

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ
SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS – SRH
COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS - COGERH

PROGERIRH II (*Financiamento Adicional*) - Acordo de Empréstimo Nº 7630-BR

**AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA QUALI-QUANTITATIVA DO CAMPO DE DUNAS
PECÉM/PARACURU, NO ESTADO DO CEARÁ.**

Relatório Final

Consultor: Dr. Enéas Oliveira Lousada
Adaptado por: José Guilherme Filgueira da Silva
e Zulene Almada Teixeira

Fortaleza-CE
Dezembro/2016

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ

Governador: Cid Ferreira Gomes

SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS

Secretário: César Augusto Pinheiro

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Diretor Presidente: Francisco José Coelho Teixeira

CHEFIA DE GABINETE

Antônio Treze de Melo Lima

DIRETORIA DE PLANEJAMENTO

João Lúcio Farias de Oliveira

DIRETORIA DE OPERAÇÕES

José Ricardo Adeodato

DIRETORIA FINANCEIRA

Paulo Henrique Studart Pinho

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Zulene Almada Teixeira

SUMÁRIO

1. Introdução	01
2. Objetivo do estudo	01
3. Localização da área de estudo	01
4. Dados climatológicos	03
4.1. Objetivo do balanço hídrico	03
4.2. Metodologia do balanço hídrico	04
4.3. Balanço hídrico	04
5. Modelo hidrogeológico	11
5.1. Objetivos dos modelamentos	11
5.2. Parâmetros levantados	12
5.3. Modelamento matemático	13
5.3.1. <i>Aplicação do modelo</i>	17
5.3.2. <i>Cenários 10, 20 e 30 anos</i>	29
6. Hidrogeologia	23
6.1. Aquífero Dunas/Paleodunas	23
6.2. Inventário hidrogeológico	24
6.3. Piezometria	25
6.3.1. <i>Mapa Piezométrico</i>	26
6.4. Fluxo subterrâneo	28
6.4.1. <i>Metodologia para elaboração do mapa de fluxo</i>	29
6.5. Avaliação das vazões dos poços	33
6.5.1. <i>Condições atuais do abastecimento</i>	35
6.6. Exploração da água subterrânea	37
6.7. Reserva permanente	40
6.8. Reserva renovável	41
6.9. Oferta e demanda hídrica atual	42
6.10. Sustentabilidade e vulnerabilidade das águas subterrâneas	43

6.11.	Vulnerabilidade do aquífero	44
6.12.	Águas subterrâneas	45
6.13.	Áreas potenciais e orientações de perfurações	45
7.	Geofísica	48
7.1.	Eletrorresistividade – SEV	48
7.1.1.	<i>Conceitos básicos</i>	50
7.1.2.	<i>Princípios básicos da Eletrorresistividade</i>	50
7.1.2.1	<u><i>Aplicação da Sondagem Elétrica Vertical</i></u>	50
7.1.2.2	<u><i>Resistividade aparente</i></u>	51
7.1.2.3	<u><i>Arranjo Schlumberger</i></u>	51
7.1.2.4	<u><i>Equipamento utilizado</i></u>	52
7.1.3.	<i>Resultados e considerações</i>	53
8.	Sondagens mecânicas	58
9.	Altimetria	61
9.1.	Metodologia do levantamento planialtimétrico	61
10.	Batimetria da Lagoa do Pécem	63
11.	Conclusões	67
12.	Bibliografia	69

1. Introdução

O presente relatório integra o produto final a ser apresentado como resultado do Projeto de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos do Ceará – PROGERIRH II (*Financiamento Adicional*) - Acordo de Empréstimo Nº 7630-BR. Em cumprimento ao termo de referência para Consultoria Técnica Especializada (Pessoa Física) para Interpretação e Consistência dos Dados Quali-Quantitativos Compreendendo, Avaliação e o Cálculo das Reservas dos Aquíferos do Campo de Dunas Pecém / Paracuru, no Estado do Ceará - **MANIFESTAÇÃO DE INTERESSE Nº 20100019/CEL 04/PROGERIRH II-BIRD/COGERH/CE.**

Em função da estiagem dos últimos anos (2012 - 2016) o presente relatório foi atualizado nos itens Balanço Hídrico e Cálculo das Reservas Renováveis e Permanentes, com a série histórica do início da aquisição dos dados até 2015.

2. Objetivo do estudo

A situação atual dos recursos hídricos subterrâneos na região de Pecém e Paracuru denota uma demanda elevada que está momentaneamente suprida através da exploração de lagoas, provavelmente alimentadas pelos volumes armazenados no aquífero Dunas/Paleodunas. Esta demanda é decorrente de atividades industriais, incrementadas com a instalação do complexo portuário do Pecém, instalação de complexos turísticos e residências particulares de veraneio.

A principal meta da pesquisa, objeto do projeto em execução, é caracterizar o potencial hídrico subterrâneo do campo de dunas Pecém/Paracuru, a fim de elucidar quanto aos parâmetros que norteiam a gestão desses recursos na região.

3. Localização da área de estudo

A área de pesquisa localiza-se na faixa litorânea do estado do Ceará. Compreende parte dos municípios de Caucaia, São Gonçalo do Amarante e Paracuru, em uma faixa costeira inserida nos domínios de planície litorânea, campo de dunas móveis e paleodunas, estendendo-se para o interior onde estão presentes os sedimentos do Grupo Barreiras (Figura 1). Determinou-se os limites da área de aplicação dos métodos de pesquisa de acordo as características geológicas e hidrogeológicas da região, principalmente no que se refere às áreas de ocorrência das unidades

dunas/paleodunas, as quais representam maior potencial aquífero (Figura 2). A área foi selecionada por apresentar intensa expansão industrial em decorrência das atividades portuárias, por estar situada em domínio hidrogeológico com elevado potencial hídrico e por apresentar-se vulnerável às intervenções antrópicas.

Figura 1 – Mapa de localização da área de pesquisa

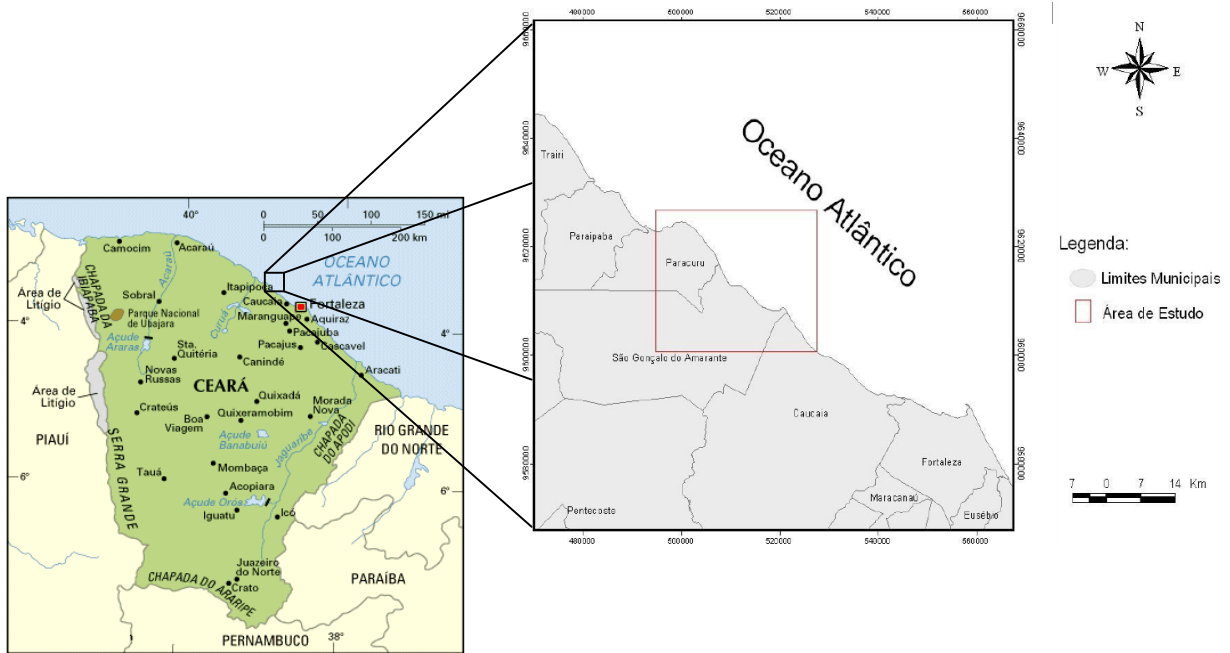
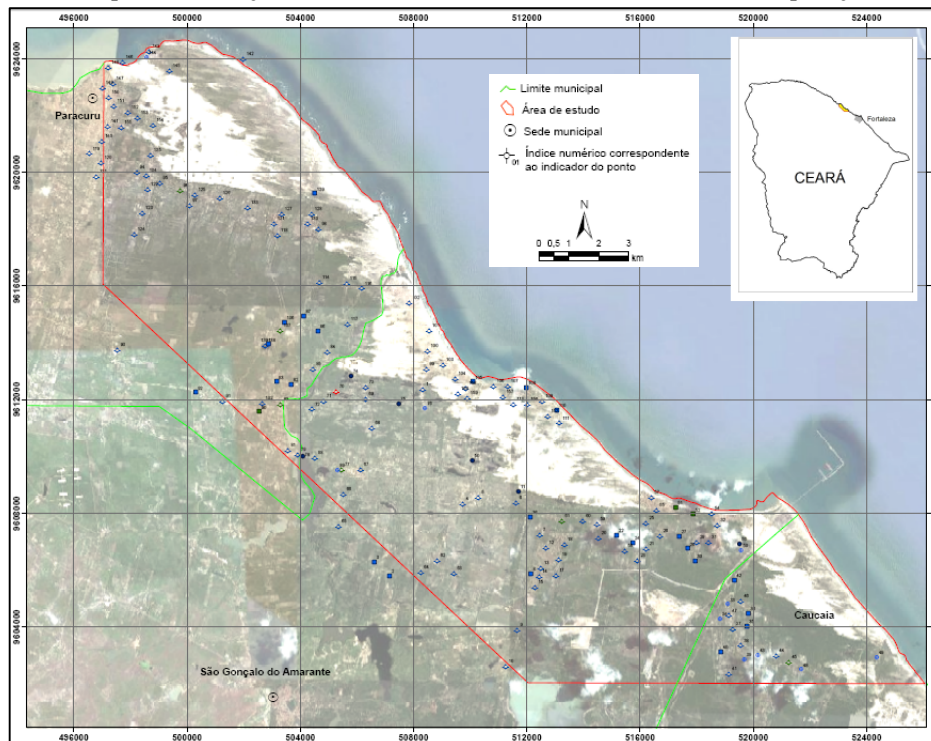


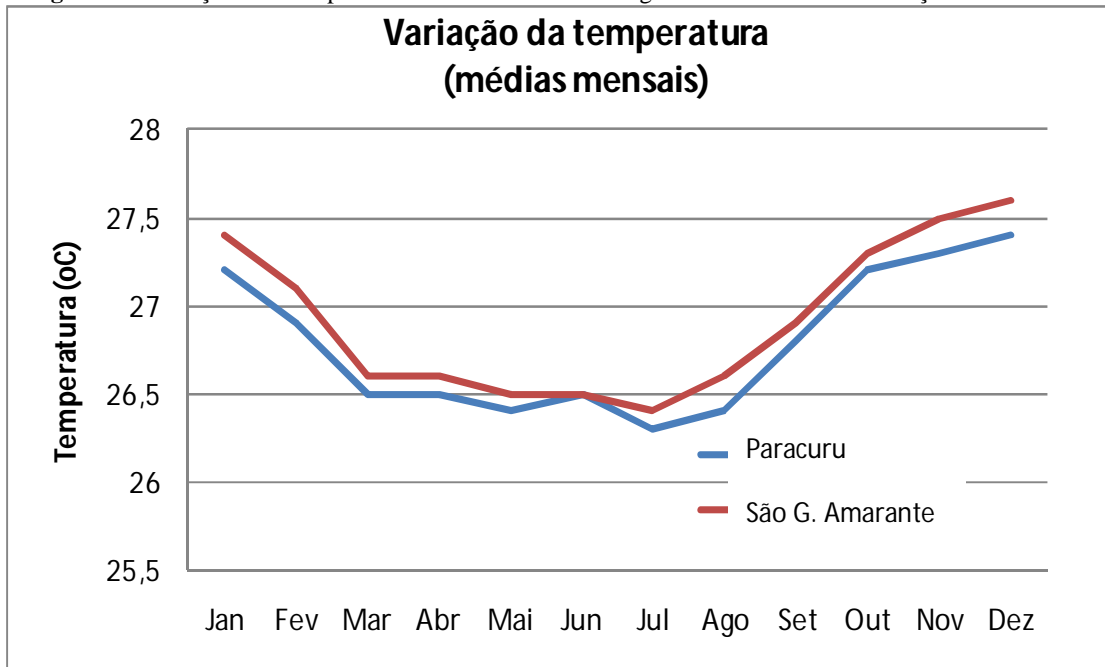
Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo. Limite em vermelho - área da aplicação do método



4. Dados climatológicos

Segundo a classificação de Köppen predomina no estado do Ceará o clima semi-árido quente (Bsh) com variações de temperaturas nas diferentes regiões do estado, litoral (27°C), Serras (22°C) e Sertão (33°C durante o dia e 23°C a noite). Na faixa litorânea predomina o clima tropical subúmido, que possui pluviosidades normalmente entre 1.000mm e 1.500mm. Na região as temperaturas são bastante elevadas, com médias de 26 °C a 28 °C (Figura 3), mas a amplitude térmica é bastante pequena. No geral, as temperaturas variam, durante o dia, de mínimas de 23 °C - 24 °C até máximas de 30° - 31 °C. É raro as temperaturas ultrapassarem os 35 °C na região litorânea, ao contrário do que ocorre no sertão cearense.

Figura 3 – Variações das temperaturas médias mensais na região de Paracuru e São Gonçalo do Amarante



4.1. Objetivo do balanço hídrico

A elaboração do balanço hídrico tem como objetivo quantificar a água em uma dada região, contemplando o equilíbrio entre entradas e saídas do sistema. O resultado do balanço mostra a variação mensal do volume de água presente nos aquíferos, considerando-se os dados de temperatura e precipitação em séries históricas registradas nas diversas estações meteorológicas implantadas.

Segundo Custódio e Llamas (1976), o balanço hídrico é caracterizado pela aplicação do princípio de conservação de massa a uma região definida por determinadas condições de contorno.

Para uma dada região, com um volume conhecido e durante certo intervalo de tempo, a diferença entre o volume de entrada e o total de saídas de água do sistema deve ser equivalente à variação positiva ou negativa do armazenamento.

Para os estudos referentes ao projeto em apreço, o balanço hídrico tem o objetivo de auxiliar na determinação da recarga do aquífero em questão, estimando suas reservas e condições de circulação, de modo a orientar na tomada de decisões quanto à exploração sustentável das águas armazenadas.

4.2. Metodologia do balanço hídrico

Considerando-se as condições climáticas da área em estudo, adotou-se o método de Thornthwaite para elaboração do balanço hídrico. O método de Thornthwaite é o que melhor se adapta às áreas com as características climáticas que apresentam alternância de períodos secos e chuvosos bem diferenciados (Vasconcelos, 1996).

$$\mathbf{PPT = ETR + ES + I} \quad \text{onde:}$$

PPT = precipitação (mm)

ETR = evapotranspiração real (mm)

ES = escoamento superficial em mm (representa a quantidade de água de precipitação que escoar superficialmente e atinge as drenagens)

I = infiltração em mm (representa a quantidade de água que infiltra no solo e alimenta os aquíferos)

$$\mathbf{I = R_{as} + I_e}$$

R_{as} = reserva de água retida no solo

I_e = infiltração eficaz (parcela da precipitação que alimenta o aquífero)

A infiltração eficaz (I_e) está diretamente relacionada com as variações dos níveis potenciométricos que refletem a variação das reservas de água subterrânea. Segundo Castany (1975) a infiltração eficaz I_e, pode ser mensurada a partir da precipitação (PPT), da evapotranspiração real (ETR) e do escoamento superficial (ES), segundo a expressão:

$$\mathbf{I_e = PPT - (ETR + ES)}$$

Nas situações onde as características físicas e morfológicas dos solos permitem intensa infiltração, pode-se desconsiderar a interferência do escoamento superficial (ES) no balanço. Considerando-se ainda que para a presente metodologia, que avalia a infiltração (recarga) e a

evaporação (perda) a partir da precipitação, pode-se inferir que todas as massas de água estão contempladas no balanço hídrico.

4.3. Balanço hídrico

De posse dos dados das estações selecionadas, realizou-se a avaliação hídrica. Para elaboração do balanço hídrico pelo método de Thornthwaite é necessária a determinação dos parâmetros:

T = temperatura média (°C)

I = índice térmico (mm) com base na temperatura

K = fator de correção relacionado à latitude e insolação média mensal (os valores adotados para latitudes entre 15° norte e 37° sul estão apresentados na tabela 1)

ETP = evapotranspiração potencial (mm)

PPT = precipitação (mm)

ETR = evapotranspiração real (mm)

EX = excedente (mm)

Para obtenção dos parâmetros necessários ao balanço hídrico pelo método de Thornthwaite, devem ser aplicadas as seguintes equações:

- Para obtenção da evapotranspiração potencial (ETP) - **$ETP = 16K(10 T / I)^a$**

T = temperatura média mensal (°C)

I = índice térmico

K = fator de correção que depende da latitude. A região estudada encontra-se associada à latitude 5°S, onde os valores para a correção utilizados estão apresentados em destaque na Tabela 1.

- Para obtenção do índice térmico (I) - **$I = \sum_{i=1}^{12} I_i$ onde $I_i = (T_i / 5)^{1,5}$**

T = temperatura média de cada mês do ano

i = varia de 1 a 12 (janeiro a dezembro)

O somatório dos índices térmicos mensais resulta no índice térmico anual (I).

- Para obtenção do termo **a**:

$$a = 0,49239 + 1792 \times 10^{-5} I - 771 \times 10^{-7} I^2 + 675 \times 10^{-9} I^3, \text{ onde } I = \text{índice térmico anual}$$

Como parte da metodologia adotada considera-se que a evapotranspiração real é menor ou igual à evapotranspiração potencial ($ETR \leq ETP$). Para o cálculo da evapotranspiração real é necessário estabelecer as relações com as taxas de precipitação, da seguinte forma:

Se $PPT > ETP$ então $ETR = ETP$

Se $PPT < ETP$ então $ETR = PPT$

Para o balanço hídrico é necessário estabelecer o valor da capacidade de retenção do solo (C), que representa a sua capacidade de armazenamento. Este valor é arbitrado considerando-se as características físicas dos solos. Segundo Castany (1975) solos arenosos apresentam capacidade de retenção de 50 mm e solos argilosos de 200 mm. Na ausência de valores medidos utiliza-se o valor de 100 mm como sendo o valor de C.

Então, a **ETR** é determinada para cada um dos meses do ano, considerando a retenção de água no solo **C**, as médias mensais de precipitação **PPT** e os valores de evapotranspiração potencial **ETP**, calculados para a série de anos utilizada na determinação das médias mensais de precipitação e temperatura.

Com a **ETR** e a **PPT** chega-se a uma estimativa para a **infiltração eficaz I_e** que corresponde à quantidade da água de precipitação disponível para a recarga subterrânea e que, na ausência de medidas diretas da variação de carga hidráulica anual, pode ser também uma estimativa para a reserva renovável do sistema aquífero.

Nos cálculos do balanço são efetuadas as seguintes considerações:

- $C \leq 100\text{mm}$ - Parcela de água retida no solo
- $ETR = PPT$, se $PPT - ETP < 0$ e $ETR = ETP$ em caso contrário.
- $I_e = PPT - ETR$, depois de esgotada a capacidade de retenção de água no solo.

A infiltração efetiva calculada corresponde à disponibilidade da água de precipitação para a recarga subterrânea. Mesmo partindo da hipótese de que o sistema aquífero é homogêneo no que se refere à porosidade efetiva e condutividade hidráulica, sabe-se que a recarga assimilada por este sistema é variável em função da posição, tendo em vista que a “transmissividade” e a carga hidráulica assumem valores diferenciados para diferentes locais. Desta forma, esta estimativa de recarga exige a consideração de hipóteses simplificadoras tornando qualquer avaliação quantitativa vulnerável a questionamentos, porém, sem estas considerações seria impossível chegar a uma avaliação quantitativa da recarga direta para área de estudo.

Numa abordagem das condições hídricas da região se realizou uma avaliação com base nas estações meteorológicas de Paracuru e São Gonçalo do Amarante. Para a estação de Paracuru avaliou-se series históricas com registros de dados de precipitação no período de 1977 a 2015 (Tabela 2). Para a estação de São Gonçalo do Amarante o período disponível é de 1974 a 2015 (Tabela 3). Ambas as estações mostraram que as maiores taxas de precipitação encontram-se no

período de janeiro a junho (Figuras 4 e 5). Nos meses de julho a dezembro as chuvas apresentam suas taxas mínimas. As taxas de evapotranspiração real atingem seus valores mais elevados (123 a 134 mm) no período de fevereiro a junho para a estação de Paracuru (Tabela 4). Para os registros na estação meteorológica de São Gonçalo do Amarante a evapotranspiração real ocorre com mais intensamente no período de fevereiro a maio (135 a 137 mm) (Tabela 5).

Tabela 1 – Fatores para correção de evapotranspiração potencial mensal segundo Thornthwaite, com latitudes entre 15° norte e 37° sul

Lat.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
15°N	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
10°N	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,05	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
5°N	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
Eq	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5°S	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10°S	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15°S	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20°S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22°S	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23°S	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24°S	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25°S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26°S	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27°S	1,18	1,02	1,05	0,96	0,93	0,87	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28°S	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29°S	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30°S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31°S	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32°S	1,21	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23
33°S	1,22	1,04	1,06	0,94	0,90	0,83	0,88	0,95	1,00	1,13	1,16	1,23
34°S	1,22	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,84	1,00	1,13	1,16	1,24
35°S	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
36°S	1,24	1,04	1,06	0,94	0,88	0,81	0,86	0,94	1,00	1,13	1,17	1,26
37°S	1,25	1,05	1,06	0,94	0,88	0,80	0,86	0,93	1,00	1,14	1,18	1,27

Fonte: Villela, 1975

Tabela 2 – Série histórica com taxas mensais de precipitação (mm) registrada na estação meteorológica de Paracuru

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Totais
1977	175,70	83,60	253,20	329,40	197,40	241,60	97,60	0,00	3,20	1,20	0,00	0,00	1382,90
1978	3,00	150,00	72,00	88,90	214,70	104,50	141,80	0,00	8,20	0,00	0,00	0,00	783,10
1979	6,20	61,60	150,40	178,80	279,80	51,50	3,20	2,30	3,50	4,50	3,20	3,10	748,10
1980	239,00	373,50	160,00	27,10	43,00	32,80	37,70	0,00	8,50	0,00	0,00	5,50	927,10
1981	28,00	90,40	359,60	163,40	231,80	20,40	4,20	0,00	0,00	0,00	0,00	27,70	925,50
1982	103,50	138,30	336,90	257,00	67,10	92,30	28,40	0,00	18,60	2,10	0,00	0,00	1044,20
1983	39,50	121,10	182,50	106,80	45,80	66,90	8,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	570,90
1984	10,60	131,70	363,20	324,90	275,50	187,10	152,10	2,50	1,20	15,30	0,00	0,00	1464,10
1985	271,70	537,90	471,80	516,70	195,10	119,70	150,40	5,20	0,00	0,00	0,00	88,70	2357,20
1986	61,80	193,10	584,50	405,60	223,70	269,80	20,50	7,50	3,20	1,20	2,50	19,00	1792,40
1987	99,00	132,20	568,40	139,40	12,00	165,60	38,70	3,20	2,30	0,00	0,00	0,00	1160,80
1988	92,20	244,60	185,80	429,70	312,00	94,20	56,60	0,00	0,00	0,00	5,50	96,80	1517,40
1989	239,30	29,10	346,70	592,90	225,90	175,60	230,80	22,60	4,60	0,00	0,00	90,20	1957,70
1990	17,20	93,10	54,00	189,40	219,20	83,00	19,80	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	685,70
1991	26,60	160,60	287,00	284,80	158,00	31,30	42,00	0,00	0,00	22,00	0,50	0,00	1012,80
1992	23,10	283,40	244,90	138,00	117,60	111,00	5,60	15,80	6,80	0,00	1,00	0,00	947,20
1993	27,20	11,10	124,80	78,40	31,10	39,80	160,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	472,40
1994	151,70	314,70	435,40	311,40	394,30	424,10	125,50	32,00	19,40	0,00	0,00	16,00	2224,50
1995	84,00	223,70	440,70	705,70	435,80	88,60	97,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2075,80
1996	236,60	85,20	404,30	373,50	203,90	0,00	3,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1312,50
1997	5,00	16,00	260,60	299,60	251,60	38,80	27,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,80	916,40
1998	165,00	35,00	228,10	159,70	205,00	92,00	8,00	10,00	0,00	8,00	0,00	4,00	914,80
1999	37,70	154,70	490,90	399,80	299,60	33,10	7,50	0,00	24,00	3,00	2,00	23,30	1475,60
2000	176,90	115,20	280,30	301,30	236,20	157,60	160,10	47,00	93,50	4,80	0,00	0,50	1573,40
2001	0,00	28,70	167,20	838,20	17,20	71,00	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,40	1153,70
2002	329,80	64,00	347,30	440,00	227,70	211,50	36,00	1,00	1,50	0,00	0,00	6,70	1665,50
2003	176,80	221,00	505,10	415,20	284,40	182,20	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1786,70
2004	403,90	213,80	356,40	194,80	83,40	343,80	173,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1769,50
2005	17,80	92,80	195,60	111,20	288,40	218,00	42,60	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	973,40
2006	7,60	85,40	196,60	266,60	296,20	142,00	31,40	22,80	25,80	0,00	0,00	18,00	1092,40
2007	15,40	346,40	281,20	273,60	364,80	62,00	3,00	3,00	0,00	0,00	0,00	22,00	1371,40
2008	245,40	31,80	374,00	423,30	187,80	36,20	13,40	27,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1338,90
2009	114,60	230,60	437,20	590,60	301,00	237,40	165,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2077,20
2010	61,00	69,60	154,00	271,80	153,00	82,80	60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	74,00	926,20
2011	433,60	192,80	186,60	194,40	224,60	61,60	54,80	16,80	0,00	0,00	0,00	0,00	1365,20
2012	23,20	181,40	220,60	134,00	57,40	29,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	645,60
2013	52,60	99,00	40,40	230,20	260,00	121,40	120,20	0,00	0,00	0,00	0,00	7,00	930,80
2014	48,00	60,40	156,00	302,40	153,30	31,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	754,10
2015	52,20	196,70	292,30	310,80	71,80	81,20	11,40	0,00	0,00	0,00	0,00	11,00	1027,40
Média	110,32	151,13	287,09	302,55	201,21	118,78	60,59	5,94	5,75	1,59	0,63	13,92	1259,50

Fonte: FUNCEME, 2015

Tabela 3 – Série histórica com taxas mensais de precipitação (mm) da estação meteorológica de São Gonçalo do Amarante

