



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO WTF PARA ESTIMATIVA DA
RECARGA DO AQUÍFERO LIVRE DA REGIÃO DA BACIA DO RIO
GRAMAME E DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA/PB**

Por

Lucila Araújo Fernandes

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Julho de 2017



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO WTF PARA ESTIMATIVA DA
RECARGA DO AQUÍFERO LIVRE DA REGIÃO DA BACIA DO RIO
GRAMAME E DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA/PB**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Lucila Araújo Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida

João Pessoa – Paraíba

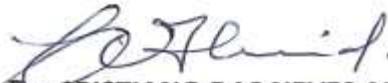
Julho de 2017

**"APLICAÇÃO DO MÉTODO WTF PARA ESTIMATIVA DA RECARGA DO AQUÍFERO
LIVRE DA REGIÃO DA BACIA DO RIO GRAMAME E DO BAIXO CURSO DO RIO
PARÁIBA/PB"**

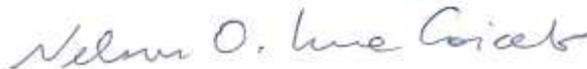
LUCILA ARAÚJO FERNANDES

Dissertação aprovada em 28 de julho de 2017

Período Letivo: 2017.1



**Prof. Dr. CRISTIANO DAS NEVES ALMEIDA - UFPB
(Orientador)**



**Prof. Dr. NELSON OSWALDO LUNA CAICEDO - UFPB
(Membro Interno)**



**Prof. Dr. EDSON CEZAR WENDLAND – USP/EESC
(Membro Externo)**

**João Pessoa/PB
2017**

F363a

Fernandes, Lucila Araújo.

Aplicação do método WTF para estimativa da recarga do aquífero livre da região da bacia do Rio Gramame e do baixo curso do Rio Paraíba/PB / Lucila Araújo Fernandes. – João Pessoa, 2017.

142 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida.

Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT/PPGECA

1. Engenharia urbana e ambiental.
2. Água Subterrânea.
3. Monitoramento – poços.
4. Método WTF.
5. Bacia sedimentar.
6. Recarga - aquífero. I. Título.

UFPB/BC

CDU – 62:711 (043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Alba Lygia, pelo amor, pela confiança, por acreditar em mim e por ser a pessoa mais importante da minha vida. Ao meu padrasto Tadeu pelo apoio e incentivo na busca pelo conhecimento. À toda minha família pelo carinho e acolhimento;

A Lenildo, por todo incentivo, paciência, por ser suporte nas horas em que eu mais precisei e por ser minha fonte de energia para a realização e conclusão deste trabalho;

Agradeço especialmente aos colegas do LARHENA, que foram essenciais à realização desta pesquisa, pelas idas à campo, pelos conselhos e discussões que engrandeceram este trabalho: Geraldo Moura, com quem dividi mais de perto a jornada do mestrado; Romero Barbosa, que, com sua grande sagacidade, sempre contribuiu enormemente para esta pesquisa; André Gadelha, por sua disposição para nos ajudar nos trabalhos de campo; Victor Coelho, que me ajudou com todo seu conhecimento e experiência em recarga de aquíferos; Jaqueline Coutinho, Emerson Freitas, Diego Galdino e Euler Gonçalves, pela convivência. Sem vocês, essa pesquisa não teria sido possível;

Gostaria de agradecer mais que especialmente a Edilson Edimar, técnico do laboratório que, com seu bom humor, suas histórias e seu vasto conhecimento, sempre nos acompanhou e foi essencial nos trabalhos de campo;

Agradeço com muito carinho a cada um dos moradores dos sítios, que sempre abriram suas casas e seus poços para que nós pudéssemos desenvolver este trabalho. Obrigada por sempre nos receberem com uma rica variedade de frutas e boas conversas;

Agradeço também aos colegas que fazem parte do projeto BRAMAR pela troca de conhecimentos, em especial: Eduardo Bernardo, Florian Walter, Saskia Schimmelpfenning, Ta Duy Phuong e Mateus Tresinari;

Aos demais colegas do PPGE CAM, que durante a esse período dividiram comigo os desafios e os prazeres da pós-graduação;

Agradeço a todos os professores e professoras do programa pelo conhecimento compartilhado, em especial ao Prof. Nelson Caicedo, por todo aprendizado e contribuição a esta pesquisa;

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Cristiano das Neves Almeida, pela sugestão do tema, pelos valiosos conhecimentos transmitidos e pela confiança que me foi depositada.

Agradeço à capes pela bolsa de estudo concedida e ao projeto BRAMAR pelo apoio financeiro, que propiciaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi estimar a recarga do aquífero livre da bacia do rio Gramame e do baixo curso do rio Paraíba, localizados no Nordeste do Brasil, utilizando o método *Water Table Fluctuation* - WTF. Esta área de estudo foi definida no âmbito do projeto de pesquisa e cooperação internacional, o projeto BRAMAR (Estratégias e Tecnologias para Mitigação da Escassez Hídrica do Nordeste do Brasil). A aplicação desse método é simples e necessita de dados de variação do nível estático (Δh) e do rendimento específico do aquífero (S_y). A recarga foi estimada para o ano de 2016, no entanto o monitoramento foi iniciado em outubro de 2015. O monitoramento foi realizado manualmente e em alguns poços foram instalados sensores que medem o nível da água em um intervalo de tempo de 15 minutos. Os poços monitorados são do tipo tubulares e do tipo amazonas (ou cacimbões), que são poços rasos e com diâmetro, em média, de 1,70 m. Foram monitorados 39 poços, sendo 20 cacimbões e 19 tubulares. O coeficiente de rendimento específico, assim como outros parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, foram determinados através de testes de bombeamento. A análise dos dados obtidos nos testes de bombeamento dos poços tubulares foi feita através do *software AQTESOLV Demo*, e os dados dos testes realizados em cacimbões foram analisados pelo método de Papadopulos & Cooper. Os resultados obtidos dos ensaios de bombeamento apresentaram valores de coeficiente de armazenamento - S variando entre 0,04 e 0,13. Os valores de transmissividade - T oscilaram entre $8,53 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e $9,51 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, que são valores coerentes com a literatura. A recarga direta anual nos poços variou entre 41,33 mm e 426,47 mm, com uma média, para a região estudada, de 184,88 mm, que representa 11,70% da precipitação média da região estudada, que foi de 1.579,73 mm no período analisado. Recomenda-se a continuação do monitoramento do nível estático na área de estudo, bem como um aprofundamento das análises dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, de modo a dar subsídio à gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos da região.

PALAVRAS-CHAVE: Água Subterrânea, Recarga, Método WTF, Monitoramento, Bacia sedimentar costeira.

ABSTRACT

The main objective of this work is to estimate the free aquifer recharges of the Gramame river basin and the Baixo Paraíba river basin, located in the Northeast region of Brazil, using the Water Table Fluctuation - WTF method. This study area was defined within the scope of an international research and cooperation project, the BRAMAR project (Strategies and Technologies for Mitigation of the Water Scarcity in Northeast Brazil). The application of this method is simple and requires the static level variation data (Δh) and the specific yield value of the aquifer (S_y). The recharge was estimated for 2016; however, the monitoring step started in October 2015. The monitoring process was carried out manually and sensors that measure the water level in a time step of 15 minutes were installed in some wells. The monitored wells are tubular and “cacimbão”, which are shallow wells of 1.70 m average diameter. A total of 39 wells were monitored, of which 20 are large diameter wells and 19 are tubular. The specific yield coefficient, as well as other hydrodynamic parameters of the aquifer, were determined by pumping tests. The pumping test data of the tubular wells were analyzed using the software AQTESOLV Demo, and the pumping test data of the large diameter wells were analyzed using the Papadopulos & Cooper method. The results obtained from the pumping tests showed storage coefficient – S values – ranging from 0.04 to 0.13. The transmissivity – T values – ranged from $8,53 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ and $9.51 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. The annual direct recharge in the wells ranged between 41.33 mm and 426.47 mm, with an average of 184.88 mm for the studied area, representing 11.70% of the average precipitation, which was 1,579.73 mm. Maintenance of the static level monitoring is recommended, as well as a deeper analysis of the hydrodynamic parameters of the aquifer, in order to subsidize the sustainable management of groundwater resources in the region.

KEYWORDS: Groundwater, Recharge, WTF Method, Monitoring, Coastal Sedimentary Basin.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS	19
2.2	RECARGA DE AQUÍFEROS	23
2.2.1	<i>Métodos de estimativa de recarga subterrânea</i>	<i>23</i>
2.2.2	<i>Estudos de caso</i>	<i>26</i>
2.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
3	ÁREA DE ESTUDO	28
3.1	LOCALIZAÇÃO	28
3.2	GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA	29
3.3	CLIMA	32
3.4	USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL.....	33
4	MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1	CADASTRAMENTO DOS POÇOS E MONITORAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO	37
4.1.1	<i>Monitoramento manual</i>	<i>38</i>
4.1.2	<i>Monitoramento por sensores</i>	<i>39</i>
4.2	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DO AQUÍFERO.....	41
4.2.1	<i>Teste de bombeamento</i>	<i>41</i>
4.2.1.1	<i>Método de Papadopoulos & Cooper.....</i>	<i>42</i>
4.2.1.2	<i>Método de Theis</i>	<i>44</i>
4.2.1.3	<i>Método de Neuman</i>	<i>46</i>
4.2.1.4	<i>Método de Moench.....</i>	<i>48</i>

4.3	DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SEMELHANTE.....	49
4.4	RECARGA DIRETA – MÉTODO WTF	50
4.5	DADOS DE PRECIPITAÇÃO	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1	PRECIPITAÇÃO	53
5.2	REDE DE MONITORAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO	57
5.3	ANÁLISE DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL FREÁTICO	62
5.4	PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DO AQUÍFERO	68
5.4.1	<i>Poços tubulares</i>	69
5.4.2	<i>Poços cacimbão</i>	82
5.5	ZONAS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SEMELHANTE	86
5.6	RECARGA DIRETA DO AQUÍFERO PELO MÉTODO WTF.....	92
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	ANEXO 1.....	112
	APÊNDICE A	128
	APÊNDICE B.....	131
	APÊNDICE C	136
	APÊNDICE D	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo.....	29
Figura 2 – Bacia Sedimentar Paraíba (Fonte: Barbosa, 2007)	30
Figura 3 – Estratigrafia da Sub-Bacia Alhandra (Fonte: Furrier <i>et al.</i> , 2006).....	31
Figura 4 – Mapa geológico da área de estudo (Fonte: adaptado de AESA, 2017).....	32
Figura 5 - Distribuição média mensal da precipitação	33
Figura 6 - Mapa de uso e ocupação	34
Figura 7 – Esquema da metodologia da pesquisa.....	37
Figura 8 - Medição manual do nível freático realizada no poço P11	39
Figura 9 - Equipamentos de medição de nível da Ampeq (Fonte: Ampeq, 2015)	40
Figura 10 – Equipamentos de medição automática da SWS	41
Figura 11 – Representação idealizada de um poço aberto em um aquífero artersiano	43
Figura 12 - Família de curvas padrão de Papadopulos	44
Figura 13 – Esquema do método de Theis (Fonte: AQTESOLV, 2017)	45
Figura 14 – Esquema do método de Neuman (Fonte: AQTESOLV, 2017).....	47
Figura 15 – Esquema do método de Moench (Fonte: AQTESOLV, 2017)	48
Figura 16 – Demonstração da diferença de altura entre o pico de elevação da curva observada e a curva de recessão extrapolada.....	51
Figura 17 – Determinação das áreas de influência dos postos pelo método de Thiessen ...	54
Figura 18 – Distribuição espacial da precipitação do ano 2015	56
Figura 19 – Distribuição espacial da precipitação do ano 2016.....	57
Figura 20 - Localização dos poços monitorados	60
Figura 21 – Variação do nível da água no poço P01	63
Figura 22 – Variação do nível da água no poço P28.....	63
Figura 23 – Variação do nível da água no poço P05	64
Figura 24 – Variação do nível da água no poço P07	64
Figura 25 – Variação do nível da água no poço P11	64
Figura 26 – Variação do nível da água no poço P08.....	65
Figura 27 – Variação do nível da água no poço P10.....	65
Figura 28 – Variação do nível da água no poço P16.....	66
Figura 29 – Variação do nível da água no poço P03	66
Figura 30 – Variação do nível da água no poço P15	67
Figura 31 – Distribuição da variação do nível da água na área de estudo.....	68

Figura 32 – Localização dos poços onde foram realizados os testes de bombeamento	69
Figura 33 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P31	70
Figura 34 – Resultado do teste de bombeamento no P31 - Solução de Neuman	71
Figura 35 – Resultado do teste de bombeamento no P31 - Solução de Theis.....	71
Figura 36 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P32	72
Figura 37 – Resultado do teste de bombeamento no P32 - Solução de Theis.....	73
Figura 38 – Resultado do teste de bombeamento no P32 - Solução de Neuman	73
Figura 39 – Resultado do teste de bombeamento no P32 - Solução de Moench.....	74
Figura 40 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P33	75
Figura 41 – Resultado do teste de bombeamento no P33 - Solução de Theis.....	75
Figura 42 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P36	76
Figura 43 – Resultado do teste de bombeamento no P36 - Solução de Moench.....	77
Figura 44 – Resultado do teste de bombeamento no P36 - Solução de Neuman	77
Figura 45 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P10	78
Figura 46 – Teste de bombeamento no P10 - Solução de Theis para um filtro de 2m.....	79
Figura 47 – Teste de bombeamento no P10 - Solução de Theis para um filtro de 4m.....	79
Figura 48 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P24	80
Figura 49 – Resultado do teste de bombeamento no P24 - Solução de Theis.....	80
Figura 50 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P23	81
Figura 51 – Curva de rebaixamento dos poços P02, P08 e P14.....	83
Figura 52 – Curva de rebaixamento do poço P04	84
Figura 53 – Superposição da curva de rebaixamento do poço P04.....	84
Figura 54 – Curva de rebaixamento do poço P09	85
Figura 55 – Superposição da curva de rebaixamento do poço P09.....	85
Figura 56 – Gráficos de recuperação dos poços tubulares	87
Figura 57 – Gráficos de recuperação dos poços cacimbões	87
Figura 58 – Cacimbões cuja recuperação é rápida	88
Figura 59 – Cacimbões cuja recuperação é moderada	89
Figura 60 – Cacimbões cuja recuperação é lenta	89
Figura 61 – Poços com recuperação semelhante	90
Figura 62 – Comparação entre as zonas de recuperação e os tipos de variação do nível freático.....	91
Figura 63 – Poços onde foi aplicado o método WTF.....	93
Figura 64 – Recarga direta anual do poço P13.....	94

Figura 65– Recarga direta anual do poço P19	94
Figura 66– Recarga direta anual do poço P21	94
Figura 67 – Recarga direta anual do poço P28	95
Figura 68 – Recarga direta anual do poço P23	95
Figura 69 – Recarga direta anual do poço P26	96
Figura 70 – Recarga direta anual do poço P25	96
Figura 71 – Recarga direta anual do poço P04	97
Figura 72 – Recarga direta anual do poço P05	97
Figura 73 – Recarga direta anual do poço P11	98
Figura 74 – Recarga direta anual do poço P22	98
Figura 75 – Recarga direta anual do poço P08	99
Figura 76 – Recarga direta anual do poço P09	99
Figura 77 – Recarga direta anual do poço P17	100
Figura 78 – Recarga direta anual do poço P16	100
Figura 79 – Recarga direta anual do poço P20	101
Figura 80 – Recarga direta anual do poço P07	101
Figura 81 – Recarga direta anual do poço P02	102
Figura 82 – Recarga direta anual do poço P14	102
Figura 83 – Recarga direta anual do poço P06	103
Figura 84 – Distribuição da recarga	105
Figura 85 – Variação do nível freático do poço P01	138
Figura 86 – Variação do nível freático do poço P03	138
Figura 87 – Variação do nível freático do poço P10	138
Figura 88 – Variação do nível freático do poço P12	139
Figura 89 – Variação do nível freático do poço P15	139
Figura 90 – Variação do nível freático do poço P18	139
Figura 91 – Variação do nível freático do poço P24	140
Figura 92 – Variação do nível freático do poço P27	140
Figura 93 – Variação do nível freático do poço P29	140
Figura 94 – Variação do nível freático do poço P30	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de condutividade hidráulica em solos naturais	19
Tabela 2 – Testes de bombeamento realizados no Estudo das Vertentes Litorâneas	20
Tabela 3 – Valores médios dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Beberibe	22
Tabela 4 – Valores médios dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Barreiras	22
Tabela 5 - Métodos de estimativa de recarga	24
Tabela 6 - Estação climatológica operada na área de estudo (Fonte: PDRH, 2000)	33
Tabela 7 – Dados de uso e ocupação do solo	34
Tabela 8 – Informações das estações pluviométricas da área de estudo	52
Tabela 9 – Precipitações anuais das estações pluviométricas	54
Tabela 10 - Informações dos poços utilizados no monitoramento	58
Tabela 11 - Informações dos sensores de medição de nível a cada 15 minutos	60
Tabela 12 – Teste de bombeamento no P31	70
Tabela 13 – Teste de bombeamento no P32	72
Tabela 14 – Teste de bombeamento no P33	75
Tabela 15 – Teste de bombeamento no P36	76
Tabela 16 – Teste de bombeamento no P10	78
Tabela 17 – Teste de bombeamento no P24	80
Tabela 18 – Teste de bombeamento no P23	81
Tabela 19 – Resumo dos valores de coeficientes de armazenamento (S), transmissividade (T) e rendimento específico (Sy) obtidos nos poços tubulares	82
Tabela 20 – Resumo dos valores de coeficientes de armazenamento (S) e transmissividade (T) obtidos nos poços cacimbões	86
Tabela 21 – Equações das curvas de rebaixamento e recuperação	86
Tabela 22 – Recarga calculada pelo método WTF para $S_y = 10\%$	103
Tabela 24 – Modelo da ficha cadastral dos poços	130

LISTA DE ABREVIATURAS

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Climas

BRAMAR – *Brazil Managed Aquifer Recharge*

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CDRM/PB – Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba

CT – Centro de Tecnologia

LARHENA – Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental

ND – Nível dinâmico

NE – Nível Estático

PNRH – Plano Nacional de Recursos Hídricos

PPGECAM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

SWS - *Schlumberger Water Services*

WTF – *Water Table Fluctuation*

LISTA DE SÍMBOLOS

h – Nível d'água

h_0 – Espessura saturada do aquífero antes do início do ensaio de bombeamento

K – Condutividade hidráulica

N_c – Nível do aquífero calculado

P – Número de dias contados a partir do primeiro dia de monitoramento no poço

Q – Vazão

r_w – Raio do poço na zona aquífera

r_c – Raio do revestimento do poço

s – Rebaixamento no poço bombeado

S – Coeficiente de armazenamento

s_c – Rebaixamento corrigido

s_w – Rebaixamento medido no poço

S_y – Rendimento específico

T – Transmissividade

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população global tem aumentando cada vez mais a demanda doméstica, agrícola e industrial de água. Embora o Brasil possua uma grande reserva hídrica, preservar a sua qualidade e quantidade no contexto das bacias hidrográficas deve ser uma prioridade. Exemplos de países desenvolvidos mostram a importância de saber utilizar cada gota d'água disponível ao invés de ostentar a sua abundância (REBOUÇAS, 2001).

No território brasileiro, 90% dos seus rios são classificados como perenes, ou seja, nunca secam (REBOUÇAS, 2002). Isso se deve às contribuições dos fluxos subterrâneos nessas áreas. A água subterrânea que abastece esses rios resulta, principalmente, da infiltração de uma parcela das águas pluviais que precipitam sobre esses terrenos, isto é, do processo de alimentação do aquífero.

Com a escassez das águas superficiais no Nordeste semiárido do Brasil, seja por falta de chuvas regulares, seja pela falta de gestão, a água subterrânea tem sido uma importante fonte hídrica para diversas populações. Verifica-se, no entanto, que nessa região a extração dos recursos hídricos subterrâneos vem sendo feita, muitas vezes, sem uma base de estudos hidrológicos e hidrogeológicos, o que impossibilita a criação de programas de conservação desse recurso (CPRM, 2004). Desta forma, o monitoramento dos aquíferos e o conhecimento das suas características constituem uma ferramenta importante para o desenvolvimento sustentável e o crescimento social e econômico dessas populações. Um grande desafio do estudo dos aquíferos é a estimativa da recarga subterrânea. Diferentemente da precipitação e de outros componentes do ciclo hidrológico, ela não pode ser medida de forma direta (MELO *et al.* 2017).

Embora a criação da Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos - PNRH, tenha proporcionado um avanço na esfera do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, no Brasil ainda são lentos os avanços na área da hidrologia experimental pelo fato de não haver séries longas de dados hidroclimatológicos (IBESA, 2004). Essa situação não se restringe apenas ao nosso país. Países como a África também têm como principal desafio a falta de dados (CHUNG *et al.*, 2016).

O Brasil ainda é carente de informações no que se refere especificamente às águas subterrâneas e sua recarga, já que muitos dados são incompletos ou até inexistentes. O estado

da Paraíba corrobora com essa situação, já que estudos que levantem dados sobre as águas subterrâneas ainda são muito escassos.

Esta pesquisa insere-se no projeto Estratégias e Tecnologias para Mitigação da Escassez Hídrica do Nordeste do Brasil – BRAMAR, um projeto de pesquisa de cooperação bilateral entre o Brasil e a Alemanha. O BRAMAR tem como objetivo melhorar a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Nordeste brasileiro. Entre seus objetivos específicos está a apresentação de estratégias para a recuperação dos níveis freáticos dos sistemas aquíferos do litoral e do interior do Nordeste. Com o propósito de contribuir com o projeto BRAMAR, a área escolhida para este estudo foram as bacias hidrográficas do rio Gramame e a parte do baixo curso do rio Paraíba, localizadas no litoral do estado da Paraíba. Espera-se que esta pesquisa seja útil para o BRAMAR, fornecendo dados de recarga e informações sobre a hidrodinâmica do aquífero livre dessa região.

Diante deste cenário, apresenta-se a seguir os objetivos geral e específicos que este trabalho pretende alcançar.

1.1 Objetivo geral

O objetivo dessa pesquisa é determinar a taxa de recarga direta do aquífero livre das bacias hidrográficas do rio Gramame e de parte do baixo curso do rio Paraíba, localizados no estado da Paraíba, utilizando o método *Water-Table Fluctuation* – WTF.

1.2 Objetivos específicos

- Instalar uma rede de monitoramento para acompanhar a variação do nível da água subterrânea na área de estudo;
- Monitorar a variação do nível do lençol subterrâneo da área de estudo;
- Determinar propriedades hidrodinâmicas do aquífero;
- Determinar zonas de condutividade hidráulica semelhantes na área de estudo;
- Estimar a taxa de recarga direta do aquífero livre.

1.3 Estrutura da dissertação

O referido trabalho está estruturado em 6 capítulos. O capítulo que introduz a pesquisa apresenta um panorama geral do tema abordado, expondo os problemas e indicando quais os objetivos se pretende atingir ao final do trabalho. O capítulo 2 faz um levantamento dos principais trabalhos publicados acerca do tema abordado. As características da área estudada, tais como localização, geologia, hidrogeologia e clima são apresentadas no capítulo 3. O capítulo 4 relata a metodologia aplicada neste estudo, os equipamentos utilizados no desenvolvimento da pesquisa e outras informações necessárias à compreensão do trabalho que foi realizado. Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 5, assim como algumas análises e discussões. O capítulo 6 apresenta as considerações finais, traz reflexões sobre a relevância do trabalho e sugere algumas recomendações para trabalhos, que podem ser frutos deste. Para finalizar, há os apêndices com informações adicionais que não foram apresentadas ao longo da dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As águas subterrâneas estão contempladas no Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), estabelecido pela Lei nº. 9.433/97, constituindo o Programa VIII. O PNRH é um instrumento cujo objetivo é estabelecer um pacto nacional para definir diretrizes e políticas públicas voltadas para a melhoria da oferta de água, considerando quantidade e qualidade, gerenciando as demandas e considerando a água um elemento fundamental para a implementação das políticas setoriais.

Segundo o PNRH, o monitoramento da qualidade e da quantidade das águas subterrâneas é um dos instrumentos mais importantes para a conservação do recurso hídrico subterrâneo, pois ele dá suporte às estratégias, ações preventivas e políticas de uso da água (MMA/SRHU, 2008).

2.1 Parâmetros hidrodinâmicos

O conhecimento dos parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero é essencial para o estudo dos recursos hídricos subterrâneos de uma determinada região. De modo geral, os parâmetros principais a serem considerados são a condutividade hidráulica, a transmissividade e o coeficiente de armazenamento. Estes parâmetros podem ser determinados de diversas maneiras, entre elas, os testes de aquífero.

A condutividade hidráulica (K) é definida como a vazão que atravessa uma seção unitária sob gradiente hidráulico também unitário (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983; FETTER, 1994; WEIGHT, 2008; FEITOSA *et al.*, 2008). Ela também pode ser entendida como a maior ou menor facilidade com que a água se move através dos vazios do meio poroso. Este parâmetro é expresso em m/s ou m/d. A Tabela 1 mostra uma referência de valores de condutividade hidráulica em diferentes solos naturais.

Tabela 1 – Valores típicos de condutividade hidráulica em solos naturais (Fonte: Powers, 2007)

Tipo de solo	Condutividade hidráulica (m/s)	Classificação condutividade hidráulica
Pedregulho uniforme	2×10^{-3} a 1×10^{-2}	Alta
Pedregulho bem graduado	5×10^{-4} a 3×10^{-3}	Moderada a alta
Areia uniforme	5×10^{-5} a 2×10^{-3}	Moderada a alta
Areia bem graduada	1×10^{-5} a 1×10^{-3}	Baixa a moderada
Areia siltosa	1×10^{-5} a 5×10^{-5}	Baixa

Areia argilosa	1×10^{-6} a 1×10^{-5}	Baixa a muito baixa
Silte	5×10^{-7} a 1×10^{-6}	Muito baixa
Argila	1×10^{-10} a 1×10^{-7}	Muito baixa, quase impermeável

Um outro parâmetro importante dos aquíferos é a transmissividade, simbolizada pela letra T. A transmissividade, como o nome já diz, representa a capacidade de transmissão de água através da espessura saturada do aquífero e pode ser expressa em m^2/s ou m^2/d . Ela é o produto da condutividade hidráulica pela espessura saturada do aquífero b .

O coeficiente de armazenamento, representado pela letra S, é o volume de água liberado ou armazenado dentro do aquífero confinado, por variação unitária do nível potenciométrico, e é um parâmetro adimensional. No caso dos aquíferos livres, corresponde à porosidade efetiva (S_y), isto é, o volume de água drenável em relação ao volume total da camada.

O Estudo de Caracterização e Verificação da Disponibilidade Hídrica da Vertente Litorânea do Estado da Paraíba é um estudo hidrogeológico realizado em 2007 pelo Ministério da Integração Nacional, cujo objetivo é conhecer as características dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na região costeira do estado da Paraíba, com a finalidade de transportar essa água para as regiões semiáridas do estado (COSTA *et al.*, 2007)

Nesse estudo da Vertente Litorânea foram realizados 11 ensaios de bombeamento para a determinação dos valores de condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento. Apenas em dois poços foi possível determinar o coeficiente de armazenamento do aquífero. Os testes foram realizados com bomba submersa, com duração de 24 horas e vazão constante. O rebaixamento e a recuperação foram medidos em intervalos de tempo pré-determinados e os valores dos coeficientes hidrodinâmicos calculados pelo método de Jacob. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos.

Tabela 2 – Resultados dos testes de bombeamento realizados no Estudo das Vertentes Litorâneas (Fonte: Adaptado de Costa *et al.*, 2007)

Local	Município	Aquífero	Prof. (m)	N.E. (m)	N.D. (m)	Vazão (m^3/h)	T (m^2/s)	K (m/s)	S
Hospital Universitário	J. Pessoa	Beberibe	140	43,9	54,7	16,16	2.42×10^{-03}	6.06×10^{-05}	
Cruz das Armas	J. Pessoa	Beberibe	202	46,1	72,1	54,60	1.57×10^{-03}	1.37×10^{-05}	
Alto do Mateus	J. Pessoa	Beberibe	300	44,5	61,8	39,60	7.69×10^{-04}	2.78×10^{-06}	
Loteam. Solimões	J. Pessoa	Barreiras/Beberibe	120	21,8	32,1	15,53	2.57×10^{-03}	3.03×10^{-05}	
Distrito Industrial	J. Pessoa	Beberibe	84	32,9	33,6	27,31	4.11×10^{-03}	6.87×10^{-05}	$1,5 \times 10^{-5}$

Marcação I	Marcação	Beberibe	126	71,6	87,9	18,86	1.07×10^{-03}	1.19×10^{-05}	
Marcação II	Marcação	Beberibe	121	68,8	100	9,43	2.45×10^{-04}	2.66×10^{-06}	
Mata Redonda	Alhandra	Barreiras/Beberibe	100	7,1	31,2	49,50	5.60×10^{-04}	1.40×10^{-05}	
Uruba	Mataraca	Beberibe	122	74,8	77,2	9,10	4.78×10^{-03}	6.22×10^{-05}	
Cajarana	Rio Tinto	Beberibe	102	60,6	69,7	8,61	2.09×10^{-03}	3.50×10^{-05}	
Fagundes	Lucena	Barreiras	20	1,2	11,0	24,00	3.05×10^{-02}	2.40×10^{-03}	$1,2 \times 10^{-4}$

Esse estudo mostrou que a transmissividade no aquífero Beberibe varia entre 21,25 m²/d (ou $2,45 \times 10^{-4}$ m²/s) e 414,26 m²/d (ou $4,78 \times 10^{-3}$ m²/s), com uma média (não significativa) da ordem de 140,12 m²/d (ou $1,62 \times 10^{-3}$ m²/s). A condutividade hidráulica variou entre 0,23 m/dia (ou $2,66 \times 10^{-6}$ m/s) até 5,94 m/dia (ou $6,87 \times 10^{-5}$ m/s). O valor encontrado para o coeficiente de armazenamento foi da ordem de $1,5 \times 10^{-5}$, no município de João Pessoa.

Já no subsistema aquífero Barreiras/Beberibe, os resultados obtidos para o T foram 223 m²/dia (ou $2,57 \times 10^{-3}$ m²/s) e 48,54 m²/dia (ou $5,60 \times 10^{-4}$ m²/s). Os valores de K foram 2,62 m/dia (ou $3,03 \times 10^{-5}$ m/s) e 1,21 m/dia (ou $1,40 \times 10^{-5}$ m/s).

No único poço do aquífero Barreiras, localizado em Lucena, o resultado mostrou a transmissividade da ordem de 2.646 m²/dia (ou $3,05 \times 10^{-2}$ m²/s), condutividade hidráulica de 207,4 m/d (ou $2,40 \times 10^{-3}$ m/s) e coeficiente de armazenamento de $1,2 \times 10^{-4}$.

Outros três estudos foram realizados na bacia sedimentar Pernambuco-Paraíba (COSTA *et al.*, 2007). O primeiro é um estudo realizado pela Acquatool Consultoria, com 20 ensaios de bombeamento. O segundo foi realizado pela CDRM da Paraíba, e consta de 19 ensaios. O último estudo foi realizado no estado de Pernambuco e consta de 152 ensaios de bombeamento.

O estudo realizado pela Acquatool Consultoria apresentou os seguintes resultados: Coeficiente de transmissividade (T) - variou entre 14,59 54 m²/dia (ou $1,69 \times 10^{-4}$ m²/s) e 222,48 m²/dia (ou $2,57 \times 10^{-3}$ m²/s), com média (não significativa) da ordem de 76,45 m²/dia (ou $8,85 \times 10^{-4}$ m²/s), coeficiente de condutividade hidráulica (K) - variou entre 0,26 m/dia e 6,79 m/dia, com média em torno de 1,72 m/dia.

O estudo realizado pela Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba - CDRM constou de 11 ensaios no aquífero Barreiras e 8 no aquífero Beberibe e apresentou os seguintes valores: Aquífero Beberibe: transmissividade (T) - variou desde o mínimo de 15,64 m²/dia (ou $1,0 \times 10^{-5}$ m²/s) ao máximo de 154,65 m²/dia (ou $1,79 \ 63 \times 10^{-3}$ m²/s), com média (não representativa) de 84,33 m²/dia (ou $9,76 \times 10^{-4}$ m²/s), condutividade hidráulica (K) - avaliada em apenas 4 ensaios, variou entre 0,26 m/dia (ou $3,0 \times 10^{-6}$ m/s) e

43,72 m/dia (ou $5,06 \times 10^{-4}$ m/s); Aquífero Barreiras: transmissividade (T) - variou de 5,18 m²/dia (ou $6,0 \times 10^{-5}$ m²/s) ao máximo de 523,58 m²/dia (ou $6,06 \times 10^{-3}$ m²/s), com média (não significativa) de 155,52 m²/dia (ou $1,8 \times 10^{-3}$ m²/s), condutividade hidráulica (K) - avaliada em apenas três ensaios, variou entre 0,86 m/dia a 21,51 m/dia.

O último estudo é um conjunto de 140 ensaios realizados no estado de Pernambuco, sendo 140 ensaios de bombeamento no aquífero Beberibe e 12 ensaios no aquífero Barreiras e apresenta os seguintes valores médios: Aquífero Beberibe: transmissividade (T) - 190,10 m²/dia (ou $2,2 \times 10^{-3}$ m²/s), condutividade hidráulica (K) - 1,9 m/dia (ou $2,2 \times 10^{-5}$ m/s); Aquífero Barreiras: transmissividade (T) - 146,88 m²/dia (ou $1,7 \times 10^{-3}$ m²/s) e condutividade hidráulica (K) - 2,93 m/dia (ou $3,4 \times 10^{-5}$ m/s).

As Tabelas 3 e 4 apresentam um resumo dos valores médios dos parâmetros hidrodinâmicos encontrados nos 4 estudos citados anteriormente, para o aquífero Beberibe e para o aquífero Barreiras, respectivamente, na bacia sedimentar Pernambuco-Paraíba.

Tabela 3 – Valores médios dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Beberibe (Fonte: adaptado de Costa *et al.*, 2007)

Origem do estudo	T		K		S.
	m ² /d	m ² /s	m/d	m/s	s/dimens.
Estudo das Vertentes Litorâneas	140,12	$1,62 \times 10^{-3}$	2,33	$2,69 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$
Número de testes	8		8		1
Estudo da Acquatool	76,45	$8,85 \times 10^{-4}$	1,72	$1,99 \times 10^{-5}$	$1,45 \times 10^{-4}$
Número de testes	20		20		20
Estudo da CDRM	84,33	$9,76 \times 10^{-4}$	15,03	$1,74 \times 10^{-4}$	
Número de testes	8		4		
Estudos no Estado de Pernambuco	190,10	$2,2 \times 10^{-3}$	1,90	$2,2 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-4}$
Número de testes	140		140		-

Tabela 4 – Valores médios dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Barreiras (Fonte: adaptado de Costa *et al.*, 2007)

Origem do estudo	Transmissividade		Condutiv. hidráulica		Armazen.
	m ² /d	m ² /s	m/d	m/s	s/dimens.
Estudo das Vertentes Litorâneas	2.646	$2,4 \times 10^{-3}$	207,4	$2,4 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-4}$
Número de testes	1		1		1
Estudo da CDRM	155,52	$1,8 \times 10^{-3}$	8,64	$1,00 \times 10^{-4}$	
Número de testes	11		11		
Estudos no Estado de Pernambuco	146,88	$1,7 \times 10^{-3}$	2,94	$3,40 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-2}$
Número de testes	12		12		

As tabelas anteriores mostram que é muito difícil estabelecer um valor médio para os coeficientes encontrados por cada um dos estudos, já que os valores oscilam substancialmente. Isso se deve às distintas metodologias utilizadas e aos diferentes métodos de interpretação empregados por cada uma delas.

2.2 Recarga de aquíferos

Estudos focados na estimativa da recarga de águas subterrâneas vêm ganhando espaço desde a década de 1980, e vários métodos vêm sendo desenvolvidos para atingir esse objetivo.

Chung et al. (2016) definem a recarga das águas subterrâneas como sendo o fluxo de água que alcança o aquífero, sendo considerado um adicional ao reservatório de água subterrânea. Ela pode acontecer de forma natural, através da precipitação, por rios, canais e lagos ou por fenômenos induzidos por atividades humanas, como a irrigação e a urbanização (LERNER *et al.*, 1990), sendo a precipitação a principal fonte de recarga.

A medição da flutuação do nível da água é um aspecto muito importante como parte dos estudos de água subterrânea. As oscilações no nível da água podem ser resultado de diversos fenômenos hidrológicos, sejam fenômenos naturais ou provocados pelo homem, podendo haver mais de um mecanismo operando ao mesmo tempo (MAZIERO & WENDLAND, 2008). Um ponto importante a ser observado é a participação de fenômenos que interferem na flutuação do nível d'água, mas que não representam verdadeiramente a recarga subterrânea, como é o caso da evapotranspiração, da variação da pressão atmosférica, variação na temperatura, bombeamento de poços e mudanças naturais ou induzidas na superfície freática (LERNER *et al.*, 1990). Para a disponibilidade hídrica de um aquífero é imprescindível que a exploração não seja maior que a capacidade de recarga.

2.2.1 Métodos de estimativa de recarga subterrânea

Existem atualmente diversos métodos para quantificar a recarga subterrânea, tendo cada método suas próprias limitações em termos de aplicabilidade e confiança (MAZIERO & WENDLAND, 2008). Scanlon *et al.* (2002) mencionam diversas técnicas para a estimativa da recarga de aquíferos, afirmando que a utilização do método apropriado dependerá das metas a serem alcançadas, das escalas de espaço/tempo e da região a ser estudada. As técnicas de recarga frequentemente utilizadas são os métodos físicos, químicos

e modelação numérico-matemática. O estudo de Scanlon *et al.* (2002) divide as estimativas de recarga em três regiões: zona superficial, zona não-saturada e zona saturada. Uma tabela elaborada por Maziero & Wendland (2008) apresentada a seguir especifica cada uma dessas regiões e os seus respectivos métodos de estimativa de recarga (Tabela 5).

Tabela 5 - Métodos de estimativa de recarga (Fonte: Scanlon *et al.*, 2002; Beekman e Xu *in* Xu & Beekman, 2003; entre outros, *apud* Maziero & Wendland, 2008)

ZONA	TÉCNICAS	MÉTODO	DESCRIÇÃO	REFERÊNCIAS
SUPERFICIAL	FÍSICAS	CWB	Aplicação do balanço hídrico a um trecho do canal.	11
		SM	Determinação da taxa de infiltração a partir da variação do volume de água no infiltrômetro.	10
		BF	Separação do escoamento de base a partir da hidrografia de uma seção do canal.	22,26
	TRAÇADORES	Heat	A variação da temperatura pode ser usada para estimativa da recarga.	14,17
		Isotopic	Os isótopos estáveis ^{16}O e ^2H podem ser usados para identificar a recarga de rios e lagos.	19
	NUMÉRICAS	WM	A recarga é estimada como um termo residual do modelo precipitação-escoamento superficial.	15
NÃO-SATURADA	FÍSICAS	Lysimeter	Utilização de lisímetros. No entanto, lisímetros são mais apropriados para cálculo da evapotranspiração.	4, 27
		ZFP	Simplificação do balanço hídrico no solo abaixo do ZPF (gradiente hidráulico vertical é igual a zero).	4, 8, 13, 16
		Darcy's Law	Aplicação da Lei de Darcy. Obs.: A condutividade hidráulica varia com o teor de umidade do solo.	12, 18
	TRAÇADORES	CMB	A recarga é estimada a partir do balanço de massa de cloreto na água de chuva e no perfil do solo.	2, 4, 6, 8, 16
		Historical	Análise da distribuição do traçador (^3H e ^{36}Cl) como um resultado de atividades acontecidas no passado.	2, 4, 8, 17
	NUMÉRICAS	UFM	Simulação do fluxo não-saturado, por exemplo, usando a equação de Richards.	4, 11
SATURADA	FÍSICAS	WTF	As variações do nível d'água são proporcionais a recarga/descarga.	4, 9
		CRD	A resposta do nível d'água para recarga é proporcional à precipitação acumulada.	4, 25

		RIB	Melhoramento do CRD, incorporando ajustes de tendências das séries de precipitação;	24
		SVF	Estima a recarga a partir da variação do volume de armazenamento no aquífero.	4
		EV-SF	Balanço hídrico em escala da bacia hidrográfica.	4
		Darcy's Law	Aplicação da Lei de Darcy.	3
	TRAÇADORES	CMB	A recarga é estimada a partir do balanço de massa de cloreto na água de chuva e na água subterrânea.	1, 5, 7, 15, 23
		GD	A recarga é derivada a partir da presença histórica de traçadores na água subterrânea.	2, 16, 21
	NUMÉRICAS	EARTH	Modelo de parâmetros hidrológicos usado na simulação da recarga e evolução piezométrica.	4, 20
		GM	A recarga é derivada a partir do modelo de fluxo de água subterrânea.	4, 8
CWB: Channel Water Budget		CRD: Cumulative Rainfall Departure		
BF: Baseflow		RIB: Rainfall Infiltration Breakthrough		
SM: Seepage Meters		SVF: Saturated Volume Fluctuation		
ZFP: Zero Flux Plane		EV-SF: Equal Volume – Spring Flow		
CMB: Chloride Mass Balance		GD: Groundwater Dating		
UFM: Unsaturated Flow Modelling		EARTH: Extended model for Aquifer Recharge and Moisture Transport through Unsaturated Hardrock		
WTF: Water Table Fluctuation				
GM: Groundwater Modelling				
¹ Bazuhair e Wood, 1996	¹⁰ Lee e Cherry, 1978	¹⁹ Taylor <i>et al.</i> , 1992		
² Beekman <i>et al.</i> , 1996	¹¹ Lerner <i>et al.</i> , 1990	²⁰ Van der Lee e Gehrels, 1997		
³ Belan e Matlock, 1973	¹² Nimmo <i>et al.</i> , 1994	²¹ Weaver e Talma, 1999		
⁴ Bredenkamp <i>et al.</i> , 1995	¹³ Richards <i>et al.</i> , 1956	²² Wittenberg e Sivapalan, 1999		
⁵ Edmunds e Gaye, 1994	¹⁴ Ronan <i>et al.</i> , 1998	²³ Wood e Sanford, 1995		
⁶ Eriksson e Khunakasem, 1969	¹⁵ Sami e Hughes, 1996	²⁴ Xu e Beekman, 2003		
⁷ Gaye e Edmunds, 1996	¹⁶ Selaolo, 1998	²⁵ Xu e Van Tonder, 2001		
⁸ Gieske, 1992	¹⁷ Stallman, 1964	²⁶ Xu <i>et al.</i> , 2002		
⁹ Healy e Cook, 2002	¹⁸ Stephens e Knowlton, 1986	²⁷ Young <i>et al.</i> , 1996		

Em nível internacional, Delin *et al.* (2007) compararam vários métodos de recarga de aquíferos, entre eles o WTF, comparando-os com o método RRR (*Recharge Regression Regional*). O estudo foi feito na área do estado de Minnesota, nos EUA. Como os métodos utilizaram períodos diferentes de dados, eles não puderam ser comparados diretamente. Segundo o autor, o método WTF foi o mais simples e de fácil aplicação. Muitas vezes os

métodos são utilizados de forma combinada (JIE *et al.* 2011; ABO & MERKEL, 2014; MELO *et al.*, 2017; IZADY *et al.* 2017)

No Brasil, o método WTF foi aplicado com sucesso em diversas regiões, principalmente no estado de São Paulo (WAHNFRIED & HIRATA, 2005; RABELO, 2006; WENDLAND *et al.*, 2007; MAZIEIRO & WENDLAND, 2008; NETO & KIANG, 2008; GOMES, 2008; GOMEZ *et al.*, 2010; LUCAS *et al.*, 2012).

