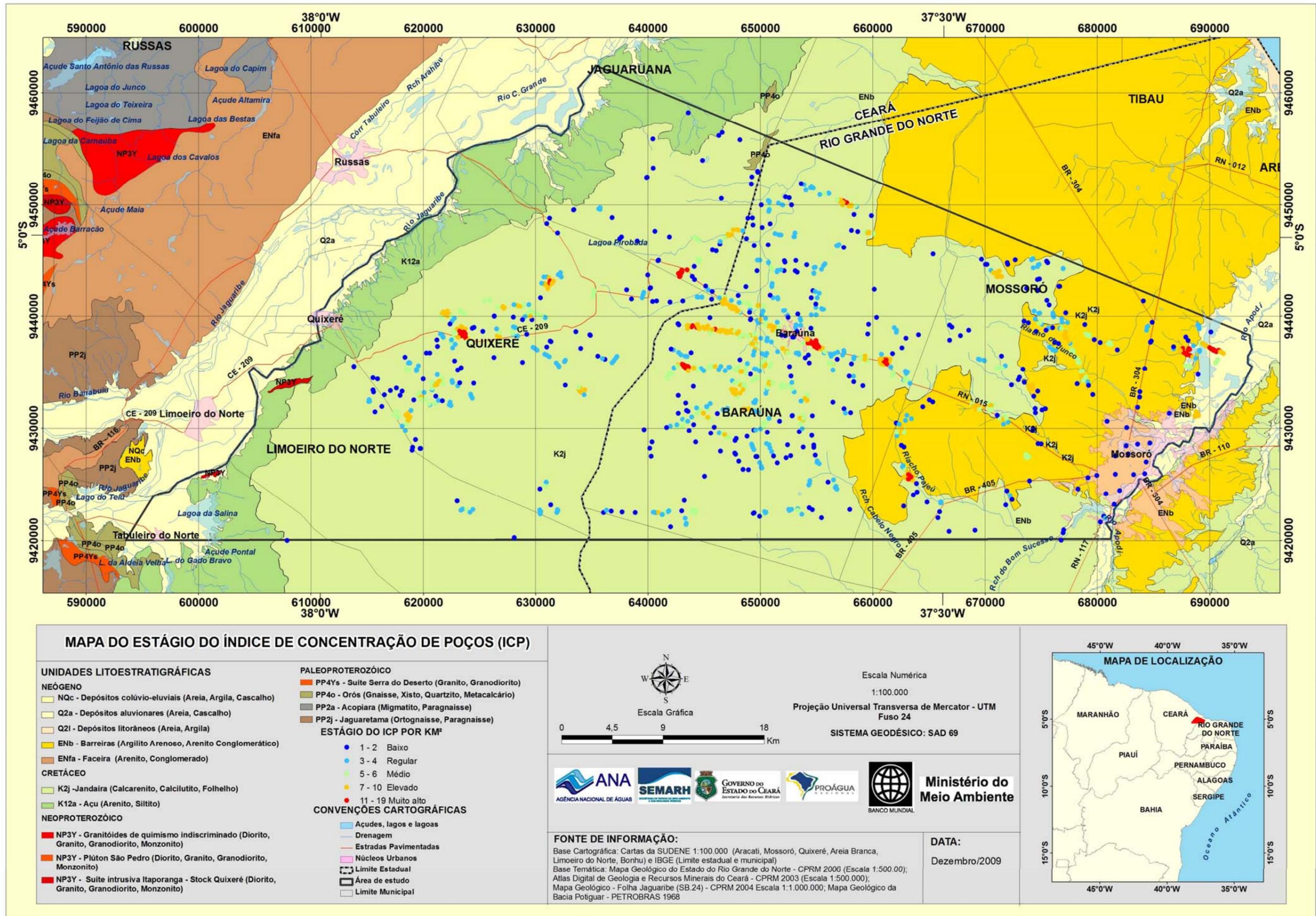


Figura 4.28 – Mapa de distribuição das faixas do índice de concentração de poços em 2009.

No aquífero Açú foram levantadas informações de 43 poços dos quais apenas 35 foram cadastrados por se acharem dentro da área do Projeto. Os 8 (oito) restantes, embora tenham contribuído com informações estratigráficas importantes, não foram cadastrados por se encontrarem fora da área do Projeto (**anexo A4.2**).

Dos 35 poços cadastrados somente foi possível incluir na rede de monitoramento do Açú na área do projeto, 28 poços, uma vez que 7 (sete) poços estão abandonados e sem condições de monitoramento. Dos 28 poços da rede de observação, 9 (nove) estão paralisados, 3 (três) não instalados e 16 (dezesesseis) em operação.

No tocante ao **nivelamento topográfico** existem na área de estudo 402 poços nivelados, sendo 107 pela COGERH, e 295 pela SEMARH. No final de setembro existiam na rede de observação, 140 poços nivelados, e foi concluído o nivelamento dos 148 poços restantes no final de novembro de 2009.

O critério principal adotado na implantação das redes de monitoramento tanto de nível quanto de qualidade da água para as análises básicas foi a cobertura mais ampla possível da área de estudo. Levou-se ainda em consideração, com base no cadastramento realizado, as características dos poços quanto à facilidade de acesso para medição de níveis e coleta de água. Particularmente para a rede de monitoramento da qualidade, foram considerados os resultados do reconhecimento hidrogeoquímico realizado durante o cadastramento.

A rede de **monitoramento de níveis** de água se acha em implantação, em paralelo com a instalação de tubos guia para introdução de medidores, tendo sido feitas medições em 88 pontos de água, sendo 28 poços com tubos guia instalados, 27 em poços sem tampa (nos quais os tubos guia serão instalados com braçadeiras) e em 33 cacimbas, nas quais não há necessidade de instalação de tubos guia.

A rede de **monitoramento de qualidade** para as **análises básicas** da água foi implantada, contemplando 80 (oitenta) poços no aquífero Jandaíra, 18 (dezoito) poços no aquífero Açú e 2 (dois) poços na aluvião.

A primeira campanha de amostragem de água para **análises químicas básicas** teve lugar em setembro 2009. No aquífero Jandaíra, embora tenha sido prevista a coleta de 80 amostras, foram efetivamente coletadas e analisadas 98 (noventa e oito) e ainda 2 (duas) amostras em aluviões.

Dos 18 poços previstos para amostragem qualitativa no aquífero Açú, a maioria dos poços não oferece condições de coleta de amostras de água. Além de 9 (nove) poços paralisados, alguns dos 16 poços em operação bombeiam diretamente para reservatórios muito elevados e de difícil acesso. Mesmo assim, na rede considerada, foram feitas 12 análises físico-químicas básicas pela CAERN, sendo (onze) datadas de maio/2009 em poços de Mossoró e uma datada de julho 2009, coletada no poço P4 de Baraúna durante o teste de aquífero.

No tocante às **análises químicas específicas**, conforme previsto nos TRs, deveriam ser coletadas 10 amostras para cada um dos três aquíferos (Aluvionares, Barreiras e Jandaíra) o que deveria totalizar 30 amostras em cada campanha e 60 amostras nas duas campanhas. Tendo sido demonstrado que a Formação Barreiras não se manifesta como aquífero na área do Projeto, a primeira campanha de amostragem realizada em setembro foi feita com a utilização de 20 kits de amostragem, envolvendo 18 pontos no aquífero Jandaíra e 2 (dois) pontos nas aluviões. Cada kit de coleta de água contempla as 3 (três) categorias de análises

previstas, a saber: i) Fenóis ii) BTEX; iii) Metais Pesados No aquífero Açú, onde os poços produtores da rede são administrados pela CAERN, foram utilizadas 12 análises físico-químicas realizadas por essa Companhia. A situação da amostragem de água realizada na 1ª campanha e a previsão para a 2ª campanha (a ser realizada na 2ª quinzena de janeiro de 2010) é mostrada na **tabela 4.23**, conforme definido pela CONSULTORA em conjunto com a CTAF.

**Tabela 4.23** – Número de amostras de água por aquífero coletadas na 1ª campanha (setembro 2009) e número previsto para a 2ª campanha (janeiro de 2010).

Categoria de Serviço/Campanha	Aquífero						Total
	Jandaíra		Açú		Aluvionar		
	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	
Análise química básica	97	80	01	14*	02	02	196
Análise de Fenóis e BTEX	20	22		14*		02	58
Análise de Metais Pesados	20	30		8**		02	60
Análise de Agrotóxicos	09	22		14*	02	02	49
Análise Isotópica	20	14		6***			40

\*(11 amostras em Mossoró, 02 em Baraúna e 01 no aquífero Açú raso).

\*\* (05 amostras em Mossoró, 02 em Baraúna e 01 no aquífero Açú raso)

\*\*\* (03 amostras em Mossoró, 02 em Baraúna e 01 no aquífero Açú raso)

Além disso, para a 2ª campanha de amostragem, serão coletadas amostras de água em pelo menos 04 (quatro) fontes na porção oeste da área de estudo, sobre a borda da Chapada do Apodi, com as quais serão realizadas análises físico-químicas básicas, fenóis e BTEX, metais pesados, agrotóxicos e isotopia. Também serão selecionados 10 pontos para a coleta de amostras para análise bacteriológica, dentre aqueles que possuem teor de nitrato mais elevado, observando a 1ª campanha.

Os critérios adotados para a escolha dos pontos de amostragem tiveram como base o levantamento das fontes potenciais de contaminação (**figura 4.29**), escolhendo-se os poços de acordo com a sua proximidade das referidas fontes. Por exemplo, postos de combustíveis, lixões, currais, granjas e outras fontes de matéria orgânica, além de perímetros de irrigação onde se utilizam produtos químicos tais como adubos e defensivos agrícolas.

No caso dos isótopos a amostragem foi realizada de modo a cobrir toda a área de estudo incluindo coleta de amostras de água em poços situados nas aluviões dos vales existentes nos extremos leste e oeste da área.

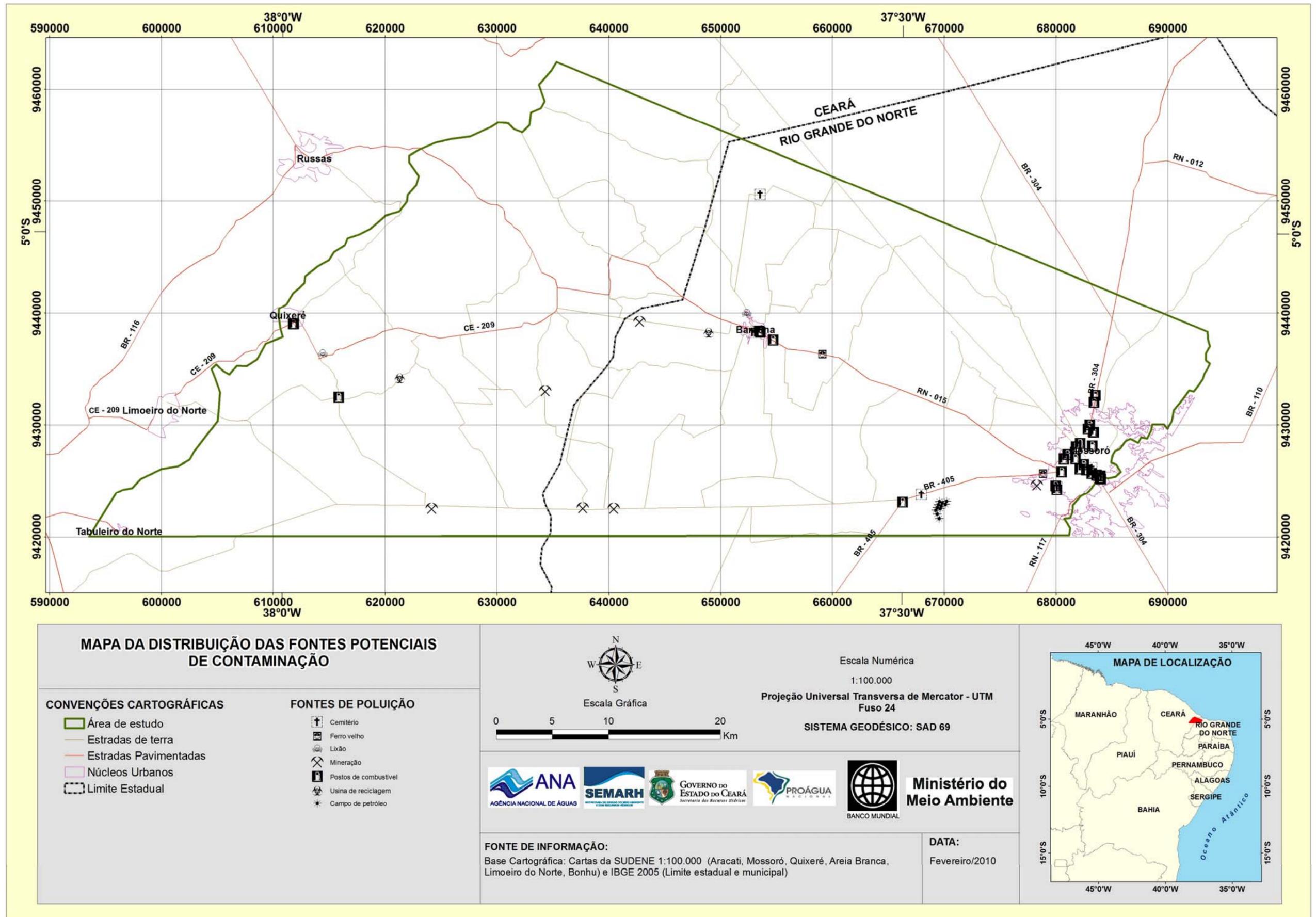


Figura 4.29 – Mapa de distribuição das Fontes Potenciais de Contaminação.

#### 4.5 – Realização de Campanhas de Medição de Níveis de Água

Nos termos de referência foram previstas duas campanhas de medição de níveis de água para realização com intervalo de 5 (cinco) meses, numa rede de 260 pontos d'água no aquífero Jandaíra e 40 pontos nos aquíferos Açú e Barreiras. A evolução dos conhecimentos apontou para a conveniência de considerar para monitoramento quantitativo apenas os aquíferos Jandaíra e Açú, excluindo-se o Barreiras. Para viabilizar as medições, previu-se a instalação de tubos guia para introdução de medidores de níveis nos poços das redes selecionadas (no Jandaíra pela CONSULTORA e no Açú pela PETROBRÁS). Somente a consultora instalou tubos guia na rede selecionada no aquífero Jandaíra. No aquífero Açú não foram instalados tubos guia. Portanto, as duas campanhas de medições de níveis de água ficaram restritas ao aquífero Jandaíra.

Devido ao excesso de chuva, com paralisação de atividades nas propriedades agrícolas até meados de julho não foi possível concluir as instalações de tubos guia como previsto no cronograma. De fato, somente a partir de julho é que teve início a instalação de tubos guia nos poços para acesso de medidores e progressiva execução de medidas de nível estático. Assim sendo a conclusão da **primeira campanha** de medições, cobrindo toda a rede de 260 pontos de medição de nível, somente foi concretizada no final do período de 15 de julho a 15 de outubro de 2009.

A exigência dos Termos de Referência quanto à necessidade de obedecer ao intervalo de 5 (meses) meses entre as medições, motivou a programação do início da segunda campanha para 15 de janeiro de 2010. Como já havia acessos para os medidores de nível em toda a rede, a segunda campanha foi concluída em apenas 15 dias, ou seja, no período de 15 a 30 de janeiro de 2010.

Excluídos 154 poços abandonados, 168 paralisados e 140 não instalados, pode-se dizer que as medições mensais de nível estático refletem a profundidade média da superfície das águas subterrâneas no trimestre 15 de julho a 15 de outubro 2009, resultante dos bombeamentos praticados através dos 938 poços em operação. Nesse período praticamente não houve excedente hídrico capaz de produzir recarga significativa.

Considerando que o ponto médio do referido trimestre coincide com o final de agosto e que todas as referências de cargas hidráulicas estão sendo feitas a valores médios, em escala mensal, por questões de homogeneidade, a **potenciometria trimestral** da **primeira campanha** será referida, de agora em diante neste trabalho, como **potenciometria de agosto 2009**. Isso se justifica para fins comparativos com os valores médios dos níveis de água medidos em outros meses de 2009 e particularmente com os valores médios dos níveis de janeiro de 2010.

Os valores das medições mensais de nível de água (**tabela 4.24**) mostraram que, em média, os níveis estáticos se aprofundaram de agosto até novembro de 2009, sofrendo significativa elevação em dezembro e novamente baixando em janeiro de 2010. Os valores mais baixos ocorreram no mês de novembro de 2009. Há que considerar que esses dados dizem respeito a um número diferente de poços. Seja como for, em dezembro a elevação local do nível

(apenas 16 poços), pode ser atribuída principalmente a uma redução dos bombeamentos nesse mês, como é de praxe na região, embora também não se possa descartar a possibilidade de contribuições por recarga natural já que dezembro se constitui no mês que antecede o início do novo período chuvoso na região.

As medições de níveis de água realizadas em novembro e dezembro de 2009 contemplam um número relativamente pequeno de poços e foram feitas fora do âmbito das duas principais campanhas. Elas fornecem, no entanto, informações complementares em escala mais ou menos localizada.

**Tabela 4.24** – Valores médios mensais das profundidades do nível estático do aquífero Jandaíra entre agosto 2009 e janeiro 2010 e variação média do nível estático em relação a janeiro de 2010, nos poços indicados.

Parâmetro	2009					2010
	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro
Num poços	51	139	70	37	16	260
NEx	10,7	15,4	20,0	21,6	15,2	21,1
NE1	15,1	20,6	26,4	26,2	17,1	21,1
$\Delta h$	4,4	5,2	6,4	4,6	1,9	0

NEx= valor médio no mês x de 2009; NE1 = valor médio no mês de janeiro 2010.

#### 4.6 – Elaboração de mapas potenciométricos

Pelas razões já expostas no item anterior foram elaborados mapas potenciométricos apenas para o aquífero Jandaíra, com o objetivo de caracterizar o comportamento do fluxo das águas subterrâneas no ano de 2009.

O escoamento natural da água subterrânea em um aquífero é governado pela equação da continuidade, que se expressa da seguinte maneira:

$$\text{Entrada} - \text{Saída} = \text{Variação no armazenamento} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

**Entrada:** corresponde à recarga natural, que (no caso da área em estudo) tem duas origens:

- ✓ i) **recarga difusa** produzida por infiltrações difusas do excedente do balanço hídrico, que se processam extensivamente sobre toda a região;
- ✓ ii) **recarga concentrada** em zonas preferenciais (produzida por canalização das águas pluviais diretamente para as estruturas abertas até a superfície do terreno pelos fenômenos cársticos).

A recarga concentrada é armazenada, em um primeiro estágio, nos grandes espaços vazios representados principalmente por cavernas e sumidouros. A grande velocidade de fluxo da água canalizada para esses amplos espaços vazios produz um armazenamento muito rápido e uma ascensão diferenciada da carga potenciométrica nesses ambientes. Formam-se, assim, verdadeiros “**cones de injeção**” a partir dos quais o meio cárstico fissural adjacente é

realimentado em um segundo estágio no qual essas águas são incorporadas ao escoamento natural.

**Saída:** as saídas de água do aquífero Jandaíra na área do projeto se processam através de escoamento natural e de escoamento artificial criado pelo bombeamento dos poços. Se as retiradas de água através de poços forem aumentadas o escoamento natural será reduzido.

Portanto, para uma condição de **equilíbrio de longo prazo**, ou seja, para uma exploração sustentável, é necessário que a **descarga bombeada** não ultrapasse a descarga de **escoamento natural** a qual, por sua vez, é igual à **recarga** ou entrada de água no aquífero.

Isso não significa que não se possa (**no curto prazo**) entrar na reserva permanente, como é o caso em períodos de longa estiagem quando a recarga natural é praticamente nula ou inferior à recarga média de longo período. Isto porque nos anos favoráveis a recarga natural é superior à média de longo prazo e, portanto, compensa os déficits dos anos secos.

No longo prazo, se as retiradas de água através de poços permanecerem por muitos anos acima das entradas por recarga natural, o escoamento natural na área em exploração será reduzido e o aquífero entrará em regime de exaustão. Se houver um dispositivo de monitoramento de níveis na área em exploração, o processo de exaustão será evidenciado pelo contínuo decréscimo dos níveis ano após ano e medidas corretivas podem ser tomadas.

#### 4.6.1 – Mapa potenciométrico da primeira campanha

O mapa potenciométrico da **primeira campanha (agosto 2009)** é apresentado na **figura 4.30**. Esse mapa, interpolado a partir dos 260 pontos de água da rede de monitoramento, revela tipicamente a situação esperada para a superfície das águas subterrâneas de um aquífero heterogêneo em fase de exploração, por cerca de 950 poços em operação no ano de 2009. Ou seja, um grande número de **altos** e **baixos** caracterizados por curvas fechadas de distribuição de cargas hidráulicas, incluindo:

- altos de **fluxos divergentes** se encontram nas linhas divisórias de água subterrânea aproximadamente coincidentes com os limites entre as bacias hidrográficas e também, ao que parece, nas proximidades de estruturas cársticas.
- baixos de **fluxos convergentes**, que podem incluir **cones residuais de depressão**, produzidos pelas recuperações de níveis de poços paralisados ou abandonados há algum tempo, e também **cones ativos de depressão** em estágio crescente de evolução transiente da carga hidráulica por conta dos bombeamentos dos poços existentes em operação no momento retratado pelo respectivo mapa potenciométrico.

O mapa potenciométrico de agosto 2009 (**figura 4.31**) revela que:

- ✓ Existem duas linhas divisórias principais de fluxo subterrâneo aberto, que coincidem aproximadamente com os divisores de água superficial entre a bacia hidrográfica do riacho Mata Fresca no centro da área e as bacias do Apodi, a leste e do Jaguaribe a oeste.

- ✓ Além disso, parecem coexistir na superfície potenciométrica fluxos **convergentes** para poços evidenciados por curvas fechadas indicativas de **cones de depressão** e fluxos **divergentes** evidenciados por curvas fechadas indicativas de **altos potenciométricos** comparáveis a verdadeiros “**cones de injeção**”.
- ✓ Ao que tudo indica esses **altos potenciométricos** estão associados com a **recarga canalizada** por drenagem de águas pluviais diretamente para os grandes vazios (cavernas, dolinas, sumidouros, etc) criados localmente pelos fenômenos de dissolução.
- ✓ É sem dúvida a grande capacidade de armazenamento dessas estruturas que favorece (mesmo na ausência de cursos de água) a rápida drenagem das águas pluviais.
- ✓ Na região de Baraúna essa capacidade de drenagem das águas pluviais para o ambiente subterrâneo foi comprovada durante o teste de aquífero realizado nos poços de pesquisa construídos em Furna de Pedra, no âmbito do Projeto (item 4.5.4) e ainda por dados de monitoramento de níveis de poços realizado pela SEMARH na região de Baraúna.

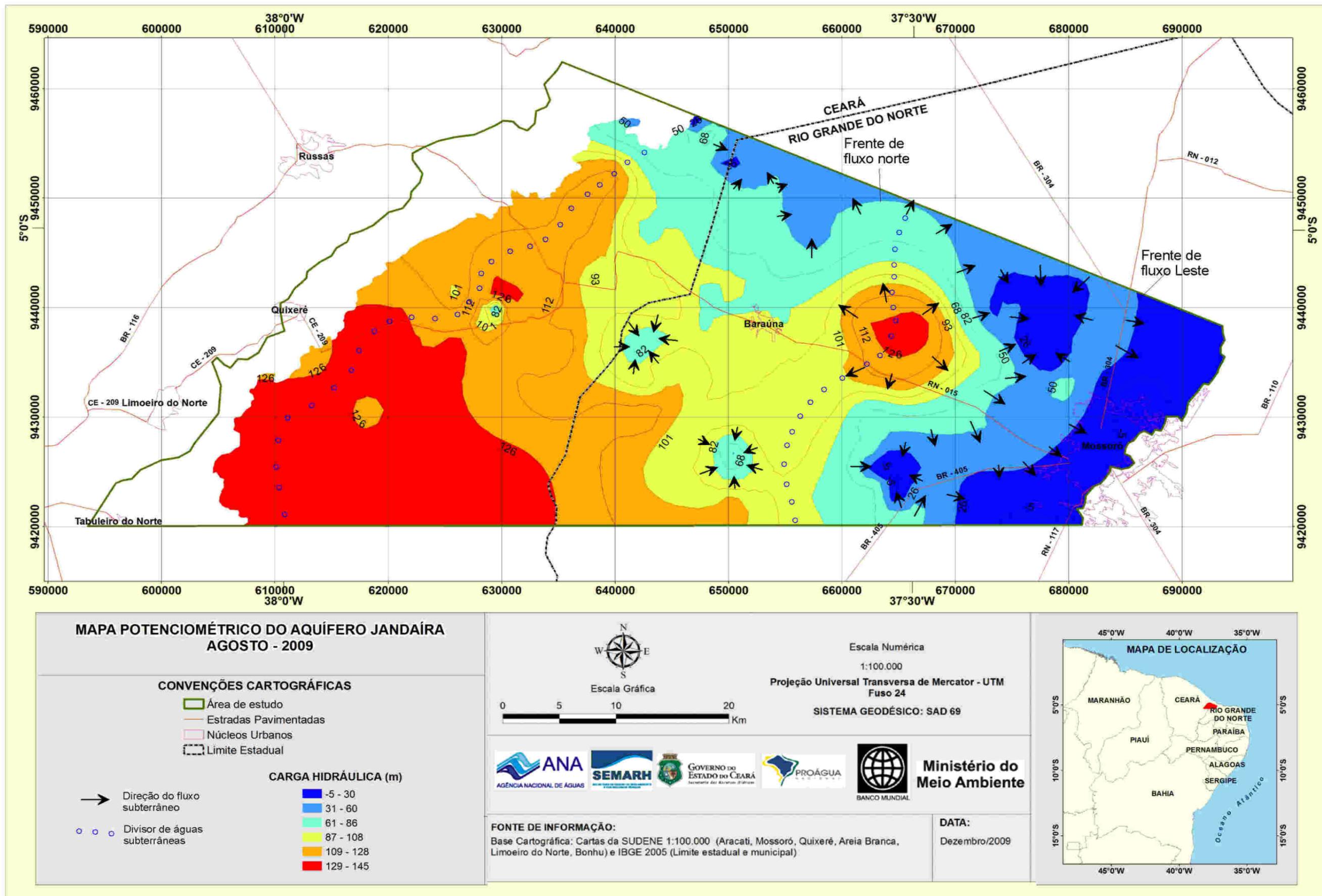


Figura 4.30 - Potenciometria do aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi em agosto 2009.

### **Escoamento natural**

Apesar da intensiva exploração de água subterrânea do aquífero Jandaíra através de poços, ainda se observa na área de estudo um escoamento natural significativo.

De fato, o mapa potenciométrico de agosto de 2009 (**figura 4.30**) mostra duas frentes de fluxo aberto: uma a leste do divisor de águas subterrâneas Mata Fresca – Apodi, denominada – **Frente Leste** – com largura L, de 57 km (**tabela 4.25**).

**Tabela 4.25** – Frente Leste, de fluxo subterrâneo aberto em agosto 2009.

<b>L (m)</b>	<b>dl (m)</b>	<b>dh (m)</b>	<b>i =dh/dl</b>	<b>K<sub>h</sub> m/dia</b>	<b>b (m)</b>	<b>VEN= KbiL m<sup>3</sup>/dia</b>
2374	442	10	0,022624	1,2	400	25781
10920	250	10	0,040	1,2	400	209664
3758	258	10	0,03876	1,2	400	69916
7294	220	10	0,045455	1,2	400	159142
3275	439	10	0,022779	1,2	400	35809
3775	711	10	0,014065	1,2	400	25485
6652	1600	10	0,00625	1,2	400	19956
3769	568	10	0,017606	1,2	400	31851
10500	365	10	0,027397	1,2	400	138082
4800	218	10	0,045872	1,2	400	105688
<b>57117</b>						<b>821374</b>
						<b>9,51 m<sup>3</sup>/s</b>

Com gradiente hidráulico ( $i=dh/dl$ ) variável de 6 a 46 m/km a vazão de escoamento natural (VEN) ao longo da referida frente (na qual o aquífero apresenta espessura média  $b=400$  m e condutividade hidráulica  $K_h=1,2$  m/dia) é estimada em 9,51 m<sup>3</sup>/s.

Esse fluxo se realiza nas direções gerais SE e NE, sendo ainda realimentado por três zonas de recarga que se manifestam sob a forma de altos orientados na direção NE-SW, com cargas máximas de 50 m no sul, 100 m na porção intermediária e 70 m no norte, constituindo uma linha divisória secundária de águas subterrâneas paralela ao rio Apodi (**figura 4.30**).

Outra frente de fluxo subterrâneo aberto e que escapa da área do projeto – denominada **Frente Norte** - se manifesta a noroeste, na bacia do riacho Mata Fresca, ao longo de uma extensão de 35 km com gradiente hidráulico da ordem de 7 a 38 m/km e gera uma descarga de 2,1 m<sup>3</sup>/s (**tabela 4.26**).

**Tabela 4.26** – Frente Norte, de fluxo subterrâneo aberto, em agosto 2009.

L (m)	dl (m)	dh (m)	$i = dh/dl$	Kh m/dia	b (m)	VEN= KbiL (m <sup>3</sup> /dia)
6326	260	10	0,0385	1,8	199	87153
5000	2400	10	0,0042	1,8	199	7463
4086	700	10	0,0143	1,8	199	20909
3760	1500	10	0,0067	1,8	199	8979
6783	850	10	0,0118	1,8	199	28584
3985	861	10	0,0116	1,8	199	16579
5000	1500	10	0,0067	1,8	199	11940
<b>34940</b>						<b>181606</b>
						<b>2,1 m<sup>3</sup>/s</b>

#### 4.6.2 – Mapa potenciométrico da segunda campanha

O mapa potenciométrico da **segunda campanha** de medições, definido como **mapa potenciométrico de janeiro 2010**, é apresentado na **figura 4.31**.

Pode-se notar que esse mapa exibe em termos de distribuição de cargas hidráulicas um comportamento bastante semelhante ao mapa de **agosto de 2009**. De fato, em ambos estão presentes duas zonas divisórias de águas subterrâneas que coincidem aproximadamente com os dois divisores de águas superficiais das três bacias hidrográficas da área do projeto. Fora delas predominam zonas fechadas que incluem **cones de depressão** resultantes de bombeamento e **cones de injeção** indicativos de zonas preferenciais de recarga concentrada.

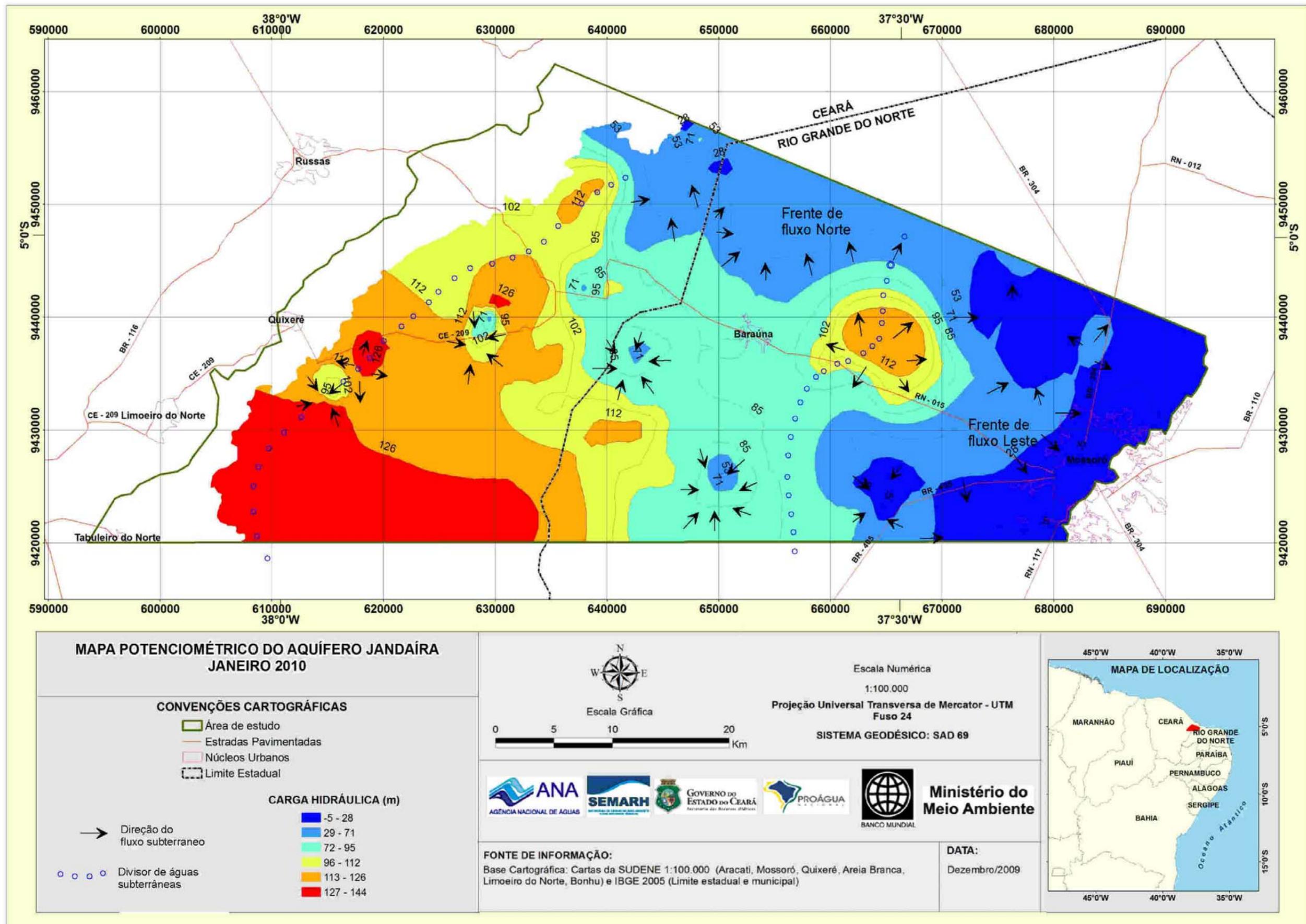
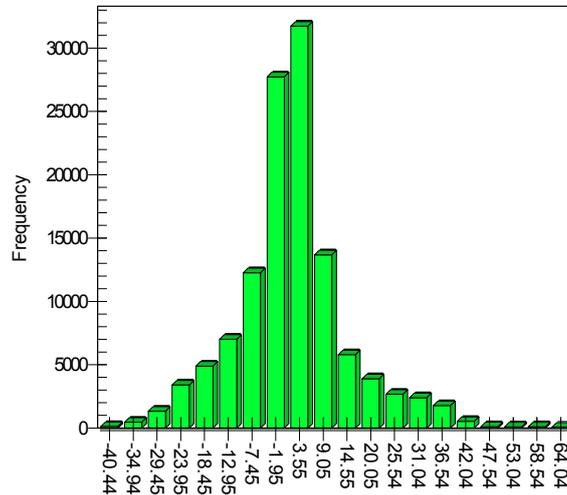


Figura 4.31 – Potenciometria do aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi em Janeiro 2010.

### 4.6.3 – Diferenças de cargas entre as duas campanhas

Em primeiro lugar os resultados globais obtidos por **interpolação** das medições de níveis realizadas nas duas campanhas, revelam uma diferença média de carga hidráulica (cargas de agosto 09 – cargas de janeiro 2010) de 5,4 m e mediana de 4 m, estando a distribuição de frequência ilustrada na **figura 4.32**.



**Figura 4.32** – Histograma de distribuição normal de frequência dos dados interpolados de variação do nível estático  $\Delta H$  do aquífero Jandaíra entre agosto 2009 e janeiro de 2010 em escala da área do projeto.

O resumo estatístico dos 260 valores da profundidade do nível estático medido (na área do projeto) nas duas campanhas e a respectiva variação num intervalo de 150 dias (30 de agosto de 2009 e 30 de janeiro de 2010, são mostradas na **tabela 4.27**.

**Tabela 4.27** – Resumo estatístico dos valores medidos de profundidade do nível estático nas duas campanhas de medição na Chapada do Apodi.

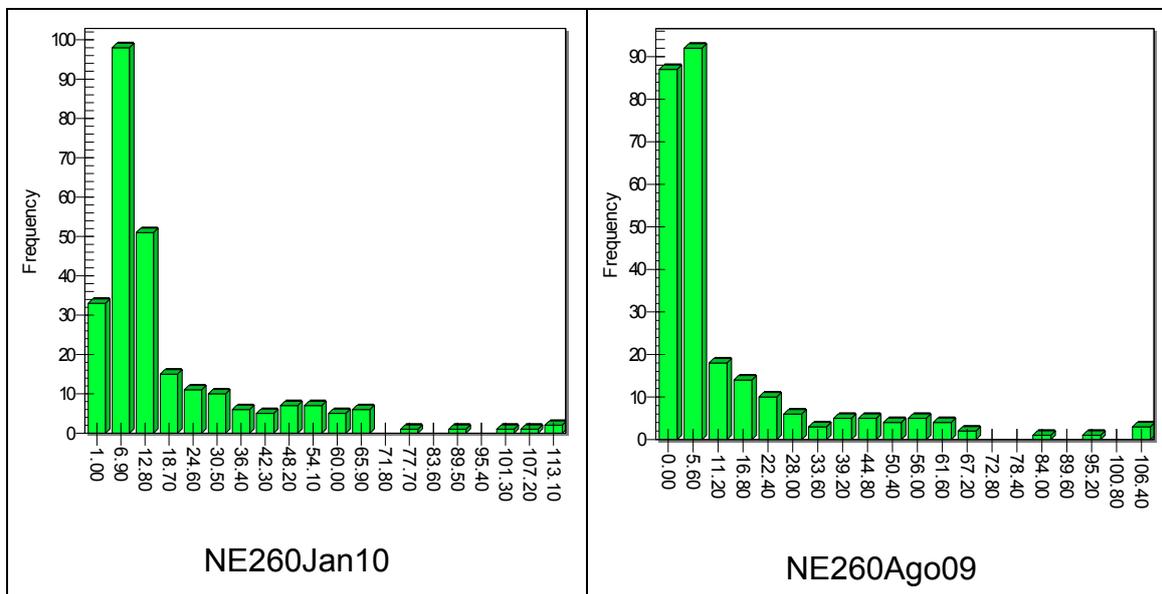
Campanhas e Variação	Média	Mediana	Desvio Padrão	Min	Max
Agosto 2009*	15,2	8,0	19,7	0	112
Janeiro 2010	20,6	12,0	20,8	1	119
Variação $\Delta H$	5,4	4,0	43,5	-18	53

\*Trimestre 15 de julho a 15 de outubro (centrado em agosto 2009).