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Totais
1974	347,90	173,20	492,50	609,50	350,40	116,60	7,00	5,60	6,20	5,30	1,20	84,90	2200,30
1975	95,90	90,10	412,10	280,20	292,10	72,00	63,90	0,00	58,00	2,90	1,20	47,40	1415,80
1976	38,70	496,30	245,00	264,90	32,80	13,20	37,10	5,00	1,80	15,70	3,60	15,80	1169,90
1977	104,60	175,70	247,10	231,60	127,20	194,70	190,40	0,40	3,50	0,00	0,00	3,20	1278,40
1978	20,70	88,10	51,50	118,20	148,80	0,00	69,00	1,80	5,80	8,70	0,80	17,90	531,30
1979	16,50	164,60	166,00	106,50	95,60	59,60	3,00	0,90	13,50	0,00	1,40	0,20	627,80
1980	84,50	271,30	147,30	9,80	48,10	69,10	19,90	2,30	0,00	2,70	0,00	10,00	665,00
1981	18,30	80,70	343,60	80,10	85,40	5,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	72,00	686,30
1982	146,10	148,20	220,10	245,20	67,20	56,60	27,80	20,60	12,20	11,60	3,40	3,40	962,40
1983	19,60	176,10	211,80	100,60	43,40	1,00	0,00	1,20	0,00	2,90	0,00	11,40	568,00
1984	23,40	88,90	306,30	350,00	164,80	131,00	76,00	7,40	7,00	8,00	4,60	17,00	1184,40
1985	290,40	411,50	438,90	254,60	220,40	80,90	65,10	11,50	7,00	0,00	0,40	139,40	1920,10
1986	113,30	277,90	635,90	461,40	196,40	272,80	21,40	28,20	20,50	3,20	12,60	53,00	2096,60
1987	42,20	107,20	394,20	120,20	12,50	186,60	53,00	0,00	2,60	0,00	0,60	0,00	919,10
1988	90,90	203,60	225,90	351,80	169,80	106,80	72,10	0,00	4,60	4,40	0,00	30,20	1260,10
1989	131,20	74,80	194,00	378,60	273,10	118,00	87,40	14,40	25,20	0,20	6,60	63,60	1367,10
1990	47,40	76,90	64,80	93,00	121,80	22,50	29,40	8,60	16,00	0,00	9,00	8,30	497,70
1991	56,50	149,20	376,60	310,40	109,50	24,20	4,70	7,40	0,00	10,80	4,00	0,00	1053,30
1992	54,40	271,60	233,40	122,80	43,00	54,60	0,00	3,20	1,90	0,00	0,00	0,00	784,90
1993	5,40	17,80	97,90	122,40	24,60	19,00	128,60	0,00	0,00	18,40	0,00	0,00	434,10
1994	117,00	359,20	246,00	241,90	317,20	194,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,40	1492,50
1995	33,30	147,00	219,60	403,60	182,80	96,40	32,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	1117,70
1996	176,30	66,80	356,60	233,60	70,60	21,80	12,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	940,70
1997	3,40	27,00	192,80	244,60	131,80	0,00	7,60	5,80	0,00	0,00	0,00	16,00	629,00
1998	134,60	69,60	145,80	79,00	4,00	55,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	488,00
1999	54,40	135,40	245,00	171,00	231,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,20	847,80
2000	126,50	98,80	192,20	247,40	64,00	77,00	56,40	54,00	29,60	0,00	0,00	0,00	945,90
2001	96,20	83,80	119,60	409,90	24,80	70,20	18,40	0,00	0,00	0,00	8,60	6,00	837,50
2002	259,20	50,40	260,00	291,40	118,40	84,00	29,00	0,00	0,00	0,00	11,00	0,00	1103,40
2003	85,00	285,00	524,40	303,50	155,00	91,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1443,90
2004	306,60	267,40	199,20	86,00	14,40	127,00	67,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1067,60
2005	25,00	45,00	87,60	133,40	243,60	132,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	674,60
2006	0,00	158,40	260,20	282,00	188,80	133,90	15,00	0,00	10,00	0,00	0,00	10,00	1058,30
2007	59,40	319,80	211,20	189,60	96,50	65,20	10,20	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	966,90
2008	114,40	30,40	280,60	303,40	121,00	47,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	896,80
2009	155,40	224,40	498,60	454,40	257,40	176,20	130,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1896,60
2010	82,80	40,00	107,00	316,00	55,00	36,00	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	102,60	754,40
2011	257,00	147,60	252,80	333,00	93,80	100,00	117,80	9,00	0,00	23,40	0,00	0,00	1334,40
2012	36,00	140,60	141,60	71,60	49,40	25,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	464,20
2013	24,00	134,20	68,00	145,40	112,00	70,60	27,40	0,00	0,00	0,00	0,20	35,60	617,40
2014	123,00	129,20	96,40	164,20	51,00	13,40	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	587,20
2015	41,40	106,20	184,40	288,20	27,60	32,00	83,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	762,80
Média	91,70	150,01	237,05	226,93	116,99	78,25	38,12	4,53	4,09	2,42	1,71	16,52	968,31

Fonte: FUNCEME, 2015

Tabela 4 – Balanço hídrico com base nos dados registrados na estação meteorológica de Paracuru

MÊS	T(média)	Im	K	ETP	PPT	PPT-ETP	C	ETR	Ie
	(°C)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Jan	27,2	12,69	1,06	155,7	110,3	-45,4	0,0	110,3	0,0
Fev	26,9	12,48	0,95	134,0	151,1	17,2	17,2	134,0	0,0
Mar	26,5	12,20	1,04	138,8	287,1	148,3	100,0	138,8	65,4
Abr	26,5	12,20	1,00	133,5	302,5	169,1	100,0	133,5	169,1
Mai	26,4	12,13	1,02	134,3	201,2	66,9	100,0	134,3	66,9
Jun	26,5	12,20	0,99	132,1	118,8	-13,4	100,0	118,8	0,0
Jul	26,3	12,06	1,02	132,4	60,6	-71,8	100,0	60,6	0,0
Ago	26,4	12,13	1,03	135,6	5,9	-129,6	100,0	5,9	0,0
Set	26,8	12,41	1,00	139,1	5,8	-133,4	99,4	5,8	0,0
Out	27,2	12,69	1,05	154,2	1,6	-152,7	0,0	1,6	0,0
Nov	27,3	12,76	1,03	153,4	0,6	-152,7	0,0	0,6	0,0
Dez	27,4	12,83	1,06	160,0	13,9	-146,0	0,0	13,9	0,0
Total		148,78			1259,5			858,1	301,4

Tabela 5 – Balanço hídrico com base nos dados registrados na estação meteorológica de São Gonçalo do Amarante

MÊS	T(média)	Im	K	ETP	PPT	PPT-ETP	C	ETR	Ie
	(°C)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Jan	27,4	12,83	1,06	159,9	91,7	-68,2	0,0	91,7	0,0
Fev	27,1	12,62	0,95	137,5	150,0	12,5	23,3	137,5	0,0
Mar	26,6	12,27	1,04	140,5	237,1	96,6	100,0	140,5	19,9
Abr	26,6	12,27	1,00	135,1	226,9	91,8	100,0	135,1	91,8
Mai	26,5	12,20	1,02	135,9	117,0	-18,9	81,1	117,0	0,0
Jun	26,5	12,20	0,99	131,9	78,3	-53,6	27,5	78,3	0,0
Jul	26,4	12,13	1,02	134,0	38,1	-95,9	0,0	38,1	0,0
Ago	26,6	12,27	1,03	139,1	4,5	-134,6	0,0	4,5	0,0
Set	26,9	12,48	1,00	140,8	4,1	-136,8	0,0	4,1	0,0
Out	27,3	12,76	1,05	156,2	2,4	-153,8	0,0	2,4	0,0
Nov	27,5	12,90	1,03	157,5	1,7	-155,8	0,0	1,7	0,0
Dez	27,6	12,97	1,06	164,3	16,5	-147,7	0,0	16,5	0,0
Total		149,90			968,3			767,5	111,7

Figura 4 – Gráfico representativo das variações dos valores de precipitação (mm) e temperaturas (°C) registradas na estação meteorológica de Paracuru

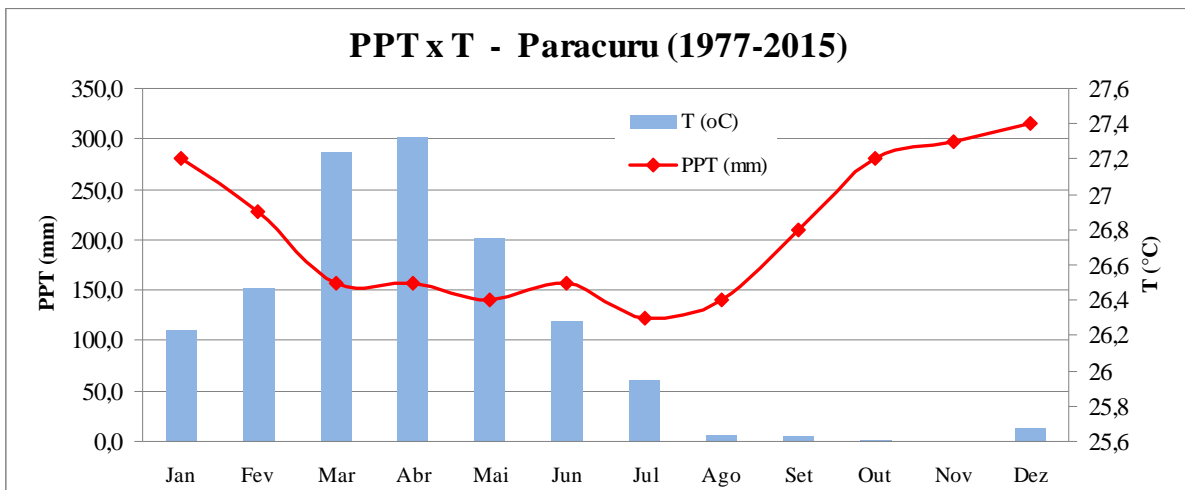
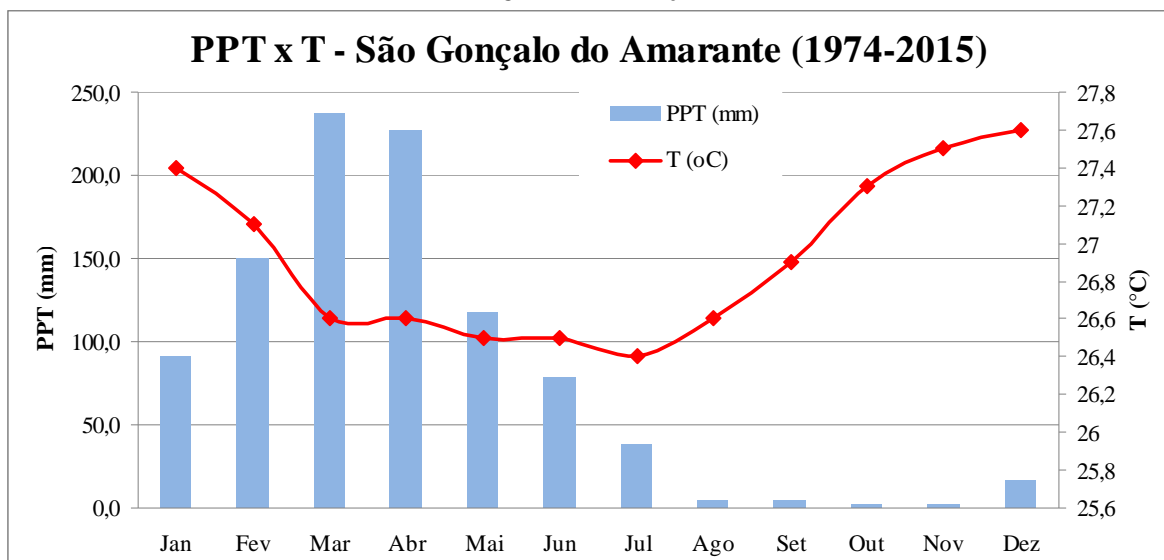


Figura 5 – Gráfico representativo das variações dos valores de precipitação (mm) e temperaturas (°C) registradas na estação meteorológica de São Gonçalo do Amarante



5. Modelo Hidrogeológico

5.1. Objetivos dos modelamentos

Segundo Tucci (1998), um modelo é a representação de um objeto ou sistema (bacia hidrográfica), em linguagem de fácil acesso e utilização, objetivando entendê-lo e para a obtenção de respostas para diferentes condições iniciais (entradas). Portanto, deve-se buscar o entendimento

de seu comportamento e dos fenômenos e processos envolvidos, visando fundamentalmente o uso racional de seus recursos.

Como outra conceituação para modelos hidrológicos pode-se abordar a definição presente no Glossário de Termos Hidrológicos da Agência Nacional de Águas (ANA), que aborda o modelo como uma representação matemática simplificada de alguns ou de todos os processos do ciclo hidrológico por um conjunto de conceitos hidrológicos expressos em linguagem matemática e interligados em sequências temporais e espaciais correspondentes às observadas na natureza. Os modelos analógicos conceituais são utilizados para simular o comportamento de uma bacia.

As pesquisas desenvolvidas no presente projeto auxiliaram na elaboração do modelo hidrogeológico para a área do campo de dunas ocorrente na faixa litorânea compreendida entre as cidades de Pecém e Paracuru, litoral oeste do estado do Ceará. Para tanto foram elaboradas atividades afins para levantamento de dados que compuseram a base para o modelo. A partir da elaboração e calibração do modelo será possível:

- Estimar, com base no balanço hídrico, as reservas reguladoras e permanentes;
- Definir as reservas exploráveis;
- Avaliar a situação atual do aquífero;
- Analisar a vulnerabilidade e sustentabilidade da exploração das águas subterrâneas;
- Calcular as projeções da oferta de água subterrânea na área;
- Orientar quanto ao monitoramento das reservas reguladoras e permanentes;
- Auxiliar no zoneamento e regulação de áreas de captação de águas subterrâneas;
- Delinear as zonas de recarga potencial natural.

5.2. Parâmetros levantados

Para realização do modelamento matemático das condições hidrológicas da região, será utilizado o Software *Modflow*. Este programa foi desenvolvido por Michael McDonald e Arlen Harbaugh, da *United States Geological Service (USGS)*, sendo o primeiro lançamento em 1983. Desde então o programa tem passado por diversas atualizações e inserção de pacotes adicionais desenvolvidos por outros autores para condições específicas, até o lançamento da última versão, que será a base para o trabalho aqui desenvolvido.

É necessário o conhecimento das bases conceituais do programa *Modflow*, considerando-se que este será utilizado para modelamento e calibração do aquífero. O *ModFlow* representa um modelo tridimensional de diferenças finitas que simula o aquífero em condições não permanentes. O software permite simular aquíferos confinados e não confinados e a combinação entre estes,

bem como o fluxo associado a uma pressão externa como, mananciais, superfícies recarregadas, evapotranspiração, drenagens e correntes.

Na maioria dos métodos que regem os modelos é necessário fixar critérios que possam conduzir a acurácia do modelo, permitindo a continuação da interação ou subsidiando a aceitação da solução. Estes critérios podem se dividir em três grupos (Alvarez *et al*, 1976), aplicados ao:

Balanco – consiste no cálculo do volume de água de entrada e saída do aquífero, comparando com a variação do armazenamento. Se a diferença entre as duas quantidades é maior que o limite admissível (representa um erro absoluto ou em percentual), então é necessário a continuação da interação.

Resíduo – critério que limita o resíduo máximo, médio e a soma dos resíduos calculados, substituindo no sistema de equações, os níveis obtidos em cada interação.

Nível piezométrico – estes são de aplicação mais direta, pois controlam a diferença de níveis em cada limite entre as sucessivas interações.

Para composição do modelo matemático hidrogeológico é necessário estabelecer algumas condições de contorno, as quais são inseridas no programa através de aplicativos diretos. Estas condicionantes referem se a:

- Delimitação da área de estudo e dos limites a serem considerados na elaboração do modelo hidrogeológico;
- Características topográficas (cotas topográficas) através de mapas e modelos digitais de terreno;
- Descrição e posicionamento das unidades litoestratigráficas, abordando características físicas (distribuição espacial das unidades, espessura, área aflorante) e condições geológicas (área sedimentar, limites embasamento), características hidrogeológicas (unidades aquíferas, unidades permeáveis e impermeáveis, profundidades e oscilação de nível freático, vazões com base em dados de poços);
- Parâmetros hidráulicos - condições de fluxo vertical e horizontal, condutividades hidráulicas de sistemas hídricos superficiais – bacias hidrográficas – que representam reflexo das condições hídricas livres em subsuperfície;
- Demarcação das principais drenagens e condições hídricas superficiais;
- Condições de calibração – entradas e saídas do sistema hídrico.

Para determinações destas várias condições e características da área foram realizadas pesquisas hidrogeológicas clássicas que incluem cadastramento e avaliação de dados de poços tubulares, levantamento planialtimétrico de detalhe, levantamento geofísico com objetivo de caracterização das condições aquíferas, sondagens mecânicas para avaliações diretas das

características dos materiais em subsuperfície, construção de piezômetros e avaliação dos dados provenientes dos mesmos, concluindo com os testes de aquíferos. Todos estes dados foram levantados por empresa especializada sendo contratada e fiscalizada pela equipe da Companhia de Gestão e Recursos Hídricos – Cogeh.

5.3. Modelamento matemático

Um modelo é um conjunto de hipóteses que busca explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, a realidade de um sistema de forma simplificada. Modelos para sistemas de água subterrânea são representações matemáticas dos processos físicos de escoamento e transporte nos aquíferos (Monteiro, 2000).

Modelos de água subterrânea são baseados na avaliação das informações da geologia, hidrologia de superfície e hidrologia subterrânea. Após definidos os objetivos a serem alcançados procede-se à idealização do modelo conceitual. Este é elaborado após análise hidrogeológica clássica com base em perfis dos poços, dados de testes de aquífero, mapas potenciométricos, taxas de precipitação, evapotranspiração, infiltração, cursos d'água, dentre outros. Nessa fase da modelagem deve-se determinar a geometria do sistema, condições iniciais e de contorno, os prováveis parâmetros hidrodinâmicos, condições de recarga e bombeamentos e a interconexão hidráulica.

Conhecendo-se o esquema conceitual passa-se a fase de escolha de um modelo matemático que enquadre o modelo conceitual proposto da forma mais coerente possível. Nesta fase será utilizado o programa *Visual Modflow 4.3*, que é um pacote computacional desenvolvido para tal finalidade e que proporciona o tratamento e avaliação das informações a serem consideradas no modelamento.

A esquematização da modelagem matemática consistirá de:

- Equações algébricas ou diferenciais que caracterizem o fluxo ou os processos de transporte.
- Geometria do Modelo (forma, topo e base do aquífero).
- Discretização da área modelada.
- Parâmetros hidrodinâmicos
- Condições de contorno que definam as entradas no sistema tal como (precipitação e infiltração) e saídas tais como descargas (poços, fontes, e evapotranspiração).
- Condições iniciais que retratem o estado do sistema anteriormente às informações que se pretende analisar.
- Seleção do intervalo do tempo de simulação (*time-step*).

De posse do modelo obtido inicia-se o processo de calibração. O modelo de calibração compara o modelo de resposta com os dados de campo. Na calibração se procura ajustar os parâmetros do modelo para que os resultados obtidos se aproximem da melhor forma possível dos dados medidos em campo. Após a calibração com um conjunto de dados de campo, pode ser feito um processo de validação utilizando outro conjunto de dados de campo. Se os resultados do segundo conjunto, simulado com os parâmetros obtidos no primeiro conjunto, apresentarem bom ajuste em relação aos valores reais observados, podemos dizer que o modelo é válido para analisar o problema em estudo.

Na área de pesquisa realizou-se estudos de altimetria, hidrogeológicos, geofísicos e de sondagens mecânicas, para gerar dados que forneceram subsídio à delimitação das reais condições de contorno para o modelamento matemático.

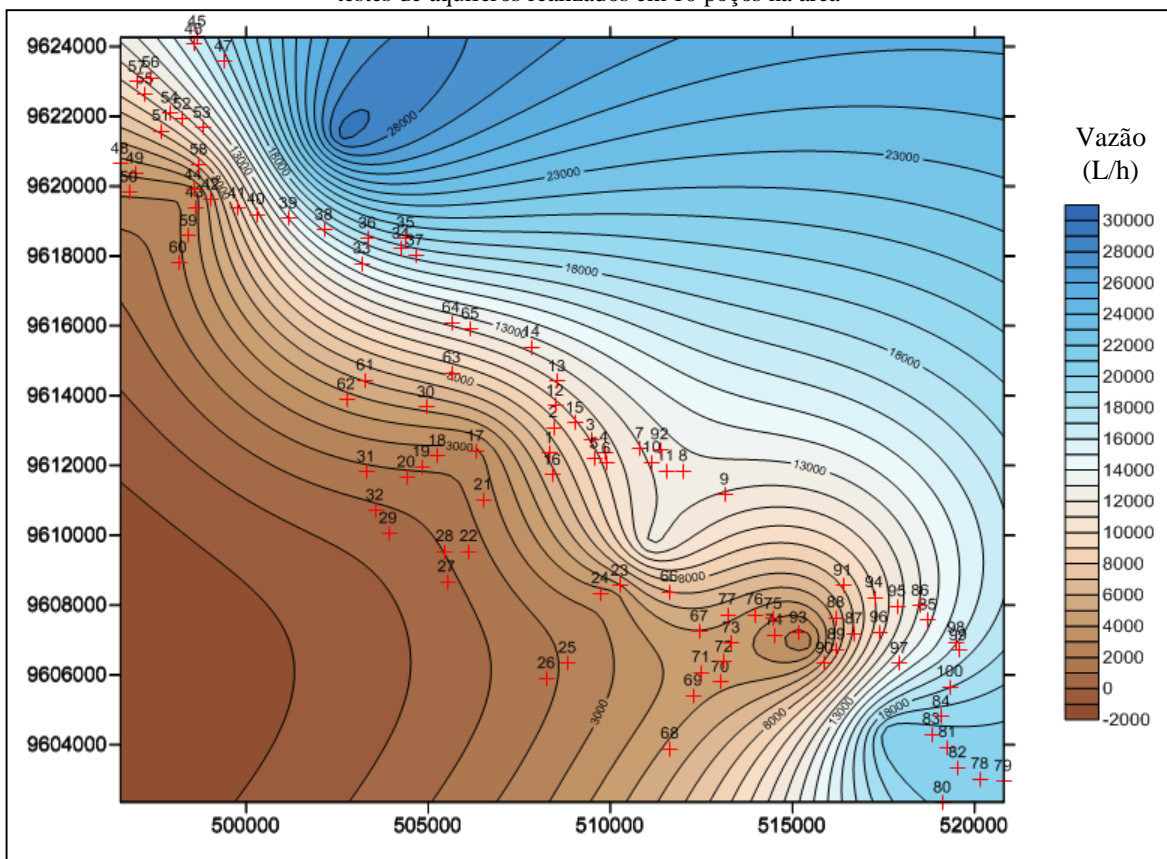
As informações iniciais levantadas estão apresentadas na tabela 6. Os dados de vazão para compor a tabela 6 foram provenientes de uma interpolação através do software *Surfer* (Figura 6), onde se utilizou como base os dados de vazões obtidos nos testes de aquífero realizados em 10 poços ao longo da área. Através do método de *krigagem* se estabeleceu os valores de vazão para cada ponto a ser utilizado no modelamento matemático (100 pontos), os quais compuseram a malha para georreferenciamento através de GPS Geodésico. Apesar da densidade de dados não ser a ideal, esta avaliação é coerente por se tratar de um aquífero livre e relativamente homogêneo. Os dados de vazões fornecidos no cadastro dos poços têm caráter informal. Na maioria dos casos a vazão fica restrita à potencialidade do equipamento de bombeamento. Não existem testes de produção dos poços para afirmar as reais condições de produção destas unidades.