2.2.2 Estudos de caso

O estudo de Wendland *et al.* (2007) foi realizado na bacia hidrográfica de Ribeirão da Onça, inserido no Sistema Aquífero Guarani, utilizando os métodos WTF e *Water Balance* - WB. Os resultados utilizando o método WTF mostraram uma estimativa de recarga entre 313 e 407 mm, correspondente a 22-29% da precipitação total, que foi de 1410mm. Já o método WB mostrou uma porcentagem menor da precipitação sendo convertida em recarga, variando entre 10 e 13%. Em relação à correlação entre os valores estimados e observados, obteve-se um valor próximo a 1, com erros quadráticos da ordem de milímetros.

Ainda em São Paulo, Neto & Kiang (2008) aplicaram o método de flutuação do nível da água para estimar a recarga do aquífero Rio Claro, no município de mesmo nome. O monitoramento foi feito durante um período de quatro anos (2002 a 2005) em poços parcialmente penetrantes. Os resultados mostraram uma variação na recarga de 298 e 636 mm entre os anos 2002 e 2005.

Maziero & Wendland (2008) aplicaram os métodos WTF, Darcy e WB para estimar a recarga do aquífero livre em uma área urbanizada localizada na cidade de São Carlos/SP. Os métodos WTF e de Darcy apresentaram uma taxa média de recarga praticamente igual, além de uma similaridade em relação à taxa individual da recarga dos poços monitorados. No geral, os resultados obtidos nos três métodos foram convergentes, com valores médios de taxas de 14,3%, 16,3% e 17,2%, respectivamente.

No estado da Paraíba, Coelho *et al.* (2012), aplicaram o método WTF para estimar a recarga no aquífero livre da bacia hidrográfica do rio Gramame. Eles realizaram o monitoramento de 27 poços amazonas existentes na região no período de um ano hidrológico, de novembro de 2009 a outubro de 2010. Para a aplicação do método, foi utilizado o valor de rendimento específico de 7%. Foram encontrados valores de recarga variando entre 13,9 e 190,5 mm, representando cerca de 1,2 a 16,2 % da precipitação média

na bacia hidrográfica durante o período de estudo, que foi de 1026 mm. Segundo os autores, os valores encontrados são considerados baixos para uma região úmida e isso pode ser explicado pelo fato do índice pluviométrico no período da pesquisa ter sido abaixo da média anual da área estudada.

Rebouças et al., (1999) afirmam que na região de rochas cristalinas do Nordeste semi-árido, onde as chuvas são muito irregulares, com média entre 400 e 800 mm/ano, a recarga das águas subterrâneas é de cerca de 11mm/ano. Já na região tropical úmida, cuja pluviometria varia entre 800 e 2000 mm/ano, a recarga pode ultrapassar os 600 mm/ano. No clima amazônico, a lâmina infiltrada chega a 1000 mm/ano.

O Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Gramame – PDRH menciona que a alimentação do aquífero Barreiras acontece, exclusivamente, pela a precipitação atmosférica. Sobre a bacia hidrográfica do rio Gramame a precipitação varia entre 1200 a 2000 mm/ano. Deste valor, cerca de 15% é infiltrado e alimenta o lençol subterrâneo. Em comparação com áreas similares do Nordeste, existe a hipótese de que a taxa de infiltração chega a variar entre 10 e 30% da precipitação anual (PDRH, 2000)

De acordo com Rebouças (2001), uma análise do valor médio da taxa de recarga das reservas subterrâneas do Brasil, estimada em 3,4 mil km³/ano, mostra que a utilização de apenas 25% desse valor já representaria uma disponibilidade de 5 mil m³/ano por habitante, enquanto que as Nações Unidas estimam que 2 mil m³/ano/habitante já seria uma taxa de consumo total suficiente para usufruto de boa qualidade de vida, com desenvolvimento sustentado

2.3 Considerações sobre a revisão bibliográfica

Frente aos poucos estudos encontrados sobre a recarga do aquífero livre na bacia hidrográfica do rio Gramame e na região da bacia sedimentar costeira do baixo curso do rio Paraíba, bem como a variação dos valores de coeficientes hidrodinâmicos encontrados, fica mais uma vez evidenciada a necessidade de estudos a serem desenvolvidos nessa região.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

A bacia hidrográfica do rio Gramame e a região do baixo curso do rio Paraíba são áreas litorâneas localizadas na costa do nordeste brasileiro, no leste do estado da Paraíba. Estas áreas são formadas pelo sistema aquífero Beberibe/Barreiras, e fazem parte da Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba.

A bacia hidrográfica do rio Gramame destaca-se por sua importância socioeconômica. Ela é a principal responsável pelo abastecimento da Grande João Pessoa e apresenta diferenças físico-bióticas notórias quando comparada a outras bacias hidrográficas do seu porte na região. Ademais, ela apresenta alto grau de exploração antrópica frente às outras bacias litorâneas do estado, estando mais vulnerável a riscos de contaminação (PDRH, 2000).

A bacia do rio Gramame abrange uma área de 589,1 km² e a região total estudada possui uma extensão de 1.036,07 km². Ela está situada entre as longitudes -34,793364° e -35,214766° e latitudes -6,959107° e -7,404173°, como pode ser visto na Figura 1. Esta área faz parte do projeto BRAMAR e é denominada *João Pessoa Study Case (JPA Study Case)*.

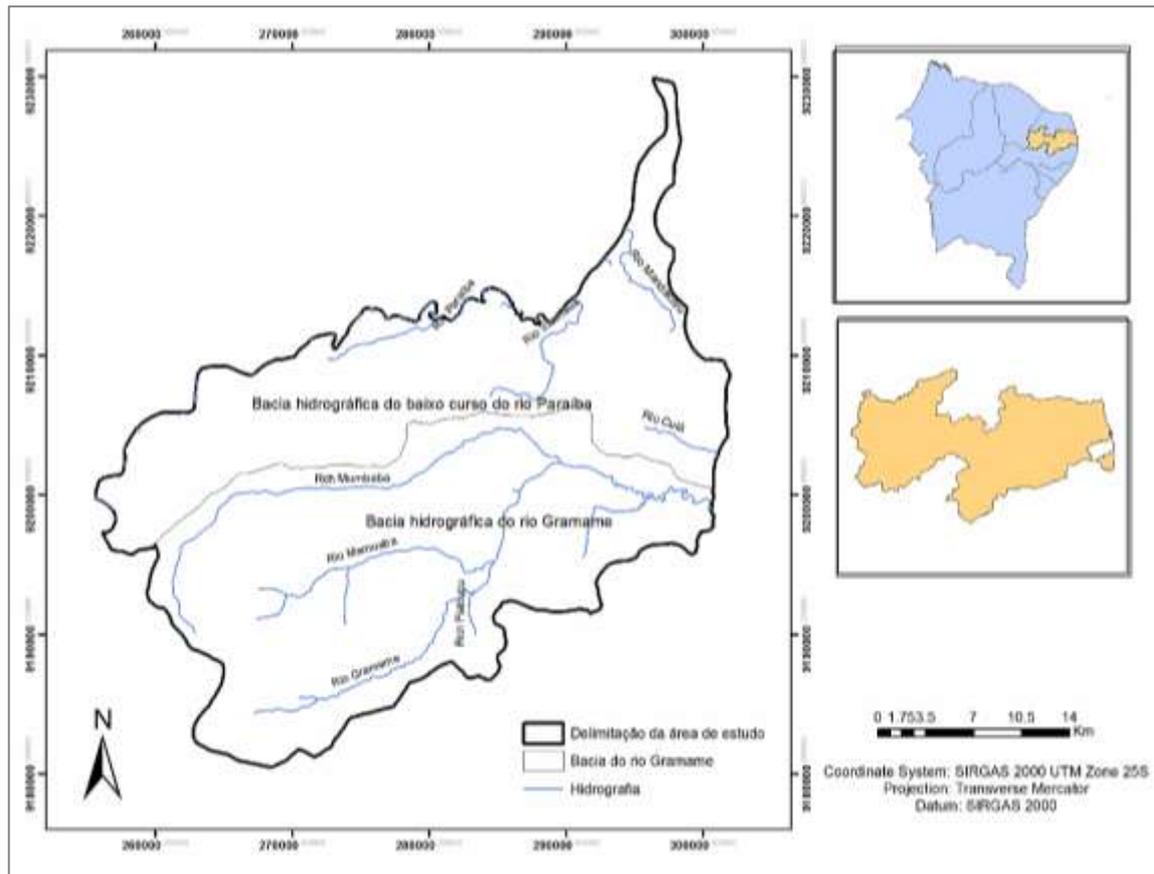


Figura 1 – Localização da área de estudo

Estão inseridos na área de estudo os municípios de Pedras de Fogo, Santa Rita, Alhandra, Conde, São Miguel de Taipu, Cruz do Espírito Santo, Bayeux, Cabedelo e João Pessoa, capital do estado. As principais sub-bacias que compõem a área de estudo são: Mumbaba, Mamuaba e Água Boa.

3.2 Geologia e hidrogeologia

A área de estudo está inserida na região denominada de Bacia Sedimentar Paraíba (Figura 2), que por sua vez é dividida em três sub-bacias: Miriri, Alhandra e Olinda, respectivamente de norte a sul. A área de estudo situa-se, especificamente, na sub-bacia Alhandra.



Figura 2 – Bacia Sedimentar Paraíba (Fonte: Barbosa, 2007)

A sub-bacia Alhandra tem como embasamento rochas metamórficas e ígneas do Complexo Cristalino Pré-Cambriano. Ela apresenta três unidades litoestratigráficas depositadas em períodos geológicos distintos. Na sequência de baixo para o topo, essas unidades são: formação Beberibe, formação Gramame e formação Barreiras.

A formação Beberibe se assenta discordantemente sobre o embasamento cristalino, podendo aflorar nas partes oeste e sul da bacia sedimentar. A parcela denominada Beberibe Inferior é caracterizada por arenitos continentais, quartzosos, com uma espessura média de 50 metros. São arenitos médios, finos e grossos, de coloração cinzenta, creme, vermelha e roxa, apresentando grãos sub-angulosos a sub-arredondados, com partículas argilosas. No Beberibe Superior, observa-se uma passagem lateral, caracterizada principalmente por interdigitação e também por gradação, para um arenito mais duro, com características granulométricas variadas e cores diversas.

Sobre a formação Beberibe repousa horizontalmente a formação Gramame. Ela consiste, basicamente, de pedra calcária argilosa cinzenta, com algumas intercalações finas de argila. Esse pacote sedimentar tem espessura média de 50 metros, podendo chegar a 102 metros na região de Jacumã. A formação Gramame pode aflorar na orla marítima da Paraíba, atravessando a formação Barreiras para os depósitos flúvio-marítimos das planícies costeiras.

Repousando de forma discordante sobre o embasamento cristalino e os sedimentos da Bacia Paraíba, encontra-se a formação Barreiras, composta por sedimentos arenos-argilosos. Esta unidade é a mais superficial em toda a área de estudo e seus sedimentos são provenientes da ação do intemperismo sobre o embasamento cristalino do Planalto da Borborema. De acordo com Reis (2008) a formação Barreiras constitui-se de sedimentos clásticos, pobres em conteúdo fossilíferos, de coloração viva e variada, mal consolidadas, correspondendo à areia, silte, argila e areias com seixos e cascalhos. A figura 3 mostra a estratigrafia da sub-bacia Alhandra.

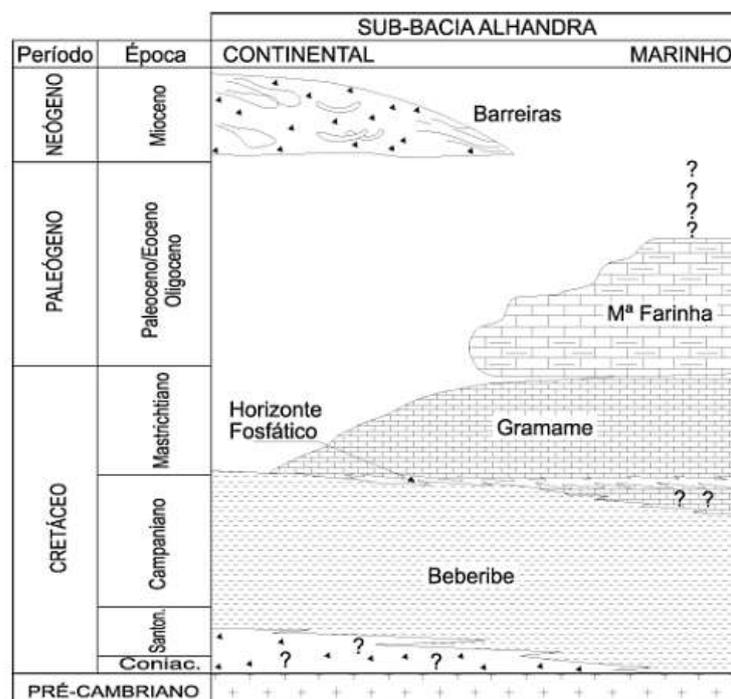


Figura 3 – Estratigrafia da Sub-Bacia Alhandra (Fonte: Furrier *et al.*, 2006)

Em relação à província cristalina, aparecem corpos graníticos e granitóides, alongados e laminados em pontos esparsos na região sudoeste da área estudada. Elas ocorrem a partir das proximidades do município de Pedras de Fogo, próximo ao local onde nascem os rios Gramame, Mamuaba e Mumbaba, nos sedimentos de potencial hidrogeológico explorável classificado de médio e fraco. Um mapa geológico da região é mostrado na Figura 4.

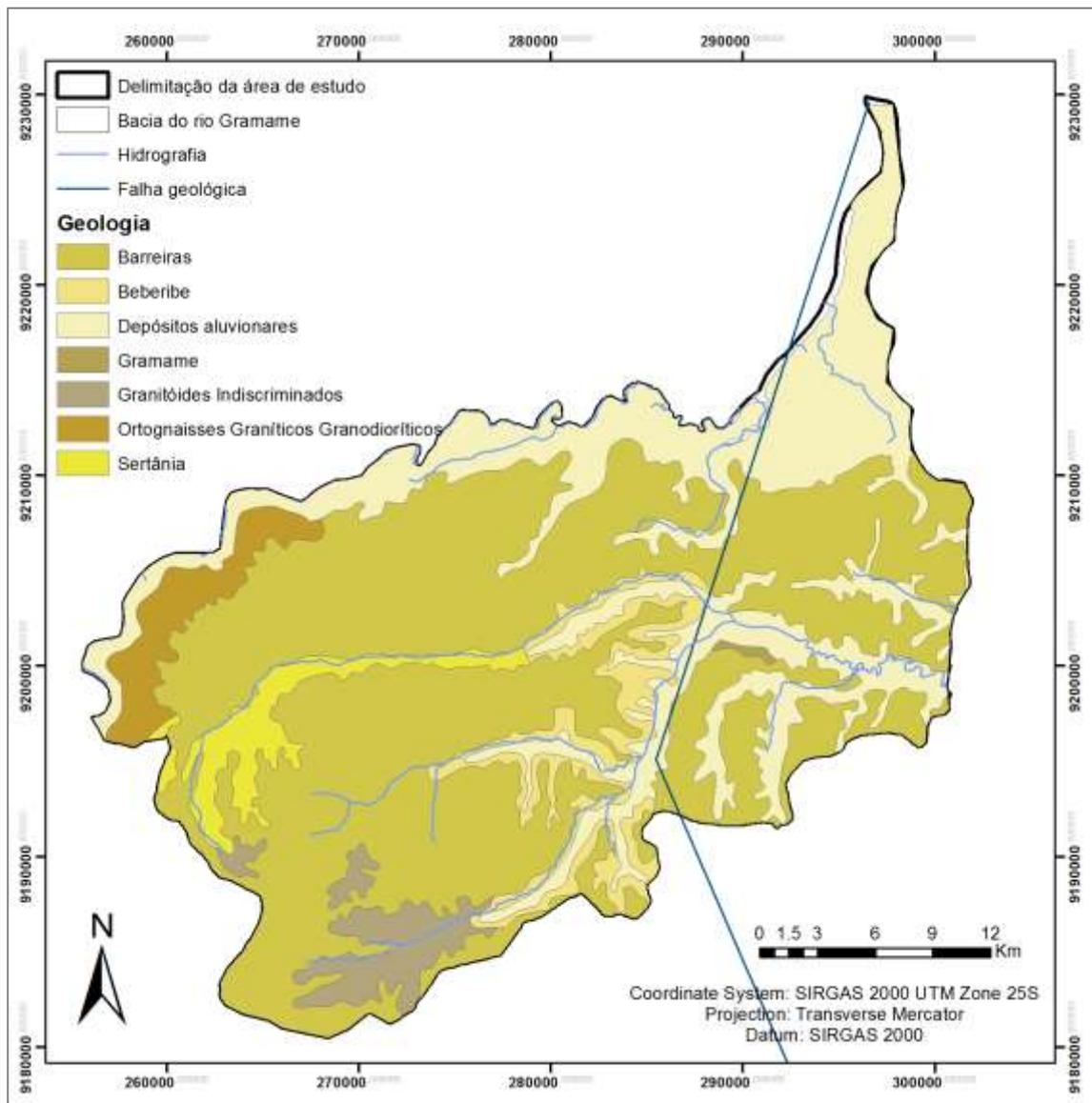


Figura 4 – Mapa geológico da área de estudo (Fonte: adaptado de AESA, 2017)

3.3 Clima

O clima predominante na região estudada, de acordo com a classificação de Köppen, é o tropical úmido As', que se caracteriza por um verão seco e chuvas predominantemente de outono a inverno.

O domínio territorial estudado dispõe de uma única estação climatológica que fornece dados climatológicos da região, datando do período 1961-1990. Informações de localização desta estação são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Estação climatológica operada na área de estudo (Fonte: PDRH, 2000)

Número	Estação	Lat. (Sul)	Long. (Oeste)	Período
82798	João Pessoa	7,06	34,52	1961/1990

De acordo com os dados pluviométricos desta estação, a precipitação média anual do período é de 1.740 mm/ano. A estação chuvosa compreende o período de março a julho, a qual concentra cerca de 70% do total anual das precipitações (Figura 5).

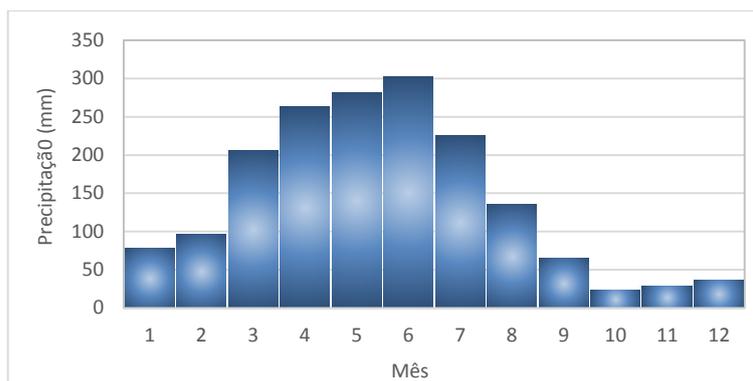


Figura 5 - Distribuição média mensal da precipitação

A temperatura média do ar varia na faixa de 23,7 a 28,2°C, com média de 26,1°C, sendo as temperaturas mais baixas registradas no mês de julho e os picos de calor no mês de janeiro.

A evapotranspiração potencial é de cerca de 1.500 mm/ano. O mês mais seco do ano é setembro, quando a umidade relativa do ar chega a 67%, já o mês de julho é o mais úmido, com máximo de 87% de umidade. Já a insolação, que é o número de horas, durante o dia, em que os raios solares atingem diretamente a superfície da terra, apresenta uma média de 2.591,4 horas ao longo do ano, sendo junho e julho os meses de menor incidência solar.

3.4 Uso do solo e cobertura vegetal

Na região estudada ainda existem resquícios de áreas com a vegetação nativa da Mata Atlântica e ecossistemas associados, como manguezais, campos de várzeas cerrados e restingas. No entanto, grande parte da vegetação nativa foi devastada, como consequência da exploração desordenada, para dar lugar a culturas como cana de açúcar, abacaxi, inhame e mandioca, e também por conta da crescente urbanização no território da bacia hidrográfica.

Um mapa de uso e ocupação do solo da área estudada foi elaborado com base nas imagens do *Google Earth Pro* (Figura 6). Foram utilizadas imagens do *U.S. Geological Survey* (1969 - maio/2000), *ASTRIUM* (setembro/2013 - março/2015) e *SPOT 5* (setembro/2015). Adicionalmente, foram feitas visitas a campo com a utilização de um GPS do tipo *GARMIN* (*Gpsmap76csx*) para confirmar e atualizar as informações e eliminar quaisquer dúvidas geradas pelas falhas nas imagens. As visitas de campo referentes a este levantamento ocorreram no mês de abril de 2016.

Concluído o trabalho de campo e de posse das informações atualizadas, o mapa de uso e ocupação do solo foi produzido utilizando o software *Arcgis 10.3*.

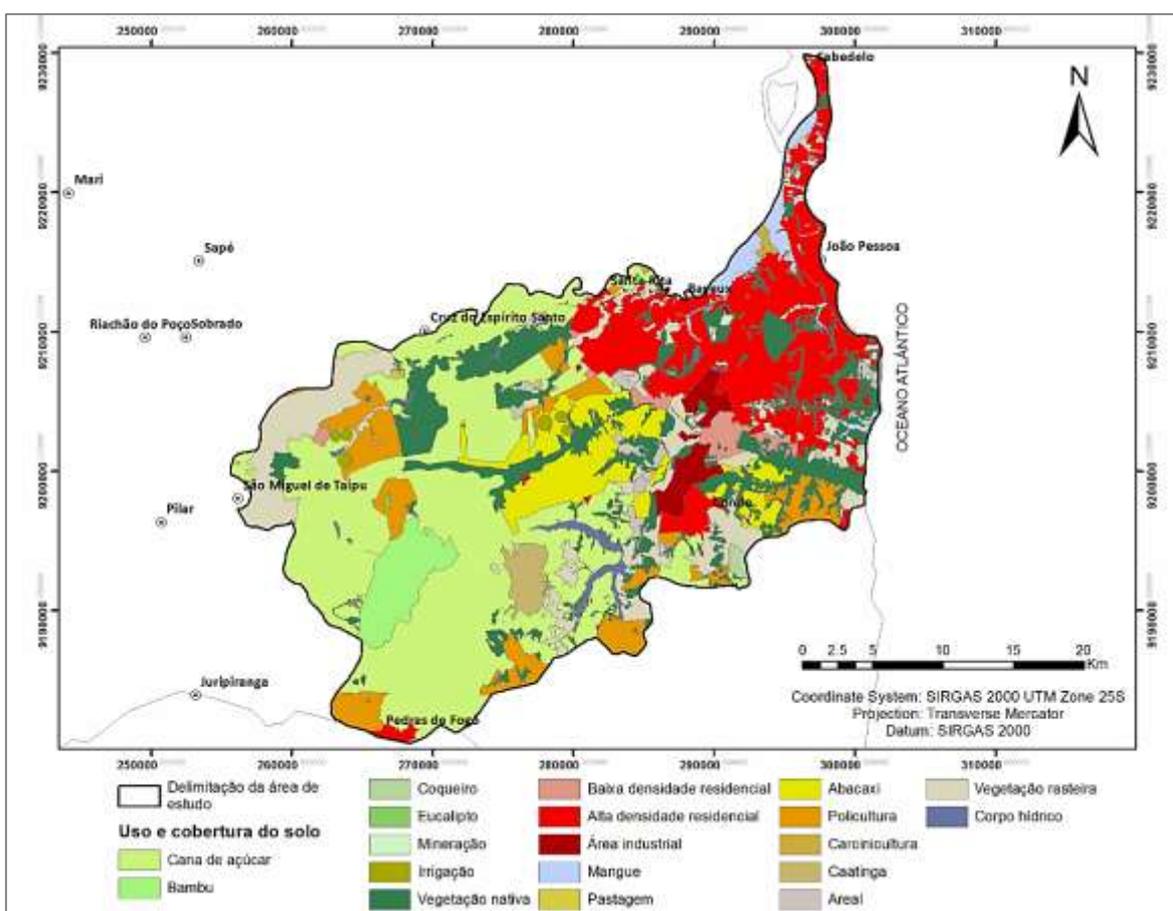


Figura 6 - Mapa de uso e ocupação

Tabela 7 – Dados de uso e ocupação do solo

Uso e cobertura do solo	Área (km ²)	Área (%)
Cana de açúcar	347,45	32,66
Alta densidade residencial	162,55	15,28
Vegetação nativa	147,78	13,89
Vegetação rasteira	108,63	10,21
Policultura	75,12	7,06

Abacaxi	64,06	6,02
Bambu	31,51	2,96
Baixa densidade residencial	29,09	2,73
Corpo hídrico	21,05	1,98
Área industrial	19,79	1,86
Mangue	17,90	1,68
Caatinga	12,29	1,16
Areal	10,68	1,00
Coqueiro	7,88	0,74
Irrigação	4,01	0,38
Carcinicultura	2,18	0,20
Mineração	0,86	0,08
Pastagem	0,53	0,05
Eucalipto	0,33	0,03

Como pode ser visto no mapa da Figura 6, a principal cultura de exploração nesta área é a cana de açúcar, que representa 33,66%. A área residencial de alta densidade ocupa 162,55 km². A vegetação nativa e vegetação rasteira representam o terceiro e quarto lugar em relação ao uso e ocupação do solo, com 147,78 km² e 108,63 km², respectivamente. O cultivo de abacaxi também ocupa uma grande área na região, 64,06 km².

O reservatório Gramame-Mamuaba, localizado na bacia hidrográfica do rio Gramame, tem uma capacidade total de 56.937.000 m³, sendo a principal fonte de abastecimento da região metropolitana de João Pessoa. Uma população de 1.001.485 habitantes, equivalente a 26,6 % da população do Estado da Paraíba, depende diretamente deste reservatório.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa é de natureza aplicada que, segundo Barros e Lehfeld (2000), tem como base a produção do saber com a finalidade de pôr em prática os seus resultados, visando à obtenção da solução do problema estudado.

Do ponto de vista da abordagem do problema, a pesquisa é do tipo quantitativa, que consiste em traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las.

As técnicas de pesquisa utilizadas são a documentação indireta, através do levantamento de dados por pesquisa bibliográfica, ou seja, fontes secundárias – teses, monografias, livros, revistas, jornais - e a documentação direta por pesquisa de campo, que, segundo Marconi e Lakatos (2003), é aquela que se fundamenta na observação e coleta de dados dos fatos e fenômenos exatamente como eles ocorrem de forma natural, bem como no registro de variáveis que podem ser relevantes para a análise do fenômeno.

Para se chegar ao objetivo principal desta pesquisa foi necessário realizar um monitoramento da variação do nível do lençol freático. Este monitoramento foi feito através de medições manuais como também utilizando sensores que registram os dados automaticamente em *dataloggers*. Também foram feitos testes de bombeamento com o objetivo de se conhecer as características hidrodinâmicas do aquífero. Para os poços do tipo cacimbão, utilizou-se as metodologias de Papadopulos & Cooper. No caso dos poços tubulares, utilizou-se o *software AQTESOLV Demo*, através de diversas soluções, como a de Theis, Neumam, entre outras. O esquema da Figura 7 apresenta os passos desenvolvidos nesta pesquisa.

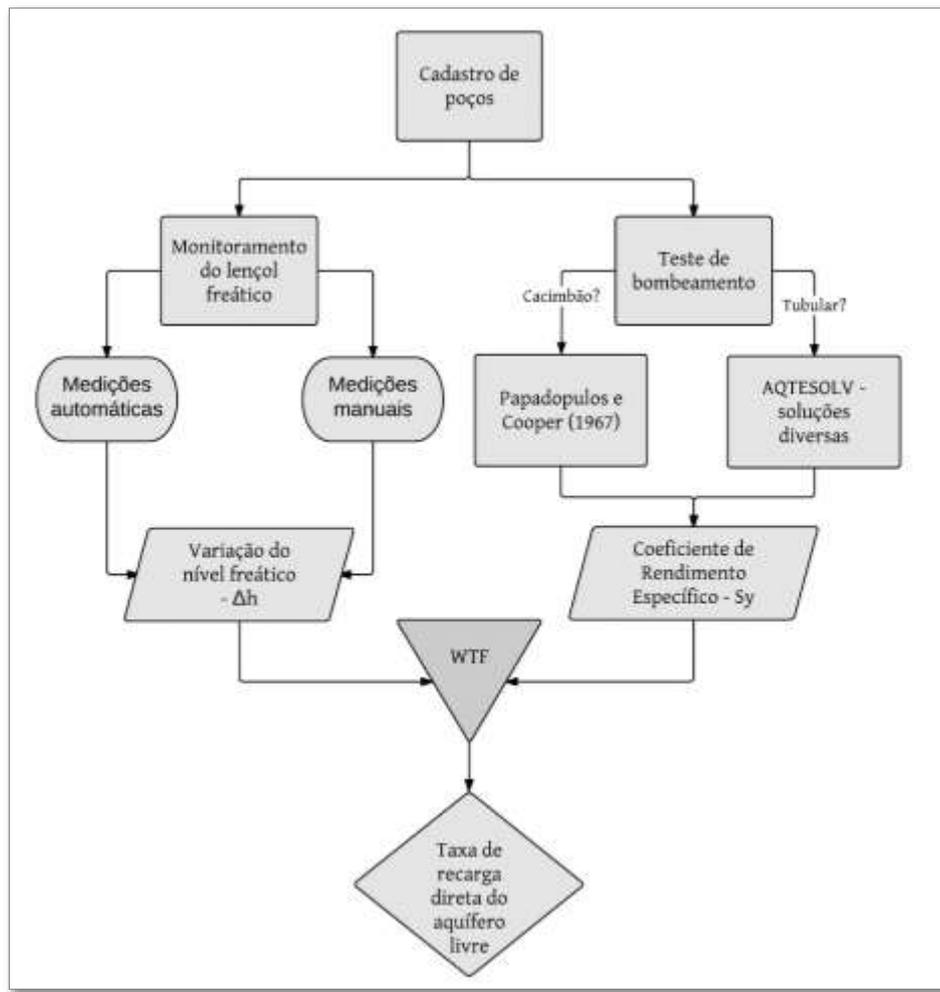


Figura 7 – Esquema da metodologia da pesquisa

4.1 Cadastramento dos poços e monitoramento do nível freático

O trabalho de monitoramento foi precedido por um processo de levantamento e cadastramento dos poços existentes e possíveis de serem monitorados na região de interesse do estudo. O cadastramento dos poços teve por finalidade o relacionamento dos dados técnico-construtivos de cada obra, principalmente os de localização geográfica, diâmetro, profundidade, vazão bombeada e uso da água. Um modelo da ficha cadastral é apresentado no Apêndice A. Dos poços cadastrados, 16 foram obtidos do trabalho realizado por Coelho (2011), a fim de ampliar o monitoramento iniciado em novembro/2009. Esta etapa envolveu visitas à campo com o objetivo de levantar e/ou confirmar as informações obtidas. Foram feitas entrevistas com os proprietários dos poços para se conhecer a dinâmica do uso da água. As informações de localização geográfica dos poços foram obtidas com a utilização de um GPS Garmin, com precisão de 2 metros. Já as altitudes foram obtidas através do GPS

Trimble, em visita de campo com a colaboração do Professor Guttemberg da Silva Silvino, da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Para esta pesquisa foram selecionados, inicialmente, 43 poços, sendo que alguns tiveram seu monitoramento interrompido por motivos diversos, conforme será discutido no capítulo 5. Os poços cadastrados são do tipo cacimbão ou do tipo tubulares. Os poços cacimbão, seguindo a linguagem local, são poços perfurados manualmente, possuem diâmetro em torno de 1,7 m e são predominantes na região rural da área de estudo. Os tubulares têm diâmetro, geralmente, de 100 mm e são construídos, em sua maioria, na região urbana, por terem um custo de perfuração mais elevado e necessitarem de maquinário mais sofisticado.

Para esta pesquisa, foram considerados os dados de nível freático compreendidos no período de outubro/2015 a dezembro/2016. A recarga foi estimada apenas para o ano de 2016, no entanto foi necessário incluir dados do final de 2015 para auxiliar na construção da curva de recessão, conforme será explicado mais adiante. A frequência da coleta dos dados em campo foi mensal, no período chuvoso, e bimestral, no período de estiagem, e foram necessários, no mínimo, dois dias de atividades para cobrir toda a rede de poços. Coletas de dados adicionais foram feitas nas ocasiões em que a equipe de trabalho precisou ir a campo para resolver questões diversas ligadas ou não a esta pesquisa.

4.1.1 Monitoramento manual

O monitoramento manual do nível freático do aquífero foi realizado em todos os 39 poços monitorados, incluindo aqueles que possuem sensor de medição automática. Nesses locais, os dados manuais serviram para comparar os dois valores e acompanhar a confiabilidade dos dados medidos pelas sondas.

O equipamento utilizado para medição do nível freático foi um medidor de nível d'água da marca *Clean Environment Brasil*, modelo *Welltape 100*, com um dispositivo de contato eletro-sonoro para detectar o nível da água. O nível freático foi determinado a partir da leitura da graduação métrica da fita a partir da laje de proteção do poço (Figura 8).



Figura 8 - Medição manual do nível freático realizada pelo técnico Edilson Edmar no poço P11. (Fonte: Acervo da autora, 29 de julho de 2016)

4.1.2 Monitoramento por sensores

Foi instalada uma rede permanente de monitoramento automatizado do nível freático na região da bacia hidrográfica do rio Gramame e do baixo curso do rio Paraíba. Os sensores utilizados no monitoramento coletam dados de nível estático e dinâmico em intervalos de 15 minutos.

Os poços selecionados para o monitoramento automático foram escolhidos considerando a disponibilidade do proprietário para instalação e distribuição espacial.

A rede é formada por equipamentos de duas marcas: Ampeq e *Schlumberger Water Services* (SWS). A sonda da Ampeq é formada por mecanismos elétricos e um cabo de transferência de dados, composto por duas partes: um cabo embutido em uma mangueira e um cabo flexível. Entre esses dois cabos existe uma conexão em PVC, por onde é feita a compensação da pressão atmosférica. Daí os dados são enviados para o *datalogger*, que processa os dados recebidos pelo sensor, os armazena e os transforma em informações inteligíveis aos usuários (Figura 9).

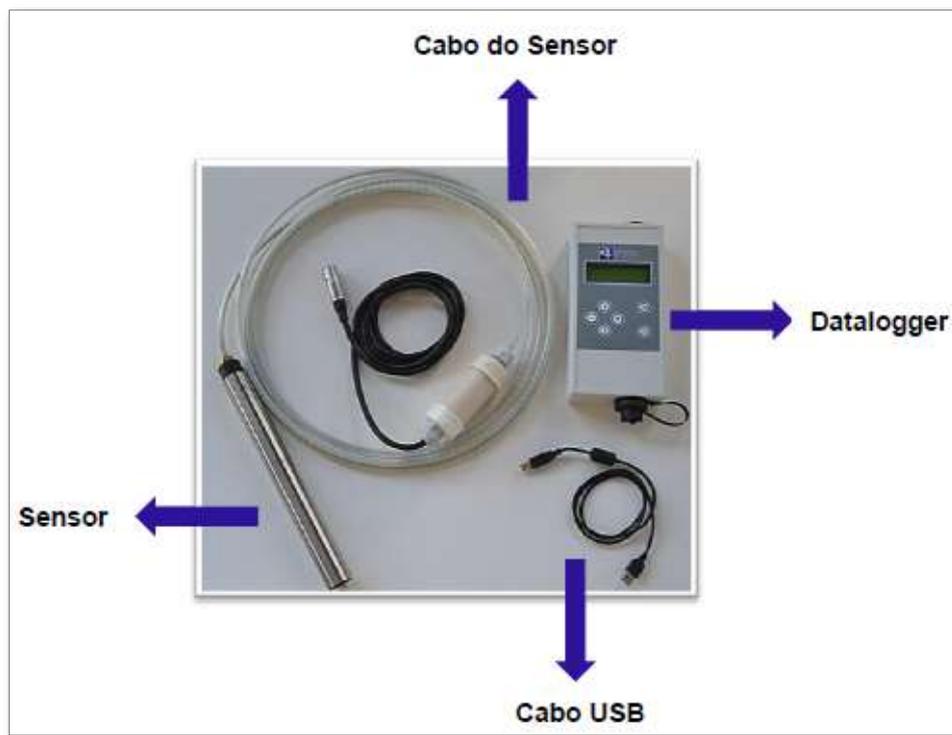


Figura 9 - Equipamentos de medição de nível da Ampeq (Fonte: Ampeq, 2015)

Os equipamentos da SWS são compostos por um *Diver*, que mede a pressão absoluta da água dentro do poço, e um barômetro, que mede a pressão atmosférica local (Figura 10). Esses dados são passados para um *software* no computador, onde é realizada a compensação desses valores, obtendo assim a medição do nível d'água. O barômetro possui um raio de atuação de 15 km, dependendo das condições do terreno, o que significa que não é necessário que cada poço possua seu próprio barômetro para compensação. Entre os *Divers*, existem dois modelos: um que mede apenas a pressão e a temperatura da água, denominado *TD Diver*, e outro que mede também a condutividade elétrica, chamado de *CTD Diver*. Os dados de condutividade elétrica serão úteis para o estudo da intrusão salina no litoral de João Pessoa, mas não serão abordados nesta dissertação.



Figura 10 – Equipamentos de medição automática da *Schlumberger Water Services* - SWS (Fonte: Página da *Schlumberger Water Service*, 2017)

4.2 Determinação das propriedades hidrodinâmicas do aquífero

4.2.1 Teste de bombeamento

Um dos objetivos dos testes de bombeamento é a determinação das propriedades hidrodinâmicas dos aquíferos. Neste caso, são chamados de “testes de aquífero”. Outra função dos testes de bombeamento é a determinação da capacidade de produção e a eficiência do poço bombeado, sendo chamados de “testes de produção” (MANOEL FILHO, 2001).

O teste de aquífero consiste em bombear um poço com vazão constante Q e acompanhar o rebaixamento e a recuperação produzidos em um ou mais poços de observação localizados a uma certa distância. No caso desta pesquisa, o rebaixamento e a recuperação foram medidos no próprio poço, já que a perfuração de piezômetros requer um investimento substancial. Os parâmetros hidrodinâmicos encontrados através deste teste são o coeficiente de armazenamento (S), a transmissividade (T) e a condutividade hidráulica (K). No caso de aquíferos livres, o coeficiente de armazenamento pode ser uma boa aproximação para o valor de rendimento específico (S_y), segundo Maziero & Wendland (2005), que é uma variável fundamental para a aplicação do cálculo da recarga. O ensaio de bombeamento com observação no próprio poço fornece valores confiáveis de transmissividade e condutividade hidráulica. É recomendado que se faça outras análises para se ter maior certeza do valor de rendimento específico.

Em razão dos diferentes tipos de poços existentes, os resultados dos testes de bombeamento foram interpretados utilizando diferentes métodos. Os poços tubulares foram

analisados utilizando o *software AQTESOLV Demo*, da *HydroSOLVE, Inc.*, onde foram utilizadas soluções para aquíferos livres, como o Método de Theis, o Método de Neuman e o Método de Moench. No caso dos cacimbões, foi utilizado o método de Papadopoulos & Cooper .

4.2.1.1 Método de Papadopoulos & Cooper

Os métodos convencionais de análise de dados de testes de bombeamento consideram que o armazenamento no poço é desprezível, o que não se aplica aos poços tipo cacimbão. Nesses poços, a água bombeada provém não apenas do aquífero, como do armazenamento do próprio poço, que funciona como uma cisterna. Este fenômeno torna-se menos significativo ao longo do tempo, podendo ser comparado com o método de Theis.

O método desenvolvido por Papadopoulos & Cooper deve ser aplicado em poços de grande diâmetro e completamente penetrantes, mas pode-se utilizar o fator de correção de Jacob e assim ser aplicado também em aquíferos livres.

A correção de Jacob para se obter o rebaixamento equivalente em aquífero confinado é feita corrigindo os valores de rebaixamento observados nos poços rasos através da equação a seguir:

$$s_c = s_w - \frac{s_w^2}{2h_o} \quad (1)$$

Onde, s_c é o rebaixamento corrigido (m), s_w é o rebaixamento medido no poço (m) e h_o é a espessura saturada do aquífero antes do início do ensaio de bombeamento (m).

O método considera um poço de grande diâmetro, em um aquífero homogêneo e isotrópico, de espessura uniforme e totalmente penetrante, conforme a Figura 11.

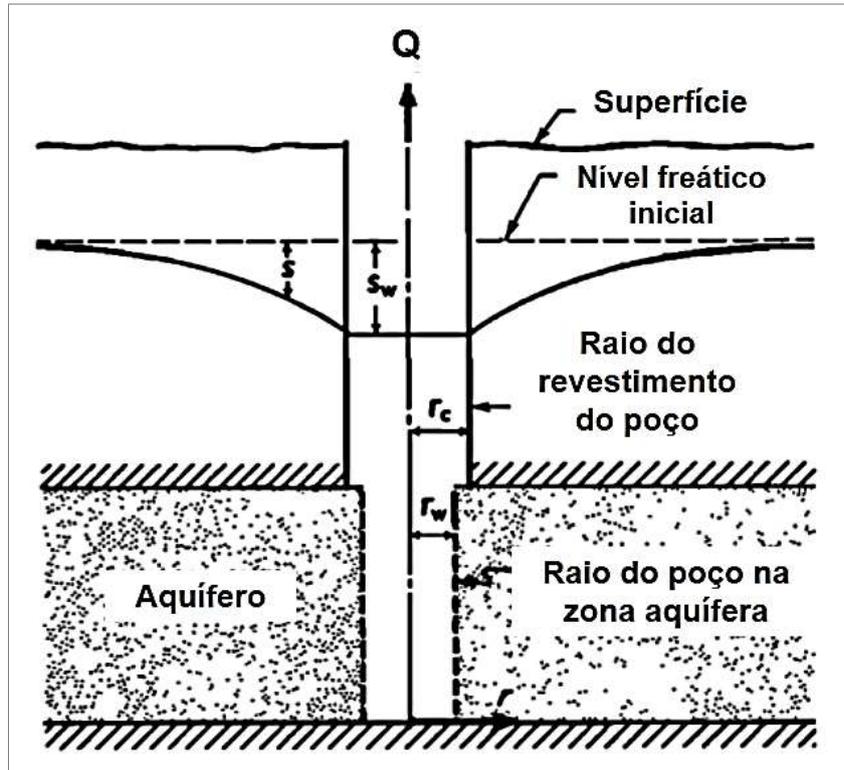


Figura 11 – Representação idealizada de um poço aberto em um aquífero artersiano (Fonte: Adaptado de Papadopoulos & Cooper, 1967)

Assumindo que em um dado tempo a vazão de descarga começa a ser constante e que as perdas são insignificantes, o rebaixamento dentro do poço e próximo a ele é descrito pelas seguintes condições:

$$\partial^2 s / \partial r^2 + (1/r) \partial s / \partial r = (S/T) \partial s / \partial t \quad r \geq r_w \quad (2)$$

$$s(r_w, t) = s_w(t) \quad (3)$$

$$s(\infty, t) = 0 \quad (4)$$

$$s(r, 0) = 0 \quad r \geq r_w \quad (5)$$

$$s_w(0) = 0 \quad (6)$$

$$2\pi r_w T \frac{\partial s(r_w, t)}{\partial r} - \pi r_c^2 \frac{\partial s_w(t)}{\partial t} = -Q \quad t > 0 \quad (7)$$

O método de Papadopoulos & Cooper consiste em construir em papel di-log o gráfico do rebaixamento observado durante o bombeamento, no eixo horizontal, e no eixo vertical, o tempo. A escala deve ser a mesma observada nos gráficos das curvas padrão de Papadopoulos (Figura 12), isto é, com o mesmo número de ciclos logarítmicos. Em seguida,

sobreposição o gráfico do rebaixamento e as curvas padrão, arrastando um gráfico sobre o outro até que consiga ajustar a curva de rebaixamento com alguma curva padrão.