Os fortíssimos desvios padrão traduzem claramente a dispersão dos valores que refletem a situação real observada dos níveis estáticos medidos, cuja variação oscila entre 0 m e 112 m em agosto 2009 e entre 1 m e 119 m em janeiro de 2010. Os altos valores de profundidade do nível estático (112m em agosto e 119 m em janeiro 2010) sugerem que muitos poços já estão explotando águas das reservas permanentes do aquífero Jandaíra. Trata-se de uma situação local e não significa que esteja ocorrendo “mineração” ou superexplotação do aquífero. Aliás, esse fato é evidenciado pela existência das frentes de escoamento natural, anteriormente analisadas valendo ainda

lembrar que o escoamento natural inclui as reservas permanentes as quais não são estáticas, mas se encontram sempre em movimento.

Os histogramas de frequência das profundidades medidas dos níveis estáticos nas duas campanhas apresentados na **figura 4.33** indicam distribuição de probabilidade lognormal.



**Figura 4.33** – Histogramas ilustrativos da distribuição de frequência (assimétrica tipo lognormal) das profundidades dos níveis estáticos na rede de monitoramento de 260 poços no aquífero Jandaíra entre agosto de 2009 e janeiro de 2010.

Em consonância com a redução geral de carga hidráulica verificada entre as duas campanhas de medição de níveis, ocorreram reduções nas vazões de escoamento natural. Por exemplo, na bacia do Apodi, a *Frente Leste* de escoamento aberto, que exibia largura de 57 km e descarga de 9,51 m<sup>3</sup>/s em agosto 2009, teve esses parâmetros reduzidos, respectivamente, para 44 km e 8,3 m<sup>3</sup>/s em janeiro de 2010, ou seja, houve uma redução de 1,2 m<sup>3</sup>/s no fluxo natural. A *Frente Norte*, caracterizada em agosto de 2009 por uma largura de 35 km e descarga natural de 2,1 m<sup>3</sup>/s, apresentou em janeiro de 2010, largura de 25 km e descarga natural de 1,8 m<sup>3</sup>/s. A redução do fluxo nessa frente foi de 0,3 m<sup>3</sup>/s.

A distribuição espacial da variação de carga hidráulica entre as duas campanhas de medição de nível na área do projeto é ilustrada na **figura 4.34**. Fica claro que essa distribuição é fortemente influenciada por bombeamentos e que a partir dela **não há como caracterizar a variação sazonal da superfície freática** do Jandaíra, como seria o caso se não existissem os poços em bombeamento.

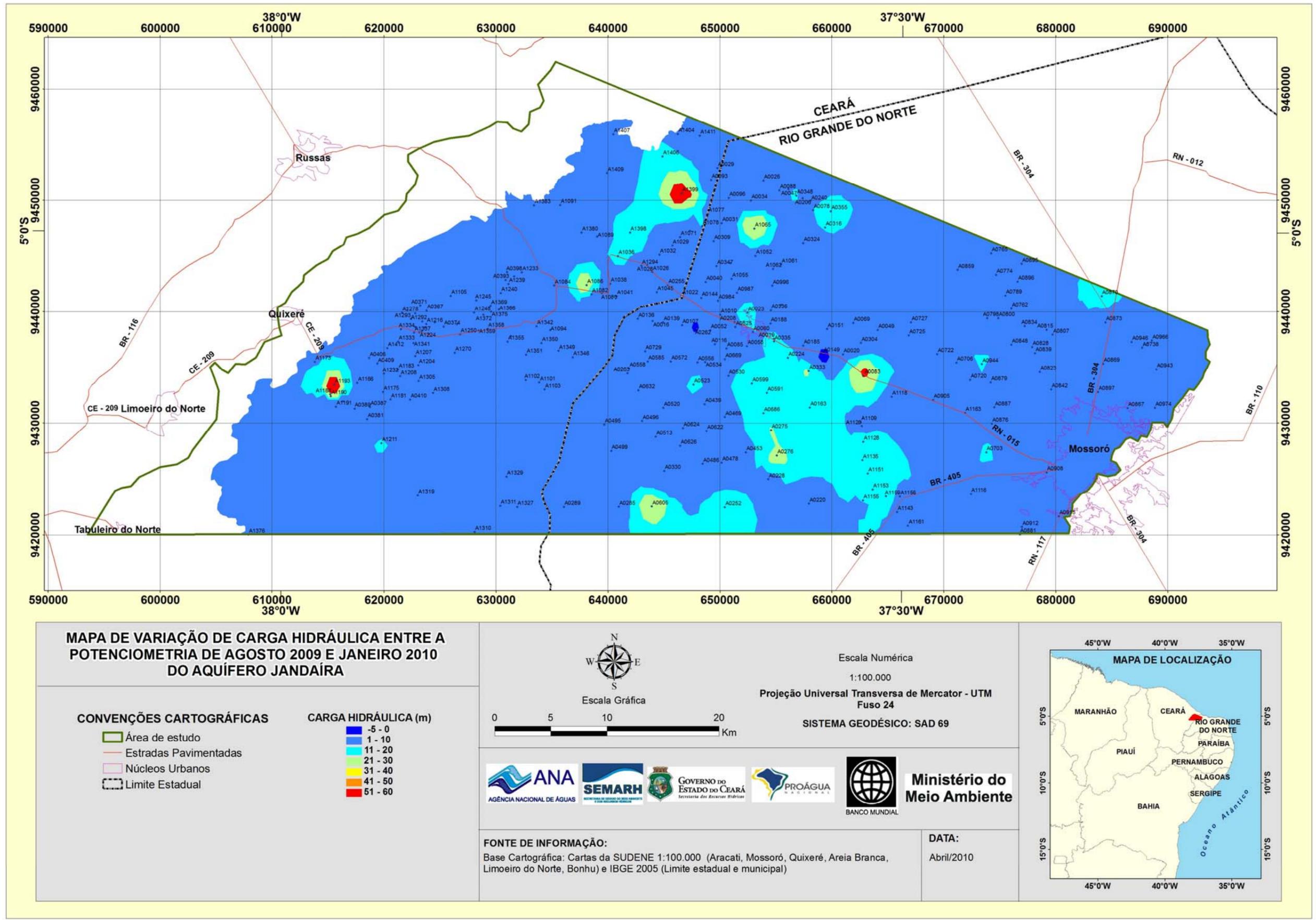


Figura 4.34 – Variação  $\Delta H$  de carga hidráulica entre a potenciometria de agosto 2009 e janeiro 2010 na área do projeto.

#### 4.7 – Balanço hídrico

O balanço hídrico descrito no presente item contempla a região do Projeto Apodi, com uma superfície de 2538 km<sup>2</sup> na zona oeste da Bacia Potiguar, estando 87% dessa área (2205 km<sup>2</sup>) sobre a Chapada do Apodi. Para atender aos objetivos da gestão compartilhada dos recursos de água subterrânea entre os Estados do Ceará e Rio Grande do Norte o balanço hídrico é apresentado nas três diferentes porções de bacias hidrográficas existentes na área de estudo que são:

- ✓ A1: Bacia do Rio Jaguaribe – CE (518 km<sup>2</sup>)
- ✓ A2: Bacia do Riacho Mata Fresca – CE/RN (1325 km<sup>2</sup>)
- ✓ A3: Bacia do Rio Apodi - RN (695 km<sup>2</sup>)

Nota-se que o recorte geográfico adotado toma como referência, as linhas divisórias de água superficial das bacias hidrográficas próprias de cada um dos 2 (dois) Estados, as quais também separam a bacia do Riacho Mata Fresca, comum aos dois Estados (**figura 4.35**).

Assim sendo, o balanço hídrico geral é complementado por balanços específicos em cada uma das 3 (três) porções de bacias hidrográficas consideradas.

##### 4.7.1 – Dados e Métodos Utilizados

Na elaboração do balanço hídrico foram usados: i) dados de evapotranspiração média diária em postos pluviométricos da região, segundo Hargreaves (Cunha & Milo, 1984); ii) dados pluviométricos levantados no site da Agência Nacional de Águas – ANA Hidroweb; iii) dados fluviométricos disponíveis em duas estações de medição de descargas no Apodi (Pedras de Abelhas e Mossoró) e uma estação no baixo Jaguaribe no posto fluviométrico de Peixe Gordo. Esses dados foram analisados com o foco na avaliação do fluxo básico.

Do acervo total de 9 (nove) postos pluviométricos existentes no território dos municípios envoltos da área do projeto, somente 7 (sete) exercem influência sobre a área de interesse. São eles:

- i) Mossoró e Baraúna no Rio Grande do Norte;
- ii) Jaguaruana, Russas, Quixeré, Limoeiro do Norte e Tabuleiro do Norte, no Ceará.

Os dados do Ceará são muito mais completos do que os dados do Rio Grande do Norte. Adotou-se como princípio na escolha do período do balanço, a necessidade de uma série de 30 anos de dados comuns aos 7 (sete) postos influentes sobre a área de estudo, contemplando os dados mais recentes. Foi assim escolhido o período de 30 anos, de janeiro de 1979 a dezembro 2008.

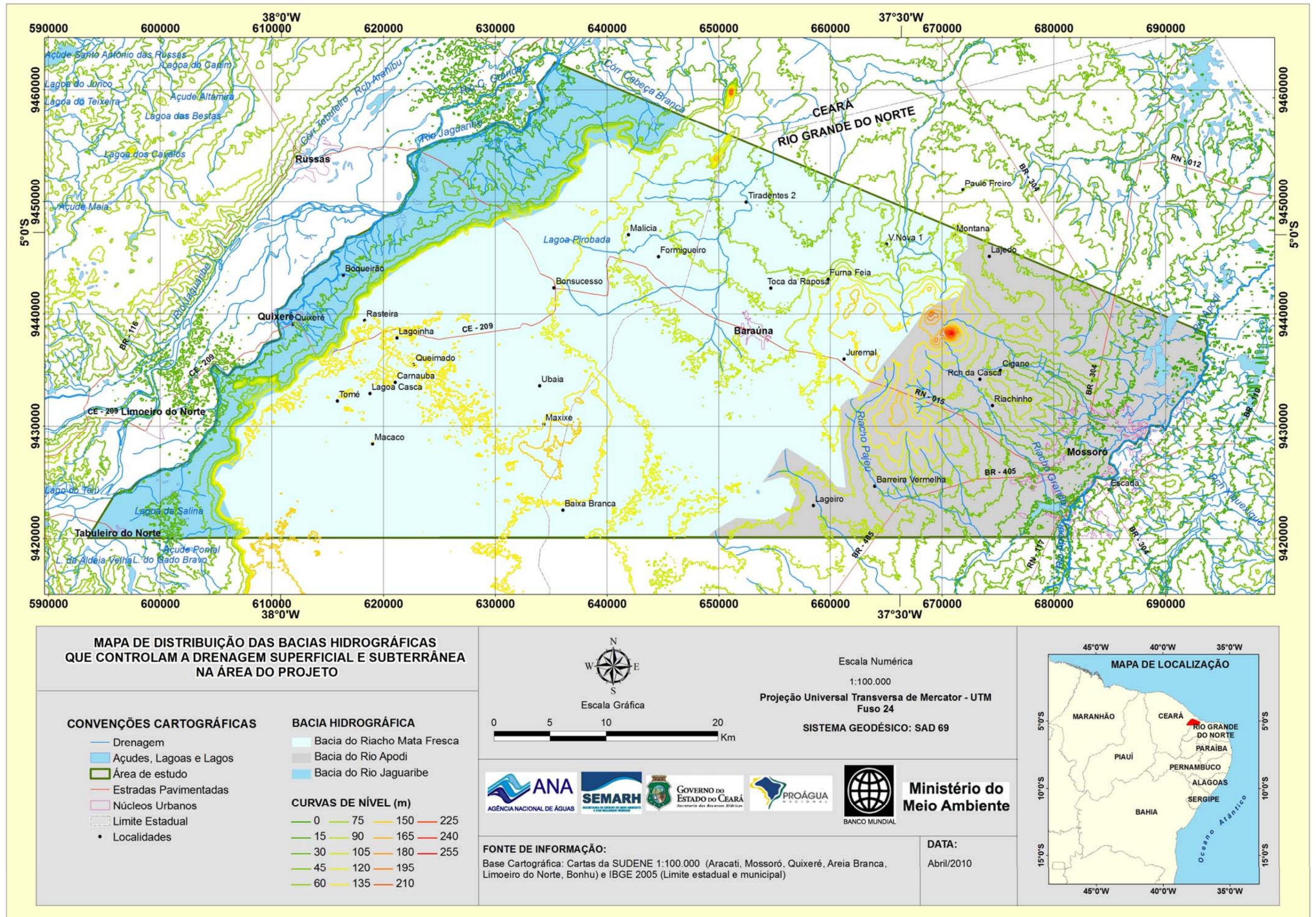


Figura 4.35 – Mapa de distribuição das bacias hidrográficas que controlam a drenagem superficial e subterrânea na área do projeto.

O balanço hídrico foi feito pelo método de Thornthwaite, utilizando a equação:

$$P+RU=ETR+EX \quad (4.1)$$

$P$  = precipitação em mm;

$RU$  = reserva útil de água utilizada pelas plantas retida no solo;

$ETR$  = evapotranspiração real em mm;

$EX$  = excedente de água (escoamento superficial + infiltração) em mm.

$$EX = R + I;$$

$R$  = escoamento superficial direto para os rios (mm);

$I$  = infiltração profunda que alcança o aquífero (mm).

Admite-se ainda que a evapotranspiração real é menor ou igual à evapotranspiração potencial ( $ETR \leq ETP$ ). A evapotranspiração real é calculada por comparação da ETP com a chuva, conforme se indica a seguir:

$$\begin{cases} \text{Quando } P > ETP \Rightarrow ETR = ETP \\ \text{Quando } P < ETP \Rightarrow ETR = P \end{cases} \quad (4.2)$$

#### **Cálculo do excedente hídrico:**

1. Inicia-se o balanço supondo completa a reserva utilizável pelas plantas e adotando  $RU = \text{solo} = 100$  mm
2. Foi empregado o algoritmo seguinte:

Se $P-ETP+\text{solo} \geq 100$	$\text{Solo} \leftarrow 100$ $ETR \leftarrow ETP$ $EX \leftarrow (P-ETP+\text{solo})-100$	Há excedente da reserva utilizável pelas plantas (infiltração)
Se $P-ETP+\text{solo} > 0$	$\text{Solo} \leftarrow (P-ETP+\text{solo})$ $ETR \leftarrow P$ $EX \leftarrow 0$	Há variação da reserva utilizável pelas plantas
Se $P-ETP+\text{solo} \leq 0$	$\text{Solo} \leftarrow 0$ $ETR \leftarrow P$ $EX \leftarrow 0$	Há déficit de água no solo

Da equação (4.1) resulta que o excesso de água é dado pela expressão:

$$EX = P-ETR+RU \quad (4.3)$$

#### **Cálculo do escoamento:**

Depois de avaliado o excesso de água ( $I+R$ ) o escoamento subterrâneo foi estimado aplicando a este excesso uma lei de decaimento exponencial do tipo

$q(t-t_0) = q_0 \exp[-\alpha(t-t_0)]$  usando os coeficientes de recessão regionais avaliados nas bacias hidrográficas dos rios Jaguaribe e Apodi, nos postos pluviométricos mais próximos da área de estudo, ou seja, rio Jaguaribe em Peixe Gordo e rio Apodi em Mossoró.

#### 4.7.1.1 – Evapotranspiração Potencial

Os valores de evapotranspiração potencial média diária segundo Hargreaves (Cunha & Milo, 1984) e os respectivos totais mensais são apresentados na **tabela 4.28** para os 9 (nove) postos pluviométricos existentes nos municípios pelos quais se distribui a área de estudo.

Regionalmente os valores médios diários de evapotranspiração potencial oscilam entre 4 mm e 5,3 mm no período chuvoso (fevereiro a maio) e de 3,8 mm a 6,1 mm no restante do ano com média de 5,3 mm/dia. A média anual na região é de 1835,8 mm, o que corresponde globalmente a 5 mm/dia.

#### 4.7.1.2 – Precipitações

Os dados pluviométricos levantados no Sistema de Informações Hidrológicas disponibilizado no Portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas – ANA - correspondem a séries de chuvas diárias envolvendo diferentes períodos, com extensões variáveis de 21 a 98 anos, algumas delas apresentando muitas lacunas. As 9 (nove) estações pluviométricas existentes nos municípios ligados à área de estudo, com indicação dos períodos de dados disponíveis e das entidades responsáveis e operadoras (ANA, CPRM, FUNCEME, EMPARN), são mostradas nas **tabelas 4.28 e 4.29**.

**Tabela 4.28** – Evapotranspiração potencial média diária em 9 postos pluviométricos de interesse na região do Projeto Apodi (segundo Hargreaves).

Código Nacional	Município	UTM_E	UTM_N	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	
537037	Mossoró	682873	9422836	5,8	5,6	5,2	4,4	3,8	3,5	3,5	4,1	5	5	6	6	
537003	Baraúna	651496	9437962	5,8	5,6	5,2	4,4	3,8	3,5	3,5	4,1	5	5	6	6	
437006	Jaguaruana	634916	9465636	5,6	5,2	4,2	3,7	4,3	4	4,3	5,4	5,9	5,9	5,9	6,1	
437010	Russas	614567	9454614	5,6	5,2	4,2	3,7	4,3	4	4,3	5,4	5,9	5,9	5,9	6,1	
537041	Quixeré	612696	9439876	6,1	5,3	4,3	4,2	3,9	3,9	4,6	5,5	6,1	6,5	6,5	6,5	
538009	Limoeiro do Norte	599752	9432525	6,1	5,3	4,3	4,2	3,9	3,9	4,6	5,5	6,1	6,5	6,5	6,5	
538069	Tabuleiro do Norte	596040	9419632	6,1	5,3	4,3	4,2	3,9	3,9	4,6	5,5	6,1	6,5	6,5	6,5	
537036	Gov. Dix-Sept Rosado	664520	9397388	6	5,6	4,7	4,1	4	4,1	4,4	5,2	6,1	6,4	6,5	6,3	
437000	Aracati	636816	9494809	4,7	4,5	4,1	3,9	3,8	3,7	4	4,5	4,8	5,1	5	4,8	
	<b>Média Regional</b>			<b>5,8</b>	<b>5,3</b>	<b>4,5</b>	<b>4,1</b>	<b>4,0</b>	<b>3,8</b>	<b>4,2</b>	<b>5,0</b>	<b>5,7</b>	<b>5,9</b>	<b>6,1</b>	<b>6,1</b>	
	Número de dias			31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	
	ETP/mês			178,4	148,1	139,5	122,7	123,0	115,0	130,2	155,7	170,0	181,9	182,7	188,8	
	<b>Total ano</b>															<b>1835,8</b>

**Tabela 4.29** – Estações pluviométricas da região do Baixo Jaguaribe e Chapada do Apodi levantadas no Portal Hidroweb da ANA.

NR	Código Nacional	Nome da Estação	Município	Long	Lat	Alt	UTME	UTMN	Responsável	Operadora	Série	Anos
1	00537037	Mossoró	Mossoró	37°21'44"	5°13'10"		682873	9422836	ANA	CPRM	1986-2006	21
2	00537003	Baraúna	Baraúna	37°38'	5°5'	110	651496	9437962	EMPARN	EMPARN	1962-1991	30
3	00437006	Jaguaruana	Jaguaruana	37°47'	4°50'	15	634916	9465636	FUNCEME	FUNCEME	1912-2009	98
4	00437010	Russas	Russas	37°58'	4°58'	20	614567	9454614	FUNCEME	FUNCEME	1962-2009	48
5	00537041	Quixeré	Quixeré	37°59'	5°4'		612696	9439876	FUNCEME	FUNCEME	1981-2009	29
6	00538009	Limoeiro do Norte	Limoeiro do Norte	38°6'	5°8'	35	599752	9432525	FUNCEME	FUNCEME	1912-2009	97
7	00538069	Tabuleiro do Norte	Tabuleiro do Norte	38°8'	5°15'		596040	9419632	FUNCEME	FUNCEME	1974-2009	36
8	00537036	Gov. Dix-Sept Rosado	Gov. Dix-Sept Rosado	37°30'54"	5°27'		664520	9397388	ANA	CPRM	1986-2009	24
9	00437000	Aracati	Aracati	37°46'	4°34'		636816	9494809	FUNCEME	FUNCEME	1912-2008	97

Embora no Estado do Ceará, as séries de chuvas sejam bastante completas, faltam dados nos anos 1979 e 1980 em Quixeré. No Rio Grande do Norte a situação é mais difícil, com ausência de dados em Mossoró nos anos de 1979 a 1982 e em 1986. Em Baraúna faltam dados nos anos de 1979, 1989, 1990 e todo o período de 1991 a 2008. Essas lacunas não permitem obter para os 7 (sete) postos influentes sobre a área de estudo, um período comum de 30 anos de informações diárias e por esse motivo o balanço hídrico diário foi feito utilizando apenas os dados diários disponíveis posto a posto.

Dada, porém, a necessidade de integrar os resultados do balanço diário em um período completo de 30 anos comum a todos os postos, as lacunas dos totais mensais de chuva foram preenchidas pelo método das isoietas (com interpolação pelos métodos do inverso da distância e do vizinho natural). Do ponto de vista prático essa solução é julgada satisfatória, notadamente por ter sido viabilizada pela relativa riqueza de dados dos postos do Estado do Ceará. Desse modo foram obtidas séries de 30 anos de totais mensais de chuvas diárias, no período de 1979 a 2008, nos 7 (sete) postos considerados (**anexo II tabelas A4.1a - A4.1g**).

#### 4.7.1.3 – Precipitação média (P)

O cálculo da precipitação média dos totais mensais do balanço diário na área do projeto foi realizado pelo método de Thiessen levando em conta os coeficientes de influência representados pelas frações de superfície ocupada pelos polígonos (**figura 4.36**) em cada setor de bacia considerado.

Os valores dos coeficientes atribuídos a cada um dos postos influentes sobre essa área são mostrados na **tabela 4.30**.

**Tabela 4.30** – Pesos dos polígonos de Thiessen para cálculo da chuva média sobre o setor A1: Bacia do Jaguaribe – CE (518 km<sup>2</sup>).

Cod_Nac	UTM-E	UTM-N	Posto	Área Km <sup>2</sup>	Influência
00537037	682873	9422836	Mossoró	0	0,0000
00537003	651496	9437962	Baraúna	4	0,0077
00437006	634916	9465636	Jaguaruana	143	0,2761
00437010	614567	9454614	Russas	78	0,1506
00537041	612696	9439876	Quixeré	149	0,2876
00538009	599752	9432525	Limoeiro do Norte	69	0,1332
00538069	596040	9419632	Tabuleiro do Norte	75	0,1448
Total				518	1,0000

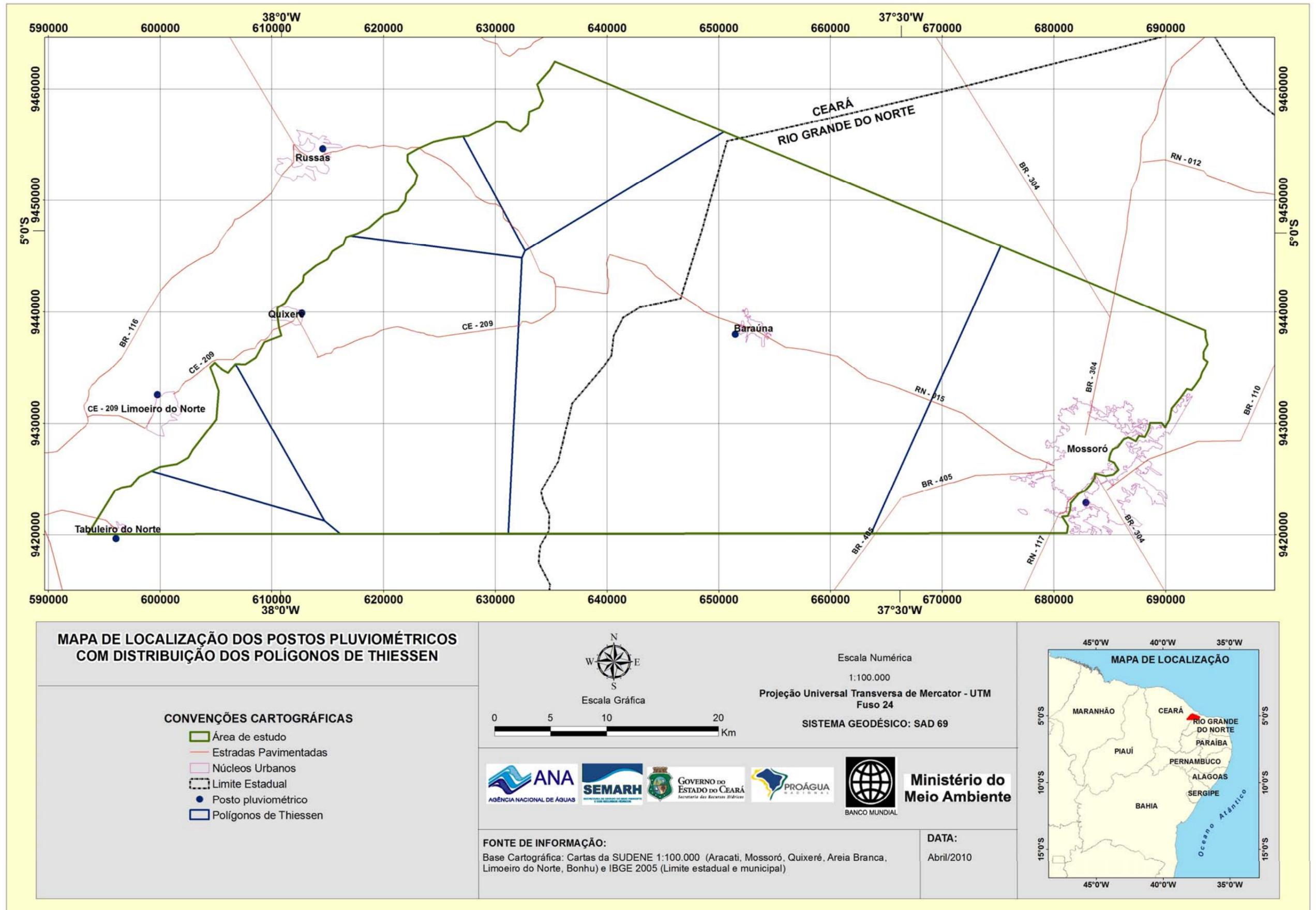


Figura 4.36 - Polígonos de Thiessen ilustrando a distribuição das áreas de influência dos postos pluviômetros da região sobre a área do Projeto Apodi.

#### 4.7.1.4 – Deflúvios (R)

Não existem informações sobre escoamento superficial direto na área de interesse do estudo, passíveis de tratamento para definição de um coeficiente de escoamento superficial.

#### 4.7.1.5 – Fluxo básico (I)

A análise do fluxo básico, realizada aplicando o modelo clássico de decaimento exponencial  $q(t-t_0) = q_0 \exp[-\alpha(t-t_0)]$ , aos dados de descargas médias diárias disponíveis na região, já teve os seus resultados mostrados no **item 2.4.** Com base nos referidos resultados, são considerados como representativos das restituições de água subterrânea, no domínio da área de estudo, os seguintes valores do coeficiente de restituição:

- ✓ **Setor A1 Bacia do Jaguaribe:**  $\alpha = 0,0346 [1/dia]$ , estimado na bacia do Jaguaribe (Posto 36390000 Peixe Gordo ) pelo valor médio dos anos de 1978 e 1979, com o número médio de dias correspondente à redução de 90% da descarga (decaimento de 10 para 1 m<sup>3</sup>/s) igual a 68. Esses números caracterizam um predomínio de drenagem sobre terrenos cristalinos, que são pouco permeáveis por natureza. Por isso, para fins de estimativa de recarga, admite-se que esse valor do coeficiente de recessão é extensivo aos terrenos pouco permeáveis da Formação Quebradas, aflorantes na faixa de 333 km<sup>2</sup> mapeada como Formação Açu Superior no Estado do Ceará, entre o rio Jaguaribe e a cuesta da Chapada do Apodi.
- ✓ **Setor A2 Bacia do Mata Fresca:** nesta bacia existem duas zonas com características distintas, em termos de escoamento do excesso de água do balanço hídrico:
  - i) **zona sul, com 750 km<sup>2</sup>**, totalmente destituída de cursos de água superficial e na qual se pode considerar que todo o excedente hídrico se infiltra nos sumidouros, dolinas e cavernas existentes. Esse comportamento é extensivo à porção de 185 km<sup>2</sup> desse aquífero, desprovida de cursos de água superficial, presente na bacia do Jaguaribe na borda oeste da Chapada do Apodi.
  - ii) **zona norte, com 575 km<sup>2</sup>** na qual se observa uma rede de drenagem superficial incipiente cuja existência se deve a transbordamentos de águas subterrâneas infiltradas nos carsts da zona sul. Para o fluxo de base da zona norte, na bacia do Mata Fresca, será usado o coeficiente de recessão do rio Apodi.
- ✓ **Setor A3 Bacia do Apodi:** na bacia do rio Apodi, o coeficiente de recessão  $\alpha = 0,0507 [1/dia]$ , foi determinado em Mossoró (Posto 37090000) para o aquífero Jandaíra, pelo valor médio dos anos 1987, 1989, 1994, 1995 e 1996, que está associado a uma rede de drenagem superficial significativa, no setor leste da área.

## 4.7.2. – Resultados obtidos

### 4.7.2.1 – Síntese do Balanço Hídrico no Setor A1)

Os resultados gerais do balanço hídrico no período de 1979-2008 no **Setor A1** da bacia do Jaguaribe, sobre uma superfície de 518 km<sup>2</sup>, são mostrados na **tabela 4.31**. Os totais mensais e anuais dos parâmetros, ano a ano, se encontram no **anexo A4.3.1**.

A **média pluviométrica (P)** é de 692,5 mm/ano sendo que 88,6% das chuvas ocorrem no período de janeiro a maio. O período de estiagem, no qual ocorre apenas 1% da chuva média, se concentra nos meses de agosto a novembro (**tabela A4.3.1a**).

O **excedente hídrico médio (I+R)** é de 155,7 mm/ano e 97,3% dos eventos de excesso (151 mm/ano) ocorrem no período de janeiro a maio (**tabela A4.3.1b**).

A **recarga média (I)** é de 85,4 mm/ano sendo que 74,8 mm (87,6%) acontecem no período de janeiro a maio (**tabela A4.3.1c**).

O **escoamento superficial médio (R)** é de 70,3 mm e 99,8% (70,2 mm/ano) ocorrem no período de janeiro a maio (**tabela A4.3.1d**).

**Tabela 4.31** - Resumo do balanço hídrico 1979-2008 no Setor A1 – Bacia do Jaguaribe (518 km<sup>2</sup>).

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
P	71,4	118,6	179,6	158,2	86,1	44,5	12,3	3,2	2,4	0,8	1,5	13,8	692,5
I+R	10,6	28,9	39,6	55,5	16,9	3,5	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	155,7
I	3,8	11,6	18,1	26,1	15,2	6,6	2,6	0,9	0,3	0,1	0,0	0,1	85,4
R	6,8	17,3	21,5	29,4	1,7	-3,1	-2,0	-0,9	-0,3	-0,1	0,0	0,1	70,3

### *Estatística Descritiva da Chuva e da Recarga no Setor A1*

A estatística descritiva da chuva e da recarga médias (**tabela 4.32**) no **Setor A1** Bacia do Jaguaribe – Ceará revela que: i) a precipitação média com 5% de risco situa-se no intervalo de 584 mm/ano a 801 mm/ano, ou seja, é igual a  $692,5 \pm 108,5$  mm/ano. ii) a recarga média, com 95% de confiança varia no intervalo de 53,4 a 117,3 mm/ano, ou seja, é igual a  $85,4 \pm 32$  mm/ano.

**Tabela 4.32** – Estatística descritiva da chuva e recarga médias no Setor A1.

Parâmetro	Média	Confiança da média		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Assimetria
		-95%	+95%					
Chuva	692,5	584,0	801,0	613,8	197,5	1560,8	290,5	0,85
Recarga	85,4	53,4	117,3	74,1	0,5	351	85,6	1,4

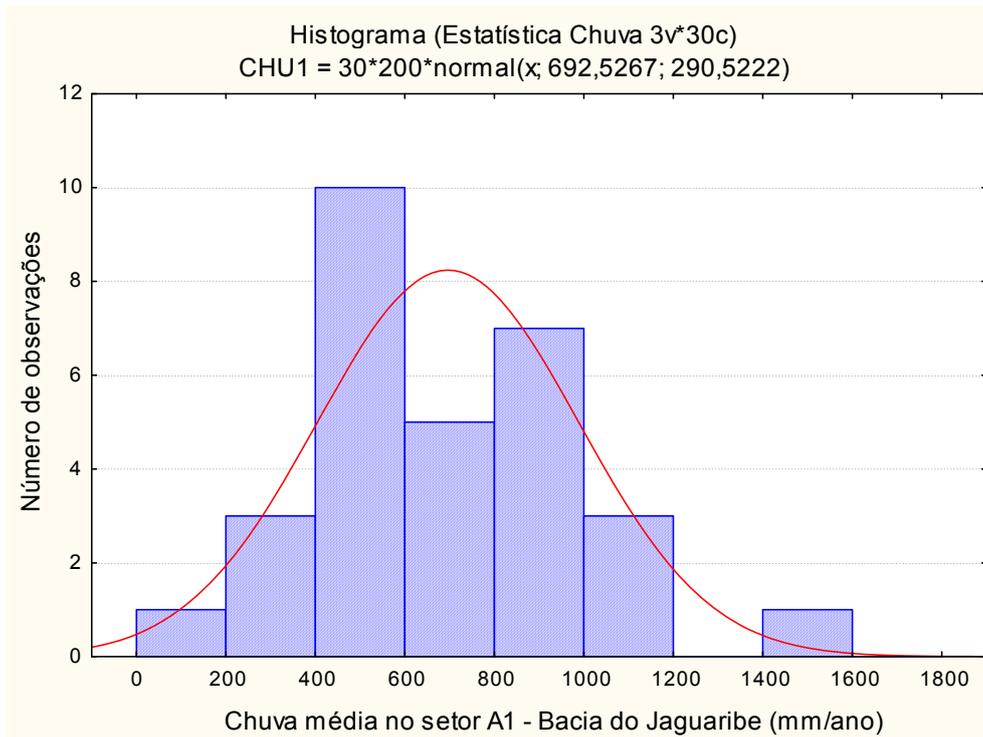
### Frequência da Chuva e da Recarga no Setor A1

A **tabela 4.33** contém as distribuições de frequência de chuva e recarga no Setor A1. Nota-se que 96,6% da chuva é menor ou igual a 1200 mm/ano e 96,6% da recarga é menor ou igual a 250 mm/ano.

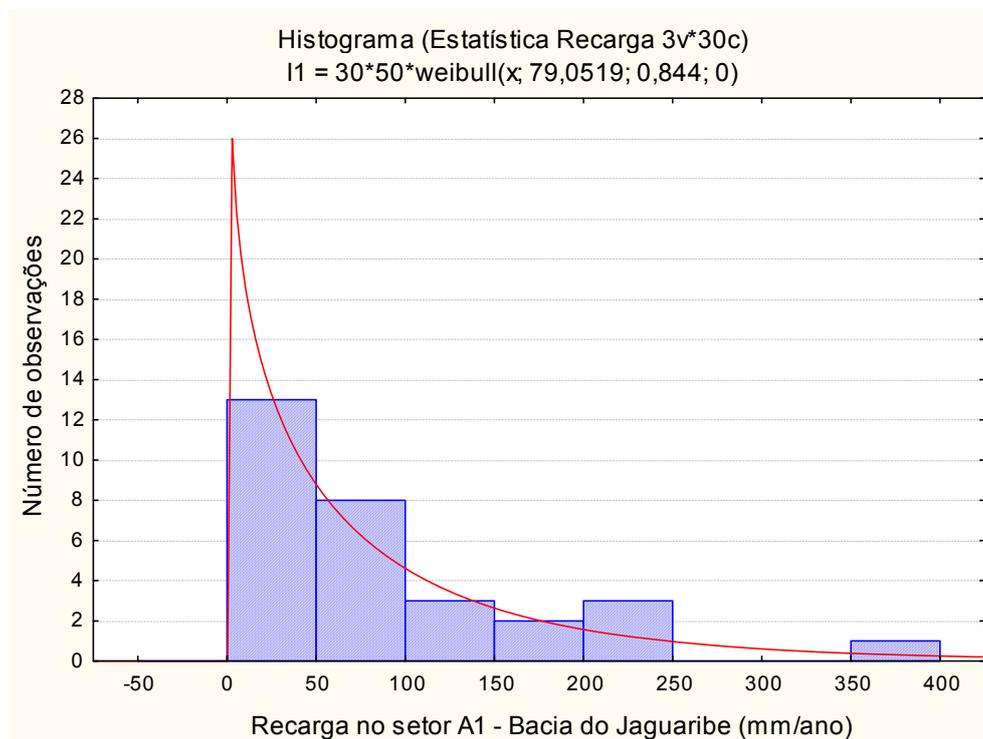
**Tabela 4.33** – Frequência de chuva e recarga no Setor A1 – Bacia Jaguaribe.

Classe	Frequência	Frequência acumulada	Frequência relativa	% Acumulado
<b>CHUVA SETOR A1</b>				
$0,0 < x \leq 200$	1	1	3,33333	3,3333
$200 < x \leq 400$	3	4	10,00000	13,3333
$400 < x \leq 600$	10	14	33,33333	46,6667
$600 < x \leq 800$	5	19	16,66667	63,3333
$800 < x \leq 1000$	7	26	23,33333	86,6667
$1000 < x \leq 1200$	3	29	10,00000	96,6667
$1200 < x \leq 1400$	0	29	0,00000	96,6667
$1400 < x \leq 1600$	1	30	3,33333	100,0000
<b>RECARGA SETOR A1</b>				
$0,0 < x \leq 50$	13	13	43,33333	43,3333
$50 < x \leq 100$	8	21	26,66667	70,0000
$100 < x \leq 150$	3	24	10,00000	80,0000
$150 < x \leq 200$	2	26	6,66667	86,6667
$200 < x \leq 250$	3	29	10,00000	96,6667
$250 < x \leq 300$	0	29	0,00000	96,6667
$300 < x \leq 350$	0	29	0,00000	96,6667
$350 < x \leq 400$	1	30	3,33333	100,0000

Os histogramas de frequência e as leis de probabilidade ajustadas são ilustradas na **figura 4.37a** para a chuva e na **figura 4.37b** para a recarga.



a



b

**Figura 4.37**– Histogramas de frequência da chuva e da recarga anual no **Setor A1**, com curvas de densidade de probabilidade ajustadas: a) distribuição normal ajustada à chuva média; b) distribuição de Weibull ajustada à recarga média.