Tabela 6 – Dados utilizados para composição do modelo matemático, incluindo cenários para 10, 20 e 30 anos

ID	UTM_N	UTM_E	Cota (m)	Esp. Aquif. (m)	Bottom (m)	Vazão (m³/h)	Vazão (m³/dia)	Vazão (10anos-3650dias)	Vazão (20anos-7300dias)	Vazão (30anos-10950dias)
ESP56	9606905.53	519510.35	15.291	9	6.291	16	384	1401600	2803200	4204800
PN01	9612337.23	508324.92	10.902	5.5	5.402	7.2	172.8	630720	1261440	1892160
PN04	9608319.24	509737.74	19.833	6.9	12.933	3.8	91.2	332880	665760	998640
PN05	9608537.01	510276.62	20.394	8	12.394	5	120	438000	876000	1314000
PN06	9608365.82	511635.31	18.276	9.2	9.076	7	168	613200	1226400	1839600
PN07	9607231.98	512456.01	14.824	5	9.824	5	120	438000	876000	1314000
PN09	9603867.83	511650.82	21.447	5.3	16.147	5.4	129.6	473040	946080	1419120
PN100	9613691.52	508494.54	5.939	17.6	-11.661	9.6	230.4	840960	1681920	2522880
PN101	9614390.11	508548.26	2.731	15.7	-12.969	11	264	963600	1927200	2890800
PN102	9615377.6	507844.29	3.442	12.7	-9.258	12.4	297.6	1086240	2172480	3258720
PN103	9613207.06	509042.31	5.568	10	-4.432	10	240	876000	1752000	2628000
PN104	9612703.78	509473.7	6.558	6.1	0.458	10	240	876000	1752000	2628000
PN106	9612465.97	510820.14	10.072	7.9	2.172	12	288	1051200	2102400	3153600
PN107	9612442.96	511373.1	6.985	10.5	-3.515	12.5	300	1095000	2190000	3285000
PN111	9611153.61	513150.81	11.098	9.4	1.698	12	288	1051200	2102400	3153600
PN113	9611826.01	511529.57	17.929	11.4	6.529	12.5	300	1095000	2190000	3285000
PN115	9616070.05	505645.74	9.272	14.2	-4.928	12.2	292.8	1068720	2137440	3206160
PN116	9615898.58	506166	7.825	16.2	-8.375	12.2	292.8	1068720	2137440	3206160
PN159	9612042.69	509902.01	10.66	5.3	5.36	10.2	244.8	893520	1787040	2680560
PN160	9612184.81	509564.22	12.213	5.3	6.913	9.6	230.4	840960	1681920	2522880
PN17	9605776.58	513035.52	16.377	5.6	10.777	4.8	115.2	420480	840960	1261440
PN18	9606903.75	513330.48	11.89	5	6.89	5.4	129.6	473040	946080	1419120
PN19	9606359.92	513125.36	12.708	5.3	7.408	4.7	112.8	411720	823440	1235160
PN20	9607116.13	514521.34	7.858	6.9	0.958	3.4	81.6	297840	595680	893520
PN21	9606709.48	516217.36	4.173	10	-5.827	6.9	165.6	604440	1208880	1813320
PN22	9607193.41	515179.81	5.874	8.4	-2.526	3	72	262800	525600	788400
PN23	9606312.92	515895.78	10.481	9.8	0.681	6.4	153.6	560640	1121280	1681920
PN25	9607623.72	516207.43	2.623	7.3	-4.677	6.4	153.6	560640	1121280	1681920
PN26	9607163.58	516704.91	7.539	7.7	-0.161	8.2	196.8	718320	1436640	2154960
PN27	9607206.66	517394.38	4.638	6.8	-2.162	10.7	256.8	937320	1874640	2811960
PN30	9606317.14	517952.84	14.497	11.2	3.297	5.2	124.8	455520	911040	1366560
PN32	9607566.41	518729.56	5.797	7.5	-1.703	13.8	331.2	1208880	2417760	3626640

ID	UTM_N	UTM_E	Cota (m)	Esp. Aquif. (m)	Bottom (m)	Vazão (m ³ /h)	VAZÃO (m ³ /dia)	VAZÃO (10anos-3650dias)	VAZÃO (20anos-7300dias)	VAZÃO (30anos-10950dias)
PN33	9604790.9	519106.52	29.475	8.5	20.975	19.5	468	1708200	3416400	5124600
PN64	9605885.18	508256.33	22.428	2.8	19.628	1.8	43.2	157680	315360	473040
PN66	9608651.26	505517.12	9.871	4.3	5.571	1	24	87600	175200	262800
PN67	9609522.09	506127.51	13.361	5.2	8.161	1.5	36	131400	262800	394200
PN68	9610996.18	506522.39	11.219	6.7	4.519	2.6	62.4	227760	455520	683280
PN70	9612264.11	505261.54	7.407	7	0.407	2.7	64.8	236520	473040	709560
PN71	9611941.13	504816.82	4.99	7	-2.01	2.2	52.8	192720	385440	578160
PN72	9611647.51	504410.16	4.1	7	-2.9	1.9	45.6	166440	332880	499320
PN73	9612389.79	506309.44	7.16	8.5	-1.34	3	72	262800	525600	788400
PN76	9611712.08	508412.15	13.169	7	6.169	6.8	163.2	595680	1191360	1787040
PN77	9609517.72	505466.71	8.432	5	3.432	1	24	87600	175200	262800
PN79	9610037.42	503914.01	3.82	5.5	-1.68	0.6	14.4	52560	105120	157680
PN80	9611804.71	503301.06	4.026	7.5	-3.474	1.8	43.2	157680	315360	473040
PN81	9610699.91	503553.53	4.514	6.3	-1.786	1	24	87600	175200	262800
PN84	9613651.28	504949.63	9.471	14.5	-5.029	5.2	124.8	455520	911040	1366560
PN95	9619594.25	499039.64	21.115	20.5	0.615	5.7	136.8	499320	998640	1497960
PN96	9619346	499758.8	20.499	19.8	0.699	8.8	211.2	770880	1541760	2312640
PN98	9617994.73	504652.9	8.273	18.2	-9.927	17.2	412.8	1506720	3013440	4520160
PN99	9613068.69	508456.45	8.265	9.2	-0.935	8.5	204	744600	1489200	2233800

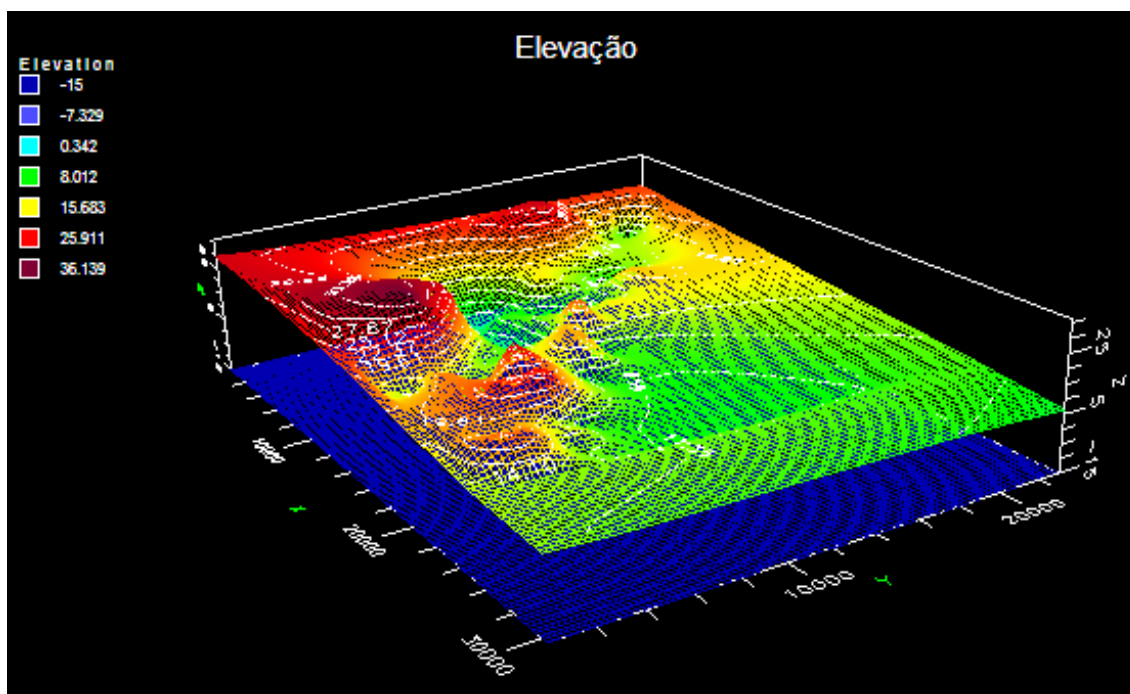
Figura 6 – Mapa de isolinhas para os valores de vazão (litros/hora), interpolados com base nos dados obtidos nos testes de aquíferos realizados em 10 poços na área



5.3.1. Aplicação do modelo

O objetivo principal da aplicação do modelo na área pesquisada é avaliar o comportamento do nível freático ao longo da exploração do aquífero em períodos extensos. O modelo parte da seleção dos poços a serem inseridos na base de dados. Tais poços devem ter informações de topo e base da camada saturada, espessura do aquífero e vazão (Tabela 6). Na sequência foi realizado o nivelamento através de GPS diferencial, determinado suas coordenadas UTM e altimetria dos pontos selecionados (Figura 7).

Figura 7 – Representação 3D do nivelamento altimétrico realizado na área



A partir da elaboração da base de dados utilizando-se o Software *Visual Modflow 4.3*, são gerados os contornos que permitem a visualização do comportamento do nível da água ao longo da área. Esta interface gráfica permite a visualização em 3D, onde se pode relacionar a base de dados (poços) com as isolinhas geradas (Figura 8). Para avaliação do bloco 3D representado na figura 8 padronizou-se em vermelho a porção saturada do poço, em amarelo a porção não saturada e em verde os poços de observação.

Em síntese, verificou-se zona saturada mais espessa a sudoeste da ponta do Pecém e também na região da Sede de Paracuru, as quais constituem áreas que podem conferir um maior potencial hídrico. Esta característica pode ser visualizada claramente no mapa de isovalores para a espessura saturada gerado a partir do modelamento pelo *Visual Modflow 4.2*. (Figura 9). Nesta representação as zonas mais quentes (em vermelho) apresentam espessuras saturadas que variam entre 34 e 40m. Estas espessas zonas saturadas conferem ao aquífero uma elevada potencialidade, considerando-se ainda a alta porosidade dos sedimentos que compõem o domínio Dunas/Paleodunas.

Figura 8 – Modelo tridimensional mostrando a superfície do nível freático na região e a base de dados proveniente dos poços inseridos. Poços em verde são os de observação. Poços em vermelho/amarelo são a base de dados

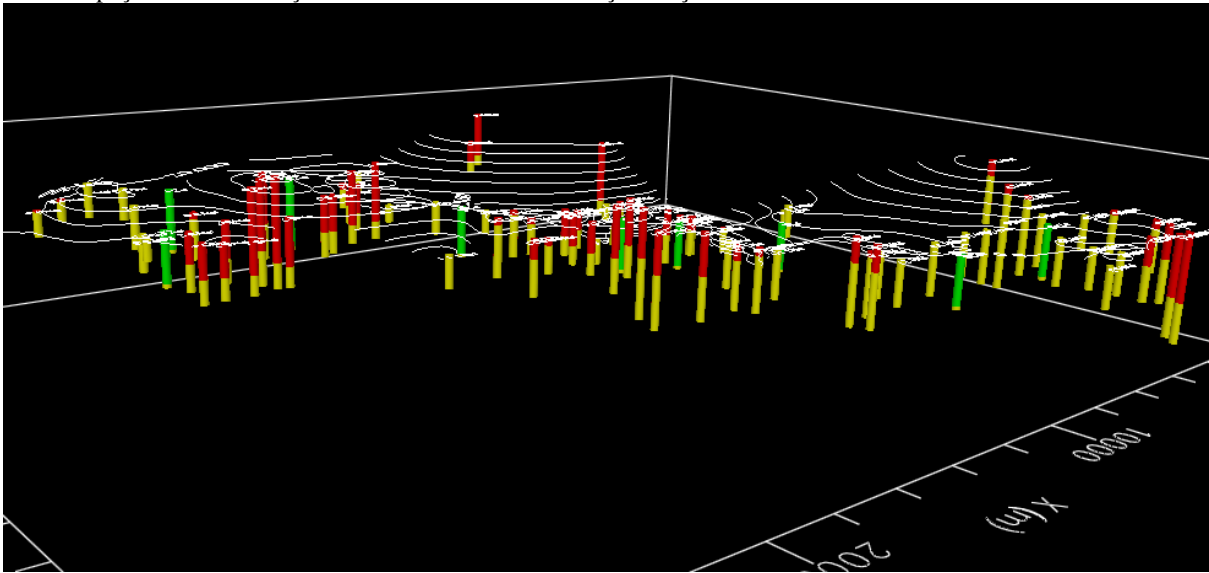
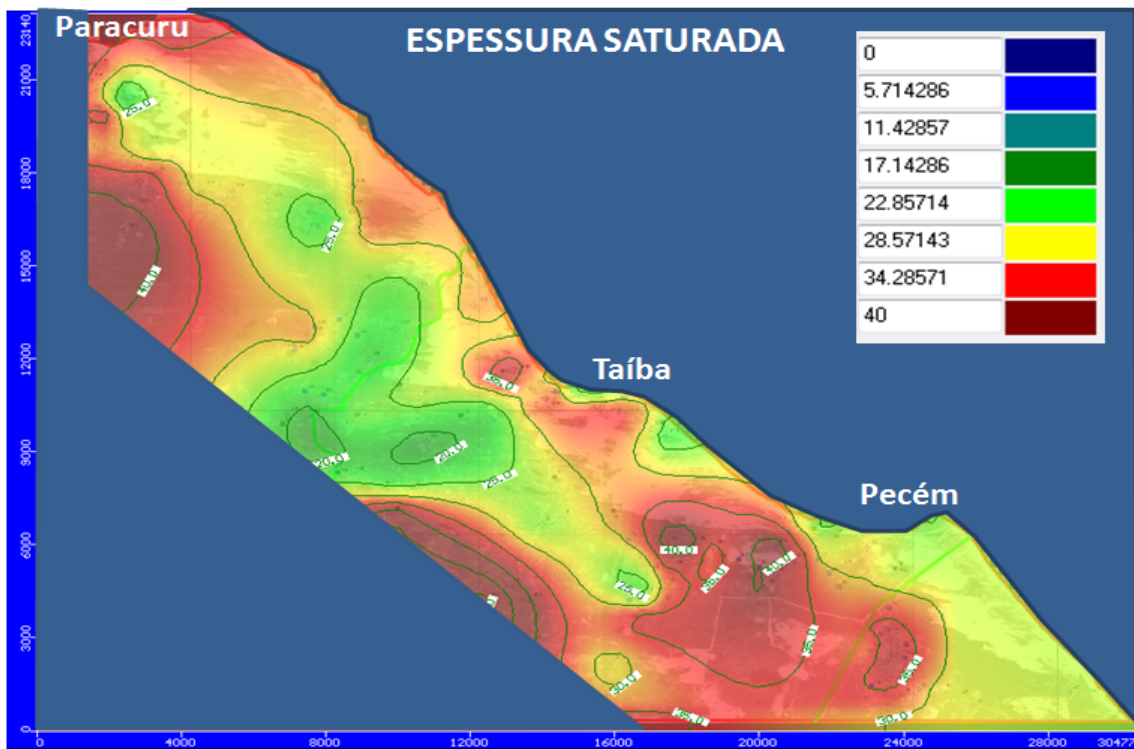


Figura 9 – Mapa de isovalores para a espessura saturada na região, gerado através do *Visual Modflow 4.2*



5.3.2. Cenários 10, 20 e 30 anos

As avaliações hidrogeológicas que envolvem perspectivas para cenários futuros contribuem para um melhor entendimento das condições hídricas locais quando se aplica uma

condição de uso e exploração. Para obtenção destas informações a partir do modelamento são necessárias as seguintes informações:

- Nível (m) de topo e base da camada aquífera em cada poço da base de dados
- Vazão (m^3/s) de produção em cada poço
- Período de avaliação (dias)
- Recarga (mm)

De posse dos dados mencionados é dado início ao processo de modelamento. Nesta condição os dados de elevação do nível da água (topo do aquífero) são interpolados considerando-se os rebaixamentos causados pelos volumes extraídos (vazão de produção). De modo geral os cenários futuros são úteis por propiciar uma visualização gráfica da intensidade do rebaixamento ao longo do período determinado (10, 20 e 30 anos). A Figura 10 mostra um mapa de isolinhas para o comportamento do nível freático (interface gráfica do *Visual Modflow 4.2*) decorrente da exploração do aquífero num período de 10 anos. Deve-se salientar que tais perspectivas não assumem condições distintas de produção dos poços, assume-se que as saídas do sistema são as mesmas ao longo do tempo. Em contrapartida sabe-se que esta não representa uma situação real, principalmente em áreas de larga ocupação industrial e turística como é o caso da região compreendida entre Pecém e Paracuru, que utilizam as águas subterrâneas como fonte principal do abastecimento público e privado.

Partindo-se do entendimento de tais condições, realizou-se a avaliação do comportamento do nível freático na área de pesquisa em cenários de utilização das águas subterrâneas ao longo de 10, 20 e 30 anos, os resultados na forma de mapa de isovalores estão apresentados nas figuras 11, 12 e 13 respectivamente. É pertinente esclarecer que os valores apresentados nos mapas das figuras 11, 12 e 13 representam a altitude do nível freático em relação ao nível do mar (superfícies potenciométricas).

Para uma avaliação ampla das variações dos níveis das águas ao longo dos anos na região pode-se observar principalmente as áreas onde o nível da água encontra-se mais próximo à superfície, identificada pela área rebaixada associada à drenagem do Rio Siupé (região em azul claro presente na porção central do mapa da figura 11). Nesta porção o nível da água varia de -2 a 4m num cenário de 10 anos. Quando observado o cenário de 20 anos (Figura 12) nessa mesma porção o nível varia de -8 a 2m. Seguindo as avaliações para um período de 30 nesta área identifica-se uma variação do nível da água de -10 a -2m.

Com base nas informações do modelamento pode-se inferir que num período de 10 anos o nível da água rebaixa na ordem de 2 a 3 metros. Ao longo da área estão registrados

rebaixamentos da ordem de 6 a 9 metros para um período de retiradas do sistema de 30 anos. Pode-se concluir que apesar da intensa exploração do aquífero os rebaixamentos ao longo dos períodos avaliados não se apresentaram tão intensos. Isso se deve às condições de recarga e elevada porosidade do meio, que resulta numa boa condição de armazenamento.

Figura 10 - Mapa de isolinhas para o comportamento do nível freático para cenário de 10 anos (interface gráfica do *Visual Modflow 4.2*)

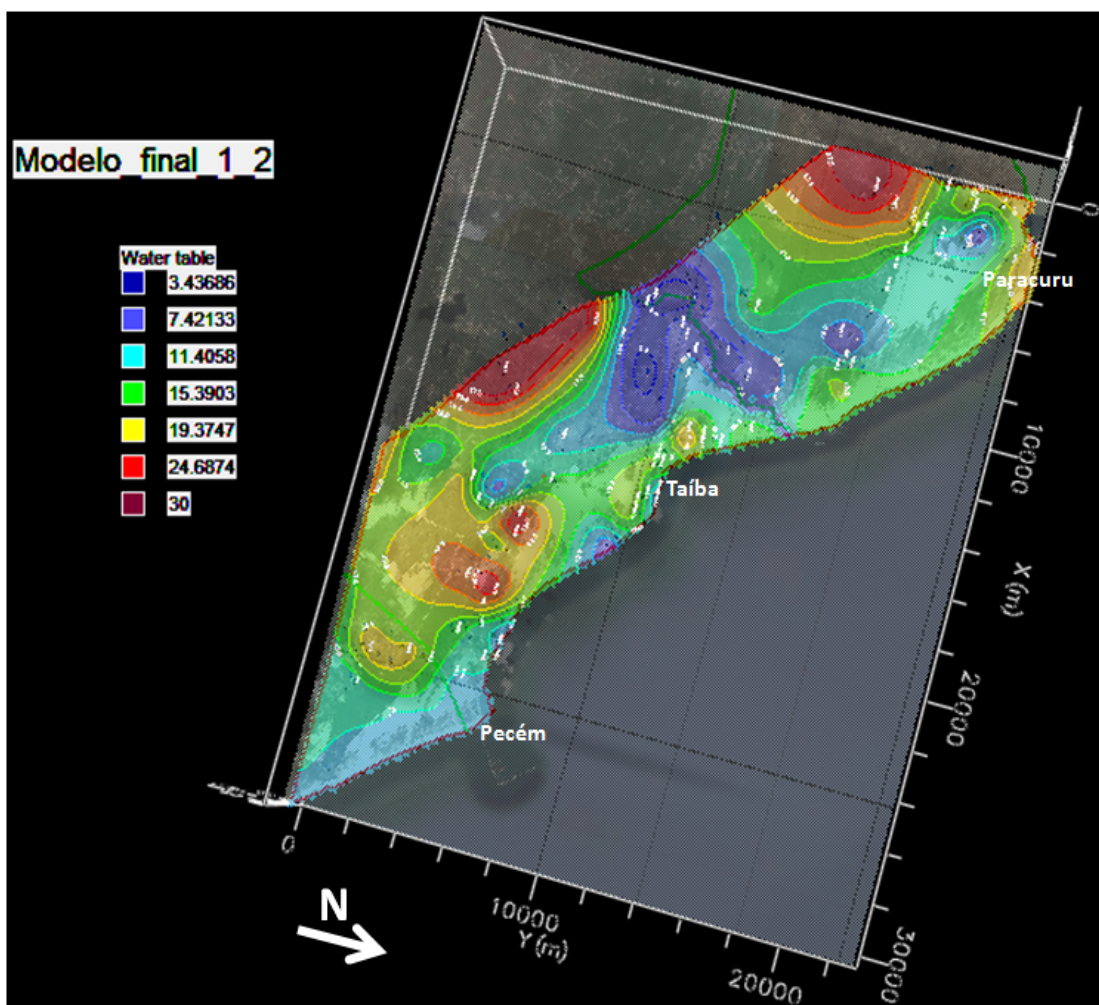


Figura 11 – Mapa de isolinhas para o comportamento do nível freático em cenário de 10 anos (interface gráfica do *Surfer 9*)

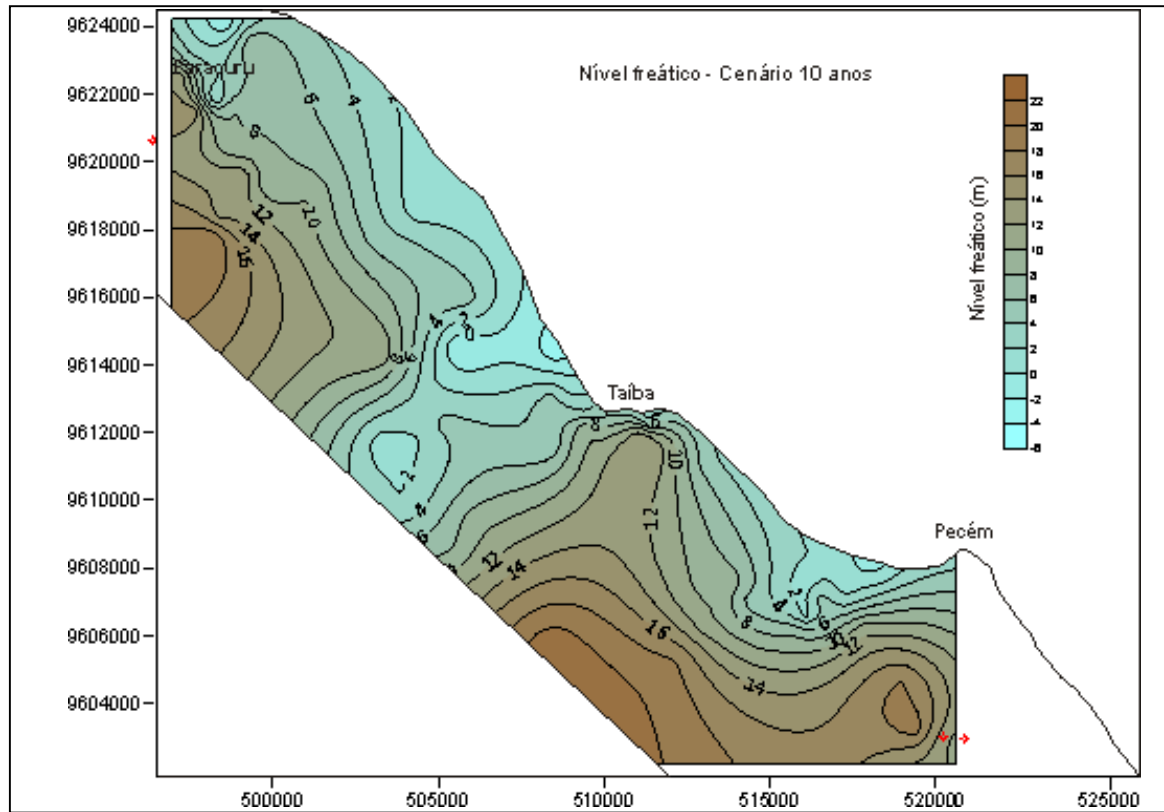


Figura 12 - Mapa de isolinhas para o comportamento do nível freático em cenário de 20 anos (interface gráfica do *Surfer 9*)

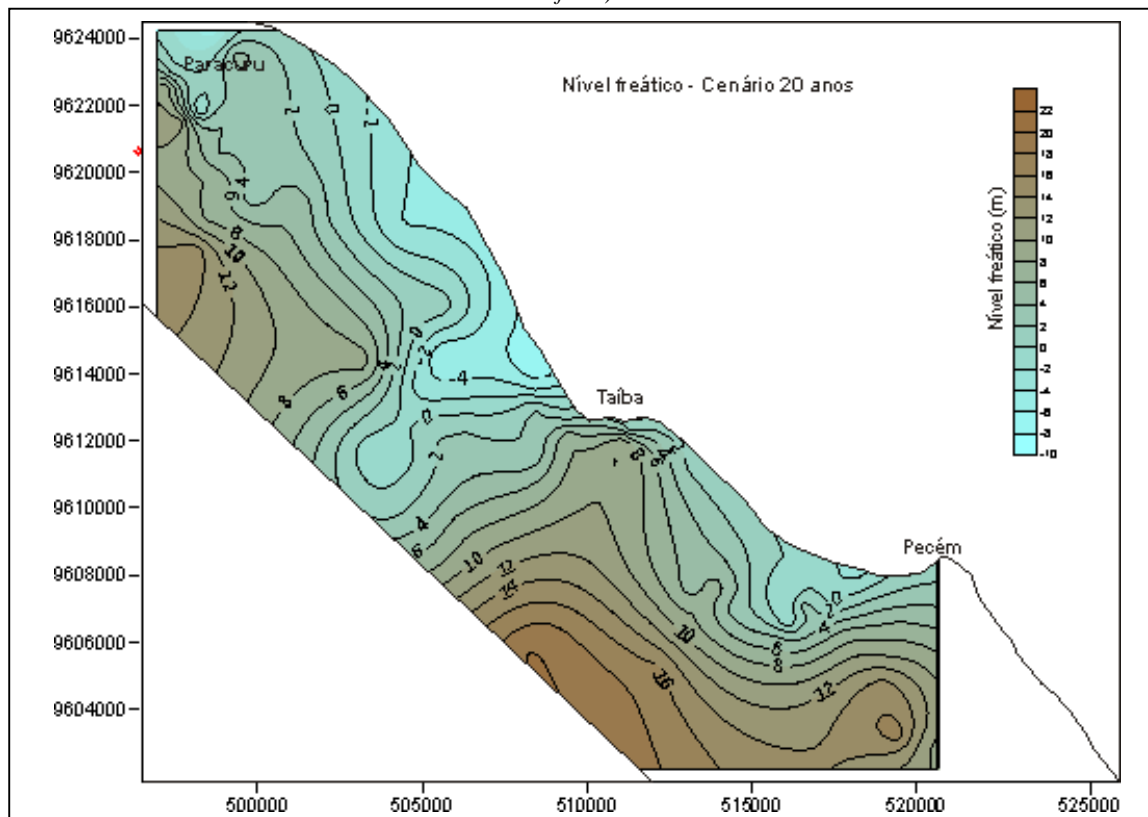
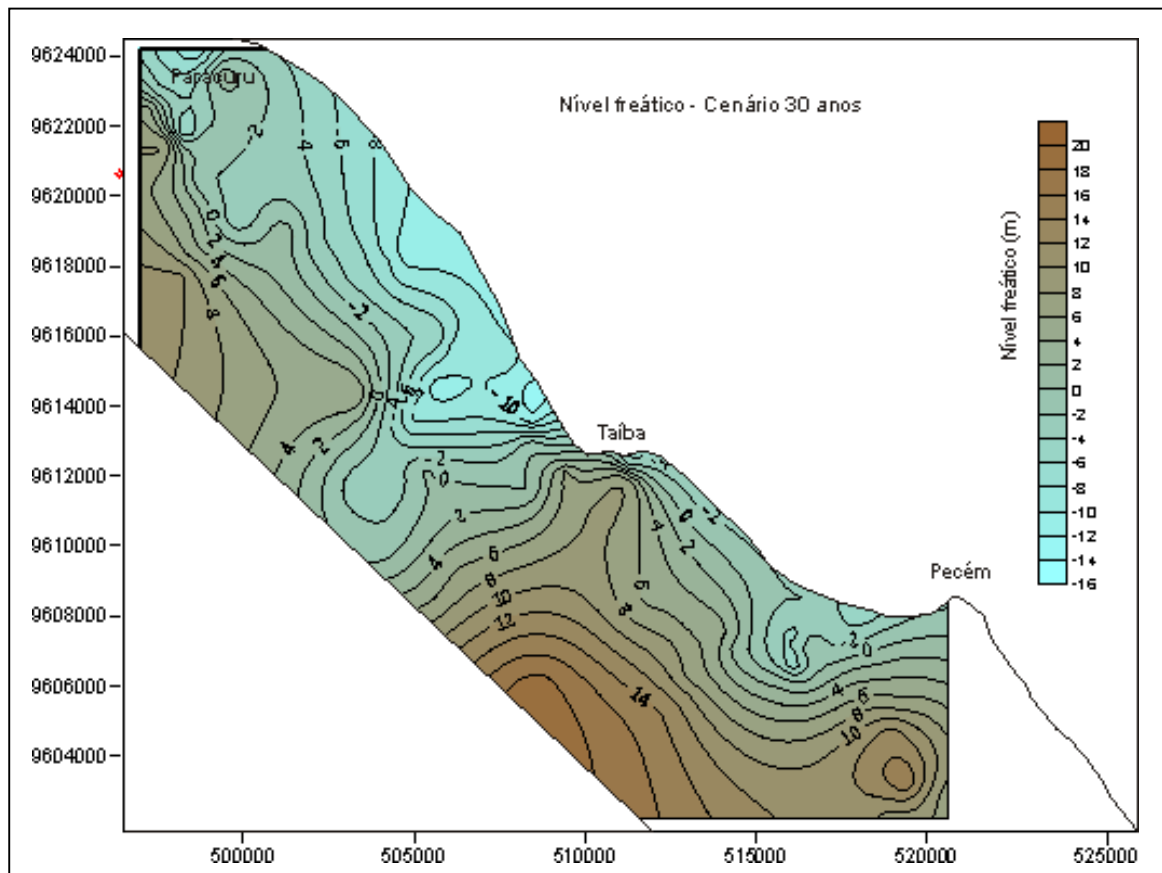


Figura 13 - Mapa de isolinhas para o comportamento do nível freático em cenário de 30 anos (interface gráfica do Surfer 9)



6. Hidrogeologia

6.1. Aquífero Dunas/Paleodunas

As características hidrogeológicas de uma região estão diretamente relacionadas às condições geológicas das rochas presentes e aos fatores climáticos atuantes.