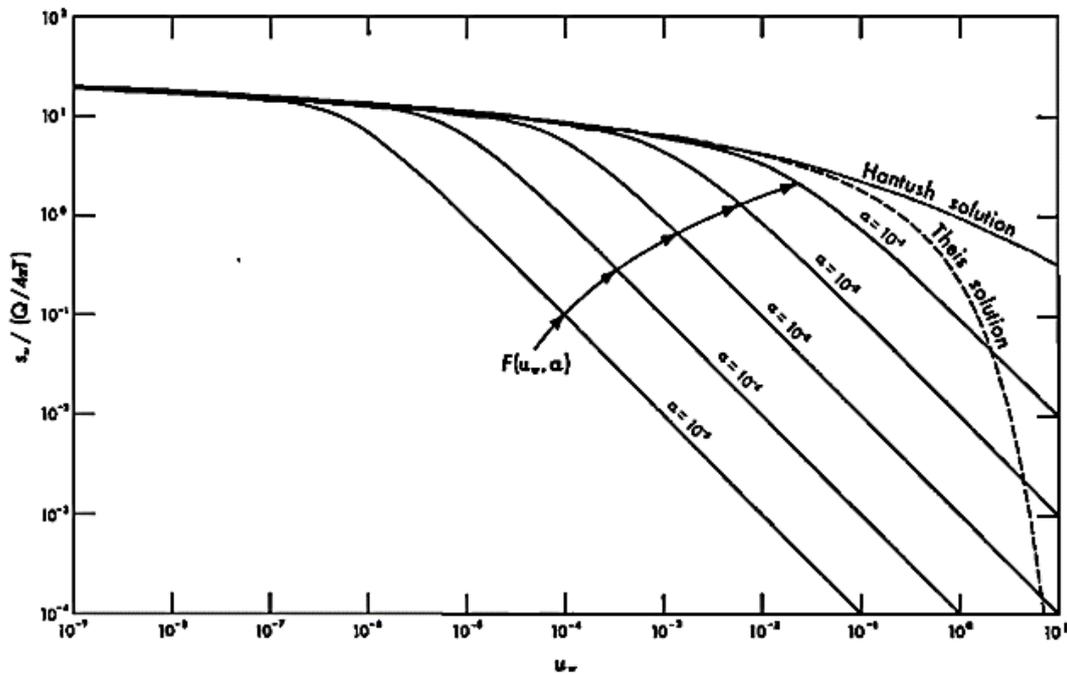


Figura 12 - Família de curvas padrão de Papadopolus (Fonte: Papadopolus & Cooper, 1967)

Encontrada a curva tipo, aplica-se as seguintes equações para se obter os parâmetros S e T:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F(\alpha, u) \quad (8)$$

$$u = \frac{r_w^2 S}{4Tt} \quad (9)$$

Onde, s é o rebaixamento no poço de bombeamento (m); Q é a vazão constante de bombeamento (m³/d); T é a transmissividade do aquífero (m²/d); $\alpha = S r_w^2 / r_c^2$; r_w é o raio do poço na zona aquífera (m); r_c é o raio do revestimento do poço (m); S é o coeficiente de armazenamento (adimensional); e t é o tempo de bombeamento (dias).

4.2.1.2 Método de Theis

Theis (1935) chegou a uma solução que caracteriza o fluxo de água para um poço parcialmente penetrante em um aquífero confinado. Essa solução assume um fluxo linear

para um poço bombeado e considera insignificante o armazenamento do poço (Figura 13). Essa solução também pode ser aplicada aos aquíferos livres mediante a correção dos rebaixamentos pelo método de Jacob.

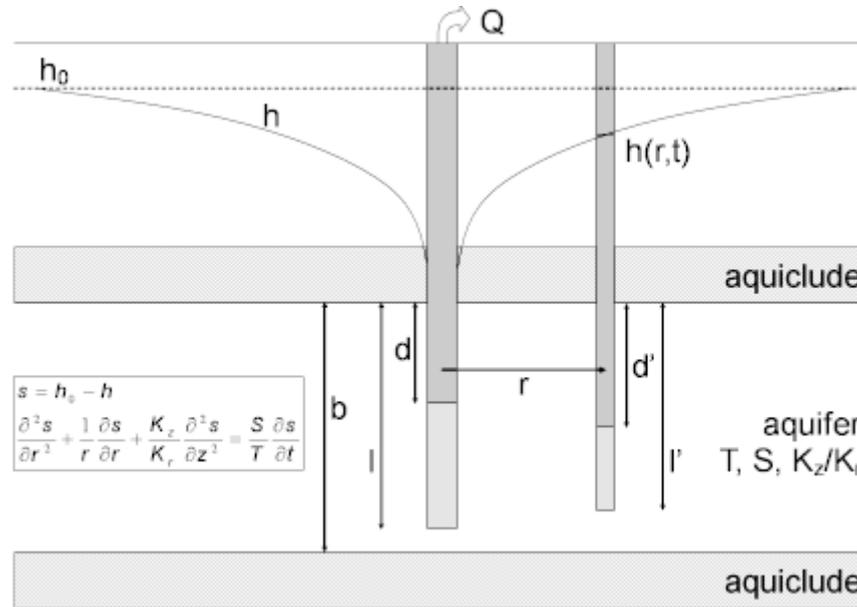


Figura 13 – Esquema do método de Theis (Fonte: AQTESOLV, 2017)

Este método é utilizado para determinar as propriedades hidráulicas (transmissividade e coeficiente de armazenamento) do aquífero através da superposição da curva de Theis com a curva dos dados de rebaixamento do poço em função do tempo, em um gráfico duplo log.

A equação que descreve os rebaixamentos em um aquífero confinado a uma determinada distância r é mostrada a seguir:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u} du}{u} \quad (10)$$

Onde:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (11)$$

Onde: r é a distância do poço bombeado ao observado (m); s é o rebaixamento a uma distância r do poço bombeado (m); Q é a vazão de bombeamento (m^3/s ou m^3/d); T é a transmissividade (m^2/s ou m^2/d); S é o coeficiente de armazenamento (adimensional); t é o tempo a partir do início do bombeamento (s).

A função exponencial pode ser desenvolvida da seguinte forma:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} + \dots \right) \quad (12)$$

De maneira simplificada, a equação de Theis fica da seguinte forma:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (13)$$

Admitem-se as seguintes condições para a aplicação do método de Theis:

- O aquífero é confinado;
- Poços com penetração total, onde a sua zona filtrante abrange a totalidade da espessura do aquífero;
- Aquífero homogêneo, isotrópico (onde em todas as direções o aquífero possui condutividade hidráulica iguais) e com espessura uniforme sobre a área de influência do bombeamento;
- Aquíferos infinitamente extensos, ou seja, não sendo limitados por barreiras hidrogeológicas impermeáveis (falha, maciço impermeável, etc.) ou limites de recarga (rios, lagos ou o mar);
- Superfície potenciométrica horizontal antes do bombeamento;
- Poço bombeado a vazão constante;
- A água removida do armazenamento é descarregada instantaneamente com a diminuição de carga;
- Diâmetro do poço pequeno de modo que o armazenamento seja negligenciável.

4.2.1.3 Método de Neuman

Este método é utilizado para determinar os parâmetros transmissividade, coeficiente de armazenamento, rendimento específico e condutividade hidráulica vertical em aquíferos não-confinados. Esta análise também envolve a superposição de curvas tipo com os dados de rebaixamento coletados durante o ensaio de bombeamento. O esquema do método de Neuman é mostrado na Figura 14.

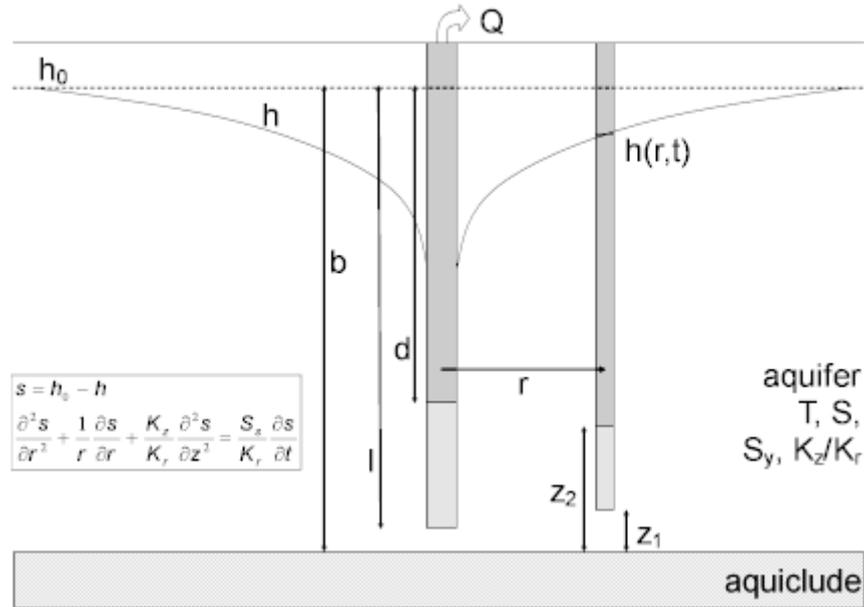


Figura 14 – Esquema do método de Neuman (Fonte: AQTESOLV, 2017)

Neuman (1972, 1974) chegou a uma solução analítica para poços parcialmente penetrantes cuja equação é a seguinte:

$$s = \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{K_r}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + K_v \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (14)$$

Onde: h é a espessura saturada do aquífero (m); r é a distância do ponto ao poço de bombeamento (m); z é a coordenada cartesiana vertical (m); S_s é o coeficiente de armazenamento específico (1/d); K_r é a condutividade hidráulica radial (ou horizontal) (m/d); K_v é a condutividade hidráulica vertical (m/d) e t é o tempo (dias).

A solução da equação anterior é dada por:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B) \quad (15)$$

Onde T é a transmissividade e é dada por $T = h_0 K_r$; e u_A e u_B são obtidos através do ajuste dos dados de rebaixamento em função do tempo na curva de Theis. Daí, calculam-se a transmissividade (T), o coeficiente de armazenamento (S), o rendimento específico (S_y) e a condutividade hidráulica vertical (β) a partir das equações 10, 11 e 12:

$$u_A = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (16)$$

$$u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{r^2 K_z}{b^2 K_r} \quad (18)$$

Admitem-se as seguintes condições para a aplicação do método de Neuman:

- O aquífero tem uma extensão infinita;
- Aquífero homogêneo e de espessura uniforme;
- Considera-se uma resposta gravitacional retardada;
- O fluxo é instável;
- O diâmetro do poço é pequeno, de modo que o armazenamento no poço pode ser desconsiderado.

4.2.1.4 Método de Moench

Através desse método pode-se determinar a transmissividade, o coeficiente de armazenamento, rendimento específico e a condutividade hidráulica vertical em aquíferos livres. Esta solução considera a resposta gravitacional retardada, os efeitos de armazenamento do poço e a penetração parcial do poço. A Figura 15 ilustra o esquema do método de Moench.

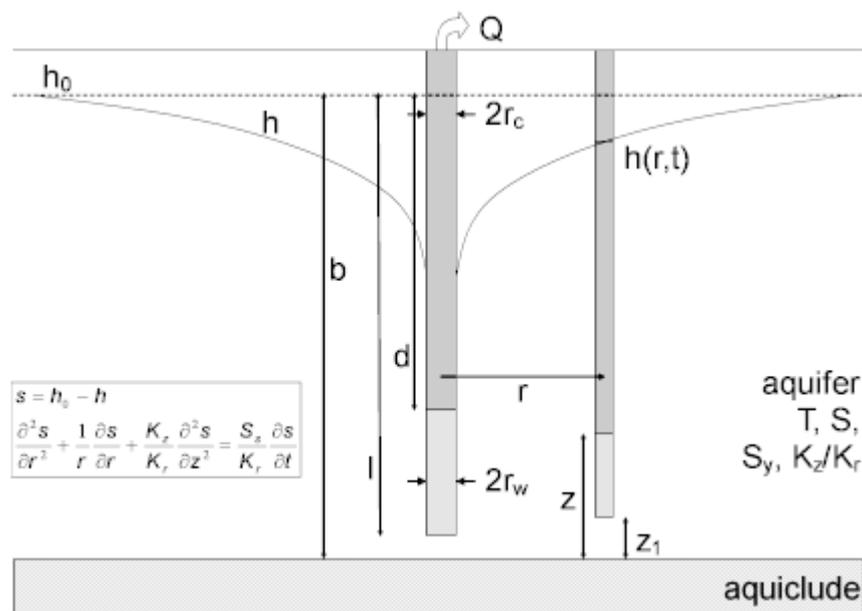


Figura 15 – Esquema do método de Moench (Fonte: AQTESOLV, 2017)

As equações envolvidas nessa solução são:

$$\beta_w = \frac{r_w^2 K_z}{b^2 K_r} \quad (19)$$

$$\beta = \frac{r^2 K_z}{b^2 K_r} \quad (20)$$

$$t_D = \frac{Kt}{S_s r_w^2} \quad (21)$$

$$h_D = \frac{4\pi K b}{Q} (h_o - h) \quad (22)$$

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (23)$$

$$\sigma = \frac{S_s b}{S_y} \quad (24)$$

Onde: b é a espessura do aquífero (m); d é a distância da água até o topo do poço (m); K e K_r são a condutividade hidráulica (m/s); K_z é a condutividade hidráulica vertical (m/s); Q é a vazão (m³/s); r é a distância radial (m); r_c é o raio do revestimento do poço; r_w é o raio do poço na zona aquífera; S_s é o coeficiente de armazenamento específico (1/m); S_y é o rendimento específico (s/ dimensionamento) e t é o tempo (s).

Para este método, considera as seguintes condições:

- O aquífero tem uma extensão infinita;
- Aquífero homogêneo, isotrópico e de espessura uniforme;
- O fluxo é instável.

4.3 Delimitação de zonas de condutividade hidráulica semelhante

Esta análise consiste em identificar zonas que apresentam características de condutividade hidráulica semelhantes a partir da análise gráfica das curvas de recuperação daqueles poços que têm bomba funcionando e sensor de medição automática.

Inicialmente, tomaram-se os dados coletados pelos sensores e identificou-se os poços onde existe atividade de bombeamento. De cada poço selecionado, identificaram-se 10 eventos de bombeamento e recuperação, de preferência abrangendo os períodos chuvoso e de estiagem da área estudo. Para cada um destes eventos, investigou-se o comportamento da curva de recuperação imediatamente após o desligamento da bomba.

Para isso, foi determinada a equação de cada uma dessas curvas de recuperação e em seguida procedeu-se uma análise estatística dos seus coeficientes. Foi calculado o valor mínimo, valor máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação,

4.4 Recarga direta – Método WTF

De posse dos dados da variação dos níveis da água (Δh) e do coeficiente de rendimento específico (S_y), foi calculada a recarga do aquífero livre da região de estudo pelo método da Flutuação da Superfície Piezométrica, aqui denominada de WTF, do inglês *Water Table Fluctuation*. Este método é uma simplificação do fenômeno da movimentação da água no lençol freático. Ele é um método físico de monitoramento da zona saturada para estimar a recarga total do aquífero e a variação do armazenamento em subsuperfície (SCANLON *et al.*, 2002). Sua principal vantagem é a simplicidade e fácil utilização.

O método WTF foi descrito detalhadamente em Healy & Cook (2002). Este método só possui aplicabilidade em aquíferos não confinados e necessita apenas dos dados de variação dos níveis d'água ao longo do tempo e do conhecimento do coeficiente de rendimento específico. A equação que rege a recarga pelo método WTF é descrita a seguir:

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (25)$$

Onde: S_y é o rendimento específico, h é a altura do nível freático e t é o tempo. Esta equação considera que a água que chega ao nível freático entra imediatamente em armazenamento e considera nulos todos os outros componentes do balanço hídrico subterrâneo durante o período de recarga (i.e. evapotranspiração subterrânea, fluxo de base, entrada e saída de fluxo subsuperficial). A equação é aplicada para cada elevação individual do nível freático, fornecendo uma estimativa da recarga total.

A variação da altura do nível da água (Δh) é determinada pela diferença entre o pico de elevação do nível da água e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente, a qual é extrapolada até o instante do pico (SCANLON *et al.*, 2002), como mostrado na Figura 16.

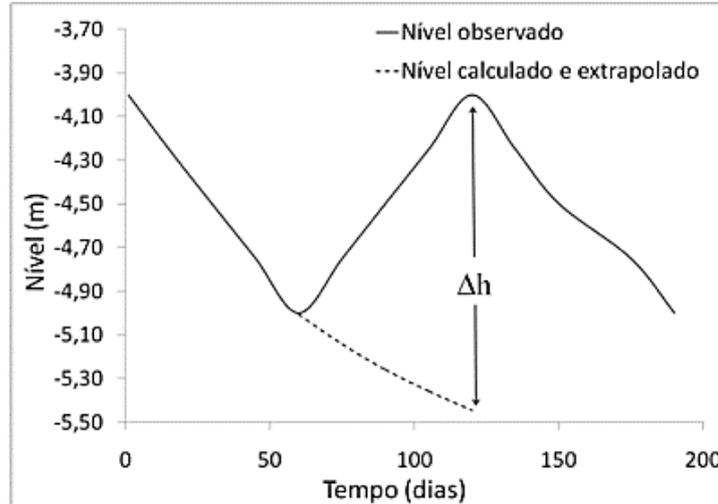


Figura 16 – Demonstração da diferença de altura entre o pico de elevação da curva observada e a curva de recessão extrapolada. (Fonte: Coelho *et al.*, 2012)

A curva de recessão representa o nível da água que o aquífero apresentaria caso não tivesse ocorrido a precipitação causadora de elevação. Healy & Cook (2002) afirmam que a construção dessa curva é algo subjetivo e que não há um tipo específico de função. Neste trabalho utilizou-se a função potencial utilizada por Barreto (2006), que é apresentada a seguir (Equação 26).

$$N_c = a(P - P_o)^b \quad (26)$$

Em que N_c é o nível do aquífero calculado; P é o número de dias contados a partir do primeiro dia de monitoramento no poço; e a , b e P_o são parâmetros a serem determinados. Identificados os parâmetros da função para o primeiro período de recessão do poço, aplica-se a função aos outros períodos de recessão, mantendo os valores de a , b e P_o próximos. A curva de recessão é prolongada até o ponto em que se inicia outro período recessivo.

Por fim, a recarga direta para cada poço durante um determinado período de tempo fica da seguinte forma:

$$\frac{R_d}{S_y} = (N_{oi} - N_{cei}) - (N_{oj} - N_{cej})(i > j) \quad (27)$$

Onde R_d é a recarga direta; S_y é o coeficiente de rendimento específico; N_{oi} é o nível observado do aquífero no tempo i ; N_{cei} é o nível calculado e extrapolado da curva de recessão no instante i ; N_{oj} é o nível observado do aquífero no instante j ; e N_{cej} é o nível calculado e extrapolado da curva de recessão no instante j .

4.5 Dados de precipitação

Os dados de precipitação para a área de estudo foram obtidos a partir de 11 estações pluviométricas instaladas na área de estudo e no seu entorno (Tabela 8). A maior parte dos postos é monitorada pela Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), outros 2 são monitorados pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), um posto é de responsabilidade do INMET e um outro é monitorado por pesquisadores da UFPB dentro do projeto de Bacias Experimentais e Representativas no Semiárido (BEER). A resolução temporal dos dados da AESA e do INMET é diária. Já o pluviógrafo monitorado pela UFPB registra a precipitação a cada 1 minuto.

Tabela 8 – Informações das estações pluviométricas da área de estudo

ID	Nome	Lat. (m)	Long. (m)	Responsável
3940819	Alhandra	-7,4256	-34,9106	AESA
3941133	Cabedelo/EMATER	-7,0878	-34,8500	AESA
3859183	Condado (PE)	-7,5833	-35,1000	APAC
3849384	Cruz do Espírito Santo	-7,1408	-35,0911	AESA
3849599	Est. Pluv 02 (BEER)	-7,2991	-35,0312	UFPB
3950102	Goiana (Itapirema - IPA)	-7,5667	-35,0000	APAC
3940415	João Pessoa/CEDRES	-7,2171	-34,9496	AESA
3940226	João Pessoa/DFAARA	-7,0833	-34,8300	AESA
3940233	João Pessoa/INMET	-7,1409	-34,8511	INMET
3849877	Pedras de Fogo	-7,4014	-35,1175	AESA
3940934	Pitimbu	-7,4544	-34,8369	AESA

Os dados utilizados nesta pesquisa foram aqueles compreendidos no período de 2015 a 2016. Para a correção das falhas existentes e homogeneização dos valores foi utilizado o método do vetor regional.

A determinação da área de influência de cada posto pluviométrico foi feita utilizando o método dos polígonos de Thiessen, em que são determinadas áreas de domínio de cada posto pluviométrico por meio da construção de polígonos. A distância de influência de um certo posto é determinada como sendo até a metade da distância do posto seguinte em qualquer direção.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados atingidos nesta pesquisa. Inicialmente são apresentados os resultados da precipitação dos anos 2015 e 2016. Em seguida os resultados envolvendo o monitoramento do nível freático, posteriormente os resultados dos testes de bombeamento, depois as análises das zonas de condutividade hidráulica semelhante e, para finalizar, os resultados e discussões da recarga livre do aquífero.

5.1 Precipitação

Foram obtidos dados de precipitação das 11 estações pluviométricas para os anos 2015 e 2016. Não foi possível obter dados de precipitação do ano 2017.

As áreas de influência de cada posto foram determinadas pelo método de Thiessen (Figura 17). Observa-se que as estações de Alhandra, Condado, Goiana e Pitimbu não tiveram nenhum poço em sua área de influência. Os postos com maior número de poços sob sua influência foram o da Estação Pluviométrica 02 (BEER) e o de João Pessoa/INMET.

A Tabela 9 mostra as precipitações anuais para os anos de 2015 e 2016, bem como a lista de poços localizados nas áreas de influência de cada uma das estações.

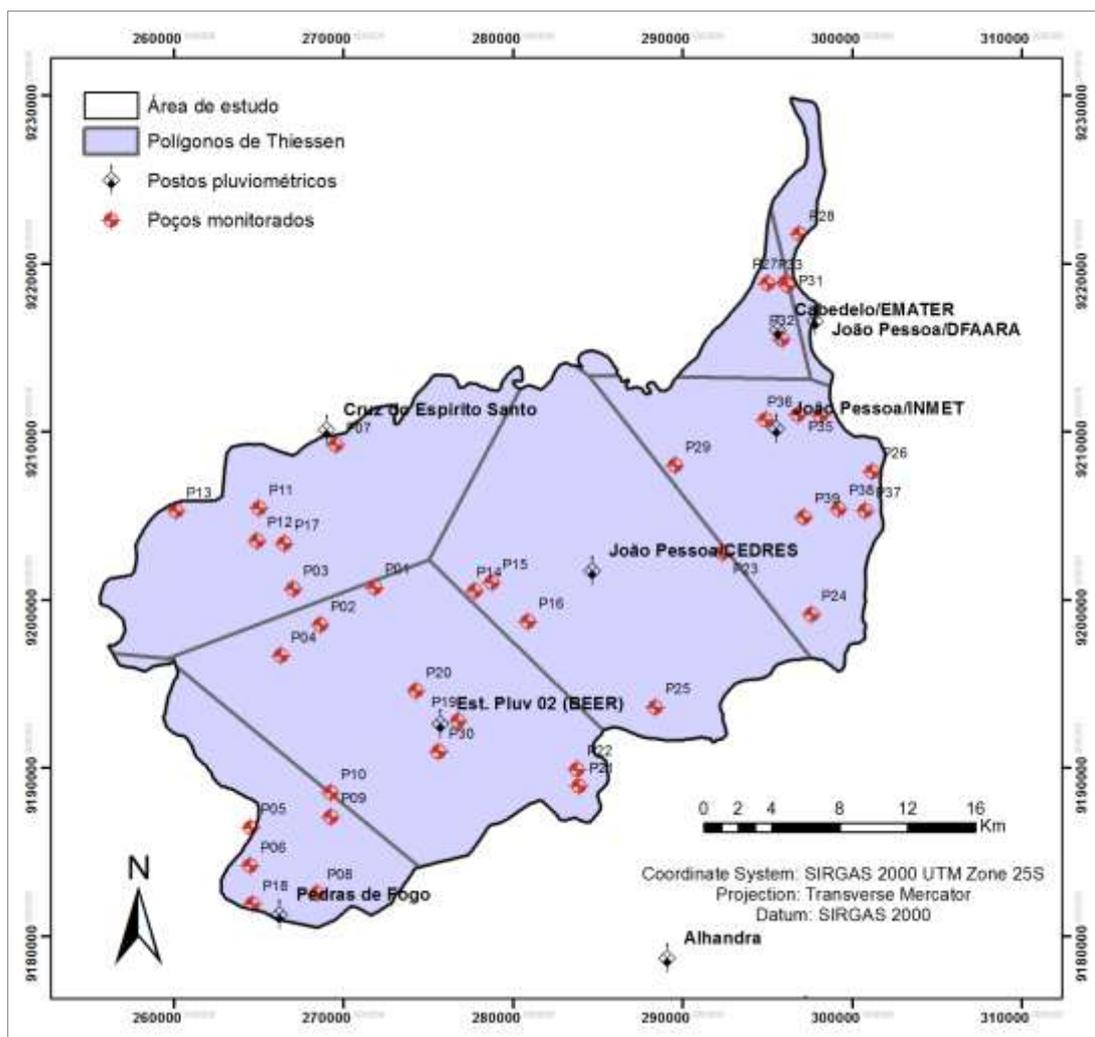


Figura 17 – Determinação das áreas de influência dos postos pelo método de Thiessen

Tabela 9 – Precipitações anuais das estações pluviométricas

Estação pluviométrica	Precipitação 2015 (mm)	Precipitação 2016 (mm)	Poços sob influência
Alhandra	1703,4	1493,0	
Cabedelo/EMATER	1483,0	1498,7	P27, P32, P33
Condado (PE)	997,7	1006,0	
Cruz do Espírito Santo	1108,0	1176,8	P03, P07, P11, P12, P13, P17
Est. Pluv 02 (BEER)	1310,7	1522,7	P01, P02, P04, P19, P20, P21, P22, P30
Goiana (Itapirema - IPA)	1595,8	1546,2	
João Pessoa/CEDRES	1515,3	1475,6	P14, P15, P16, P23, P25
João Pessoa/DFAARA	1618,2	1534,7	P31, P28
João Pessoa/INMET	1530,3	1569,2	P24, P26, P29, P34, P35, P36, P37, P38, P39
Pedras de Fogo	1100,9	1185,6	P05, P06, P08, P09, P10, P18
Pitimbu	1715,8	1767,0	

Os dados da tabela anterior mostram que os anos 2015 e 2016 apresentaram valores de precipitação próximos, sendo a média da área de estudo no ano 2015 de 1350,5 mm e no ano 2016 de 1418,8 mm. Esses valores se encontram um pouco abaixo da média histórica da região, que é de 1740 mm.

No ano de 2015, as estações apresentaram valores variando entre 997,7 mm e 1715,8 mm, o que representa um desvio padrão de 255,4 mm e coeficiente de variação de 18%. Já no ano 2016, as estações apresentaram valor mínimo de 1006,0 mm e valor máximo de 1767,0 mm, com um desvio padrão de 119,1 mm e coeficiente de variação de 15%.

Os mapas a seguir mostram a espacialização da média anual da precipitação de cada uma das estações para o ano 2015 e 2016 (Figuras 18 e 19)

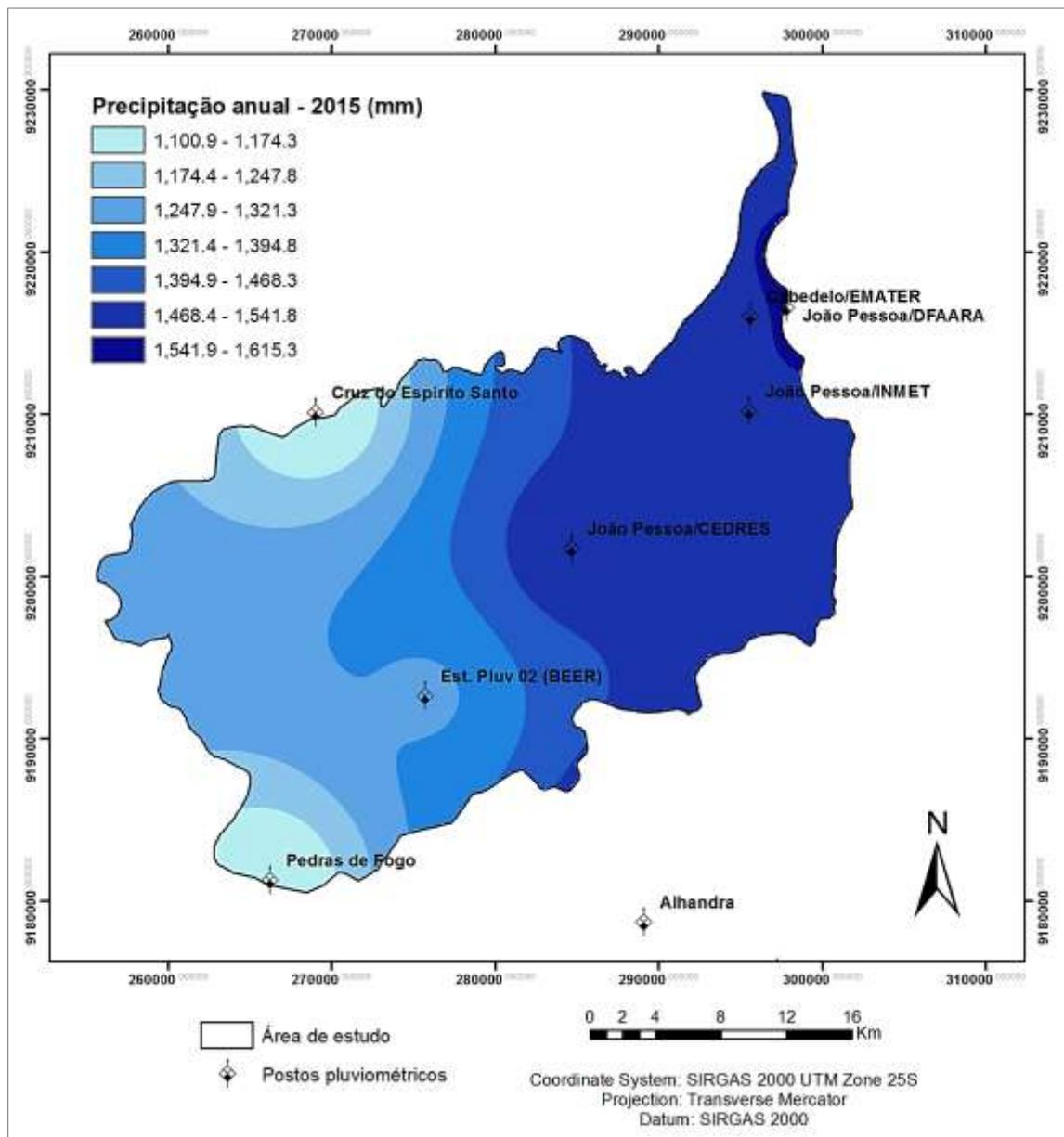


Figura 18 – Distribuição espacial da precipitação do ano 2015 através da interpolação IDW

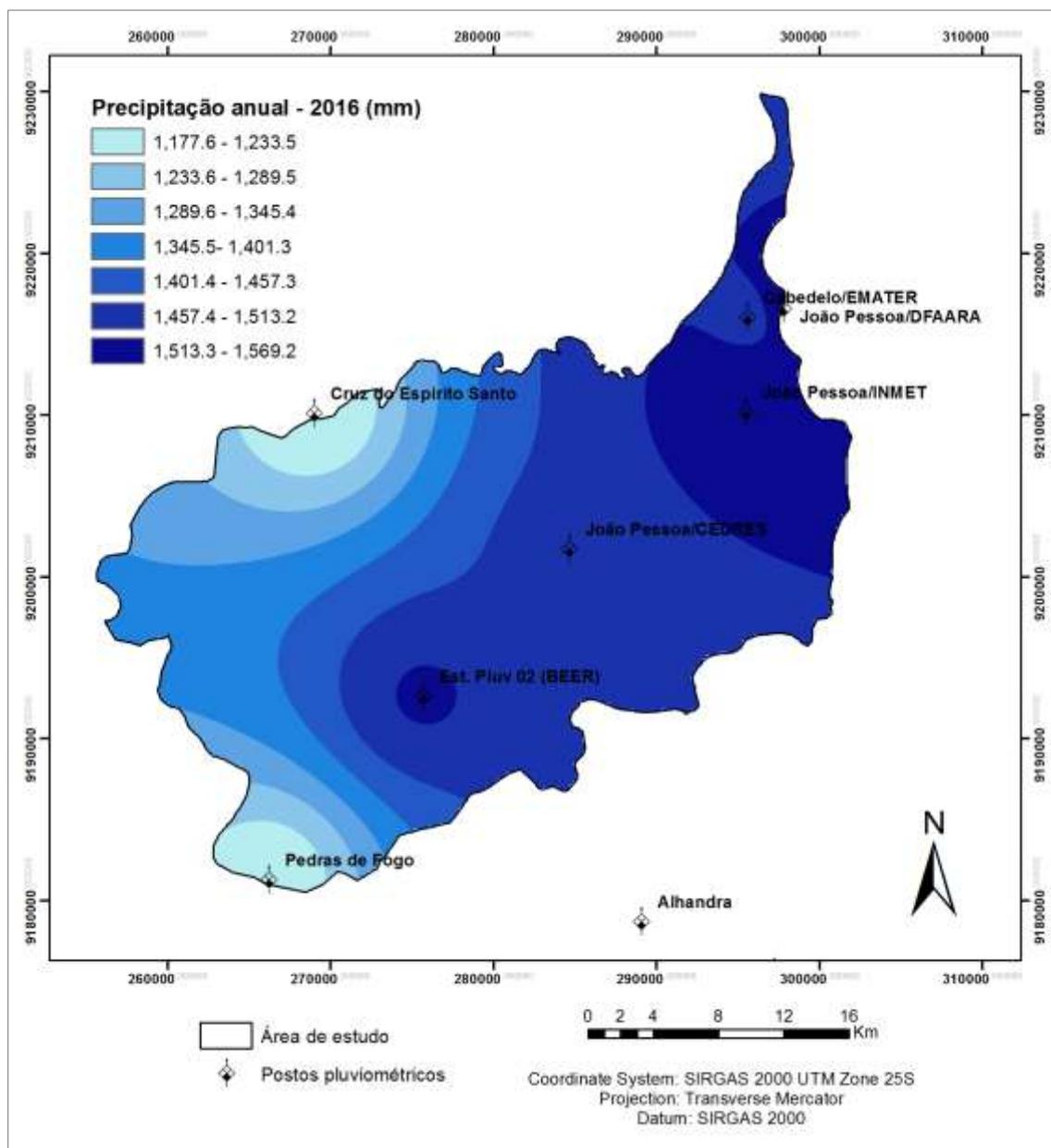


Figura 19 – Distribuição espacial da precipitação do ano 2016 através da interpolação IDW

5.2 Rede de monitoramento do nível freático

O monitoramento do nível freático foi realizado através de 39 poços, sendo 22 localizados na bacia hidrográfica do rio Gramame e 17 na região do baixo curso do rio Paraíba. A Tabela 10 apresenta as principais informações desses poços e uma lista com os nomes de referência deles é apresentada no Apêndice D.

Tabela 10 - Informações dos poços utilizados no monitoramento

ID	Long. X	Lat. Y	Bacia hidrográfica	Sensor	Elevação GPS Trimble (m)	Profundidade (m)	Tipo	Motivo da interrupção
P01	-35,0664	-7,2257	Gramame	Sim	56,607	5,65	Cacimbão	
P02	-35,0954	-7,2459	Gramame		68,089	9,20	Cacimbão	
P03	-35,1099	-7,2264	Gramame		67,104	6,20	Cacimbão	
P04	-35,1166	-7,2622	Gramame	Sim	133,324	19,80	Cacimbão	
P05	-35,1331	-7,3546	Gramame		175,068	11,10	Cacimbão	
P06	-35,1335	-7,3752	Gramame		137,744	10,90	Cacimbão	
P07	-35,0867	-7,1488	B. Paraíba	Sim	12,816	4,90	Cacimbão	
P08	-35,0979	-7,3900	Gramame		113,117	8,05	Cacimbão	
P09	-35,0905	-7,3489	Gramame		121,168	11,70	Cacimbão	
P10	-35,0904	-7,3360	Gramame	Sim	111,432	12,95	Tubular	
P11	-35,1279	-7,1830	B. Paraíba		89,059	18,00	Cacimbão	
P12	-35,1289	-7,2002	B. Paraíba	Sim	80,612	6,74	Cacimbão	
P13	-35,1721	-7,1842	B. Paraíba		18,383	5,00	Cacimbão	
P14	-35,0130	-7,2277	Gramame		25,005	7,00	Cacimbão	
P15	-35,0038	-7,2235	Gramame		26,776	12,10	Tubular	
P16	-34,9845	-7,2445	Gramame	Sim	74,412	10,37	Cacimbão	
P17	-35,1145	-7,2019	B. Paraíba		91,981	26,00	Cacimbão	
P18	-35,1322	-7,3958	Gramame	Sim	155,326	19,65	Cacimbão	
P19	-35,0219	-7,2976	Gramame	Sim	99,938	2,11	Tubular	
P20	-35,0446	-7,2816	Gramame	Sim	46,518	7,30	Cacimbão	
P21	-34,9579	-7,3332	Gramame		33,173	4,00	Cacimbão	
P22	-34,9587	-7,3242	Gramame	Sim	51,391	16,00	Cacimbão	
P23	-34,8805	-7,2079	Gramame	Sim	50*	39,00	Tubular	
P24	-34,8332	-7,2412	Gramame	Sim	25*	28,00	Tubular	
P25	-34,9170	-7,2908	Gramame	Sim	34*	9,70	Cacimbão	
P26	-34,8004	-7,1646	Gramame	Sim	25*	24,00	Tubular	
P27	-34,8463	-7,0626	B. Paraíba		1,352	13,00	Tubular	
P28	-34,8389	-7,0368	B. Paraíba		-0,815	4,90	Tubular	
P29	-34,9056	-7,1609	B. Paraíba		35*	**	Tubular	
P30	-35,0325	-7,3143	Gramame		117,648	2,00	Tubular	
P31	-34,8451	-7,0641	B. Paraíba	Sim	1,026	8,89	Tubular	
P32	-34,8485	-7,0931	B. Paraíba	Sim	0,86	12,59	Tubular	
P33	-34,8559	-7,0630	B. Paraíba	Sim	-1,193	14,66	Tubular	
P34	-34,8279	-7,1343	B. Paraíba	Sim	40 *	36,70	Tubular	
P35	-34,8401	-7,1339	B. Paraíba	Sim	33,134	42,83	Tubular	
P36	-34,8571	-7,1365	B. Paraíba	Sim	22*	22,94	Tubular	
P37	-34,8042	-7,1857	B. Paraíba	Sim	28*	32,00	Tubular	
P38	-34,8184	-7,1845	B. Paraíba	Sim	42*	33,59	Tubular	
P39	-34,8369	-7,1889	B. Paraíba	Sim	39*	35,17	Tubular	
-	-35,1529	-7,2032	B. Paraíba	-	-	-	Tubular	Excesso de bombeamento

-	-35,0484	-7,1342	B. Paraíba	-	-	-	Cacimbão	A proprietária fechou a boca do poço
-	-34,9149	-7,1219	B. Paraíba	-	-	-	Tubular	O poço foi entupido
-	-34,8490	-7,2122	Gramame	-	-	-	Tubular	Excesso de bombeamento

* Elevações segundo o *Google Earth Pro*.

** Não foi possível medir a profundidade porque o poço possui bomba instalada e o proprietário não soube informar com precisão a profundidade.

Embora tenham sido cadastrados 43 poços na região, 4 deles tiveram seu monitoramento interrompido. Desses, 2 foram suspensos do monitoramento pois tiveram suas entradas bloqueadas e os outros 2 tiveram seu monitoramento descontinuado por decisão própria, já que o excesso de uso da bomba estava impossibilitando a obtenção do nível estático da água.

Dos poços cadastrados e utilizados nesta pesquisa, 20 são cacimbões e 19 são poços tubulares, o que implica numa rede de monitoramento com densidade de 1 poço a cada 26,6 km². A profundidade média dos poços monitorados é de 15,65 m, com desvio padrão de 11,25 m, o que corresponde a um coeficiente de variação de 72%. Os poços com menor e maior profundidade são os P30 e P35, com 2,0 m e 42,83 m, respectivamente. Já a elevação desses poços varia entre -1,19 e 175,07 m, sendo as cotas mais baixas no litoral e os pontos mais altos no sudoeste da área monitorada. Um mapa da distribuição espacial dos poços da rede de monitoramento atual é mostrado na Figura 20.