### Probabilidade da Chuva e da Recarga no Setor A1

A forma do histograma da chuva média anual (**figura 4.37a**), associada à pequena assimetria de 0,85 sugere que a distribuição de probabilidade das chuvas pode ser descrita por uma lei Gaussiana. Já o histograma da recarga (**figura 4.37b**) marcado por um coeficiente de assimetria igual a 1,4 não obedece à lei normal e fica bem caracterizado por uma lei de Weibull.

Diante disso, as probabilidades de ocorrência de chuva e recarga avaliadas com base nas mencionadas leis são mostradas na **tabela 4.34**. A chuva média de 692,5 mm/ano se reduz a 320,2 mm/ano com 90% de probabilidade. A recarga (que seria de 85,4 mm se a distribuição fosse normal), segundo a lei de Weibull é de 51,2 mm/ano com 50% de probabilidade e se reduz a apenas 5,5 mm/ano com 90% de probabilidade.

**Tabela 4.34** – Probabilidade de ocorrência da chuva e da recarga médias anuais (mm e m<sup>3</sup>/s) do balanço hídrico (1979-2008) no Setor A1 – Bacia do Jaguaribe – CE (518 km<sup>2</sup>).

Prob(x>=a)	0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Chuva média	692,5	448	320,2	214,6	95,8	16,6
Recarga mm/ano	51,2	13,4	5,5	2,3	0,8	0,3
%Recarga/Chuva	7,4	3,0	1,7			
Recarga m <sup>3</sup> /s	0,84	0,22	0,09	0,04	0,01	0,00

#### 4.7.2.2 – Síntese do Balanço Hídrico no Setor A2 – Bacia do Mata Fresca (1325 km<sup>2</sup>)

No **Setor A2** – Bacia do riacho Mata Fresca - os resultados gerais do balanço hídrico no período de 1979-2008, sobre uma superfície de 1325 km<sup>2</sup>, são mostrados na **tabela 4.35**. Os totais mensais e anuais dos parâmetros, ano a ano, se encontram no **anexo 4.3.2**.

Em termos de escoamento o **Setor A2** (1325 km<sup>2</sup>) compreende o **Setor A2 Norte** (575 km<sup>2</sup>) com escoamento superficial (R), através de rede hidrográfica incipiente, equivalente a cerca de 7% (49 mm) da chuva média e o **Setor A2 Sul** (750 km<sup>2</sup>) totalmente destituído de rede hidrográfica, no qual o escoamento superficial (R) é inteiramente canalizado pelas estruturas cársticas possuidoras de aberturas expostas até a superfície do terreno.

A **média pluviométrica (P)** é de 735,1 mm/ano sendo que 86% das chuvas (635,1 mm) ocorrem no período de janeiro a maio. Nos 8 (oito) meses restantes do ano ocorrem, em média, os 14% restantes de chuva. (**tabela A4.3.2a**).

O **excedente hídrico médio (I+R)** é de 400,5 mm/ano e 91% dos eventos de excesso (363,5 mm/ano) ocorrem no período de janeiro a maio (**tabela A4.3.2b**).

A **recarga média (I)** é estimada em 351,5 mm/ano sendo que 262,3 mm (75%) dos eventos acontecem no período de janeiro a maio (**tabela A4.3.2c**).

**Tabela 4.35** - Resumo do balanço hídrico 1979-2008 no Setor A2 – Bacia do Riacho Mata Fresca (1325 km<sup>2</sup>).

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
P	59,7	117,6	184,2	182,5	91,1	48,9	25,1	5,4	3,6	0,8	1,9	14,3	735,1
I+R	26,8	60,0	100,8	122,2	53,5	20,9	11,1	2,6	1,8	0,0	0,0	0,7	400,5
I	13,0	34,1	63,1	86,6	65,5	40,4	24,1	12,5	6,7	3,1	1,5	1,0	351,5
R	6,0	11,2	16,4	15,4	0	0	0	0	0	0	0	0	49,0

O **escoamento superficial médio (R)** de 49 mm é totalmente realizado no período de janeiro a maio (**tabela A4.3.2d**).

- ✓ No **Setor A2 Norte** o escoamento superficial se faz através da rede hidrográfica incipiente de cursos de água superficial originados pelo transbordamento dos carsts da zona sul.
- ✓ No **Setor A2 Sul** propriamente dito, as águas de alagamento superficial resultantes de chuvas intensas são canalizadas diretamente para o aquífero Jandaíra através das estruturas cársticas que possuem aberturas expostas na superfície do terreno como já anteriormente mencionado.

#### ***Estatística Descritiva de Chuva e Recarga no Setor A2***

A **tabela 4.36** mostra que a chuva média no Setor A2 varia de 191,4 mm/ano a 2319,2 mm /ano. O valor da média com 95% de confiança situa-se no intervalo de [581,6 a 888,5] mm/ano configurando um quadro de extrema irregularidade.

**Tabela 4.36** – Estatística descritiva da chuva e recarga médias no Setor A2.

Parâmetro	Média	Confiança da média		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Assimetria
		-95%	+95%					
Chuva	735,1	581,6	888,5	633,8	191,4	2319,2	410,9	2,1
Recarga	351,5	266,5	436,4	343,8	4,4	1129	227,5	1,2

Essa irregularidade, como não poderia deixar de ser, também se manifesta sobre a recarga cujos valores anuais, segundo o balanço hídrico diário, situam-se entre um mínimo de 4,4 mm/ano e um máximo de 1129 mm/ano. O intervalo de confiança de 95% da recarga média fica compreendido entre [266,5 e 436,4] mm/ano.

#### ***Frequência da Chuva e da Recarga no Setor A2***

A **tabela 4.37** mostra a frequência da chuva e da recarga anual no **Setor A2** e indica que nada menos que cerca de 27% dos eventos relacionados com esses parâmetros correspondem a chuvas anuais inferiores ou iguais a 500 mm e a recargas anuais inferiores ou iguais a 200 mm.

**Tabela 4.37** – Frequência de chuva e recarga no Setor A2 – Mata Fresca.

Classe	Frequência	Frequência acumulada	Frequência relativa	% Acumulado
<b>CHUVA SETOR A2</b>				
0,0<x<=500	8	8	26,66667	26,6667
500<x<=1000	18	26	60,00000	86,6667
1000<x<=1500	3	29	10,00000	96,6667
1500<x<=2000	0	29	0,00000	96,6667
2000<x<=2500	1	30	3,33333	100,0000
<b>RECARGA SETOR A2</b>				
0,0<x<=200	8	8	26,66667	26,6667
200<x<=400	9	17	30,00000	56,6667
400<x<=600	11	28	36,66667	93,3333
600<x<=800	1	29	3,33333	96,6667
800<x<=1000	0	29	0,00000	96,6667
1000<x<=1200	1	30	3,33333	100,0000

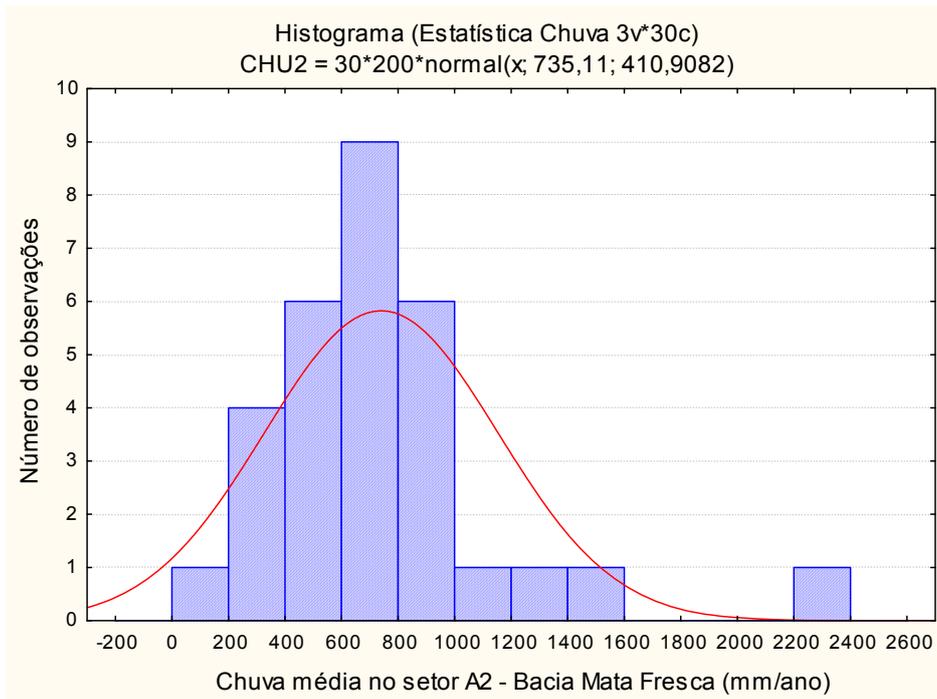
Os histogramas de frequência da chuva e da recarga no Setor A2, com as respectivas leis de distribuição de densidade de probabilidade normal ajustada, são mostrados na **figura 4.38**.

#### **Probabilidade de Chuva e Recarga no Setor A2**

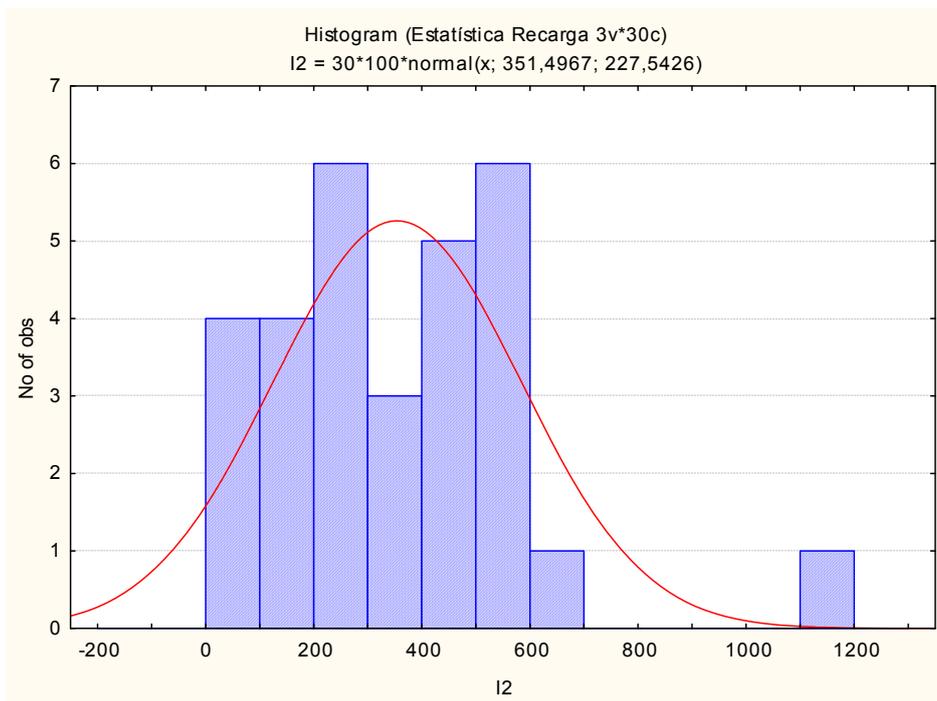
A probabilidade de chuva e recarga no Setor A2 é mostrada na **tabela 4.38**. Segundo os resultados obtidos a chuva média anual com 50% de probabilidade é de 735,1 mm e igual a 208,5 mm com 90% de probabilidade. Quanto à recarga média esperada com 50% de probabilidade no Setor A2 é de 351,5 mm/ano e não passa de 59,8 mm/ano com 90% de probabilidade.

**Tabela 4.38** – Probabilidade de ocorrência da chuva e da recarga médias anuais (mm e m<sup>3</sup>/s) do balanço hídrico (1979-2008) no Setor A2 – Bacia do Jaguaribe – CE (1325 km<sup>2</sup>).

Prob(x>=a)	0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Chuva média	735,1	389,2	208,5	59,2	-108,7	-220,6
<b>Setor A2 Norte 575 km<sup>2</sup></b>						
Recarga mm/ano	351,5	159,9	59,8	-22,8	-115,8	-177,8
%Recarga/Chuva	47,8	41,1	28,7			
Recarga m <sup>3</sup> /s	6,42	2,92	1,09	-	-	-
<b>Setor A2 Sul 750 km<sup>2</sup></b>						
Recarga mm/ano	400,5	182,2	68,1	-26,0	-131,9	-202,6
%Recarga/Chuva	54,5	46,8	32,7			
Recarga m <sup>3</sup> /s	9,54	4,34	1,62	-	-	-
<b>Total m<sup>3</sup>/s</b>	<b>15,95</b>	<b>7,26</b>	<b>2,71</b>			



a



b

**Figura 4.38** – Histogramas de frequência da chuva e da recarga anual no **Setor A2**, com as respectivas curvas de densidade de probabilidade normal ajustadas: a) para a chuva média; b) para a recarga média.

#### 4.7.2.3 – Síntese do Balanço Hídrico no Setor A3

No **Setor A3** – Bacia do rio Apodi, os resultados gerais do balanço hídrico no período de 1979-2008, sobre uma superfície de 695 km<sup>2</sup>, são mostrados na **tabela 4.39**. Os totais mensais e anuais dos parâmetros, ano a ano, se encontram no **anexo A4.3.3**.

**Tabela 4.39** - Resumo do balanço hídrico 1979-2008 no Setor A3 – Bacia do Apodi (695 km<sup>2</sup>).

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
P	54,1	105,0	184,9	181,2	97,1	42,0	27,5	7,9	5,4	0,8	1,6	15,3	722,8
I+R	17,4	42,9	81,7	106,6	45,1	12,2	5,4	2,4	2,7	0,0	0,0	1,6	318,0
I	3,9	10,2	20,1	27,7	15,9	6,1	2,5	1,1	0,8	0,2	0,0	0,4	88,9
R	13,5	32,7	61,6	78,9	29,2	6,1	2,8	1,3	1,9	-0,2	0,0	1,2	229,1

A **média pluviométrica (P)** é de 722,8 mm/ano sendo que 86% das chuvas (622,3 mm) ocorrem no período de janeiro a maio. Nos 8 (oito) meses restantes do ano ocorrem, em média, os 14% restantes de chuva. (**tabela A4.3.3a**).

O **excedente hídrico médio (I+R)** é de 318 mm/ano e 92% dos eventos de excesso (293,7 mm/ano) ocorrem no período de janeiro a maio (**tabela A4.3.3b**).

A **recarga média (I)** é estimada em 88,9 mm/ano sendo que 77,8 mm (88%) dos eventos acontecem no período de janeiro a maio (**tabela A4.3.3c**).

O **escoamento superficial médio (R)** de 229 mm/ano tem 94% do seu valor escoado no período de janeiro a maio (**tabela A4.3.3d**). Os 6% restantes ocorrem no restante do ano, com exceção dos meses de outubro e novembro, nos quais sempre existe déficit de escoamento superficial.

#### **Estatística Descritiva de Chuva e Recarga no Setor A3**

A **tabela 4.40** mostra que a chuva média no **Setor A3** varia de um mínimo de 185,1 4 mm/ano a 2175,8 mm /ano. O valor da média com 95% de confiança situa-se no intervalo de [584,3 a 861,3] mm/ano confirmando a irregularidade sugerida pelo balanço hídrico e já caracterizada nos outros setores da área do projeto. A recarga tem média de 88,9 mm/ano e varia de 0,7 mm/ano a 301,8 mm/ano. O intervalo de confiança de 95% da recarga média é [64,9 a 112,8].

**Tabela 4.40** – Estatística descritiva da chuva e recarga médias no Setor A3 -Bacia do Apodi - RN (695 km<sup>2</sup>).

Parâmetro	Média	Confiança da média		Mediana	Min	Max	Desvio Padrão	Assimetria
		-95%	+95%					
Chuva	722,8	584,3	861,3	699,6	185,1	2175,8	370,9	1,9
Recarga	88,9	64,9	112,8	80,7	0,7	301,8	64,0	1,3

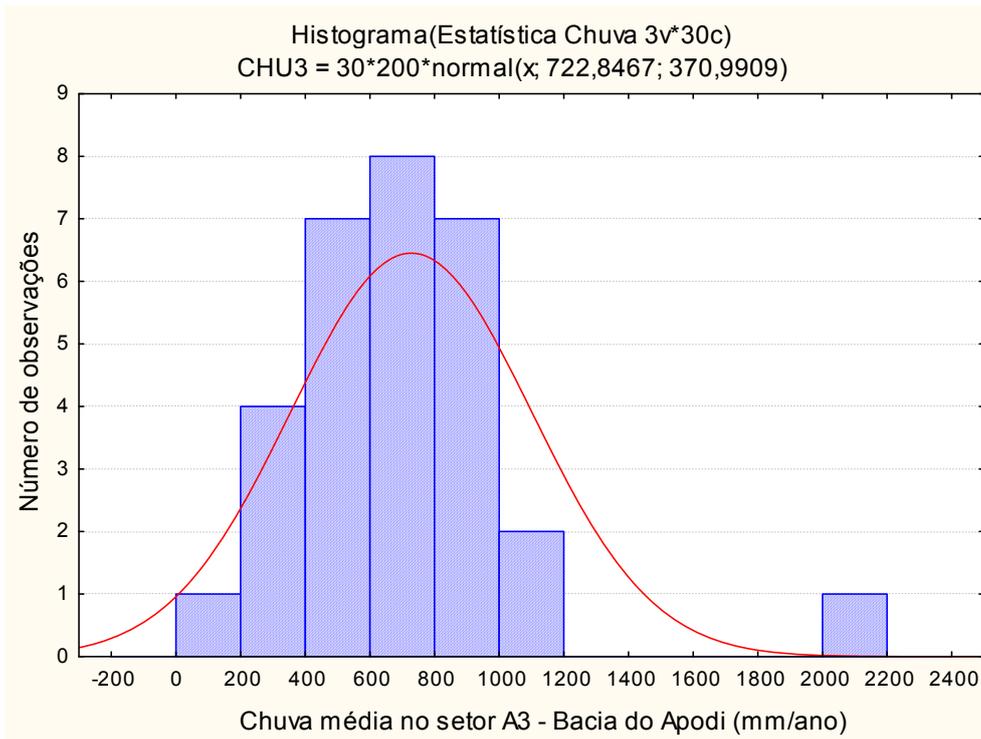
### Frequência da Chuva e da Recarga no Setor A3

Para o **Setor A3** a **tabela 4.41** mostra a frequência da chuva e da recarga anual e indica que cerca de 17% da precipitação assume valores menores ou iguais a 500 mm/ano e que 27% (8 anos em 30) apresentam recarga média inferior ou igual a 50 mm/ano.

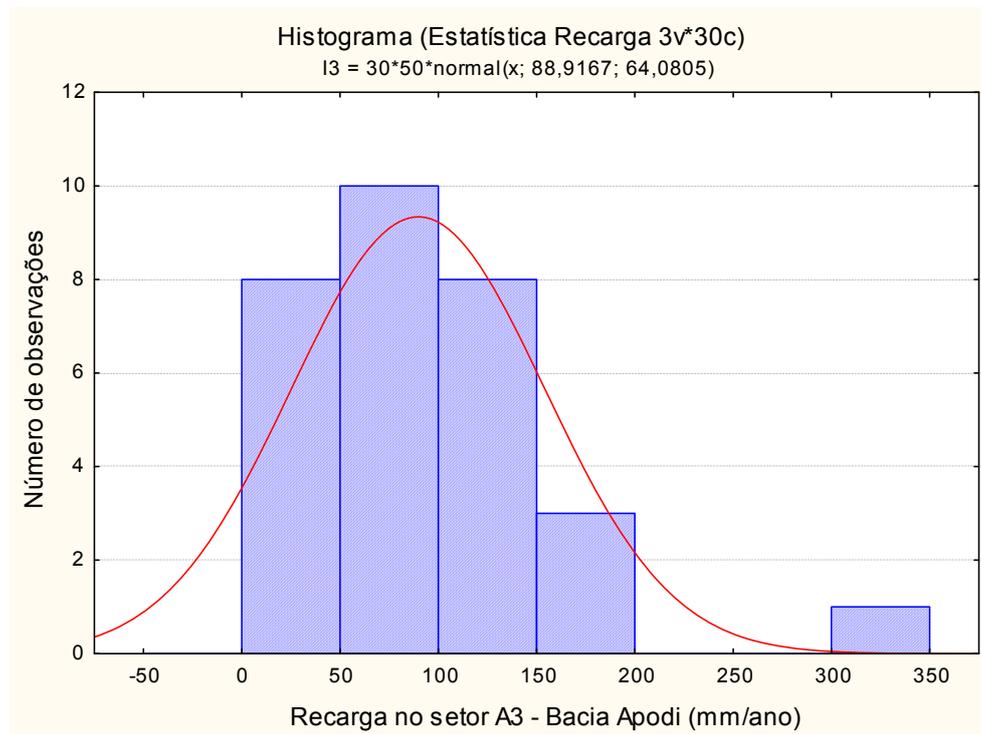
**Tabela 4.41** – Frequência de chuva e recarga no Setor A3 – Bacia Apodi (695 km<sup>2</sup>).

Classe	Frequência	Frequência acumulada	Frequência relativa	% Acumulado
<b>CHUVA SETOR A3</b>				
0,0<x<=500	5	5	16,66667	16,6667
500<x<=1000	22	27	73,33333	90,0000
1000<x<=1500	2	29	6,66667	96,6667
1500<x<=2000	0	29	0,00000	96,6667
2000<x<=2500	1	30	3,33333	100,0000
<b>RECARGA SETOR A3</b>				
0,0<x<=50	8	8	26,66667	26,6667
50 <x<=100	10	18	33,33333	60,0000
100<x<=150	8	26	26,66667	86,6667
150<x<=200	3	29	10,00000	96,6667
200<x<=250	0	29	0,00000	96,6667
250<x<=300	0	29	0,00000	96,6667
300<x<=350	1	30	3,33333	100,0000

Os histogramas de frequência da chuva e da recarga médias anuais no **Setor A3** são ilustrados na **figura 4.39** e apresentam um comportamento que justifica o ajuste de um modelo normal de distribuição de densidade de probabilidade.



**a**



**b**

**Figura 4.39** – Histogramas de frequência com distribuição normal; a) chuva; b) recarga no **Setor A3**, bacia do Apodi.

### Probabilidade de Chuva e Recarga no Setor A3

A probabilidade de chuva e recarga no Setor A3 é mostrada na **tabela 4.42**. De acordo com os resultados do balanço hídrico a chuva média anual com 50% de probabilidade é de 722,8 mm e igual a 247,3 mm com 90% de probabilidade. Por outro lado a recarga média esperada com 50% de probabilidade no Setor A3 é de 88,9 mm/ano e não passa de 6,8 mm/ano com 90% de probabilidade.

**Tabela 4.42** – Probabilidade de ocorrência de chuva e de recarga médias anuais (mm e m<sup>3</sup>/s) do balanço hídrico (1979-2008) no Setor A3 – Bacia do Apodi RN (695 km<sup>2</sup>).

Prob(x>=a)	0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
Chuva média	722,8	410,5	247,3	112,5	-39,5	-140,2
Recarga mm/ano	88,9	34,9	6,8	-16,4	-42,7	-60,2
Recarga m <sup>3</sup> /s	1,96	0,77	0,15	-	-	-
%Recarga/Chuva	12,3	8,5	2,7			

Como resultado geral do balanço hídrico, os valores da recarga em m<sup>3</sup>/s são apresentados com diferentes níveis de risco na **tabela 4.43** para as 3 (três) subáreas e para toda a região estudada. Convém notar que os valores encontrados refletem antes de tudo a grande irregularidade do regime pluviométrico característica do clima semi-árido dominante na área de estudo.

A recarga anual na bacia do Riacho Mata Fresca, graças ao desenvolvimento dos fenômenos cársticos, tem um comportamento totalmente diferenciado daquele que se observa no restante da área de estudo, ou seja: enquanto no Setor Mata Fresca a recarga é, sobretudo, do tipo **canalizado** (absorvendo, em média, 47,8% da chuva), ela é **difusa**, nos demais setores da área do Projeto. Tanto é assim que, em média, na bacia do rio Apodi, a leste, equivale a 12,3% da chuva e na bacia do rio Jaguaribe, a oeste representa apenas 7,4% da chuva.

O resultado final indica, portanto, para a área de estudo, uma recarga aproximada de 18,8 m<sup>3</sup>/s com 50% de risco; 8,3 m<sup>3</sup>/s com 20% de risco e 3,0 m<sup>3</sup>/s com 10% de risco.

**Tabela 4.43** – Probabilidade de recarga anual (m<sup>3</sup>/s) nas 3 subáreas e na área total do Projeto.

Setor	Área Km <sup>2</sup>	Prob(x>=a)					
		0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
A1 - Jaguaribe	518	0,84	0,22	0,09	0,04	0,01	0,00
A2 - Mata Fresca N	575	6,42	2,92	1,09	-	-	-
A2 –Mata Fresca S	750	9,54	4,34	1,62			
A3 - Apodi	695	1,96	0,77	0,15	-	-	-
<b>Área do Projeto</b>	<b>2538</b>	<b>18,76</b>	<b>8,25</b>	<b>2,95</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>

#### 4.8 – Sondagens e poços exploratórios

Para detalhar o conhecimento da geologia de subsuperfície e também para a realização de testes de aquífero visando obter os parâmetros hidráulicos dos aquíferos, foram construídos 6 (seis) poços de pesquisa, distribuídos nos seguintes sítios:

- ✓ No **Sítio Furna de Pedra**, 6 km ao norte de Baraúna, foram construídos dois poços no aquífero Jandaíra, pela SEMARH/RN, sendo um poço exploratório e um poço de observação. No **Sítio Formigueiro**, município de Jaguaruana-CE, foi construído um poço exploratório no aquífero Jandaíra (**figura 4.40**).
- ✓ No **Sítio Vertentes-Santa Cruz**, município de Quixeré (**figura 4.41**), foram construídos 3 (três) poços de pesquisa sendo um exploratório até o cristalino e 02 de observação na Formação Açú aflorante.

##### 4.8.1 – Características Técnicas dos Poços

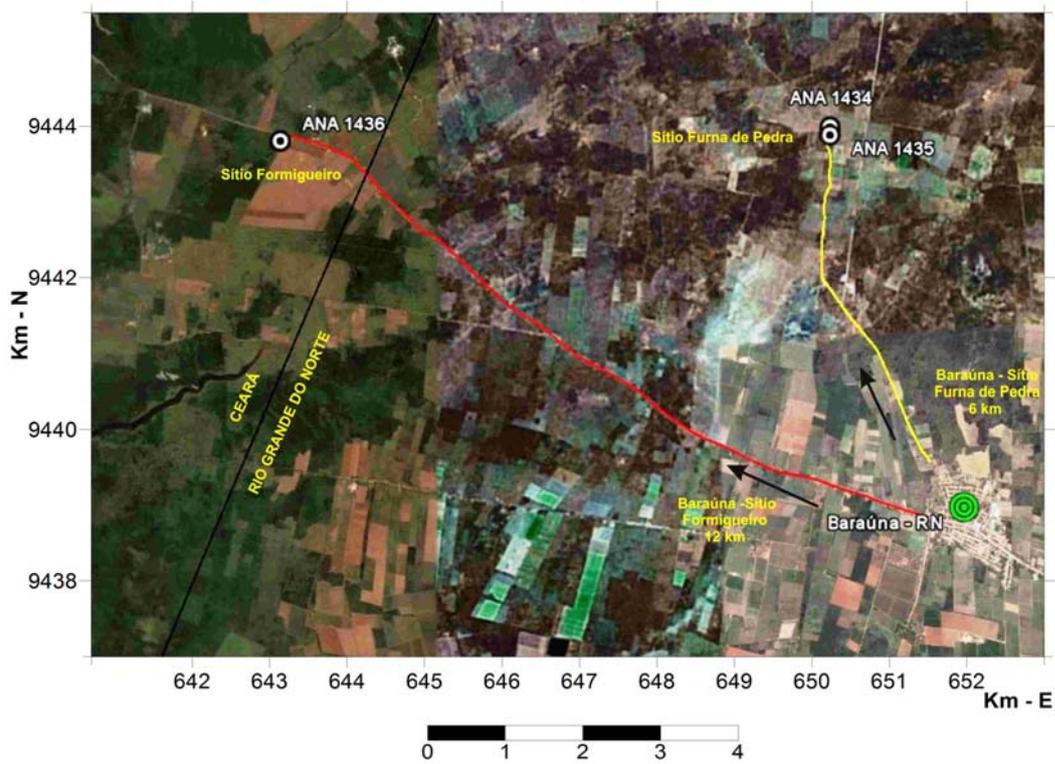
As características técnicas dos dois poços perfurados no aquífero Jandaíra em **Furna de Pedra (RN)** são indicadas nas fichas técnicas das **tabelas A4.6a e A4.6b**. Os poços foram perfurados pela SEMARH (Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos) com as sondas percussoras (P9 e P13).

O poço exploratório (ANA 1434), perfurado com sonda percussora em diâmetro de 10 polegadas, atingiu a profundidade de 131 m e o poço de observação (ANA 1435), perfurado em diâmetro de 8,5 polegadas, foi concluído na profundidade de 98 m. Esses poços não atingiram a profundidade prevista de 150m devido a desmoronamentos em camadas de folhelhos Quebradas intercaladas no Jandaíra.

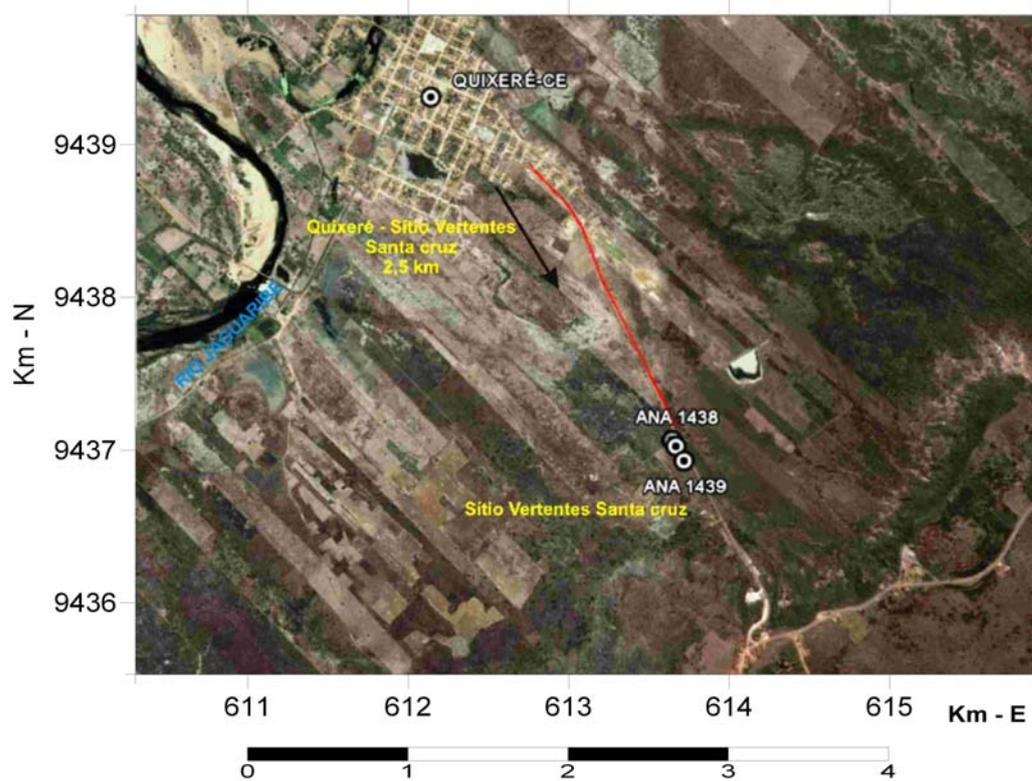
Em **Sítio Formigueiro (CE)**, o poço ANA 1436 (**tabela A4.6c**) perfurado com sonda rotopneumática encontrou uma caverna e não teve condições de avançar além de 18 m, em virtude de perda de circulação.

Não foram utilizados nem revestimentos nem filtros. Como revestimento foram usados apenas, a título de proteção, 2,5 m de tubo de PVC geomecânico de 270 mm de diâmetro no poço exploratório e um tubo de 2,5 m do mesmo material em diâmetro de 180 mm no poço de observação.

Em **Sítio Vertentes Santa Cruz (CE)**, no sopé da Chapada do Apodi, na Formação Açú aflorante, foram perfurados 3 (três) poços (**tabelas A4.6d a A4.6f**), sendo um deles com extensão até o cristalino. Os trabalhos foram realizados pela SOHIDRA (Superintendência de Obras Hidráulicas) utilizando uma sonda rotopneumática R1H-18. A consultora esteve presente em todas as fases de construção (perfuração, completação e desenvolvimento) e de estudo (descrição de amostras de calha, perfilagem geofísica e ótica). A interpretação dos dados revelou que os sedimentos perfurados pertencem à Formação Açú Superior, são bastante argilosos e constituem, do ponto de vista hidrogeológico, o aquífero Quebradas.



**Figura 4.40** – Localização dos poços de pesquisa perfurados no aquífero Jandaíra em Sitio Furna de Pedra (Baraúna-RN) e em Sitio Formigueiro (Jaguaruana-CE).



**Figura 4.41** – Localização dos poços de pesquisa perfurados no aquífero Açú em Vertentes-Santa Cruz.

#### 4.8.2 – Perfis litológicos e construtivos

Os perfis e descrições litológicas dos poços de pesquisa foram desenvolvidos a partir das amostras de calha coletadas. No aquífero Jandaíra as amostras foram colhidas a cada 2 (dois) metros no poço ANA 1434 e 1 (uma) por metro no piezômetro ANA 1435.

No poço P1-SF, no Sítio Formigueiro, as amostras foram coletadas a cada 3 (três) metros.

A amostragem de calha na Formação Açú também seguiu o padrão adotado pela SOHIDRA, ou seja, coleta a cada 3 (três) metros, em todos os 3 (três) poços: PO1-VSC, PB2-VSC e PO3-VSC.

A completação dos poços na Formação Jandaíra é composta apenas por revestimento de boca com PVC geomecânico, devido à ocorrência dos calcários maciços desta formação e também pelo fato de que as águas subterrâneas a serem aproveitadas, se encontram em cavernas que não podem ser isoladas por revestimentos.

Os poços exploratórios no aquífero Açú foram completados com tubos e filtros de PVC geomecânico em diâmetro de 6” (poços ANA 1437 e ANA 1439) e em diâmetros de 4” e 6” no poço ANA 1438. Os detalhes construtivos de todos os poços, com o posicionamento dos revestimentos e filtros, bem como os perfis litológicos, estão ilustrados no **anexo A4.5**.

#### 4.9 – Execução de testes de aquíferos

Nos termos de referência foram previstos 5 (cinco) testes de aquífero, cada um com duração de 24 horas, cuja realização, a cargo da CONSULTORA, deveria se desenvolver obedecendo ao plano de execução de sondagens e poços exploratórios, da seguinte maneira:

- ✓ 2 (dois) testes no  **aquífero Açú**, em dois pares de poços que deveriam ter sido perfurados pela PETROBRÁS, com profundidade de 500 m, sendo um par no Ceará (na localidade de Tomé) e um par no Rio Grande do Norte (na localidade Fazenda Veneza). Não tendo sido possível levar a termo a construção desses poços pela PETROBRÁS, a CONSULTORA avaliou os parâmetros hidráulicos do aquífero Açú a partir de 2 (dois) testes realizados em poços existentes, sendo o primeiro em Baraúna, executado em julho de 2009, no poço P4 e o segundo executado em Mossoró, em janeiro de 1980, reinterpretado em julho de 2009. Ambos os testes foram realizados pelo método de *superposição de escoamento*, uma vez que os dispositivos de poços existentes se encontravam em operação.
- ✓ 2 (dois) testes no  **aquífero Jandaíra**, em dois pares de poços com profundidade estimada de 150 m. O par de poços do Rio Grande do Norte foi perfurado pela SEMARH, pelo método de percussão, na localidade Furna de Pedra, com distância de 50 m entre o poço exploratório (que ficou com profundidade final de 131m) e o poço de observação (que ficou com profundidade final de 98 m). A redução de profundidade verificada em relação aos valores previstos foi devida a desmoronamentos ocorridos em camadas de folhelhos atribuídos à

Formação Quebradas, intercaladas na Formação Jandaíra. O teste de aquífero foi realizado conforme previsto, com duração de 24 horas. No Estado do Ceará, dos 2 (dois) poços previstos para serem construídos pela SOHIDRA, na localidade de Formigueiro, somente um foi realizado atingindo profundidade máxima de apenas 18 m (que ficou com profundidade final de 12 m devido a desmoronamentos). O equipamento de perfuração mobilizado pela SOHIDRA foi uma sonda rotopneumática e também rotativa hidráulica (PROMINAS R1-H18), com a qual não foi possível concluir as sondagens previstas devido às perdas totais de circulação de fluido verificadas nas zonas de cavernas. Assim sendo, não houve condições de efetuar o segundo teste do aquífero Jandaíra, conforme previsto.