A aplicação do estudo em questão é direcionada ao sistema aquífero Dunas/Paleodunas presente em larga escala na costa cearense. Associado a este importante sistema estão presentes ainda as unidades da Formação Barreiras e o domínio fissural composto pelas rochas fraturadas do embasamento cristalino (Figura 14).

As dunas e paleodunas constituem as unidades geológicas de maior potencialidade aquífera da Região Metropolitana de Fortaleza (Brandão, 1995). Avaliações realizadas com base em análises químicas de águas subterrâneas do município de Fortaleza, mostraram que 85% das águas do Sistema Dunas/Paleodunas são cloretadas (70% sódicas e 30% mistas tendendo a

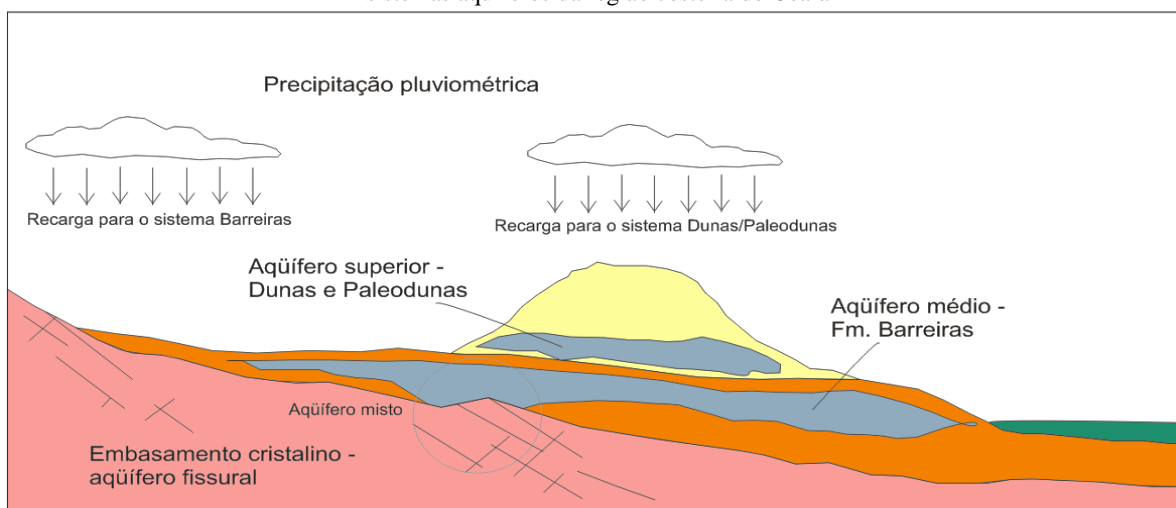
sódicas). Análises de potabilidade revelaram qualidade predominantemente boa (63%) para o consumo humano (Brandão, 1995).

Na área em estudo as pesquisas serão direcionadas ao sistema aquífero superior representado pelo Sistema Dunas/Paleodunas, os quais se comportam como aquífero livre.

As dunas e paleodunas são compostas por sedimentos arenosos inconsolidados que, juntamente com topo da unidade subjacente, constituem um aquífero raso que tem como principal fonte de recarga a contribuição direta das chuvas (Lisboa, 2002). Neste contexto a Formação Barreiras representa uma unidade de permeabilidade reduzida e compõe a base do aquífero Dunas/Paleodunas. A recarga para o sistema barreiras pode ocorrer em áreas mais elevadas com fluxo hídrico em direção à costa, ou ainda pode ser abastecido por excesso de carga hidráulica presente no Sistema Dunas/Paleodunas associada a condições satisfatórias de porosidade e permeabilidade da rocha do Sistema Barreiras, permitindo assim o acúmulo de água subterrânea e consequente formação do sistema aquífero médio (Sistema Barreiras) (Figura 14).

O Sistema Dunas/Paleodunas é também caracterizado pela presença numerosa de lagoas intermitentes. Nos períodos de chuvas, com a elevação da cota da superfície piezométrica, o aquífero assume um caráter efluente, contribuindo para o aumento do volume de águas das lagoas e riachos. Essa condição é perfeitamente compreendida quando se observam as diferenças de cotas (< 1 metro) entre os níveis estáticos de cacimbas e de poços tubulares, em relação ao da superfície das lagoas e riachos localizados próximo ao ponto observado (Lisboa, 2002).

Figura 14 – Ilustração em perfil esquemático das condições de ocorrência e circulação da água subterrânea nos sistemas aquíferos da região costeira do Ceará



6.2. Inventário hidrogeológico

Uma das formas mais eficientes de obter informações de caráter hidrogeológico é através da elaboração do que se denomina Inventário Hidrogeológico. Neste sentido elaborou-se um cadastro de poços tubulares rasos e profundos, poços do tipo amazonas (cacimbões) e lagoas (representam a exposição do lençol freático) para comporem fonte de informação extremamente importante no que se refere às condições de ocorrência e circulação da água subterrânea na região. No cadastro elaborado constam as seguintes informações: identificação do ponto d'água, dados hidrogeológicos, dados construtivos, dados de bombeamento, qualidade da água, parâmetros físico-químicos *in loco*, possíveis fontes de poluição, situação atual. Cadastrou-se 160 unidades de informação e como metodologia de trabalho, adotaram-se nesta etapa as seguintes ações:

- Pesquisa em fontes pré-existentes de unidades já cadastradas (SIAGAS e Cogerh).
- Estabelecimento de distância mínima entre poços a serem cadastrados com finalidade de proporcionar uma melhor distribuição da informação ao longo da área.
- Prioridade para cadastro de unidades em bom estado de conservação, para que possam fornecer informações consistentes e confiáveis. Poços obstruídos foram descartados devido à impossibilidade de medição de nível e coletas para obtenção dos parâmetros físico-químicos.

As tabelas 1, 2, 3, 4 e 5 em anexo reúnem todas as informações constantes no cadastro.

Todas as unidades cadastradas foram georreferenciadas e plotadas em mapa para visualização de sua distribuição espacial. O mapa de pontos d'água cadastrados na área de pesquisa está apresentado no anexo 2.

6.3. Piezometria

O estudo da piezometria na área foi aplicado para fornecer informações sobre o comportamento dos níveis freáticos, concluindo sobre suas interações com os diferentes planos de informação do meio físico (geologia, solos e geomorfologia). A piezometria consiste em avaliar o comportamento da superfície freática ao longo do tempo, auxiliando principalmente na definição das linhas de fluxo subterrâneo.

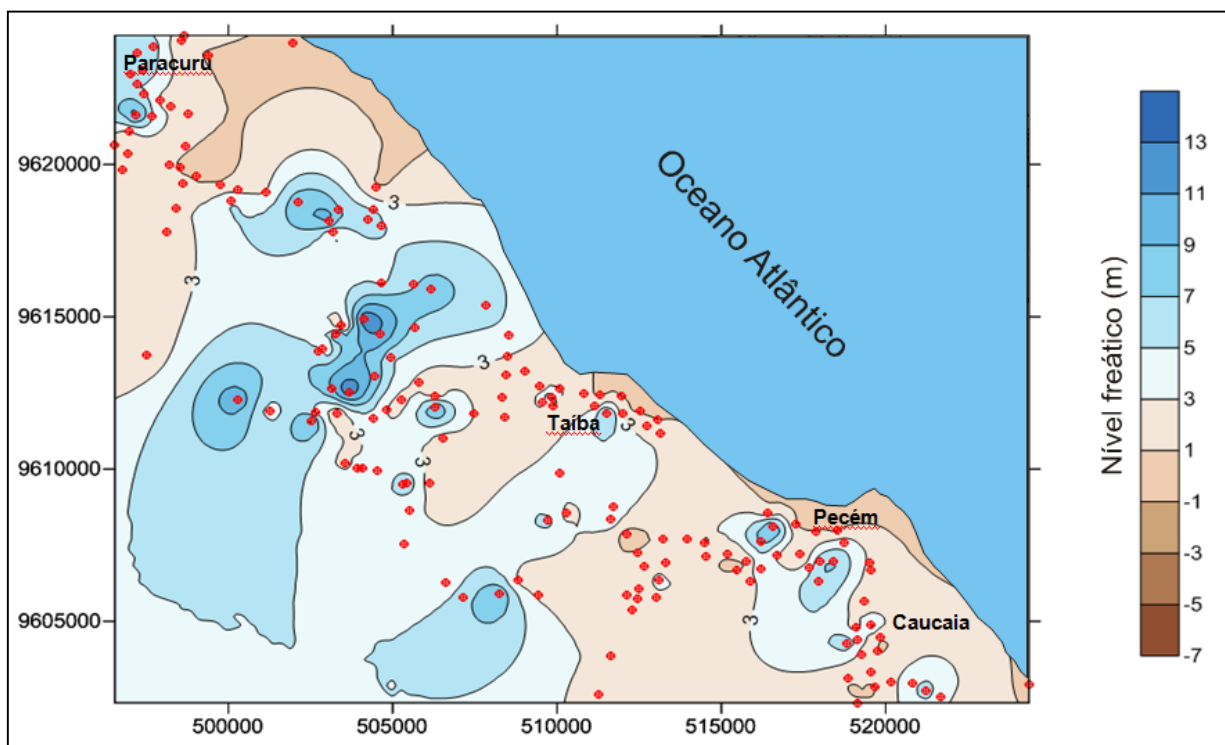
A análise sobre a piezometria na área será realizada a partir dos valores de altimetria e seguirá a seguinte metodologia:

- Seleção dos poços com maior representatividade da região em estudo.
- Nivelamento dos poços com GPS geodésico.
- Realização de medida dos níveis estáticos quando da execução do levantamento planialtimétrico.

- Realização de medida das alturas de boca de todos os poços levantados.
- Medida de níveis estáticos para identificação de suas variações ao longo no período.

Durante o cadastro dos poços na região, que ocorreu de 12 a 30 de julho (final do período chuvoso), foram obtidos os níveis estáticos de todas as unidades cadastradas. A partir desses dados elaborou-se um mapa prévio para avaliação do comportamento da superfície freática da região (Figura 15). Para tanto se utilizou o programa *Surfer Versão 9*, da *Golden Software*. Este programa fornece informações sob a forma de mapas de isolinhas. Para uma avaliação prévia das condições piezométricas interpolou-se os valores dos níveis estáticos detectados nos poços cadastrados. O mapa resultante está apresentado na figura 15. Em avaliação prévia pode-se identificar um padrão onde os níveis freáticos mais profundos apresentam-se na porção oeste da área pesquisada, atingindo valores de até 13 metros de profundidade. Na porção leste da área os níveis apresentam-se mais rasos, da ordem de 1 a 7 metros de profundidade.

Figura 15 – Mapa de isolinhas para os valores dos níveis freáticos medidos nos poços cadastrados na área de pesquisa. Os pontos vermelhos são os poços cadastrados



6.3.1. Mapa Piezométrico

Através da elaboração de um mapa piezométrico é possível o conhecimento de zonas de descarga, recarga e sentido do fluxo subterrâneo em um aquífero (Lucena, *et al.* 2004), principalmente quando se trata de aquíferos livres e rasos. Assim, a disponibilidade desta informação representa uma condição essencial para a elucidação do funcionamento hidrodinâmico dos aquíferos estudados.

O estudo em apreço compreendeu os procedimentos clássicos aplicados na elaboração de um mapa piezométrico para a área selecionada. O mapa piezométrico está apresentado na figura 16.

A potenciometria do aquífero livre representado pelo sistema Dunas/Paleodunas evidenciou a zona de recarga associada aos altos topográficos, enquanto que a zona de descarga é compreendida pela região do baixo curso do rio Siupé. Os gradientes hidráulicos apresentam-se relativamente maiores nas zonas de recarga do aquífero.

A área pesquisada evidencia uma ampla relação entre os mananciais subterrâneos e superficiais, sendo que, segundo a potenciometria, o aquífero nitidamente exerce sua descarga na principal drenagem presente na área, representada pelo rio Siupé, caracterizando o curso de água como efluente no trecho considerado.

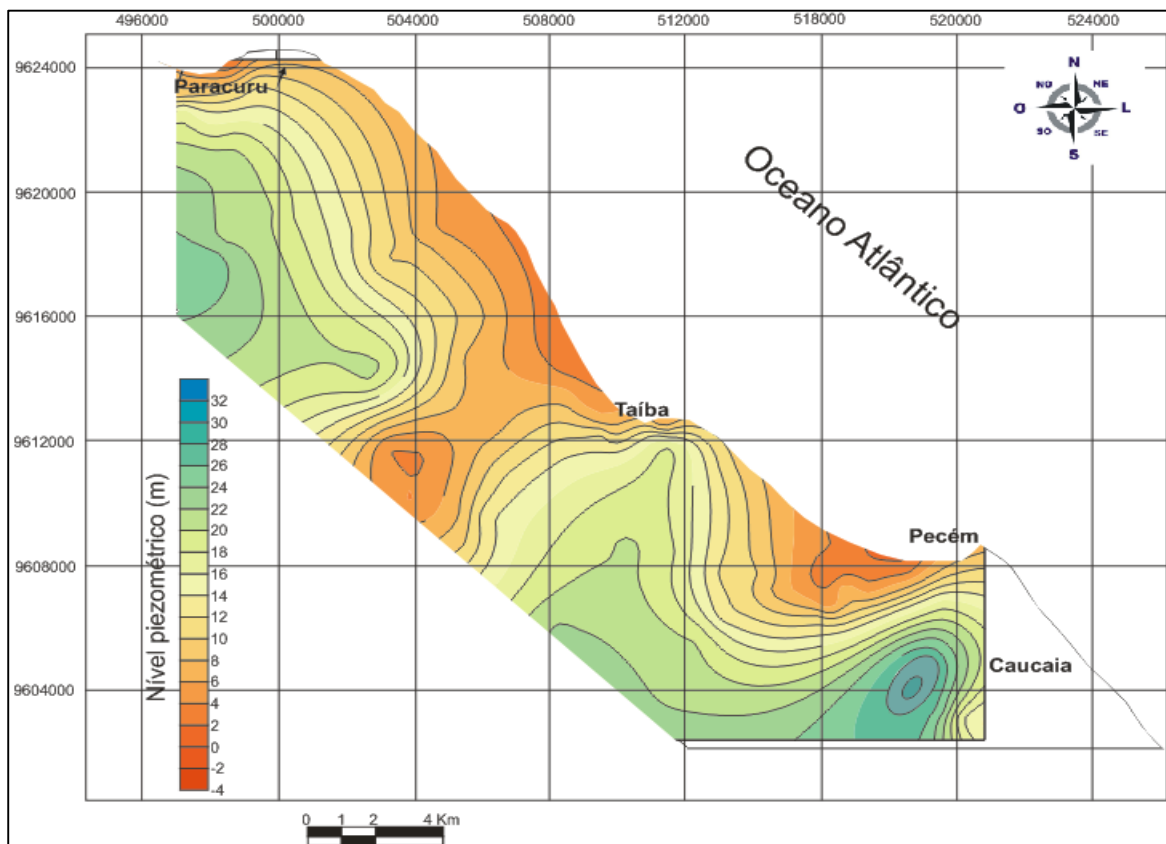
As cotas piezométricas na área têm valores médios que variam de 2 a 30 m. Esses dados indicam a grande variabilidade de cotas do aquífero livre na área, algumas praticamente ao nível do mar. Podem ainda ser abordadas as profundidades rasas para os níveis freáticos verificados em muitos dos poços levantados, indicando sua tendência em aflorar quando da estação das chuvas. Fato que ocorre nas lagoas presentes, as quais representam uma exposição do nível freático da região quando se encontra em sua carga hidráulica máxima.

Existe na região um aproveitamento intenso do recurso hídrico subterrâneo, seja por captação em poços tubulares ou do tipo amazonas, ou ainda, através de captações diretas instaladas nas várias lagoas que expõem o nível freático à superfície.

As condições de exploração nas lagoas interdunares devem ser tratadas com critérios que possam promover a estabilidade deste ambiente. Nessas situações existem riscos que podem estar associados à exploração inadequada, superiores a demanda do aquífero, ou ainda, no que se refere à poluição das águas, pois os espelhos das lagoas representam o acesso direto para o aquífero Dunas/Paleodunas em estudo. Interferências na estabilidade destas águas por aporte de contaminantes pode acarretar na dispersão dos

mesmos por todo o aquífero condicionados ao fluxo subterrâneo.

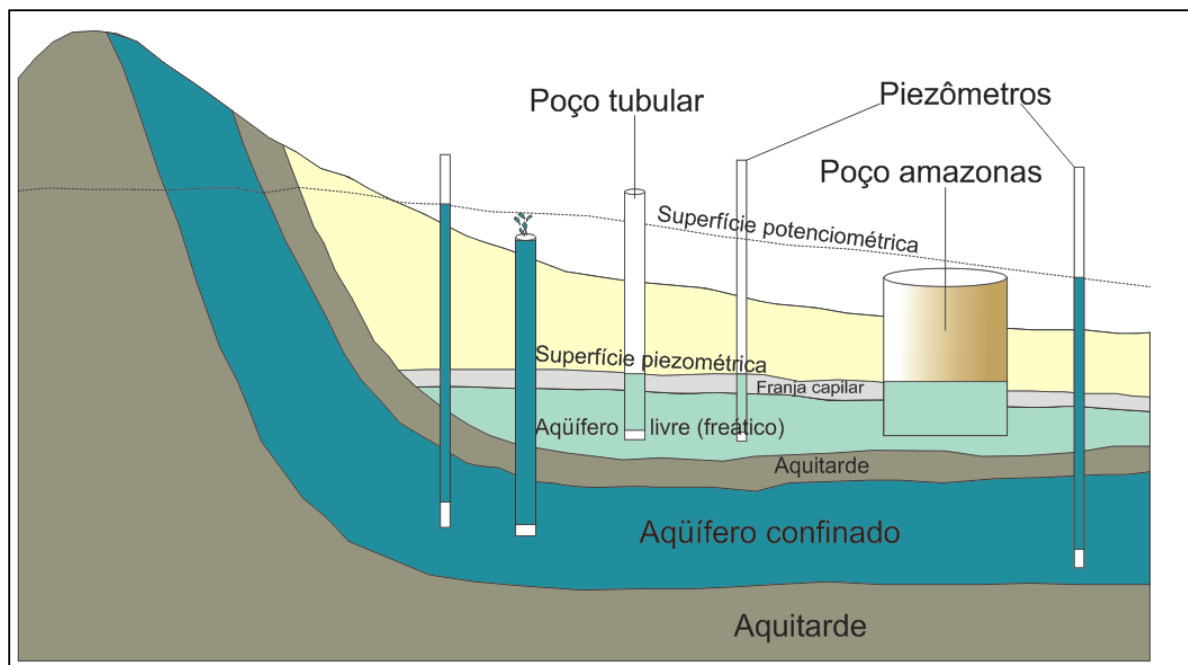
Figura 16 – Mapa piezométrico da região de campo de Dunas/Paleodunas situado entre as cidades de Pecém e Paracuru, área objeto do presente estudo



6.4. Fluxo subterrâneo

A elaboração de mapas de fluxo faz parte de uma rotina em estudos hidrogeológicos quando se investiga as formas de circulação da água subterrânea. A superfície que representa o nível de pressão (carga) do aquífero é chamada de superfície piezométrica. Para aquíferos confinados, submetidos a elevadas pressões pode-se utilizar o termo superfície potenciométrica. Os níveis piezométricos podem ser obtidos através de unidades de medição denominadas piezômetros. Poços tubulares e do tipo amazonas com profundidades que interceptam o nível freático também podem funcionar como unidades de medidas, os quais são comumente presentes na área de estudo. A Figura 17 ilustra o posicionamento de piezômetros poços e cacimbões que podem fornecer informações sobre os níveis piezométricos em aquíferos livres (área estudada) e confinados.

Figura 17 – Ilustração esquemática das unidades que funcionam como auxílio às medidas dos níveis piezométricos (piezômetros, poços tubulares e poços tipo amazonas) em associação com os diferentes ambientes aquíferos (livre e confinado)



A instalação de piezômetros em diferentes pontos e a profundidades específicas para o aquífero estudado permite mapear as variações de carga piezométrica, a partir das quais podem ser traçadas linhas de igual carga ou potencial piezométrico, denominadas linhas equipotenciais. Entre pontos de alta e baixa carga piezométrica, ocorrem os fluxos d'água subterrâneos, composto por vetores que fazem ângulos retos com as linhas equipotenciais. O mapa de fluxo apresenta linhas (setas) que indicam a trajetória da água subterrânea e as linhas equipotenciais representam estados de igual energia potencial.

6.4.1. Metodologia para elaboração do mapa de fluxo

O mapa de fluxo é obtido com base nos valores dos níveis estáticos (freáticos para o aquífero livre em questão) e da altimetria. Inicialmente realizou-se um amplo cadastro de poços na área selecionada e algumas destas unidades (poços) foram submetidas a um nivelamento topográfico. As cotas altimétricas e coordenadas UTM obtidas por GPS no modo diferencial, foram pós-processadas com a finalidade de atingir precisão máxima.

A metodologia para elaboração do mapa de fluxo foi:

1. Seleção dos poços de medição.

2. Obtenção das coordenadas UTM dos poços selecionados através de posicionamento geográfico com GPS diferencial.
3. Obtenção de cotas altimétricas através de nivelamento topográfico com GPS diferencial.
4. Medição dos níveis estáticos nos poços selecionados.
5. Medição das alturas das bocas dos poços (distância do topo do poço – tampa – ao nível do solo) selecionados.
6. Subtração dos valores das alturas de bocas em relação aos níveis estáticos medidos (NE – altura de boca) para obtenção das distâncias reais entre a superfície do terreno e os níveis freáticos.
7. Subtração dos valores dos níveis freáticos reais em relação às cotas altimétricas obtidas em cada poço, para obtenção das cotas piezométricas (relativas ao nível do mar).
8. Interpolação dos valores das cotas altimétricas com auxílio do Software Surfer 9.0 para obtenção do mapa piezométrico (Figura 16).
9. Elaboração do mapa de vetores com base nos dados das cotas piezométricas obtidos com o auxílio do *Software Surfer 9.0*. O resultado representa o mapa de fluxo da área (Figura 17).

Os dados levantados para a elaboração do mapa de fluxo estão apresentados na tabela 6. A Figura 18 apresenta uma relação entre as variações das cotas altimétricas (Figura 18a) e piezométrica (Figura 18b). Onde se pode identificar uma equivalência entre a variação topografia e a do nível piezométrico. Nas áreas topograficamente mais elevadas (dunas) os níveis piezométricos também se mostram a altitudes mais elevadas (da ordem de 30m). Nas áreas de depressões, representadas pelas calhas das principais drenagens, os níveis piezométricos apresentam suas altitudes menores (da ordem de 2m). O mapa de fluxo gerado está apresentado na figura 17. Através de aplicativo do *Software Surfer 9.0* foi possível a elaboração de uma superfície 3D que ilustra a variação das cotas piezométricas com a representação dos sentidos do fluxo subterrâneo (Figura 19). Nesse produto é possível identificar claramente o fluxo descendente em direção às drenagens fluviais, bem como em direção ao nível do mar.

Figura 17 – Mapa de fluxo da região de campo de Dunas/Paleodunas situado entre as cidades de Pecém e Paracuru, área objeto do presente estudo

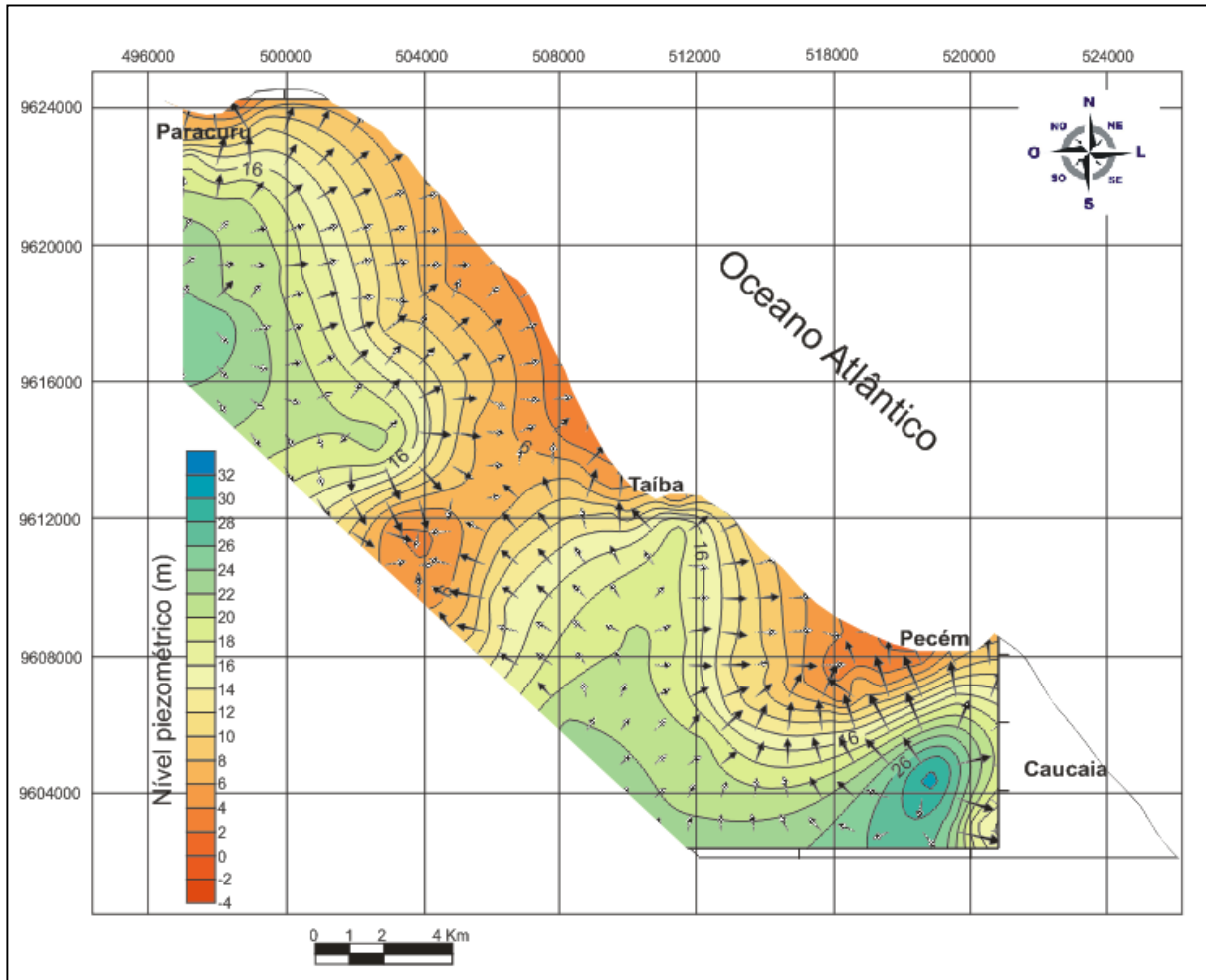


Figura 18 – Superfícies 3D representativas das superfícies topográficas (a) e piezométricas (b).