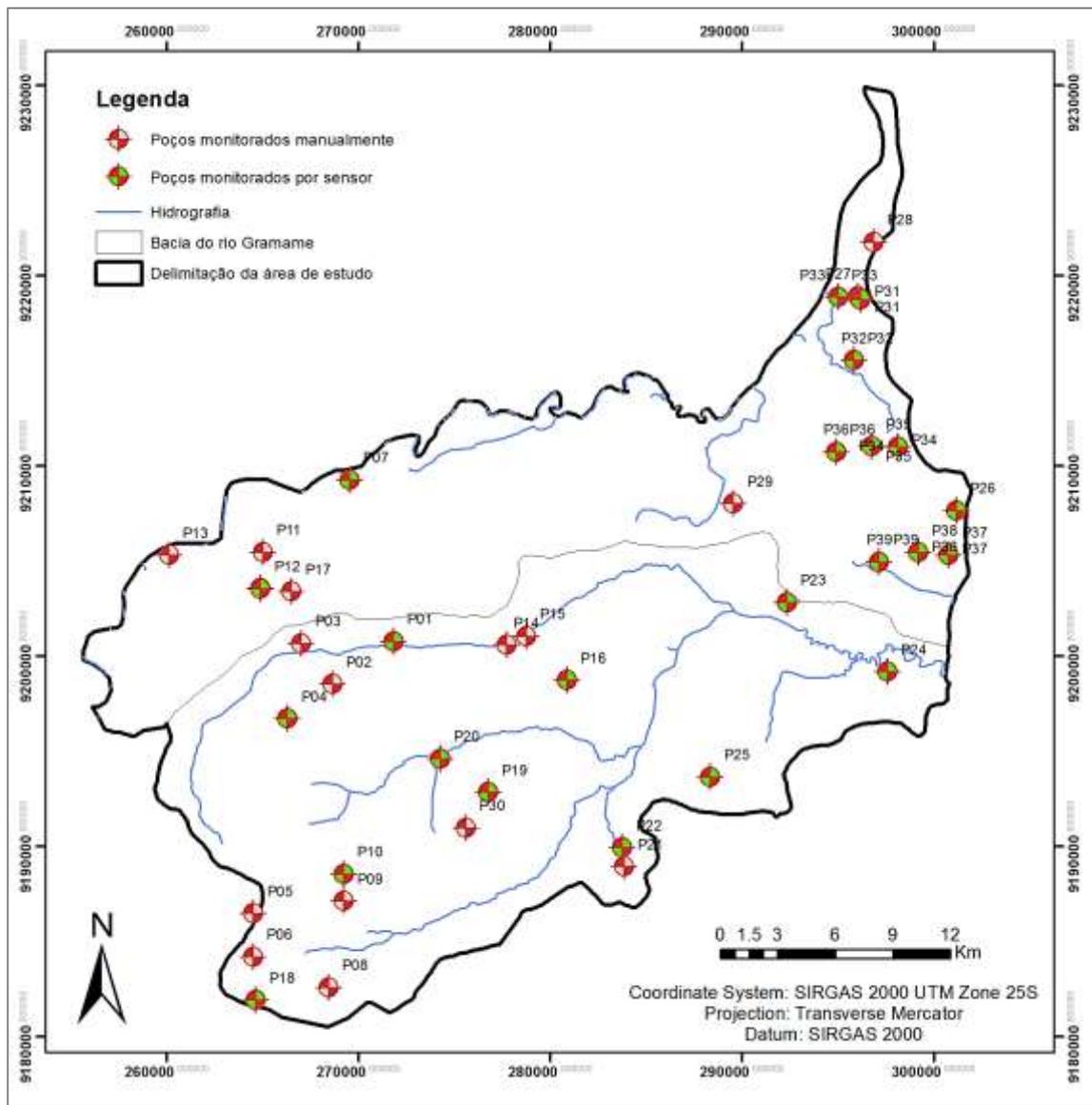


Figura 20 - Localização dos poços monitorados

A rede de monitoramento automático instalada é formada por 23 sensores que fazem medições a cada 15 minutos, implicando uma densidade de 1 sensor por 45 km². A Tabela 11 apresenta informações da rede de monitoramento automática.

Tabela 11 - Informações dos sensores de medição de nível a cada 15 minutos

ID	Início do monitoramento	Marca	ID_Sensor	ID_Baro	Tipo de medição	Existe bombeamento
P01	19/fev./16	Ampeq	113	-	Nível d'água	Sim
P04	19/fev./16	Ampeq	114	-	Nível d'água	Sim
P18	01/abr./11	Ampeq	111	-	Nível d'água	Sim
P20	19/fev./16	Ampeq	116	-	Nível d'água	Sim

P07	08/ago./16	SWS	123	202	Nível d'água	Sim
P16	19/fev./16	Ampeq	117	-	Nível d'água	Sim
P22	24/fev./16	Ampeq	118	-	Nível d'água	Sim
P25	01/ago./16	SWS	120	201	Nível d'água	Sim
P26	01/ago./16	SWS	122	-	Nível d'água	Sim
P23	08/ago./16	SWS	124	-	Nível d'água	Não
P10	19/fev./16	Ampeq	115	-	Nível d'água	Não
P19	28/dez./15	Ampeq	112	-	Nível d'água	Não
P24	01/ago./16	SWS	121	-	Nível d'água	Sim
P12	29/jul./16	SWS	119	203	Nível d'água	Sim
P31	09/dez./16	SWS	129	-	Nível d'água e condutividade elétrica	Não
P32	09/dez./16	SWS	128	206	Nível d'água e condutividade elétrica	Não
P33	29/nov./16	SWS	125	204	Nível d'água e condutividade elétrica	Não
P34	14/fev./17	SWS	132	-	Nível d'água e condutividade elétrica	Não
P35	14/fev./17	SWS	133	-	Nível d'água e condutividade elétrica	Não
P36	09/dez./16	SWS	127	-	Nível d'água e condutividade elétrica	Não
P37	23/jan./17	SWS	130	-	Nível d'água e condutividade elétrica	Não
P38	23/jan./17	SWS	131	-	Nível d'água e condutividade elétrica	Não
P39	09/dez/16	SWS	126	205	Nível d'água e condutividade elétrica	Não

O processo de instalação dos sensores iniciou em dezembro/2015 e foi finalizado em fevereiro/2017, com exceção do poço P18, que já vinha sendo monitorado desde 2011.

Dos 23 sensores instalados, 15 são da marca SWS e 8 da Ampeq. Foram instalados também 7 barômetros. Além dos barômetros mencionados na tabela anterior, um outro foi instalado na UFPB, no terceiro andar do Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental - LARHENA, localizado no Centro de Tecnologia - CT. A localização dos sensores pode ser vista no mapa da Figura 20, apresentado anteriormente.

Em relação ao uso da água, foi identificado que em 20 poços monitorados a água é destinada para consumo humano e atividades domésticas. Os outros 18 poços estão abandonados ou seu uso é exclusivo para monitoramento, como é o caso dos onze poços perfurados pelo projeto BRAMAR, que são o P19 e P30 ao P39.

Dos 18 poços que estão em uso, foi identificado que, na maioria, água é retirada por meio de bombas e apenas no poço P14 a água é retirada manualmente. A alta frequência de

bombeamentos identificado em 4 poços teve como consequência a impossibilidade de aplicação do método WTF para estimar a recarga nestes locais, são eles o P03, P15, P18 e P29. Outros poços que foram desconsiderados do estudo da recarga foram o P12, P24 e P30 ao P39, pois tiveram seu monitoramento iniciado tardiamente, não dispondo de dados suficientes para caracterização da curva de recessão. Ao todo, foram analisadas as variações do nível freático de 27 poços e aplicado o método WTF em 20 poços.

5.3 Análise das variações do nível freático

A dinâmica de variações do nível freático dos poços apresenta características diversas. Certos comportamentos semelhantes serão apresentados a seguir.

Convém informar que neste estudo os dias julianos foram utilizados de forma adaptada. O dia 1 foi estabelecido como sendo 1 de janeiro de 2015 e esta contagem continua ao longo de 2016 e 2017, isto é, o dia 1 de janeiro de 2016 é o dia juliano 366 e o dia 1 de janeiro de 2017 é o dia juliano 732. Daqui em diante, em todos os resultados apresentados, os dias serão contados desta maneira.

O primeiro tipo de comportamento identificado foi uma variação do nível freático pequena, de até 1 m ao longo do ano. Os poços que apresentaram esse tipo de comportamento foram o P01, P14, P21, P23, P25, P26, P27 e P28. Os gráfico dos poços P01 e P28 são mostrados a seguir para ilustrar esse tipo de comportamento. Estes poços tiveram uma variação de 0,70 m e 0,46 m, respectivamente, entre o nível mais alto e o nível mais baixo. Os poços P01, P14, P21, P25, P27 e P28 se localizam perto de cursos d'água, o que pode justificar esse tipo de comportamento. Os poços P23 e P26 são profundos, chegando a 39 m e 24 m, respectivamente.

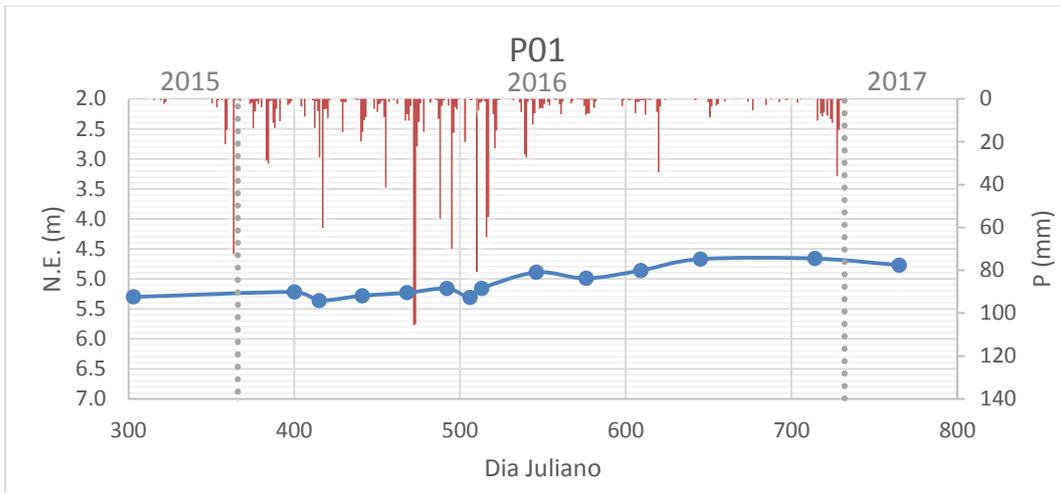


Figura 21 – Variação do nível da água no poço P01

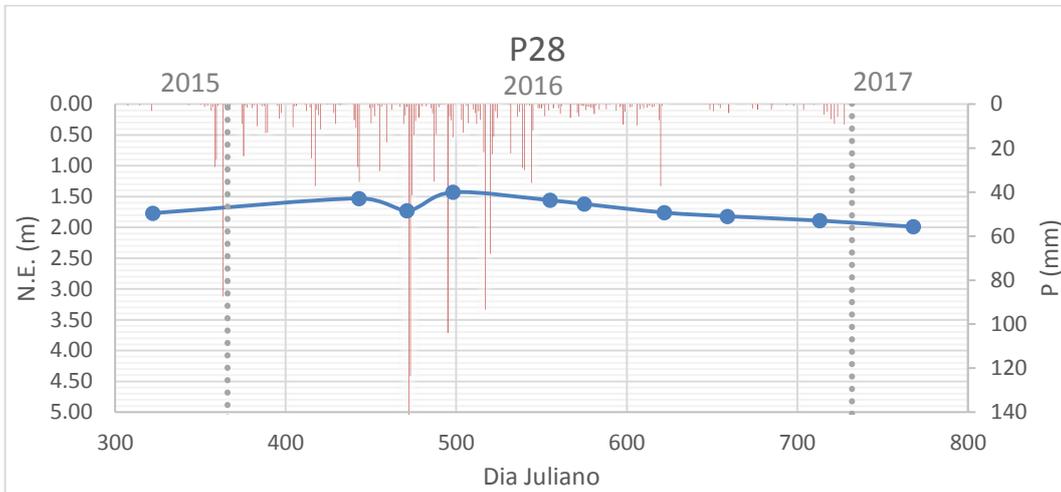


Figura 22 – Variação do nível da água no poço P28

Outro tipo de comportamento observado foi aquele em que o nível freático varia entre 1 e 2 m do nível mais baixo para o nível mais alto. Os poços que apresentam esse comportamento são o P02, P05, P06, P07, P11, P13, P19 e P22.

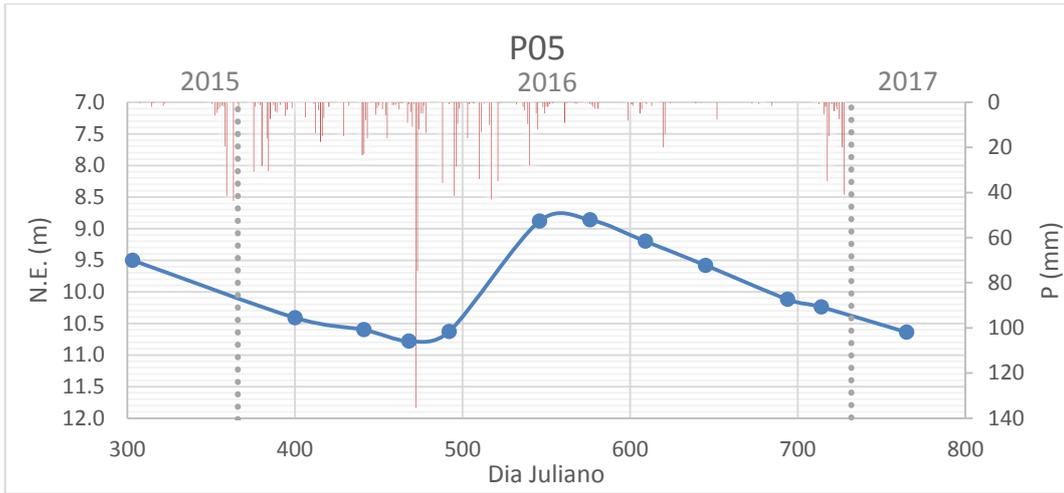


Figura 23 – Variação do nível da água no poço P05

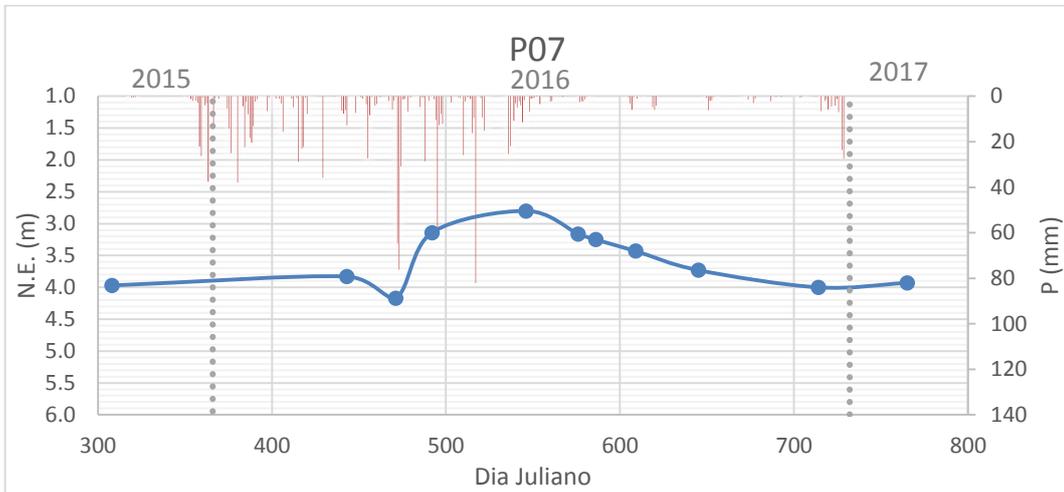


Figura 24 – Variação do nível da água no poço P07

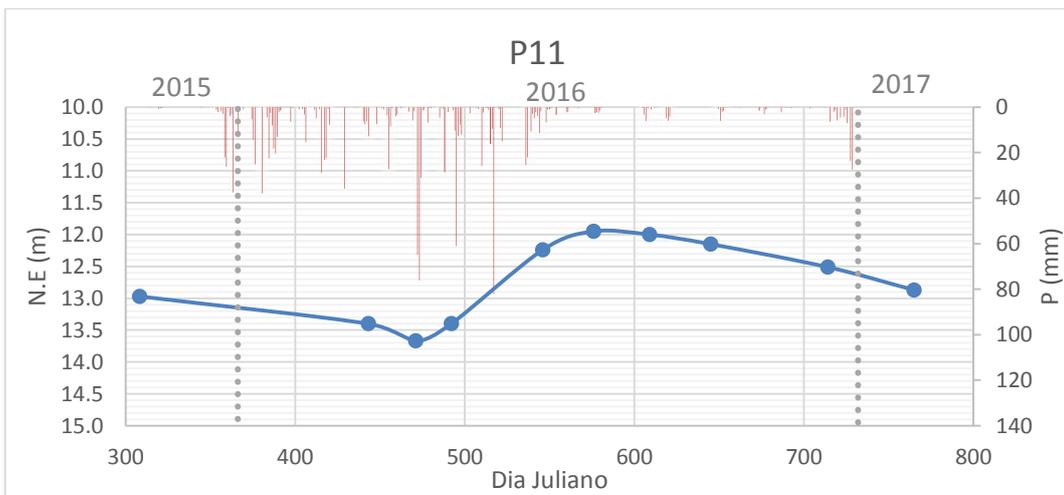


Figura 25 – Variação do nível da água no poço P11

Os poços que apresentaram variação maior, acima de 2 m, foram os poços P04, P08, P09, P10, P16, P17, P20 e P29. Os poços que tiveram as maiores variações foram o P08, com variação de 2,44 m, o P10, com uma variação de 3,92 m e o poço P16, com variação de 2,9 m.

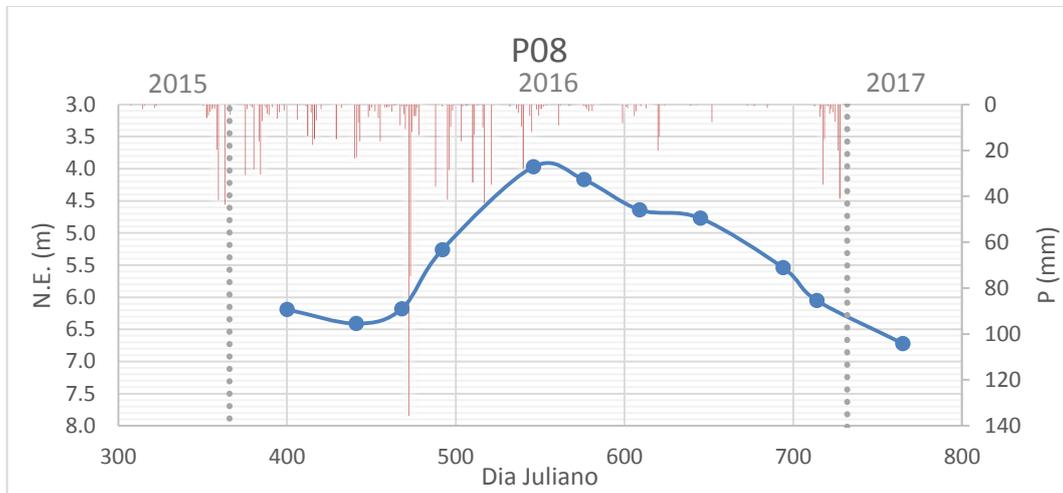


Figura 26 – Variação do nível da água no poço P08

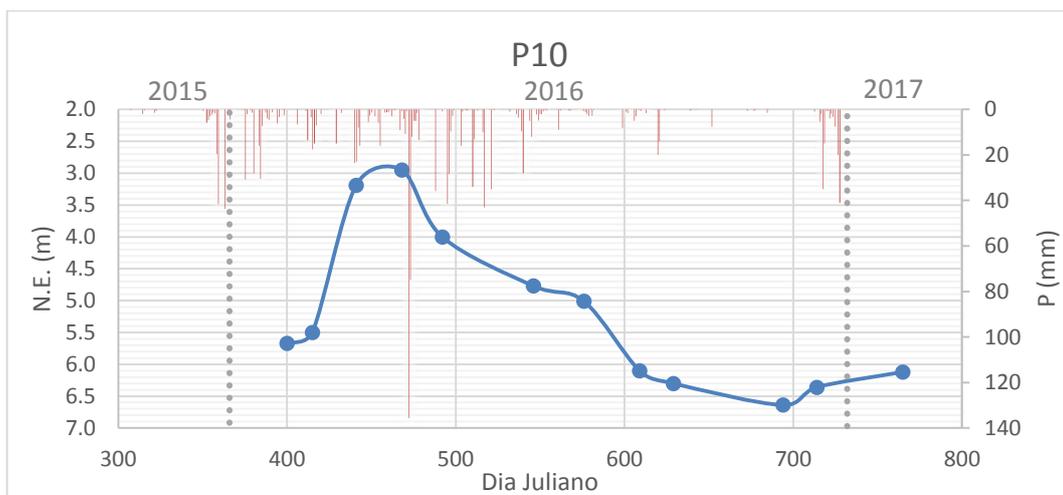


Figura 27 – Variação do nível da água no poço P10

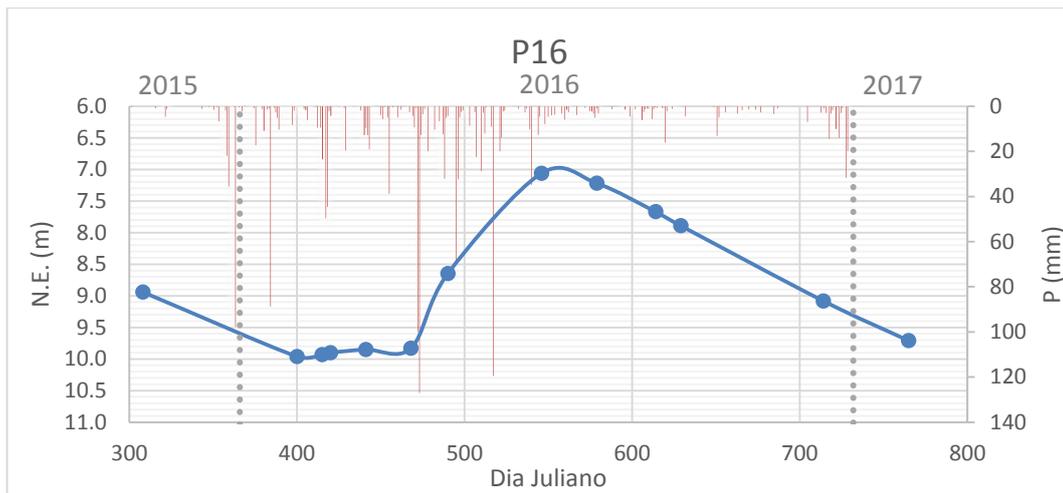


Figura 28 – Variação do nível da água no poço P16

Um outro tipo de comportamento observado entre os poços foi aquele com uma variação brusca e aleatória ao longo do período analisado, não sendo observado relação destas variações com os eventos de precipitação. Este tipo de comportamento se deve aos bombeamentos realizados. Poços com esse tipo de comportamento não foram utilizados na análise da recarga. Os poços que tiveram esse tipo de comportamento foram o P03, P15 e P18. O P03 apresentou um rebaixamento de 3,5 metros em um intervalo de 1 mês.

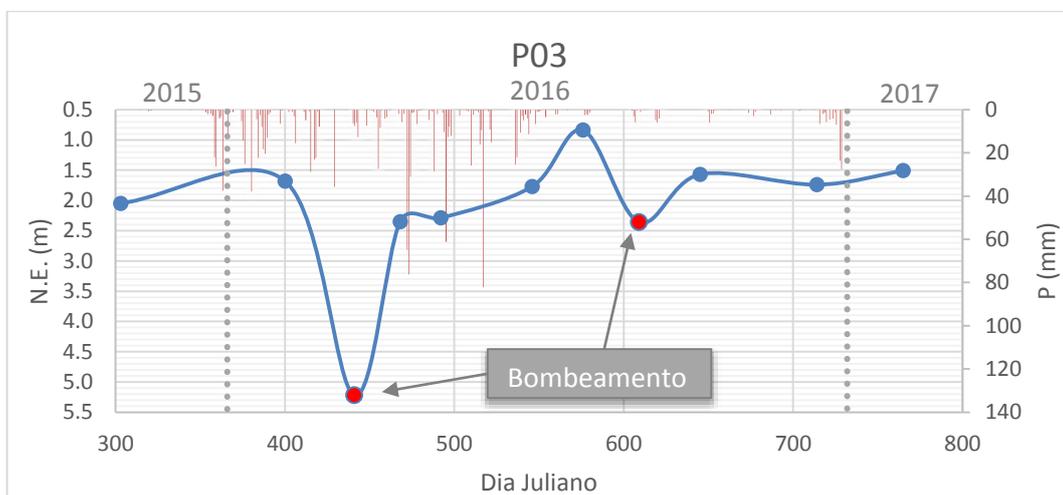


Figura 29 – Variação do nível da água no poço P03

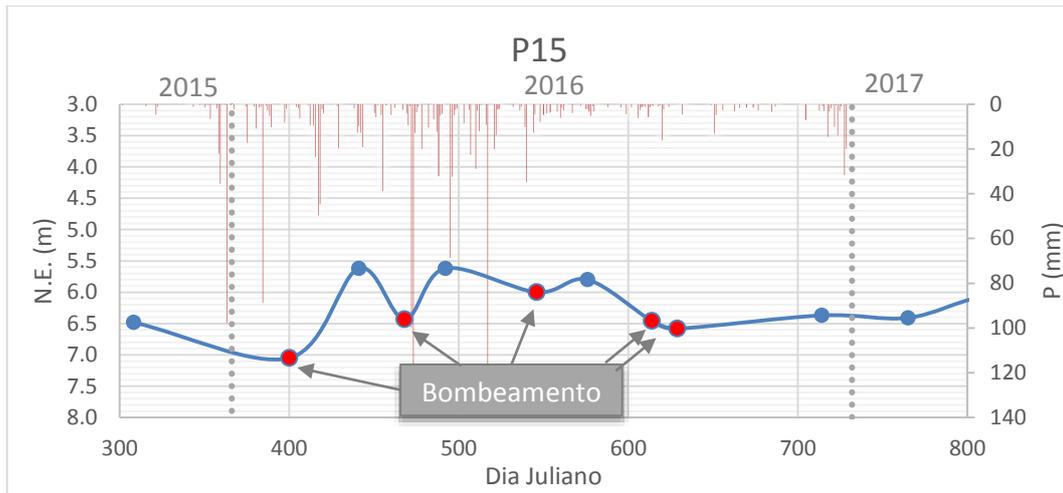


Figura 30 – Variação do nível da água no poço P15

A distribuição espacial dos tipos de variação do lençol freático é apresentada no mapa a seguir. Percebe-se que no litoral há uma tendência a variações pequenas do nível do aquífero ao longo do ano. Já na porção oeste, observa-se uma oscilação maior do nível freático entre o período chuvoso e o período de estiagem.

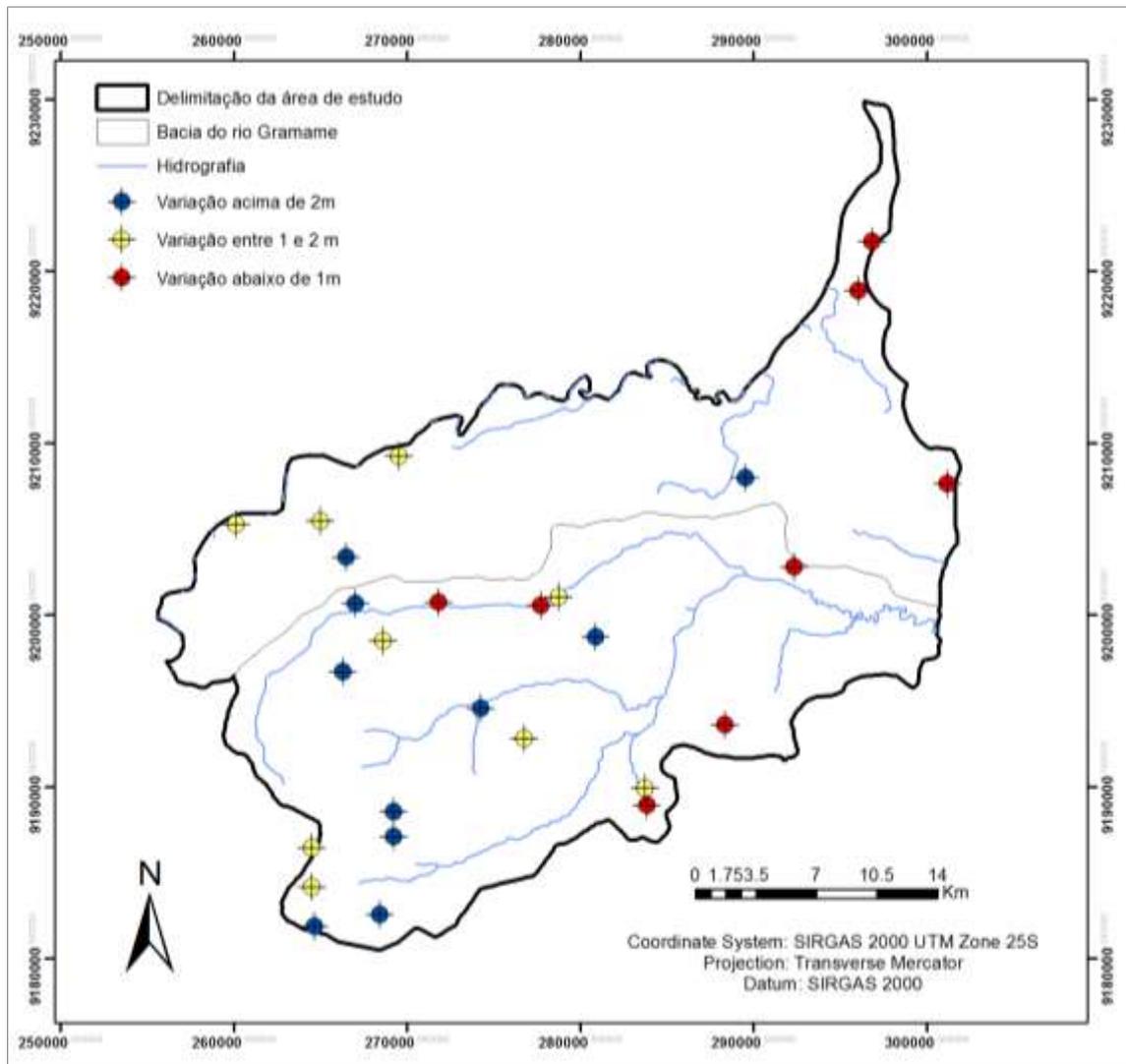


Figura 31 – Distribuição da variação do nível da água na área de estudo.

5.4 Propriedades hidrodinâmicas do aquífero

Os valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento do aquífero foram determinados através de ensaios de bombeamento. Foram realizados testes nos poços P02, P09, P14, P04, P08, P10, P23, P24, P31, P32, P33 e P36, totalizando 12 testes de bombeamento (Figura 32), abrangendo poços do tipo cacimbões e tubulares.

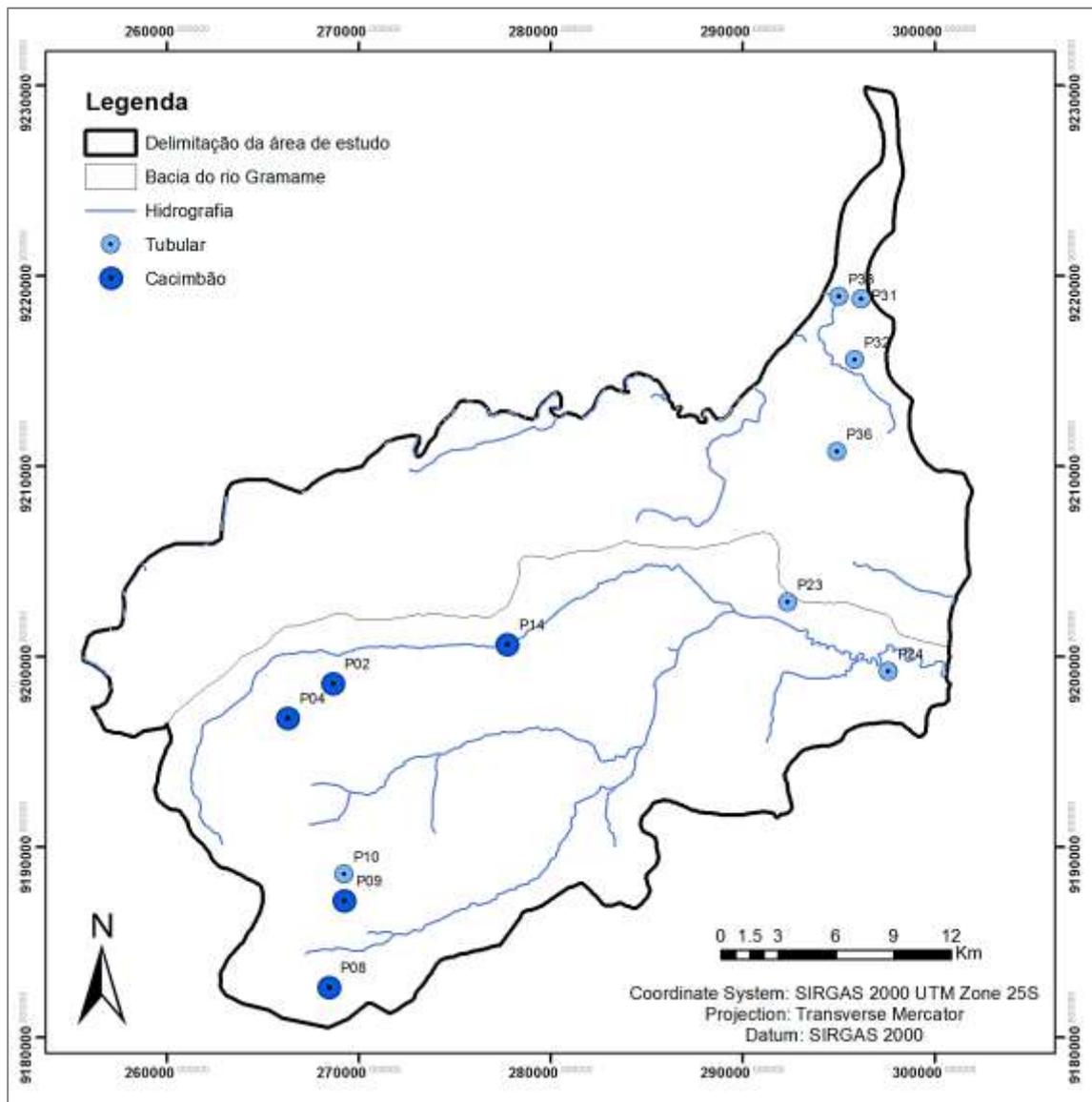


Figura 32 – Localização dos poços onde foram realizados os testes de bombeamento

Os dados obtidos dos testes em poços tubulares foram analisados no software *AQTESOLV Demo*, utilizando diversas soluções e os dados dos testes realizados nos cacimbões foram analisados pelo método de Papadopulos.

5.4.1 Poços tubulares

Os poços tubulares são aqueles cujo diâmetro mede, em média, 100 mm. Foram feitos testes de bombeamento em 7 poços tubulares: P31, P32, P33, P36, P10, P23 e P24. Os poços P31, P32, P33 e P36 foram perfurados em 2016 dentro do projeto BRAMAR, exclusivamente para monitoramento. Os detalhes construtivos desses poços são

apresentados no Anexo 1. Esse detalhamento de informações permitiu uma análise dos resultados mais confiável nesses poços.

O P31 é um poço localizado na área urbana de João Pessoa, no bairro do Bessa, próximo ao mar. Ele tem uma profundidade de 8,9 m, diâmetro de 0,1 m e foi bombeado por 52 min a uma vazão constante de 0,04 l/s. Os gráficos do rebaixamento e da recuperação são apresentados na Figura 33.

Tabela 12 – Teste de bombeamento no P31

GW1				
Vazão [l/s]	Duração do bombeamento [min]	Duração da recuperação [min]	Rebaixamento máximo [m]	Diâmetro do poço [m]
0,04	52	9	0,66	0,1

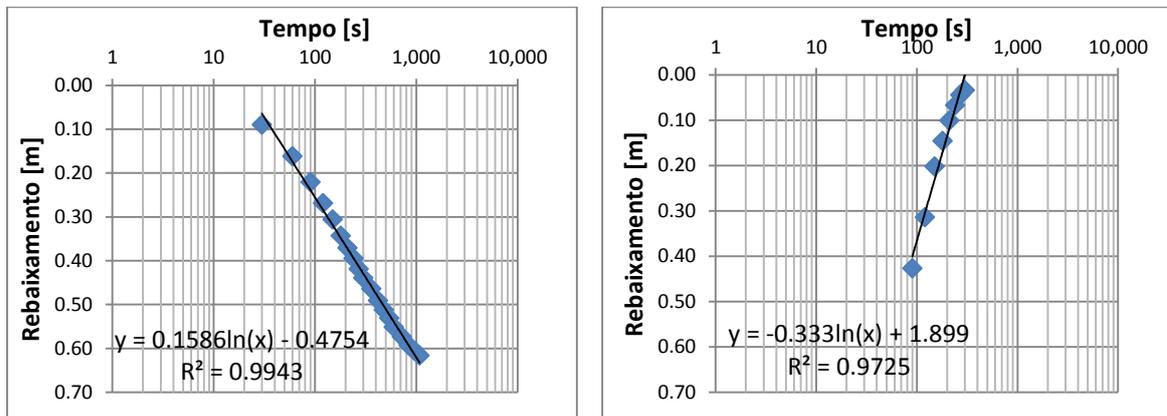


Figura 33 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P31

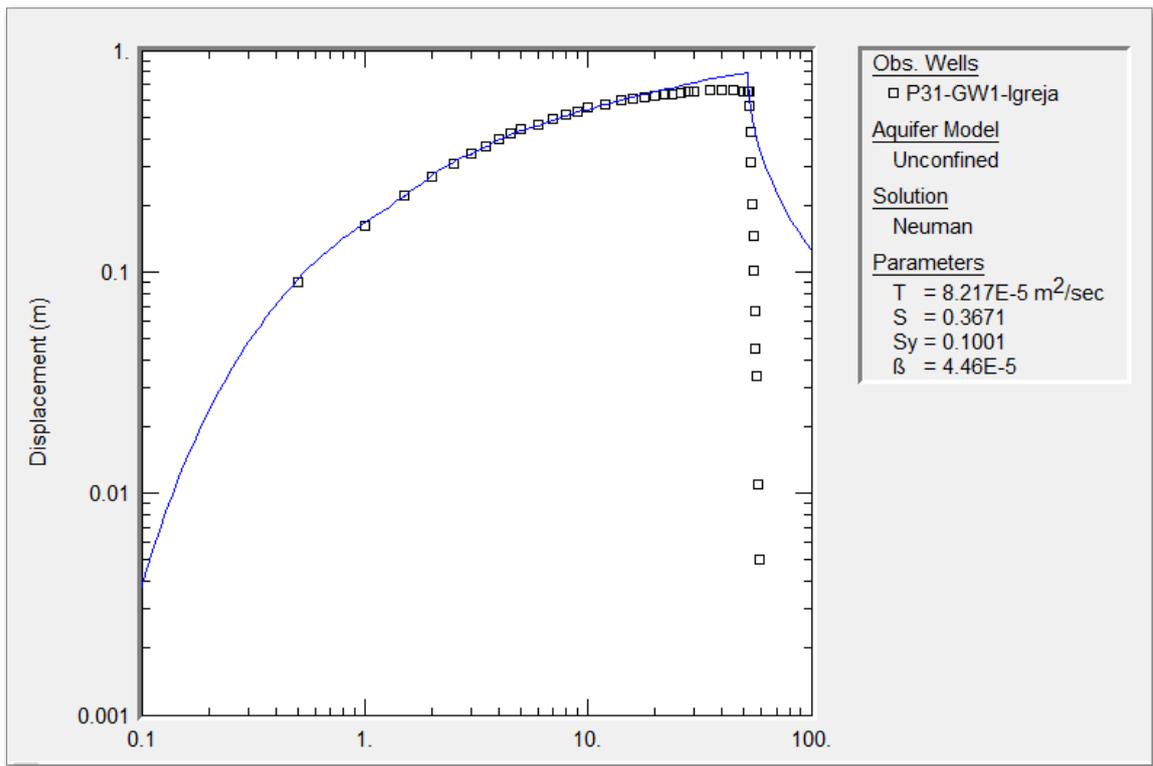


Figura 34 – Resultado do teste de bombeamento no P31 - Solução de Neuman

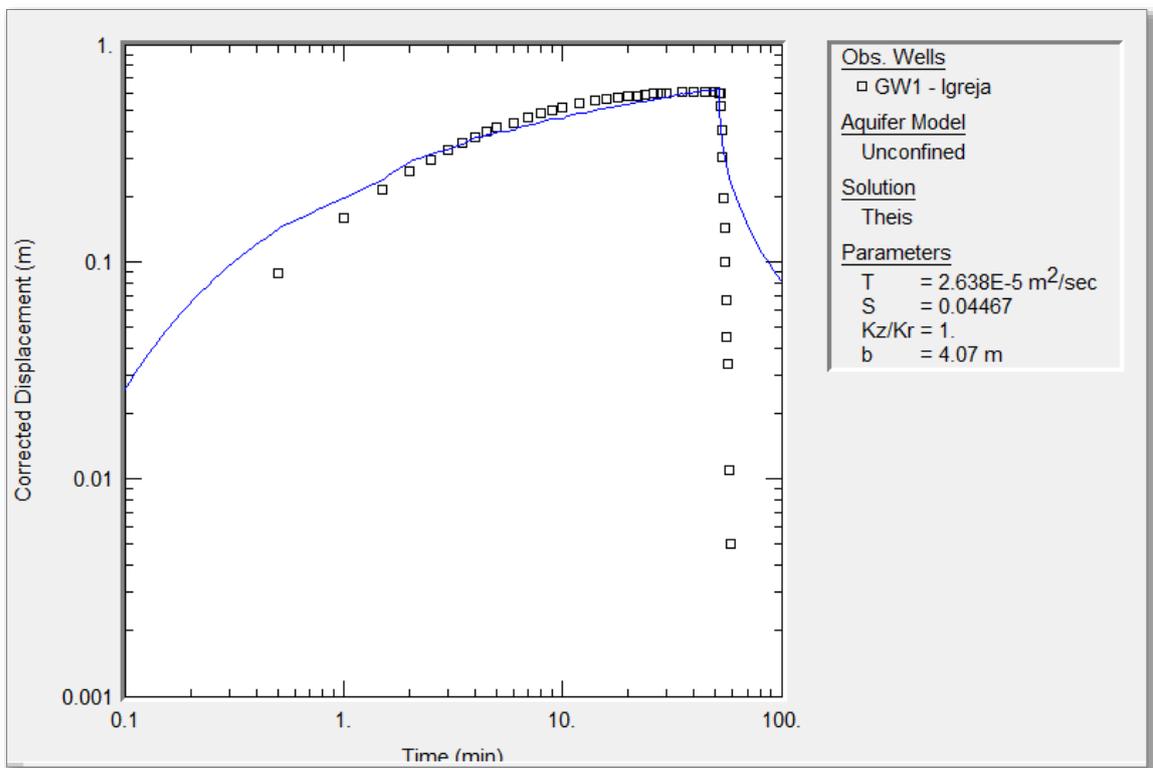


Figura 35 – Resultado do teste de bombeamento no P31 - Solução de Theis

Os dados do ensaio de bombeamento foram analisados no *AQTESOLV Demo* utilizando a solução de Neuman e a solução de Theis. A Solução de Neuman foi a que melhor se ajustou aos valores encontrados. Os valores dos parâmetros encontrados foram $T = 8,21 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $S = 0,37$ e $S_y = 0,1$.