- ✓ 1 (um) teste no **aquífero Barreiras** em 2 (dois) poços com profundidade de 60 m. Tendo sido verificado que esse aquífero não se comporta como unidade produtora de água na área do Projeto Apodi, a CTAF decidiu que os 2 (dois) poços previstos para testes de aquífero no Barreiras deveriam ser perfurados na área de afloramento do aquífero Açú, na localidade de Vertentes – Santa Cruz (VSC), onde foi inicialmente estimada uma profundidade de 50 m para o embasamento cristalino. Mesmo sem ter o primeiro poço (P01-VSC) perfurado pela SOHIDRA, com 60 m de profundidade, atingido o embasamento cristalino em VSC, como era previsto e seria desejável para os estudos, a SOHIDRA efetuou a completação do mesmo com tubos e filtros de PVC geomecânico de 6". Visando cumprir a meta de alcance do embasamento cristalino, e considerando que dos 300 m de perfuração previstos para o Jandaíra em Sitio Formigueiro somente 18 m haviam sido realizados, decidiu-se utilizar este saldo de 282 m na perfuração de um novo poço (P02-VSC), o qual foi locado a 50 m de distância do P01-VSC. Este segundo poço, a exemplo do primeiro, mesmo tendo chegado aos 120 m de profundidade sem atingir o embasamento cristalino, foi completado pela SOHIDRA até os 116 m de profundidade com tubos e filtros de PVC geomecânico de 6" no intervalo de zero a 54 m e tubos e filtros do mesmo tipo, em diâmetro de 4" no intervalo de 54 a 116 m. A essa altura, como ainda restavam junto à SOHIDRA 162 m de perfuração do saldo de 282 m, decidiu-se perfurar um terceiro poço (P03-VSC) a 100 de distância do P02-VSC, sem profundidade especificada, mas esperando que essa metragem fosse suficiente para atingir o embasamento cristalino, o que felizmente aconteceu aos 152 m de profundidade. A completação do terceiro poço foi feita até os 152m de profundidade, com tubos e filtros de PVC geomecânico de 6", ficando os filtros no intervalo de 112 m a 148 m. A existência de 3 (três) poços no aquífero Açú em VSC caracteriza este sítio como ideal para a realização de um teste de aquífero já que além do poço de bombeamento existem dois poços de observação situados a duas diferentes distâncias (50 m e 100m, respectivamente).

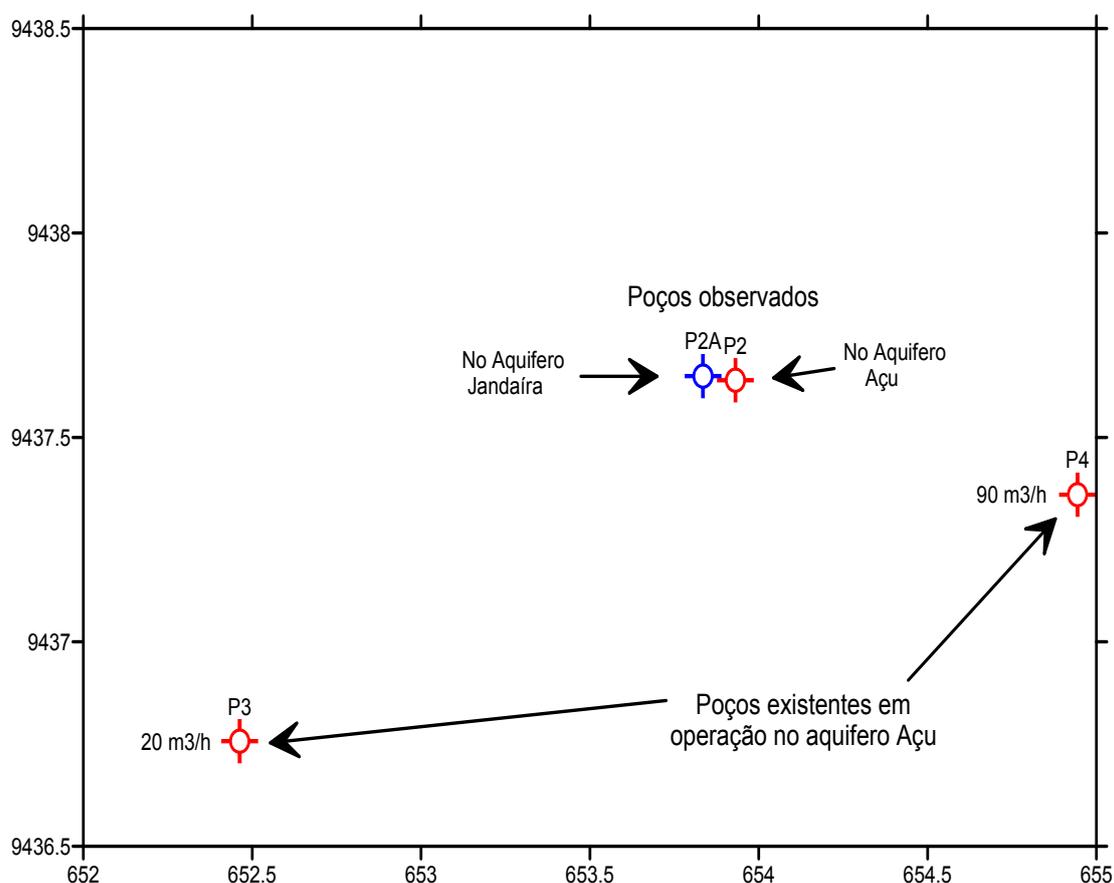
#### **4.10 – Interpretação dos resultados dos testes de e avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos**

#### 4.10.1 - Teste do aquífero Açú em Baraúna

O sistema de abastecimento de água de Baraúna, administrado pela CAERN - Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte utiliza águas subterrâneas do aquífero Açú semiconfinado pelo aquífero Quebradas acima do qual se encontra o aquífero livre, cárstico fissural Jandaíra. A cidade dispõe de 4 (quatro) poços perfurados no aquífero Açú dos quais apenas dois (P3 com 20 m<sup>3</sup>/h e P4 com 90 m<sup>3</sup>/h) são produtivos e se encontram em funcionamento.

O regime operacional dos referidos poços é contínuo e o sistema de água subterrânea se encontra em *regime dinâmico*. Assim sendo, para avaliar os parâmetros hidráulicos e a magnitude da evolução do nível potenciométrico do aquífero com o tempo, no estágio atual de exploração, realizou-se em julho de 2009 um teste de aquífero por *superposição de escoamento*.

O dispositivo de poços utilizados no teste incluiu 3 (três) poços no aquífero Açú e um poço no aquífero Jandaíra (**figura 4.42**).



**Figura 4.42** – Distribuição dos poços utilizados no teste hidrodinâmico realizado por superposição de escoamento no aquífero Açú em Baraúna.

A matriz das distâncias entre os 3 (três) poços do aquífero Açú e o poço observado no Aquífero Jandaíra em Baraúna é mostrada na **tabela 4.44**.

**Tabela 4.44** – Matriz distância entre os 3 (três) poços do aquífero Açú e o poço observado no Aquífero Jandaíra em Baraúna durante o teste do poço P4.

NPC*	Poço	x	y	z	P2	P3	P4	P2A
AD90	P2	653931	9437640	95	0	1713	1051	97
AD91	P3	652463	9436757	98	1713	0	2553	1637
AD92	P4	654944	9437360	97	1051	2553	0	1146
MG339	P2A	653835	9437650	95	97	1637	1146	0

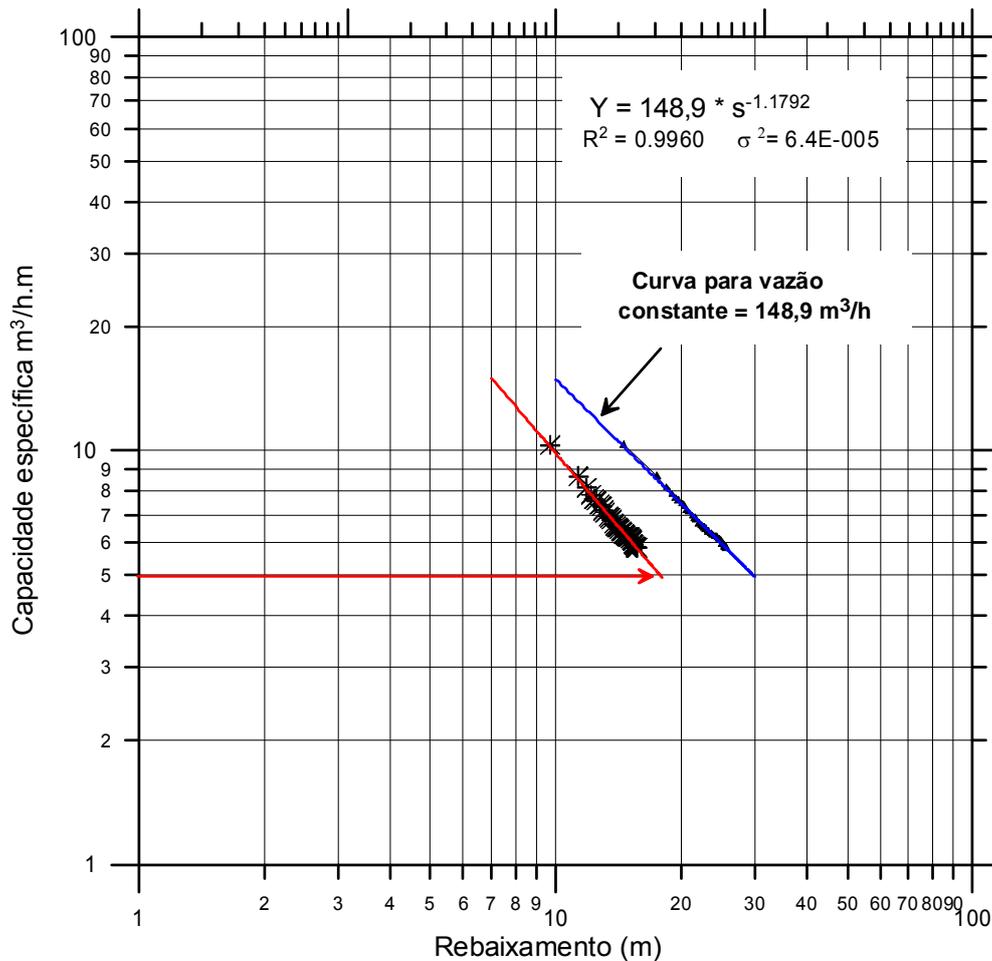
\*Npc= Nome do poço no cadastro ANA 2009. P2A = poço observado no aquífero Jandaíra.

#### 4.10.1.1 - Vazão do poço produtor

O teste propriamente dito, para cuja realização a CONSULTORA contou com a decisiva colaboração da CAERN, consistiu das seguintes atividades:

- ✓ Instalação de tubos guia de PVC de 1” nos poços P3 e P4 para controle dos níveis d’água.
- ✓ Instalação (no dia 11/07/09) de dois sensores de nível (*dataloggers*, transdutores de pressão e temperatura). O primeiro foi instalado no poço P2 (que se encontra fora de operação e serve apenas como poço de observação), para o controle do nível potenciométrico do aquífero Açú confinado. O segundo sensor foi instalado em um poço perfurado no calcário Jandaíra, denominado P2A situado a 97 m de distância do P2, para monitorar o nível potenciométrico do aquífero livre Jandaíra.
- ✓ Durante 6 (seis) dias os sensores registraram: i) no poço P2, a evolução do nível d’água do Açú sob regime de funcionamento contínuo dos poços P3 e P4 com vazão total de 110 m<sup>3</sup>/h; ii) no poço P2A, a evolução do nível do aquífero Jandaíra.
- ✓ No sexto dia (17/07/09) o equilíbrio dinâmico do sistema foi quebrado com a interrupção do bombeamento do poço P4 por um período de 14 horas (das 17:00 horas do dia 17/07/09 às 7:00 horas do dia 18/07/09), quando foi registrada a recuperação.
- ✓ Às 7:00 horas do dia 18/07/09, o poço foi religado e a vazão monitorada pela equipe de pitometria da CAERN por um período de 24 horas, até as 7:00 horas do dia 19/07/09. Nesse período a vazão bombeada variou de 99,7 m<sup>3</sup>/h para 91 m<sup>3</sup>/h.

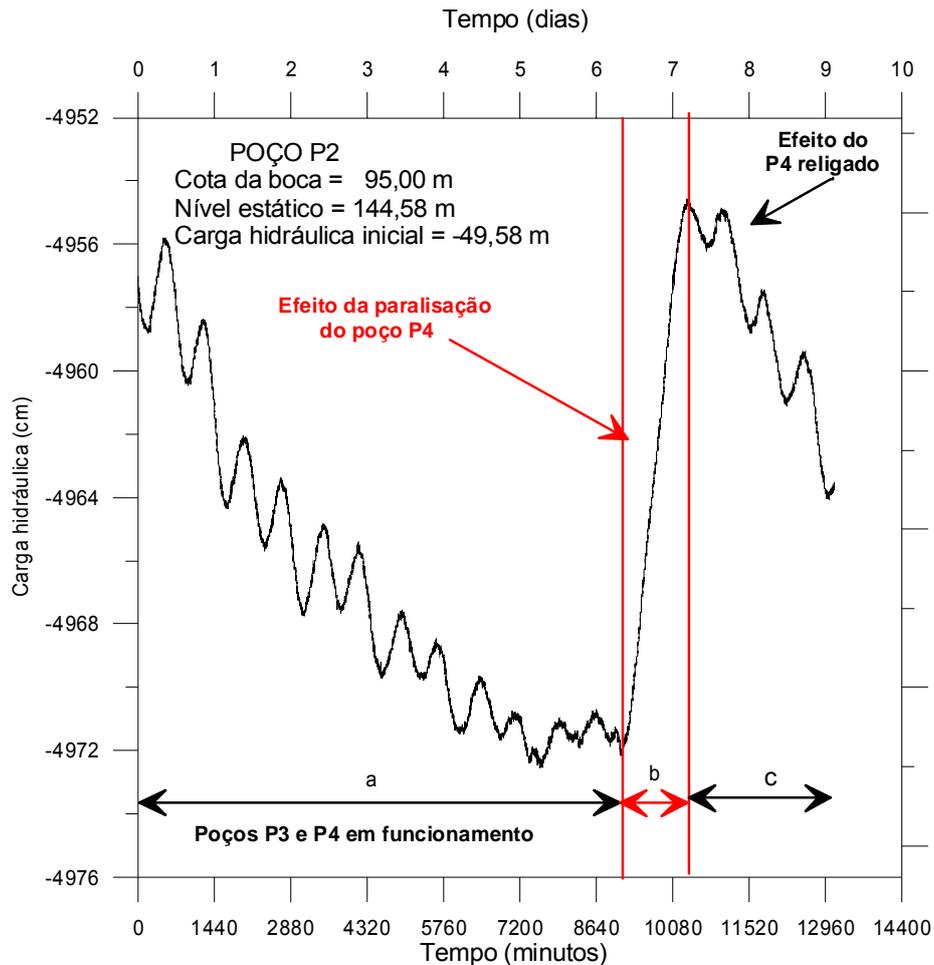
A análise da curva de descarga bombeada pelo método da capacidade específica fractal (Manoel Filho, 1996) ilustrada na **figura 4.43**, indica que o poço tem condições de produzir vazão constante de 148,9 m<sup>3</sup>/h com rebaixamento de 30 m.



**Figura 4.43** – Capacidade específica observada com vazão variável no poço P4 de Baraúna, e curva projetada para vazão constante de 148,9 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.10.1.2 - Difusividade do aquífero

Os registros de variação da carga potenciométrica do aquífero Açú no poço P2, com o bombeamento simultâneo dos poços P3 (20 m<sup>3</sup>/h) e P4 (92 m<sup>3</sup>/h), durante os primeiros 6 (seis) dias, seguidos da paralisação de 14 horas do poço P4 e novamente com o P4 ligado, são mostrados na **figura 4.44**.

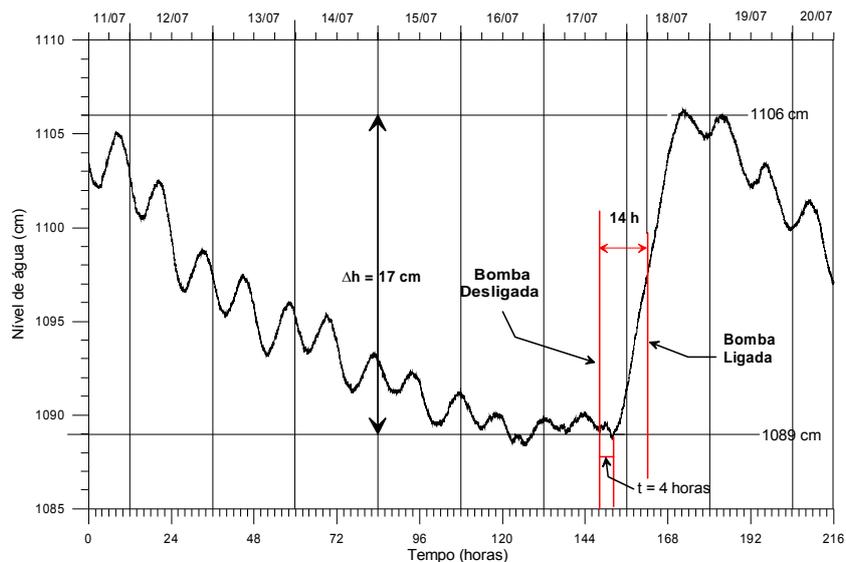


**Figura 4.44** – Variação da carga potenciométrica do aquífero Açú no poço P2: a) com o bombeamento simultâneo dos poços P3 e P4 (regime operacional vigente); b) com o poço P4 paralisado; c) com o poço P4 novamente ligado.

Como se vê, as respostas do aquífero Açú às intervenções realizadas durante o monitoramento são extremamente claras e conduzem a uma avaliação que se considera bastante confiável das propriedades hidráulicas do meio poroso.

O gráfico da **figura 4.45** indica um intervalo de tempo de 4 horas para a resposta do poço P2 à parada da bomba do poço P4, situado a 1050 m. Logo, a *difusividade do aquífero* pode ser avaliada através da equação:

$$D = \frac{r^2}{2,25\Delta t} = \frac{1050^2}{2,25 \times 1,44 \times 10^4} = 34 \text{ m}^2 / \text{s} \quad (4.4)$$

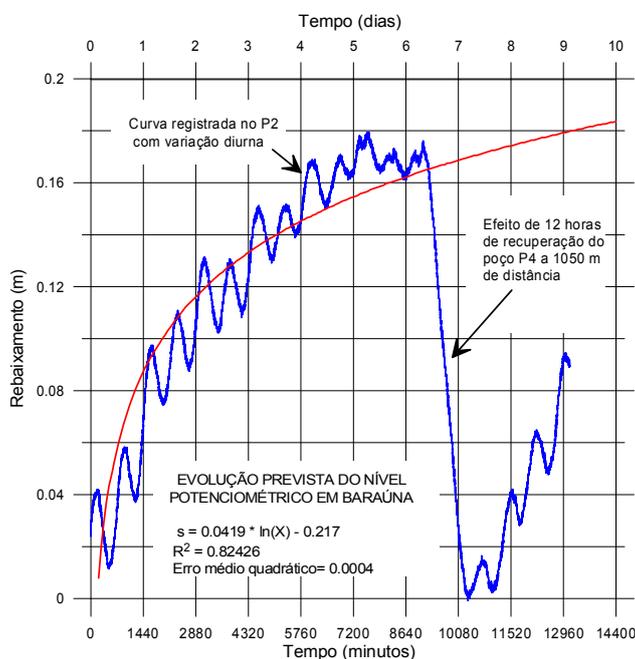


**Figura 4.45** – Gráfico da variação da carga de pressão ( $P/\gamma$ ) do aquífero Açú no poço P2, mostrando a resposta desse poço à parada da bomba do poço P4 (situado a 1050 m de distância) após um intervalo de tempo de 4 horas.

#### 4.10.1.3 - Evolução temporal do rebaixamento no aquífero Açú

A evolução do rebaixamento do nível potenciométrico do Açú registrada com o tempo nos primeiros 6 (seis) dias no poço P2 (**figura 4.46**), está crescendo a uma taxa que se ajusta aproximadamente à seguinte lei logarítmica:

$$s(t) = 0,0419 \ln(t) - 0,217 \quad (4.5)$$



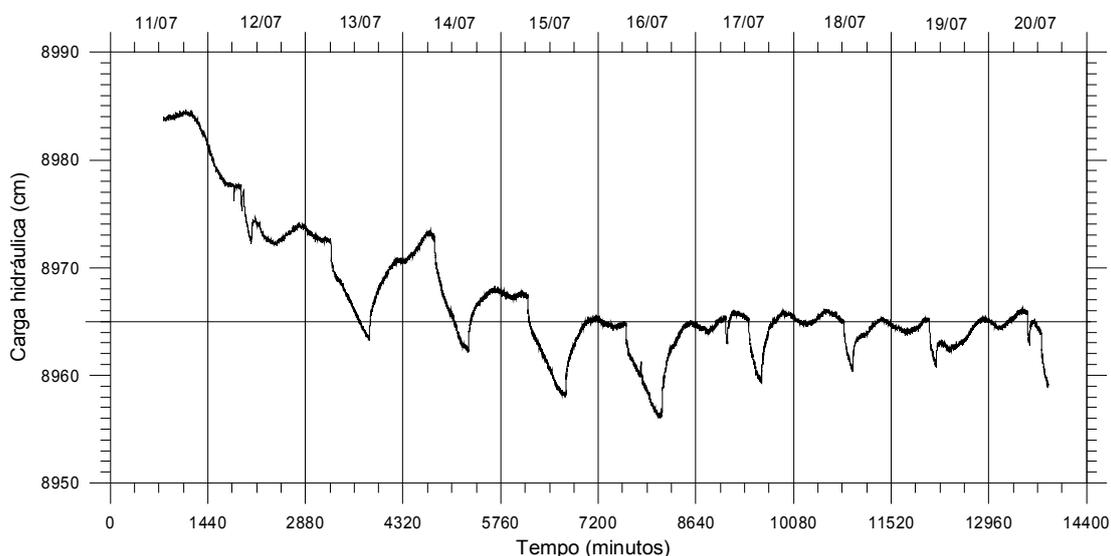
**Figura 4.46** – Curva observada de variação do rebaixamento no poço P2 de Baraúna exibindo a curva de ajuste da tendência de evolução temporal desse rebaixamento com o funcionamento simultâneo dos poços P3 e P4.

Acrescenta-se que o tempo é expresso em minutos e os parâmetros estatísticos do ajuste são: coeficiente de determinação  $R^2 = 0,824$  e erro médio quadrático  $\hat{\sigma}^2 = 0,0004$ .

#### 4.10.1.4 - Evolução do nível de água no aquífero Jandaíra

Conforme pode ser observado na **figura 4.47** o nível do aquífero Jandaíra apresentou oscilações diárias resultantes do bombeamento de um poço usado para irrigação situado a 23 m de distância. Mesmo assim a maior oscilação (cerca de 20 cm) ocorreu no primeiro dia, após o qual se observou, nos 4 (quatro) dias seguintes, uma progressiva tendência do nível d'água de manter-se (após as paradas dos bombeamentos) praticamente constante, nos últimos 5 (cinco) dias, na cota 89,65 m.

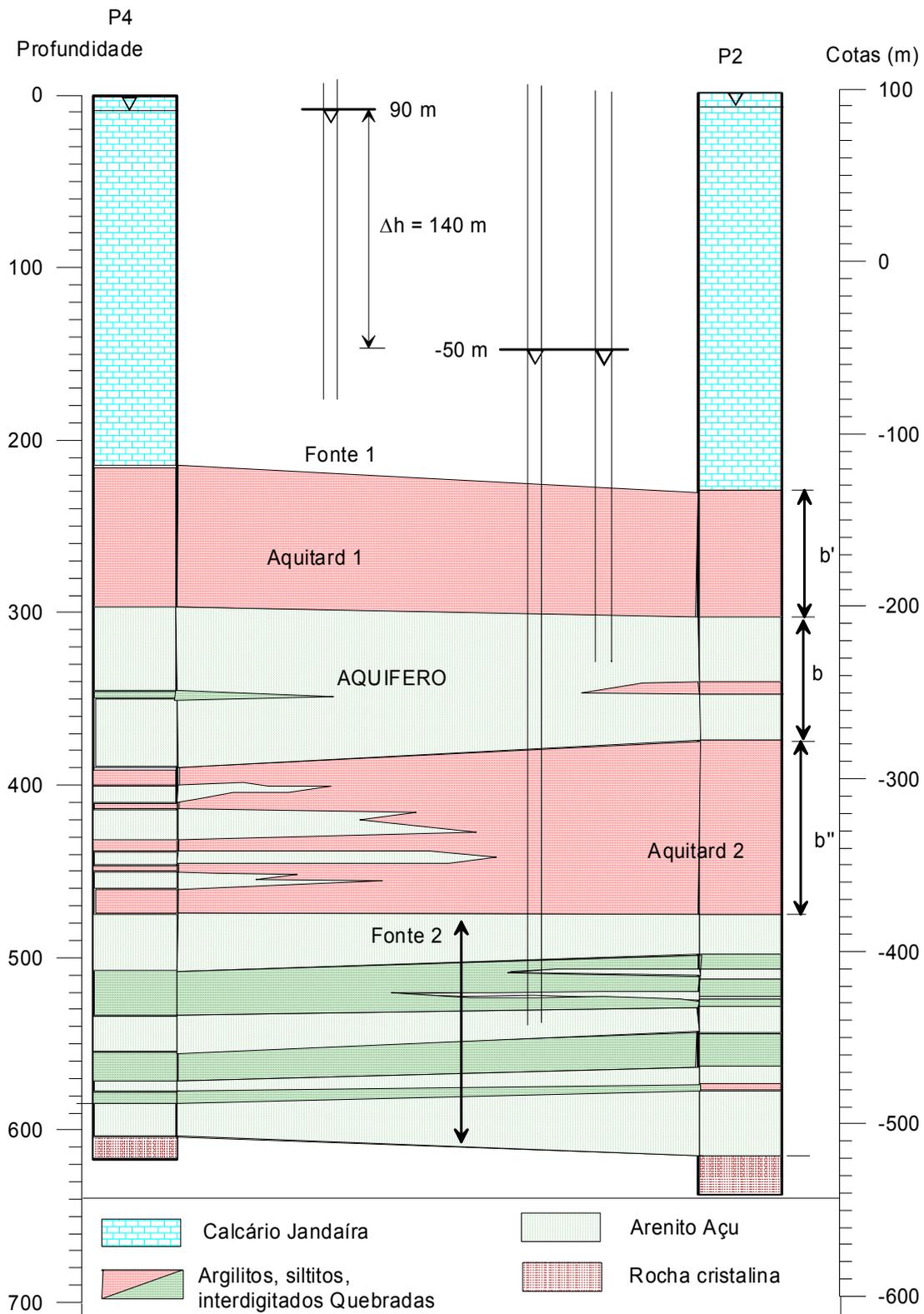
Logo, apesar dos bombeamentos, esses registros são suficientes para justificar, na interpretação dos parâmetros do sistema aquífero, a hipótese de nível constante no Jandaíra.



**Figura 4.47** – Variação de carga hidráulica do aquífero Jandaíra registrada no poço de observação P2A com oscilações diárias produzidas pelo bombeamento de um poço produtor situado a 23 m de distância, utilizado para irrigação.

A carga potenciométrica do aquífero Açú (julho 2009) é de -49,72 m ou, aproximadamente 50 m (**figura 4.48**), e, portanto, a diferença de carga registrada (139,37 m) entre os aquíferos Jandaíra e Açú é considerada da ordem de 140 m.

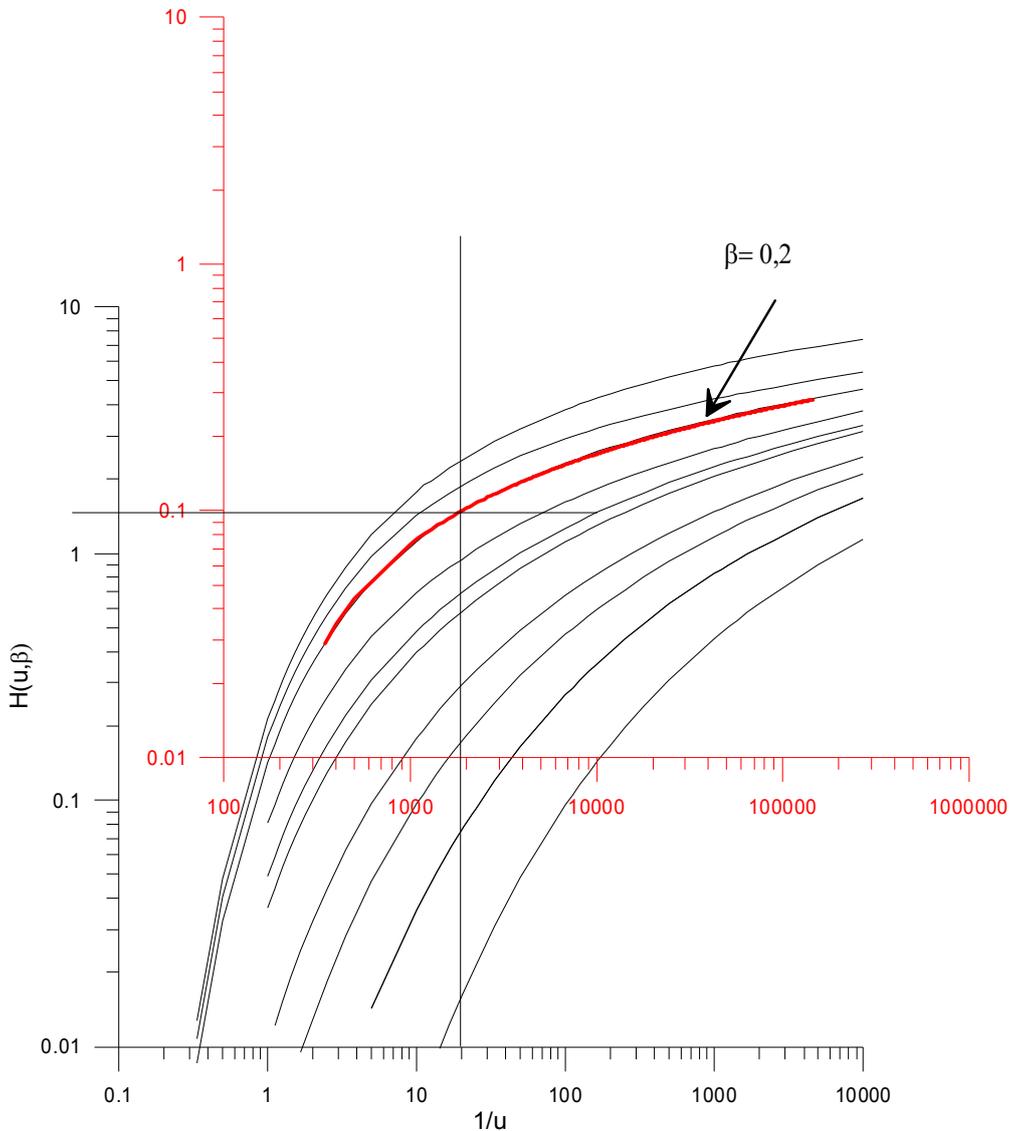
Em consonância com o que já foi antecipado pelos estudos da PETROBRAS (Araripe & Feijó, 1994; Pessoa Neto *et al.* 2007), a correlação entre os perfis litológicos dos poços P2 e P4 de Baraúna (**figura 4.48**) revela a interdigitação dos sedimentos pelíticos da Formação Quebradas afogando o sistema fluvial da Formação Açú.



**Figura 4.48** – Correlação litológica entre os perfis dos poços P4 e P2 do aquífero Açú em Baraúna.

Embora o comportamento ilustrado na **figura 4.48** torne bastante difícil a modelagem do sistema de água subterrânea, as respostas obtidas no teste permitiram ajustar uma curva de tendência do rebaixamento do aquífero com o

tempo (**equação 4.5**) que se ajusta muito bem à curva  $\beta = 0,2$  da família de curvas  $H(u,\beta)$  do modelo de Hantush (1960), para um aquífero e dois aquíferos (Batu, 1998), como mostrado na **figura 4.49**.



**Figura 4.49** – Superposição da curva de tendência de rebaixamento observada no P2 à família de curvas  $H(u,\beta)$  do modelo M2 de Hantush (1960) para um aquífero confinado e dois aquíferos.

Com esse modelo segundo Batu (1998) Hantush modifica a conhecida teoria anterior (Hantush & Jacob, 1955) que soluciona o problema da drenança através de um só aquífero (modelo M1) usando a função  $W(u,\beta)$  e introduz a função  $H(u,\beta)$ , que representa o modelo M2, de um aquífero semiconfinado (Açu superior) com dois aquíferos e duas fontes de carga constante: uma superior (aquífero Jandaíra) e uma inferior (aquífero Açu Inferior).

Portanto, em termos de modelagem analítica pode-se admitir que a resposta do aquífero testado é equivalente à que seria produzida se o *Sistema Aquífero Apodi* em Baraúna tivesse rigorosamente o seguinte comportamento:

- ✓ *Uma fonte superior de carga constante* (no caso é o aquífero livre Jandaíra,) com espessura aproximada de 220 m e carga hidráulica média de 90 m.
- ✓ *Um Aquífero confinado drenante* (Aquífero Açu Médio) com espessura média  $b=225$  m,
- ✓ *Dois Aquitardos Quebradas*. superior, com espessura média  $b'=77$  m; e inferior, com espessura média  $b''=24$  m.
- ✓ *Uma fonte inferior de carga constante*, (no caso é o aquífero Açu Inferior), com espessura média de 61 m.

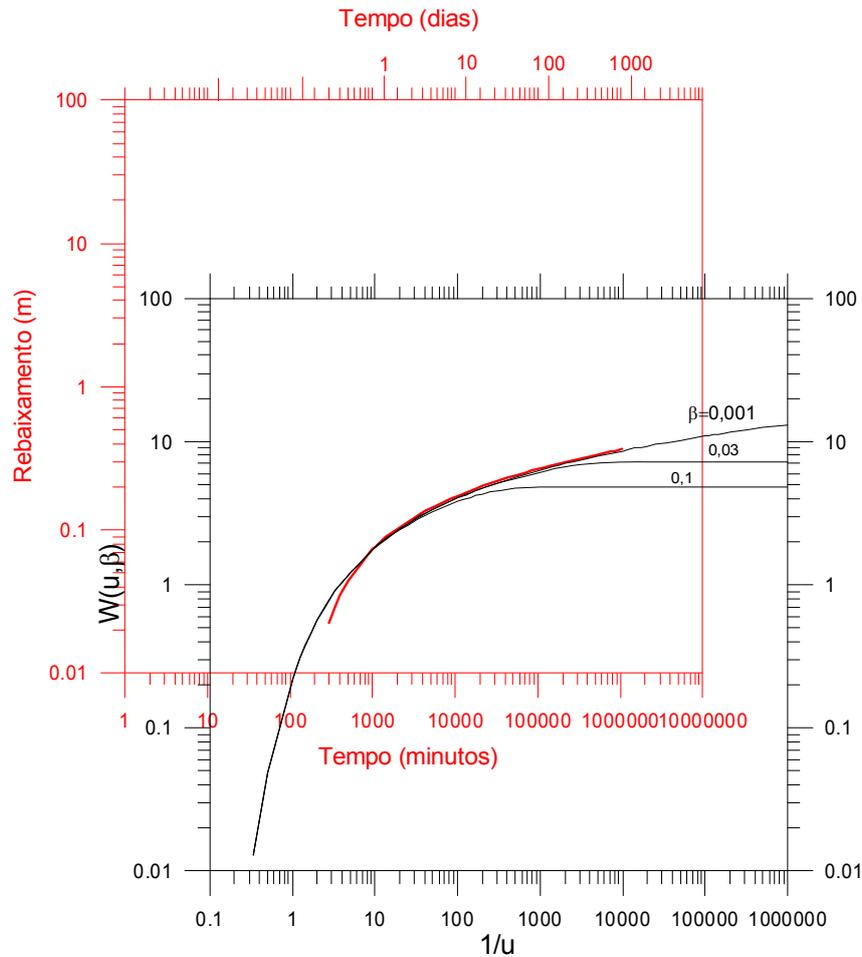
Os elementos que permitem caracterizar esse modelo M2, a partir dos perfis litológicos e construtivos dos poços são apresentados na **tabela 4.45**.

**Tabela 4.45** – Valores dos parâmetros característicos do modelo de 1 aquífero e 2 aquitardos no Sistema Aquífero Apodi obtidos dos poços P4 e P2 de Baraúna.

Modelo M2: de 1 aquífero e 2 aquitardos				
Parâmetro	Unidade	Símbolo	Valor	
			P4	P2
Espessura da fonte superior	m	$\Delta h$	140	140
Espessura do aquífero	m	b	213	240
Espessura do aquitardo superior	m	b'	80	74
Espessura do aquitardo inferior	m	b''	26	21
Espessura da fonte inferior	m	$b_2$	71	51
Extensão de filtros no aquífero	m	$h_{s1}$	93	15
Extensão de filtros na fonte superior	m	$h_{s2}$	40	43
Razão de penetração no aquífero		$p_1$	0,44	0,06
Razão de penetração na fonte inferior		$p_2$	0,56	0,84

Acontece que, no caso específico de Baraúna, os poços P4 (**figura 4.50**) e P2 (**figura 4.51**) estão captando simultaneamente o *Aquífero* (Aquífero Açu Médio) e a *Fonte Inferior* (Aquífero Açu Inferior), do modelo M2 conforme também mostram os dados da **tabela 4.46**.

Logo, em virtude da posição da zona de admissão de água dos poços, pode-se considerar que a chamada *Fonte Inferior* do modelo M2 contribui para os poços com fluxo horizontal. Nessa hipótese, essa fonte pode ser modelada como “Aquífero” e assim o segundo aquitardo fica descartado validando dessa maneira o modelo M1, como mostra o ajuste ilustrado na **figura 4.49**.



**Figura 4.50** – Superposição da curva de tendência de rebaixamento observada no P2 à família de curvas  $W(u, \beta)$  do modelo M1 de Hantush & Jacob (1955) para um aquífero confinado e um aquífero confinado e um aquífero confinado e um aquífero confinado.

**Tabela 4.46** - Caracterização da zona de admissão de água dos poços P2 e P4 de Baraúna, no Aquífero Açú, justificando a validade do modelo M1 (Hantush & Jacob, 1955).

Modelo M1: de 1 aquífero e 1 aquífero confinado				
Parâmetro	Unidade	Símbolo	Valor	
			P4	P2
Espessura da fonte superior	m	$\Delta h$	140	140
Espessura do aquífero	m	b	310	312
Espessura do aquífero confinado	m	b'	80	74
Extensão de filtros no aquífero	m	$h_s$	133	58
Razão de penetração no aquífero		$\rho$	0,47	0,20

A descrição apresentada configura a validade dos modelos M1 (Hantush & Jacob, 1955) e M2 (Hantush, 1960), conforme sugerem os ajustes ilustrados nas **figuras 4.48 e 4.49** dependendo da distribuição das zonas de admissão de água dos poços construídos.