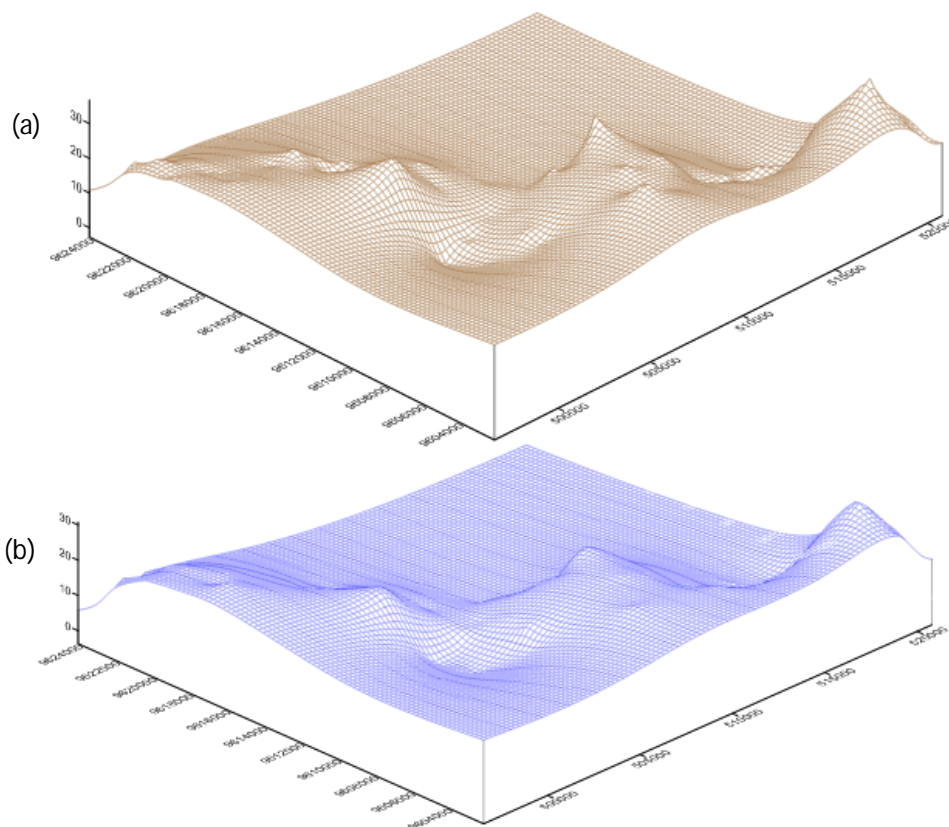


Figura 19 – Superfície 3D que ilustra a variação das cotas piezométricas com a representação dos sentidos do fluxo subterrâneo

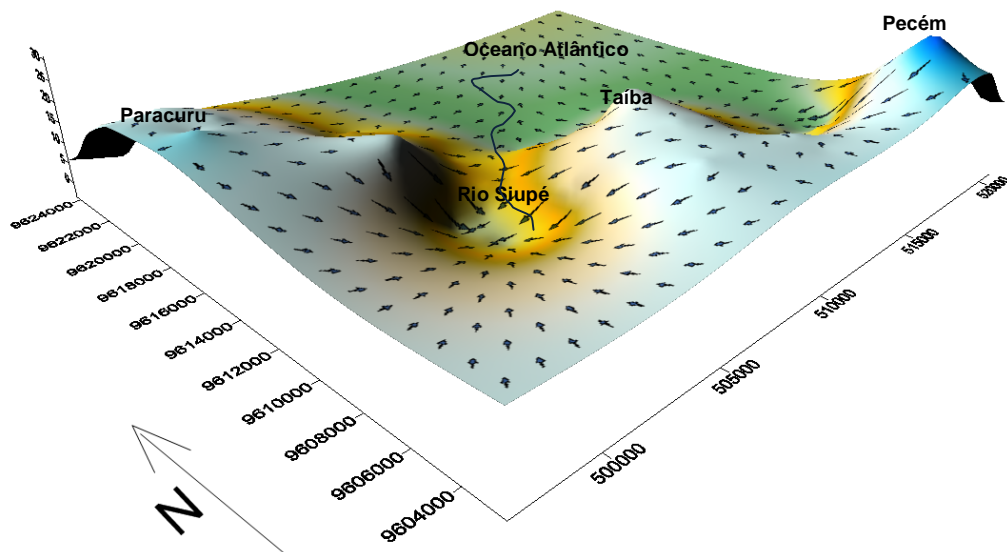


Tabela 7 - Pontos (poços) selecionados e dados obtidos através dos levantamentos altimétrico (coordenadas UTM e altitude) e hidrogeológico (níveis estáticos e alturas de bocas)

	UTM (N)	UTM (E)	Alt (m)	N.E. (m)	Alt. Da boca (m)	NE final (m)	Piezometria (m)
PN01	9612337.225	508324.921	11.492	1.21	0.62	0.59	10.902
PN99	9613068.694	508456.452	9.985	2	0.28	1.72	8.265
PN104	9612703.778	509473.696	8.468	2.27	0.36	1.91	6.558
PN158	9612359.168	509844.871	12.686	4.4	0.23	4.17	8.516
PN160	9612184.812	509564.22	15.523	3.75	0.44	3.31	12.213
PN159	9612042.694	509902.012	11.550	1.1	0.21	0.89	10.660
PN106	9612465.965	510820.143	11.932	2	0.14	1.86	10.072
PN156	9611825.195	512017.828	17.255	1.45	0.18	1.27	15.985
PN111	9611153.613	513150.807	13.478	2.56	0.18	2.38	11.098
PN157	9612065.652	511155.917	17.208	1.6	0.12	1.48	15.728
PN113	9611826.008	511529.567	26.359	8.6	0.17	8.43	17.929
PN100	9613691.523	508494.539	8.759	2.97	0.15	2.82	5.939
PN101	9614390.112	508548.259	7.231	4.5	0	4.5	2.731
PN102	9615377.598	507844.29	9.142	5.8	0.1	5.7	3.442
PN103	9613207.061	509042.308	6.828	1.5	0.24	1.26	5.568
PN76	9611712.079	508412.153	13.919	1.68	0.93	0.75	13.169
PN73	9612389.787	506309.441	8.630	1.66	0.19	1.47	7.160
PN70	9612264.109	505261.535	9.247	2.14	0.3	1.84	7.407
PN71	9611941.128	504816.82	7.340	2.6	0.25	2.35	4.990
PN72	9611647.514	504410.159	8.430	4.5	0.17	4.33	4.100
PN68	9610996.183	506522.385	12.739	1.7	0.18	1.52	11.219
PN67	9609522.085	506127.51	14.881	1.78	0.26	1.52	13.361
PN05	9608537.014	510276.622	22.559	2.25	0.085	2.165	20.394
PN04	9608319.236	509737.735	25.353	5.73	0.21	5.52	19.833
PN62	9606328.81	508832.55	23.522	2.35	0.19	2.16	21.362
PN64	9605885.178	508256.325	31.068	9	0.36	8.64	22.428
PN66	9608651.259	505517.123	13.001	3.29	0.16	3.13	9.871
PN77	9609517.719	505466.711	14.722	6.57	0.28	6.29	8.432
PN79	9610037.416	503914.007	7.900	4.3	0.22	4.08	3.820
PN84	9613651.276	504949.631	14.541	5.26	0.19	5.07	9.471
PN80	9611804.713	503301.064	4.126	0.1	0.9	0.1	4.026
PN81	9610699.905	503553.53	6.584	2.12	0.05	2.07	4.514
PN118	9617759.502	503191.278	12.303	2.59	0.14	2.45	9.853
PN130	9618189.669	504262.263	15.658	6.5	0.22	6.28	9.378
PN128	9618507.004	504391.514	11.123	5	0.2	4.8	6.323
PN127	9618488.856	503343.395	17.205	7	0.2	6.8	10.405
PN98	9617994.732	504652.896	13.253	5.2	0.22	4.98	8.273
PN133	9618727.296	502145.068	22.898	8.79	0.16	8.63	14.268
PN126	9619059.151	501167.155	19.049	2.8	0.33	2.47	16.579
PN125	9619170.557	500287.35	20.492	2.18	0.14	2.04	18.452
PN96	9619346.002	499758.801	21.319	1.1	0.28	0.82	20.499

	UTM (N)	UTM (E)	Alt (m)	N.E. (m)	Alt. Da boca (m)	NE final (m)	Piezometria (m)
PN95	9619594.254	499039.644	21.195	0.5	0.42	0.08	21.115
PN122	9619363.477	498603.969	23.102	2	0.3	1.7	21.402
PN134	9619876.89	498562.998	21.839	0.7	0.3	0.4	21.439
PN143	9624263.652	498665.247	4.344	2.5	0	2.5	1.844
PN144	9624051.892	498580.535	3.371	0.6	0	0.6	2.771
PN145	9623558.539	499389.717	12.327	0.9	0.1	0.8	11.527
PN119	9620628.276	496548.611	24.204	1.64	0.22	1.42	22.784
PN120	9620343.294	496959.262	23.726	1.1	0.1	1	22.726
PN121	9619811.147	496794.85	25.840	2.57	0.2	2.37	23.470
PN155	9621561.67	497672.466	24.488	5	0.2	4.8	19.688
PN153	9621908.6	498253.685	18.242	2.5	1.5	1	17.242
PN154	9621649.171	498803.663	20.827	2	0.6	1.4	19.427
PN152	9622082.874	497915.12	18.809	2.5	0.14	2.36	16.449
PN150	9622628.956	497230.643	21.661	4.65	0.2	4.45	17.211
PN147	9623087.582	497393.465	16.255	7	0.26	6.74	9.515
PN149	9622970.424	497016.41	15.853	5.64	0.3	5.34	10.513
PN135	9620592.688	498713.344	22.603	1.26	0	1.26	21.343
PN123	9618558.7	498419.815	24.027	2.76	0.17	2.59	21.437
PN124	9617789.389	498142.755	26.470	1.4	0.17	1.23	25.240
PN137	9614421.674	503288.577	28.571	9	0.1	8.9	19.671
PN138	9613872	502757.548	26.351	6.5	0.14	6.36	19.991
PN117	9614632.671	505664.119	13.452	6.5	0.4	6.1	7.352
PN115	9616070.046	505645.741	15.852	6.7	0.12	6.58	9.272
PN116	9615898.575	506166	15.595	8.25	0.48	7.77	7.825
PN06	9608365.819	511635.309	22.876	4.7	0.1	4.6	18.276
PN07	9607231.983	512456.007	15.944	1.23	0.11	1.12	14.824
PN09	9603867.833	511650.820	24.217	2.9	0.13	2.77	21.447
PN15	9605392.284	512288.987	21.404	1.31	0.13	1.18	20.224
PN17	9605776.584	513035.519	18.527	2.34	0.19	2.15	16.377
PN13	9606057.959	512504.469	18.673	1.34	0.19	1.15	17.523
PN19	9606359.918	513125.356	16.638	4	0.07	3.93	12.708
PN18	9606903.75	513330.482	12.800	1.19	0.28	0.91	11.890
PN20	9607116.127	514521.335	8.748	1.35	0.46	0.89	7.858
PN59	9607589.181	514483.743	11.994	3.2	0.21	2.99	9.004
PN60	9607704.032	513975.701	11.385	1.4	0.5	0.9	10.485
PN61	9607703.53	513232.14	11.996	1.23	0.02	1.21	10.786
PN43	9603004.461	520164.651	17.844	2.45	0.38	2.07	15.774
PN44	9602948.499	520804.116	17.687	4.32	0.15	4.17	13.517
PN41	9602324.55	519134.915	26.424	1.14	0.06	1.08	25.344
PN37	9603912.624	519273.328	29.507	2	0.32	1.68	27.827
PN38	9603325.507	519550.736	27.587	2.9	0.26	2.64	24.947
PN34	9604282.413	518831.411	37.062	6.47	0.3	6.17	30.892
PN33	9604790.903	519106.521	30.725	1.7	0.45	1.25	29.475

	UTM (N)	UTM (E)	Alt (m)	N.E. (m)	Alt. Da boca (m)	NE final (m)	Piezometria (m)
PN32	9607566.405	518729.561	9.737	4.2	0.26	3.94	5.797
PN26	9607163.577	516704.911	9.939	2.5	0.1	2.4	7.539
PN25	9607623.716	516207.427	10.173	7.65	0.1	7.55	2.623
PN21	9606709.482	516217.355	9.383	5.27	0.06	5.21	4.173
PN23	9606312.917	515895.778	12.531	2.35	0.3	2.05	10.481
PN57	9608540.561	516399.122	5.505	1.65	0.14	1.51	3.995
PN107	9612442.957	511373.104	7.585	0.6	0	0.6	6.985
PN22	9607193.407	515179.805	6.614	1.12	0.38	0.74	5.874
PN51	9608200.039	517262.011	3.015	0.94	0.07	0.87	2.145
PN52	9607940.826	517883.481	1.86			0	
PN27	9607206.664	517394.375	4.918	0.58	0.3	0.28	4.638
PN30	9606317.144	517952.835	21.097	7	0.4	6.6	14.497
ESP 56	9606905.533	519510.347	15.291			0	15.291
PN53	9606688.484	519566.478	18.957	2.12	0.43	1.69	17.267
PN42	9605643.069	519337.553	24.584	1.05	0.39	0.66	23.924

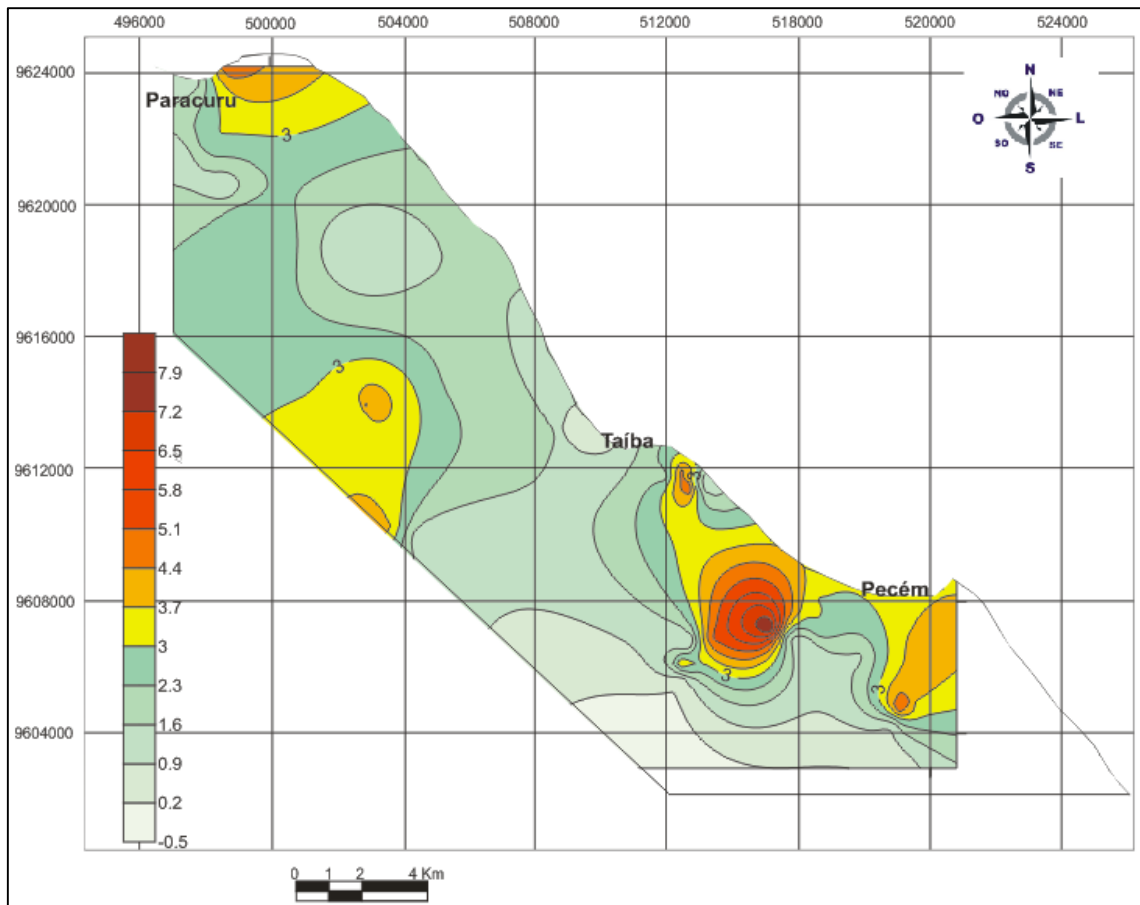
6.5. Avaliação das vazões dos poços

Através do inventário dos poços foi possível uma avaliação quanto à vazão produzida pelos poços. Salienta-se, porém que os dados obtidos foram informados pelos responsáveis dos poços ou através de testes de vazão simplificados. Dessa forma, utilizaram-se estes dados para inferências a respeito do potencial hídrico da região.

Em análise dos dados de vazão cadastrados no inventário, pode-se elaborar um mapa de isolinhas (Figura 20) para os valores de vazão (m^3/h) com o objetivo de identificar previamente zonas mais produtivas. Pode-se verificar através do mapa gerado que as vazões produzidas pelos poços atingem valores de até $8 m^3/h$. Para esta avaliação eliminou-se uma unidade que apresentou vazão anômala (poço PN16 apresentou vazão de $80 m^3/h$), no sentido de tornar a distribuição dos valores mais homogênea ao longo da área, o que acarreta um processo de interpolação mais coerente e menos tendencioso. Em síntese identificou-se em avaliação prévia que as vazões mais promissoras concentram-se na porção leste da área, com poços que produzem de 2 a $8 m^3/h$. Na porção oeste da área estão presentes os poços com vazões mais reduzidas, de 2 a $4 m^3/h$. Quanto às características dos poços observou-se que a grande maioria é tubular revestido com PVC. Além destes existem poços do tipo Amazonas revestidos com anéis de cimento, ou ainda construção mista, utilizando os dois materiais (anéis de cimento e tubos de PVC). Foram cadastrados 6 espelhos d'água e 154 poços. As profundidades dos poços são variadas, onde a grande maioria não atinge profundidades superiores a 15 metros. Dos 154 poços cadastrados apenas 6 possuem

profundidades entre 16 e 56 metros. Conclui-se que a exploração da água subterrânea ocorre em aquíferos relativamente rasos, associados ao domínio hidrogeológico das Dunas/Paleodunas.

Figura 20 – Mapa de isolinhas para os valores das vazões (m^3/h) registradas nos poços cadastrados



6.5.1. Condições atuais do abastecimento

São Gonçalo do Amarante

O Município de São Gonçalo do Amarante possui sistema de abastecimento de água operado pela CAGECE que beneficia a área urbana do Distrito de Pecém e a sede do Município, porém apenas 25% da população total do município é atendida.

O sistema de abastecimento de água da cidade de São Gonçalo do Amarante utiliza manancial subterrâneo com tomada de água de nove poços tubulares instalados na localidade da Lagoa das Cobras, no distrito de Taíba, e de uma elevatória de água bruta dotada de sistema eletro-vácuo com conjunto centrífugo horizontal que apresenta capacidade de vazão de 60 m^3/h . A

água é bombeada para o conjunto de armazenamento com capacidade de 120 m³ onde é feito o tratamento da água. A adutora de água tratada possui diâmetro de 200 milímetros, extensão de 12.500 metros com material PVC/Aço (Banco do Nordeste, PRODETUR/NE II).

A captação do sistema de abastecimento de água de Pecém é feita utilizando-se poços tubulares localizados junto à lagoa do Pecém, onde é feita a filtração e a cloração. A água captada é considerada de boa potabilidade. As figuras 21, 22 e 23 mostram o conjunto de armazenamento, a lagoa de captação e a ETA na lagoa do Pecém, respectivamente.

Figura 21 – Conjunto de armazenamento no Distrito de Pecém



Figura 22 – Lagoa de captação de água no Distrito de Pecém



Figura 23 – ETA junto à lagoa de captação no Distrito de Pecém



O Município de São Gonçalo do Amarante possui pequena infra-estrutura de saneamento básico, porém, o Complexo Industrial e Portuário do Pecém irá gerar um grande contingente de serviços e ser um fator gerador de desenvolvimento e urbanização da região (Banco do Nordeste, PRODETUR/NE II).

O complexo inclui a instalação de uma siderúrgica, um pólo metal-mecânico, uma usina termo-elétrica, distritos industriais, uma estação de recepção e medição de gás, um pólo de transportes e serviços e um pólo de derivados de petróleo e gás liquefeito.

A localidade de Taíba e região portuária possuem abastecimento de água de poços ou cacimbas e apresenta potabilidade duvidosa pela ausência de rede de esgotamento sanitário, e existência, nessa área, de grande número de fossas que podem contaminar as águas subterrâneas. Taíba, pelo fato de localizar-se ao lado do futuro Complexo Industrial e Portuário, apresentará uma urbanização acentuada nos próximos anos (Banco do Nordeste, PRODETUR/NE II).

Paracuru

O Município de Paracuru possui sistema de abastecimento de água que atende toda a área urbana da sede e praia do Município.

O abastecimento de água de Paracuru é feito através de manancial superficial, com captação na Lagoa Grande, por meio de um flutuador com elevatória dotada de conjunto centrífugo horizontal, capacidade de vazão de 80 m³/h, do qual a água é bombeada para um reservatório apoiado, com capacidade de armazenamento de 200 m³. A potabilidade da água é

considerada boa para o consumo. A partir da ETA, a água é novamente bombeada da elevatória de água tratada equipada com dois conjuntos centrífugos horizontais com capacidade de vazão de 80 m³/h, para o sistema adutor com extensão de 1.570 metros. O reservatório de distribuição é do tipo elevado, com capacidade de 200 m³, e a rede de distribuição de água possui extensão total de 30.868 metros (Banco do Nordeste, PRODETUR/NE II).

As figuras 24, 25 e 26 mostram a captação de água na Lagoa Grande, a elevatória e reservatório; e, filtros no local de captação, todos em Paracuru, respectivamente.

Figura 24 – Captação de água na Lagoa Grande, em Paracuru



Figura 25 – Elevatória de água tratada e reservatório em Paracuru



Figura 26 – Filtros no local de captação de água bruta, em Paracuru



6.6. Exploração da água subterrânea

O Sistema Dunas/Paleodunas presentes ao longo da costa são de grande importância em termos hidrogeológicos. São ambientes de grande porosidade e permeabilidade, o que confere ao sistema uma excelente condição aquífera. Em síntese, o sistema é bom acumulador e transmissor da água subterrânea.

Para a região estudada, uma faixa litorânea que se estende do Pecém à cidade de Paracuru, o referido sistema aquífero possui ainda maior importância em decorrência das lagoas existentes na área. Estas lagoas possuem elevado potencial hídrico e são utilizadas como fonte de abastecimento para a cidade de Paracuru e para o distrito de Pecém, além de suportar a demanda hídrica necessária à Petrobras e ao complexo industrial e portuário do Pecém. Mesmo com intensa exploração não se identificou um rebaixamento significativo dos níveis das águas nessas lagoas, no entanto é necessária uma avaliação mais detalhada através de medições das cotas dos espelhos d'água dessas lagoas ao longo de séries históricas mais amplas, promovendo a possibilidade de avaliação das oscilações dos níveis em função das taxas de precipitação. A condição constatada de exploração da água subterrânea através das lagoas inseridas no Sistema Dunas/Paleodunas fornece subsídio para denotar um potencial aquífero extremamente elevado. As lagoas presentes na área representam uma exposição do nível freático em decorrência das respostas aos eventos de precipitação e conseqüente recarga dos mananciais subterrâneos. Dessa forma, estas unidades

devem ser controladas no que se refere aos volumes explorados e às condições ambientais, pois qualquer desequilíbrio pode refletir em impactos na unidade aquífera regional.

Verificam-se comumente na área de estudo complexos turísticos e casas de veraneios que são abastecidas através de poços tubulares rasos e profundos construídos para captar água do aquífero superior Dunas/Paleodunas. Com o crescimento acelerado da atividade turística aumenta também a necessidade do recurso hídrico para subsidiar os empreendimentos. Existe uma demanda fixa associada aos moradores locais e outra variável que se refere às casas de veraneio que são utilizadas esporadicamente. Em ambas as situações a água subterrânea é captada através de cacimbões, poços tubulares rasos e profundos construídos para consumo próprio. Exemplifica-se abordando o distrito de Taíba, que é totalmente abastecido por água subterrânea em decorrência da ausência de abastecimento da Cagece. Neste contexto é de extrema importância o conhecimento do potencial hídrico da região para que as reservas sejam utilizadas de forma racional, sem prejuízos ambientais quanto à contaminação da água e eliminando a possibilidade de exaustão do aquífero.

Para a avaliação prévia do potencial hídrico no sistema Dunas/Paleodunas foram utilizados dados de vazões obtidos em poços cadastrados, bem como suas condições de operação no que se refere ao tempo de bombeamento aplicado para cada poço. Os dados avaliados estão reunidos na tabela 7. Com a avaliação dos 47 poços que possuíam informações de vazões de produção, obteve-se um somatório de vazão de 8.654 m³/semana. Considerando-se que cada habitante gasta em média 150 litros de água por dia em suas atividades domésticas, pode-se inferir que o referido volume é suficiente para abastecer semanalmente uma cidade com aproximadamente 8.242 habitantes. Esta avaliação prévia corrobora a elevada potencialidade hídrica do sistema aquífero estudado.

Tabela 7 – Vazões de produção e condições de operação de alguns dos poços constantes no cadastro elaborado.

	POÇO	VAZÃO (m³/h)	Dias de bombeamento	Tempo de bombeamento (h/dia)	VAZÃO (m³/semana)
1	PN12	0.5	4	0.5	1.000
2	PN13	4.0	3	0.5	6.000
3	PN14	0.6	3	0.5	0.930
4	PN15	0.2	7	0.5	0.875
5	PN16	80	7	12.0	6.720.000
6	PN17	2.0	7	0.2	3.500
7	PN18	5.0	5	1.0	25.000
8	PN21	1.0	4	1.0	4.000
9	PN22	8.0	7	0.3	18.480
10	PN24	1.5	7	8.0	84.000
11	PN26	3.0	7	0.5	10.500

	POÇO	VAZÃO (m ³ /h)	Dias de bombeamento	Tempo de bombeamento (h/dia)	VAZÃO (m ³ /semana)
12	PN30	1.5	7	1.5	15.750
13	PN33	5.4	2	0.5	5.400
14	PN34	1.0	7	0.5	3.500
15	PN38	1.0	7	0.5	3.500
16	PN44	1.5	s/i	s/i	s/i
17	PN46	3.6	7	0.5	12.600
18	PN53	4.0	1	0.5	2.000
19	PN55	3.0	s/i	s/i	s/i
20	PN66	1.2	4	0.3	1.584
21	PN81	4.0	s/i	s/i	s/i
22	PN88	1.0	7	3.0	21.000
23	PN95	3.0	3	0.3	2.970
24	PN97	3.0	s/i	s/i	s/i
25	PN99	2.0	5	0.5	5.000
26	PN103	0.5	1	1.0	0.500
27	PN106	1.0	7	0.3	2.310
28	PN107	2.0	4	0.5	4.000
29	PN109	5.0	7	24.0	840.000
30	PN110	1.0	3	1.0	3.000
31	PN111	2.0	2	0.2	1.000
32	PN112	5.0	5	0.5	12.500
33	PN117	2.0	7	0.5	7.000
34	PN119	2.0	2	0.5	2.000
35	PN120	2.0	3	0.5	3.000
36	PN124	2.4	2	0.2	1.200
37	PN128	1.5	3	0.3	1.485
38	PN131	1.0	3	1.0	3.000
39	PN133	1.0	7	1.0	7.000
40	PN134	2.1	2	0.5	2.100
41	PN135	1.0	5	0.5	2.500
42	PN138	3.0	3	0.3	2.970
43	PN139	4.5	s/i	s/i	s/i
44	PN140	1.0	3	0.5	1.500
45	PN141	1.0	7	1.0	7.000
46	PN143	5.0	7	3.0	105.000
47	PN145	4.0	7	24.0	672.000
48	PN146	1.0	3	0.3	0.990
49	PN150	2.0	1	0.5	1.000
50	PN153	3.0	7	0.3	6.930
51	PN156	2.0	3	0.5	3.000
52	PN157	2.0	7	1.0	14.000
TOTAL					8.654.574

s/i = sem informação

6.7. Reserva permanente

A reserva permanente representa um volume de água subterrânea que participa do ciclo hidrológico numa escala de tempo plurianual, centenária ou milenar (Cavalcante, 1990, 1998). Esta corresponde ao volume de água subterrânea armazenado na porção saturada, abaixo da posição mínima da variação sazonal do nível freático.