O poço P32 também se localiza no litoral de João Pessoa, tem profundidade de 12,59 m, diâmetro de 0,1m e foi bombeado por 30 minutos a uma vazão constante de 0,12 l/s. Os gráficos de rebaixamento e recuperação são mostrados na Figura 36.

Tabela 13 – Teste de bombeamento no P32

P32				
Vazão [l/s]	Duração do bombeamento [min]	Duração da recuperação [min]	Rebaixamento máximo [m]	Diâmetro do poço [m]
0,12	30	10,5	1,73	0,1

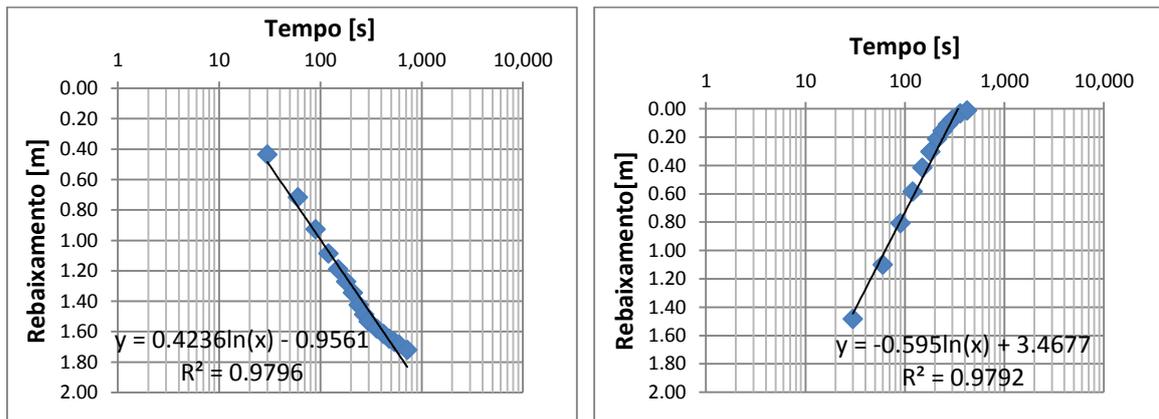


Figura 36 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P32

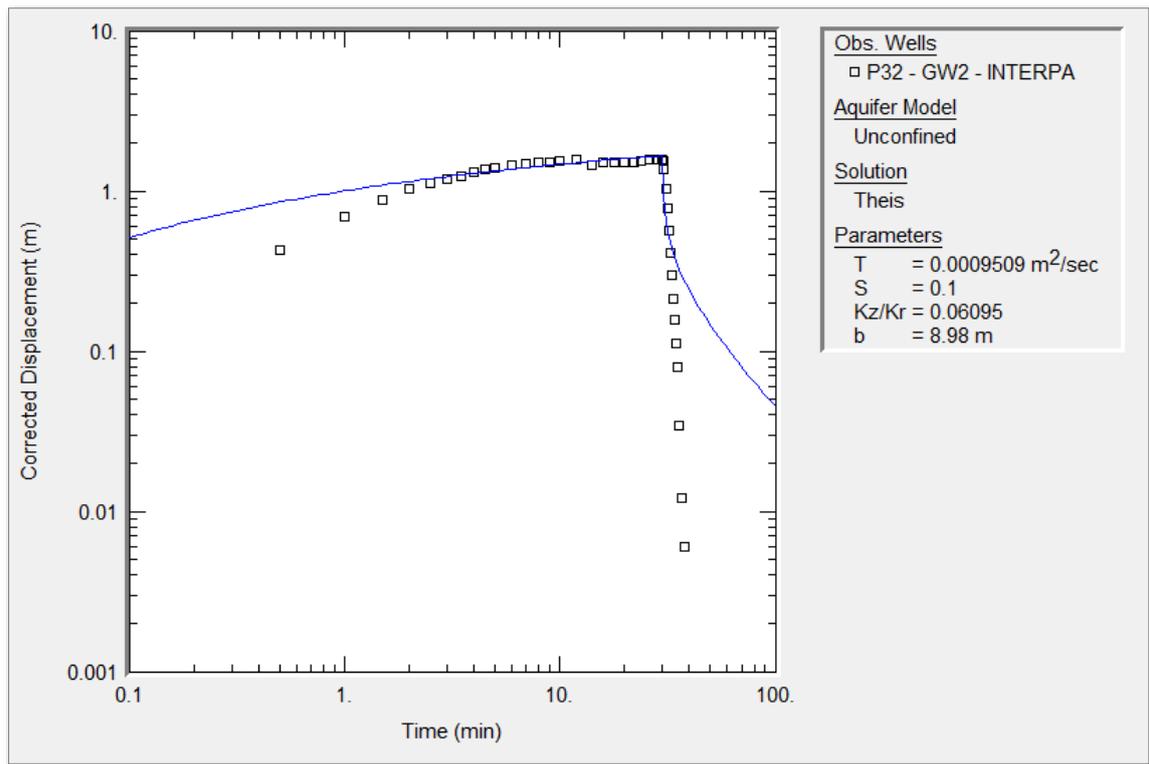


Figura 37 – Resultado do teste de bombeamento no P32 - Solução de Theis

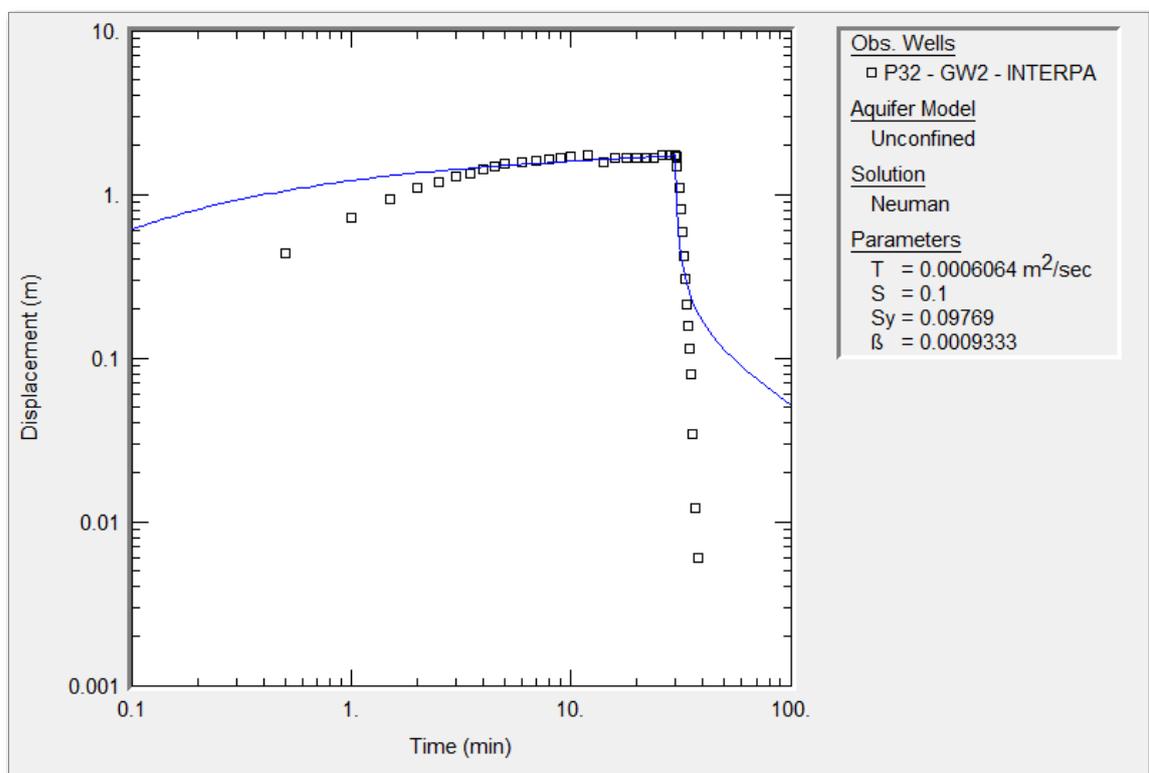


Figura 38 – Resultado do teste de bombeamento no P32 - Solução de Neuman

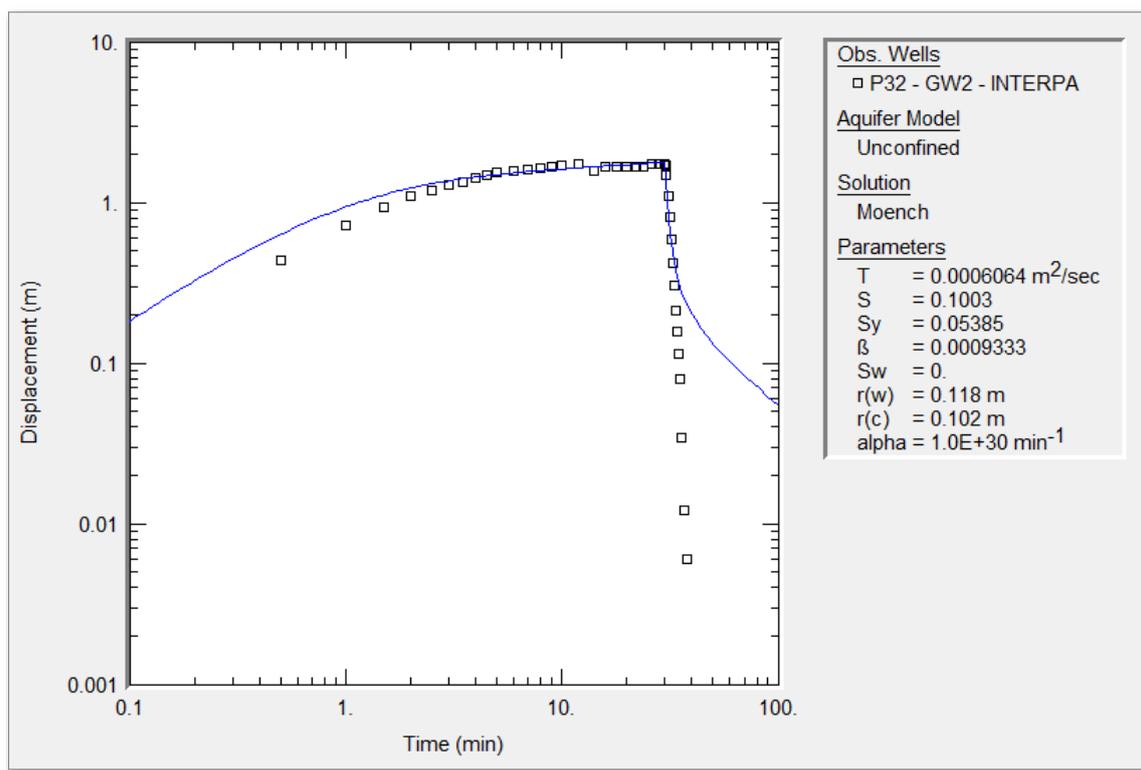


Figura 39 – Resultado do teste de bombeamento no P32 - Solução de Moench

As soluções utilizadas para analisar os dados do ensaio de bombeamento do P32 foram Theis, Neuman e Moench. As três soluções se adaptaram de forma razoável aos dados observados. A solução de Theis apresentou um valor de $T = 9,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 0,1$. A solução de Neuman apresentou $T = 6,06 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $S = 0,1$ e $Sy = 0,098$. Já a solução de Moench mostrou $T = 6,06 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, semelhante à solução de Neuman, $S = 0,1$, também semelhante à solução de Neuman, e $Sy = 0,05$.

Outro poço perfurado pelo BRAMAR, em que foi realizado o teste de bombeamento, foi o P33. Ele se localiza também no bairro do Bessa, em João Pessoa, dentro de uma área de preservação de Mata Atlântica, denominada Mata do Amém, nas dependências do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio.

Esse poço tem profundidade de 14,66 m, diâmetro de 0,1 m e foi bombeado por 30 minutos a uma vazão constante de 0,12 l/s. Os gráficos de rebaixamento e recuperação são mostrados na Figura 40. Foi observado que, após um determinado tempo, o nível da água tornou a subir, mesmo com a vazão de bombeamento mantida constante. Isso mostra que o aquífero não é infinito. De fato, existe um curso d'água próximo a esse poço que deve ter influenciado nos resultados deste teste de bombeamento.

Tabela 14 – Teste de bombeamento no P33

P33				
Vazão [l/s]	Duração do bombeamento [min]	Duração da recuperação [min]	Rebaixamento máximo [m]	Diâmetro do poço (m)
0,19	22	180	3,35	0,1

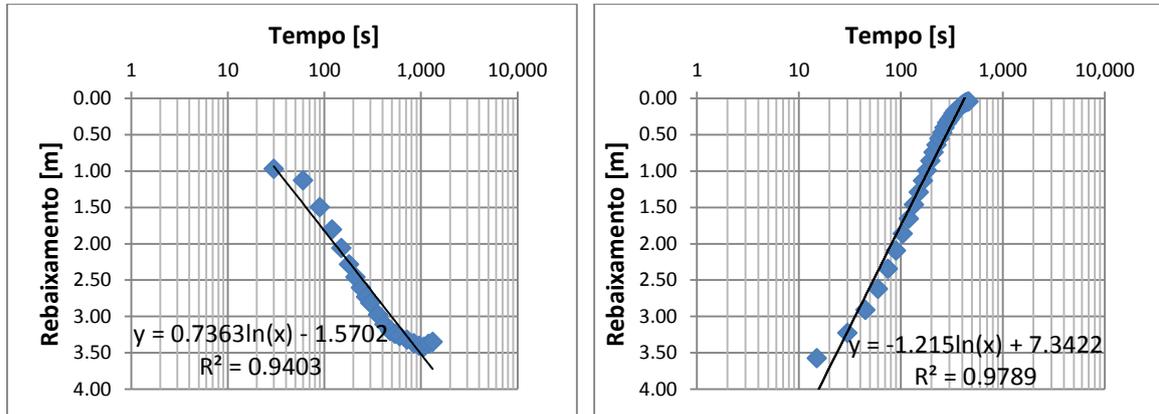


Figura 40 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P33

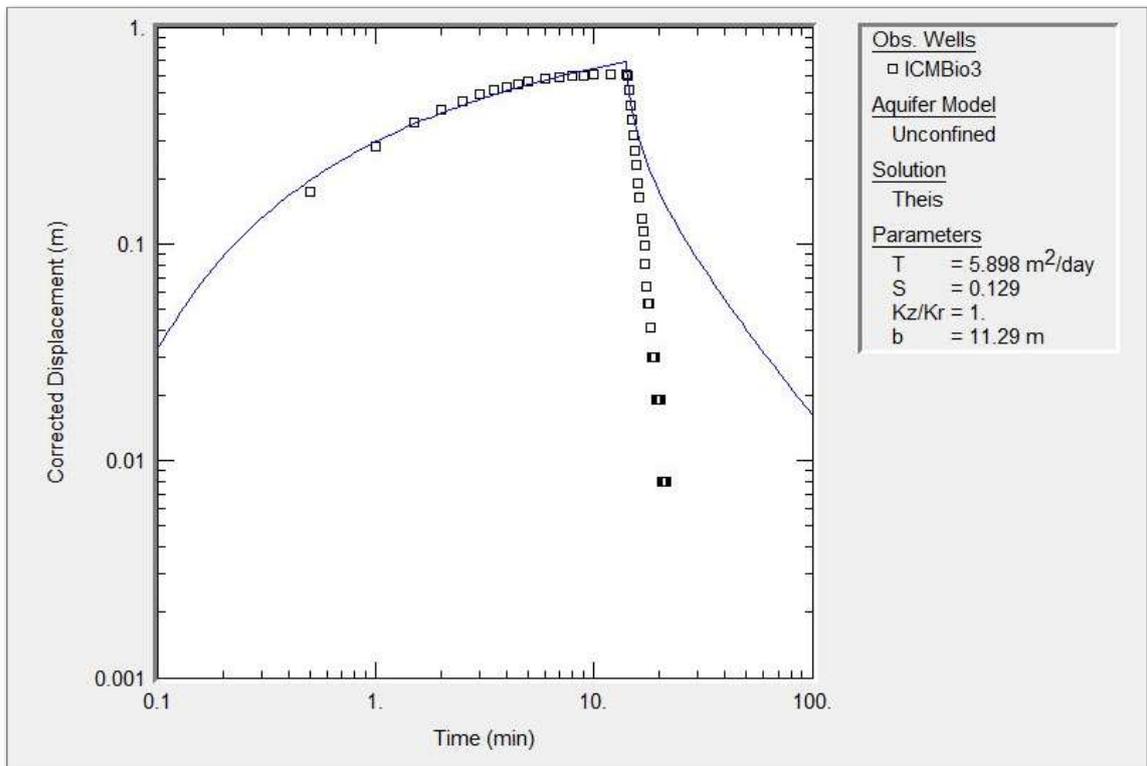


Figura 41 – Resultado do teste de bombeamento no P33 - Solução de Theis

O rebaixamento e a recuperação desse poço foram analisados pela solução de Theis. Esta solução se ajustou bem aos dados do ensaio, fornecendo valor de $T = 6,83 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 0,13$.

O último poço perfurado pelo BRAMAR e onde foi realizado teste de bombeamento foi o P36. Esse poço também se localiza em uma área de preservação de Mata Atlântica, denominada Mata do Buraquinho, nas dependências da Superintendência de Administração de Meio Ambiente da Paraíba – SUDEMA. O P36 tem uma profundidade de 22,94 m, diâmetro de 0,1 m e foi bombeado por um período de 35 minutos com vazão constante de 0,65 l/s.

Tabela 15 – Teste de bombeamento no P36

P36				
Vazão [l/s]	Duração do bombeamento [min]	Duração da recuperação [min]	Rebaixamento máximo [m]	Diâmetro do poço [m]
0,65	35	14	2,64	0,1

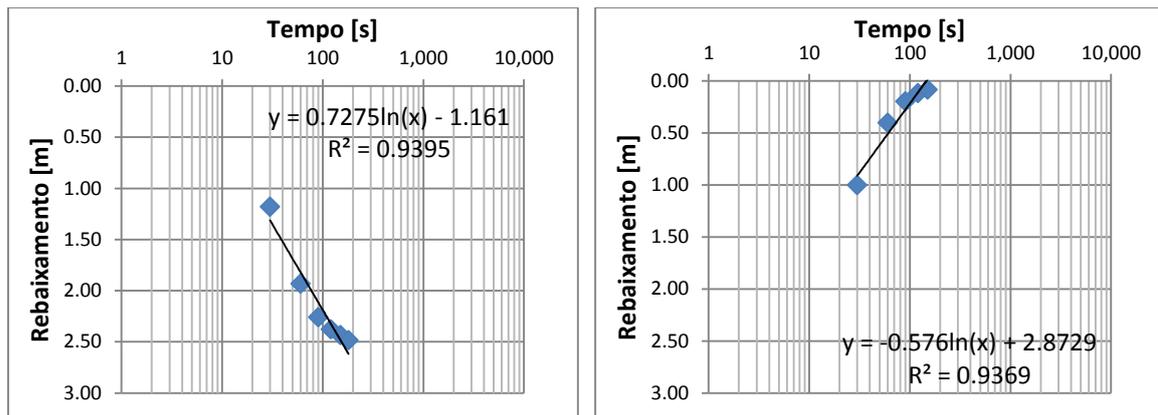


Figura 42 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P36

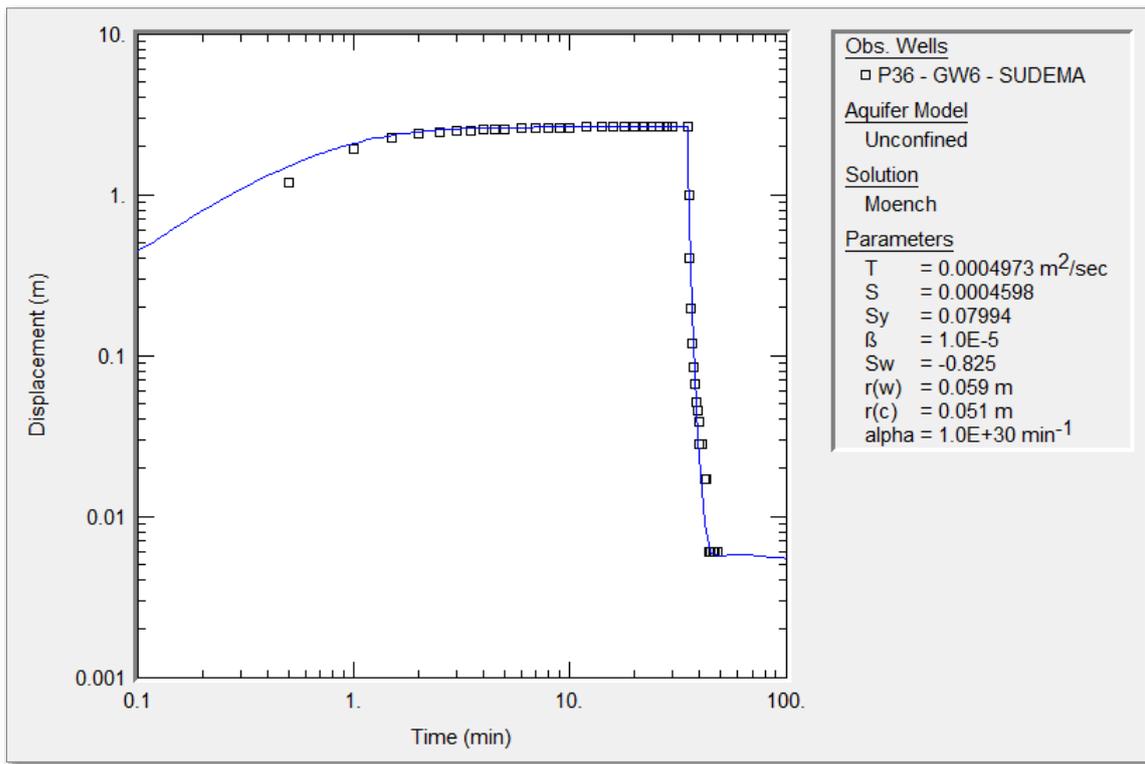


Figura 43 – Resultado do teste de bombeamento no P36 - Solução de Moench

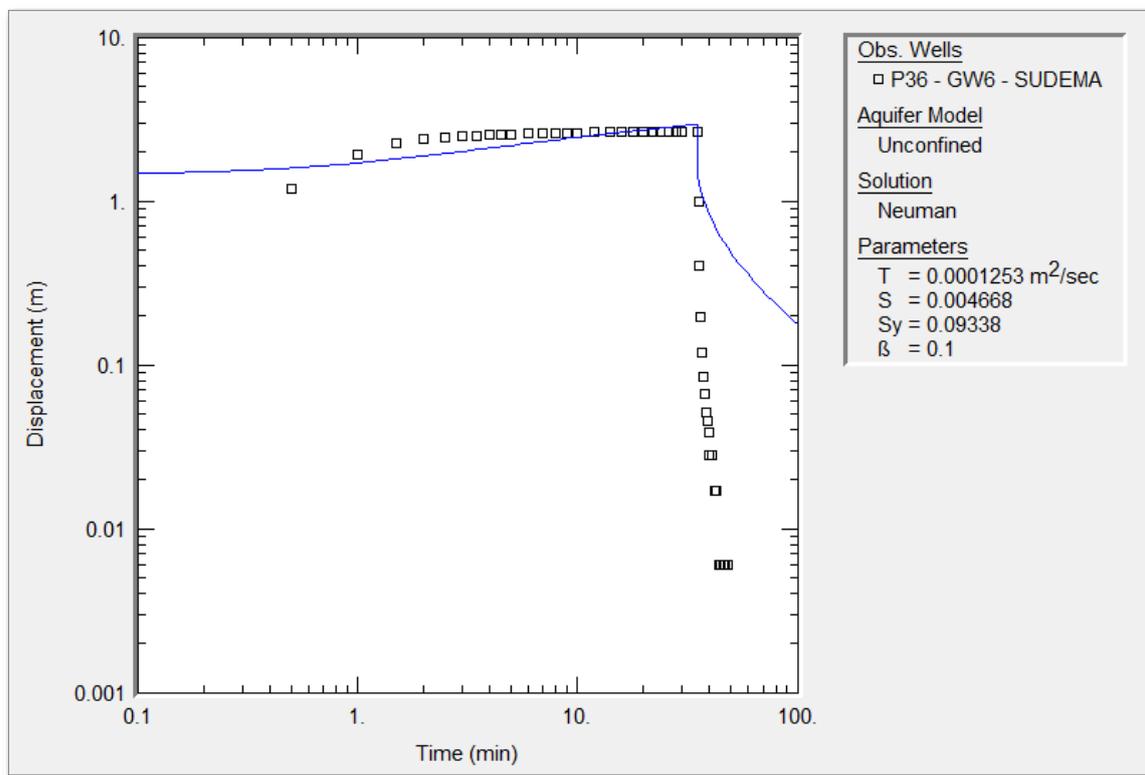


Figura 44 – Resultado do teste de bombeamento no P36 - Solução de Neuman

Os dados obtidos de rebaixamento e de recuperação desse poço foram analisados pela solução de Moench e de Neuman. A solução de Moench foi a que melhor se adaptou aos dados do ensaio e resultou em valores de $T = 4,97 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 4,5 \times 10^{-4}$ e $S_y = 0,08$.

Os próximos dois poços são o P10 e o P24. Esses poços foram utilizados para a realização do teste de bombeamento, no entanto não se tinha certeza de algumas informações importantes para a análise, como por exemplo, o tamanho dos filtros. Essa falta de certeza nesses valores resultou em valores de parâmetros hidrodinâmicos não muito confiáveis.

O P10 localiza-se na parte sudoeste da área de estudo, tem profundidade de 12 m, e foi bombeado por 90 minutos a uma vazão constante de 0,025 l/s. O P24 localiza-se no sudeste da área de estudo, tem uma profundidade de 28 m e foi bombeado por 30 minutos a uma vazão constante de 0,07 l/s.

Os gráficos do rebaixamento e da recuperação desses poços são mostrados nas Figuras 45 e 48.

Tabela 16 – Teste de bombeamento no P10

P10				
Vazão [l/s]	Duração do bombeamento [min]	Duração da recuperação [min]	Rebaixamento máximo [m]	Diâmetro do poço [m]
0,025	90	180	2,7	0,1

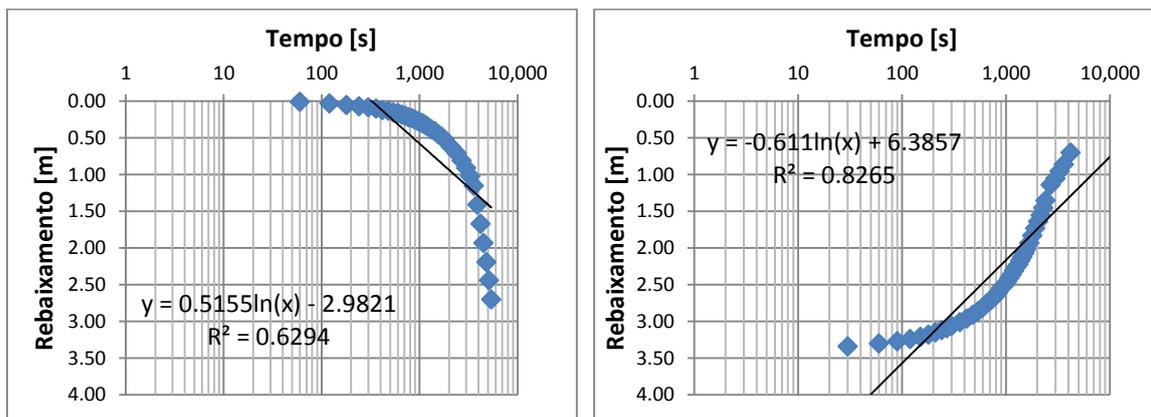


Figura 45 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P10

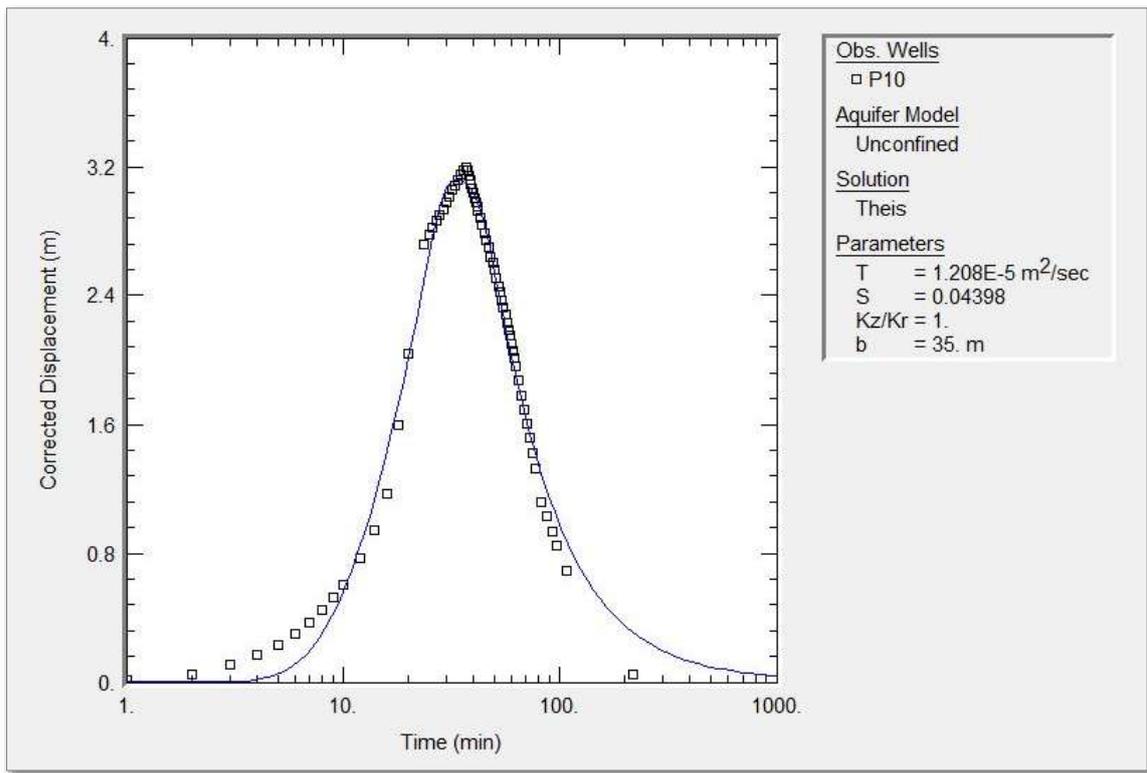


Figura 46 – Resultado do teste de bombeamento no P10 - Solução de Theis para um filtro de 2m

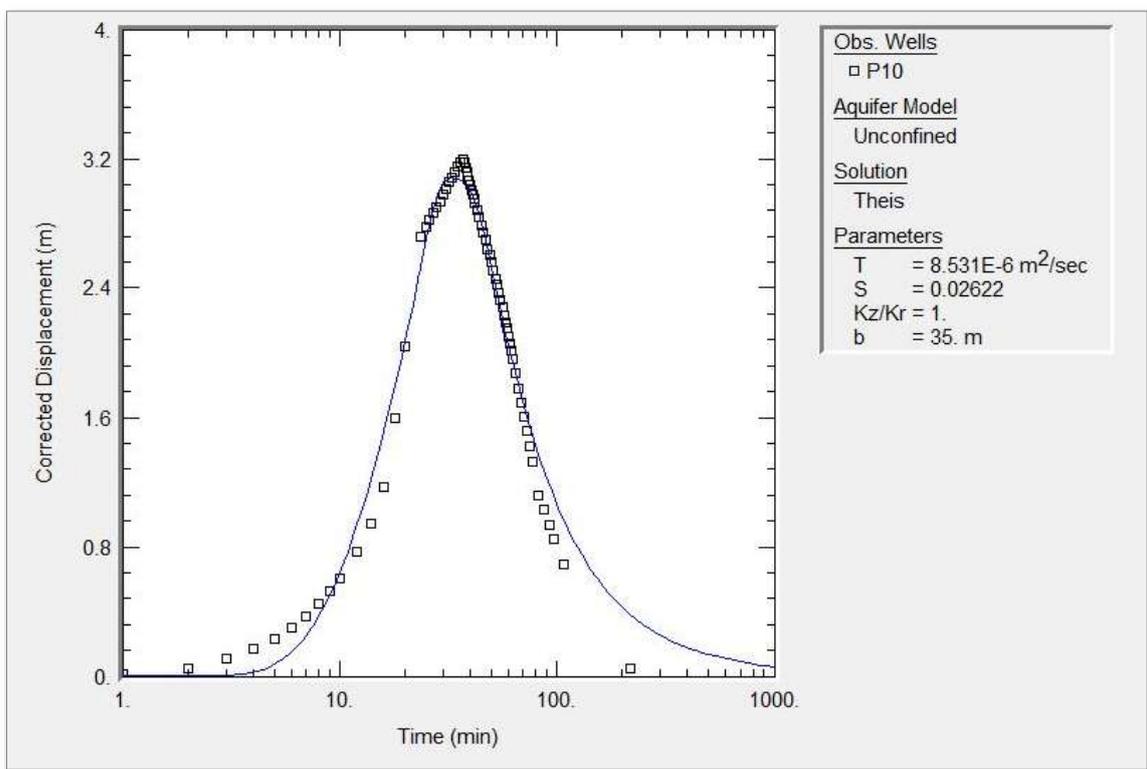


Figura 47 – Resultado do teste de bombeamento no P10 - Solução de Theis para um filtro de 4m

Tabela 17 – Teste de bombeamento no P24

P24				
Vazão [l/s]	Duração do bombeamento [min]	Duração da recuperação [min]	Rebaixamento máximo [m]	Diâmetro do poço [m]
0,18	80	65	2,63	0,1

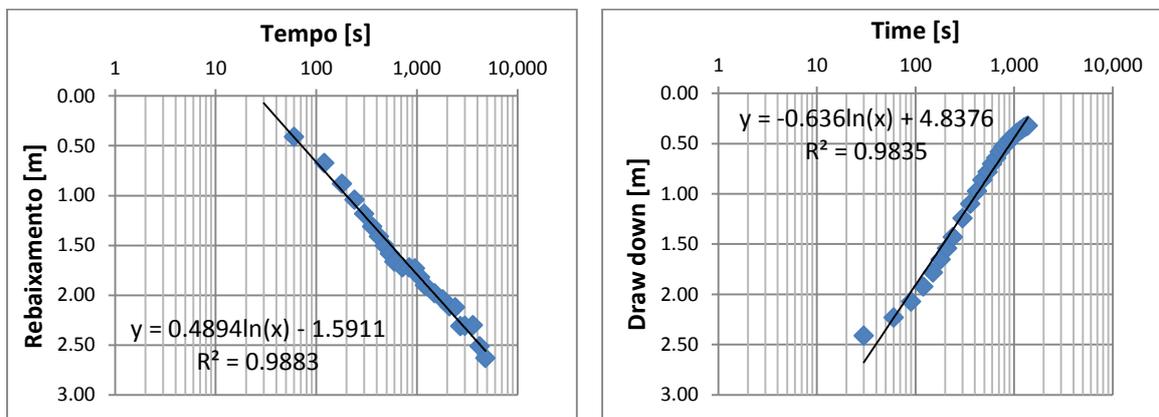


Figura 48 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P24

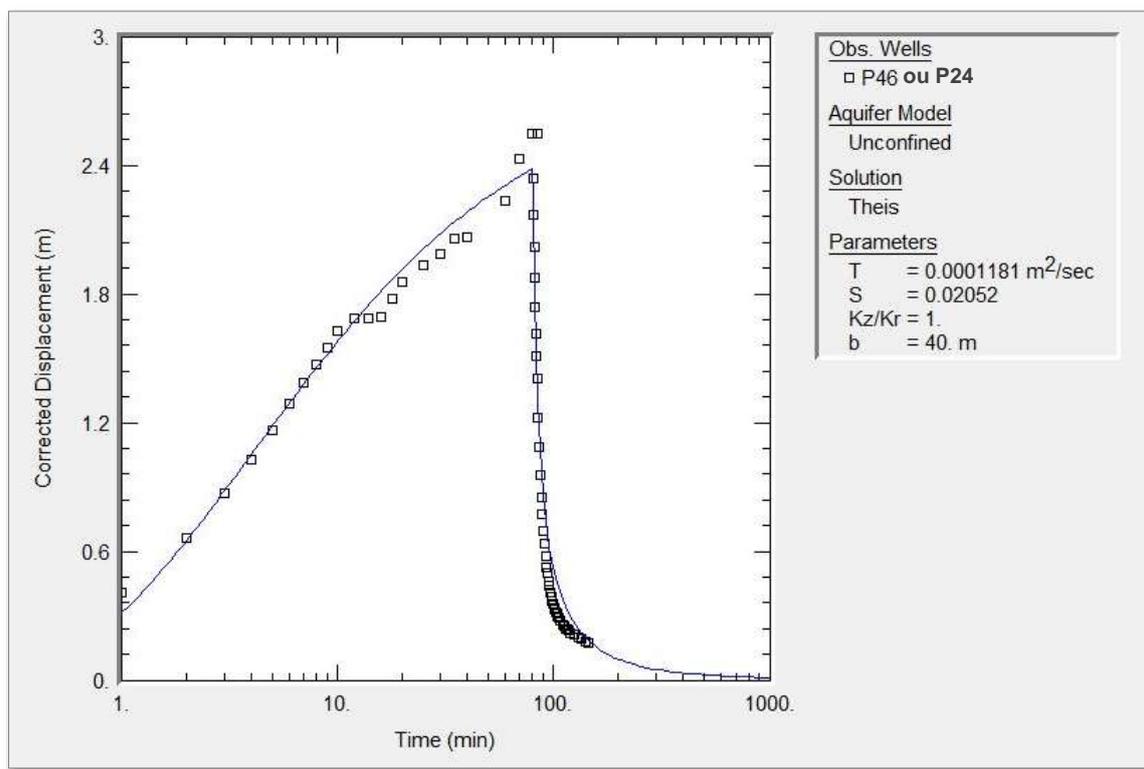


Figura 49 – Resultado do teste de bombeamento no P24 - Solução de Theis

Para o poço P10, utilizou-se a solução de Theis considerando diferentes tamanhos de filtro, já que o proprietário do poço não tinha certeza do valor exato. A primeira solução

considerou um filtro de 2m de comprimento e resultou no valor de $T = 1,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 0,04$. Já a segunda solução considerou um filtro de 4 m de comprimento e resultou em $T = 8,53 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 0,03$. Essa diferença de valores demonstra a importância de se conhecer com precisão a geometria dos poços para se obter valores dos parâmetros hidrodinâmicos confiáveis.

O poço P24 foi analisado utilizando a solução de Theis, porém também não apresentou valor consistente, dado que o tamanho do filtro também não era conhecido pelo proprietário. O valor da transmissividade foi $T = 1,18 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e do coeficiente de armazenamento foi $S = 0,02$.

O último poço tubular foi o P23. Este poço localiza-se na área urbana de João Pessoa, no bairro de Valentina. Esse poço tem uma profundidade de 39 m e o nível estático da água é na média de 20 m. Essa grande profundidade acarretou na insuficiência por parte da bomba. Foi realizado um bombeamento de 30 minutos a uma vazão de 0,07 l/s, no entanto o rebaixamento foi insignificante, apenas 0,27 m. Com esse cenário, não foi possível analisar os dados no *AQTESOLV Demo*.

Tabela 18 – Teste de bombeamento no P23

P23				
Vazão [l/s]	Duração do bombeamento [min]	Duração da recuperação [min]	Rebaixamento máximo [m]	Diâmetro do poço [m]
0,07	30	7,5	0,27	0,1

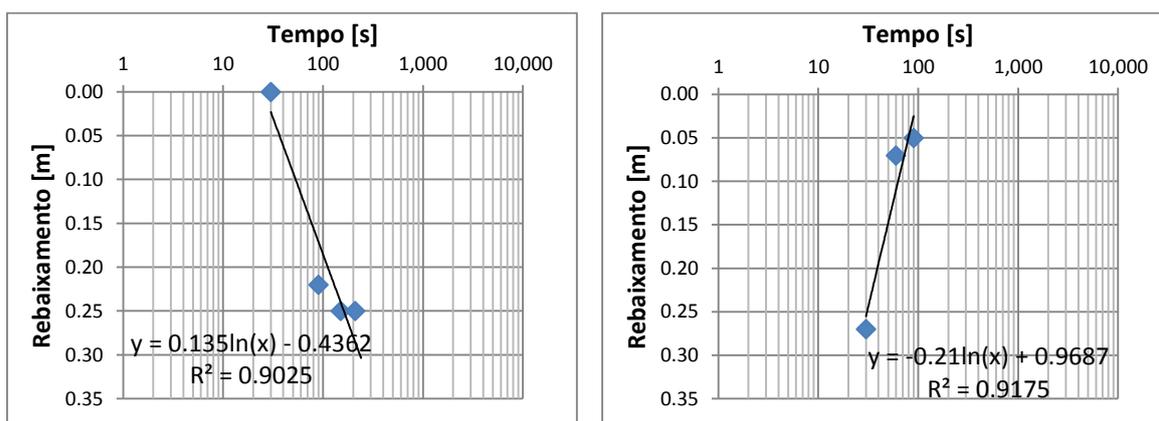


Figura 50 – Gráficos de rebaixamento e recuperação do P23

A Tabela 19 traz um resumo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos nos 7 ensaios de bombeamento nos poços tipo tubulares.

Tabela 19 – Resumo dos valores de coeficientes de armazenamento (S), transmissividade (T) e rendimento específico (Sy) obtidos nos poços tubulares

Coefficiente de armazenamento - S							
	P31	P32	P33	P36	P10	P23	P24
<i>Theis</i>	0,04	0,10	0,13	–	0,04 e 0,03	–	0,02
<i>Neuman</i>	0,37	0,10	–	4,67x10 ⁻³	–	–	–
<i>Moench</i>	–	0,10	–	4,60x10 ⁻⁴	–	–	–
Transmissividade - T [m²/s]							
	P31	P32	P33	P36	P10	P23	P24
<i>Theis</i>	2,64x10 ⁻⁵	9,51x10 ⁻⁴	6,83x10 ⁻⁵	–	1,21x10 ⁻⁵ e 8,53x10 ⁻⁶	–	1,18x10 ⁻⁴
<i>Neuman</i>	8,21x10 ⁻⁵	6,06x10 ⁻⁴	5,72x10 ⁻⁵	1,25x10 ⁻⁴	–	–	–
<i>Moench</i>	–	6,06x10 ⁻⁴	–	4,97x10 ⁻⁴	–	–	–
Rendimento específico - Sy							
	P31	P32	P33	P36	P10	P23	P24
<i>Neuman</i>	0,10	0,10	–	0,09	–	–	–
<i>Moench</i>	–	0,05	–	0,08	–	–	–

Os campos marcados com “–” indicam que não foi feita análise utilizando essas soluções.