#### 4.10.1.5 - Propriedades hidráulicas do Açú em Baraúna

Usando o método de superposição de curvas com o modelo M2, de 2 (dois) aquíferos (**figura 4.48**), a transmissividade do aquífero é calculada usando os seguintes valores e equações:

Considerando a resposta do P2 a uma distância de 1050m, após 4 horas de bombeamento, e a difusividade de 34 m<sup>2</sup>/s tem-se:

$$u = \frac{r^2}{4Dt} = \frac{1050^2}{4 \times 34 \times 14400} = 0,563 \quad \beta = 0,2 \text{ (fig. 4.49)} \rightarrow H(u, \beta) = 0,325$$

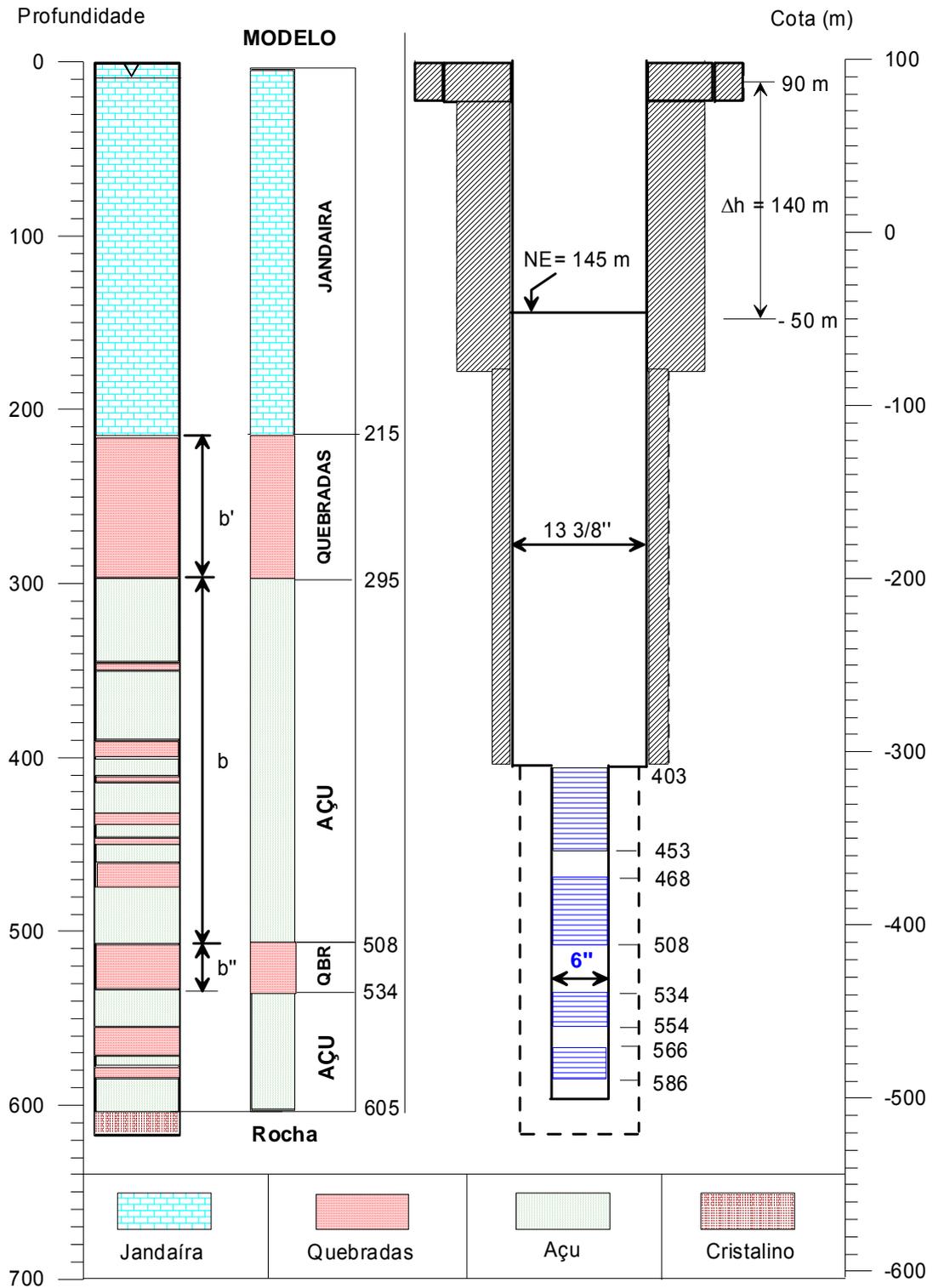
$$T = \frac{0,0255 \times H(u, \beta)}{4\pi s} = \frac{0,0255 \times 0,325}{4\pi \times 0,17} = 3,88 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$S = \frac{T}{D} = \frac{3,88 \times 10^{-3}}{34} = 1,14E - 04$$

A espessura média aproximada do aquífero (**tabela 4.53**) é de 227 m, o que permite estimar para o aquífero Açú, uma condutividade hidráulica média de

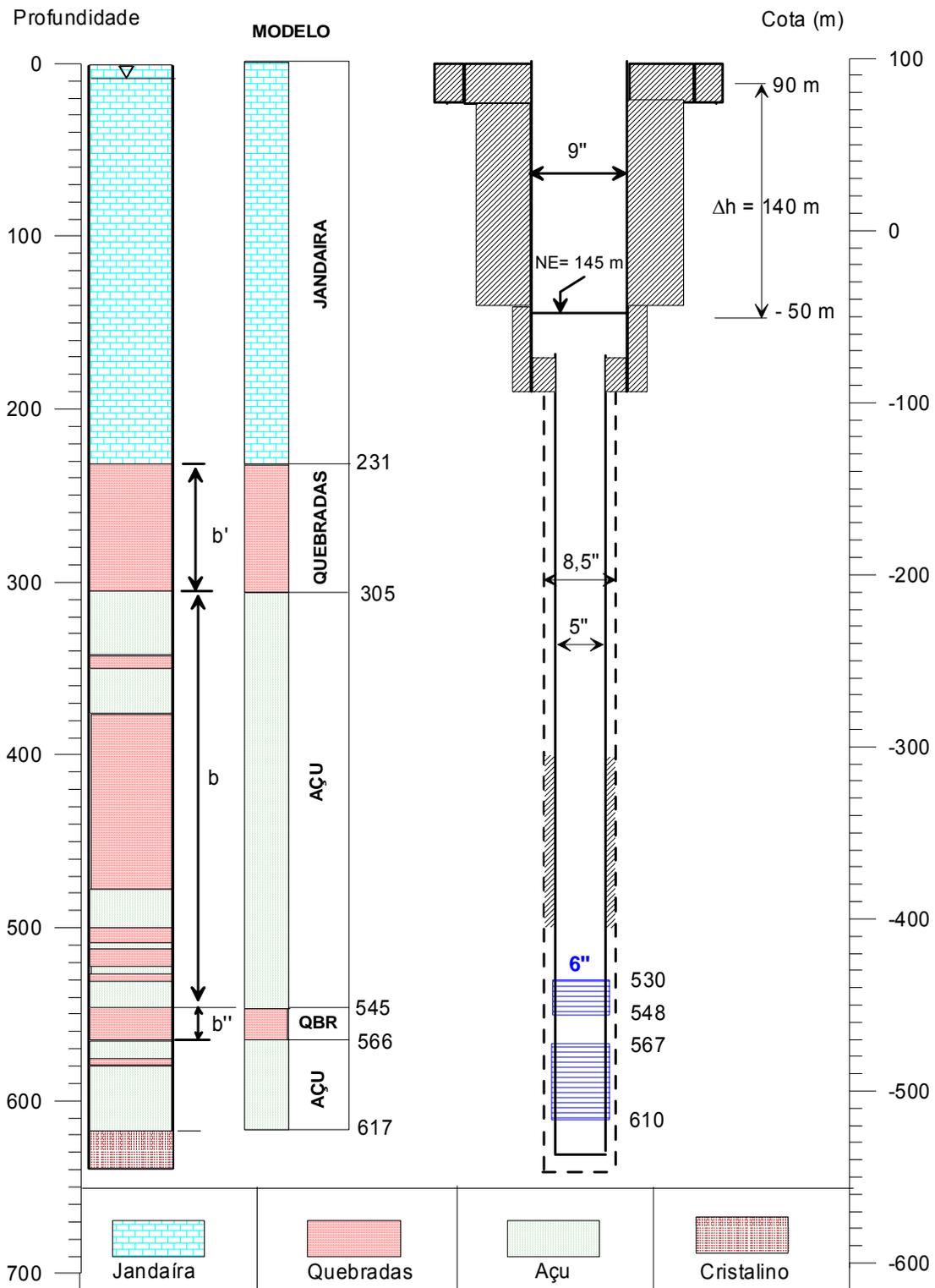
$$K = \frac{3,88 \times 10^{-3}}{227} = 1,7 \times 10^{-5} \text{ m / s ou } 1,5 \text{ m / d}$$

## PERFIL LITOLÓGICO E CONSTRUTIVO - POÇO P4 – BARAÚNA



**Figura 9.50** – Perfil litológico e construtivo do poço P4 de Baraúna perfurado pela ITAÍ (2001), mostrando que o segundo aquífero (modelo M2) pode ser descartado e adotado o modelo M1.

## PERFIL LITOLÓGICO E CONSTRUTIVO - POÇO P2 – BARAÚNA



**Figura 4.51** – Perfil litológico e construtivo do poço P2 de Baraúna perfurado pela CPRM- Serviço Geológico do Brasil. CPRM 04 MO-15-RN (1979). Perfil litológico descrito pela PLANAT (1979).

## 4.10.2 - Teste do aquífero Açú em Mossoró

### 4.10.2.1 – Descrição do teste

Em fevereiro de 1980, com todo o sistema de poços da CAERN em operação na cidade de Mossoró, foi realizado pela firma PLANAT (Bezerra, 1980) um teste de aquífero na área do Hotel Thermas, com duração de 48 horas. Como unidade de bombeamento foi usando o poço P12A, com vazão constante de  $138 \text{ m}^3/\text{h}$  e como poço de observação o P12, situado a 136m de distância.

Após 10 horas de bombeamento, observou-se uma subida inesperada do nível d'água nos poços P12A e P12, o que foi posteriormente identificado como sendo o resultado da paralisação indesejada de um terceiro poço (no caso, o **P11 - figura 4.52**) situado a uma distância de 707 m do poço P12 e a 735 m do poço P12A (**tabela 4.47**). O poço P11 permaneceu paralisado por 12 horas, após as quais voltou a operar.



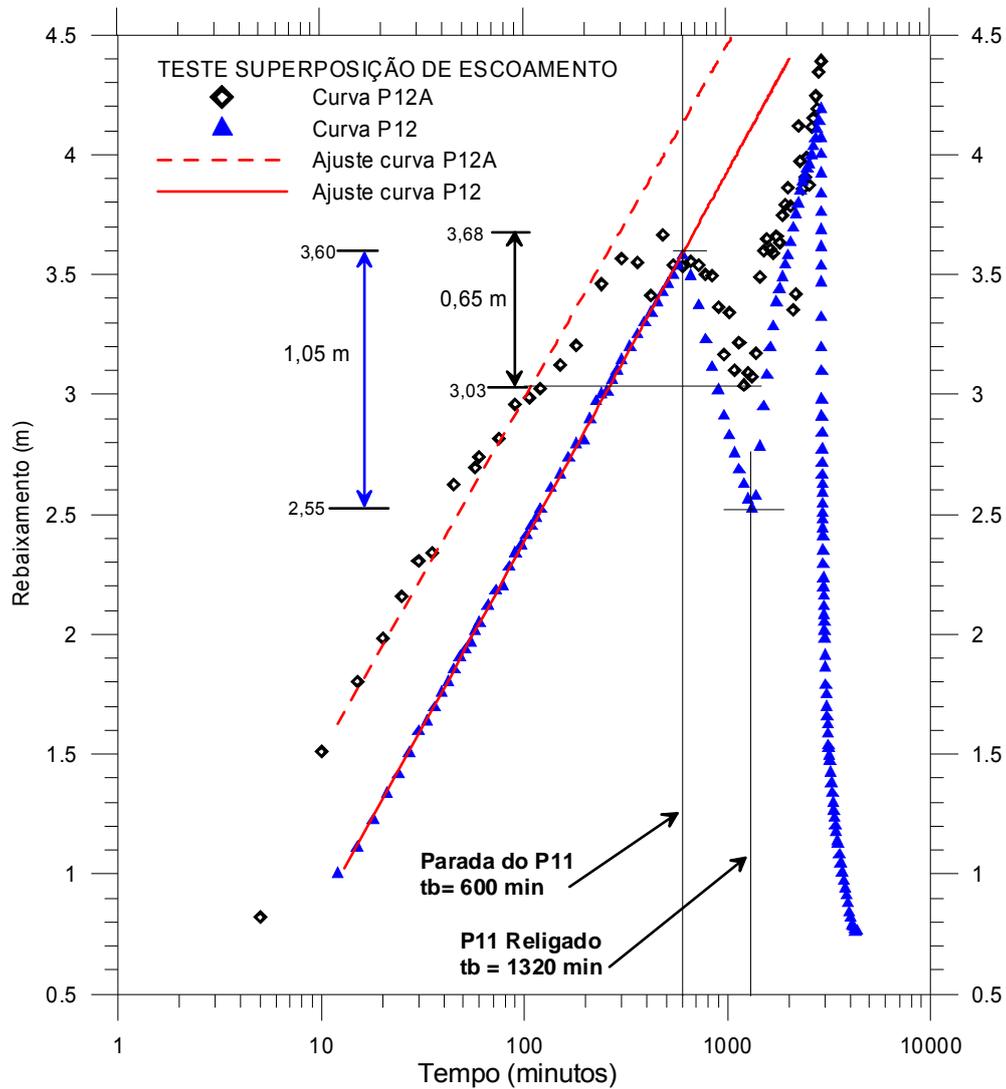
**Figura 4.52** – Localização do sítio de execução do teste do aquífero Açú em Mossoró usando os poços P12A e P12 do Hotel Thermas e incluindo (como superposição de escoamento) o efeito da paralisação de um terceiro poço (P11) localizado a cerca de 700 m ao sul.

**Tabela 4.47** – Matriz das distâncias entre os poços P11, P12 e P12A (sigla CAERN).

Poço	x	y	P11	P12	P12A
P11	682768	9427724	0	707	735
P12	682721	9428429	707	0	136
P12A	682585	9428436	735	136	0

Como se pode ver nas curvas da **figura 4.53**, tanto o efeito da paralisação do P11 (após 10 horas de teste) quanto o da sua volta à operação (12 horas depois ou com 22 horas de teste), se manifestaram de forma contundente

sobre as cargas hidráulicas dos poços que estavam sendo testados, caracterizando assim uma perfeita *superposição de escoamentos*.



**Figura 4.53** – Curvas de rebaixamento dos poços P12 e P12A exibindo resposta à paralisação do poço P11 após 10 horas de bombeamento no P12A.

#### 4.10.2.2 – Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos

A avaliação das características hidrodinâmicas realizada por Bezerra (1980), pelo método de Jacob, forneceu um coeficiente de transmissividade de  $4,64 \times 10^{-3} m^2 / s$ , e um coeficiente de armazenamento de  $1,04 \times 10^{-4}$  o que corresponde a uma difusividade hidráulica de  $44,6 m^2/s$

Apesar da excelente resposta do aquífero à superposição de escoamentos que aconteceu, Bezerra (1980) não conseguiu efetuar um cálculo direto da difusividade hidráulica por não saber exatamente em que instante aconteceu a paralisação do funcionamento do poço P11. Na verdade esse acontecimento não foi

planejado, mas aconteceu durante o período em que o teste de aquífero se encontrava em pleno andamento e somente foi identificado após o bombeamento.

No entanto, é possível avaliar esse instante se for considerada a difusividade hidráulica de 34 m<sup>2</sup>/dia determinada para o aquífero Açú no teste realizado em Baraúna (**equação 4.4**). Com essa difusividade os intervalos de tempo decorridos entre a parada do P11 e o seu efeito nos poços do Hotel Thermas, podem ser avaliados através da equação:

Tempo decorrido para chegada da onda no poço P12:

$$t = \frac{R^2}{2,25 \times D} = \frac{707^2}{2,25 \times 34} \cong 6534 \text{ seg} \cong 109 \text{ min} \cong 1,8 \text{ horas} \quad (4.7)$$

Tempo decorrido para chegada da onda no poço P12A:

$$t = \frac{R^2}{2,25 \times D} = \frac{735^2}{2,25 \times 34} \cong 7062 \text{ seg} \cong 118 \text{ min} \cong 1,96 \text{ horas} \quad (4.8)$$

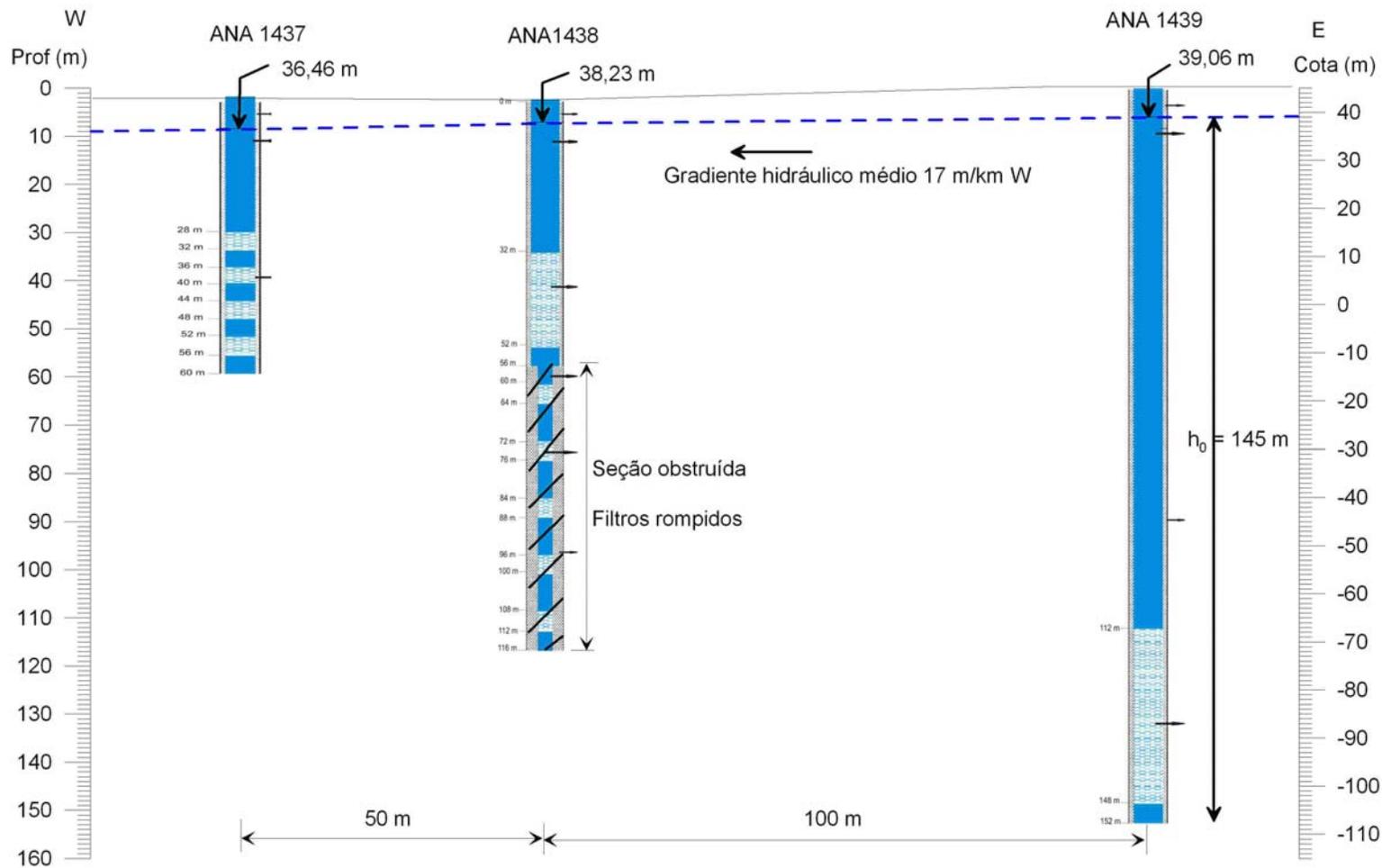
O teste foi iniciado às 22:00 horas do dia 05.02.1980 e o efeito da parada do P11 chegou ao poço P12 às 8:00 h do dia 06.02.1980, quando o tempo de bombeamento decorrido era igual a t = 600 minutos. Como decorreram 109 minutos entre a parada do P11 e a chegada da onda no P12, conclui-se que a referida parada aconteceu quando o tempo de bombeamento era igual 491 minutos, ou seja, exatamente às 6:11 do dia 06.02.80.

Adotando a difusividade avaliada em Baraúna, no teste de aquífero realizado com superposição de escoamento para o aquífero Açú e a transmissividade avaliada por Bezerra (1980), em Mossoró, o valor estimado para o coeficiente de armazenamento do aquífero Açú em Mossoró é igual a:

$$S = \frac{4,64 \times 10^{-3}}{34} \cong 1,4 \times 10^{-4} \quad (4.9)$$

#### **4.10.3 – Testes do aquífero Açú em Vertentes Santa Cruz**

Na zona de afloramento do aquífero Açú no oeste da área do projeto, cerca de 3 km a SE de Quixeré, foram construídos 3 (três) poços de pesquisa no Sítio Vertentes Santa Cruz (**Figura 4.54**) e realizados 3 (três) testes de aquífero.



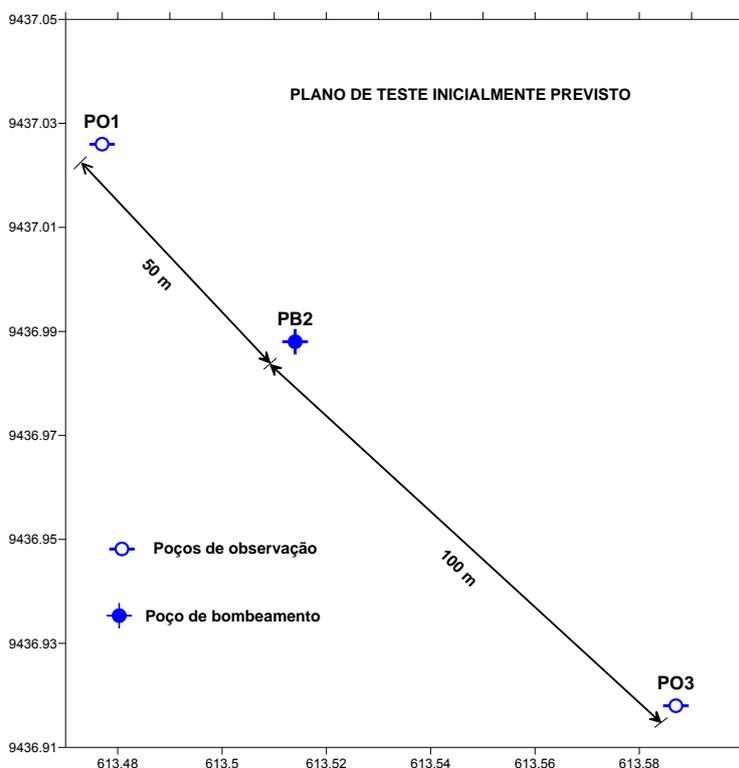
**Figura 4.54** – Seção ilustrativa dos poços usados nos testes de aquífero Açu em Vertentes Santa Cruz. Poço bombeado ANA1439 e observados ANA 1438 e ANA 1437.

Os poços (perfurados em diâmetro de 9 5/8") foram construídos em 3 (três) diferentes etapas de trabalho:

- ✓ Construção do poço P1 (ANA 1437): realizada em apenas 1 dia (14.08.09), tendo o poço sido completado com 60 m de profundidade e revestido com tubos e filtros de PVC geomecânico de 6". Foram instalados 16 m de filtros, a partir dos 28 m de profundidade, alternados com tubos lisos até a profundidade final de 60 m.
- ✓ Construção do poço P2 (ANA 1438): levada a efeito no período de 17.08.09 a 22.08.09 (6 dias). Perfurado até os 120m, esse poço foi completado até 116 m com revestimento e filtros de PVC geomecânico de 6" no intervalo de 0 a 52 m, sendo tubos lisos de 0 até 32 m e filtros de 32 a 52 m. O intervalo de 52 m a 116 m foi revestido com tubos e filtros do mesmo material em diâmetro de 4", e contendo 16 m de filtros alternados com tubos lisos.
- ✓ Construção do poço P3 (ANA 1439): esse poço foi construído no período de 11.09.09 a 24.09.09 (14 dias). A perfuração atingiu o cristalino a uma profundidade de 152 m e a completação realizada com tubos e filtros de PVC geomecânico de 6". No intervalo de 0 a 112 m foram instalados tubos lisos; os filtros ficaram no intervalo de 112 a 148 m e um tubo liso (*pé de poço*), no intervalo de 148 a 152 m.

#### 4.10.3.1 – Localização dos Poços

A localização e as distâncias entre esses poços são ilustradas na **figura 4.55**.



**Figura 4.55** – Localização dos poços no teste do aquífero Açu no Sítio Vertentes-Santa Cruz.

#### 4.10.3.2 - Execução dos testes

##### **Primeiro teste (03 de outubro de 2009)**

Para obter registros prévios do comportamento do nível d'água do aquífero antes do bombeamento, no dia 25.09.09 foram instalados 2 (dois) sensores de nível (*dataloggers*), sendo o primeiro no poço P1 (ANA 1437) e o segundo no poço P3 (ANA 1439), situados respectivamente a 50 m e a 100 m de distância do poço central P2 (ANA 1438). Levando em conta a espessura saturada do aquífero (145 m) e as distâncias entre os poços, o poço central foi eleito como poço de bombeamento.

O teste de aquífero foi iniciado no dia 03 de outubro às 16:00 horas, usando uma bomba submersa, cujas características técnicas são mostradas na **(tabela 4.48)**. Depois de ligada a bomba, com o crivo instalado a 30 m de profundidade no poço ANA 1438, verificou-se que o fluido bombeado era lama de perfuração e que o poço fora deixado pela SOHIDRA sem desenvolvimento e limpeza.

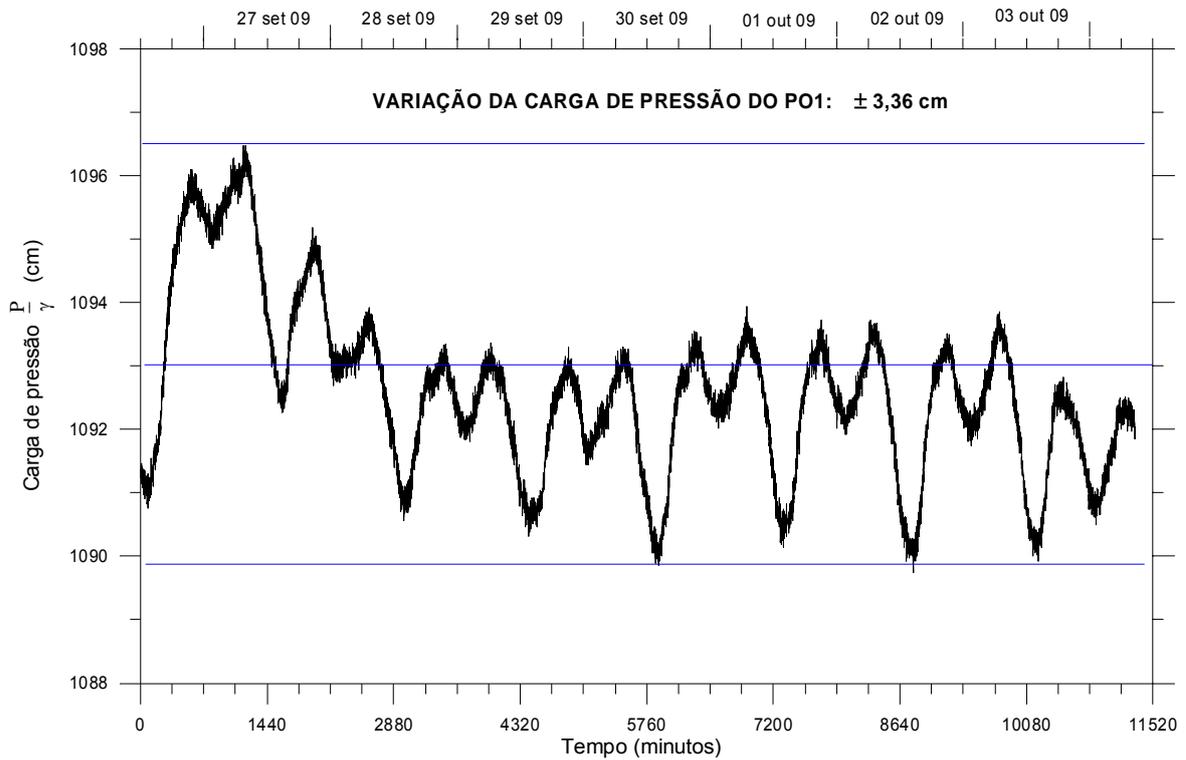
**Tabela 4.48** – Bomba submersa EBARA BP6 para poços de 6" usada no primeiro teste do aquífero Aquitardo Quebradas em Vertentes Santa Cruz.

Modelo	Estágio	Potencia		D mm	φpol BSP	L mm	VAZÃO (m <sup>3</sup> /h) e ALTURA ELEVATÓRIA (mca)				
		HP	kW				0	15	20	30	34
BHS-512-5	5	7,5	5,59	144	2	1233	67,2	61	57,8	42,8	33,2

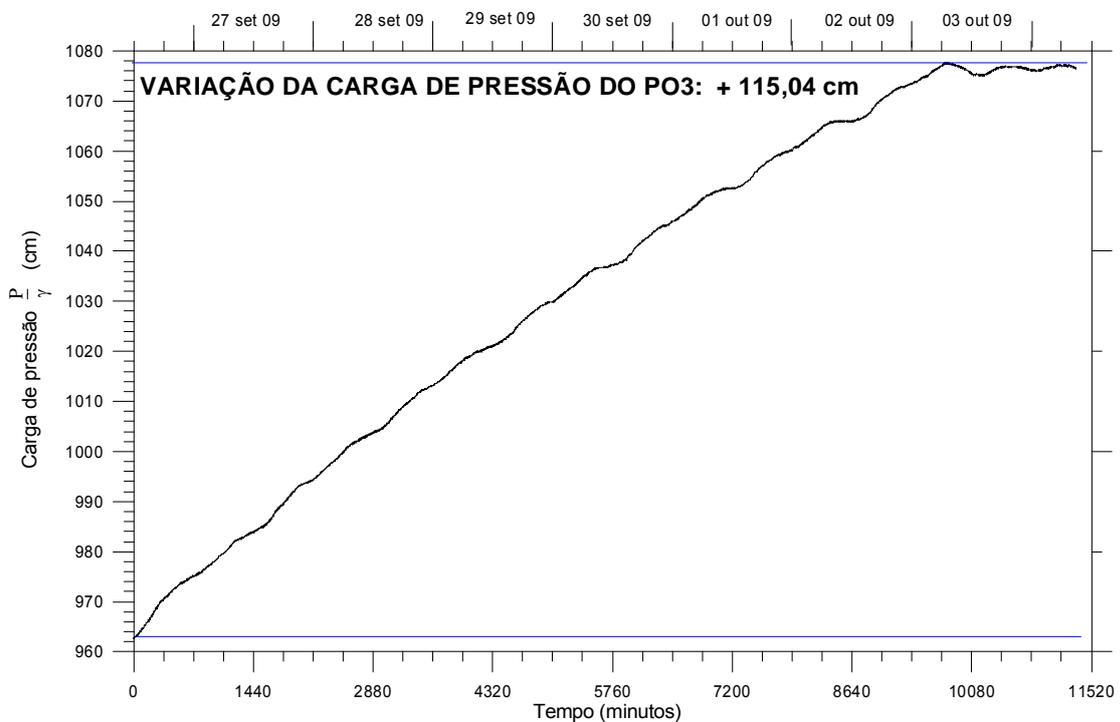
**Colapso dos filtros:** como o poço não foi desenvolvido, após 1 minuto de bombeamento com vazão de 13,2 m<sup>3</sup>/h, o nível da lama atingiu o crivo e nesse momento ouviu-se um forte estalo seguido de intenso carreamento de areia e cascalho para o tonel de medição de vazão. Ficou assim caracterizado que houve rompimento de filtros. Em poços não desenvolvidos, esse tipo de acidente costuma ocorrer quando o pré-filtro é mal instalado e não preenche totalmente o espaço anelar. Nesse caso, quando o poço é bombeado, o processo de acomodação do cascalho no espaço anelar, pode gerar pressões superiores à resistência dos filtros de PVC e causar o rompimento dos mesmos.

**Registros dos Dataloggers:** os registros de nível d'água obtidos durante 8 (oito) dias através dos sensores instalados nos poços PO1(ANA 1437) e PO3 (ANA 1439), são mostrados nas **figuras 4.56 e 4.57**.

A **figura 4.56** é o registro da oscilação diurna do poço PO1 (ANA 1437). Ele revela que o nível de água responde claramente à variação diurna de pressão atmosférica. Dentro do poço, a carga de pressão inicial medida pelo sensor, para uma lâmina de 10,07 m de fluido abaixo do nível estático, foi de 10,91 m, o que sugere numa densidade de fluido 9% maior do que a esperada para água limpa. Ainda assim a resposta do PO1 (ANA 1437) à variação diurna, mesmo estando parcialmente limpo é satisfatória.



**Figura 4.56** – Distribuição da carga de pressão no poço PO1 (ANA 1437) entre os dias 26/09/09 e 04/10/09, indicando uma oscilação diurna de  $\pm 3,36$  cm.



**Figura 4.57-** Distribuição da carga de pressão no poço PO3 (poço com lama) entre os dias 26/09/09 e 04/10/09, indicando uma variação de +115 cm na carga hidráulica.

Já no poço PO3 (ANA 1439), para uma lâmina de 8,4 m abaixo do nível estático, a carga de pressão medida foi de 10,76 m, indicando uma densidade de fluido 28% superior à densidade normal da água.

No gráfico da **figura 4.57** (entre as linhas azuis) observa-se que a carga de pressão subiu 115 cm, entre os dias 26.09.09 e 03.10.09. Esta subida da superfície potenciométrica do aquífero (no poço com lama) chega a mascarar a oscilação diurna, e se realiza em busca do estado de equilíbrio, que existia no aquífero antes da construção do poço. O gráfico sugere ainda que esse equilíbrio possa ter acontecido a partir das 6:00 horas do dia 03 de outubro de 2009.

Assim sendo, esse primeiro teste foi encerrado sem resultados por falta de condições para a sua devida realização.

### ***Segundo teste de bombeamento no poço ANA 1439***

Após serviços de desenvolvimento com compressor e limpeza com hexametáfosfato de sódio o poço P3 VSC – ANA 1439 foi submetido a um teste de bombeamento com o compressor no dia 26/11/2009. Esse teste teve duração de 12 horas e não foi registrada nenhuma interferência no poço PO2 - ANA 1438 situado a 100 m de distância, no qual foi instalado um transdutor de pressão. Partindo de um nível estático de apenas 8,5 m e com vazão de 4,5 m<sup>3</sup>/h chegou-se após 12 horas a um nível dinâmico de 55,66 m, equivalente a um rebaixamento de 47,16 m.

### ***Terceiro teste de bombeamento no poço ANA 1439***

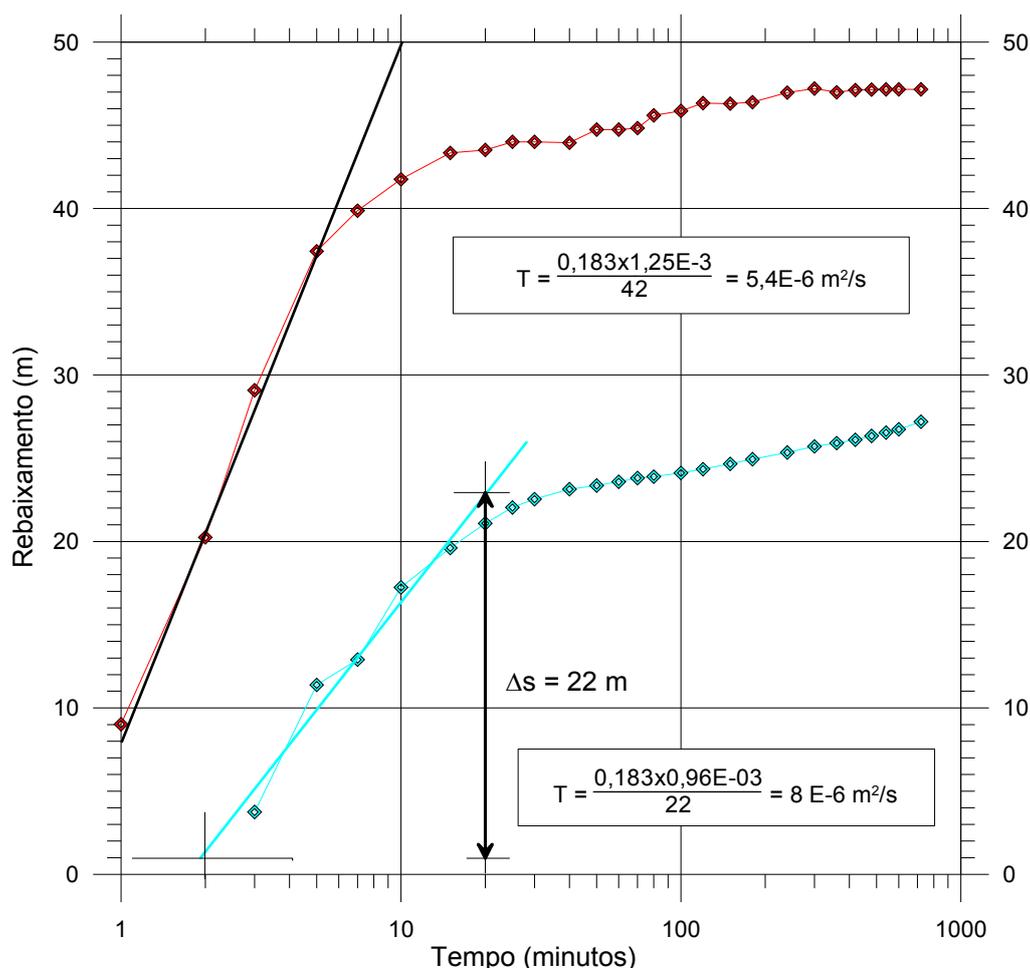
Um terceiro e último teste de bombeamento foi realizado no dia 01/12/2009 com bomba submersa no poço ANA 1439. Nessa data foi constatado que o nível estático do referido poço ainda se encontrava a uma profundidade de 17,86 m, apresentando, portanto, um rebaixamento residual de 9,36 m em relação ao nível estático que foi medido no segundo teste realizado no dia 26 de novembro de 2009. Essa constatação foi suficiente para concluir que a Formação Açú testada em Vertentes Santa Cruz é representada pelo seu membro superior caracterizado no Projeto Apodi como Formação Quebradas, aquífero do aquífero Açú.