Sendo o Aquífero Dunas/Paleodunas de caráter livre, o cálculo da reserva permanente é dado pelo volume de saturação (V_s), definido por:

$$V_s = A \cdot b \cdot \eta_e$$

Onde:

A – área de ocorrência do aquífero (m^2);

b – espessura média saturada do aquífero (m);

η_e – porosidade efetiva

A área total do estudo é de 248,45 km^2 que equivale a 248.450.000 m^2 ($2,5 \times 10^8 m^2$). Para o presente cálculo deve-se considerar a área de ocorrência do aquífero, dessa forma, realizou-se análise espacial (considerando-se a ausência de mapeamento geológico de detalhe) e concluiu-se que o aquífero abrange cerca de 65% da área de estudo, que resulta em 161.492.500 m^2 ($1,61 \times 10^8 m^2$).

A espessura média saturada do aquífero é de 10,4 m, a qual foi obtida com base no levantamento geofísico através das sondagens elétricas verticais.

A porosidade efetiva média adotada nessa versão é de 21,28%, resultante das avaliações dos testes de aquífero realizados em 10 poços na área pesquisada (Tabela 8).

Tabela 8 – Avaliações dos testes de aquífero realizados em 10 poços na área pesquisada. Obtenção dos parâmetros K (m/s), T (m^2/s) e porosidade efetiva (%)

Poços (Testes de aquífero)	COOPER & JACOB			UTM-N	UTM-E
	K (m/s)	T (m^2/s)	Por. Efet. - Sy (%)		
Pecém - posto de gasolina - P1	5.89E-04	1.17E-02	20,51	9606692	518821
Pecém - Siderurgica - CSP - P2	4.13E-03	5.79E-03	27,09	9604343	517657
Siupé - Queimadas - P7	1.17E-03	3.76E-03	22,62	9612375	506273
São Pedro - Sítio Frexeiras - P3	9.32E-04	1.43E-02	21,87	9621480	502594
Taíba - Caetano - P4	1.44E-03	4.18E-03	23,31	9602392	508245
Tabuba - P5	1.68E-04	8.37E-04	17,15	9608354	510125
Taiba - Lag Cobras - CAGECE - P8	6.91E-04	1.23E-02	20,98	9609799	511117
Paracuru - Cabra Morta - P9	1.60E-03	5.33E-03	23,66	9619830	498537
Paracuru - Cor. Canaduca - P10	3.71E-05	2.54E-04	13,82	9614540	504131
	Média		21,28		

Aplicando:

$$V_s = A \cdot b \cdot \eta_e$$

$$V_s = 161.492.500 \text{ m}^2 \times 10,4 \text{ m} \times 0,2128$$

$$V_s = 357.402.282 \text{ m}^3$$

$$V_s = 3,57 \times 10^8 \text{ m}^3$$

Utilizando-se a equação acima, obteve-se o valor de $357.402.282 \text{ m}^3$ ($3,57 \times 10^8 \text{ m}^3$) para a reserva permanente do aquífero Dunas/Paleodunas na porção entre os municípios de São Gonçalo do Amarante e Paracuru.

6.8. Reserva renovável

Esta representa o volume de água que participa efetivamente do ciclo hidrológico em uma escala de tempo anual ou sazonal. Quando este potencial não é aproveitado por obras de captação, é reintegrado ao ciclo hidrológico ou se constitui como fluxo de base dos rios (Cavalcante, 1990, 1998). O método adotado para o cálculo da reserva reguladora, que corresponde ao volume d'água infiltrado, ou seja, a recarga anual do sistema, foi o de Vazão de Escoamento Natural (V_{en}). A V_{en} é calculada a partir da porosidade efetiva, da área de ocorrência do aquífero e da variação do nível d'água subterrânea (Costa, 1998).

$$V_{en} = A \cdot \Delta h \cdot \eta_e$$

Onde:

A – área de ocorrência do aquífero (m^2);

Δh – variação média do nível d'água subterrâneo (m);

η_e – porosidade efetiva.

A variação do nível d'água subterrânea foi estabelecida por meio de medidas diretas em poços cadastrados, que posteriormente foram monitorados, e interceptam o aquífero pesquisado. Considerando-se que se trata de um aquífero livre e com características hidrogeológicas homogêneas, estabeleceu-se uma média dos valores das variações obtidas nos diversos poços medidos.

A porosidade efetiva foi obtida por meio de tratamento de dados de teste de aquífero realizados em 10 poços instalados nos domínios do aquífero Dunas/Paleodunas.

A variação sazonal da carga hidráulica (Δh) considerada nessa versão é de 2,50 m, tendo como base o monitoramento realizado ao longo do último ano hidrológico.

Aplicando:

$$V_{en} = A \cdot \Delta h \cdot \eta e$$

$$V_{en} = 161.492.500 \text{ m}^2 \times 2,50 \text{ m} \times 0,2128$$

$$V_{en} = 85.914.010 \text{ m}^3$$

$$V_{en} = 8,59 \times 10^7 \text{ m}^3$$

Como resultado da aplicação da equação se obteve o valor de $85.914.010 \text{ m}^3$ ($8,59 \times 10^7 \text{ m}^3$) para a reserva renovável do aquífero Dunas/Paleodunas ocorrente entre os municípios de São Gonçalo do Amarante e Paracuru.

6.9. Oferta e demanda hídrica atual

População de Paracuru em 2000	27.541 habitantes
População de Paracuru em 2010	31.636 habitantes
Crescimento em 10 anos	4.095 habitantes (14,9%)
População de São G. Amarante em 2000	35.608 habitantes
População de São G. Amarante em 2010	43.890 habitantes
Crescimento em 10 anos	8.282 habitantes (23,3%)
Reserva permanente (V_s)	$3,57 \times 10^8 \text{ m}^3 = 357.402.282 \text{ m}^3$
Reserva renovável (V_{en})	$8,59 \times 10^7 \text{ m}^3 = 85.914.010 \text{ m}^3$
Reserva total	$4,43 \times 10^8 \text{ m}^3 = 443.316.292 \text{ m}^3$
População total (Paracuru + São G. Amarante)	75.526 habitantes
Consumo de água	120 litros/hab/dia = 43.800 litros/hab/ano
Consumo de água total / ano	3.308.038.800 litros
	3.308.039 m^3
	$3,31 \times 10^6 \text{ m}^3$

Consumo de água em indústrias / ano	40.997 m ³
Consumo total (doméstico+indústrias) / ano	3.349.036 m ³ 3,35 x 10 ⁶ m ³
Consumo de água total / ano	3,90% da reserva renovável

Com base nas informações levantadas conclui-se que o aquífero em questão possui elevado suporte hídrico. Considerando-se a soma das populações para os dois municípios (Paracuru e São Gonçalo do Amarante) obteve-se um total de 75.526 habitantes. Cada habitante consome em média 120 litros de água por dia, o que equivale a 43.800 litros por ano. Para a população dos dois municípios em questão o consumo de água anual é de 3.308.039 m³.

Avaliando-se a reserva renovável (85.914.010 m³), que é a parte do manancial subterrâneo que se pode explorar com segurança sem prejuízo do aquífero, identificou-se que 3,85% está atualmente comprometida com o consumo doméstico.

O consumo de água subterrânea pelas indústrias pode ser estimado com base nas outorgas concedidas pela Companhia de Gestão e Recursos Hídricos do Ceará (Cogerh), como apresentado na Tabela 9. Considerando-se apenas as indústrias que possuem outorga de direito de uso da água, obteve-se um volume de 40.997m³ que é utilizado por ano pelas empresas em questão, correspondente a 0,05% da reserva renovável.

Tabela 9 – Volumes outorgados pelas indústrias da região, conforme Sistema de Outorga e Licença – SOL, operado pela Cogerh/SRH

Cliente	Consumo (m³/ano)
Wobben Windpower Indústria e Comércio LTDA	17.345
Tortuga LTDA.	23.652
TOTAL	40.997

Fonte: Cogerh, 2015.

Em síntese o potencial aquífero no domínio Dunas/Paleodunas é superior à demanda da região. Ainda considerando-se a utilização da água subterrânea para fins industriais, pode-se verificar que o aquífero fornece potencialidade para tal. No entanto, deve-se salientar que é de grande importância a orientação quanto às formas de exploração do recurso, no que se refere à instalação de obras de captação e volumes extraídos.

6.10. Sustentabilidade e vulnerabilidade das águas subterrâneas.

O uso sustentável está associado às explorações condicionadas aos volumes disponíveis estabelecidos no cálculo da reserva renovável. Para tanto algumas condições são necessárias:

1. Estabelecer a distância entre os poços de captação respeitando os cones de interferência. Para a área pesquisada realizou-se testes de aquífero em 10 poços com piezômetros instalados a 3 metros de distância. Os resultados dos testes mostraram rebaixamentos nos piezômetros que variaram de 8 a 104 cm, confirmando interferências entre poços posicionados a 3 metros de distância. Com base nesta informação, pode-se inferir que os poços devem respeitar uma distância mínima que pode variar de 10 a 15 metros, segundo as avaliações com base nos testes de aquífero realizados no domínio Dunas/Paleodunas no âmbito do desenvolvimento deste projeto. Neste caso, deve-se salientar que para garantir a estabilidade do manancial subterrâneo, sugere-se uma distância mínima de 100 metros entre os poços de captação. Esta distância considera a elevada porosidade do aquífero Dunas/Paleodunas e a possibilidade de aumento na demanda da região em decorrência do crescimento industrial. Pode-se abordar ainda que as avaliações aqui realizadas têm subsídios em dados atuais, os quais podem incrementar em curto intervalo de tempo, principalmente no que se refere à relação oferta-demanda de água subterrânea.

2. Determinar as vazões de produção através de testes de aquífero realizados nos pontos de captação. Para uma melhor avaliação quanto às distâncias a serem preservadas entre os pontos de captação, sugere-se a realização de testes de aquíferos nos locais de perfuração, obtenção de informações sobre a densidade de poços já perfurados e condições de bombeamento nas adjacências. Nestas avaliações deve-se considerar que poços que são mais intensamente bombeados resultam em cones de interferência com maiores diâmetros, fato que restringe a locação de poços a curtas distâncias entre os mesmos.

3. Para a área da pesquisa em apreço, os poços de captação devem vir acompanhados de piezômetros posicionados em média a 3 metros de distância para monitoramento da abrangência do cone de rebaixamento do nível da água. Estas condições estão diretamente relacionadas à geologia local, que deve ser conhecida e considerada para estabelecimento dos reais parâmetros de monitoramento em diferentes ambientes.

4. Redimensionamento das captações com adaptações de centrais de armazenamento (caixas d'água) e redes de distribuição. Esta sugestão se adéqua às captações para abastecimento humano, podendo facilitar o controle adequado por parte da companhia de gestão, no que se refere à construção de novas obras, volumes extraídos e qualidade da água.

5. Regularização e fiscalização das captações particulares.

6.11. Vulnerabilidade do aquífero

O aquífero pesquisado representa um domínio de elevada porosidade e permeabilidade, resultando em ambiente altamente vulnerável às contaminações. Neste sentido deve existir um controle eficaz quanto às atividades e unidades de risco como: lixões e aterros sanitários, cemitérios, dispersão de agrotóxicos e fertilizantes, manipulação de hidrocarbonetos (armazenamento e distribuição de combustíveis), instalação de fossas sépticas e sumidouros, dentre outros.

Maior atenção deve ser dispensada às áreas de grande exploração de água subterrânea, pois nesses locais o fluxo é induzido em decorrência do bombeamento, resultando em níveis dinâmicos mais profundos. Nesta situação, existe o risco de plumas poluentes atingirem o fluxo subterrâneo natural e contaminarem o aquífero. Como consequência tem-se uma dispersão difusa da contaminação ao longo do aquífero, fato que ocasiona maior dificuldade em despoluição e remediação do impacto.

6.12. Águas Subterrâneas

Motivado pela ampla disponibilidade de água subterrânea na região, identificou-se um consumo importante, podendo-se caracterizar como vital para as comunidades fixadas. Este recurso é extraído principalmente de poços tubulares profundos, poços tubulares rasos e cacimbas. Os principais usos das águas subterrâneas estão relacionados ao abastecimento público, aos segmentos industriais e domésticos.

De acordo com os dados levantados na pesquisa, é possível avaliar que os volumes atualmente captados são perfeitamente suportados pelas reservas estimadas dos aquíferos.

Em contra partida deve-se atentar para a possibilidade de cenários futuros onde fatores adversos podem comprometer a estabilidade do potencial aquífero, como:

- Crescimento desordenado das cidades.
- Impermeabilização das zonas de recarga.
- Crescimento da demanda industrial.
- Custo da água praticada pela Concessionária.
- Ausência ou fornecimento irregular de água por parte da Concessionária.
- Falta de água motivada por racionamento.
- Períodos de seca.

Diante do desenvolvimento industrial e populacional previsto para a região, associado à baixa oferta de água superficial, a ocorrência das alternativas acima pode ocasionar um

incremento significativo na utilização dessas águas subterrâneas. Portanto, ações diretas no sentido de controlar o uso e preservar as condições necessárias para recarga dos aquíferos são de suma importância na estabilidade da condição hídrica na região.

Outro fator a ser considerado é a perspectiva de demandas futuras para a região. Neste sentido, é necessária uma avaliação histórica do uso da água na área do projeto além de pesquisas para o cálculo das reservas disponíveis, a qual foi contemplada no estudo em questão. Para a construção de cenários de demandas futuras das águas subterrâneas, procurou-se estimar o consumo por unidade de captação (poços tubulares rasos e profundos e cacimbões). De acordo com o cadastro realizado, relativo aos poços que possuem informações de vazões, estima-se que são extraídos 201 m³/h.

6.13. Áreas potenciais e orientações de perfurações

Os estudos hidrogeológicos contemplados neste projeto fornecem subsídios para determinação de áreas potenciais à captação de água subterrânea. Neste sentido pode-se abordar como áreas alvo aquelas que apresentaram camadas saturadas mais espessas, as quais estão representadas na figura 27. As captações devem ocorrer em poços que interceptam o domínio Dunas/Paleodunas. Poços mais profundos que captam águas armazenadas nas rochas do Grupo Barreiras devem ser evitados, por possuírem menor potencial que o domínio sobrejacente. Pode-se abordar neste contexto que existe a possibilidade de execução de poços mistos. Estes podem ser viáveis, pois captam água subterrânea tanto do domínio Dunas/Paleodunas quanto do aquífero Barreiras, aproveitando seus melhores potenciais.

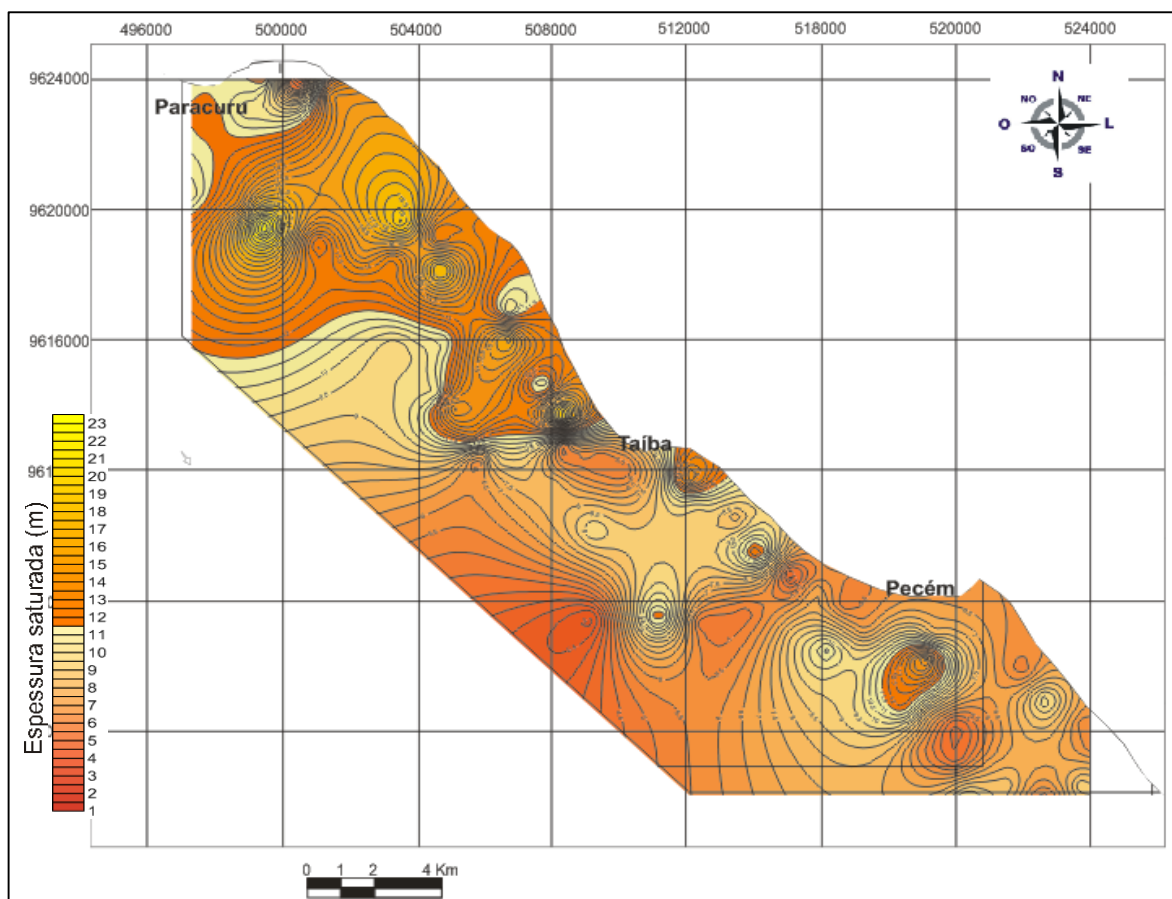
Deve-se salientar que é de extrema importância as características construtivas dos poços, principalmente no que se refere à instalação das seções filtrantes, que devem ser implantadas em profundidades compatíveis às principais entradas de água. Outro fator a ser considerado é a utilização de fluidos de perfuração adequados, que possibilitem fácil remoção e não impermeabilize as entradas de água. Concluída a perfuração e instalação da coluna de revestimento e necessário o preenchimento do espaço anelar com pré-filtro. Este material também interfere na produção do poço, que deve ser composto de material inerte e bem selecionado para que facilite a transmissão de água do aquífero para o interior do poço.

Outra área potencial à captação é associada às lagoas que representam exposição do nível freático. Nesta situação a captação é feita em superfície através de sistema de bombeamento adequado compatível à potencialidade do aquífero. Como exemplo deste tipo de exploração pode-se citar a captação nas lagoas do Pecém e Paracuru. Esta forma de captação merece destaque por

possuir baixo custo para obtenção de água para suprimento de uma determinada região, porém são necessários estudos específicos para determinação das reais condições de exploração neste ambiente de modo a não comprometer a estabilidade do aquífero.

Em se tratando de perfurações na linha de costa deve-se resaltar a interferência da cunha salina. Os poços neste ambiente devem ser rasos para evitar a contaminação por sais provenientes da interceptação da cunha salina. O bombeamento intenso causa o avanço dessa cunha em direção ao continente, limitando a qualidade da água principalmente no que se refere à concentração de sais. Poços perfurados neste ambiente devem ter acompanhamento técnico de profissional geólogo especializado, com objetivo de monitorar a qualidade da água e estabelecer a profundidade de conclusão dentro dos padrões de consumo pertinentes.

Figura 27 – Mapa de isovalores para a espessura da camada saturada na área de pesquisa. Em destaque (escala de cor laranja a amarelo) as áreas que possuem espessuras saturadas acima de 11,5m, as quais representam ambientes de elevada potencialidade hídrica



7. Geofísica

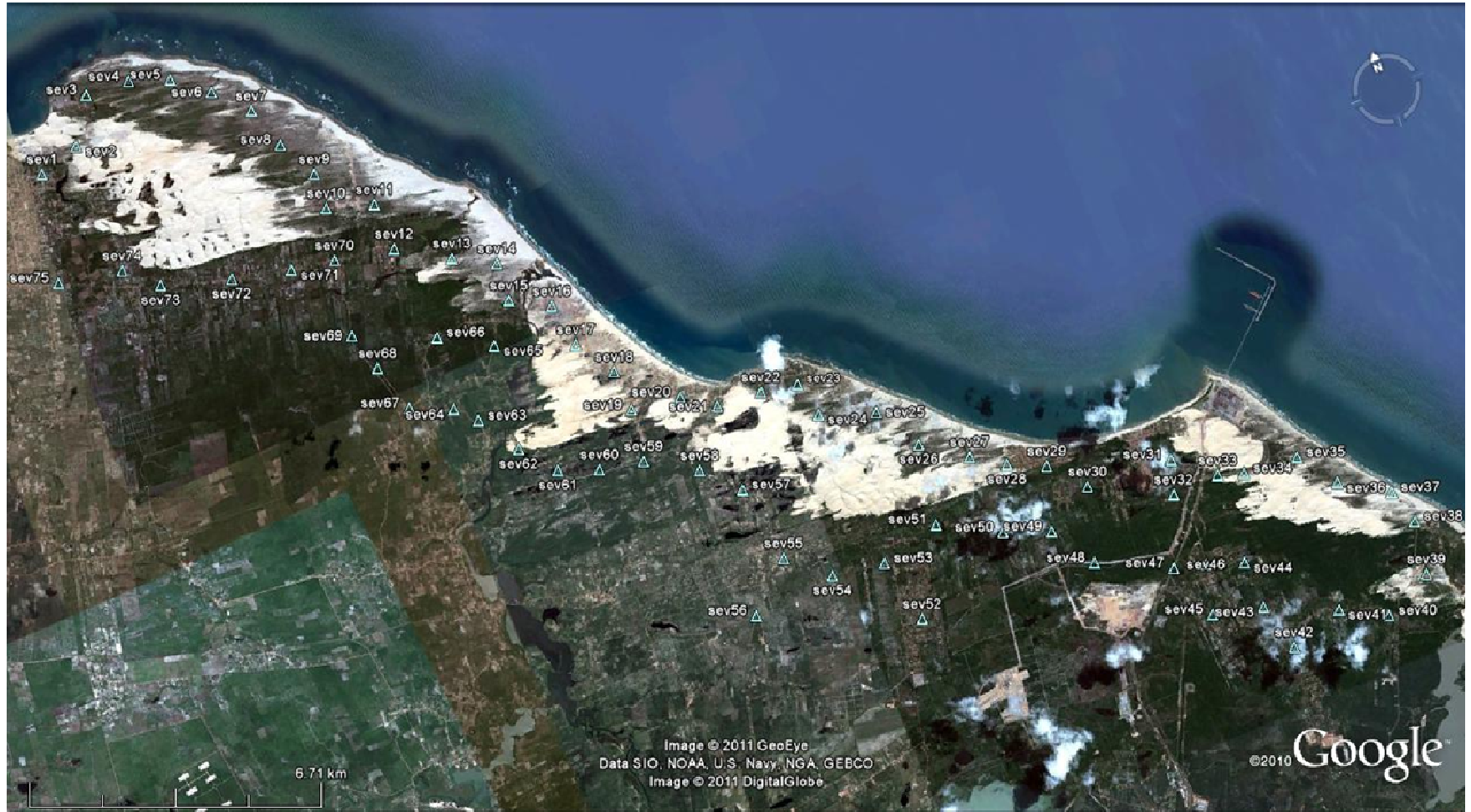
Os estudos geofísicos desenvolvidos na área têm o objetivo de definir a espessura das camadas sedimentares através de suas características geoeletricas. Esta característica é de suma importância para a elaboração do modelo matemático, pois resultará em uma condição de contorno caracterizada pela espessura do aquífero. O método utilizado foi o de eletrorresistividade através de sondagens elétricas verticais (SEV), o qual é extremamente eficaz na caracterização de ambientes sedimentares, bem como na identificação dos topos do embasamento cristalino, o que resulta na espessura do sistema aquífero.

Os pontos para realização das SEV's foram selecionados e contemplaram uma distribuição espacial equacionada ao longo da área. A figura 28 mostra os pontos de realização das SEV's plotados em uma imagem orbital da área estudada.

7.1. Eletrorresistividade – Sondagens Elétricas Verticais (SEV)

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV) representa uma técnica de investigação do método de eletrorresistividade. A SEV é uma investigação indireta e pontual do terreno, onde através das variações de condutividade elétrica em profundidade, estima-se o tipo de material e suas espessuras no ponto de investigação. Esta técnica foi aplicada na área, concluindo com 75 SEV's distribuídas ao longo da área, a fim de se obter a densidade de informações necessárias à caracterização das camadas geoeletricas ocorrentes.

Figura 28 – Imagem *Quickbird* da área de estudo com posicionamento das Sondagens Elétricas Verticais (SEV's).



Fonte: Imagem Google Earth

7.1.1. Conceitos Básicos

Resistividade da Terra

A Eletrorresistividade é um método geométrico que consiste em medidas da resistividade aparente e subsequente interpretação, baseado na resposta de cada estruturação geológica em sub-superfície ao fluxo de uma corrente elétrica. Quando uma corrente elétrica é introduzida no solo através de dois eletrodos (A-B) usando equipamento característico (eletrorresistivímetro), esta produz uma diferença de potencial que é medida pelo equipamento através de um segundo par de eletrodos (M-N). O valor medido desta diferença de potencial e da corrente associada é função da resistividade aparente do solo e do arranjo geométrico dos eletrodos, sendo a profundidade alcançada diretamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos (Orellana, 1972).

Qualitativamente, resistividade é uma medida de dificuldade que um determinado material impõe a passagem de uma corrente elétrica, correspondendo ao inverso da condutividade. A resistividade é designada por (ρ) dada em ohm.m e a condutividade (σ) é dada em S/m, sendo a relação entre elas: $\rho = 1/\sigma$.