5.4.2 Poços cacimbão

Outro tipo de poço, onde foram realizados ensaios de bombeamento, foi o cacimbão. Esses poços são construídos manualmente e têm diâmetro de cerca de 1,70 m. Por serem construídos manualmente, esses poços não seguem um padrão de construção, podendo ter revestimentos de diferentes qualidades.

Os cacimbões selecionados para os ensaios de bombeamento foram aqueles em que a lâmina d’água era suficientemente grande para permitir um rebaixamento do nível d’água sem atingir a bomba. Foram selecionados os poços P02, P04, P08 P09 e P14. Uma grande dificuldade encontrada durante os testes de bombeamento foi a definição da vazão apropriada para cada poço. Isto é, a vazão não deve ser muito pequena, de modo que não cause rebaixamento na água, nem pode ser muito grande, para que não haja um rebaixamento rápido da lâmina d’água, atingindo depressa o nível da bomba. A vazão ideal é aquela suficientemente grande para rebaixar a lâmina d’água, mas que, depois de um certo tempo, consiga atingir o regime de rebaixamento permanente. Esse tipo de regime significa que a água que está sendo retirada pela bomba é compensada pela contribuição do aquífero ao poço, de modo que o nível da água torna-se constante. Em alguns poços esse regime

permanente não foi atingido nem sequer iniciado. Este foi o caso dos poços P02, P08 e P14, como pode ser visto nos gráficos de rebaixamento no tempo a seguir.

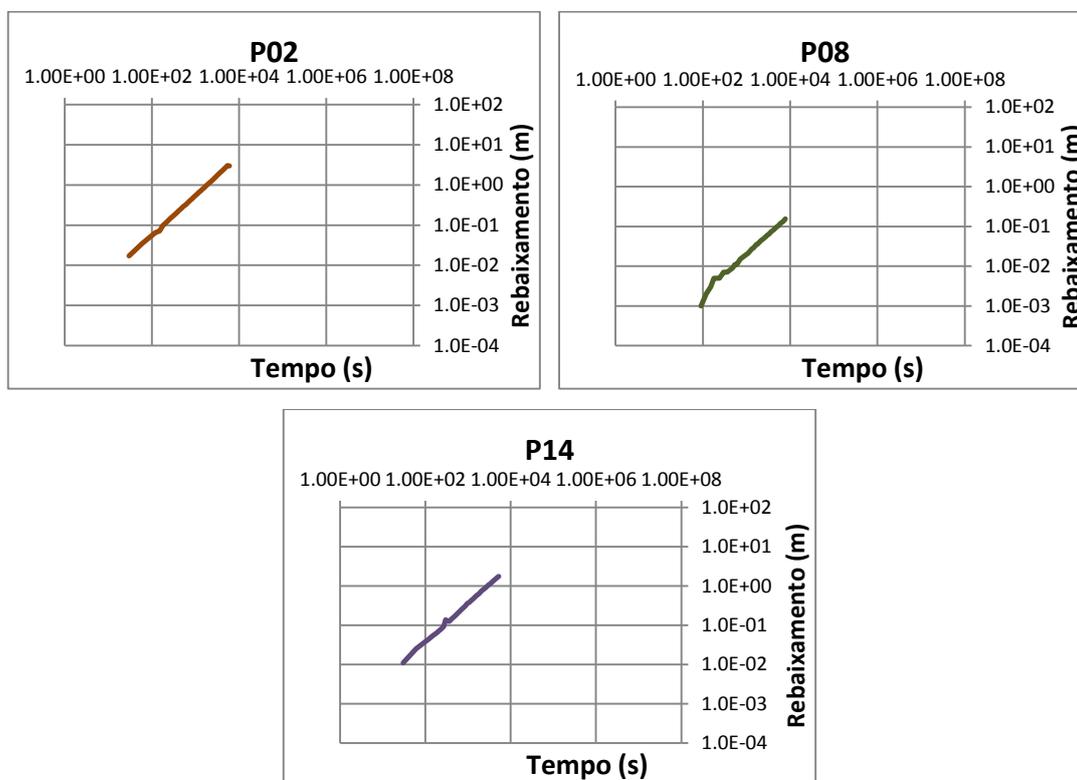


Figura 51 – Curva de rebaixamento dos poços P02, P08 e P14.

Nesses poços, o rebaixamento aconteceu de forma linear durante todo o bombeamento, o que significa dizer que toda água que foi retirada pela bomba estava estocada no poço, ou seja, o cacimbão funcionou como se fosse uma cisterna. Como não houve contribuição do aquífero, não foi possível inferir sobre os parâmetros hidrodinâmicos.

Um dos motivos pelos quais a contribuição do aquífero não foi sentida está relacionado aos aspectos construtivos dos cacimbões. Alguns deles são construídos com manilhas de concreto. À medida que o poço vai sendo cavado, as manilhas vão descendo e ocupando os espaços mais profundos do poço, funcionando como revestimento. Nesse tipo de poço a água sente mais dificuldade de penetrar, ficando a entrada da água restrita à parte inferior do poço ou acima da manilha, caso a lamina d'água seja suficientemente grande. Outro tipo de revestimento utilizado são as paredes de tijolos. Nesses casos, a água penetra com mais facilidade o poço.

Nos poços P04 e P09 o comportamento do rebaixamento foi como esperado. O rebaixamento iniciou de forma linear e depois de um certo tempo apresentou uma inclinação na curva, significando que houve contribuição do aquífero ao poço (Figuras 52 e 54).

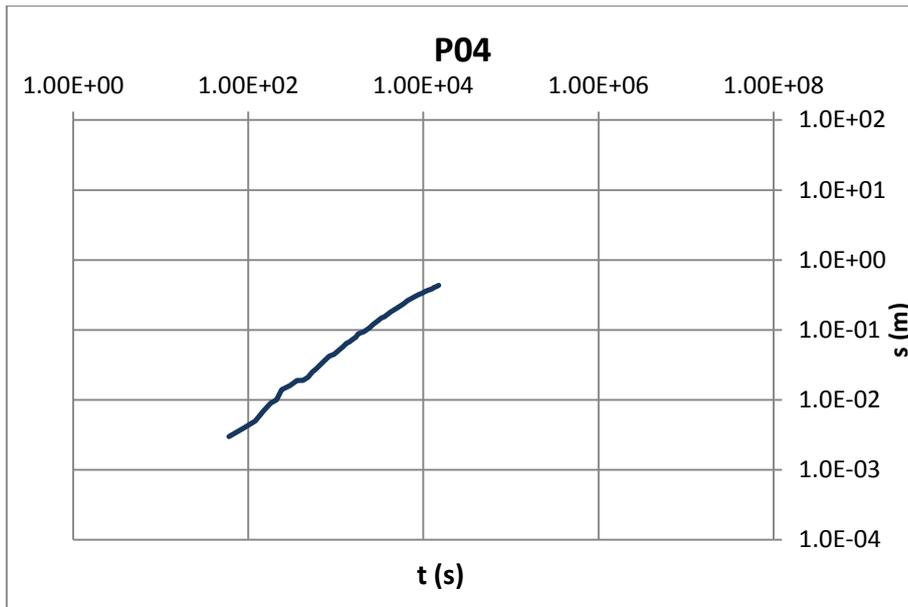


Figura 52 – Curva de rebaixamento do poço P04

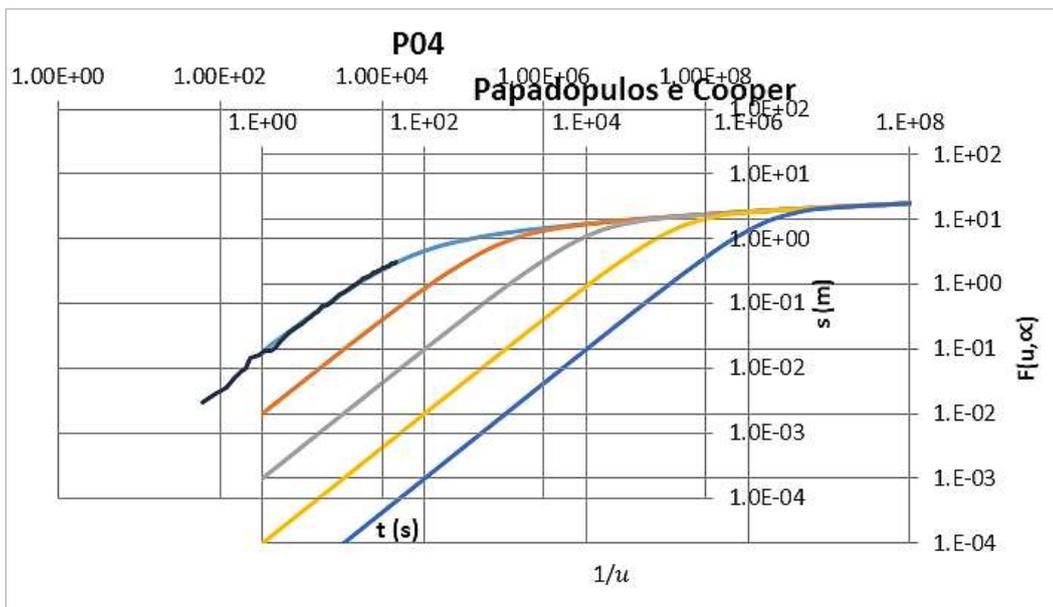


Figura 53 – Superposição da curva de rebaixamento do poço P04

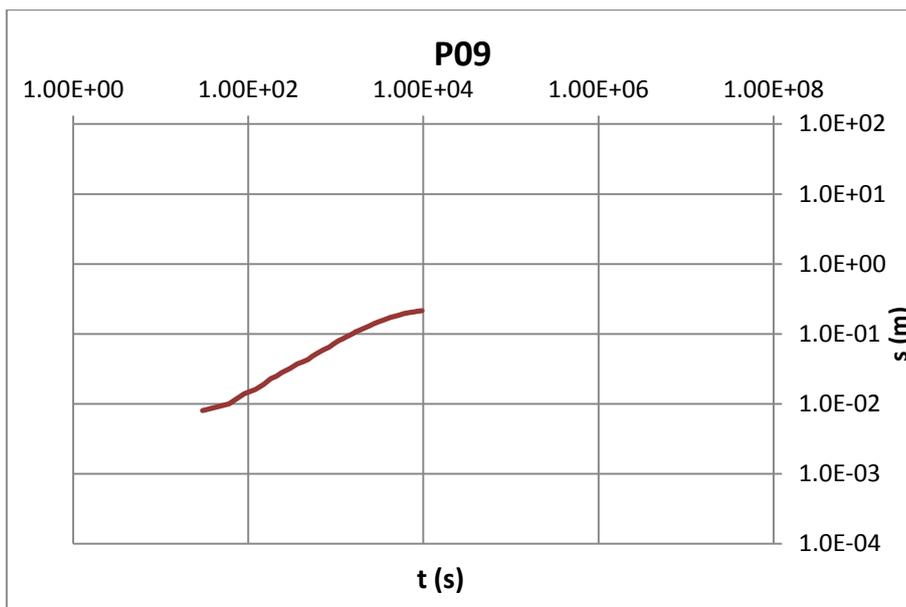


Figura 54 – Curva de rebaixamento do poço P09

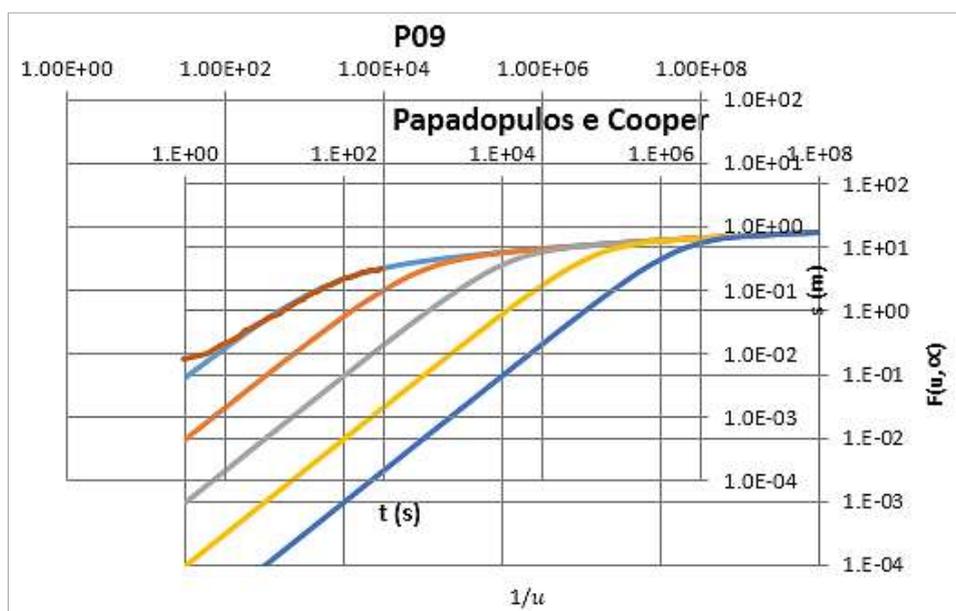


Figura 55 – Superposição da curva de rebaixamento do poço P09

Os dados de rebaixamento desses poços foram analisados utilizando o método desenvolvido por Papadopulos para poços de grande diâmetro (Figuras 53 e 55). Esse método se baseia na superposição do gráfico de rebaixamento pelo tempo com o gráfico das curvas-tipo de Papadopulos. Esse método é bastante simples mas muito sensível, já que as curvas são muito parecidas e não sendo o teste realizado por uma longa duração, ele depende da sensibilidade do pesquisador em avaliar qual curva se encaixa melhor.

Os resultados do poço P04 foram: $T = 6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 0,08$. O poço P09 apresentou os seguintes valores: $T = 1,96 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 0,08$. A Tabela 20 resume os valores dos

parâmetros hidrodinâmicos obtidos pelos testes de bombeamento em poços de grande diâmetro.

Tabela 20 – Resumo dos valores de coeficientes de armazenamento (S) e transmissividade (T) obtidos nos poços cacimbões

Coefficiente de armazenamento - S					
	P02	P04	P08	P09	P14
<i>Papadopulos</i>	–	0,08	–	0,08	–
Transmissividade - T [m²/s]					
	P02	P04	P08	P09	P14
<i>Papadopulos</i>	–	6,00 x 10 ⁻⁵	–	1,96x10 ⁻⁴	–

Os campos marcados com “–” indicam que os testes não geraram curva possível de extrair valores dos parâmetros.

5.5 Zonas de condutividade hidráulica semelhante

A rede de monitoramento por sensores instalada durante esta pesquisa envolve não apenas poços exclusivos para o monitoramento, mas também poços em que a água é utilizada para diversos fins. A extração dessa água é feita, na maioria das vezes, com a utilização de bombas. Baseado no comportamento de rebaixamento e recuperação desses poços, pretende-se delimitar as zonas de condutividade hidráulica semelhante.

Foram selecionados 17 poços em que foi verificado o evento de bombeamento. Em seguida, selecionaram-se 10 eventos de bombeamento de cada poço. Depois foram estimadas as equações das curvas de recuperação de cada um desses eventos. A Tabela a seguir mostra essas equações considerando cada termo como sendo a média dos termos de cada uma das 10 curvas. Nos poços P09, P14, P10 tubular, P10 cacimbão, P36, P23 e P33 as equações da recuperação são referentes apenas a um dia, que foi o dia em que houve o teste de bombeamento. Nesses casos, apenas a equação da recuperação é apresentada.

Tabela 21 – Equações das curvas de rebaixamento e recuperação

Poço	P18	P01	P04	P20	P16
Rebaixamento	$y=-0,11x-17,37$	$y=0,16\ln(x)-5,28$	$y=-0,04x-17,28$	$y=-0,09x-5,65$	$y=-0,004x-7,80$
Recuperação	$y=0,14\ln(x)-18,28$	$y=-0,284x-4,71$	$y=0,03\ln(x)-17,42$	$y=0,03\ln(x)-5,96$	$y=0,02\ln(x)-7,85$
Poço	P22	P25	P24	P26	P07
Rebaixamento	$y=-0,13x-14,40$	$y=-0,107x-7,20$	$y=-0,62x-18,43$	$y=-0,53x-18,63$	$y=-0,08x-3,6$
Recuperação	$y=0,18\ln(x)-14,99$	$y=0,14\ln(x)-7,97$	$y=1,35\ln(x)-17,44$	$y=0,49\ln(x)-19,65$	$y=0,05\ln(x)-3,94$
Poço	P09	P14	P10 tubular	P10 cacimbão	P36

Rebaixamento	-	-	-	-	-
Recuperação	$y=0,0004x+9,52$	$y=-0,002x+3,43$	$y=-0,02x+2,87$	$y=8E-05x+2,003$	$y=-1,04\ln(x)+0,73$
Poço	P23	P33			
Rebaixamento	-	-			
Recuperação	$y=-0,22x+0,24$	$y=-0,05x+3,28$			

Os gráficos a seguir foram construídos a partir da normalização dos dados de nível dinâmico selecionados desde o momento em que a bomba foi desligada até 4 horas de recuperação. Esta normalização consiste em A análise foi separada entre os poços tubulares e os cacimbões, por conta do diâmetro deles.

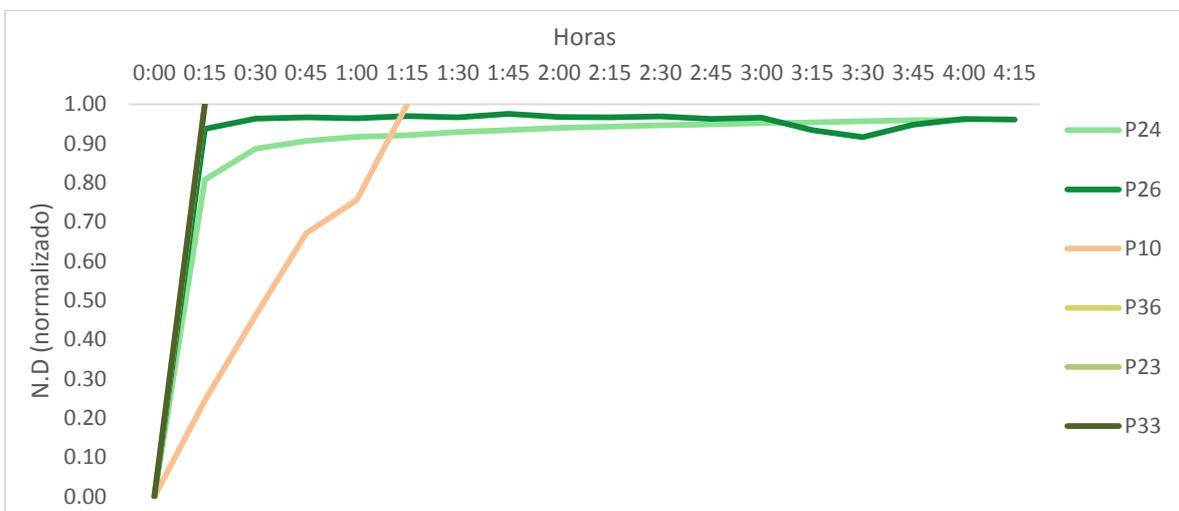


Figura 56 – Gráficos de recuperação dos poços tubulares

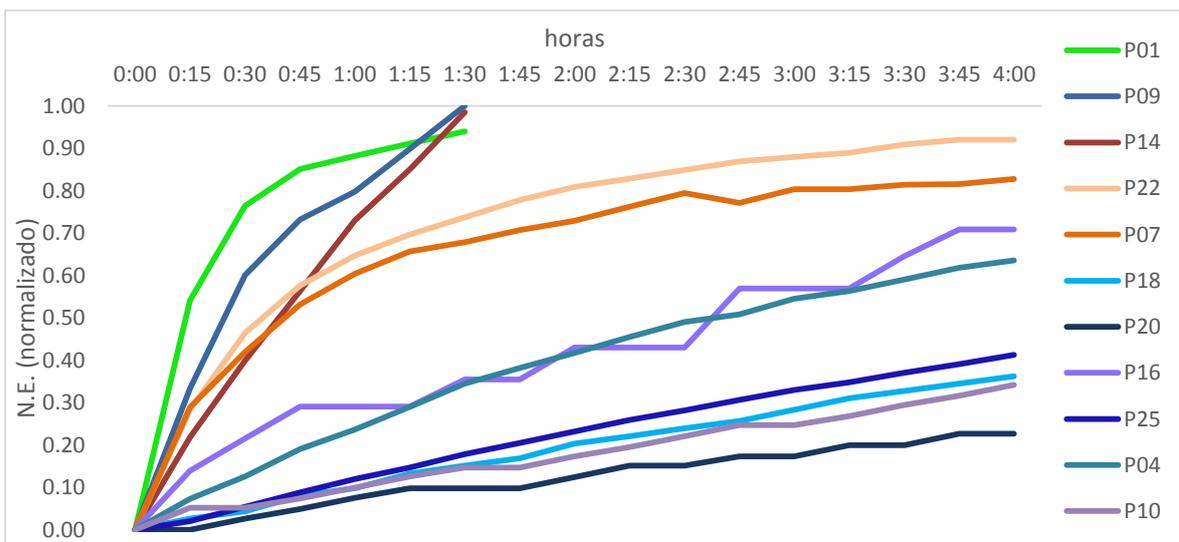


Figura 57 – Gráficos de recuperação dos poços cacimbões

O gráfico dos poços tubulares mostra que, com exceção do P10, os outros têm um comportamento muito semelhante de recuperação, sendo uma recuperação bastante rápida,

com o máximo de 15 minutos para a total recuperação do nível freático. As curvas dos poços P36, P23 e P33 se sobrepõem.

Já nos poços cacimbões, é possível identificar 3 comportamentos distintos. Aqueles poços cuja recuperação se dá de forma rápida, 1 hora e 30 minutos, aqueles poços cuja recuperação acontece de forma moderada, em média 7 horas, e poços cuja recuperação acontece de forma muito lenta, quase linear, com duração média variando de 8 horas até mais de um dia para a completa recuperação. Cada um desses comportamentos representa a forma como o aquífero recarrega esses poços, sendo possível inferir sobre em qual aquífero está cada um desses poços. Essa diferença de comportamento foi entendida como zonas de diferentes gradientes hidráulicos.

Cada uma dessas zonas identificadas nos poços do tipo cacimbão é apresentada nos gráficos a seguir.

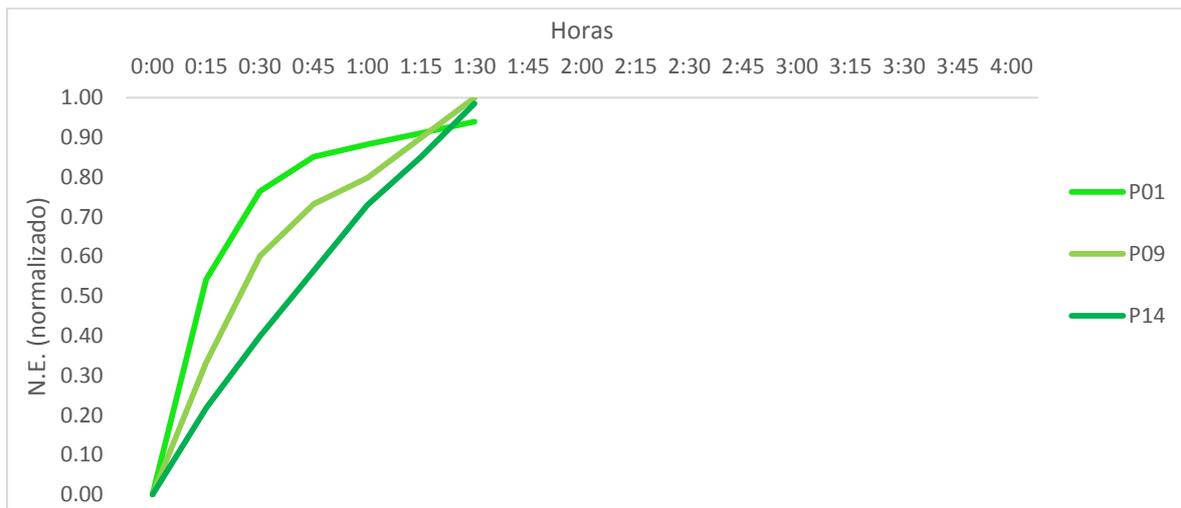


Figura 58 – Cacimbões cuja recuperação é rápida

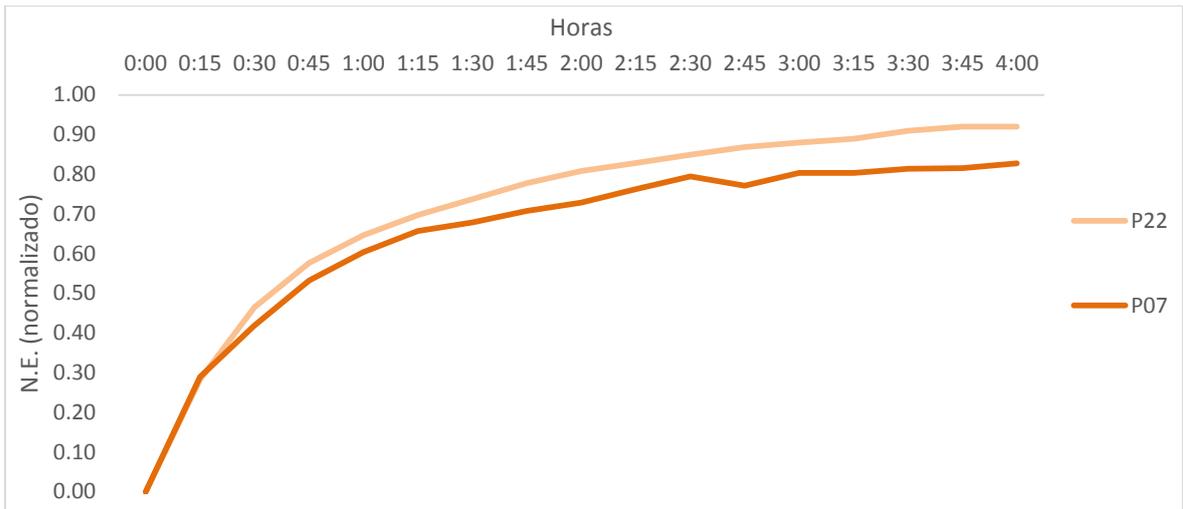


Figura 59 – Cacimbões cuja recuperação é moderada

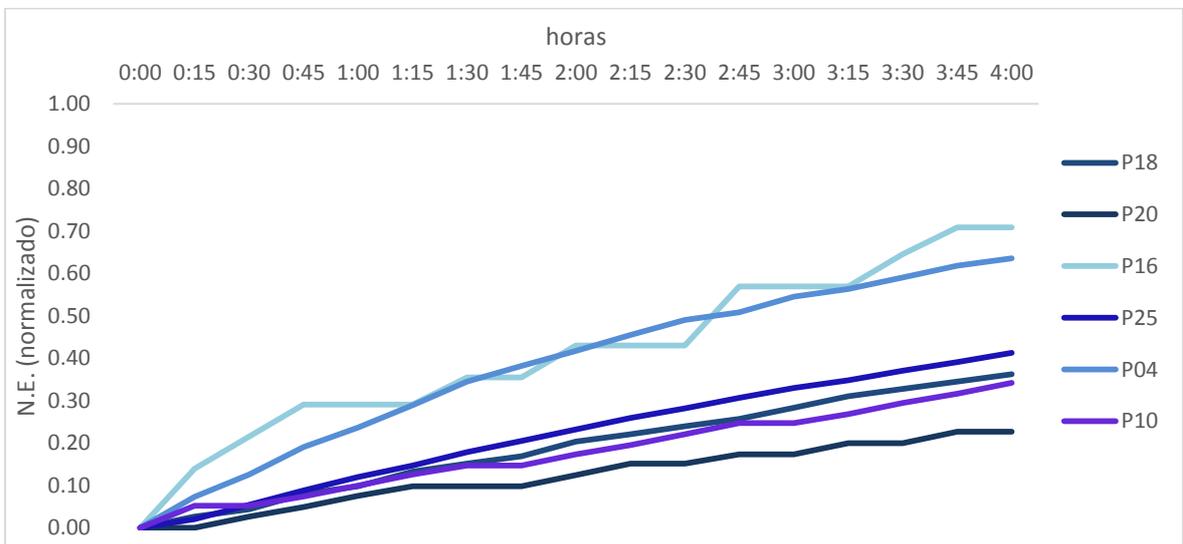


Figura 60 – Cacimbões cuja recuperação é lenta

Alguns dos fatores que podem interferir na velocidade de recuperação dos poços são seus diâmetros, o tamanho e tipo dos filtros, a vazão de bombeamento do poço e o rebaixamento total.

A distribuição espacial dos poços cacimbões utilizados nesta análise é mostrada no mapa da Figura 61.

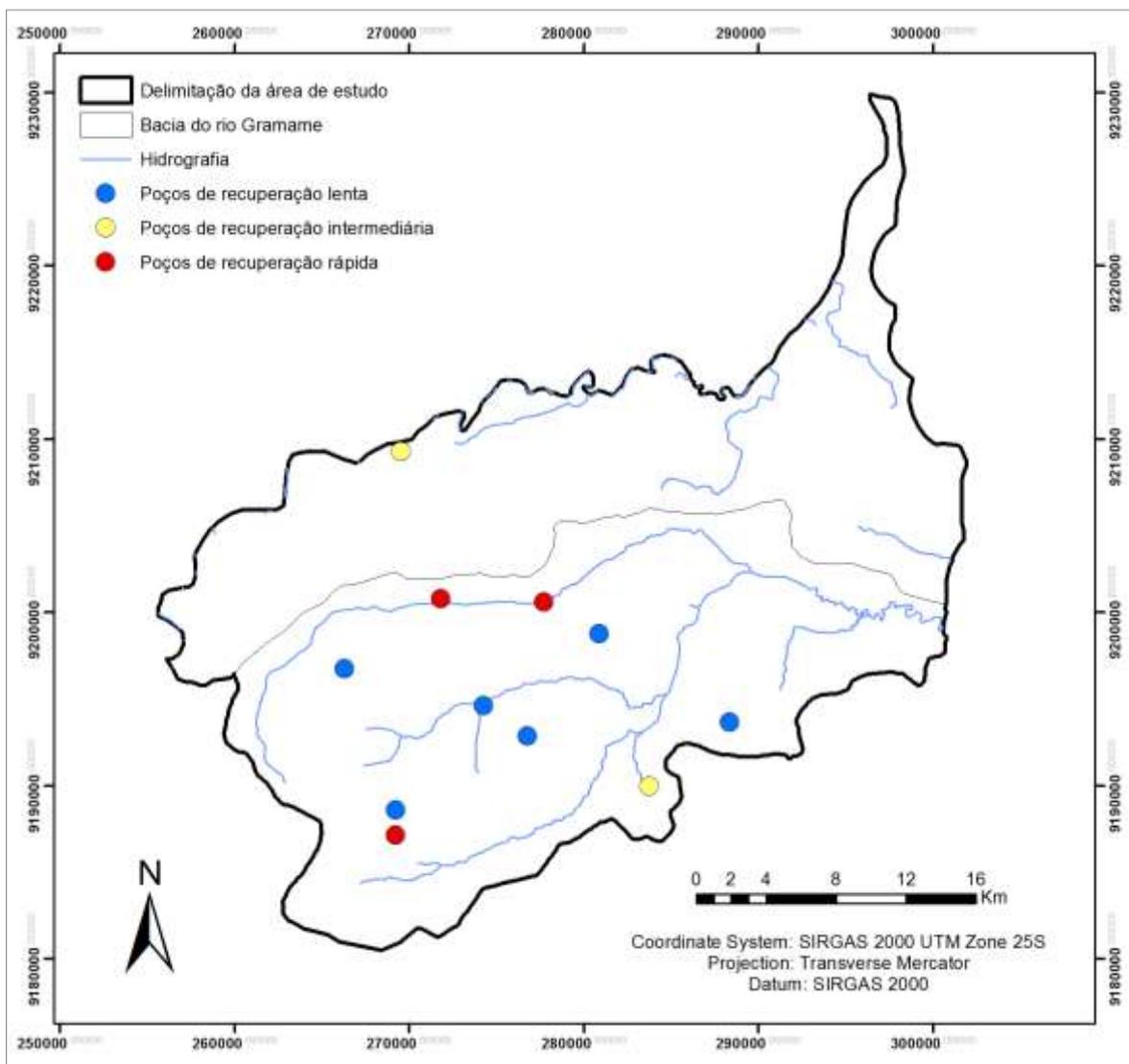


Figura 61 – Poços com recuperação semelhante

A partir destes resultados é possível inferir sobre a condutividade do aquífero. Se for uma área onde a recuperação é mais rápida, significa que o gradiente hidráulico é maior; já na área onde a recuperação é mais lenta, significa que a condutividade hidráulica do aquífero é menor. Uma análise mais profunda das características construtivas dos poços pode ajudar, já que este detalhe pode interferir no comportamento de recuperação dos poços. Também é importante conhecer os diâmetros dos poços para que esta informação não mascare o resultado.

Uma análise comparativa entre as curvas de recuperação dos poços e a variação do nível freático pode ser feita a partir do mapa da Figura 62, que mescla informações das Figuras 61 e 31.

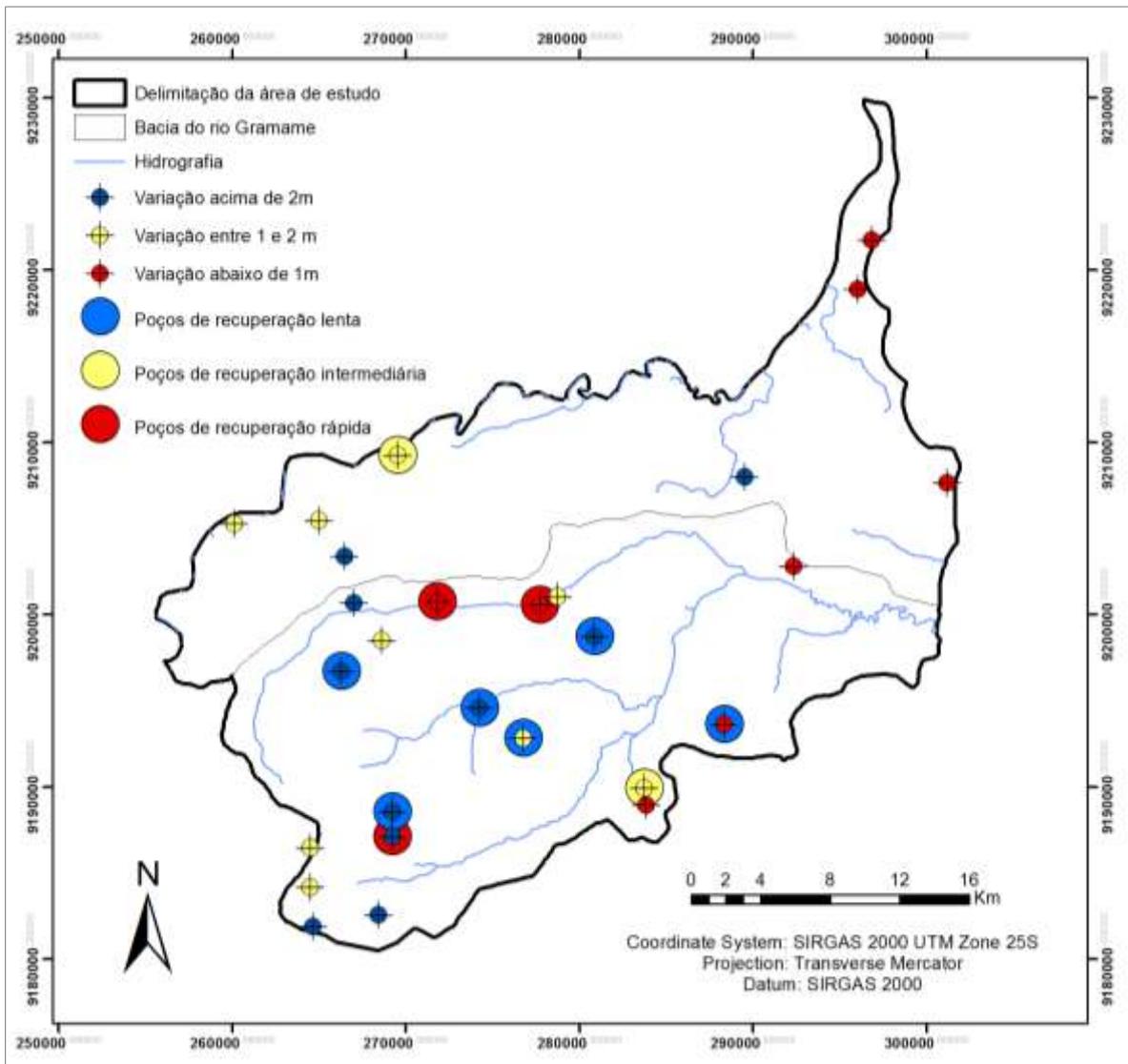


Figura 62 – Comparação entre as zonas de recuperação e os tipos de variação do nível freático

Uma análise da Figura 62 mostra que os poços que apresentam pouca variação ao longo do ano, normalmente, estão em áreas em que a recuperação é rápida. Já os poços que têm um comportamento de maior oscilação entre os níveis freáticos localizam-se em áreas que demoram mais para recuperar o nível inicial após um evento de bombeamento. Os poços de variação intermediária, entre 1 e 2 m, localizam-se em áreas de recuperação intermediária, isto é, cerca de 7 horas.

5.6 Recarga direta do aquífero pelo método WTF

A recarga direta do aquífero, objetivo principal desta pesquisa, foi calculada utilizando o método WTF. Como a aplicação desse método se baseia na extrapolação das curvas de recessão, foram utilizados os dados de nível estático (NE) monitorados dos anos 2015 e 2016, bem como a precipitação ocorrida nos 365 dias que antecederam o pico de elevação do nível da água.

Tomando como base os valores de rendimento específico obtidos dos testes de bombeamento, que variaram entre 0,02 e 0,13, foi escolhido o $S_y = 0,1$ como uma média razoável e em consonância com os valores encontrados na literatura. Portanto, a recarga de todos os poços foi calculada utilizando o rendimento específico de 10%.

Como já foi dito anteriormente, a alta frequência de bombeamentos identificados em 4 poços teve como consequência a impossibilidade de aplicação do método WTF para estimar a recarga nestes locais, são eles o P03, P15, P18 e P29.

Outros 12 poços não foram considerados no estudo da recarga, pois tiveram seu monitoramento iniciado tardiamente, não dispondo de dados suficientes do período de recessão para a aplicação do método, são eles o P12, P24 e P30 ao P39.

Ainda, mais 3 poços também foram excluídos da análise da recarga, pois a curva de variação do nível estático ao longo do ano 2016 não possibilitou a determinação da curva de recessão ou simplesmente porque a variação do nível da água foi muito pequena. Esse foi o caso do P01, P10 e P27. Todos esses gráficos serão apresentados no Apêndice C. Sendo assim, o método da flutuação da superfície piezométrica foi aplicado em 20 poços de monitoramento, apresentados na Figura 63.

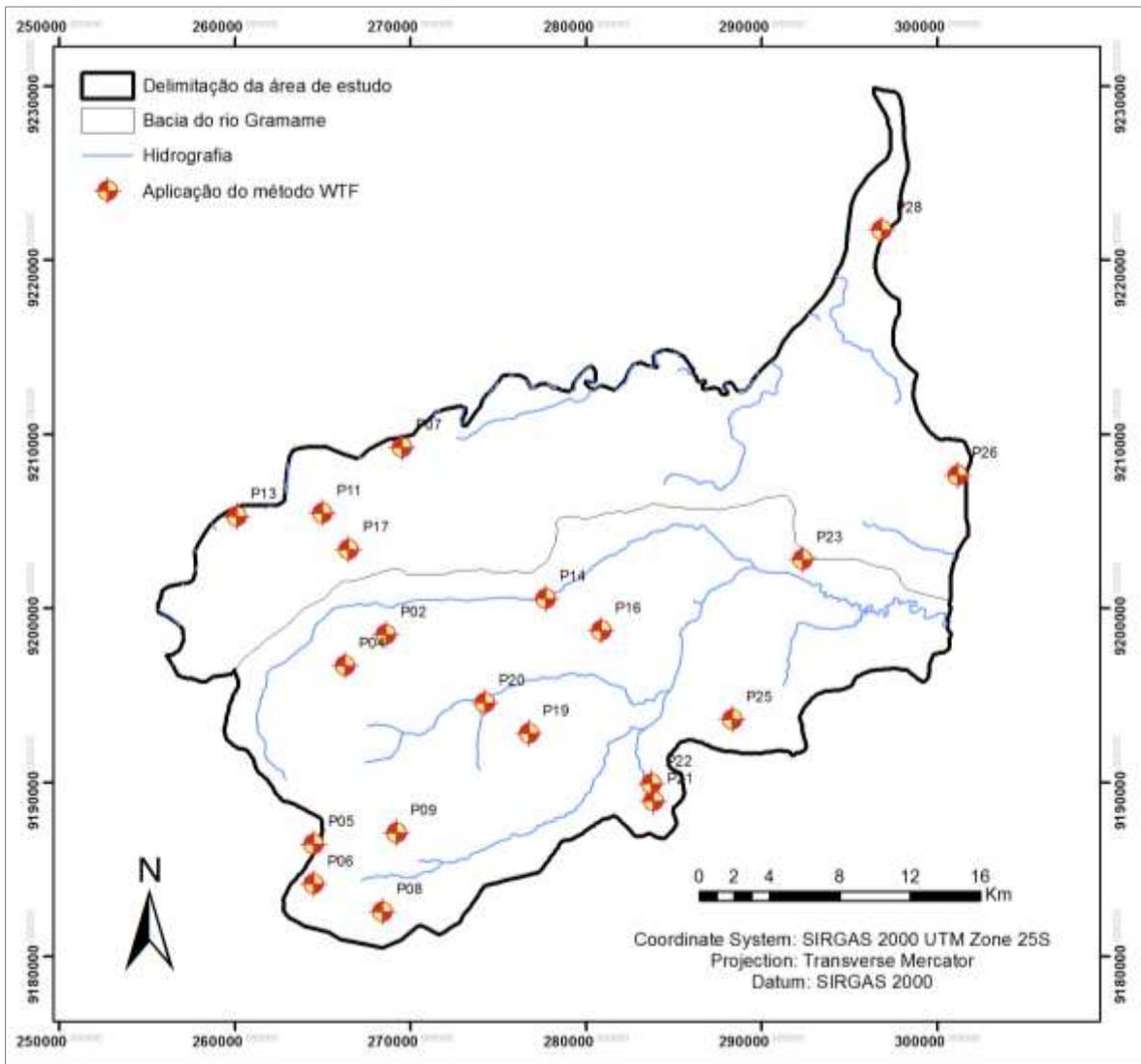


Figura 63 – Poços onde foi aplicado o método WTF

A recarga direta também foi dividida em 3 grupos. Existem alguns poços que tiveram uma única curva de recessão e um único pico, sendo esse pico relativamente pequeno, com variação média de 1,50 m. Outros poços também tiveram uma única curva de recessão e um único pico, mas este pico mais significativo, com variação média de 2,5 m. E outro tipo de comportamento diz respeito aos poços que apresentaram mais de uma curva de recessão e mais de um pico. Esses comportamentos serão apresentados a seguir.