Mesmo assim, o terceiro teste foi conduzido durante 24 horas com vazão de 3,5 m<sup>3</sup>/h alcançando um rebaixamento final de 28,25 m, sem produzir qualquer rebaixamento no poço de observação ANA 1438 situado a 100 m de distância.

### ***Avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos***

Como parâmetros hidrodinâmicos foi possível avaliar, em primeiro lugar, o coeficiente de **transmissividade** cujos valores foram, respectivamente, de  $5,4 \times 10^{-6} m^2 / s$  no segundo teste e de  $8,0 \times 10^{-6} m^2 / s$  no terceiro teste, conforme **figura 4.58**.

Em seguida, considerando a espessura saturada de 130 m do Quebradas em Vertentes Santa Cruz, e a transmissividade média obtida no segundo e terceiro testes de bombeamento, chega-se a uma **condutividade hidráulica horizontal** de  $5,2 \times 10^{-8} m / s$  para o aquífero Quebradas.



**Figura 4.58** – Curvas monolog de rebaixamento versus tempo obtidas no segundo e terceiro testes de bombeamento realizados no poço ANA 1439.

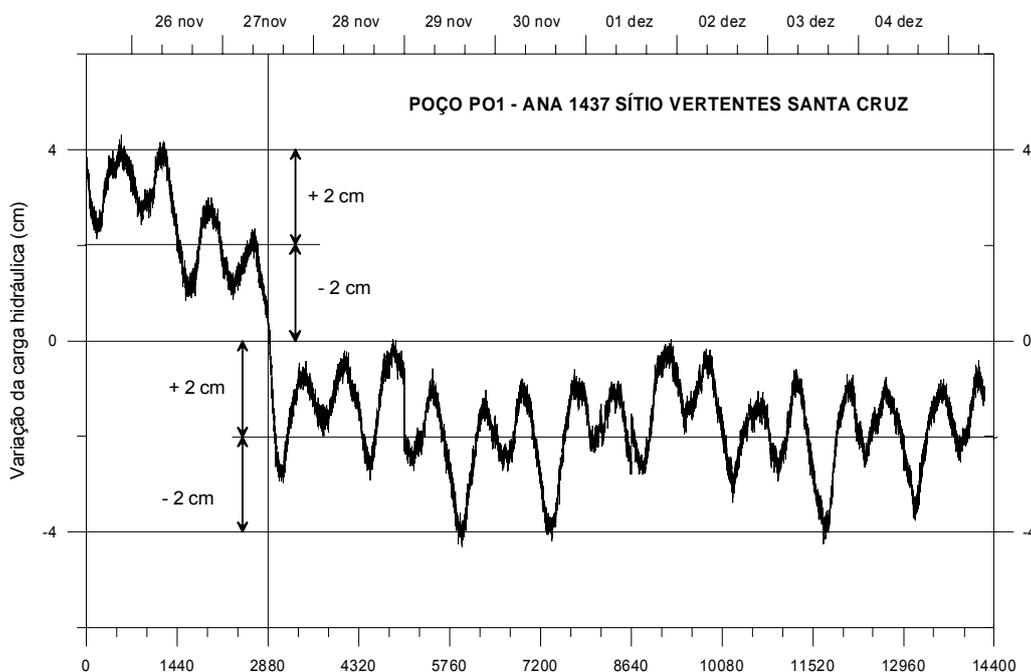
### **Conclusões da pesquisa do “aquífero” Açú em Vertentes Santa Cruz**

Através dos 3 (três) poços de pesquisa foi possível concluir que o “aquífero” testado na área de Vertentes Santa Cruz é na verdade o “aquitarado” Quebradas, constituído por intercalações de siltitos e folhelhos avermelhados e esverdeados de baixíssima condutividade hidráulica.

Além disso, foi evidenciado que a distribuição de carga hidráulica no aquitarado Quebradas, neste setor, exhibe uma declividade aparente de 17 m/km, no sentido contrário ao do mergulho das camadas para o interior da bacia Potiguar, que se realiza na direção sudeste. A tendência do fluxo subterrâneo nesse aquitarado na borda oeste da bacia Potiguar é de sul para norte ou de SSE para NNW em direção ao vale do rio Quixeré-Jaguaribe. Conclui-se ainda que esta zona de afloramento da Formação Quebradas não é uma zona de recarga das águas subterrâneas do aquífero Açú, como sempre se imaginou, devendo, portanto, os mapeamentos geológicos existentes serem revistos para dar conta dessa nova situação.

As constatações anteriores são ainda corroboradas pelo comportamento da carga de pressão registrada com “datalogger” no poço de observação PO1 - ANA 1437, mostrado no gráfico da **figura 4.59**. Trata-se de uma queda de 4 cm

observada na linha média de variação diurna da carga de pressão no poço ANA 1437, que parece ter ocorrido após 1 hora de bombeamento “air-lift” no dia 27 de novembro de 2009, realizado para limpeza no poço PO2 ANA 1438 situado a 50 m de distância. Essa queda, como se vê na **figura 4.59** permaneceu sem alteração como rebaixamento residual até o dia 04 de dezembro, quando foram encerrados os registros.



**Figura 4.59** – Registros da carga de pressão no poço ANA 1437 em Vertentes Santa Cruz.

#### 4.10.4 – Teste do aquífero Jandaíra em Furna de Pedra

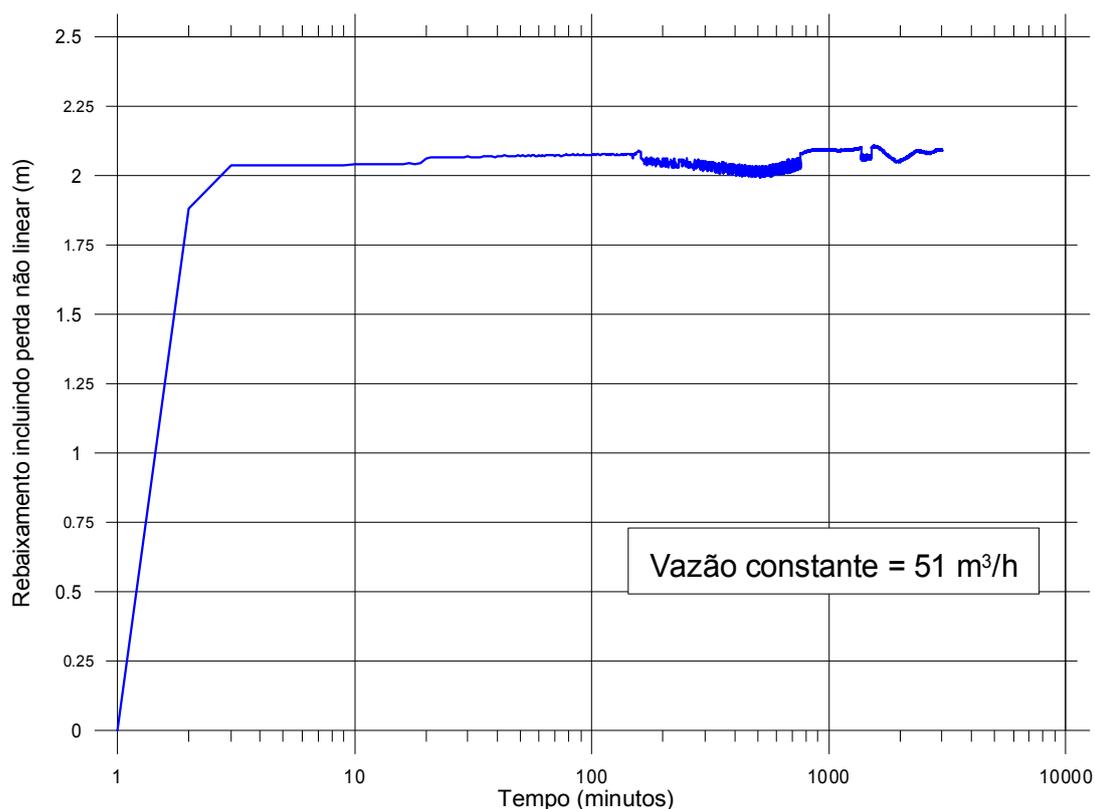
Um teste do aquífero Jandaíra em Furna de Pedra foi realizado usando o poço exploratório P1-FP e o poço de observação PO1-FP, ambos construídos pela SEMARH no âmbito do Projeto Apodi com o objetivo de avaliar as propriedades hidráulicas.

O referido teste teve duração de 24 horas e foi realizado com vazão constante de 51 m<sup>3</sup>/h. As variações da carga hidráulica foram registradas por sensores transdutores de pressão (dataloggers), o que confere uma ótima precisão às leituras registradas.

##### 4.10.4.1 – Curva do poço bombeado

Conforme sugere a curva registrada no poço bombeado (**figura 4.60**) logo após o início do bombeamento o nível de água sofreu uma perda de carga singular (não linear) de cerca de 2 m, decorrente do efeito da extração pontual da vazão de 51 m<sup>3</sup>/h.

### Poço P1-FP - Carst do Sítio Furna de Pedra - Baraúna - RN



**Figura 4.60** – Curva de rebaixamento registrada no poço bombeado P1-FP no sítio Furna de Pedra, em zona cárstica do aquífero Jandaíra.

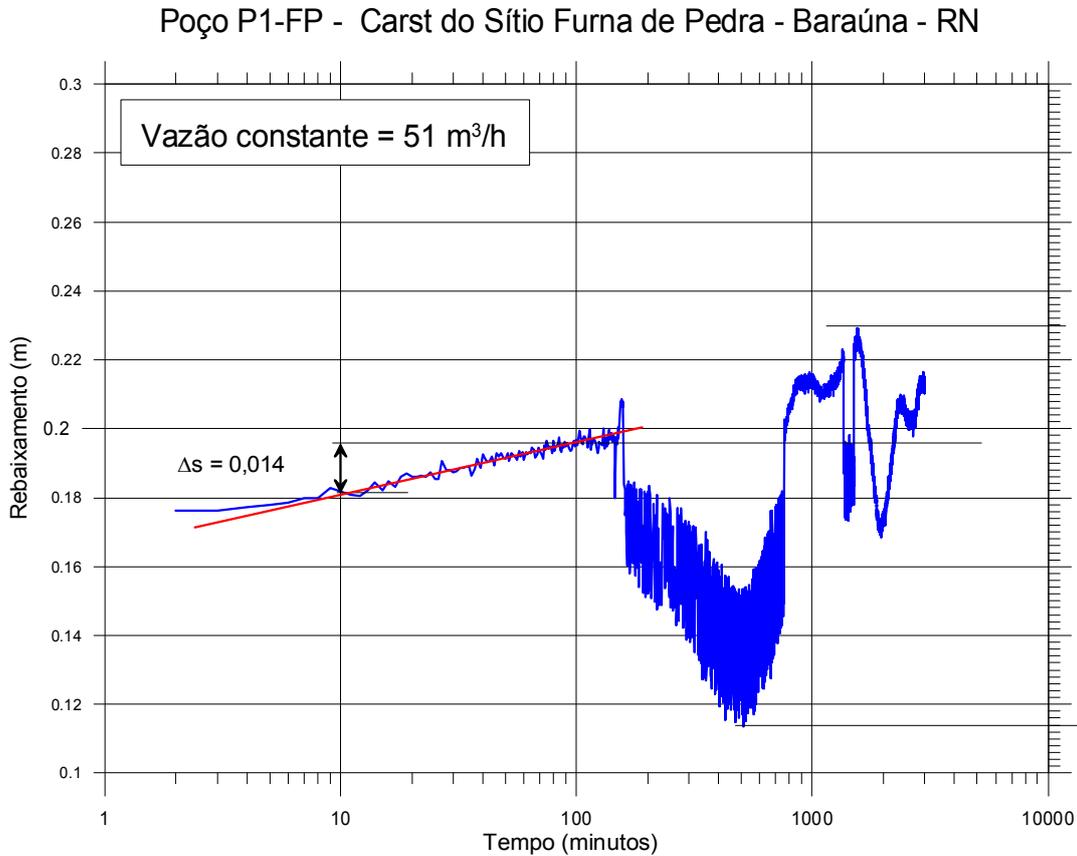
Excluída essa perda, nota-se que o rebaixamento observado com o tempo, (entre 2 minutos e o final do teste), se revela muito pequeno e evolui com variações praticamente imperceptíveis na **figura 4.60**, motivo pelo qual foi feita uma ampliação da escala vertical.

Com essa ampliação o gráfico de rebaixamento sem perda singular (**figura 4.61**), mostra (a partir dos 10 minutos até 150 minutos) uma oscilação cujo nível médio evolui segundo uma reta com declividade 0,014 m/ciclo logarítmico. Depois desse tempo, a água bombeada começou a retornar ao meio aquífero através das fendas e sumidouros existentes na área, como se vê claramente no gráfico. De fato a presença de cavernas, sugerida pelos estudos geofísicos e pelo mapeamento de campo, foi comprovada pelas perfurações e pelas perfilações óticas realizadas nos poços observados no teste de aquífero.

Em um meio aquífero com essas características os métodos clássicos de análise de testes de bombeamento costumam ser vistos como insatisfatórios para avaliação de parâmetros hidráulicos em face da heterogeneidade do meio poroso.

Diante disso, será usado um novo método de análise desenvolvido por Renard, *et al.* (2009), que sugere a utilização de **gráficos de diagnóstico** para escolha de um modelo de interpretação apropriado. Trata-se de uma metodologia recente que consiste na elaboração de um gráfico do rebaixamento e da sua

derivada em função do logaritmo do tempo. A partir da análise desses gráficos em escala mono-log e di-log foram escolhidos, respectivamente, os métodos de Jacob e Theis, como os modelos mais apropriados para a análise do teste.



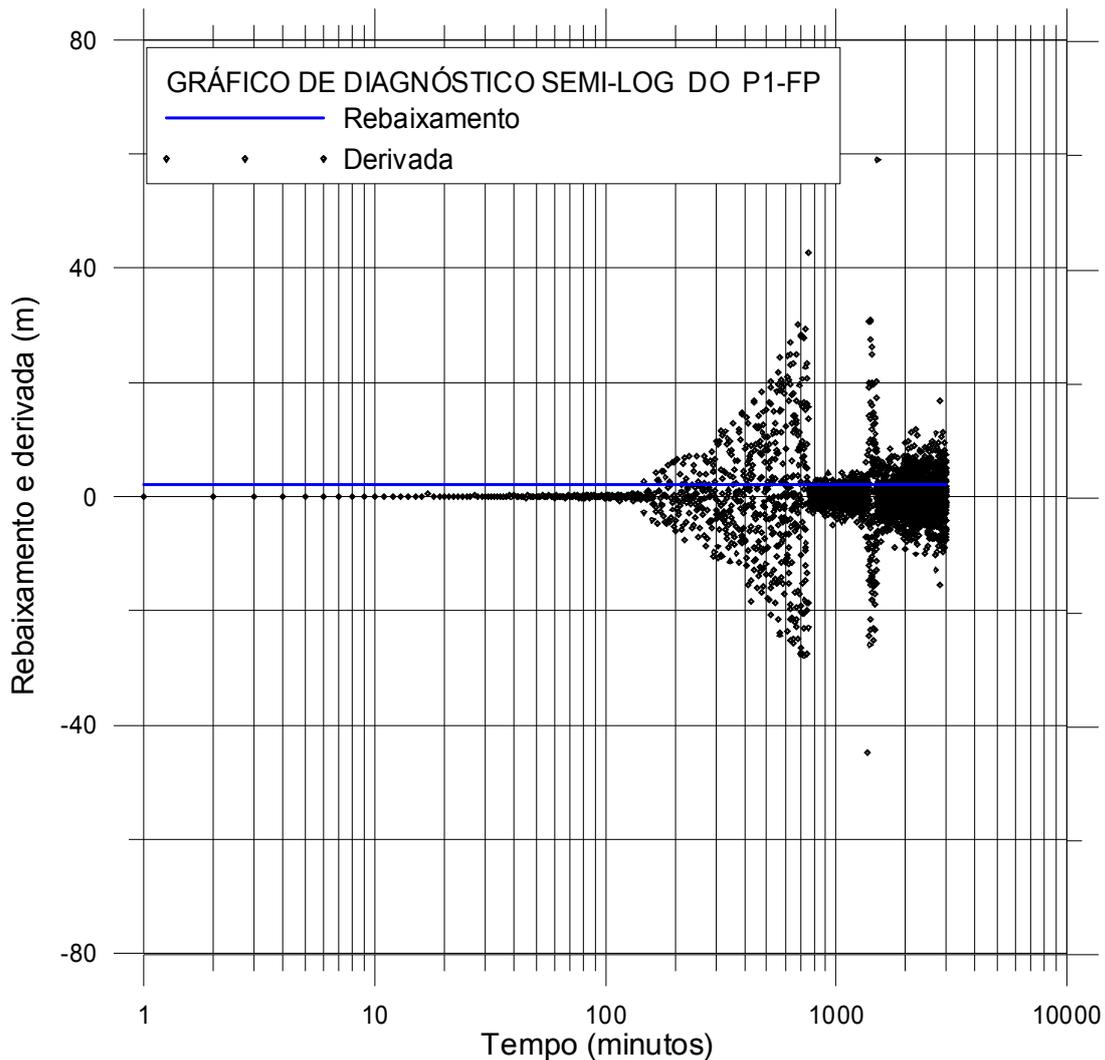
**Figura 4.61** - Curva de rebaixamento registrada no poço bombeado P1-FP no sítio Furna de Pedra, em zona cárstica do aquífero Jandaíra.

Os dados de campo foram obtidos através de *datalogger* para intervalos de tempo  $\Delta t = 1$  min entre as leituras, de modo que são muito precisos e permitem uma estimativa muito boa da derivada logarítmica. Essa derivada foi avaliada numericamente usando os pares de valores discretos das séries de rebaixamentos  $s_i$  registrados nos tempos  $t_i$  através da equação:

$$\left. \frac{\partial s}{\partial \ln t} \right|_{\Delta t} = \frac{s_i - s_{i-1}}{\ln(t_i) - \ln(t_{i-1})} \quad (4.10)$$

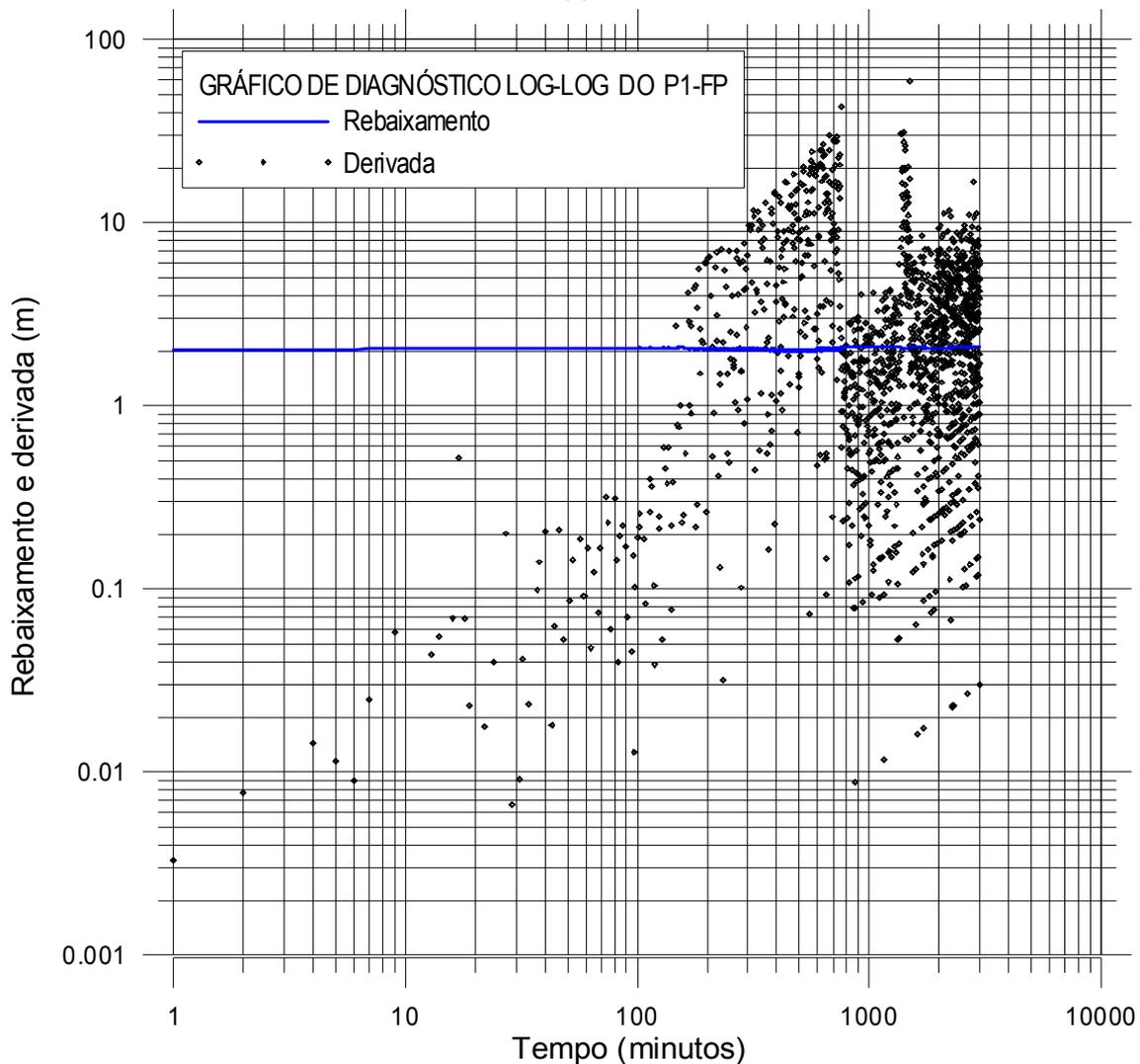
Para um total de 3003 registros, a estatística descritiva do rebaixamento indica uma média de 2,07 m com desvio padrão de 0,02 m e uma variação total de apenas 0,11 m, compreendida entre um mínimo de 1,99 m e um máximo de 2,10 m. Já a derivada logarítmica apresenta um valor médio de 0,02 m com desvio padrão de 6,18 m e variação total surpreendente de 103,86 m, compreendida entre - 44,80 m e 59,06 m.

Abrigando os valores do rebaixamento e da sua derivada logarítmica, o gráfico semi-log de diagnóstico (figura 4.62), em escala 1000 vezes maior do que a da figura 4.61, mostra que o rebaixamento de 2,07 m se mantém praticamente constante, ou seja, como uma reta de declividade nula. No mesmo gráfico a derivada apresenta uma oscilação crescente com o tempo, e os seus pontos se dispersam simetricamente em torno da linha de rebaixamento nulo, notadamente a partir dos 150 minutos. Esse resultado sugere que, a menos das oscilações diurnas e da perda localizada de 2 m no poço bombeado, o rebaixamento observado no poço se manteve praticamente constante, caracterizando um regime de equilíbrio que se explica pelo retorno da água bombeada ao meio aquífero.



**Figura 4.62** – Gráfico de diagnóstico semi-log do poço bombeado P1-FP no teste de aquífero realizado no carst de Furna de Pedra, município de Baraúna – RN.

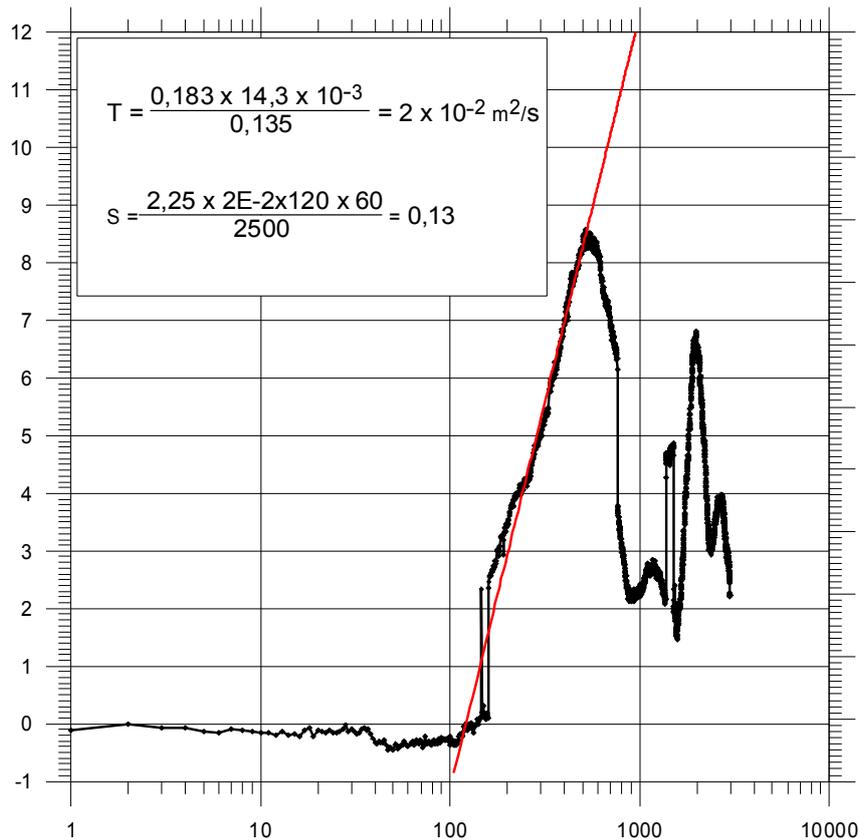
O gráfico de diagnóstico dilog do poço bombeado (figura 4.63) mostra na linha azul, o rebaixamento (variável de 1,99 m a 2,10 m), e apenas os valores positivos da derivada logarítmica, variáveis de 0,003 a 59 m. Até aí, nada se conclui desses valores positivos da derivada.



**Figura 4.63** – Gráfico de diagnóstico log-log do poço bombeado P1-FP no teste de aquífero realizado no carst de Furna de Pedra, município de Baraúna – RN.

#### 4.10.4.2 – Curva do poço de observação

A curva de rebaixamento do poço de observação PO1-FP, situado a 50 m de distância é mostrada na **figura 4.64**.

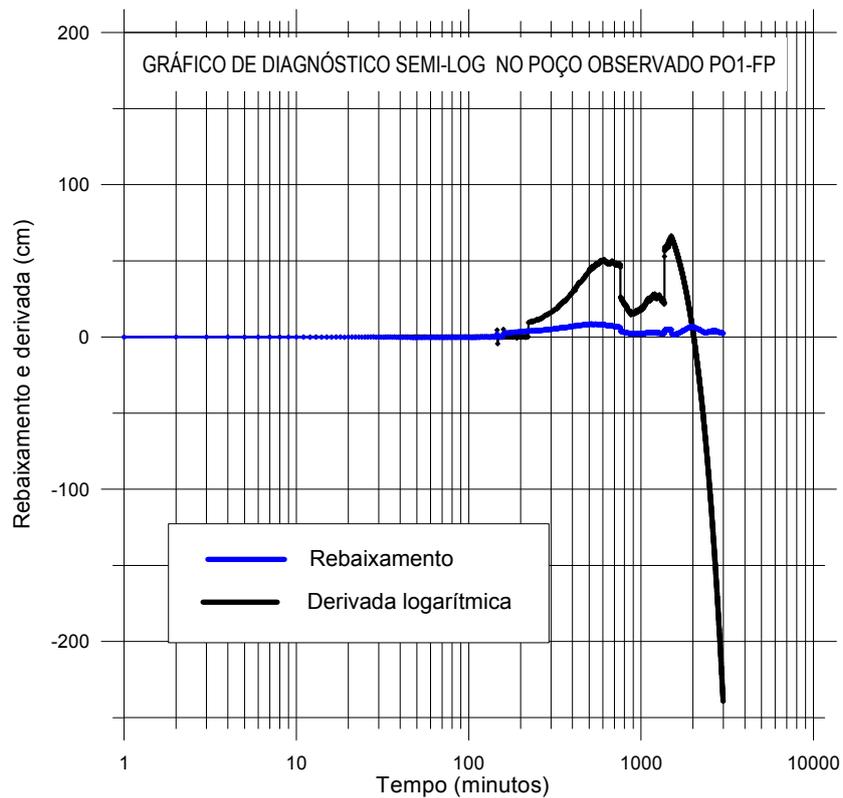


**Figura 4.64** – Curva de rebaixamento do poço de observação PO1-FP, a 50 m do poço bombeado no carst de Furna de Pedra (ajuste do modelo de Jacob, 1946).

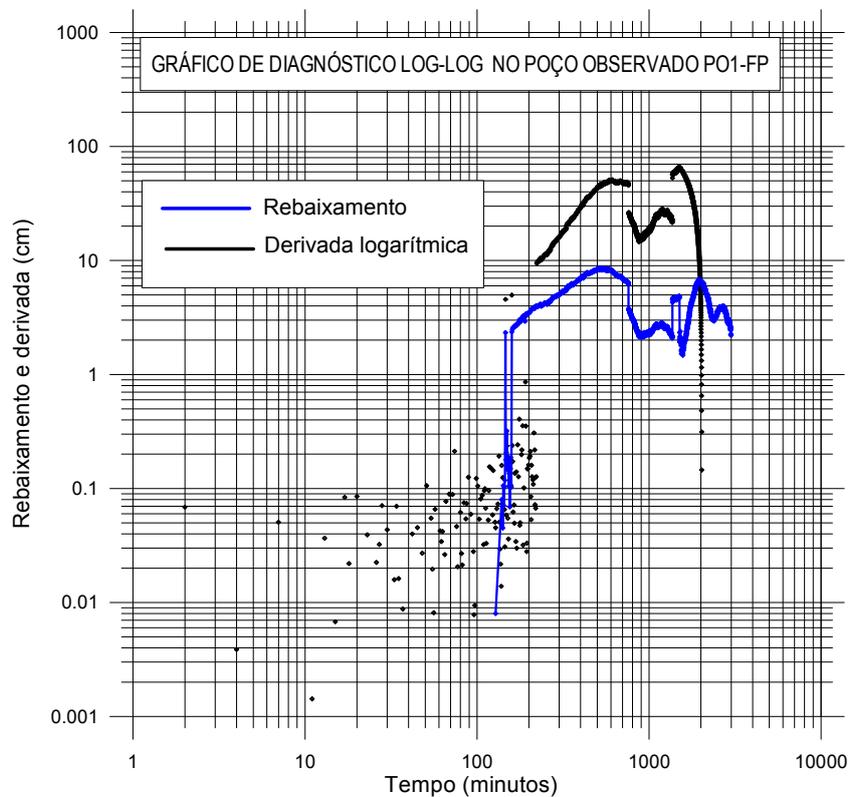
Não existe método específico para avaliação de propriedades hidráulicas em ambiente do tipo encontrado no carst da Furna de Pedra, a menos que ele seja considerado equivalente a um meio poroso contínuo. Se assim for, o gráfico de rebaixamento do poço de observação (**figura 4.64**) revela a possibilidade de se fazer uma estimativa satisfatória dos parâmetros hidráulicos do referido meio aquífero, pelo método de Jacob.

De fato, usando esse procedimento os valores estimados para os parâmetros hidráulicos foram respectivamente: transmissividade de  $T = 2,0 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$ , e coeficiente de armazenamento (porosidade efetiva)  $S_y = 0,13$ . Esses parâmetros são indicativos de um aquífero livre de altíssima transmissividade.

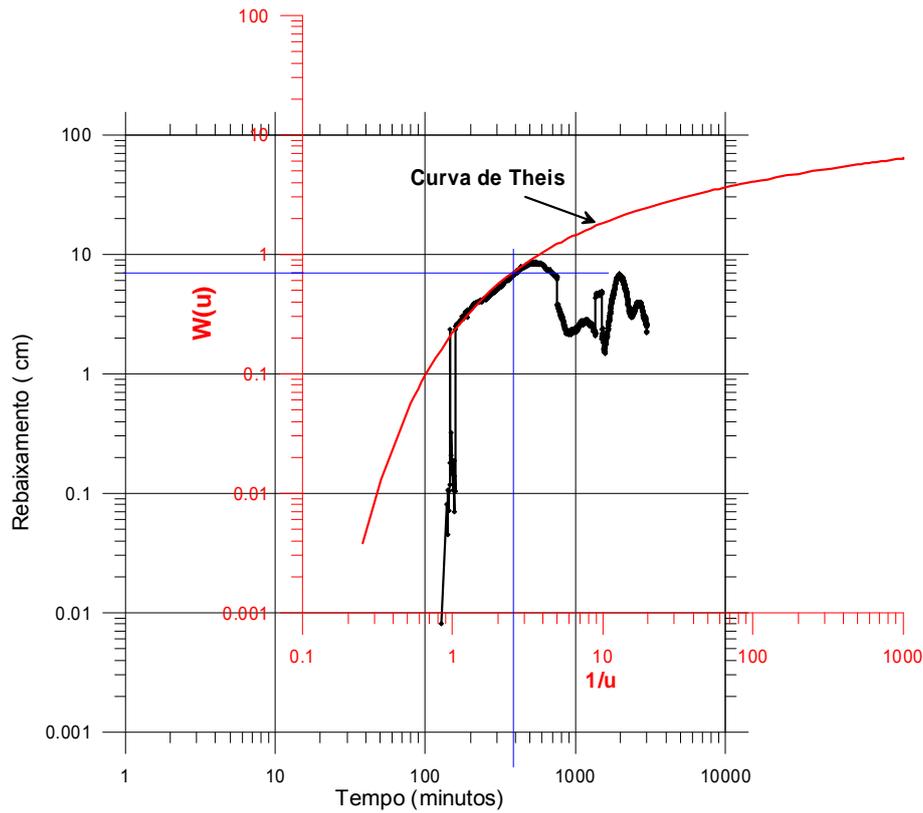
Convém alertar que embora a duração do teste tenha sido de 24 horas, os dados utilizados para a estimativa dos parâmetros hidráulicos ficam restritos aos valores observados no PO1-FP nas primeiras 6 horas de bombeamento. A partir desse tempo a água bombeada, lançada sobre a superfície do terreno, retornou rapidamente para o aquífero através da rede de canais constituintes dos sumidouros existentes no local, conforme se deduz da recuperação revelada pelo gráfico após o tempo de 6 horas (**figura 4.65**). Agora os gráficos de diagnóstico (**figuras 4.65 e 4.66**) confirmam que o trecho compreendido entre 2 horas e 6 horas de bombeamento pode ser usado para ajuste do modelo de Jacob (como feito na **figura 4.69**) e/ou do modelo de Theis, como feito na **figura 4.67**.



**Figura 4.65** – Gráfico de diagnóstico semi-log do poço observado PO1-FP no teste de aquífero realizado no carst de Furna de Pedra, município de Baraúna – RN.



**Figura 4.66** – Gráfico de diagnóstico log-log do poço de observação PO1-FP no teste de aquífero realizado no carst de Furna de Pedra, município de Baraúna – RN.



**Figura 4.67**– Curva de rebaixamento do poço de observação PO1-FP, a 50 m do poço bombeado no carst de Furna de Pedra (ajuste do modelo de Theis, 1935).

#### **Cálculo dos parâmetros pelo método de Theis**

$$Q = 51 \text{ m}^3 / h = 14,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s} \quad \left| \quad T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) = \frac{14,2 \times 10^{-3} \times 0,7}{4\pi \times 0,07} = 1,13 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \right.$$

$$\frac{1}{u} = 2,6 \rightarrow u = 0,385 \rightarrow W(u) = 0, \quad \left| \quad S_y = \frac{4 \times 1,13E - 2 \times 380 \times 60 \times 0,385}{2500} = 0,16 \right.$$

$$t = 380 \text{ min} \quad s = 0,07 \text{ m}$$

**Tabela 4.49** – Parâmetros hidráulicos do aquífero Jandaíra em Furna de Pedra.

Método	T m <sup>2</sup> /s	S <sub>y</sub>	D m <sup>2</sup> /s
Jacob	2,0 x 10 <sup>-2</sup>	0,13	0,15
Theis	1,1 x 10 <sup>-2</sup>	0,16	0,07
<b>Média</b>	<b>1,6</b>	<b>0,15</b>	<b>0,11</b>

#### 4.11 – Elaboração de modelos conceituais

A elaboração de um modelo conceitual de fluxo não pode ficar restrita à área do projeto (2538 km<sup>2</sup>) pelo fato da mesma estar inserida em um domínio hidrogeológico muito mais amplo (13000 km<sup>2</sup>), qual seja o da zona oeste da Bacia Potiguar, compreendido entre os vales dos rios Jaguaribe a oeste e do rio Piranhas a leste, tendo na sua parte central o vale do rio Apodi.

Nesse domínio mais amplo o sistema aquífero Apodi já era explotado em 2002 por 1048 poços existentes em operação dentre 1878 cadastrados. Naquela época, existiam na área do projeto 474 poços em operação contra 938 em 2009, o que significa um aumento de 98% no número de poços existentes em funcionamento na área do projeto.

Fica assim bastante claro que para avaliar as possibilidades de exploração do sistema aquífero Apodi na área do Projeto convém dispor de um modelo conceitual que ultrapasse os seus limites. Esse modelo já existe (Manoel Filho *et al.* 2003). Há, porém, necessidade de dados históricos de evolução de níveis e de vazões, na área do projeto, afim de que se possa efetuar simulações objetivando a calibração de um modelo local do aquífero Jandaíra, baseado no regional existente. A decisão consensual da CTAF foi de que a gestão deve ser feita para cada um dos dois aquíferos existentes (Açu e Jandaíra), separadamente.

No âmbito da gestão compartilhada, não é cogitada a exploração do  **aquífero Açu**. Isto porque, além de suas reservas serem constituídas exclusivamente de paleoáguas esse aquífero já vem sendo explotado na área do projeto, pela CAERN, Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte, para abastecimento urbano de água em Mossoró e Baraúna, há mais de 40 anos em regime de exaustão, também chamado de  *não equilíbrio*. Admite-se que o rebaixamento máximo permissível (RMP) para esse aquífero deva ser de 1/3 da carga de confinamento, em consonância com a regra de preservação dos 2/3 da reserva disponível sob pressão.

A ênfase da gestão compartilhada, portanto, se concentra no  **aquífero Jandaíra** para o qual definiu-se como reserva explotável, a recarga natural média de longo período, acrescida, eventualmente, em épocas críticas de estiagem, de uma parte da reserva permanente.