A aquisição da resistividade aparente do subsolo pode ser feita através da combinação de uma das três técnicas (Sondagem Elétrica Vertical – SEV, Caminhamento Elétrico – CE e Perfilagem Elétrica – PERF) com um dos diversos arranjos propostos para o método da Eletrorresistividade (Braga, 2005). Na área pesquisada, realizou-se a técnica da Sondagem Elétrica Vertical, com disposição dos eletrodos na superfície seguindo arranjo *Schlumberger*.

7.1.2. Princípios básicos do método da eletrorresistividade

No método geofísico da eletrorresistividade, uma corrente elétrica contínua é introduzida no interior da terra através de dois eletrodos (hastes de metal) conectados aos terminais de uma fonte portátil de força eletromotriz (eletrorresistivímetro). A distribuição de potencial resultante no solo é mapeada através de outros eletrodos, geralmente em número de dois, também de metal ou de um material não-ionizável, conectado aos terminais de milivoltímetro. Através das leituras dos potenciais e da corrente elétrica injetada no solo, obtida por um mili-amperímetro ligado à fonte, podemos obter informações sobre a distribuição da resistividade elétrica abaixo da superfície. Este método tem sido amplamente utilizado na busca de formações aquíferas, em correlações estratigráficas em campos de óleo e na prospecção de corpos metálicos condutores.

7.1.2.1 Aplicação da Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

O objetivo da sondagem elétrica vertical (SEV) é determinar a variação da resistividade da terra com a profundidade. Para tal, assume-se que a resistividade da terra no local da medição varia apenas com a profundidade, isto é, a geologia de sub-superfície é composta por camadas planas e horizontais com espessuras constantes. A variação na resistividade com a profundidade é medida através do aumento da distância entre os eletrodos de corrente, mantendo-se fixo o centro do arranjo; assim obtemos um valor de resistividade aparente para cada valor de distância entre os eletrodos **AB**. O aumento na distância entre os eletrodos de corrente faz com que a corrente elétrica passe por níveis cada vez mais profundos, fazendo com que os valores calculados da resistividade aparente sejam cada vez mais influenciados pelas resistividades das camadas mais profundas. O resultado então de uma SEV é uma curva de resistividade aparente versus distância **AB/2**, que representa de uma maneira indireta a curva resistividade \times profundidade.

7.1.2.2 Resistividade aparente

Chamemos de **A** e **B** os eletrodos de corrente, positivo e negativo, respectivamente, postos na superfície da terra e **M** e **N** os eletrodos de potencial. Se ΔV é a diferença de potencial lida entre **M** e **N** teremos, através da *Lei de Ohm*, que:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{IG} \quad (1)$$

onde:

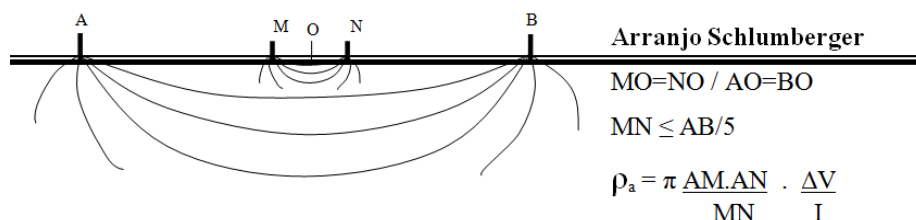
$$G = \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}. \quad (2)$$

A equação (1) nos dá a resistividade real se a sub-superfície fosse homogênea. Nos casos reais, ρ varia com a mudança na geometria do arranjo de eletrodos (G) ou mudando as suas posições na superfície da terra sem alterar sua disposição relativa. Então ao utilizarmos a equação (1) com o devido G obtido pela equação (2), o valor resultante será a chamada resistividade aparente (ρ_a).

7.1.2.3 Arranjo de eletrodos Schlumberger

O arranjo dos eletrodos na superfície da terra pode ser aleatória, mas sempre utiliza-se arranjos já consagrados que possuem métodos de interpretação já bastante desenvolvidos, facilitando assim o trabalho. Nas atividades realizadas neste trabalho foi usado o arranjo conhecido como do tipo *Schlumberger* centrado, mostrado na figura 29.

Figura 29 – Arranjo do Tipo *Schlumberger*



7.1.2.4 Equipamento utilizado

O equipamento utilizado foi o eletrorresistímetro marca *Geotest RD-1000A* (Figura 30). O eletrorresistímetro é formado por um conjunto transmissor – receptor. O transmissor constitui-se de uma fonte de tensão contínua com medição de corrente de saída. O receptor, por sua vez, incorpora uma unidade de medição de tensão com compensador de potenciais naturais. As especificações das unidades estão descritas na Tabela 10.

Tabela 10 – Especificações operacionais do resistímetro RD-1000A

UNIDADE TRANSMISSORA	UNIDADE RECEPTORA
Potência máxima aplicada: 2 kW de pico a pico	Sensibilidade em M-N: 0,1 mV
Tensão máxima aplicada: 2 kV de pico a pico	Duplo M-N para facilitar as “embreagens”
Corrente máxima aplicada: 2 A	Controla remotamente o Transmissor sem necessidade de cabos conectores
Alimentação: 2 baterias de 12 V e 50 Ah em série (24V)	Rejeição automática dos potenciais de contato e telúricos em M-N, que permite uso de eletrodos metálicos
Amplificador em escalas de 10, 120 300, 500, 600, 800, 980 V	Alimentação: 8 Baterias internas AA de 1,5 V

Figura 30 – Resistivímetro RD-1000A, utilizado no levantamento geofísico da área pesquisada



Como acessórios também foram utilizadas bobinas de fiação flexível $1,5\text{mm}^2$, eletrodos A-B de aço inoxidável maciço e eletrodos M-N de cobre maciço e duas baterias (12V) como fonte de carga elétrica. Um *notebook* serviu para cálculo das resistividades aparentes e construção das curvas em tempo real, o que permitiu o acompanhamento e entendimento das variações das resistividades e retificações e/ou ratificações de algumas leituras com auxílio de planilha criada em arquivo do *software Excel*. O uso de equipamento de GPS Garmin Etrex serviu para localização precisa do posicionamento das SEVs.

A equipe de campo foi composta por um profissional geólogo especializado em levantamentos geofísicos e três auxiliares.

As interpretações das sondagens elétricas, em escritório, foram feitas para parametrização das resistividades elétricas e estimativa da profundidade das camadas, utilizando o *software ATO*, que se baseia em técnicas de minimização dos erros entre dados sintéticos, modelados através de filtragem linear e os dados obtidos em campo, gerando modelos hipotéticos que guardam melhor correspondência com os dados obtidos nas campanhas. Esta interpretação foi refinada utilizando-se o *software RESIST*, otimizando-se o número de camadas geelétricas a partir de modelo gerado com a curva de multicamadas previamente interpretada no *ATO*.

7.1.3. Resultados e Considerações

O levantamento geofísico compreendeu a elaboração de 75 sondagens elétricas verticais. As SEV's foram distribuídas de forma a cobrir toda a extensão do campo de Dunas/Paleodunas na região compreendida entre a Barra do Cauípe e a Cidade de Paracuru.

Todas as sondagens executadas no campo foram incluídas e validadas, em função das leituras não apresentarem níveis de ruído na aquisição. De uma maneira geral, os modelos geoeletricos gerados mostram as sondagens com uma interpretação bastante aceitável, considerando que os erros obtidos no programa de inversão foram de 4,1% para 44 sondagens, 7,7% para 30 sondagens e apenas uma sondagem ultrapassou erro de 10% (SEV 43).

As análises dos resultados das interpretações das SEVs mostram que a maioria possui um caráter genérico o que pode refletir uma litologia típica de ambientes costeiros com apenas 4 camadas, onde primeiramente temos uma camada arenosa seca resistiva seguida de uma zona de resistividade tênue saturada e de uma camada argilosa condutiva tendo o substrato cristalino em sotoposição com alta resistividade.

O aquífero freático dunar, associado à segunda camada geoeletrica e objeto principal do estudo, mostrou-se com espessura variando de 2,8m a 23,3m com espessura média de 10,4m. A superfície média do nível freático é de 4,9m atingindo-se até 31,8m de profundidade.

O embasamento cristalino (rocha sã) da bacia costeira se apresenta variando de 22,4m a 97m de profundidade, onde os valores de resistividade são elevados, indicado pelo fato do ramo ascendente final ter uma inclinação de 45° na escala *bilog*. Com auxílio do Software Surfer foi possível a construção de um mapa de isolinhas para os valores da profundidade do embasamento (Figura 31), resultando na determinação de zonas sedimentares mais espessas (embasamento cristalino mais profundo). A superfície tridimensional (Figura 32) torna possível uma visualização direta das regiões mais profundas do embasamento cristalino. Em análise pode-se abordar a região costeira de Taíba a Paracuru como as porções que registraram maiores profundidades do embasamento cristalino.

Após o tratamento das SEV's foi possível determinar a estruturação das camadas geoeletricas, abordando sobre suas profundidades, espessuras, resistividades e concluindo com suas descrições (Tabela 11).

A principal informação proveniente do levantamento geofísico é a determinação das espessuras das camadas (Tabela 12). Em análise das seções geoeletricas, obteve-se que a camada 2, possui características hidrogeológicas que caracterizam a unidade armazenadora do aquífero Dunas/Paleodunas. Para uma melhor visualização desta informação (espessura saturada) ao longo da área, elaborou-se um mapa de isovalores para as espessuras da camada 2, o qual está apresentado na figura 33. Avaliando a distribuição destes valores, verificou-se

que a região costeira entre Taíba e Paracuru mostrou maiores espessuras para a camada aquífera. Corroborando com a informação da profundidade do embasamento cristalino, onde as espessuras da camada aquífera (camada 2) são maiores nas regiões de embasamento cristalino mais profundo.

Tabela 11 – Quadro resultante da aplicação das SEV's, com identificação da camada geolétrica, espessura média de cada camada (metros), profundidade média (metros), resistividade média (ohm.m) e a variação da resistividade (ohm.m) do Campo de Dunas Pecém/Paracuru

CAMADA GEOELÉTRICA	ESPESSURA MÉDIA (m)	PROFUNDIDADE MÉDIA (m)	RESISTIVIDADE MÉDIA (Ω m)	RESISTIVIDADE - VARIAÇÃO (Ω m)	DESCRIÇÃO HIDROGEOLOGIA
1	4,9	4,9	8010,4	205,2 - 73.121,0	DUNAS; COBERTURA ARENOSA; INSATURADO; SUPERFÍCIE DE RECARGA
2	10,4	15,3	610,1	47,9 - 9.977,4	DUNAS E/OU PALEODUNAS; AREIAS SELECIONADAS POR VEZES SILTOSAS; SATURADO; AQUIFERO FREÁTICO CLÁSTICO
3	39,7	55,0	28,6	2,4 - 276,9	FORMAÇÃO BARREIRAS E/OU SAPROLITO; ARGILLO ARENOSA DE GRAN FINA E/OU ROCHA ALTERADA; AQUICLUDE
4			973,8	172,4 - 10.884,4	ROCHAS CRISTALINAS PRÉ-CAMBRIANAS; EMBASAMENTO IMPERMEÁVEL; AQUIFERO FISSURAL

Tabela 12 – Dados das interpretações das SEV's, abordando as profundidades das camadas interpretadas e a espessura da camada saturada (camada 2)

SEV	Coordenadas		Profundidade (metros)			Espessura camada 2 (metros)
	UTM-E	UTM-N	Camada 1	Camada 2	Camada 3	
1	497.752	9.622.767	3.7	15.8	97	12.1
2	498.709	9.623.028	4.2	14.3	91.6	10.1
3	499.353	9.623.973	0.9	12.9	54.8	12
4	500.371	9.623.871	12	13.5	43.5	1.5
5	501.264	9.623.537	2.9	17.7	58.2	14.8
6	502.045	9.622.912	2.9	18.6	68.8	15.7
7	502.735	9.622.186	2.4	19	78.9	16.6
8	503.065	9.621.242	2.6	20	70.1	17.4
9	503.534	9.620.357	2.9	21.5	73.7	18.6
10	503.498	9.619.562	1.3	21.1	73.2	19.8
11	504.551	9.619.212	1.1	13.5	51.3	12.4
12	504.600	9.618.145	5.9	25.3	53	19.4
13	505.742	9.612.441	1.3	6.5	49.8	5.2
14	506.652	9.616.943	1.3	11.1	56.5	9.8
15	506.595	9.616.091	5.1	22.8	55.2	17.7
16	507.460	9.615.596	3.6	17.4	52.2	13.8
17	507.647	9.614.609	3	12.8	92.1	9.8

SEV	Coordenadas		Profundidade (metros)			Espessura camada 2 (metros)
	UTM-E	UTM-N	Camada 1	Camada 2	Camada 3	
18	508.228	9.613.727	1.2	22.7	48.1	21.5
19	508.270	9.612.802	3.1	7.6	32.2	4.5
20	509.415	9.612.626	2	7.4	72.6	5.4
21	510.121	9.612.111	8.1	13	91.1	4.9
22	511.175	9.612.012	2.4	10.6	76.5	8.2
23	512.017	9.611.849	1.8	17.3	54.9	15.5
24	512.208	9.611.057	2.6	11.8	70.3	9.2
25	513.449	9.610.589	3.7	11.2	76.1	7.5
26	514.078	9.609.564	0.7	13.8	63.4	13.1
27	515.055	9.608.862	6.1	8.9	94.1	2.8
28	515.787	9.608.383	12.3	19.5	39.7	7.2
29	516.616	9.607.995	3.4	8.5	55.3	5.1
30	517.307	9.607.221	2.3	8.7	30.7	6.4
31	519.309	9.607.019	2.2	10.2	29.4	8
32	519.069	9.606.299	11.5	27.6	81.8	16.1
33	523.765	9.602.452	31.8	40.9	81.7	9.1
34	523.765	9.602.452	2.4	13.8	41.4	11.4
35	522.011	9.605.952	3.8	8.9	32.5	5.1
36	522.655	9.605.081	1.5	11.7	30.3	10.2
37	523.735	9.604.403	9.9	15.7	91.2	5.8
38	523.983	9.603.614	1.7	7.5	24.4	5.8
39	523.765	9.602.452	4.8	9	41.1	4.2
40	522.616	9.601.966	8.3	12.7	33.8	4.4
42	520.329	9.602.176	16.5	26.2	45.2	9.7
43	520.010	9.603.257	10.2	14.3	39.4	4.1
44	519.982	9.604.317	8.3	12	26	3.7
45	518.870	9.603.561	1.6	7.5	22.4	5.9
46	519.147	9.604.617	16.4	23.7	46.7	7.3
47	518.446	9.604.827	5.3	17.4	35.4	12.1
48	516.803	9.605.637	3.5	12.4	69.6	8.9
49	516.163	9.606.644	2.5	13.8	36.8	11.3
50	515.124	9.607.053	2.7	11.3	32.3	8.6
51	513.764	9.607.805	6.4	11.1	28	4.7
52	512.670	9.606.036	1.4	6.7	42.8	5.3
53	512.344	9.607.487	1.6	6.2	40.3	4.6
54	511.133	9.607.602	1.4	13.9	56.2	12.5
55	510.245	9.608.481	5	12.9	56.1	7.9
56	509.177	9.607.575	12.8	14.5	34.6	1.7

SEV	Coordenadas		Profundidade (metros)			Espessura camada 2 (metros)
	UTM-E	UTM-N	Camada 1	Camada 2	Camada 3	
57	509.177	9.610.221	1.5	11.1	44.3	9.6
58	509.204	9.610.989	1.8	9.9	47.1	8.1
59	508.094	9.611.667	1.9	9.7	47.6	7.8
60	507.088	9.611.891	2.9	11.1	47.5	8.2
61	506.196	9.612.247	3.9	12.1	38.8	8.2
62	505.547	9.613.016	5.4	18.3	62.3	12.9
63	504.946	9.613.952	6.7	22.4	51.8	15.7
64	504.505	9.614.391	15	25.1	53.8	10.1
65	505.901	9.615.312	4.4	20.1	64.5	15.7
66	504.761	9.615.980	6.1	16.6	90.7	10.5
67	503.575	9.614.805	11.2	20.9	43.8	9.7
68	503.236	9.615.893	5.1	14.2	65.9	9.1
69	502.964	9.616.772	4.8	16.1	54.4	11.3
70	503.235	9.618.440	5.4	18.4	72.3	13
71	502.237	9.618.628	7.3	22.8	63.3	15.5
72	500.901	9.618.971	2.7	14.2	47.2	11.5
73	499.331	9.619.476	2.2	25.5	53.9	23.3
74	498.640	9.620.114	4.5	19	49.7	14.5
75	497.182	9.620.426	8.7	18.8	50.9	10.1

Figura 31 – Profundidade do embasamento (em metros) com SEV's plotadas

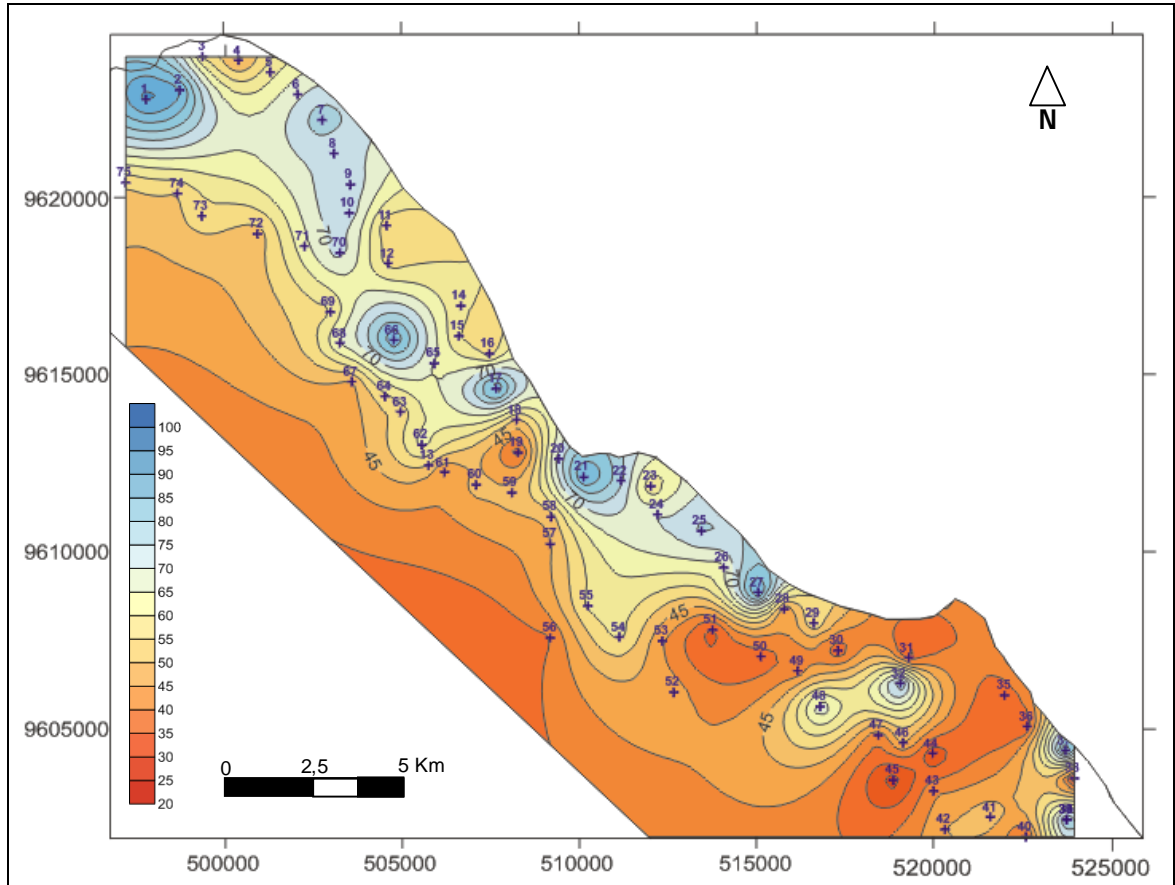


Figura 32 – Superfície tridimensional representativa da profundidade do embasamento de acordo com as SEV's

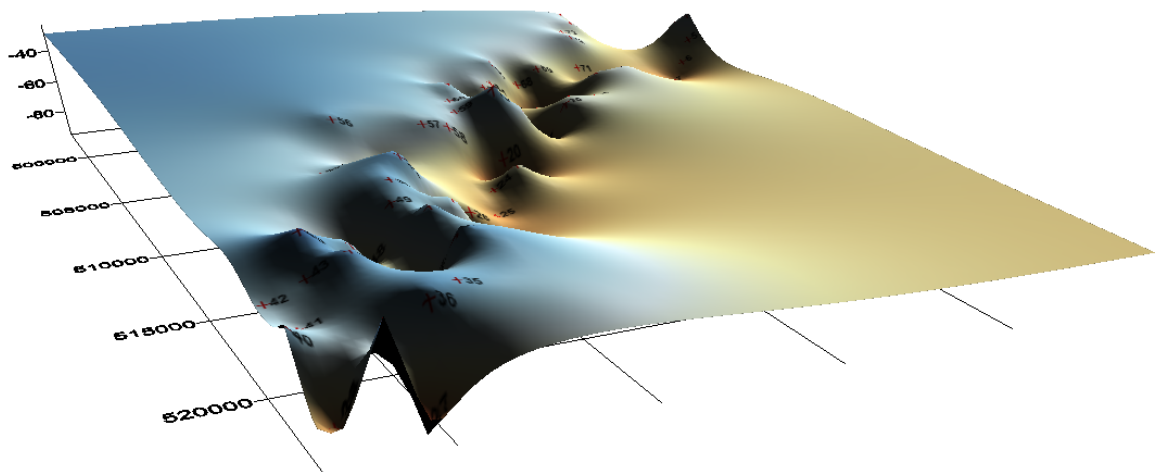
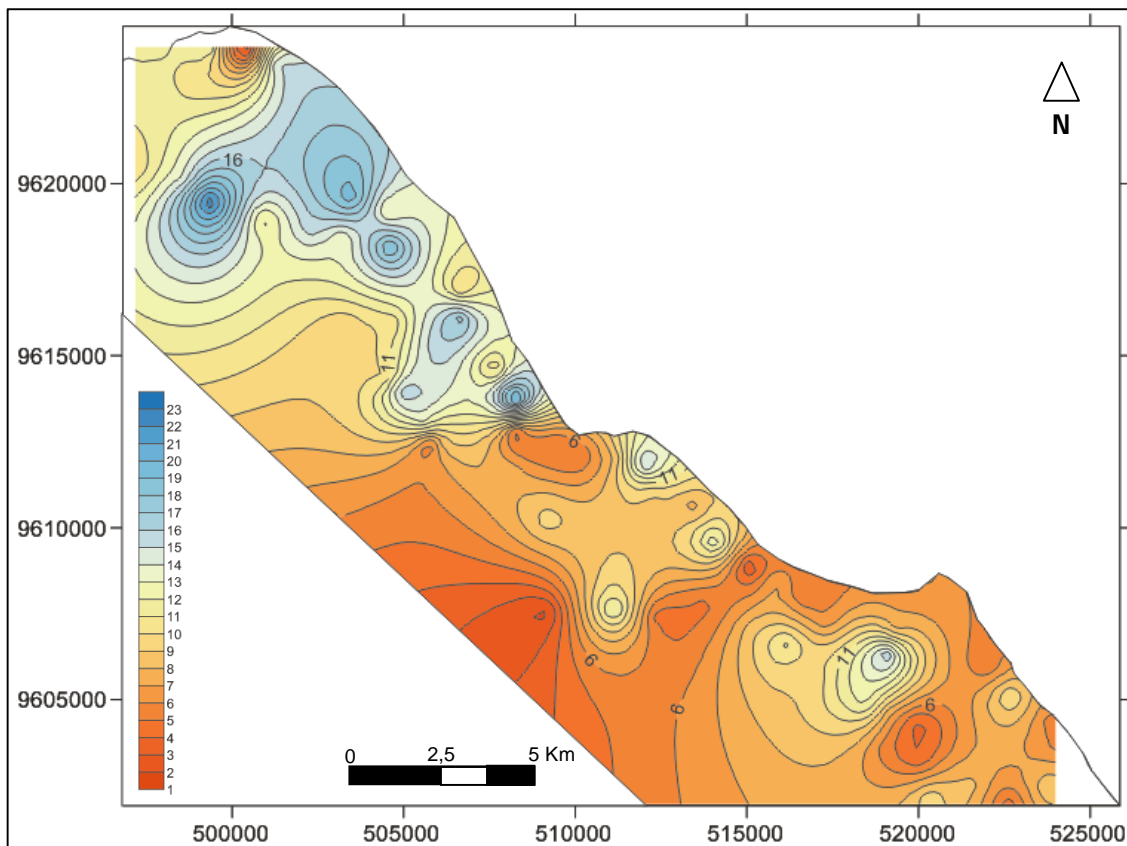


Figura 33 – Mapa de isovalores para a espessura da camada saturada do Aquífero Dunas/Paleodunas (camada 2)



8. Sondagens mecânicas

Os pontos determinados para realização das sondagens a trado estão apresentados nas figuras 34, 35 e 36. Estas sondagens foram executadas após a pesquisa geofísica através das SEV's, pois seu objetivo é parametrizar as sondagens elétricas. Os furos de sondagens tiveram diâmetro de 2" e a cada metro sondado ou a cada mudança de litologia foi feita a coleta de amostra. Como resultado foram obtidas informações sobre as características físicas diretas dos materiais em subsuperfície, o que servirá de subsídio para avaliações quanto as condições de armazenamento e circulação da água subterrânea.

Com base nos estudos geofísicos, o aquífero freático dunar, associado à segunda camada geométrica e objeto principal do estudo, mostrou-se com espessura variando de 2,8m a 23,3m e espessura média de 10,4m. A superfície média do nível freático é de 4,9m atingindo-se até 31,8m de profundidade. Tais características se mostraram compatíveis com os dados obtidos através das sondagens diretas (mecânicas), as quais estão apresentadas no

anexo 3. As principais informações estão apresentadas na Tabela 13. Com base nos dados obtidos obteve-se uma média de 2,9m para o nível estático e 6,8m para as profundidades de sondagem. Deve-se salientar que as profundidades das sondagens são limitadas pelas características dos materiais em subsuperfície, bem como das limitações do equipamento (sonda) utilizado no levantamento.

Os materiais obtidos caracterizam um ambiente de porosidade elevada. São sedimentos arenosos que variam sua granulometria de fina a grossa, comumente bem selecionados e coloração variando de creme a vermelha. Níveis argilosos e siltosos podem ser identificados em menor escala. Tais características conferem ao ambiente uma boa condição de armazenamento e transmissão de água subterrânea, resultando em meio aquífero favorável quanto às vazões de produção. As descrições e perfis resultantes das sondagens mecânicas estão apresentados no anexo 3.