Os poços que apresentaram um único pico e uma única curva de recessão, com uma variação do nível da água pequena foram os poços P13, P19, P21, P23, P25, P26 e P28, mostrados nas Figuras 64, 65, 66 e 67.

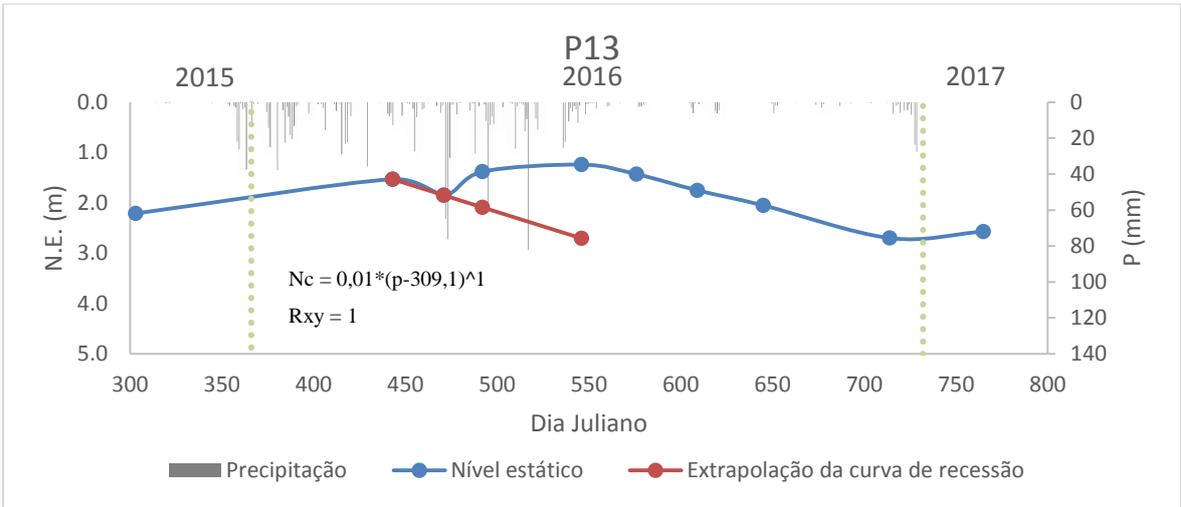


Figura 64 – Recarga direta anual do poço P13

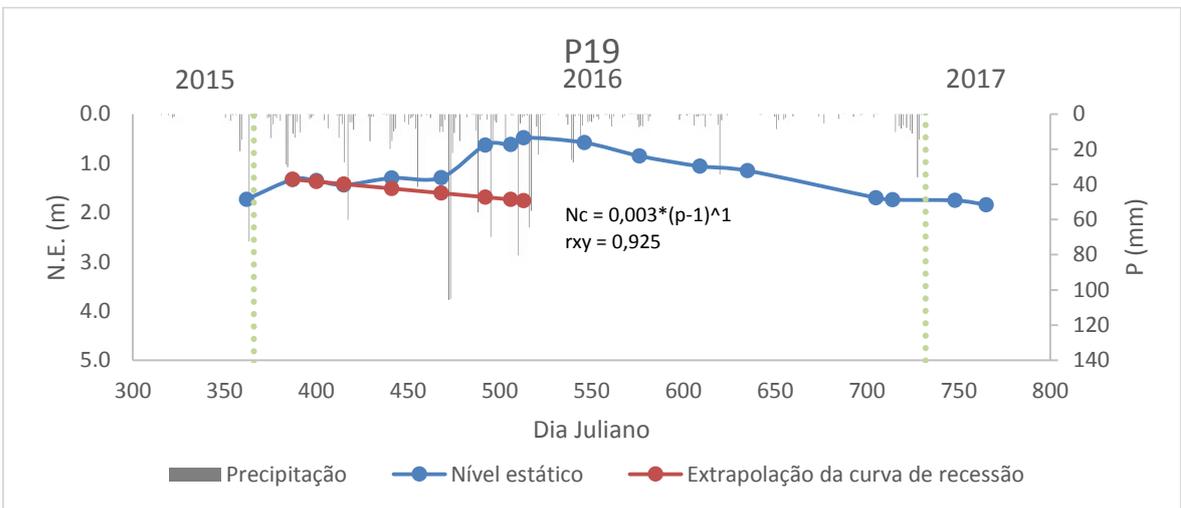


Figura 65– Recarga direta anual do poço P19

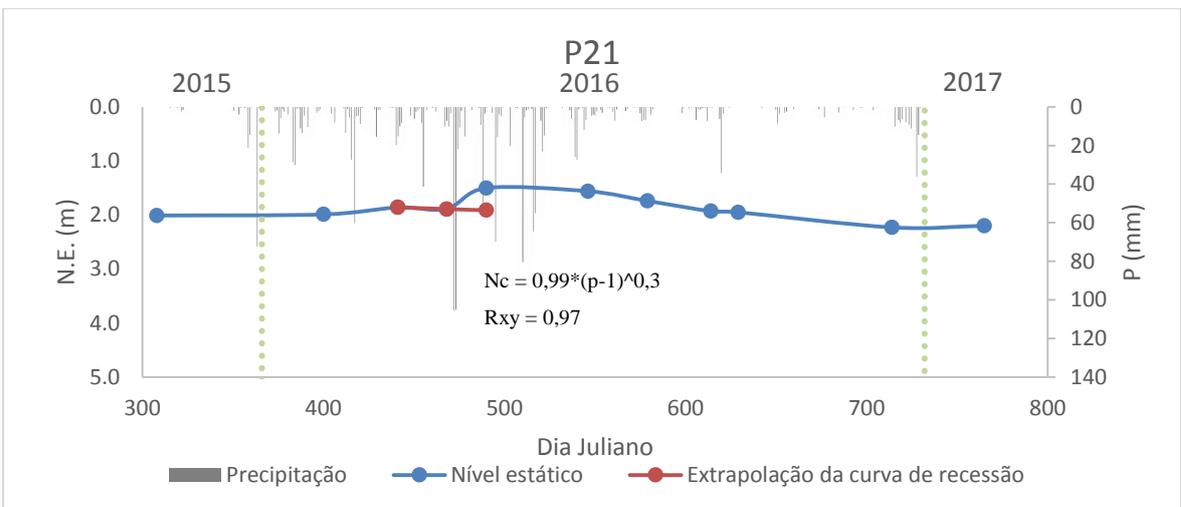


Figura 66– Recarga direta anual do poço P21

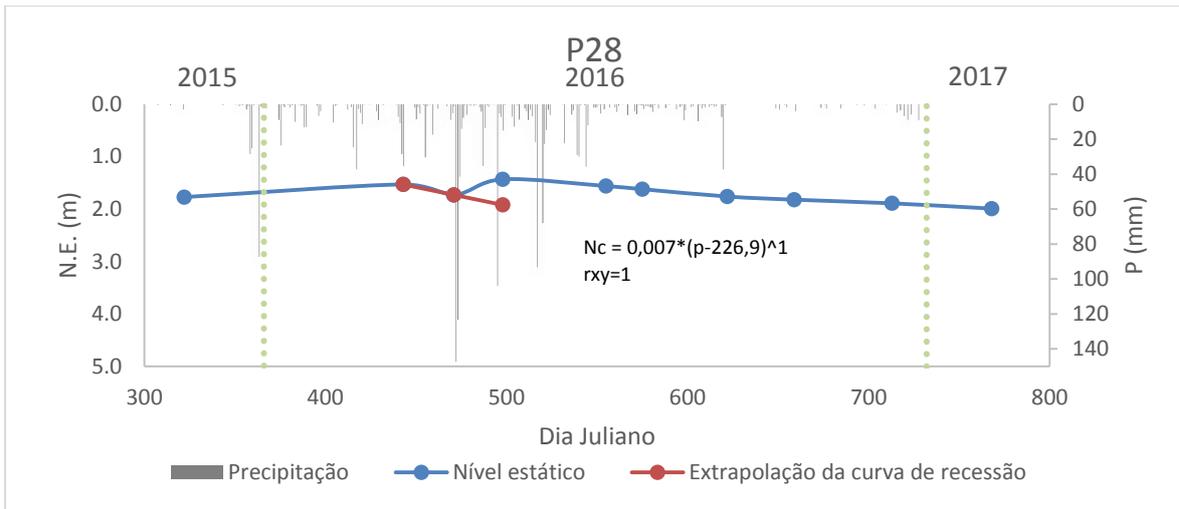


Figura 67 – Recarga direta anual do poço P28

Os poços P13, P19, P21 e P28 são aqueles que apresentam uma reduzida camada não-saturada e estão próximos a cursos d'água. Esses poços apresentaram uma variação da ordem de 1 m, resultando em uma baixa recarga nesses locais. A recarga anual direta nesses poços foi 146,71mm, 127,96, 41,38 e 49,05 mm, respectivamente. Embora o P13 tenha apresentado uma pequena variação entre os níveis estáticos, a curva de recensão teve uma inclinação grande, levando a um maior valor de recarga.

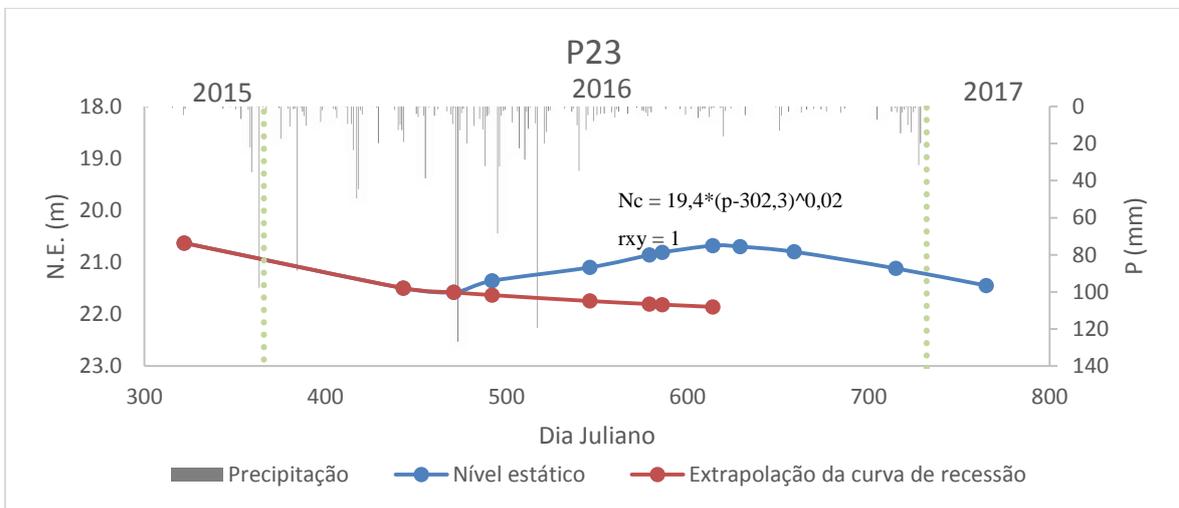


Figura 68 – Recarga direta anual do poço P23

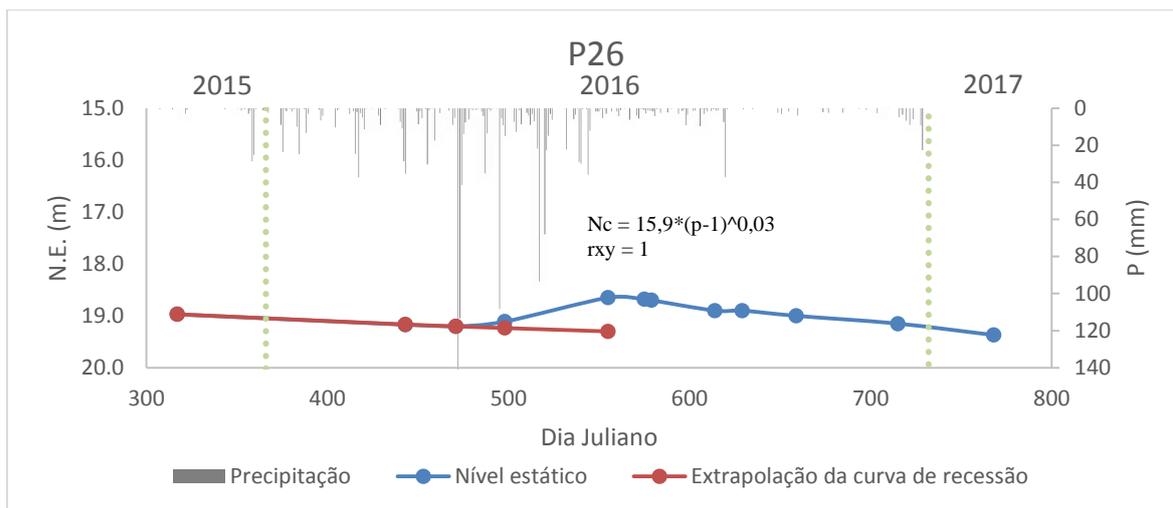


Figura 69 – Recarga direta anual do poço P26

Os poços P23 e P26 apresentam uma camada não-saturada mais espessa, em torno de 20 m. Esses poços também não tiveram uma resposta significativa aos eventos chuvosos, se mantendo sempre com o nível estático aproximadamente constante. A recarga no poço P23 foi 118,08 mm e no poço P26 foi 64,99 mm.

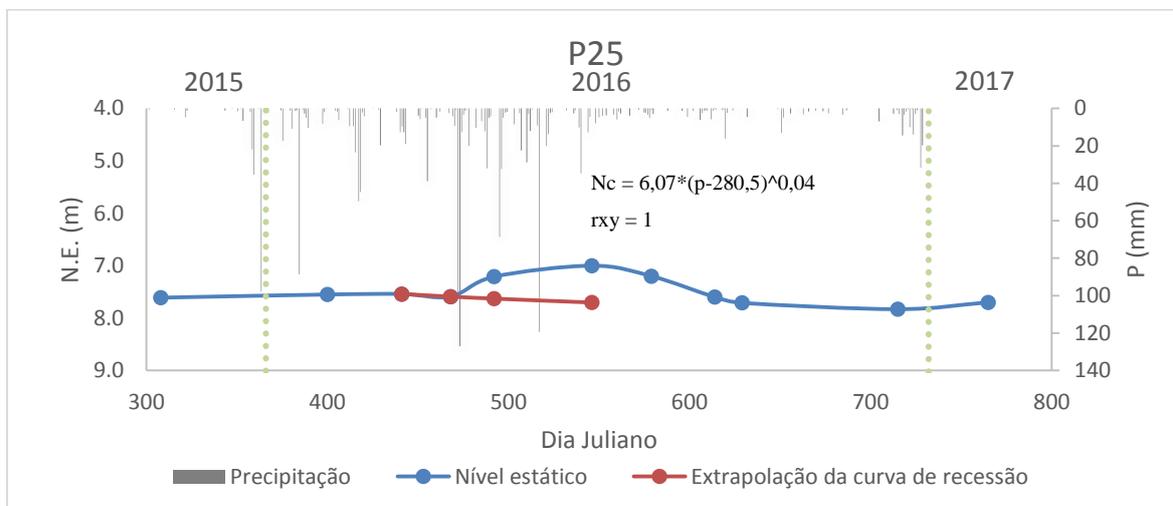


Figura 70 – Recarga direta anual do poço P25

O poço P25 está localizado em uma região de plantação de abacaxi, possui espessura da camada não-saturada em torno de 7 m e a recarga anual foi de 70,30 mm. Esse valor baixo se deve ao fato de que este poço se localiza a cerca de 100 m de um curso d'água.

O segundo tipo de comportamento foi aquele em que só houve um pico e uma curva de recensão, mas a variação entre o ponto mais baixo e o pico foi maior. Os poços que

apresentaram esse comportamento foram o P04, P05, P07, P08, P09, P11, P16, P17, P20 e P22.

Os poços P04, P05, P11 e P22 apresentaram comportamento bem semelhante. A recarga do P04 foi de 254,68 mm, do P05 foi de 231,68mm, do P11 de 194,92mm e no P22 a recarga foi de 216,70mm.

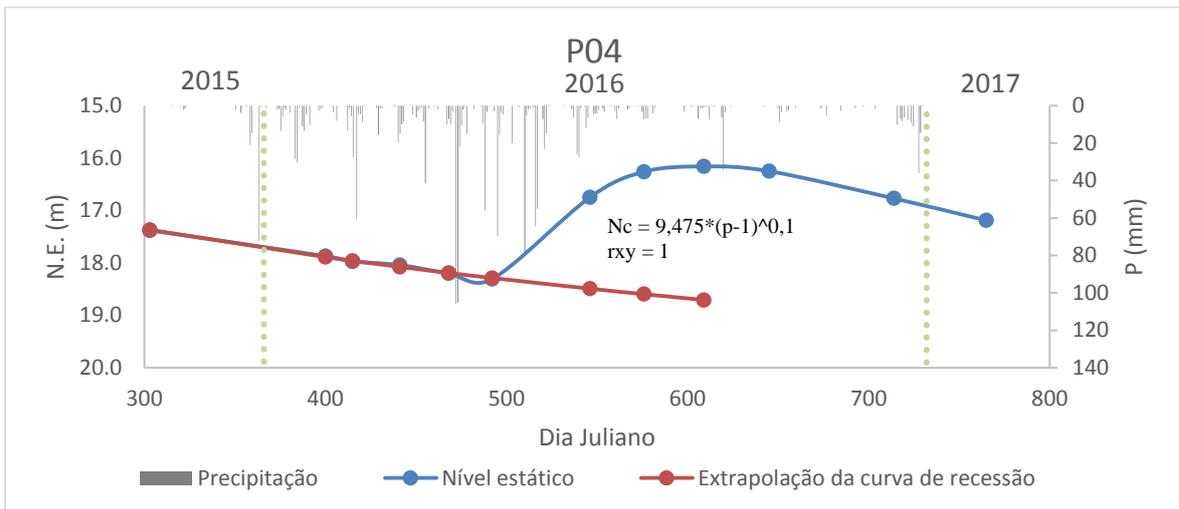


Figura 71 – Recarga direta anual do poço P04

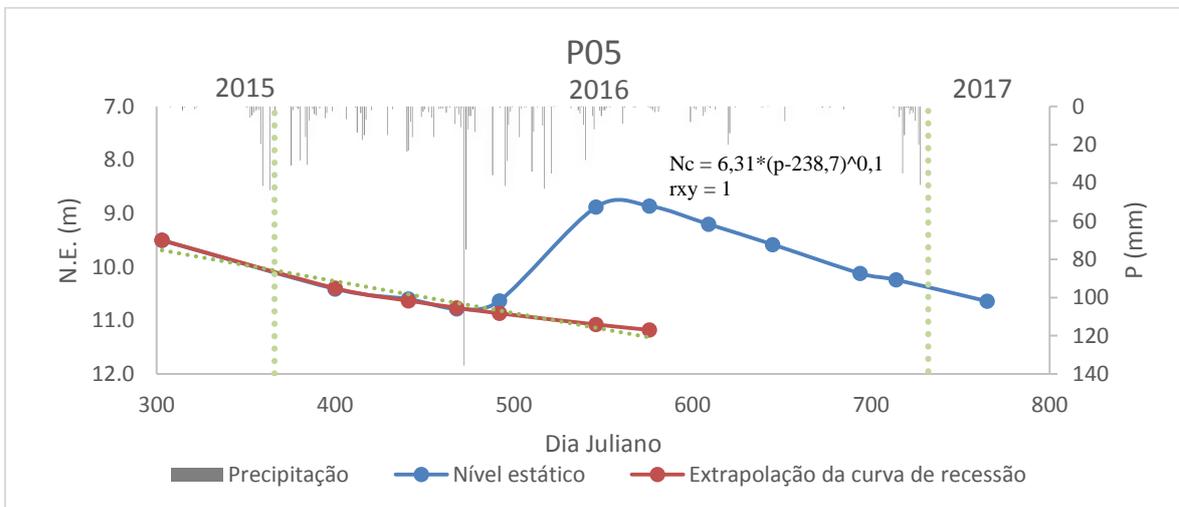


Figura 72 – Recarga direta anual do poço P05

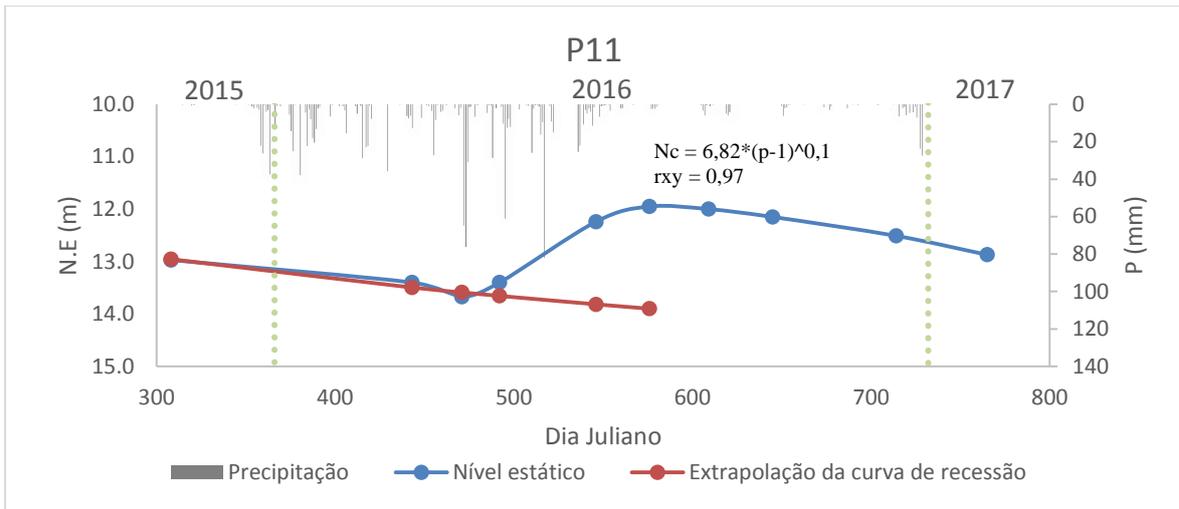


Figura 73 – Recarga direta anual do poço P11

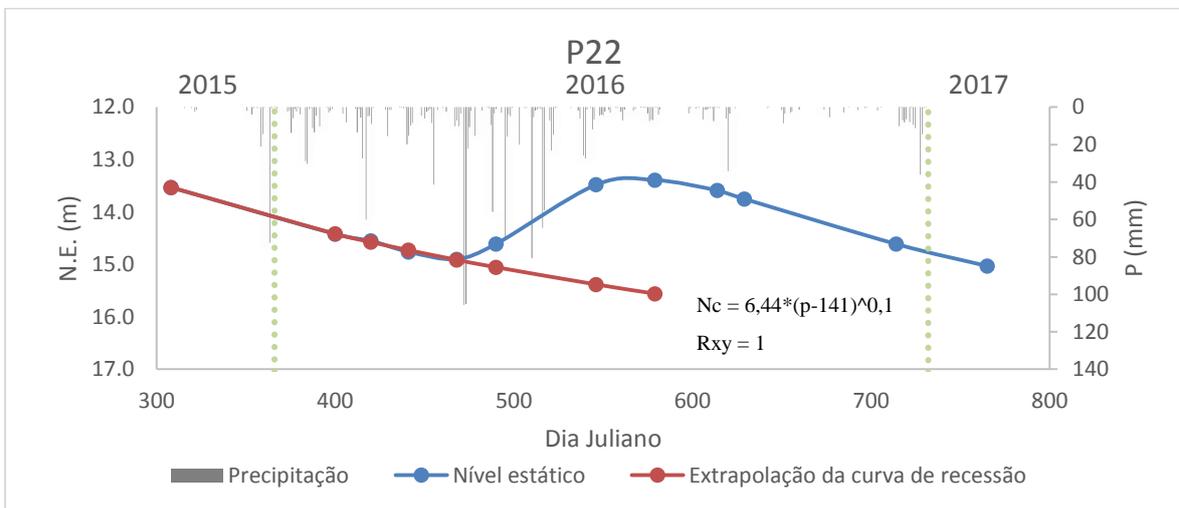


Figura 74 – Recarga direta anual do poço P22

Os poços P08 e P09 começaram a ser monitorados apenas no mês de fevereiro, mas ainda assim foi possível gerar a curva de recensão desses poços. A recarga direta anual do P08 foi de 295,74 mm e do P09 foi de 209,29 mm, representando 20,02% e 14,17% da chuva, respectivamente.

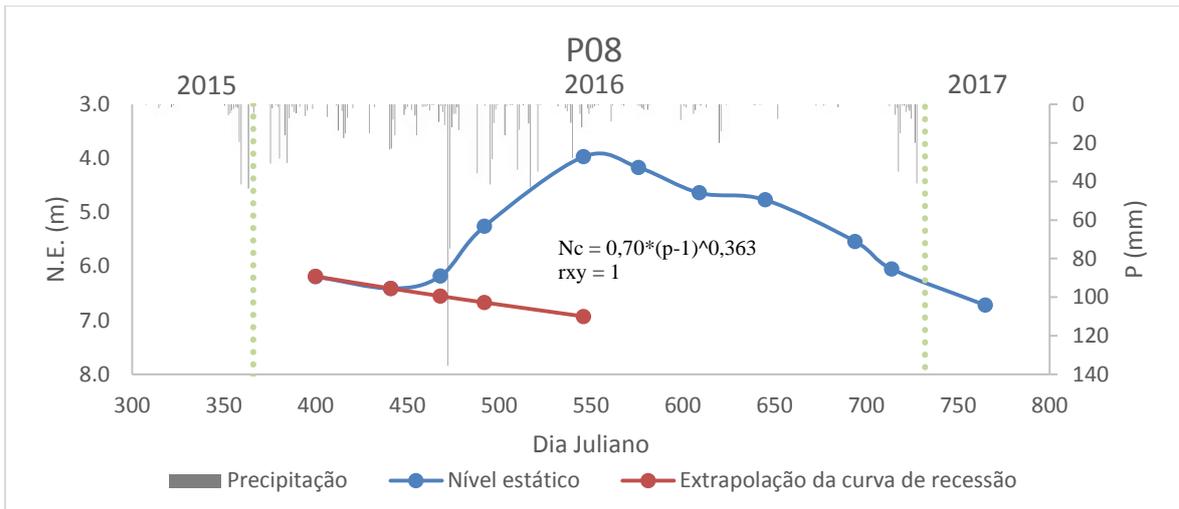


Figura 75 – Recarga direta anual do poço P08

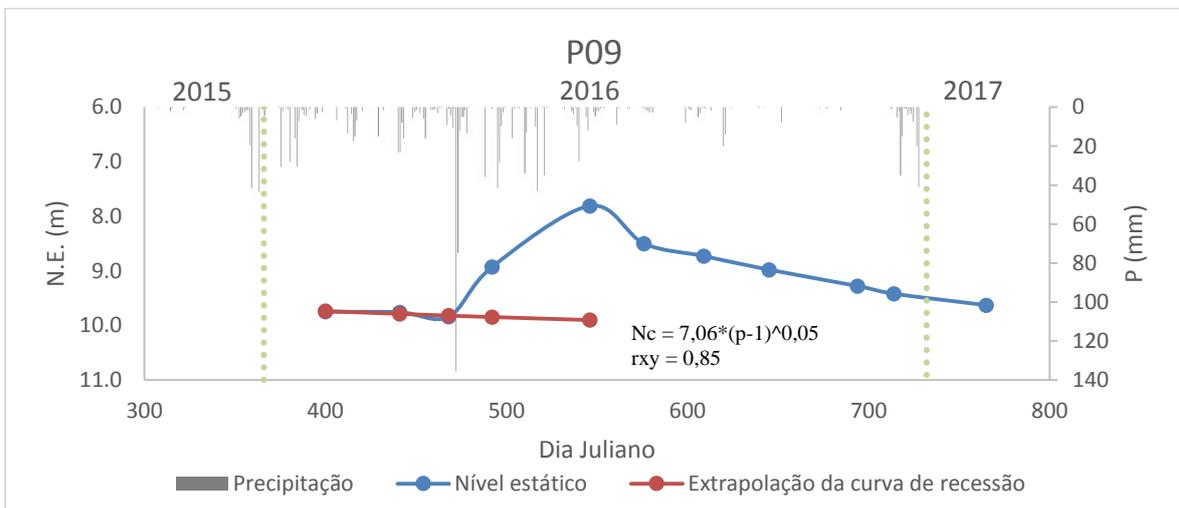


Figura 76 – Recarga direta anual do poço P09

No poço P17 foi feito um ajuste no valor do nível estático medido no mês de maio. O valor medido em campo foi 22,60m, sendo considerado um erro. Para corrigir este erro, foi feita uma interpolação dos valores dos meses de abril e junho. A recarga anual desse poço foi de 303,17mm, correspondendo a 25,60% da precipitação anual.

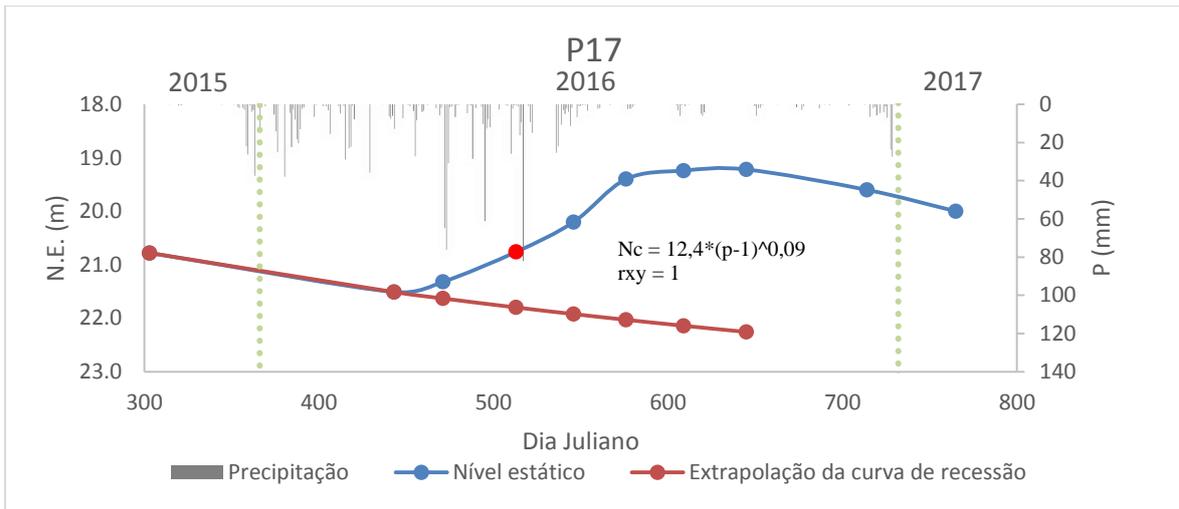


Figura 77 – Recarga direta anual do poço P17

Por último, os poços P16, P20 e P07 tiveram uma recarga anual de 426,74mm, 245,98m e 228,07 mm, respectivamente.

O poço P07 é um caso típico em que a falta de dados pode levar ao erro da estimativa da recarga. Neste caso, a primeira medição foi em novembro de 2015 e a medição seguinte foi em março de 2016. Entre essas duas datas pode ter havido uma elevação no nível freático, que resultaria em uma curva de recensão mais ou menos inclinada. Isto teria como consequência uma maior ou menor recarga em relação àquela estimada.

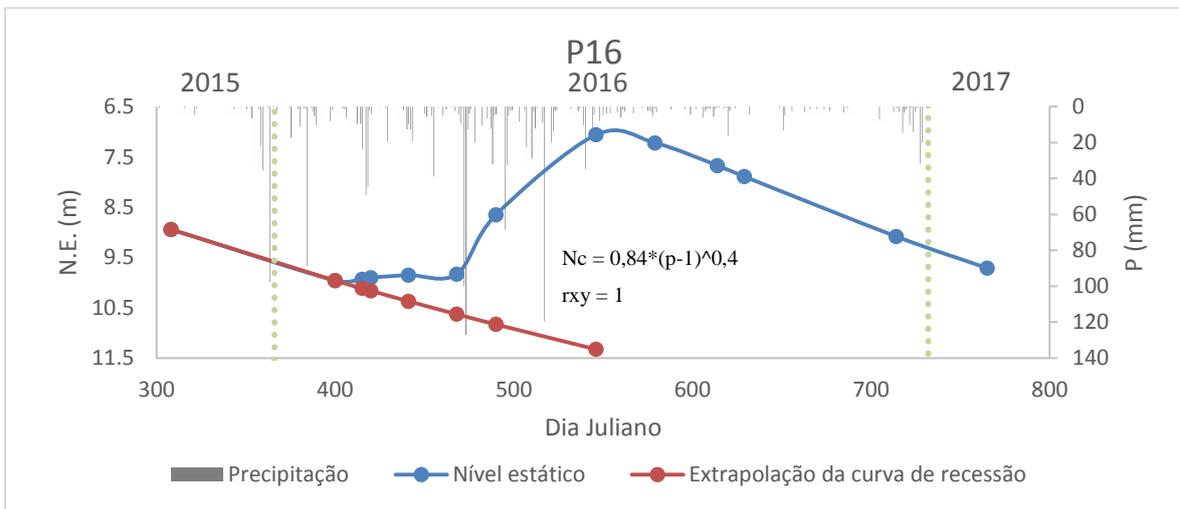


Figura 78 – Recarga direta anual do poço P16

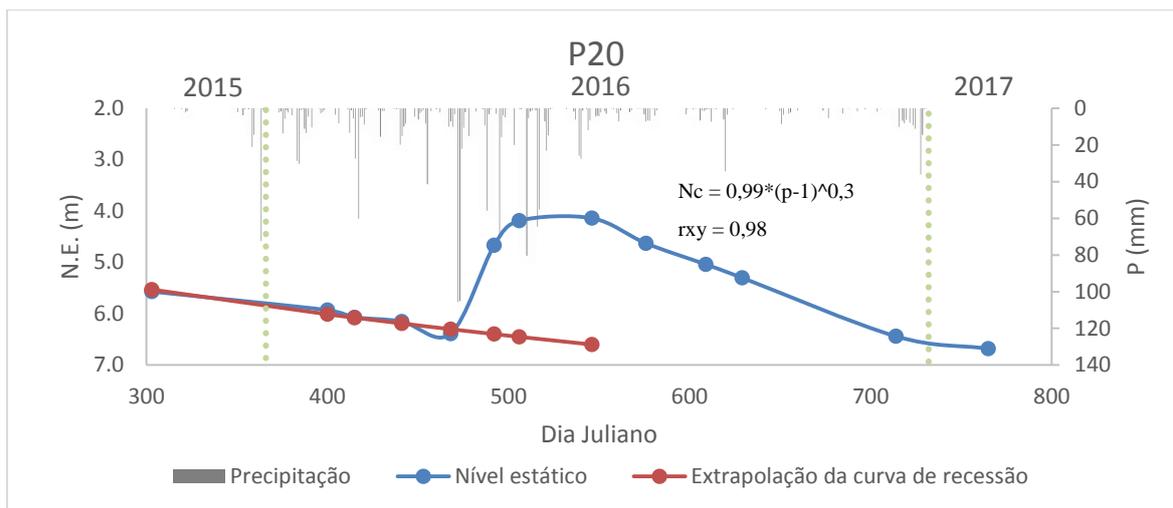


Figura 79 – Recarga direta anual do poço P20

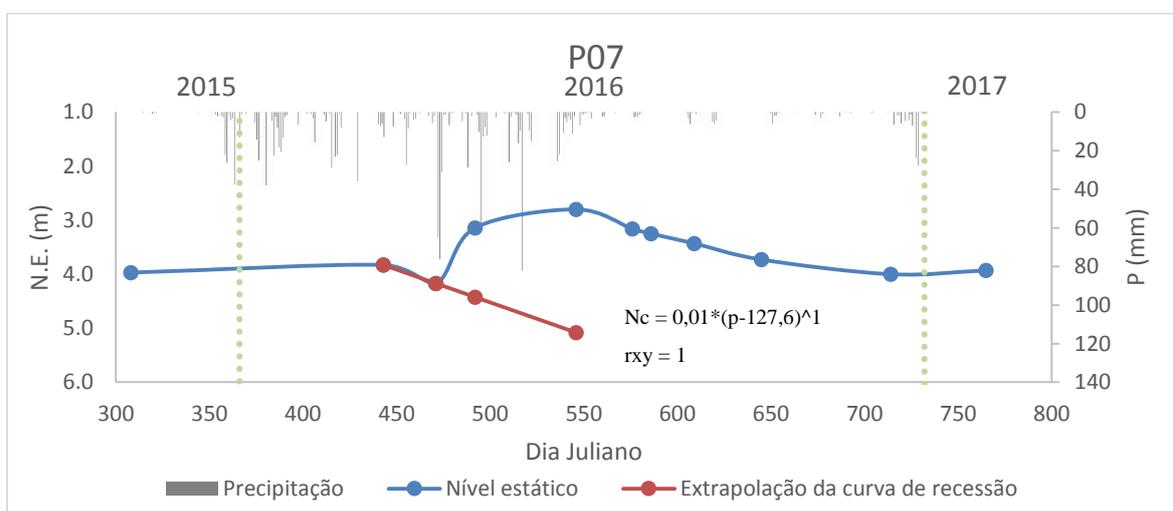


Figura 80 – Recarga direta anual do poço P07

Os poços P02, P06 e P14 foram os únicos que apresentaram mais de uma curva de recensão e mais de um pico de elevação do nível estático. A espessura média da camada não-saturada dos poços P02 e P14 é de cerca de 3m e do poço P06 é em torno de 6m. A recarga calculada no poço P02 e P14 foi 208,42mm e 122,25 mm, respectivamente. Já no poço P06, a recarga anual foi de 141,29mm.

No poço P06 foi realizada uma correção no dado do dia 06 de maio de 2016, pois foi identificado um erro grosseiro de medição. O valor medido em campo foi 10,05 m, o que não condiz com o comportamento do nível do poço observado anteriormente. Desta forma, foi feita uma interpolação dos dados.

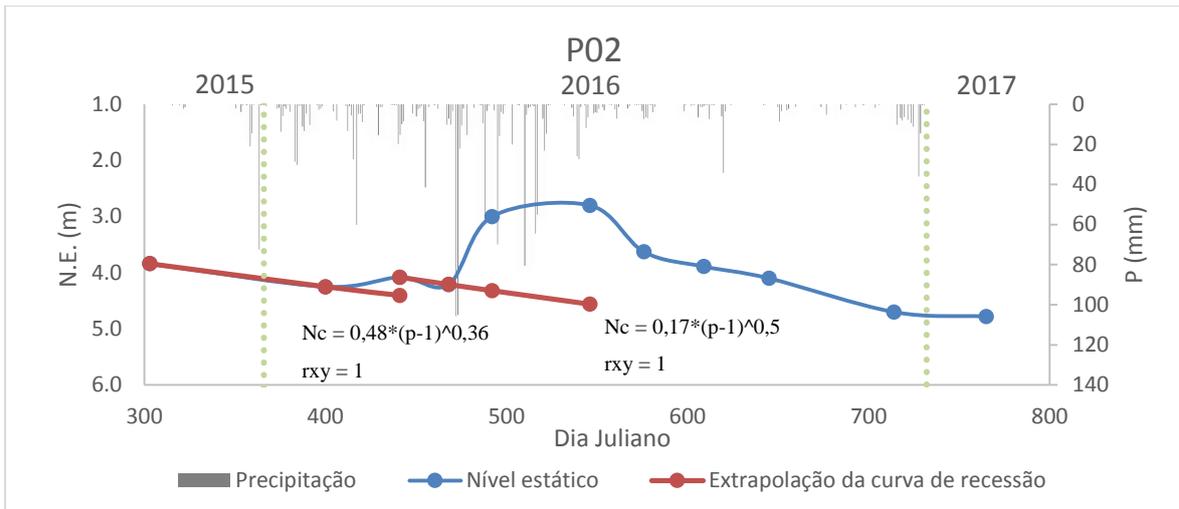


Figura 81 – Recarga direta anual do poço P02

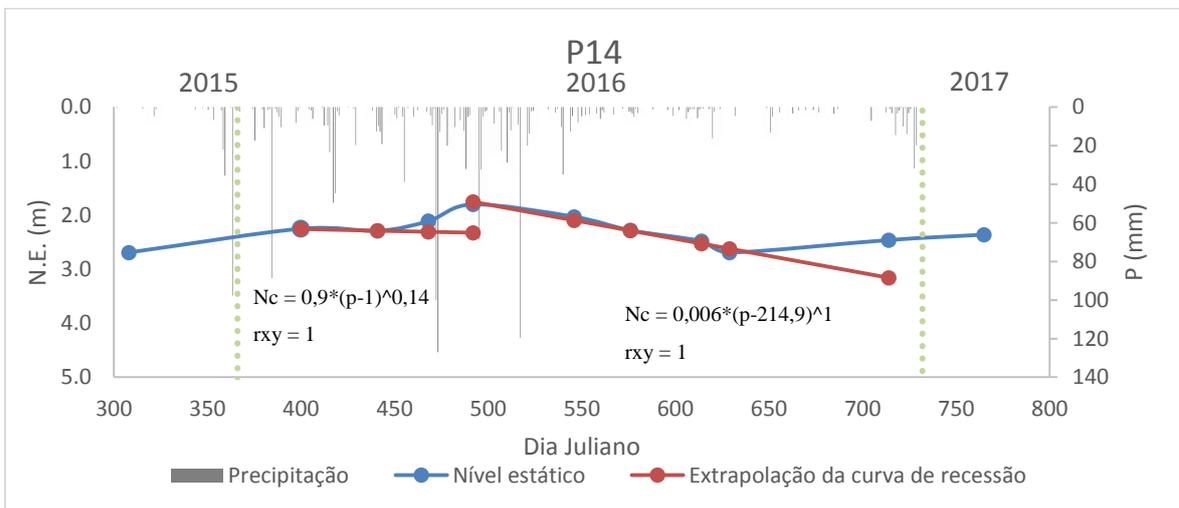


Figura 82 – Recarga direta anual do poço P14

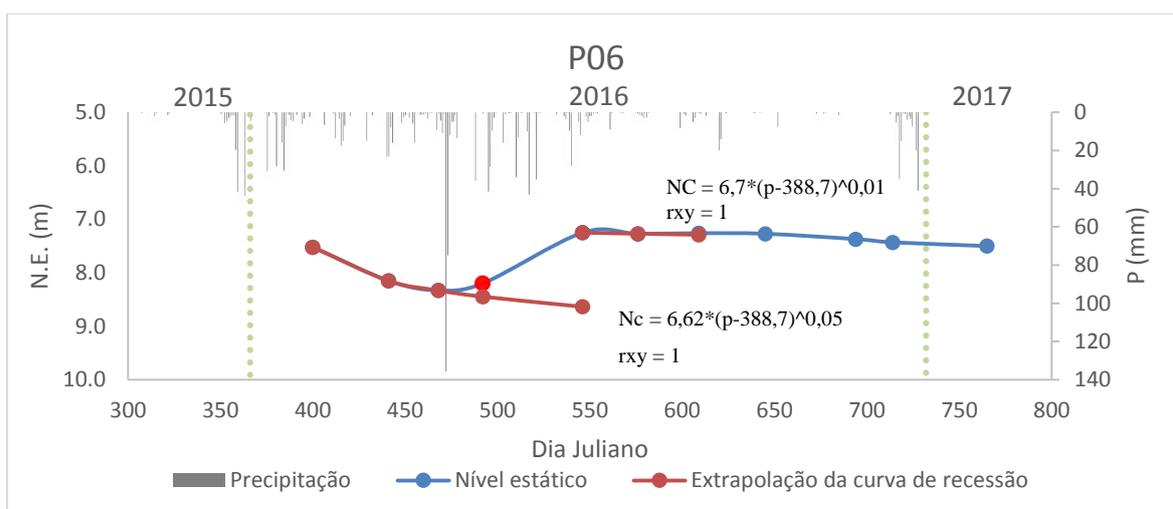


Figura 83 – Recarga direta anual do poço P06

A Tabela 22 traz um resumo dos valores de recarga calculados para cada um dos 20 poços analisados, considerando o rendimento específico de 10%, conforme foi identificado nos testes de bombeamento.