#### 4.12 – Aplicação de modelos computacionais

A orientação geral dada inicialmente para a aplicação de modelos computacionais, e considerada no relatório parcial RP04, foi a de que:

- No caso de ser a reserva reguladora insuficiente para o atendimento das demandas atuais e futuras, num horizonte de 50 anos, a alternativa recomendada seria retirar das reservas permanentes ( $V_{rp}$ ) uma parcela equivalente a 1/3 do seu volume, de modo a obter uma descarga adicional de  $(V_{rp}/150)$  m<sup>3</sup>/ano. Essa  **decisão de longo alcance** admite que a preservação de 2/3 do volume  $V_{rp}$  é bastante para a geração futura e

suficiente para manter 2/3 da espessura saturada como zona de admissão de água para os poços de exploração, por hipótese, totalmente penetrantes.

- Em termos de gestão, o objetivo dessa ideia é obter um **rebaixamento máximo permissível (RMP)** igual a 1/3 da espessura saturada, que possa servir de guia para o licenciamento e outorga de poços em **zonas de exploração do aquífero (ZEA)**, de modo a permitir que as concessões de uso da água sejam feitas **por zonas** e não **por poço**.
- A metodologia baseada no RMP tem maior chance de ser exitosa em aquíferos homogêneos e principalmente confinados, nos quais as simulações de fluxo através de modelos analíticos e/ou numéricos são bastante satisfatórias na prática, como é o caso do aquífero Açú.
- Esse, naturalmente, não é o caso do aquífero cárstico fissural Jandaíra, que é extremamente heterogêneo, apresentando amplas áreas com poços de pequena vazão e sobretudo zonas de sumidouros e cavernas nas quais grandes vazões são extraídas de poços com baixíssimos rebaixamentos, em situações localizadas que não podem ser extrapoladas para a escala regional sem grande risco de erro. Daí porque ao invés de um **RMP** decidiu-se prever uma **VMP (vazão máxima permissível)** avaliada através de um balanço de entrada-saída em cada ZEA.
- Considerando que o conceito de ZEA é fundamental para a gestão do aquífero, o ponto de partida para o **zoneamento da exploração** foi a inserção da área de estudo no interior de um retângulo de 90 km x 38 km, no qual foi feita uma partição em 40 células regulares de 85,5 km<sup>2</sup> (9 km x 9,5 km) das quais somente 33 tiveram em seu interior porções significativas da área de estudo no domínio do aquífero Jandaíra.
- Foi então realizado um balanço tendo como vazão de entrada em cada célula a recarga média de longo período e como descarga de saída, a vazão informada no cadastro de usuários realizado em 2009 na área do projeto. Verificou-se que o número de poços existentes em operação em cada célula varia de zero a mais de 130 estando concentrados principalmente nas células das regiões de Mossoró e Baraúna. Isto permitiu obter o **mapa de zoneamento da exploração do aquífero Jandaíra em 2009**, indicativo dos excedentes e/ou dos déficits existentes em relação à recarga natural (**figura 4.68**). Esse mapa revela que existe déficit significativo em relação à recarga de longo período nas células de números 15, 19 e 33, ilustradas no referido mapa.
- Embora essa conclusão baseada em vazão informada encerre algum grau de incerteza, os monitoramentos de nível que vêm sendo conduzidos pela SEMARH no Rio Grande do Norte, deverão certamente indicar, a curto prazo, até que ponto esse quadro é preocupante. A julgar pelo índice de concentração de poços, esta é a realidade.

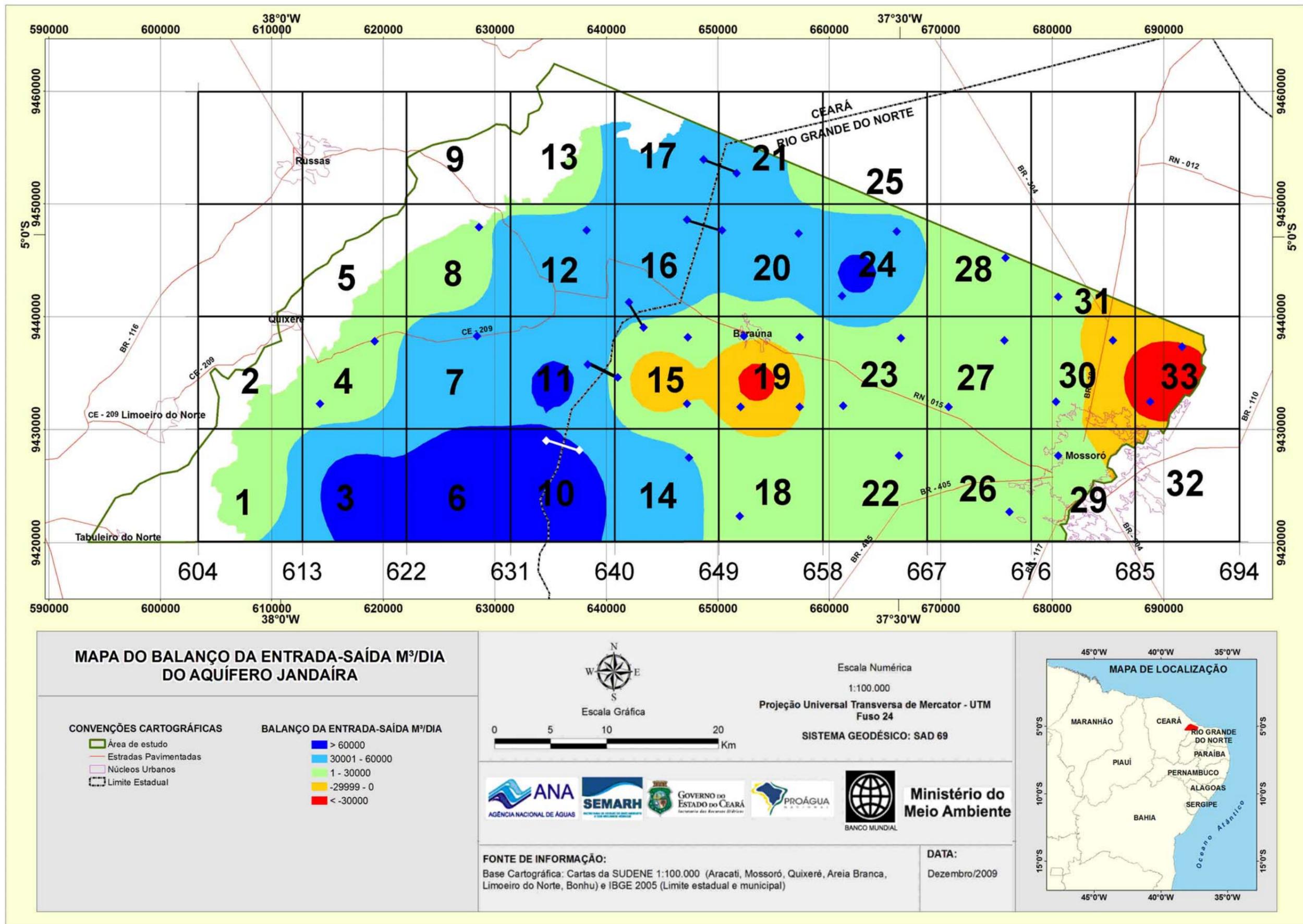
- Seja como for, há necessidade de implementar um programa de monitoramento automático de níveis e descargas de poços priorizando as zonas já diagnosticadas como críticas no atual estágio de conhecimento.
- Neste sentido é proposta em termos gerais sobre a área, uma rede de 40 sensores (**tabela 4.50**) distribuídos como mostra o mapa da **figura 4.68**, com absoluta prioridade para a instalação de 10 (dez) sensores, sendo 4 (quatro) na célula 15; 4 (quatro) na célula 19 e 2 (dois) na célula 33.
- Para permitir um melhor acompanhamento dos efeitos da exploração do aquífero ao longo da fronteira CE/RN são previstas 5 (cinco) seções transversais, com 2 (dois) poços em cada uma e ficando cada poço distante 1,5 km de cada lado da fronteira (**figura 4.68**).
- Em consonância com a Resolução CNRH 107/2010 é sugerida a instalação de sensores tipo LTC (nível, temperatura e condutividade elétrica) em poços de 60 m de profundidade, perfurados em 6" para essa finalidade (dedicados). São previstos em cada poço 6 m de tubo de PVC geomecânico de 6", apenas para proteção da parte superior, ficando o restante do poço sem revestimento. No aquífero Jandaíra esse é o padrão recomendado para os poços. Por questões de segurança contra vandalismo recomenda-se que o tubo de boca do poço não apareça na superfície, mas fique situado no interior de uma caixa (por exemplo, de 0,5 m x 0,5 m x 0,4m) recoberta por uma tampa de concreto.
- Para as campanhas semestrais de amostragem de água previstas na CNRH 107/2010, existem duas alternativas: **i)** Selecionar na rede qualitativa de 100 poços estudados, uma rede de 40 poços (equipados) situados o mais próximo possível dos locais previstos para a perfuração dos poços dedicados ao monitoramento automático. Ou seja, a locação dos dedicados (mais flexível) já seria feita o mais próximo possível de poços existentes devidamente equipados e em condições de serem usados para a amostragem de água; **ii)** a segunda alternativa (recomendada) seria efetuar as amostragens semestrais de água diretamente na rede de 40 poços dedicados, equipados com colunas de 60 m de tubos de PVC geomecânico de 75 mm de diâmetro, com 6 m de filtros, para introdução de uma **bomba de válvula dupla**, especialmente projetada para coletas de água.
- Preferencialmente, os poços devem ser perfurados em locais passíveis de vigilância por moradores (por exemplo, quintais de residências da zona rural). Os sensores de monitoramento automático dotados de interface USB devem ser programados para uma leitura diária (por exemplo, às 7:00 horas da manhã). Com uma leitura diária os sensores terão maior longa vida de serviço e os dados serão mais do que suficientes para a finalidade pretendida, que é a evolução temporal do nível de água, da temperatura e da salinidade em uma zona de exploração. Portanto, não há necessidade de leituras horárias. A frequência proposta de coleta dos dados é trimestral, ou seja, de 4 (quatro) vezes por ano, para permitir uma análise sistemática

dos dados pelo órgão gestor ao longo do ano e apresentação dos mesmos no relatório anual.

- O monitoramento de descargas dos poços deve ser incentivado e compartilhado principalmente com os principais usuários, a exemplo do que já vem sendo feito no Ceará pela COGERH.
- Com utilização dos dados coletados, são recomendadas avaliações anuais através de modelagem analíticas e numéricas das zonas de exploração monitoradas, incluindo análise dos registros coletados, calibração de modelos de fluxo, e implementação de modelos de otimização de vazões, em escala de ZEA, compondo um **Relatório Anual de Controle da Exploração**, circunstanciado.

**Tabela 4.50** – Coordenadas dos pontos onde deverão ser executados poços para instalação de sensores para monitoramento automático de nível, temperatura e condutividade elétrica da água do aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi.

id	x	y	id	x	y
S01	615250	9431875	S21	655750	9427125
S02	634380	9428040	S22	655750	9431875
S03	619750	9436625	S23	655750	9436625
S04	628750	9436625	S24	655750	9446125
S05	628750	9446125	S25	660250	9431875
S06	637270	9427225	S26	660250	9441375
S07	638070	9435480	S27	651145	9450880
S08	637750	9446125	S28	664750	9427125
S09	640575	9433800	S29	664750	9436625
S10	642550	9438400	S30	664750	9446125
S11	640950	9440950	S31	669250	9431875
S12	646750	9427125	S32	673750	9422375
S13	646750	9431875	S33	673750	9436625
S14	646750	9436625	S34	673750	9446125
S15	646425	9445425	S35	678250	9427125
S16	651250	9422375	S36	678250	9431875
S17	651250	9431875	S37	678250	9441375
S18	651250	9436625	S38	682750	9436625
S19	649355	9444755	S39	687250	9431875
S20	648275	9451800	S40	691750	9436625



**Figura 4.68** – Mapa de distribuição da rede proposta de monitoramento automático nas zonas de exploração do aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi, definidas em função do balanço de entrada (recarga) menos saída por bombeamento de poços existentes.

#### 4.13 – Avaliação da recarga

Conforme previsto nos Termos de Referência a avaliação da recarga deveria ser feita utilizando:

- Dados hidrológicos e clima – recessões e vazão de escoamento natural
- Experimentos de campo
- Variação sazonal dos níveis de água obtida das campanhas de monitoramento de níveis de água

##### 4.13.1 – Estimativa da recarga a partir de dados hidrológicos

A avaliação da recarga a partir de dados hidrológicos e de clima foi realizada através do balanço hídrico diário de Thornthwaite (1979-2008) com estimativa da precipitação média pelo método de Thiessen, fazendo uso dos totais mensais de chuvas diárias, conforme já descrito no **item 4.3**.

O balanço foi feito em escala regional, por setor de bacia hidrográfica existente na área do Projeto (**ver figura 4.35**), uma vez que a drenagem do escoamento ( $Q=I+R$ ) calculado no balanço é controlada pelos referidos setores (A1 Jaguaribe; A2 Mata Fresca; A3 Apodi), naturalmente separados por linhas divisórias de escoamento superficial e, no caso, até de água subterrânea. Os resultados são os indicados na **tabela 4.51**.

**Tabela 4.51** – Recarga avaliada por setor de bacia hidrográfica na área do Projeto, a partir do balanço hídrico (1979 – 2008).

Setor de Bacia	Bacia Hidrográfica	Área Km <sup>2</sup>	50% Probabilidade		90% Probabilidade	
			mm	m <sup>3</sup> /s	mm	m <sup>3</sup> /s
A1	Rio Jaguaribe	518	51,2	0,84	5,5	0,09
A2 Norte	Riacho Mata Fresca	575	351,5	6,42	59,8	1,09
A2 Sul	Riacho Mata Fresca	750	400,5	9,54	68,2	1,62
A3	Rio Apodi	695	88,9	1,96	6,8	0,15
		<b>2538</b>		<b>18,76</b>		<b>2,95</b>

O ponto essencial a ser notado nesses resultados é a **incerteza hidrológica** indicada pelos dados analisados, que reduz a recarga de 18,75 m<sup>3</sup>/s (com 50% de risco) para 2,95 m<sup>3</sup>/s com 10% de risco. Esse é, sem dúvida, no entender da CONSULTORA, o comportamento esperado na área do Projeto, dada a sua consistência com a irregularidade climática do semiárido nordestino, onde se convive com um regime de chuvas irregulares da ordem de 700 mm/ano e com um regime de evapotranspiração potencial praticamente constante de 1850 mm/ano.

##### 4.13.2 – Estimativa da recarga a partir de ensaios de infiltração

###### **Experimentos de campo**

Foram realizados 40 ensaios de infiltração com infiltrômetro de duplo anel, sendo 10 testes sobre sedimentos da Formação Barreiras, 20 testes sobre os calcários da Formação Jandaíra e 10 testes sobre os arenitos da Formação Açú, aflorantes no setor ocidental da área de estudo.

A análise dos dados obtidos no campo consistiu na construção de gráficos de variação da taxa de infiltração com o tempo aos quais foi ajustada a conhecida

equação de Horton (**equação 4.11**). Trata-se de uma equação empírica, na qual, por hipótese, a infiltração inicia com uma taxa  $f_0$  e decresce exponencialmente com o tempo  $t$ . Admite-se que depois de um tempo variável, quando a umidade do solo atinge um grau elevado (próximo da saturação), a taxa de infiltração converge para um valor constante  $f_c$ .

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t} \quad (4.11)$$

- ✓  $f_t$ : taxa de infiltração no tempo  $t$ ;
- ✓  $t$ : tempo transcorrido desde o início do processo de infiltração;
- ✓  $f_0$ : taxa de infiltração inicial (tempo  $t = 0$ );
- ✓  $f_c$ : taxa de infiltração alcançada quando a umidade do solo está próxima da saturação;
- ✓  $k$ : taxa de decaimento constante da taxa de infiltração, específica para cada solo.

O ajuste da equação de Horton foi feito através de uma macro em Visual Basic Excel, que calcula a taxa de infiltração  $f_t$  e fornece os parâmetros estatísticos indicativos da qualidade do ajuste (coeficiente de determinação  $R^2$  e erro padrão  $\sigma_e$ ). Nesse programa, os valores de  $f_0$  e  $f_c$  obtidos das curvas de campo são introduzidos como parâmetros de entrada. Em seguida, usando valores de  $k$ , por tentativa e erro, calcula-se a taxa de infiltração  $f_t$  para um número de valores de tempo suficiente para produzir uma curva contínua e bastante suave da variação da taxa de infiltração com o tempo, como mostrado nos gráficos do **anexo A4.4**.

Para a construção das curvas de campo e das curvas ajustadas de Horton utiliza-se naturalmente um programa específico para construção de gráficos.

Os valores obtidos da **taxa de infiltração** medida com infiltrômetro de duplo anel são apresentados na **tabela 4.52**; os valores de condutividade hidráulica obtidos em laboratório estão da **tabela 4.53** e a estatística descritiva desses parâmetros é mostrada na **tabela 4.54**. Globalmente essa taxa varia de 0,03 a 13,2 m/dia, com média de 1,8 m/dia. Por aquífero, a média é de 1,1 m/dia no Açú, 0,8 m/dia no Barreiras e 2,7 m/dia no calcário Jandaíra.

**Tabela 4.52** – Resultados dos testes de infiltração realizados em campo com infiltrômetro de duplo anel.

Ponto	x	y	Local	Município	f <sub>c</sub> m/dia	R <sup>2</sup>	Erro Padrão
Acu-01	632671	9455574	Lagoa Vermelha	Jaguaruana	0,40	0,964	0,2
Acu-02	625284	9454149	Campo Limpo	Russas	0,13	0,945	0,1
Acu-03	628729	9450431	Serra do Vieira	Russas	0,19	0,973	0,1
Acu-04	614311	9441584	Leão	Quixeré	0,96	0,962	0,1
Acu-05	616399	9443223	Boqueirão	Quixeré	0,38	0,915	0,1
Acu-06	613558	9436658	Sítio Vertentes	Quixeré	1,60	0,972	0,1
Acu-07	611919	9438483	Quixeré	Quixeré	5,38	0,976	0,1
Acu-08	606117	9430381	Limoeiro do Norte	L.do Norte	0,43	0,912	0,1
Acu-09	602345	9425008	Sítio Imbueiro	Taboleiro do Norte	0,10	0,944	0,1
Acu-10	602768	9421195	Lagoa da Salina	Taboleiro do Norte	1,39	0,961	0,1
Bar-01	684796	9437930	Puxa Boi	Mossoró	0,67	0,901	0,1
Bar-02	683997	9434932	Distrito Ind. BJ Services	Mossoró	0,03	0,871	0,1
Bar-03	683087	9432062	Sal Jacaré	Mossoró	0,38	0,931	0,1
Bar-04	681649	9427697	Nova Betânia	Mossoró	0,20	0,974	0,1
Bar-05	679412	9425785	Bom Pastor	Mossoró	1,20	0,961	0,1
Bar-06	672813	9424858	Sítio Rosa de Saron	Mossoró	2,40	0,974	0,1
Bar-07	674943	9428699	Barrinha	Mossoró	0,19	0,909	0,0
Bar-08	675233	9434993	Cigano	Mossoró	0,36	0,941	0,1
Bar-09	678594	9439326	Senegal	Mossoró	1,20	0,958	0,2
Bar-10	674303	9445152	Lagedo	Mossoró	1,20	0,954	0,1
Jdr-01	615807	9433225	Tomé	Quixeré	0,82	0,992	0,0
Jdr-02	631199	9448077	Serra do Vieira	Russas	0,43	0,982	0,1
Jdr-03	623157	9438094	Maria Preta	Quixeré	0,38	0,965	0,1
Jdr-04	640473	9453221	Lagoa da Salsa	Jaguaruana	4,80	0,996	0,1
Jdr-05	623613	9422783	KM-60	Limoeiro do Norte	3,60	0,965	0,1
Jdr-06	624158	9434413	Lagoinha	Quixeré	5,18	0,981	0,1
Jdr-07	636772	9422630	BAIXA BRANCA	Baraúna	2,64	0,991	0,1
Jdr-08	643294	9435540	MATO ALTO	Baraúna	0,90	0,946	0,2
Jdr-09	645123	9442760	Corrego de Pedras	Jaguaruana	0,46	0,978	0,1
Jdr-10	651097	9444199	Furna de Pedra	Baraúna	13,25	0,991	0,2
Jdr-11	657482	9450230	Pico estreito	Baraúna	2,74	0,991	0,1
Jdr-12	653003	9422795	Recreio	Baraúna	1,80	0,957	0,1
Jdr-13	650423	9430187	Recreio	Baraúna	3,55	0,991	0,1
Jdr-14	653273	9436752	Recreio	Baraúna	0,76	0,977	0,1
Jdr-15	656472	9440560	Toca da Raposa	Baraúna	2,06	0,991	0,0
Jdr-16	664970	9446237	Vila Nova	Baraúna	2,67	0,949	0,3
Jdr-17	665225	9423501	Ass. Fam. Rosado		1,49	0,991	0,1
Jdr-18	662830	9428305	Ass. São José I	Mossoró	4,80	0,981	0,1
Jdr-19	659265	9436288	Campestre	Baraúna	0,45	0,926	0,2
Jdr-20	658320	9434626	Fazenda Miranda	Baraúna	0,76	0,991	0,0

**Tabela 4.53** – Resultados dos testes de condutividade hidráulica realizados no Laboratório de Mecânica de Solos da Universidade Federal do Ceará.

Ponto	x	y	Local	Município	Condutividade Hidráulica (m/dia)	
					Vertical	Horizontal
AÇU-01	632671	9455574	Lagoa Vermelha	Jaguaruana	0,06	0,08
AÇU-02	625284	9454149	Campo Limpo	Russas	0,01	0,05
AÇU-03	628729	9450431	Serra do Vieira	Russas	0,10	3,80
AÇU-04	614311	9441584	Leão	Quixeré	1,04	3,28
AÇU-05	616399	9443223	Boqueirão	Quixeré	0,16	0,20
AÇU-06	613558	9436658	Sítio Vertentes	Quixeré'	0,05	0,08
AÇU-07	611919	9438483	Quixeré	Quixeré	1,30	0,41
AÇU-08	606117	9430381	Limoeiro do Norte	Lim. do Norte	0,32	3,02
AÇU-09	602345	9425008	Sítio Imbueiro	Tab. do Norte	0,03	0,08
AÇU-10	602768	9421195	Lagoa da Salina	Tab. do Norte	0,04	0,20
Bar-01	684796	9437930	Puxa Boi	Mossoró	5,96	3,63
Bar-02	683997	9434932	Distrito Ind. BJ Services	Mossoró	0,47	0,95
Bar-03	683087	9432062	Sal Jacaré	Mossoró	7,00	0,11
Bar-04	681649	9427697	Nova Betânia	Mossoró	1,21	0,95
Bar-05	679412	9425785	Bom Pastor	Mossoró	0,20	0,60
Bar-06	672813	9424858	Sítio Rosa de Saron	Mossoró	3,02	2,16
Bar-07	674943	9428699	Barrinha	Mossoró	9,50	18,14
Bar-08	675233	9434993	Cigano	Mossoró	0,39	0,56
Bar-09	678594	9439326	Senegal	Mossoró	1,38	4,84
Bar-10	674303	9445152	Lagedo	Mossoró	0,06	3,11
Jdr-01	615807	9433225	Tomé	Quixeré	0,56	1,12
Jdr-02	631199	9448077	Serra do Vieira	Russas	0,10	8,21
Jdr-03	623157	9438094	Maria Preta	Quixeré	0,03	0,27
Jdr-04	640473	9453221	Lagoa da Salsa	Jaguaruana	0,09	0,55
Jdr-05	623510	9424020	KM-60	Lim. do Norte	0,19	0,27
Jdr-06	629570	9431830	Lagoinha	Quixeré	0,50	1,04
Jdr-07	636772	9422630	BAIXA BRANCA	Baraúna	0,51	0,52
Jdr-08	643294	9435540	MATO ALTO	Baraúna	0,95	1,56
Jdr-09	645123	9442760	Córrego de Pedras	Jaguaruana	0,08	0,05
Jdr-10	651097	9444199	Furna de Pedra	Baraúna	3,28	3,97
Jdr-11	657482	9450230	Pico estreito	Baraúna	3,28	6,74
Jdr-12	653003	9422795	Recreio	Baraúna	0,07	1,21
Jdr-13	650423	9430187	Recreio	Baraúna	0,60	3,20
Jdr-14	653273	9436752	Recreio	Baraúna	0,10	3,37
Jdr-15	656472	9440560	Toca da Raposa	Baraúna	1,12	1,99
Jdr-16	664970	9446237	Vila Nova	Baraúna	0,22	5,44
Jdr-17	665225	9423501	Ass. Fam. Rosado		4,41	6,74
Jdr-18	662830	9428305	Ass. São José I	Mossoró	5,36	12,10
Jdr-19	659265	9436288	Campestre	Baraúna	1,38	7,52
Jdr-20	658320	9434626	Fazenda Miranda	Baraúna	0,01	0,10

O mapa de distribuição espacial da taxa de infiltração na área do Projeto é mostrado na (figura 4.69), valendo notar que na grande maioria do território essa taxa é inferior ou igual a 3 m/dia.

### **Experimentos de laboratório**

Em cada um dos 40 (quarenta) pontos de medição da taxa de infiltração em campo, foram coletadas 3 (três) amostras de solo usando a metodologia especificada no Termo de Referência, para determinação das condutividades hidráulicas horizontal (Kh) e vertical (Kv).

Os ensaios foram levados a efeito no Laboratório de Mecânica do Solo da Universidade Federal do Ceará e os resultados obtidos são apresentados na **tabela 4.53**.

A estatística descritiva dos 40 (quarenta) valores de Kv e Kh (**tabela 4.54**) revela que:

- ✓ Os valores de Kv situam-se no intervalo de [0,01 a 9,5] m/dia, com média de 1,4 m/dia.
- ✓ Os valores de Kh estão no intervalo [0,1 a 18,1] m/dia com média de 2,8 m/dia.
- ✓ Os valores da razão Kv/Kh ficam no intervalo [0,1 a 18,1] m/dia e o seu valor médio é igual 2,1 m/dia.

Quanto à distribuição espacial de Kh e Kv, ela é ilustrada, respectivamente no mapa da **figura 4.70** e no mapa da **figura 4.71**.

**Tabela 4.54** – Estatística descritiva da taxa de infiltração, da condutividade hidráulica horizontal e vertical e da razão Kv/Kh em m/dia.

<b>Estatística</b>	<b>Kv (m/dia)</b>	<b>Kh (m/dia)</b>	<b>Fc (m/dia)</b>	<b>Kv/Kh</b>
Média	1,38	2,81	1,81	2,10
Erro padrão	0,35	0,59	0,38	1,55
Mediana	0,43	1,17	0,93	0,49
Modo	0,06	0,20	0,38	#N/D
Desvio padrão	2,21	3,73	2,39	9,78
Variância da amostra	4,87	13,88	5,73	95,68
Curtose	4,62	6,91	12,84	39,68
Assimetria	2,20	2,36	3,12	6,29
Intervalo	9,50	18,09	13,22	62,30
Mínimo	0,01	0,05	0,03	0,01
Máximo	9,50	18,14	13,25	62,31
Soma	55,13	112,23	72,35	84,09
Contagem	40	40	40	40,00
Maior(1)	9,50	18,14	13,25	62,31
Menor(1)	0,01	0,05	0,03	0,01
Nível de confiança(95,0%)	0,71	1,19	0,77	3,13

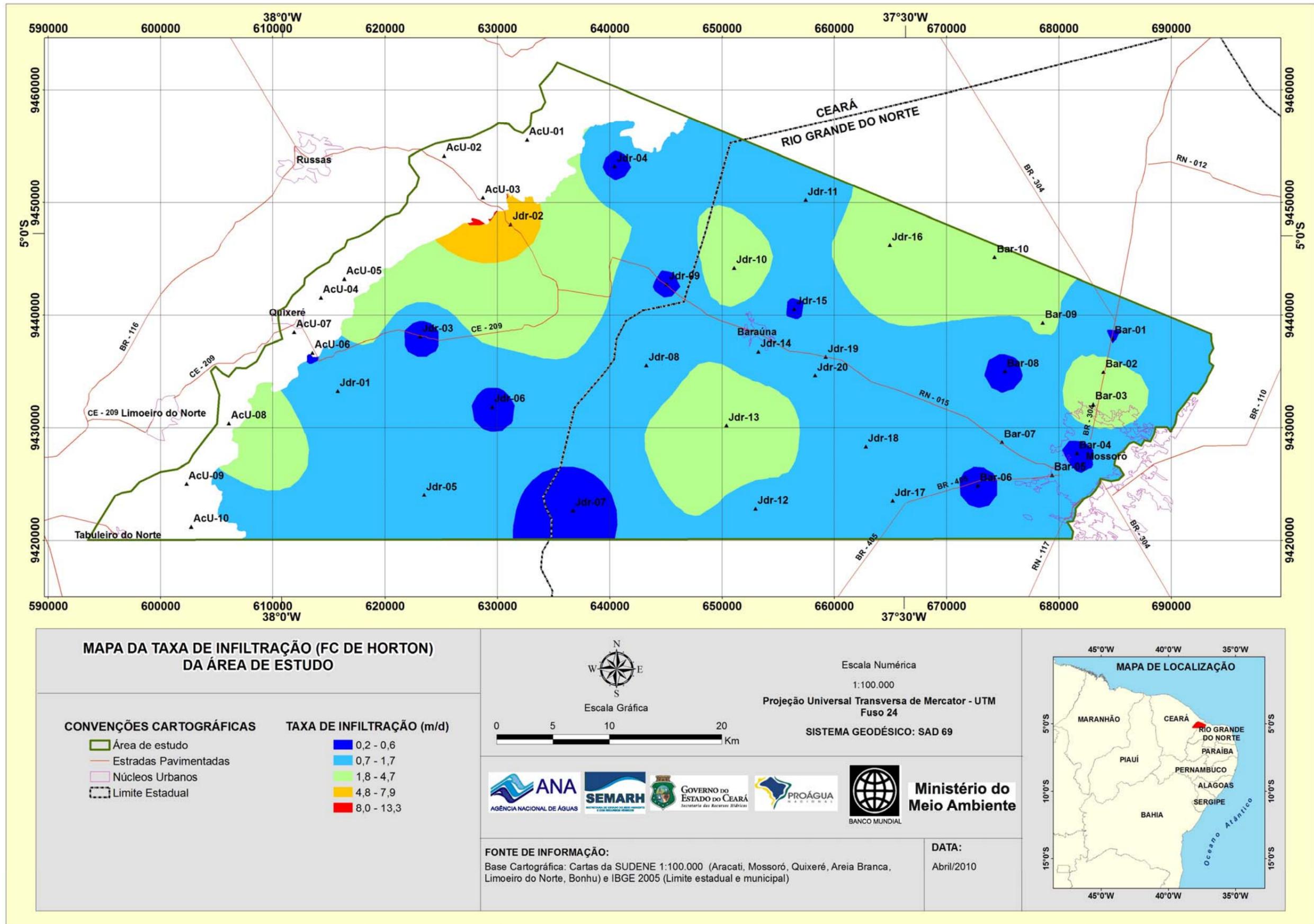
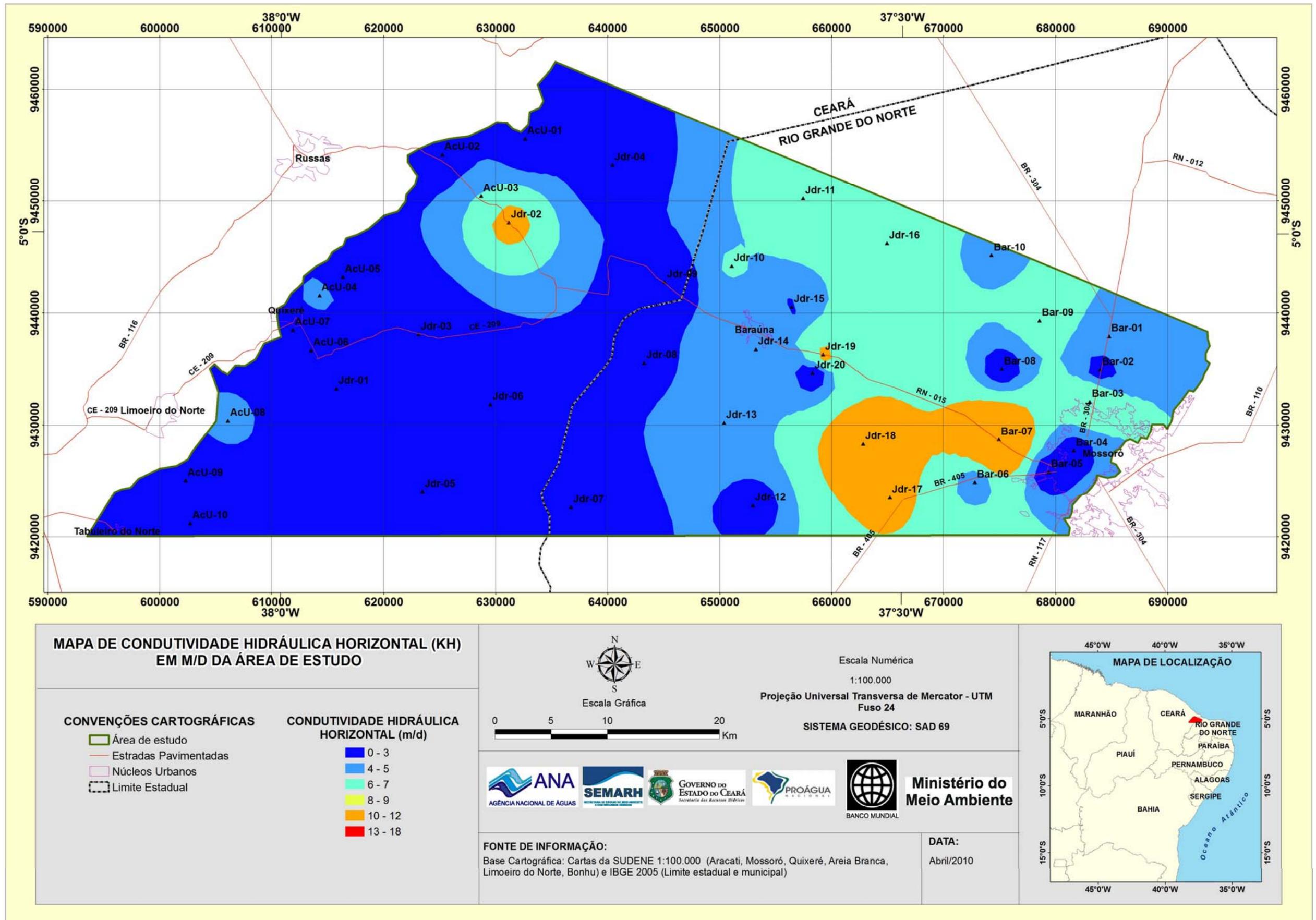


Figura 4.69 – Mapa da taxa de infiltração (Fc de Horton) em m/dia obtida de testes de campo realizados com infiltrômetro de duplo anel na área do Projeto.



**Figura 4.70** – Mapa de condutividade hidráulica horizontal (Kh) em m/dia obtida através de ensaios no Laboratório de Mecânica de Solos da Universidade Federal do Ceará usando amostras de solo coletadas na área do Projeto nos pontos de medida de infiltração.

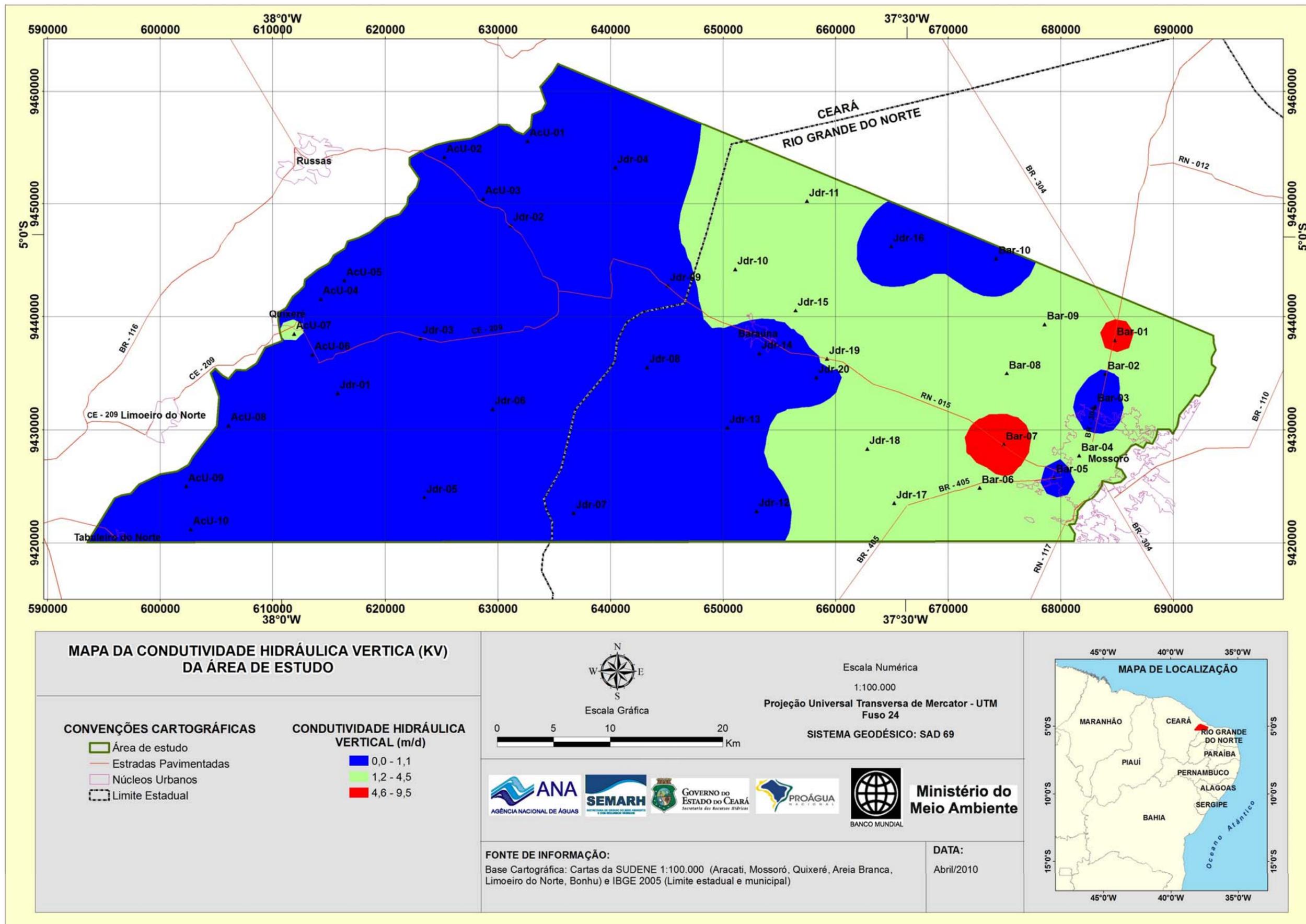


Figura 4.71 – Distribuição espacial da condutividade hidráulica vertical (Kv) obtida através de ensaios no Laboratório de Mecânica de Solos da Universidade Federal do Ceará usando amostras de solo coletadas na área do Projeto nos pontos de medida de infiltração.