Tabela 13 – Relação das sondagens mecânicas (SM) realizadas na área e principais informações

SM	Município	Local	UTM-N	UTM-E	N.E. (m)	PROF. (m)
1	Paracuru	Sede	9622752	497869	4,0	7,5
2	Paracuru	Pedra Rachada	9623864	500379	2,0	5,0
3	Paracuru	Estrada do Cais	9621234	503046	2,4	6,5
4	Paracuru	Estrada do Cais	9619552	503499	1,5	5,0
5	Paracuru	São Pedro	9617528	505419	2,0	5,5
6	S.G. Amarante	Taíba	9615585	507460	5,6	9,0
7	S.G. Amarante	Taíba	9612926	508829	1,0	6,0
8	S.G. Amarante	Taíba	9612128	510993	4,0	8,0
9	S.G. Amarante	Taíba	9610867	512927	2,7	6,0
10	S.G. Amarante	Colônia	9608254	516201	6,0	11,0
11	S.G. Amarante	Pecém	9606290	519069	5,8	8,5
12	S.G. Amarante	Pecém	9605136	522677	3,0	6,0
13	Caucaia	Barra do Cauípe	9603603	523984	2,8	6,0
14	S.G. Amarante	Paú	9606974	515479	2,2	4,0
15	Caucaia	Matões	9604310	519982	4,5	6,0
16	S.G. Amarante	Pecém	9604827	518439	5,5	6,0
17	S.G. Amarante	Paú	9607017	514291	3,8	7,5

SM	Município	Local	UTM-N	UTM-E	N.E. (m)	PROF. (m)
18	S.G. Amarante	Tabuba	9608473	510244	2,5	8,0
19	S.G. Amarante	Tabuba	9610502	509681	1,5	7,0
20	S.G. Amarante	Queimadas	9611950	507044	1,0	6,0
21	Paracuru	Umarizeiras	9614592	504160	3,5	5,0
22	S.G. Amarante	Queimadas	9612335	506631	1,5	4,0
23	Paracuru	Sem terra	9616736	502955	3,8	7,0
24	Paracuru	Cabra Morta	9619850	498626	2,0	4,0
25	Paracuru	Pedra Rachada	9623028	498546	6,5	9,0

Figura 34 – Imagem orbital com plotagem dos pontos para realização das sondagens elétricas verticais (SEV) e sondagens mecânicas (SM) – seção 1 da área pesquisada



Figura 35 – Imagem orbital com plotagem dos pontos para realização das sondagens elétricas verticais (SEV) e sondagens mecânicas (SM) – seção 2 da área pesquisada



Figura 36 – Imagem orbital com plotagem dos pontos para realização das sondagens elétricas verticais (SEV) e sondagens mecânicas (SM) – seção 3 da área pesquisada



9. Altimetria

O levantamento planialtimétrico tem o propósito de estabelecer as cotas topográficas da superfície onde se situam os poços cadastrados. Tais cotas irão auxiliar na determinação das cotas piezométricas e conseqüentemente do sentido do fluxo da água subterrânea na área pesquisada. O nivelamento foi executado com a utilização de GPS geodésico.

O levantamento Planialtimétrico foi realizado com a utilização de receptores geodésicos (L1/L2) do sistema GPS (global position system), com precisão nominal de 5mm + 1ppm. O produto final apresentado é planta na escala de 1:40.000.

9.1. Metodologia do levantamento planimétrico

Foram estabelecidas três estações, utilizadas como referência (apoio básico) geodésica para o levantamento planialtimétrico dos 100 poços. As coordenadas das estações de referências foram determinadas pelo método de Posicionamento Preciso por Ponto (PPP), serviço administrado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, obedecidas normas e procedimentos que regem a cartografia e geodésia no país.

As coordenadas planialtimétricas E (Este), N (Norte) e H (Ortométrica) de todos os pontos nas seções transversais foram referenciadas aos data geodésicos SIRGAS2000 e Marégrafo de Imbituba/SC, respectivamente data horizontal e vertical do Sistema Geodésico Brasileiro - SGB.

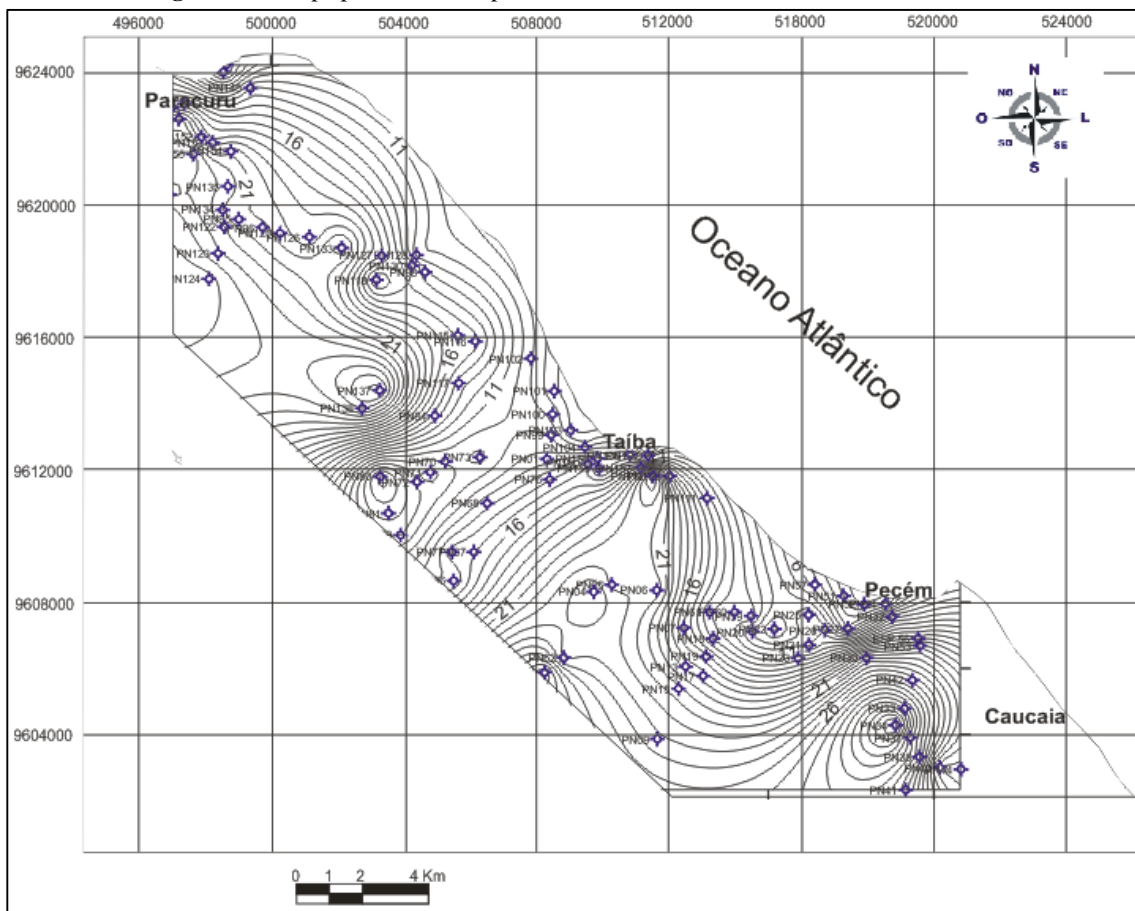
Para a aplicação do método de rastreamento por satélite, foi efetuado reconhecimento da área a ser levantadas, para identificação das condições de observação com vistas à boa recepção do sinal dos satélites. Todos os resultados analisados em relatórios atenderam às seguintes especificações:

- O apoio terrestre planialtimétrico (E,N,H) da área de trabalho foi determinado a partir do Método de Posicionamento Preciso por Ponto (PPP), integrante da Rede de Apoio Geodésico Fundamental, determinado pela Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – FIBGE;
- Para o rastreamento por receptores geodésicos, para a determinação de coordenadas planialtimétricas dos 100 poços, objeto de Contrato, foi adotado o método estático relativo;

- O cálculo e ajustamento das observações GPS, na determinação de coordenadas dos pontos planialtimétricos (E, N, H), foram efetuados por programas proprietários, com base no Sistema de Projeção UTM (Universal Transverso de Mercator);
- Todos os dados foram analisados estatisticamente nos relatórios de processamento de dados observados, adotando-se como referência base a tolerância de 68%;
- As observações, para determinações altimétricas, foram referenciadas ao *datum* vertical Marégrafo de Imbituba-SC, pertencente ao Sistema Geodésico Brasileiro;
- A determinação de pontos, dispostos em seções transversais, com espaçamento de 100m, tinha por objetivo estabelecer Modelos Digitais do Terreno, para determinação de curvas de níveis com equidistância de 1m.

Para interpolação das curvas de nível utilizou-se o programa Surfer 9.0. O mapa gerado está apresentado na figura 37. Este mapa apresenta equidistância entre curvas de nível de 1m e as cotas topográficas variam de 2,6 nas áreas de depressão a aproximadamente 37 metros no topo das dunas mais elevadas (Figura 37).

Figura 37 – Mapa planimétrico e pontos utilizados no levantamento da área estudada



10. Batimetria da Lagoa do Pecém

Estudos de batimetria estão associados á medidas de profundidades de uma massa de água como os mares, lagos, rios (topografia do fundo imerso). A batimetria é expressa cartograficamente por curvas batimétricas que são curvas que unem pontos de mesma profundidade com equidistâncias verticais, à semelhança das curvas de nível topográfico.

A batimetria na Lagoa do Pecém consistiu do levantamento de dados com o objetivo de obter a tabela Cota x Área x Volume do reservatório.

Na área em apreço realizou-se a delimitação de sua bacia hidráulica com um GPS e coletaram-se diversos pontos dentro do reservatório. Para cada um destes pontos, obteve-se sua profundidade e coordenadas, com auxílio de um Ecobatímetro e GPS.

Depois de concluída a malha, realizou-se o processamento dos dados com objetivo de gerar as curvas de nível que caracterizam o substrato do reservatório. Com base nestes dados podem-se obter os volumes e áreas em relacionadas a cada cota.

Após o levantamento do contorno da bacia hidráulica da Lagoa do Pecém, foram definidas as linhas base para a coleta dos dados XYZ. Seguindo as linhas base pré-definidas, a coleta dos pontos foi realizada, através de barco a motor, com velocidade constante de 3 km/h.

Utilizou-se neste levantamento um ecobatímetro de dupla frequência GPS PLOTTER ECHOSOUNDER FURUNO GP-1650. Este equipamento possui precisão de 10 cm nas medições de profundidade. Acoplado ao ecobatímetro foi utilizado um par de GPS Geodésico L1/L2 LEICA GPS900. Para a coleta dos dados de profundidade foi utilizado o programa FUGAWI 3. O pós-processamento dos dados de posicionamento foi realizado através do programa LEICA Geo Office Combined. A partir da junção dos dados de profundidade e posicionamento de cada ponto em uma tabela, foram utilizados para a criação do modelo digital e curvas de nível os programas AUTOCAD 2000 e ArcGis 9.3.

Dados do levantamento batimétrico

Cota do Nível D'água: 100,00 m

Pontos Coletados na Bacia Hidráulica: 1.128

Área Bacia Hidráulica: 4,67 ha

Perímetro Bacia Hidráulica: 977,11 m

Profundidade Máxima: 5,28 m

O espelho d'água da Lagoa do Pecém representa uma exposição do nível freático associado ao aquífero Dunas/Paleodunas. Desta forma a batimetria fornece informações das dimensões do reservatório e volumes armazenados em superfície. O mapa resultante da batimetria na Lagoa do Pecém está apresentado na figura 39. Identificou-se que suas cotas batimétricas variam de 94 a 100m. As áreas e volumes de armazenamento para cada nível batimétrico estão apresentados na Tabela 14 e o gráfico que reúne as informações de cota batimétrica, área e volume está apresentado na figura 38. Obteve-se um valor de 280.205,80 m³ de água armazenada atualmente na Lagoa do Pecém.

Tabela 14 – Cotas batimétricas com respectivas áreas e volumes associados referentes à Lagoa do Pecém

COTA (m)	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)
94,72	0,000	0,000
95,00	217,078	19,250
95,50	1.118,916	335,609
96,00	3.524,063	1.369,167
96,50	7.253,579	4.077,406
97,00	10.664,911	8.588,305
97,50	13.969,053	14.691,292
98,00	18.448,926	22.796,949
98,50	23.772,690	33.301,582
99,00	30.248,174	46.765,482
99,50	37.639,245	63.697,907
100,00	46.701,670	84.562,849
	TOTAL	280.205,80

Figura 38 - Gráfico que reúne as informações de cota batimétrica, área e volume da Lagoa do Pecém

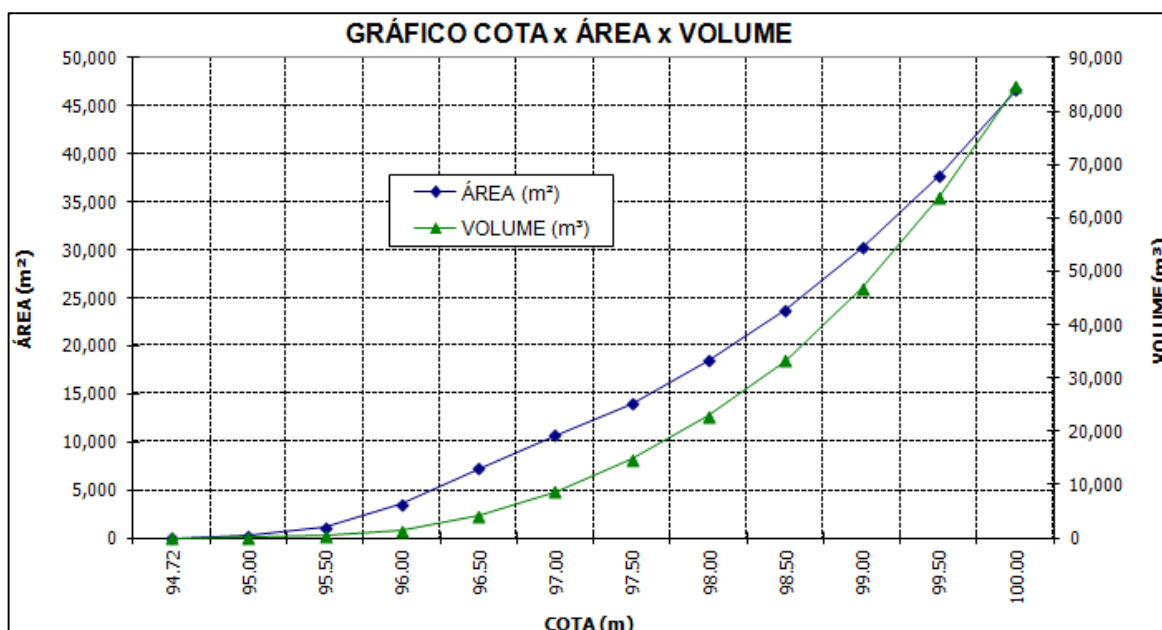
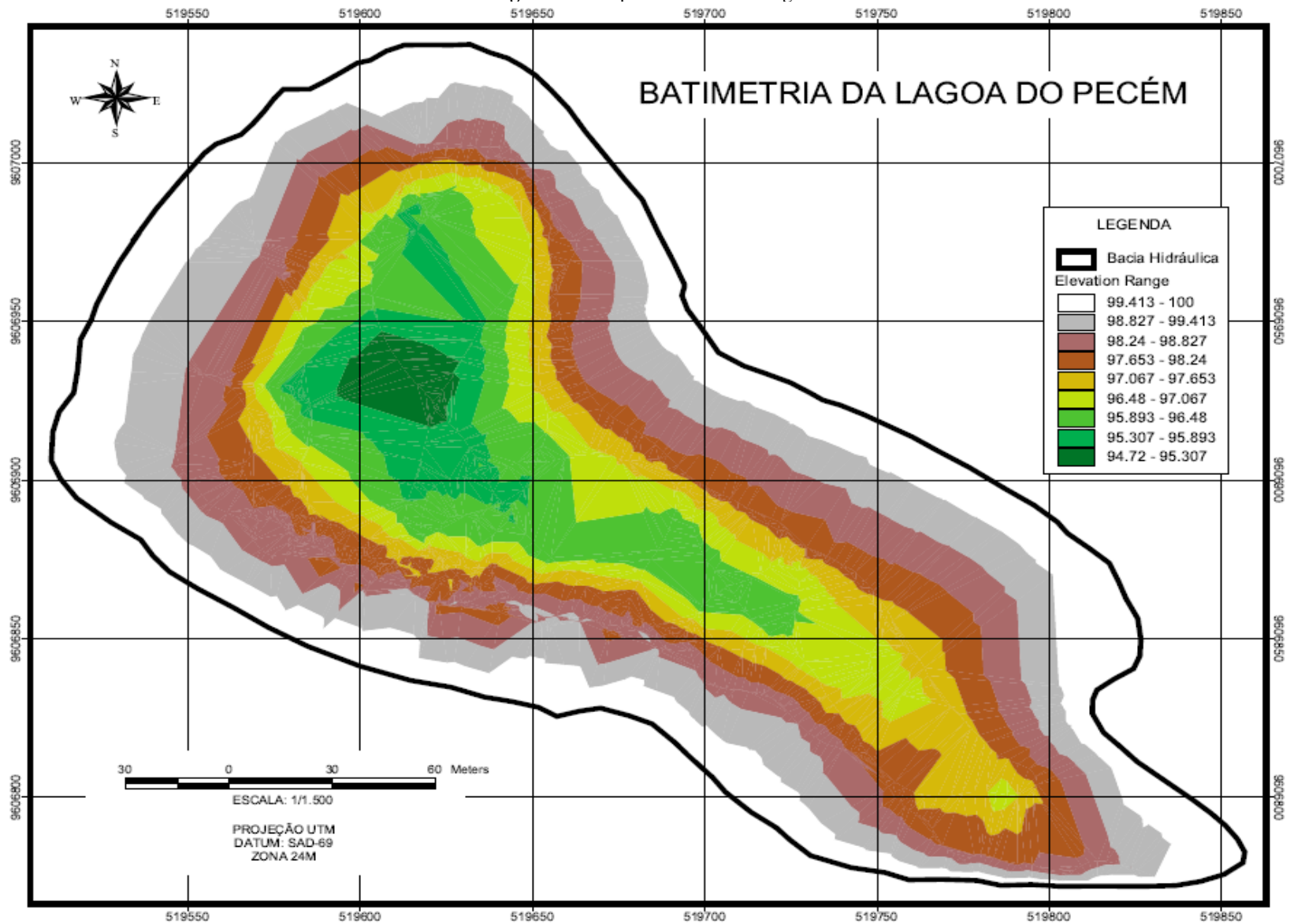


Figura 39 – Mapa batimétrico da Lagoa do Pecém



11. Conclusões

Os estudos realizados no projeto em apreço elucidaram a respeito das condições hidrogeológicas, no que se refere às condições de armazenamento, reservas disponíveis e condições de exploração. Os principais resultados são:

A potenciometria do aquífero livre representado pelo sistema Dunas/Paleodunas evidenciou a zona de recarga (gradientes hidráulicos mais elevados) associada aos altos topográficos, enquanto que a zona de descarga é compreendida pela região do baixo curso do rio Siupé. As cotas piezométricas na área têm valores médios que variam de 2 a 30 m, indicando grande amplitude de cotas do aquífero livre na área, algumas praticamente ao nível do mar.

Existe uma equivalência entre a variação da topografia e a do nível piezométrico. Nas áreas topograficamente mais elevadas (dunas) os níveis piezométricos também se mostram a altitudes mais elevadas (da ordem de 30m). Nas áreas de depressões, representadas pelas calhas das principais drenagens, os níveis piezométricos apresentam suas altitudes menores (da ordem de 2m). Conclui-se que o fluxo é descendente em direção às drenagens fluviais, bem como em direção ao nível do mar.

A modelagem subterrânea do aquífero mostra uma reserva permanente da ordem de $3,57 \times 10^8 \text{ m}^3$, e, mesmo depois de cinco anos de seca (2012-2016), nota-se que para a região litorânea a precipitação no mesmo período foi sempre acima da média, o que confere uma elevada confiabilidade aos dados obtidos. Foi realizado uma atualização do balanço hídrico para avaliar esses anos de seca, porém, como já esperado, devido a pluviometria ter ficado acima da média a reserva renovável não sofreu as conseqüências da "estiagem prolongada". Assim, a reserva renovável atualizada é da ordem de $8,59 \times 10^7 \text{ m}^3$.

As lagoas presentes representam uma exposição do nível freático da região quando se encontra em sua carga hidráulica máxima. As condições de exploração nas lagoas interdunares devem ser tratadas com critérios que possam promover a estabilidade deste ambiente. Nessas situações existem riscos que podem estar associados à exploração inadequada, superiores a demanda do aquífero, ou ainda, no que se refere à poluição das águas, pois os espelhos das lagoas representam o acesso direto para o aquífero Dunas/Paleodunas. Interferências na estabilidade destas águas por aporte de contaminantes pode acarretar na dispersão dos mesmos por todo o aquífero condicionados ao fluxo subterrâneo.

Existe na região um aproveitamento intenso do recurso hídrico subterrâneo, seja por captação em poços tubulares ou do tipo amazonas, ou ainda, através de captações diretas instaladas nas várias lagoas que expõem o nível freático à superfície.

Conclui-se que o potencial aquífero no sistema Dunas/Paleodunas é muito superior à demanda da região. Ainda considerando-se a utilização da água subterrânea para fins industriais, pode-se verificar que o aquífero fornece potencialidade para tal. No entanto, deve-se salientar que é de grande importância a orientação quanto às formas de exploração do recurso, no que se refere à instalação de obras de captação e volumes extraídos.

Mesmo com intensa exploração do aquífero não se identificou um rebaixamento significativo dos níveis das águas nas lagoas, no entanto é necessária uma avaliação mais detalhada através de medições das cotas dos espelhos d'água dessas lagoas ao longo de séries históricas mais amplas, promovendo a possibilidade de avaliação das oscilações dos níveis em função das taxas de precipitação. A condição constatada de exploração da água subterrânea através das lagoas inseridas no Sistema Dunas/Paleodunas fornece subsídio para denotar um potencial aquífero extremamente elevado.

Para garantir a estabilidade do manancial subterrâneo, sugere-se uma distância mínima de 100 metros entre os poços de captação. Esta distância considera a elevada porosidade do aquífero Dunas/Paleodunas e a possibilidade de aumento na demanda da região em decorrência do crescimento industrial.

Para se viabilizar novos pontos de captação é necessário determinar as vazões de produção através de testes de aquífero realizados nos locais de perfuração. Os poços de captação devem ser acompanhados de piezômetros posicionados em média a 3 metros de distância para monitoramento da abrangência do cone de rebaixamento do nível da água.

Sugere-se redimensionamento das captações com adaptações de centrais de armazenamento (caixas d'água) e redes de distribuição. Esta sugestão se adéqua às captações para abastecimento humano, podendo facilitar o controle adequado por parte da companhia de gestão, no que se refere à construção de novas obras, volumes extraídos e qualidade da água. Deve ser priorizada a regularização das obras de captação e viabilizada a fiscalização destas unidades.

Pode-se abordar como áreas alvo aquelas que apresentaram camadas saturadas mais espessas. As captações devem ocorrer em poços que interceptam o domínio Dunas/Paleodunas. Poços mais profundos que captam águas armazenadas nas rochas do Grupo Barreiras devem ser evitados, por possuírem menor potencial que o domínio

sobrejacente. Outra área potencial à captação é associada às lagoas que representam exposição do nível freático.

As análises dos resultados das interpretações das Sondagens Elétricas Verticais mostram que a maioria possui um caráter genérico o que pode refletir uma litologia típica de ambientes costeiros com apenas 4 camadas, onde primeiramente temos uma camada arenosa seca resistiva, seguida de uma zona de resistividade tênue saturada e de uma camada argilosa condutiva tendo o substrato cristalino em sotoposição com alta resistividade.

O aquífero freático Dunas/Paleodunas, associado à segunda camada geoeletrica, mostrou-se com espessura variando de 2,8m a 23,3m (espessura média de 10,4m). A superfície média do nível freático é de 4,9m atingindo-se até 31,8m de profundidade.

O levantamento batimétrico na Lagoa do Pecém resultou num valor de 280.205,80 m³ de água armazenada atualmente (2011).

12. Bibliografia

Alvarez, C; Cruz, W.B; Peixoto, C.A.M. 1976. Modelo matemático do aquífero Beberibe. SUDENE. CONESP – OESA. Recife.

Banco do Nordeste, PRODETUR/NE II. http://www.bnb.gov.br/content/aplicacao/prodetur/downloads/docs/ce_3_vol_1_5_analise_infraestrutura_agua.pdf. Acessado em: 23 de novembro de 2012.

Braga, A.C.O. 2005. Métodos geoeletricos aplicados em estudos de contaminação de solos e águas subterrâneas por derivados de hidrocarbonetos. Projeto de pesquisa – Modalidade Individual. FAPESP. 58p.

Brandão, R.L. 1995. Projeto SINFOR: Diagnóstico geoambiental e os principais problemas de ocupação do meio físico da Região Metropolitana de Fortaleza. CPRM. REFOR, 105 p.

Castany, G. 1975. Prospecção e Exploração de Águas Subterrâneas. Editora Omega S. A. Barcelona. Espanha. 738pp.

Cavalcante, I.N. 1998. Fundamentos para o uso integrado dos recursos hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará. Tese de Doutorado. Inédita. IG/USP. São Paulo – SP.160p.

Cavalcante, I.N.; Araújo, A. L. 1990. Qualidade das águas subterrâneas de Fortaleza - CE. Revista de Geologia da UFC, Fortaleza – CE. v.3 p. 89-97.

Costa, R.C. 2002. Aspectos hidrogeológicos do sistema Dunas/Paleodunas da costa leste do município de Fortaleza. Relatório de Graduação. UFC. Fortaleza. 77p.

Custódio, E. & Llamas, M. 1976. Hidrologia Subterrânea. Editora Omega S. A. Casanova. Barcelona. Espanha. 220pp.

Feitosa, F. A. C.; FILHO, J. M. 2001. Hidrogeologia: Conceitos e aplicações. CPRM Serviço. Geológico Nacional, 412p.

FUNCEME. <<http://www.funceme.br/index.php/areas>> Acessado em: 03 jun 2011

Lisboa, M. S. 2002. Estudos geoeletricos/hidrogeológicos da porção costeira da bacia do rio São Gonçalo-Ce. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – Ce. Dissertação de Mestrado. 101p.

Lucena, L. R. F. ; Rosa Filho, E. F. & Bittencourt, A. V. L., 2004. A Potenciometria do Aquífero Barreiras no Setor Oriental da Bacia do Rio Pirangi-RN e Considerações sobre a Relação com Mananciais Superficiais. Revista Águas Subterrâneas. 18:19-27.

Monteiro, A.B. 2000. Modelagem do fluxo subterrâneo nos aquíferos da planície e seus encaixes. Universidade Federal de Pernambuco. Recife – Pe. Dissertação de Mestrado. 104p.

Orellana, E. 1972. Prospecção Geoeletrica em Corriente Continua. Ed. Paraninfo, Madrid, 523p.

Silva, C. R. 2009. O efeito da escala espacial do modelamento hidrológico. Universidade Federal de Goiás. Escola de Engenharia. Goiânia – Goiás. Dissertação de Mestrado. 95pp.

Silva, L. F. 1986. <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAPUAAD/apostila-balanco-hidrico>>. Acessado em: 12 jun 2011.

Tomaz, P. 2006.<http://www.infinitygs.com.br/livros/livro2_infiltracao_balanco_hidrico.pdf> Balanço Hídrico. Acessado em: 09 jun 2011

Tucci, C.E.M. 1998. Modelos Hidrológicos. Editora da UFRGS. ABRH. Rio Grande do Sul. 650pp.

USGS. <<http://www.usgs.gov/>> Acessado em: 04 jun 2011.

Vasconcelos, S.M.S. 1996. Estimativa da Recarga Subterrânea a partir do Balanço Hídrico – Exemplo de Fortaleza (CE). Revista de Geologia, UFC, 6 (1): 27-34.

Vilella, S. M. 1975. Hidrologia Aplicada; Editora MC. GRAW–HILL Ltda.1975. 245pp.