#### 4.13.3 – Estimativa da recarga com base na variação do nível potenciométrico

As precipitações médias mensais avaliadas na área do Projeto Apodi através do balanço hídrico de Thornthwaite para o período de 30 anos, compreendido entre os anos de 1979 e 2008, são mostradas na **tabela 4.55**. Os valores revelam que, em média, 93% das chuvas ocorrem no primeiro semestre (janeiro a junho, com máximos em março-abril). No segundo semestre (julho a dezembro) ocorrem apenas 7% dos eventos de chuva, sendo outubro e novembro os meses mais secos. Portanto a plena variação sazonal do nível de água do aquífero Jandaíra deve ocorrer entre os meses de março-abril (no período chuvoso) e os meses de outubro-novembro no período de estiagem.

**Tabela 4.55** – Precipitação média mensal (mm) e percentual do total anual de chuva na área do Projeto Apodi no período de 1979 a 2008.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Chuva	60,6	114,4	183,5	177,2	91,7	46,1	23,1	5,6	3,9	0,8	1,7	14,5	723,1
%	8,4	15,8	25,4	24,5	12,7	6,4	3,2	0,8	0,5	0,1	0,2	2,0	100,0

Assim sendo, as campanhas de medição de nível de água realizadas no âmbito do projeto entre os meses de agosto 2009 e janeiro de 2010 não podem ser consideradas como representativas do período de máxima variação sazonal de nível potenciométrico do aquífero Jandaíra. A falta de tubos guia na rede de monitoramento não permitiu que as medições fossem realizadas na época mais adequada. Todavia, do ponto de vista prático, isso tem muito pouco significado, uma vez que as variações de nível potenciométrico produzidas por recarga natural na área do projeto, além de muito heterogêneas, devido a natureza cárstica do aquífero, sofrem profundas influências dos bombeamentos praticados por cerca de 1000 poços existentes em bombeamento. De fato, os resultados das medições de nível (**item 4.2**) mostraram isso.

Assim sendo não há como estabelecer, a essa altura, uma relação de causa e efeito entre a **variação sazonal do nível potenciométrico** e a **recarga natural**. Ademais a heterogeneidade do aquífero indica que existem pelo menos dois tipos de recarga: **recarga canalizada** (correspondente à drenagem das águas pluviais diretamente da superfície do terreno para o aquífero através dos grandes vazios criados pelo carst) e **recarga difusa** (extensiva a toda a região e produzida por infiltração do excesso de água do balanço hídrico).

De fato, variações de nível passíveis de serem atribuídas apenas à **recarga sazonal** são absolutamente imperceptíveis. Isto pelos seguintes motivos:

- ✓ Nas chamadas “zonas preferenciais” de **recarga natural canalizada**, as grandes dimensões dos vazios do meio poroso parecem funcionar como verdadeiros “**piscinões**” permitindo a drenagem e o armazenamento muito rápido das águas pluviais e uma ascensão igualmente rápida do nível freático.
- ✓ Acredita-se que nos períodos chuvosos mais favoráveis essas estruturas tendem a ser preenchidas rapidamente e até mesmo transbordar. Em essência tendem a formar “**domos**” ou “**altos**” de carga potenciométrica **pontual na escala do estudo**, a partir dos quais, em um segundo estágio, o meio poroso adjacente (representado pelas redes de fraturas e de vazios

de pequena dimensão) é realimentado, não obstante também receba **recarga difusa**.

- ✓ A verdade é que, conforme revelou o mapa da **figura 4.34**, as **oscilações de nível estático** na área de estudo se distribuem em inúmeras zonas de fluxo isolado (convergente e divergente).
- ✓ Tudo indica que a formação dessas zonas se materializa por conta de:
- ✓ ELEVACÃO DO NÍVEL: resulta de ENTRADA de fluxo no aquífero Jandaíra, através de:
  - a. **recarga canalizada** e formação, em um primeiro estágio, de **domos potenciométricos** em zonas preferenciais;
  - b. **recarga lateral** a partir dos **domos potenciométricos** das zonas adjacentes aos mesmos em um segundo estágio;
  - c. **infiltração difusa** a partir das chuvas de maneira generalizada por toda a área do Projeto;
- ✓ ABAIXAMENTO DO NÍVEL: resulta de SAÍDA de fluxo subterrâneo por:
  - a. **exploração de água** através de poços;
  - b. **escoamento natural**.

O comportamento que se acaba de descrever é apenas uma hipótese de trabalho baseada na interpretação dos dados de níveis obtidos nas duas campanhas de medição, perfeitamente compatíveis com o estudo desenvolvido na escala 1:100.000.

#### 4.14 – Avaliação das Reservas Potencialidades e Disponibilidades

Para o cálculo das reservas permanentes a CONSULTORA utilizou a metodologia recomendada pela CTAF levando em conta, por setores de bacia, os seguintes parâmetros:

- ✓ Áreas de ocorrência dos aquíferos nos respectivos setores;
- ✓ Espessuras saturadas dos aquíferos, obtidas dos mapas de isópacas;
- ✓ Zoneamento da porosidade efetiva em 4 (quatro) faixas de valores inferidos a partir da análise e superposição dos 3 (três) planos de informação ou “layers”, seguintes:
  - Distribuição espacial das **vazões informadas** em 4 (quatro) faixas de valores;
  - Distribuição espacial das **estruturas cársticas** levantadas em campo;
  - Distribuição espacial do **índice de carstificação** elaborado por meio da eletrorresistividade.

### Áreas de ocorrência e isópacas dos aquíferos Jandaíra e Açú

As áreas de ocorrência e as isópacas dos aquíferos Jandaíra e Açú foram estimadas por setor a partir dos mapas das figuras 4.72 e 4.73 da forma indicada nas tabelas 4.56 e 4.57.

**Tabela 4.56** – Áreas de ocorrência e isópacas do Aquífero Jandaíra por setor de bacia hidrográfica na área de estudo.

Isópacas Jandaíra	A1- Jaguaribe		A2 - Mata Fresca		A3- Apodi	media
	333 km <sup>2</sup>	185 km <sup>2</sup>	615 km <sup>2</sup>	710 km <sup>2</sup>	695 km <sup>2</sup>	
56-119		0,8	0,25	0,05		88
120-183		0,2	0,35	0,1		152
184-246			0,15	0,15		215
247-309			0,15	0,2		341
310-372			0,1	0,2	0,2	405
373-436				0,2	0,35	405
437-499				0,1	0,3	468
500-562					0,15	541
		1	1	1	1	
Espessura média		100	199	329	444	
Fração Quebradas		0	0	0	0,1	
<b>b Jandaíra efetiva</b>		<b>100</b>	<b>199</b>	<b>329</b>	<b>400</b>	

**Tabela 4.57** – Áreas de ocorrência e isópacas do aquífero Açú por setor de bacia hidrográfica na área de estudo.

Isópacas Açú	A1- Jaguaribe		A2 - Mata Fresca		A3- Apodi	media
	333 km <sup>2</sup>	185 km <sup>2</sup>	615 km <sup>2</sup>	710 km <sup>2</sup>	695 km <sup>2</sup>	
56-109	0,1					35
108-160	0,6	0,5				110
161-214	0,3	0,5	0,3			175
215-269			0,3	0,6	0,2	316
270-326			0,4	0,3	0,4	387
327-385				0,1	0,35	457
386-444					0,05	541
445-506					0,01	
Soma	1	1	1	1	1	
<b>Espessura média</b>	<b>122</b>	<b>143</b>	<b>302</b>	<b>351</b>	<b>405</b>	
Fração Quebradas	0,8	0,5	0,5	0,48	0,34	
<b>b Açú efetiva</b>	<b>24</b>	<b>71</b>	<b>151</b>	<b>183</b>	<b>267</b>	
bQuebradas	98	71	151	169	138	

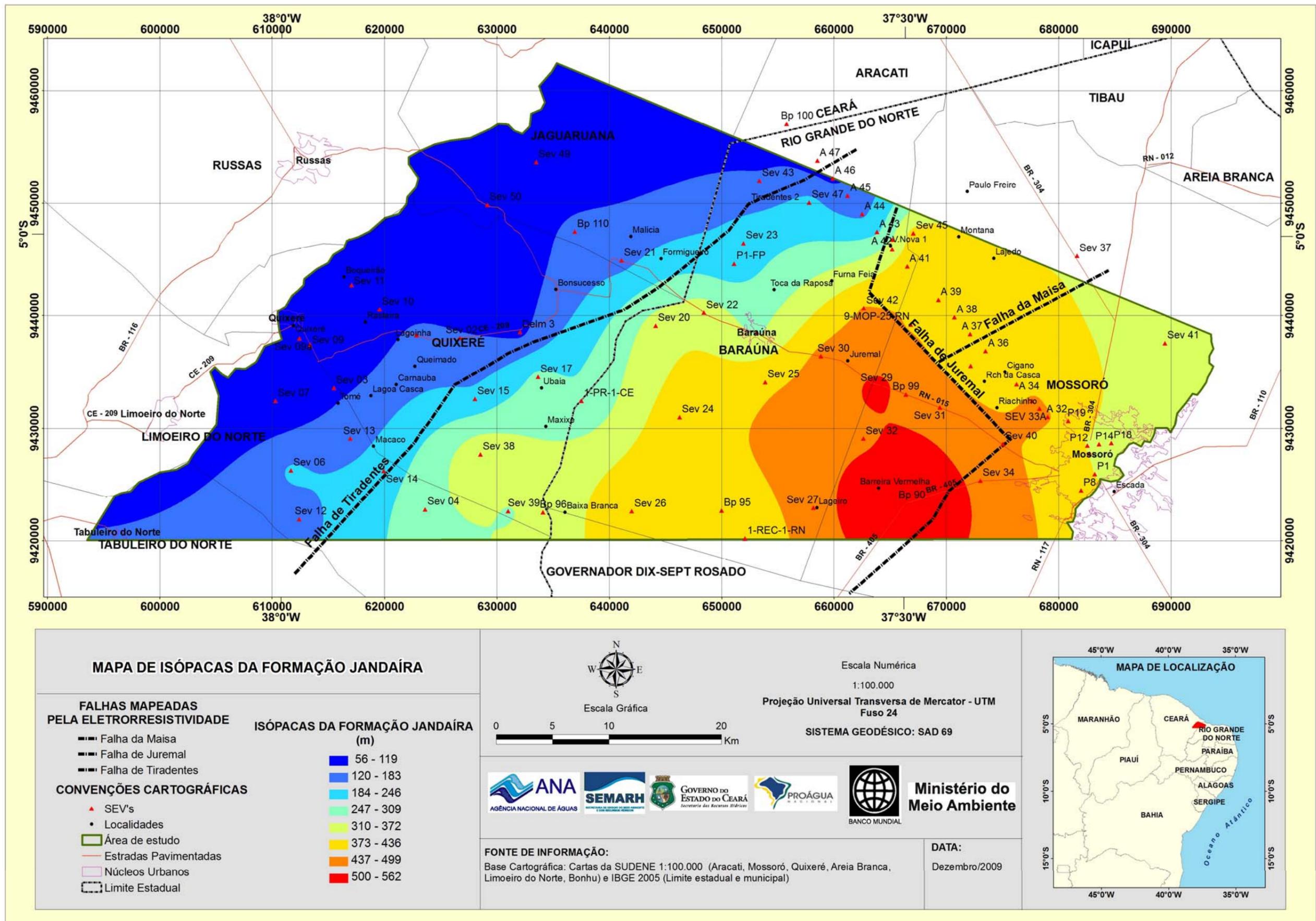


Figura 4.72 – Mapa de isópacas do aquífero Jandaíra.

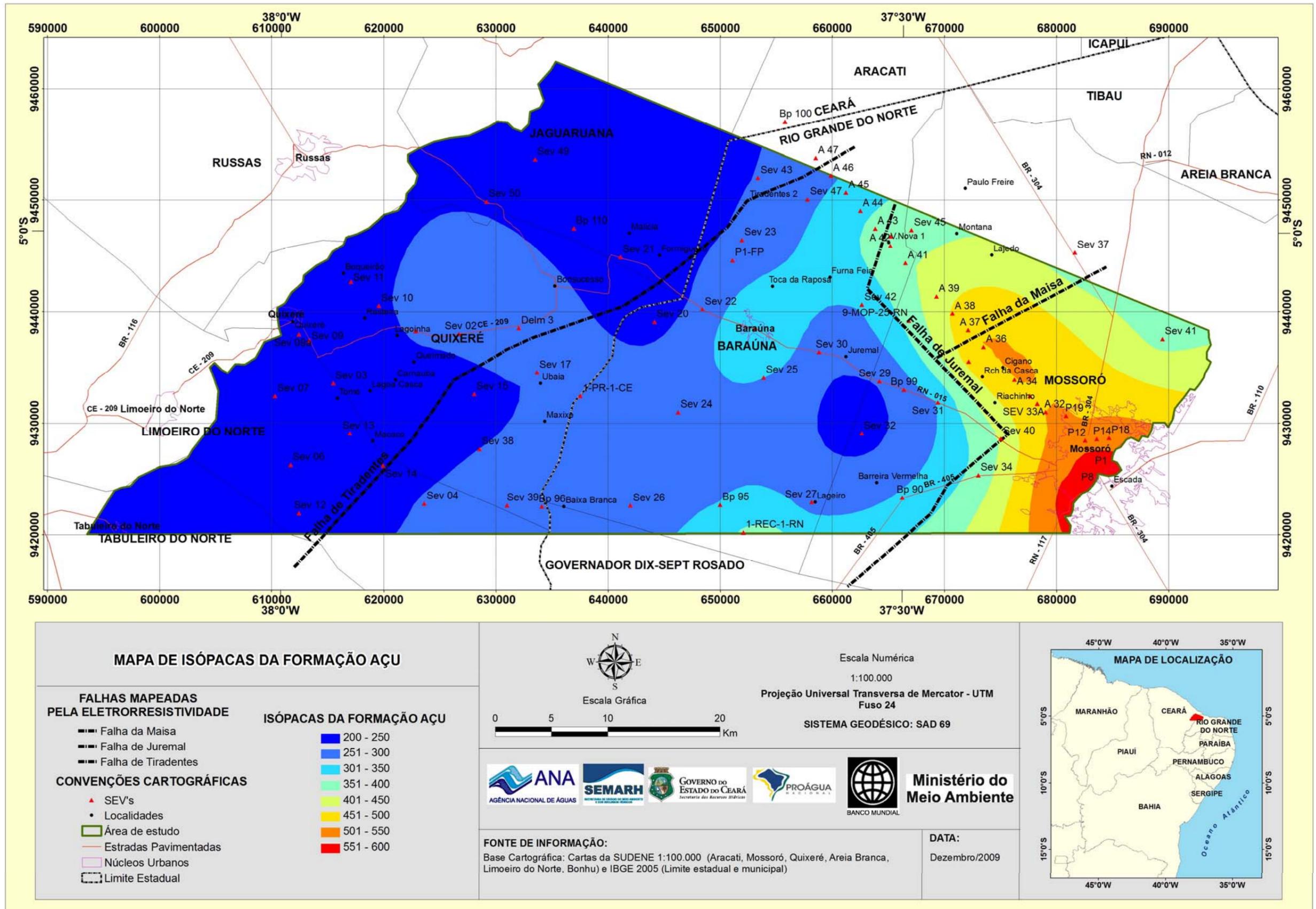


Figura 4.73 – Mapa de isópacos do aquífero Açú.

### **Zoneamento da Porosidade efetiva**

- **Vazões informadas:** a estatística descritiva das vazões informadas de 925 poços existentes em operação em 2009 é apresentada na **tabela 4.58**.

**Tabela 4.58** – Estatística descritiva das vazões informadas em 2009.

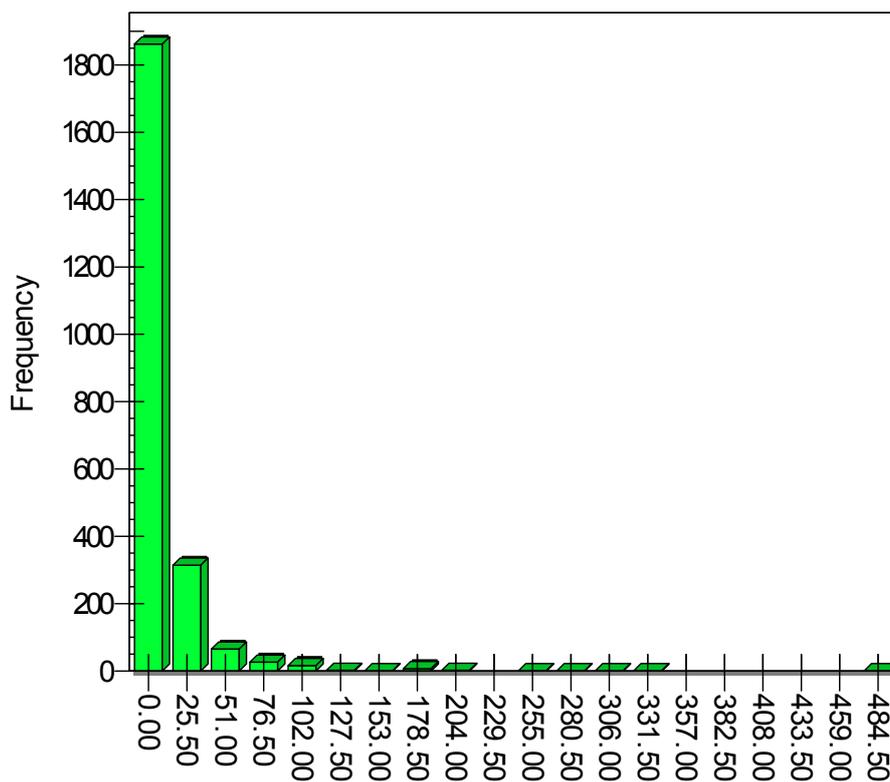
<b>Estatística</b>	<b>Regime de 1 a 24 h/dia</b>
Média	61,6
Moda	62,0
Mediana	62,0
Desvio padrão	37,1
Máximo	250,0
Mínimo	0,3
Contagem	925

Os intervalos utilizados no zoneamento da vazão informada e os respectivos valores inferidos de porosidade efetiva são indicados na **tabela 4.59**.

**Tabela 4.59** – Intervalos de vazão informada e respectivos valores de porosidade efetiva inferida em cada intervalo.

	<b>Intervalos de vazão informada (m³/h)</b>			
	<b>Q&lt;=20</b>	<b>20&lt;Q&lt;=60</b>	<b>60&lt;Q&lt;=100</b>	<b>Q&gt;100</b>
Nº de poços	160	176	521	68
% Poços	17,3	19	56,3	7,4
Porosidade efetiva	0,03	0,06	0,10	0,15

- **Estruturas cársticas:** a influência das estruturas cársticas no zoneamento da vazão informada é mostrada na **figura 4.75** sobre a carta de estruturas e feições cársticas da formação Jandaíra.
- **Índice de carstificação:** esse índice, para a parte superior da Formação Jandaíra, varia no intervalo de 0 a 510, porém mais de 98,5% dos valores são inferiores ou iguais a 100 como mostra a **tabela 4.60** e como sugere o histograma da **figura 4.74**. O valor médio é 17,75 com desvio padrão de 26,59. O zoneamento desse índice é apresentado na **figura 4.76** usando os 4 (quatro) intervalos seguintes:  $20 \leq ic$ ;  $20 < ic \leq 60$ ;  $60 < ic \leq 100$ ;  $ic > 100$ .



**Figura 4.74**– Histograma de frequência do índice de carstificação.

**Tabela 4.60** – Intervalos de zoneamento do índice de carstificação da Formação Jandaíra superior (calcário 1), obtido do estudo geofísico por eletrorresistividade e porosidade efetiva inferida em cada faixa.

	Intervalos do índice de carstificação do calcário 1 - parte superior da Formação Jandaíra			
	ic≤20	20<Q≤60	60<Q≤100	Q>100
Nº de pontos	1710	505	51	34
% pontos	74,3	22,0	2,2	1,5
Porosidade efetiva	0,03	0,06	0,10	0,15

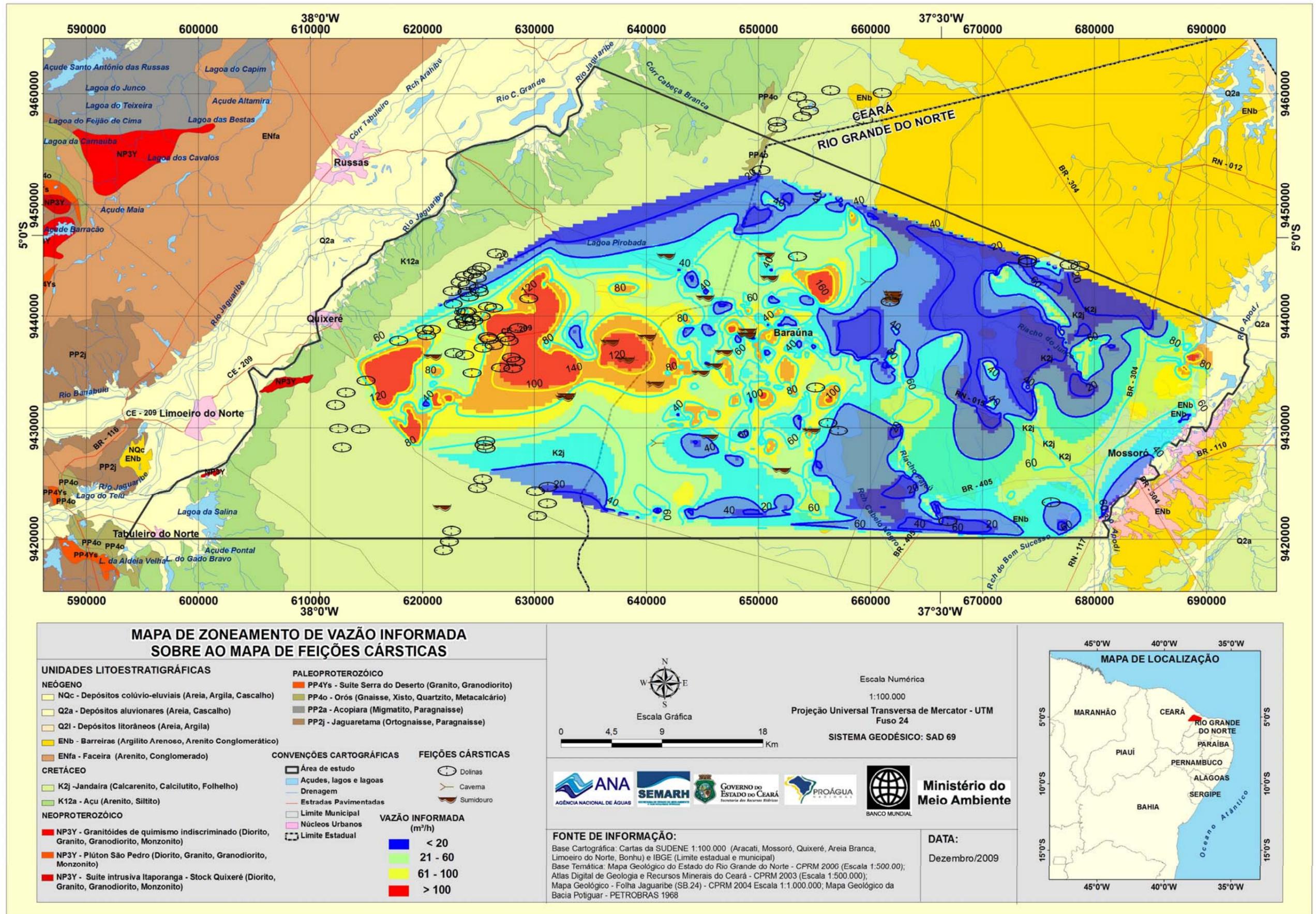


Figura 4.75 – Zoneamento das vazões informadas sobre o mapa de feições cársticas para inferir valores da porosidade efetiva.

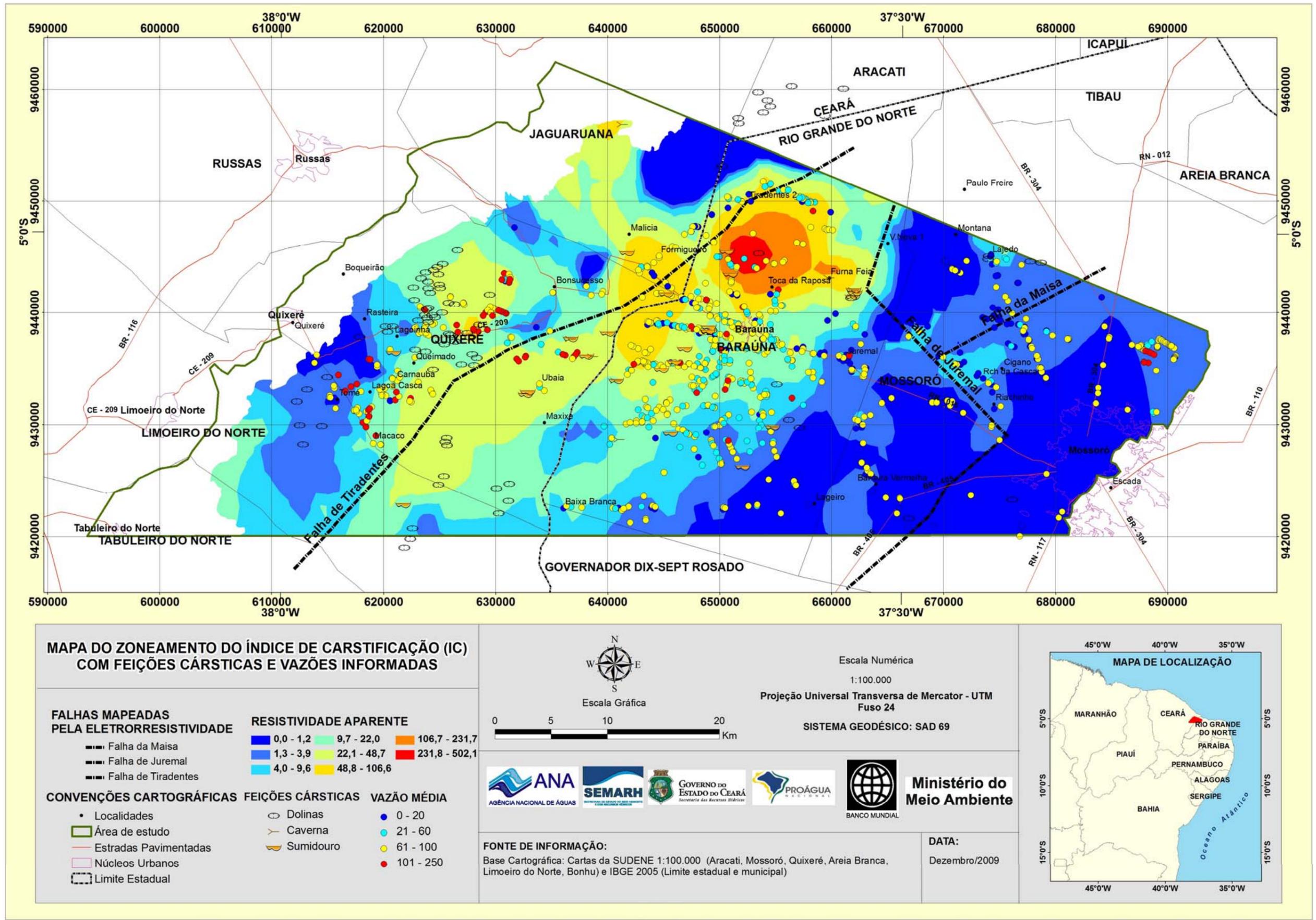


Figura 4.76 – Zoneamento do índice de carstificação com feições cársticas e vazões informadas.

Com relação à avaliação propriamente dita das reservas, potencialidades e disponibilidades, optou-se finalmente por trabalhar com os conceitos de: *reservas reguladoras* (recarga média de longo período estimada com 50% de risco); *reservas permanentes* (armazenadas nos aquíferos e independentes do ciclo hidrológico atual); *reservas exploráveis* (iguais às reservas reguladoras podendo incluir nos períodos de longa estiagem parcela das reservas permanentes); *reservas em exploração* (em uso pelos poços existentes em operação) e *reservas restantes* (dadas pela diferença entre as reservas exploráveis e as reservas em exploração).

O cálculo das reservas permanentes do aquífero Jandaíra utilizando o método de zoneamento descrito, foi feito apenas para a Camada 1, já que não existem informações sobre índice de carstificação para a camada 2.

No entanto, de acordo com os dados da eletrorresistividade, a resistência transversal da Camada 2 (camada inferior) do calcário Jandaíra é mais de 4 (quatro) vezes superior à resistência transversal da camada 1. Isto sugere uma *maior espessura* da camada 2 em relação à camada 1, partindo do princípio de que nos meios porosos homogêneos a resistência transversal é diretamente proporcional à transmissividade, ou seja, ao produto da condutividade hidráulica pela espessura da camada. Logo, para manter a consistência desse resultado com a expectativa de um ambiente menos carstificado ou mais compactado em profundidade, a *condutividade hidráulica da camada inferior deve ser menor* do que a da camada 1.

Vale lembrar que as espessuras médias do calcário entre Baraúna e Mossoró variam de aproximadamente 200 m a 400 m e que nenhum poço perfurado na região encontrou cavernas a profundidades superiores a 140 m no calcário Jandaíra. Faz sentido, portanto, associar maiores espessuras a menores condutividades hidráulicas em profundidade.

Com base nessas considerações e atribuindo uma espessura média de 100m para a camada 1, decidiu-se adotar para a camada 2, nas zonas em que a porosidade efetiva da camada 1 é igual ou superior a 6%, uma porosidade constante de 5%, em favor de uma maior segurança. Os resultados finais obtidos na avaliação das reservas com esse procedimento são mostrados na **tabela 4.61**.

Os valores das reservas por Estado são apresentados na **tabela 4.62** para o Ceará e na **tabela 4.63** para o Rio Grande do Norte.

**Tabela 4.61** – Cálculo das reservas permanentes do Aquífero Jandaíra baseado na porosidade efetiva inferida a partir do zoneamento das vazões informadas e do índice de carstificação, cujos valores se inserem dentro das faixas de vazão informada.

Aquífero	Setor	Vazão Informada m <sup>3</sup> /h	Área km <sup>2</sup>	b	h	Sy	Reservas m <sup>3</sup>	Reservas Hm <sup>3</sup>
Jandaíra	A1	Q<=20	147,45	100		0,03	4,42E+08	442
		20<Q<=60	28,66	100		0,06	1,72E+08	172
		60<Q<=100	4,68	100		0,1	4,68E+07	47
		Q>100	4,21	100		0,15	6,32E+07	63
<b>Jandaíra</b>	<b>A1</b>		<b>185</b>	<b>100</b>			<b>7,2E+08</b>	<b>724</b>
	A2-CE	Q<=20	121,68	199		0,03	7,26E+08	726
		20<Q<=60	222,76	100		0,06	1,34E+09	1337
		60<Q<=100	151,25	100		0,1	1,51E+09	1513
		Q>100	104,31	100		0,15	1,56E+09	1565
		20<Q<=60	222,76	99		0,05	1,10,E+09	1103
		60<Q<=100	151,25	99		0,05	7,49,E+08	749
		Q>100	104,31	99		0,05	5,16,E+08	516
	<b>A2-CE</b>		<b>600</b>	<b>199</b>			<b>7,5E+09</b>	<b>7508</b>
	A2-RN	Q<=20	79,51	329		0,03	7,85E+08	785
		20<Q<=60	335,39	100		0,06	2,01E+09	2012
		60<Q<=100	295,54	100		0,1	2,96E+09	2955
		Q>100	14,56	100		0,15	2,18E+08	218
		20<Q<=60	335,39	229		0,05	3,84E+09	3840
		60<Q<=100	295,54	229		0,05	3,38E+09	3384
		Q>100	14,56	229		0,05	1,67E+08	167
	<b>A2-RN</b>		<b>725</b>	<b>329</b>			<b>1,3E+10</b>	<b>13362</b>
	A3	Q<=20	58,78	400		0,03	7,05E+08	705
		20<Q<=60	493,76	100		0,06	2,96E+09	2963
		60<Q<=100	140,35	100		0,1	1,40E+09	1404
		Q>100	2,11	100		0,15	3,17E+07	32
		20<Q<=60	493,76	300		0,05	7,41E+09	7406
		60<Q<=100	140,35	300		0,05	2,11E+09	2105
		Q>100	2,11	300		0,05	3,17E+07	32
	<b>A3</b>		<b>695</b>	<b>400</b>			<b>1,5E+10</b>	<b>14646</b>

**Tabela 4.62** – Reservas por aquífero e por setor de bacia hidrográfica no Estado do Ceará.

Aquífero	Setor	RESERVAS CEARÁ									
		Reguladoras*		Permanentes		Explotáveis*		Em Explotação		Restantes	
		Hm <sup>3</sup> /ano	m <sup>3</sup> /s	Hm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	Hm <sup>3</sup> /ano	m <sup>3</sup> /s	Hm <sup>3</sup> /ano	m <sup>3</sup> /s	Hm <sup>3</sup> /ano	m <sup>3</sup> /s
Jandaíra	A1 Bacia do Jaguaribe	26	0,840	724	7,24E+08	26	0,840	2	0,058	25	0,782
	A2 Bacia Mata Fresca	233	7,390	7508	9,51E+09	233	7,390	55	1,751	178	5,639
		<b>259</b>	<b>8,230</b>	<b>8232</b>	<b>1,02,E+10</b>	<b>259</b>	<b>8,230</b>	<b>57</b>	<b>2</b>	<b>202</b>	<b>6</b>
Açu saturação	A1 Bacia do Jaguaribe			1066	1,07E+09						
	A2-Bacia Mata Fresca			7248	7,24E+09						
				<b>8314</b>	<b>8,31E+09</b>						
Açu confinamento	A1 Bacia do Jaguaribe			1	6,29E+05						
	A2-Bacia Mata Fresca			10	1,02E+07						
				<b>11</b>	<b>1,08E+07</b>	<b>6</b>		<b>0</b>		<b>6</b>	<b>0,190</b>
				<b>8325</b>	<b>8,32E+09</b>	<b>6</b>		<b>0</b>		<b>6</b>	<b>0,190</b>

50% de risco

**Tabela 4.63** – Reservas por aquífero e por setor de bacia hidrográfica no Estado do Rio Grande do Norte.

Aquífero	Setor	RESERVAS RIO GRANDE DO NORTE									
		Reguladoras*		Permanentes		Explotáveis*		Em Explotação		Restantes	
		Hm <sup>3</sup> /ano	m <sup>3</sup> /s	Hm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	Hm <sup>3</sup> /ano	m <sup>3</sup> /s	Hm <sup>3</sup> /ano	m <sup>3</sup> /s	Hm <sup>3</sup> /ano	m <sup>3</sup> /s
Jandaíra	A2 Bacia Mata Fresca	270	8,570	13362	1,34E+10	270	8,570	138	4,422	132	4,189
	A3 Bacia Apodi	62	1,960	14646	1,46E+10	62	1,960	49	1,553	13	0,406
		332	10,530	28008	2,80E+10	332	10,530	187	6	145	5
Açu saturação	A2-Bacia Mata Fresca			10394	1,08E+10						
	A3 Bacia Apodi			14845	1,48E+10						
				25239	2,56E+10						
Açu confinamento	A2-Bacia Mata Fresca			19	1,85E+07			1	0,030	18	0,571
	A3 Bacia Apodi			24	2,36E+07			12	0,390	12	0,381
				43	4,21E+07	21		13	0,42	8	0,254
				25282	2,57E+10						

50% de risco

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araripe, P.T. & Feijó, F.P. 1994. Bacia Potiguar. Boletim Geociências da PETROBRAS, Rio de Janeiro, v.8,n.1, p.127-141.
- Batu, V. 1998. Aquifer Hydraulics. A comprehensive guide to hydrogeologic data analyses. John Wiley & Sons, Inc. 727 p.
- Bezerra, M.A. 1980. Captação de Mossoró. Poço P12A – Hotel Thermas. PETROBRAS 9-MO-13-RN. PLANAT-CAERN. Relatório Técnico, 28p.
- COGERH. 2009. Monitoramento e gestão dos aquíferos da Bacia Potiguar, Estado do Ceará.
- Hantush, M.S. & Jacob, C.E. 1955. Non steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Transactions American Geophysical Union*, v.36, n.1, p.95-100.
- Hantush, M.S. 1960. Modification of the theory of leaky aquifer. *Journal of Geophysical Research* v.65,n.5,p.1627-1629.
- ITAI – Estudos, Projetos e Perfurações Ltda. 2001. Perfuração e completção de um poço tubular profundo de 600 m, para o sistema de abastecimento de água da cidade de Baraúna – RN. CAERN.
- Landon, M.K.; Jurgens, B.C.; Katz, B.G.; Eberts, S.M.; Burow, K.R., & Krandal, C.A. 2010. Depth-dependent sampling to identify short-circuit pathways to public-supply wells in multiple aquifer settings in the United States. *Hydrogeology Journal* 18 (3): 577-593.
- Manoel Filho, J. 1971. Inventário hidrogeológico básico do Nordeste. Folha nº 10 Jaguaribe NE. SUDENE. DD. Série Hidrogeologia, 30. 342p. mapas.
- Manoel Filho, J. 1996. Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural. Tese de doutoramento. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 218p.
- Manoel Filho, J.; Demetrio, J.G & Costa, W.D. 2003. Modelo numérico de fluxo do sistema aquífero Açú – Jandaíra. IN: “Diagnóstico da situação atual e possibilidades de ampliação da exploração de água subterrânea na zona oeste da Bacia Potiguar”. FUNCATE. FADE. UFPE. LABHID.
- Pessoa Neto, O.C. 2007. Litoestratigrafia da Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da PETROBRAS, v.15, n.2, p.357-369.
- PLANAT. 1979. Consultoria em Recursos Naturais. Captação de Baraúna. Poço Tubular nº 2. CPRM 04 MO-15-RN. Relatório de Conclusão. CAERN.
- Renard, P.; Glenz, D. & Mejias, M. 2009. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal* 17:589-600.