Tabela 22 – Recarga calculada pelo método WTF para $S_y = 10\%$

ID	Tipo	Recarga direta anual (mm)	P (mm)	% da chuva
P02	Cacimbão	208,42	1341,12	15,54
P04	Cacimbão	254,68	1494,50	17,04
P05	Cacimbão	231,68	1213,70	19,09
P06	Cacimbão	141,29	1477,40	9,56
P07	Cacimbão	228,07	1442,20	15,81
P08	Cacimbão	295,74	1477,40	20,02
P09	Cacimbão	209,29	1477,40	14,17
P11	Cacimbão	194,92	1200,20	16,24
P13	Cacimbão	146,71	1442,20	10,17
P14	Cacimbão	122,25	1874,50	6,52
P16	Cacimbão	426,47	1912,60	22,30
P17	Cacimbão	303,70	1186,30	25,60
P19	Tubular	127,96	1833,58	6,98
P20	Cacimbão	245,98	1825,71	13,47
P21	Cacimbão	41,33	1662,15	2,49
P22	Cacimbão	216,71	1513,04	14,32
P23	Tubular	118,08	1500,60	7,87
P25	Cacimbão	70,30	1912,60	3,68
P26	Tubular	64,99	1844,50	3,52
P28	Tubular	49,05	1962,90	2,50
Média aritmética		184,88	1579,73	-

O poço onde houve maior recarga foi o P16, com 426,47 mm, representando 22,30% de toda chuva que caiu sobre essa região. Já o poço P21 foi o que menos sofreu o processo de recarga, apenas 41,33 mm, representando 2,49% da precipitação medida naquele posto. O mapa da distribuição espacial da recarga é mostrado na Figura 84.

O método WTF estabelece que a recarga direta para a área estudada pode ser calculada pela média aritmética da recarga direta de cada poço considerado. Com isso, a recarga direta anual para a área de estudo foi de 184,88 mm, representando 11,70% da precipitação média do período analisado, que foi de 1.579,73 mm, considerando os 365 dias anteriores ao dia do pico do NE de cada poço. Esse valor está um pouco abaixo do esperado, de acordo com o PDRH (2000), que estima a recarga anual na média de 15% da precipitação.

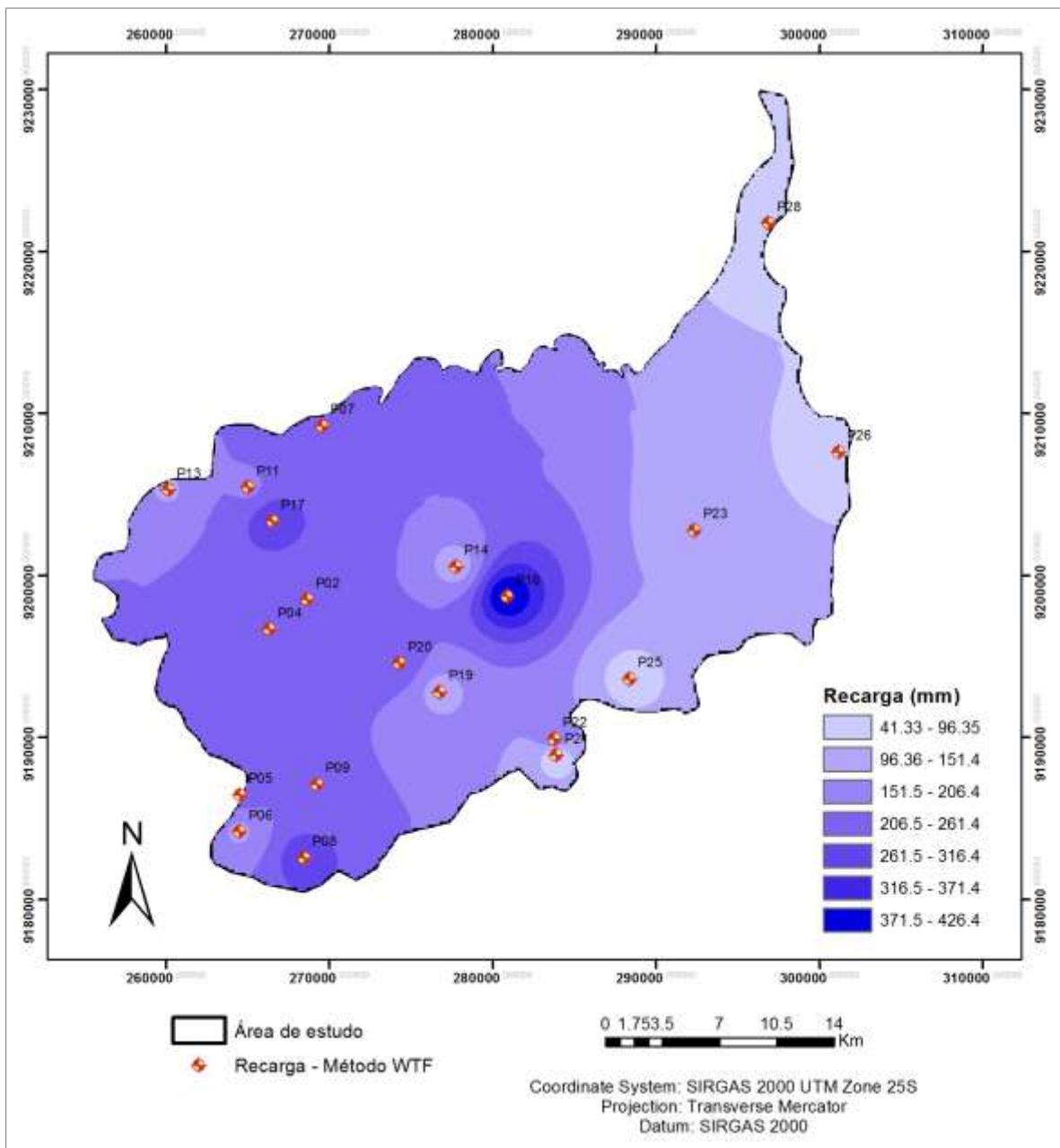


Figura 84 – Distribuição da recarga

Coelho (2011) calculou a recarga da bacia hidrográfica do rio Gramame para o ano 2011/2012 e obteve um valor médio de 105,4mm, quando calculado utilizando o rendimento específico de 10%. Esse valor representa 10,27% da precipitação do período estudado, que foi de 1026 mm. O valor encontrado nessa pesquisa está próximo ao valor encontrado por Coelho (2011), considerando que as áreas de estudo são quase semelhantes.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho atingiu o objetivo principal proposto, que foi a estimativa da recarga direta do aquífero livre da região das bacias hidrográficas do rio Gramame e do baixo curso do rio Paraíba. Os objetivos específicos também foram alcançados, tais como a realização dos testes de bombeamento para a determinação das propriedades hidrodinâmicas do aquífero e o monitoramento mensal do nível da água, que foram essenciais para a aplicação do método WTF. A recarga direta anual média para a área de estudo foi de 184,88 mm, correspondendo a 11,70% da precipitação no período analisado.

Foram monitorados 39 poços, entre tubulares e cacimbões. O monitoramento mensal, com algumas idas extras a campo, foi suficiente para representar o comportamento do nível da água. O ideal é que sejam feitas medições mensais no período de seca e quinzenais no período chuvoso. Nos poços onde existem sensores, visitas a cada 3 meses são suficientes, já que os sensores têm se mostrado eficientes na sua função, embora esses dados não tenham sido apresentados nesta pesquisa.

O nível freático dos poços variou desde 0,46 m até 3,92 m ao longo de 2016. Os poços que tiveram uma variação de até 1 m concentraram-se predominantemente na região leste e sudeste da bacia. Os poços localizados na região noroeste da área estudada tiveram uma maior variação.

Em relação às zonas de recuperação definidas neste estudo, concluiu-se que os poços com pequena variação do nível estático ao longo do ano, estão localizados nas zonas em que a recuperação do nível da água é mais rápida. Já os poços localizados na zona de recuperação lenta são aqueles que apresentam uma variação do nível estático maior.

Os testes de bombeamento resultaram em um valor médio de $S_y = 0,1$ e $T = 2,13 \times 10^4$ m²/s, que é uma estimativa confiável e coerente com os dados encontrados no estudo das Vertentes Litorâneas (COSTA *et al.*, 2007) e por Coelho (2011). Para uma correta estimativa dos parâmetros, pelo software AQTESOLV, foi necessário o conhecimento dos dados construtivos dos poços, embora isso não tenha sido possível em todos os poços. Em relação ao método de Papadopulos & Cooper, é recomendada a realização de outros testes, considerando uma duração maior do bombeamento.

Esta pesquisa foi importante para gerar dados necessários a uma gestão sustentável dos recursos hídricos na região. Por ser uma área predominantemente rural e sem sistema de abastecimento de água, as populações que lá vivem dependem exclusivamente da produção desses poços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO, R. K.; MERKEL, B. J. Comparative estimation of the potential groundwater recharge in Al Zerba catchment of Aleppo basin, Syria. **Arab J Geosci**, v. 8, p. 1339-1360, 2015.

AESA – **Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba** – Disponível em: <http://geoserver.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal_shapes.html/> Acesso em: abr./2017.

AMPEQ. **Manual de Instrução – Equipamentos Ampeq**, 2015.

AQTESOLV – **Advanced Aquifer Test Analysis Software** – Disponível em: <<http://www.aqtesolv.com/>> Acesso em: set/2017.

BARBOSA, J. A. **A deposição carbonática na faixa costeira recife-natal, NE do Brasil: aspectos estratigráficos, geoquímicos e paleontológicos**. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Geociências – UFPE, 270p. 2007.

BARRETO, C. E. A. G. **Balço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 249p. 2006.

BARROS, A. J. S. e LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de metodologia: Um guia para a iniciação científica**. 2 Ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**, Brasília, DF, 1997.

CHUNG, I, M.; SOPHOCLEOUS, M. A.; MITIKU, D. B.; KIM, N. W. Estimating groundwater recharge in the humid and semi-arid African regions: review. **Geosciences Journal**, v. 20, n. 5, p. 731 – 744, 2016.

COELHO, V. H. R. **Monitoramento e análise da variação do nível d'água para estimativa da recarga do aquífero livre da bacia do rio Gramame - PB**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) UFPB, João Pessoa, 2011.

COELHO, V. H. R.; ALMEIDA, C. N.; SILANS, A. M. B. P. DE. Análise da flutuação do nível d'água para estimativa da recarga subterrânea da bacia representativa do Rio Gramame no Nordeste brasileiro. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 241–252, 2012.

COSTA, W. D.; ALBUQUERQUE, J. do P. T. de; BRANCO, R. L. de C.; MARANHÃO, C. M. L.; GOLDFABER, M. **Estudo de caracterização e verificação da disponibilidade hídrica da vertente litorânea do estado da Paraíba. Estudos Hidrogeológicos. Relatório Final. Tomo I – Texto**. Ministério da Integração Nacional, 2007.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Estudos hidrogeológicos de bacias sedimentares da região semi-árida do Nordeste brasileiro**, Brasil, 2004.

CUSTÓDIO, G. E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia Subterrânea**. Barcelona: Ediciones Omega. 2400 p. 2v, 1983.

DELIN, G. N. et al. Comparison of local- to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. **Journal of Hydrology**, v. 334, n. 1–2, p. 231–249, 2007.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. **Hidrogeologia. Conceitos e aplicações**. 3ª ed. rev. e ampl. – Rio de Janeiro: CPRM: LABHID. 2008, 812p.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. Upper Saddle River: Prentice Hall. 66-107 p. 1994.

FURRIER, M.; ARAUJO, M. E. DE; MENESES, L. F. Geomorfologia e tectônica da formação Barreiras no Estado da Paraíba. **Geologia USP**, v. 6, n. 2, p. 1–8, 2006.

GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na Bacia-Piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em**

zona saturada. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 167p. 2008.

GÓMEZ, A. A.; RODRÍGUEZ, L. B.; VIVES, L. S. The Guarani Aquifer System: estimation of recharge along the Uruguay–Brazil border. **Hydrogeology Journal**, New York, n. 18, p.1667–1684, 2010.

GOUVÊA, T. H.; WENDLAND, E. C. Influência de características do solo na variação do nível d'água em região de recarga do Aquífero Guarani. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 1, p. 55–65, 2011.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, p. 91–109, 2002.

IBESA. **Relatório preliminar sobre a instalação de bacias experimentais no Semi-Árido.** Projeto financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, 2004.

IZADY, A.; ABDALLA, O. A. E.; JOODAVI, A.; KARIMI, A.; CHEN, M.; TOMPSON, A. Groundwater recharge estimation in Arid hardrock-alluvium aquifers using combined water-table fluctuation and groundwater balance approaches. **Hydrological Process**, v. 31, p. 3437-3451, 2017.

JIE, Z.; HEYDEN, J. V.; BENDEL, D.; BARTHEL, R. Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge calculations . **Hydrogeology journal**, v. 19, p. 1487-1502, 2011.

LAKATOS, E. M. e MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LERNER, D. N.; ISSAR, A. S. e SIMMERS, I. **Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge.** **International Contributions to Hydrogeology**, Vol. 8. International Association of Hydrogeologists, Verlag Heinz Heise, 1990.

LUCAS, M. C., GUANABARA, R. C. & WENDLAND, E. **Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani**. Boletín Geológico y Minero, 123 (3): 311-323, 2012.

MANOEL FILHO, J. **Interpretação de ensaios de bombeamento** IV Simposio de hidrogeologia do nordeste XII Encontro Nacional de perfuradores de poços, 2001.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, **XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços SP**. n. 16, 2005.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da recarga em área urbana. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 3, p. 35–46, 2008.

MELO, D. de C. D.; CABRERA, M. C. M.; WENDLAND, E. Balanço hídrico e modelagem computacional visando estimar a recarga subterrânea. **Águas subterrâneas**, v. 31, n.1, p. 66-78, 2017.

MMA/SRHU. **Programa VIII – Programa Nacional de Águas Subterrâneas – Versão Preliminar. Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente/SRHU, 2008.

NETO, D. C.; KIANG, C. H. Aplicação do método de flutuação de nível da água para a estimativa de recarga - exemplo do aquífero do Rio Claro. **Águas Subterrâneas**, v. 22, n. 1, p. 39–48, 2008.

PAPADOPULOS, I. S.; COOPER, H. H. Drawdown in a well of large diameter. **Water Resources Research**, v. 3, n. 1, p. 241–244, 1967.

PDRH. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Gramame**. SEMARH/SCIENTEC, 2000.

POWERS, J. P.; CORWIN, A. B.; SCHMALL, P. C.; KAECK, W. E. **Construction dewatering and groundwater control**. New York: John Wiley & Sons, 2007.

RABELO, J. L. **Estudo da recarga do Aquífero Guarani no sistema Jacaré- Tietê**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 200p. 2006.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo, Acad. Bras. Cien./IEA-USP, 717 p., 1999.

REBOUÇAS, A. C. Água E Desenvolvimento Rural. **Estudos Avançados**, v. 15, n. 43, p. 327–344, 2001.

REBOUÇAS, A. C. A inserção da água subterrânea no sistema nacional de gerenciamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 39–50, 2002.

REIS, C. M. M. **O litoral de João Pessoa (PB), frente ao problema da erosão costeira**. Tese de Doutorado. PPGG, CTG, UFPE. 123p, 2008.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 2, p. 18–39, 2002.

SCHLUMBERGER WATER SERVICES. Disponível em: <<http://diver-water-level-logger.com/en/diver-water-level-loggers/>> Acesso em: abr./2017.

Theis, C.V. **The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage**. Am. Geophys. Union Trans. 16, 519–524, 1935.

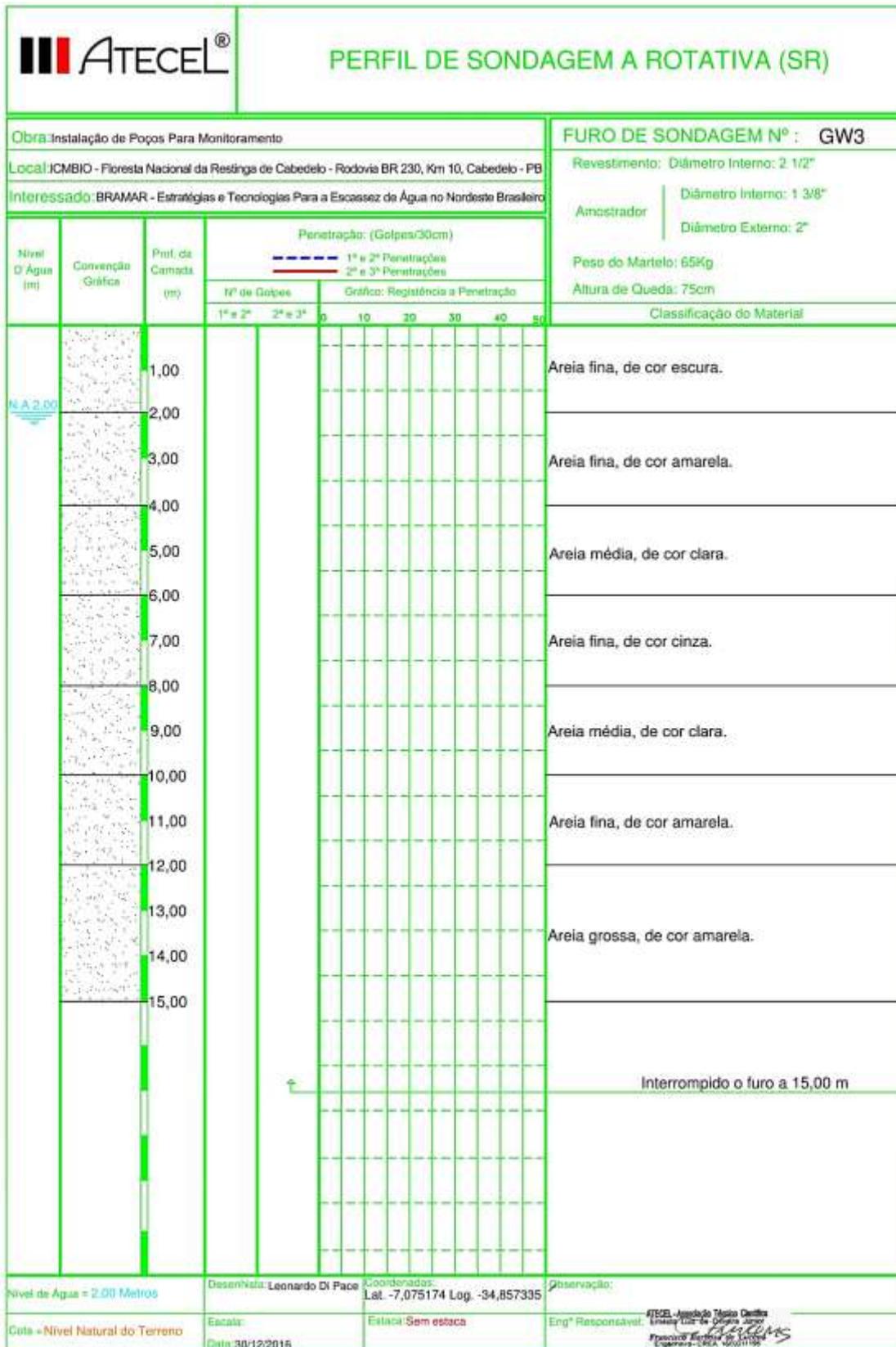
WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. Comparação de métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na bacia hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n.2, p.15-25, 2005.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 342, n. 3–4, p. 261–269, 2007.

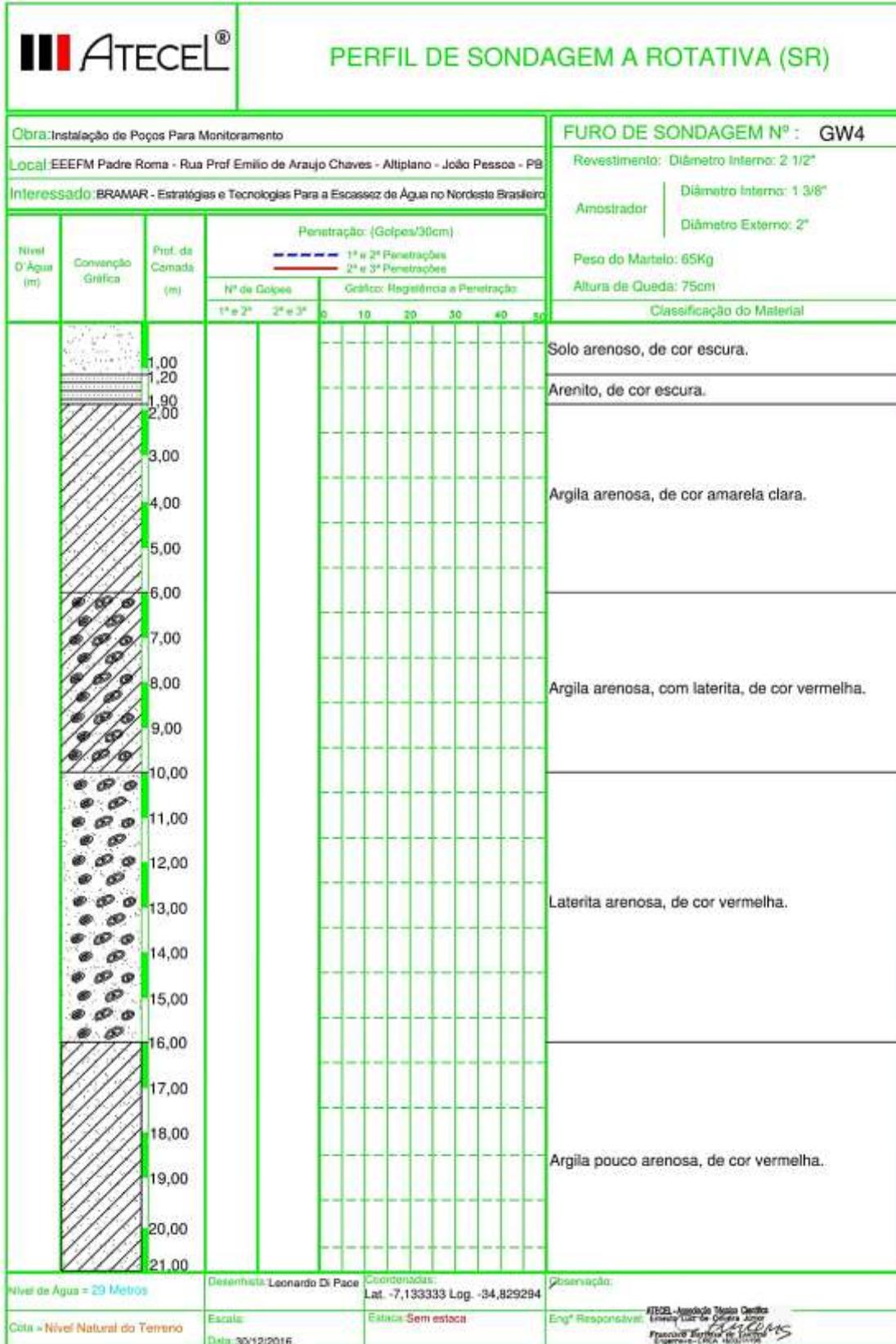
ANEXO 1

**PERFIS DOS POÇOS P31, P32, P33, P34, P35, P36, P37, P38 e P39, CONSTRUÍDOS
NO ÂMBITO DO PROJETO BRAMAR**

P33 - ICMBio:



P34 – Escola EEEFM Padre Roma:





PERFIL DE SONDAGEM A ROTATIVA (SR)

Obra: Instalação de Poços Para Monitoramento				FURO DE SONDAGEM Nº : GW4															
Local: EEEFM Padre Roma - Rua Prof Emílio de Araújo Chaves - Altiplano - João Pessoa - PB				Revestimento: Diâmetro Interno: 2 1/2"															
Interessado: BRAMAR - Estratégias e Tecnologias Para a Escassez de Água no Nordeste Brasileiro				Amostrador: Diâmetro Interno: 1 3/8" Diâmetro Externo: 2"															
Nível D'Água (m)	Convenção Gráfica	Prof. da Camada (m)	Penetração: (Golpes/30cm)																
			Nº de Golpes			Gráfico: Registro e Penetração													
			1ª e 2ª	2ª e 3ª	0	10	20	30	40	50									
22,00		22,00															Argila pouco arenosa, de cor vermelha.		
23,00																		Argila pouco arenosa, de cor cinza clara.	
24,00																			
25,00																			
26,00																			
27,00																			
28,00																			
29,00		N.A29.00																	
30,00																			
31,00																			Argila arenosa, de cor amarela clara.
32,00																			
33,00																			
34,00																			
35,00																			
36,00																		Interrompido o furo a 36,00 m	
Nível de Água = 29 Metros		Desenhista: Leonardo Di Pace		Coordenadas: Lat. -7,133333 Log. -34,829294		Observação:													
Cota = Nível Natural do Terreno		Escala:		Escala: Sem escala		Engº Responsável:													
		Data: 30/12/2016				<small>ATECEL - Associação Técnico Científica Unidade CTA de Engenharia</small> <small>Francisco Antônio de Sousa Engenheiro - CREA 42011194</small>													



PERFIL DE SONDAGEM A ROTATIVA (SR)

Obra: Instalação de Poços Para Monitoramento
 Local: UFPB - Cidade Universitária - Castelo Branco, João Pessoa - PB
 Interessado: BRAMAR - Estratégias e Tecnologias Para a Escassez de Água no Nordeste Brasileiro

FURO DE SONDAGEM Nº : GW5

Revestimento: Diâmetro Interno: 2 1/2"

Amostrador

Diâmetro Interno: 1 3/8"

Diâmetro Externo: 2"

Peso do Martelo: 65Kg

Altura de Queda: 75cm

Classificação do Material

Nível D'Água (m)	Convenção Gráfica	Prof. da Camada (m)	Penetração: (Golpes/30cm)																
			Nº de Golpes		Gráfico: Registro e Penetração														
			1ª e 2ª	2ª e 3ª	0	10	20	30	40	50									
		22,00																	
		23,00																	
		24,00																	
		25,00																	
		26,00																	
		27,00																	
		28,00																	
		29,00																	
		30,00																	
		31,00																	
		32,00																	
		33,00																	
		34,00																	
		35,00																	
		36,00																	
		37,00																	
		38,00																	
		39,00																	
		40,00																	
		41,00																	
		42,00																	

Argila pouco arenosa, de cor cinza.

Nível de Água = 33,00 Metros

Desenhista: Leonardo Di Pace

Coordenadas:
Lat. -7,133901 Log. -34,847283

Observação:

Cota = Nível Natural do Terreno

Escala:

Estaca: Sem estaca

Engº Responsável:

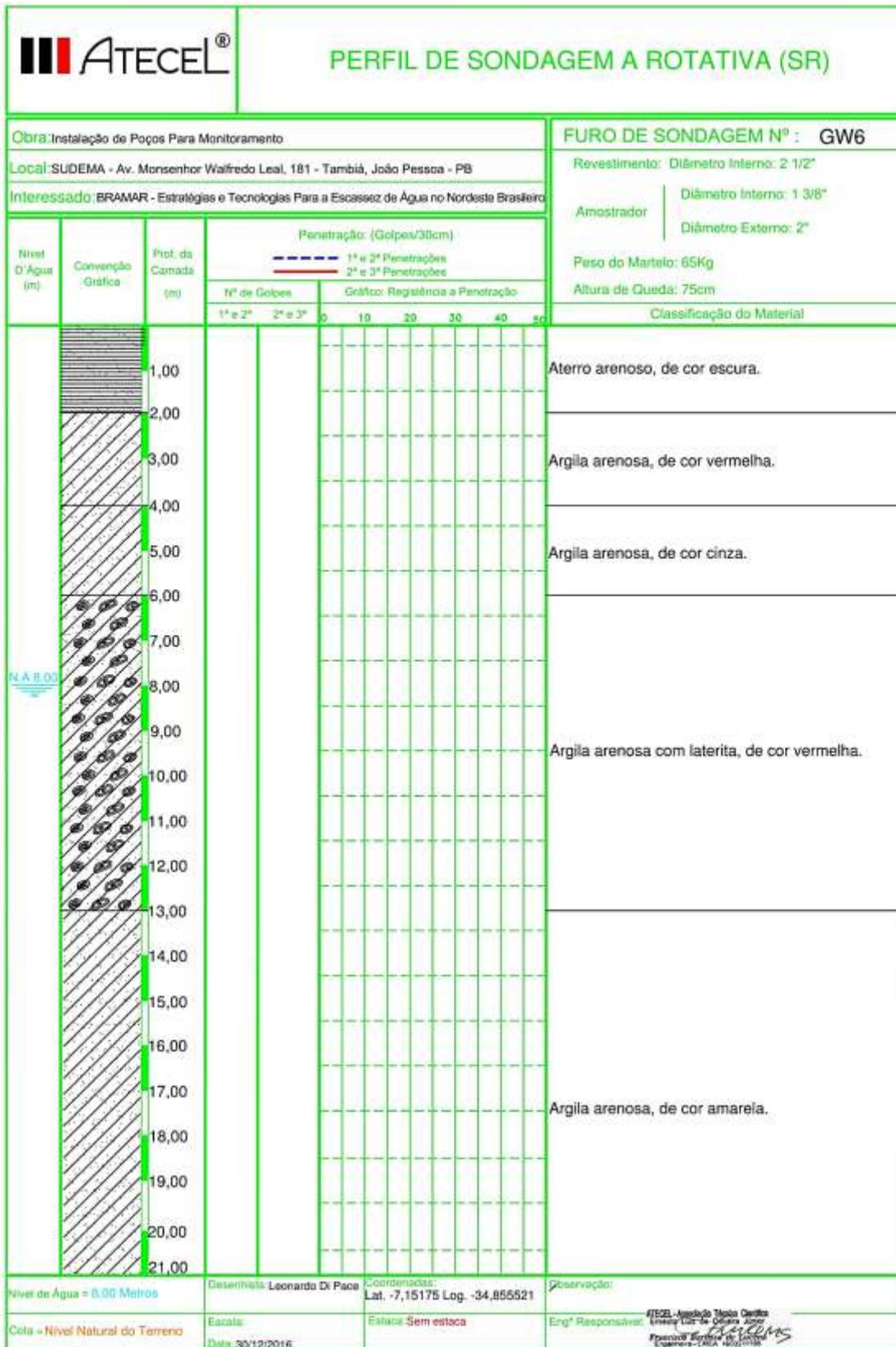
Data: 30/12/2016

ATECEL - Associação Técnico Científica
 Engenharia Civil de Qualidade Superior
 Francisco Ferreira de Lima
 Engenheiro - CREA 14051198



PERFIL DE SONDAGEM A ROTATIVA (SR)

Obra: Instalação de Poços Para Monitoramento				FURO DE SONDAGEM Nº : GW5								
Local: UFPB - Cidade Universitária - Castelo Branco, João Pessoa - PB				Revestimento: Diâmetro Interno: 2 1/2"								
Interessado: BRAMAR - Estratégias e Tecnologias Para a Escassez de Água no Nordeste Brasileiro				Amostrador: Diâmetro Interno: 1 3/8" Diâmetro Externo: 2"								
Nível D'Água (m)	Convenção Gráfica	Prof. da Camada (m)	Penetração: (Golpes/30cm)									
			<div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: 0.8em;"> --- 1ª e 2ª Penetrações — 2ª e 3ª Penetrações </div>			Gráfico: Registração e Penetração						
			Nº de Golpes		0 10 20 30 40 50							
			1ª e 2ª	2ª e 3ª								
42,32									Classificação do Material			
									Argila pouco arenosa, de cor cinza.			
									Interrompido o furo a 42,32 m			
Nível de Água = 33,00 Metros			Desenhista: Leonardo Di Pace		Coordenadas: Lat. -7,133901 Log. -34,847283		Observação:					
Cota = Nível Natural do Terreno			Escala:		Escala: Sem estaca		Engº Responsável:					
			Data: 30/12/2016				ATECEL - Instalação Técnico Científica Unidade Litorânea de Engenharia e Construção Francisco Ferreira de Sousa Engenheiro - CREA 40021/199					

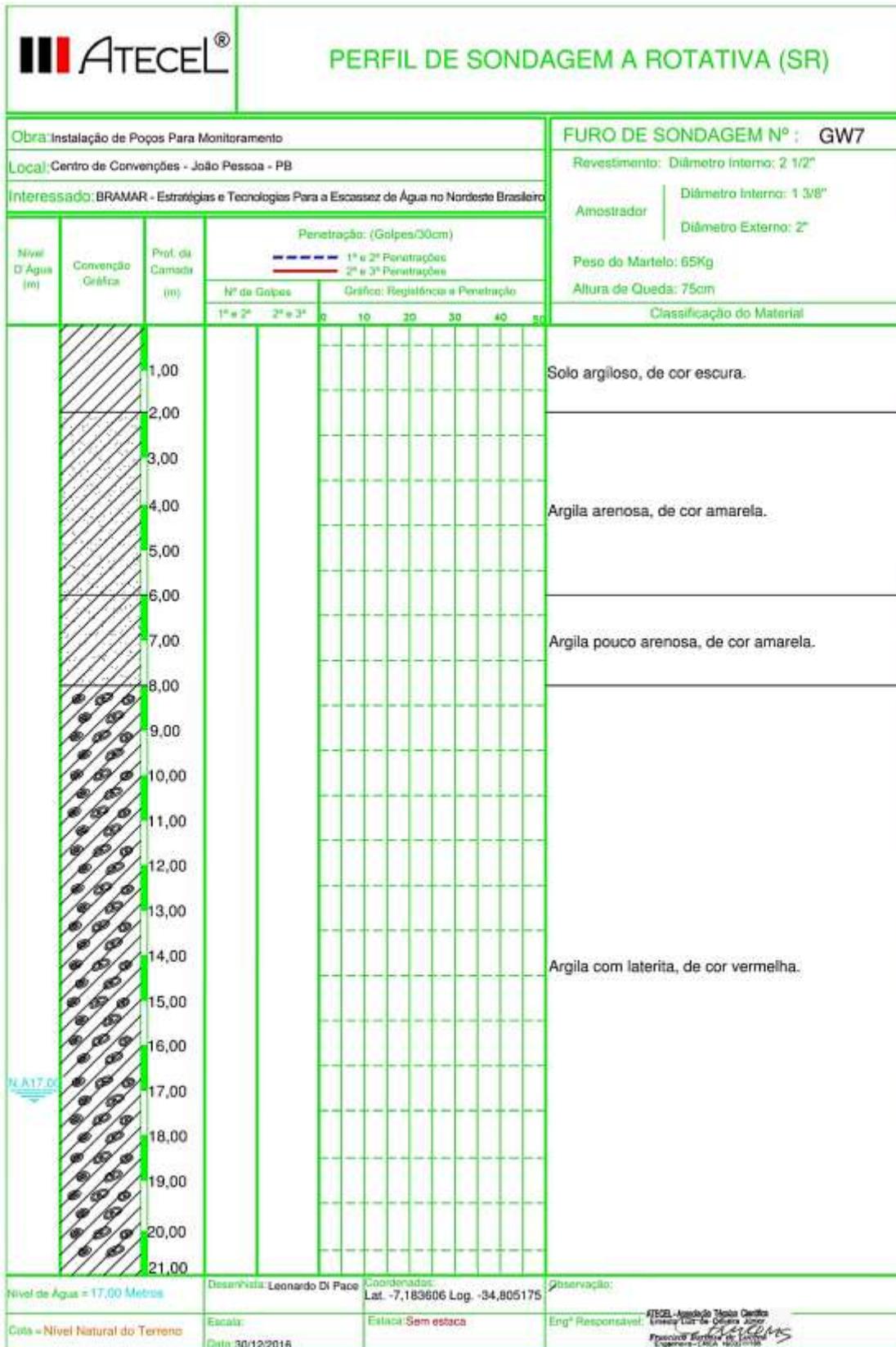




PERFIL DE SONDAGEM A ROTATIVA (SR)

Obra: Instalação de Poços Para Monitoramento				FURO DE SONDAGEM Nº : GW6		
Local: SUDEMA - Av. Monsenhor Walfredo Leal, 181 - Tambiá, João Pessoa - PB				Revestimento: Diâmetro Interno: 2 1/2"		
Interessado: BRAMAR - Estratégias e Tecnologias Para a Escassez de Água no Nordeste Brasileiro				Amostrador Diâmetro Interno: 1 3/8" Diâmetro Externo: 2"		
Nível D'Água (m)	Convenção Gráfica	Prof. da Cansule (m)	Penetração: (Golpes/30cm)			Peso do Martelo: 65Kg Altura de Queda: 75cm Classificação do Material
			<div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: 0.8em;"> --- 1ª e 2ª Penetrações — 2ª e 3ª Penetrações </div>			
		Nº de Golpes		Gráfico: Registração e Penetração		
		1ª e 2ª 2ª e 3ª		0 10 20 30 40 50		
				<div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%; position: relative;"> <div style="position: absolute; top: 0; left: 0; right: 0; height: 20px; background-color: #ffffcc;">Argila arenosa pedregulhosa, de cor amarela.</div> <div style="position: absolute; top: 20px; left: 0; right: 0; height: 100px; background-color: #ffffcc;">Argila arenosa, de cor amarela.</div> <div style="position: absolute; top: 120px; left: 0; right: 0; height: 100px; background-color: #cccccc; opacity: 0.5;">Interrompido o furo 24,00 m</div> </div>		
Nível de Água = 8,00 Metros		Desenhista: Leonardo Di Pace		Coordenadas: Lat. -7,15175 Log. -34,855521		
Cota = Nível Natural do Terreno		Escala:		Estaca: Sem estaca		
		Data: 30/12/2016		Observação: Engº Responsável: <small>ATECEL - Associação Técnico Científica Unidade UCB de Ciências Exatas Pós-graduação em Engenharia Engenheiros - CREA 1402/0198</small>		

P37 – Centro de Convenções:

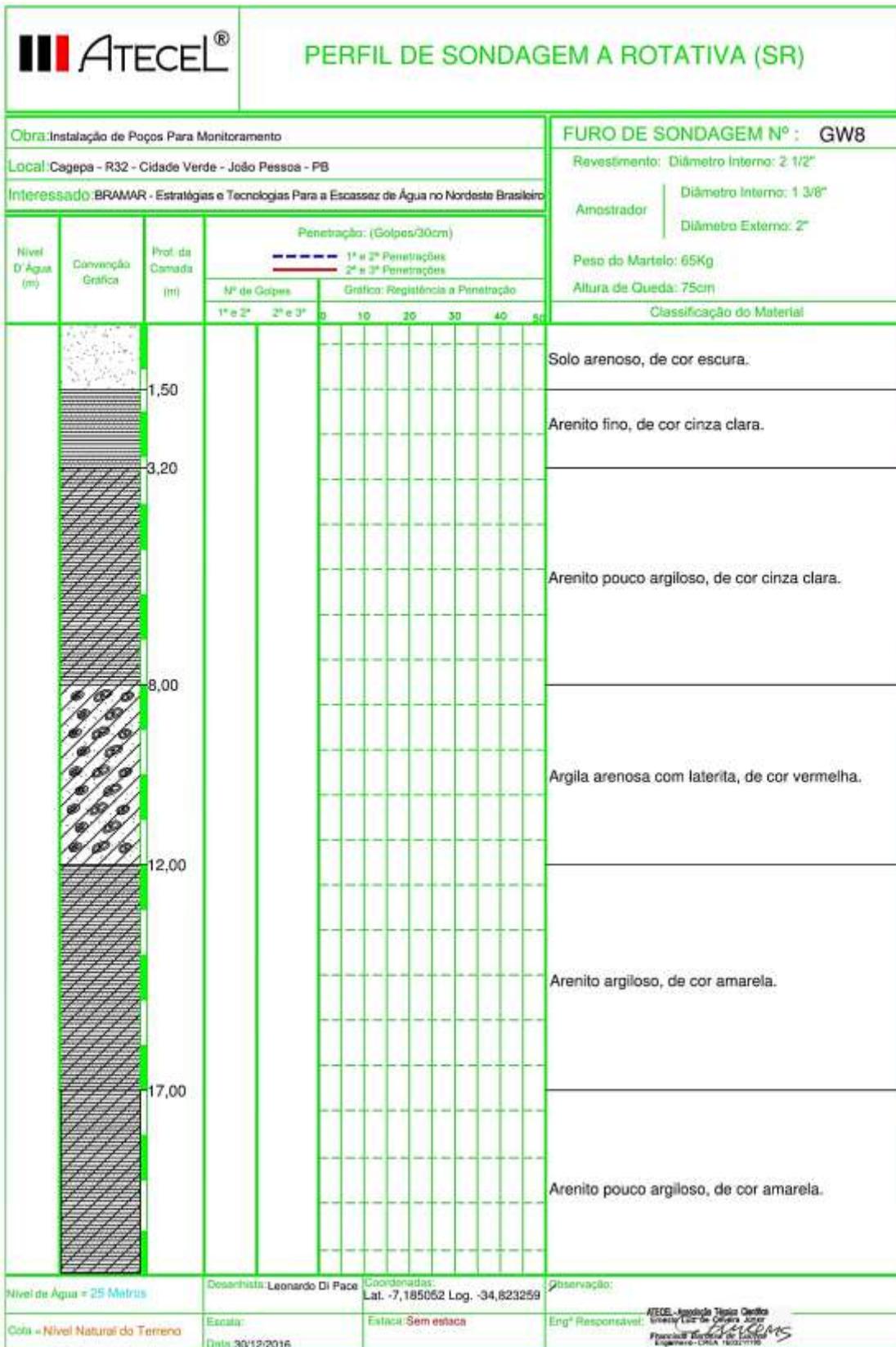




PERFIL DE SONDAGEM A ROTATIVA (SR)

Obra: Instalação de Poços Para Monitoramento				FURO DE SONDAGEM Nº : GW7					
Local: Centro de Convenções - João Pessoa - PB				Revestimento: Diâmetro Interno: 2 1/2"					
Interessado: BRAMAR - Estratégias e Tecnologias Para a Escassez de Água no Nordeste Brasileiro				Amostrador: Diâmetro Interno: 1 3/8" Diâmetro Externo: 2"					
Nível D'Água (m)	Convenção Gráfica	Prof. da Camada (m)	Penetração: (Golpes/30cm)						Peso do Martelo: 65Kg Altura de Queda: 75cm Classificação do Material
			--- 1ª e 2ª Penetrações --- 2ª e 3ª Penetrações			Gráfico: Resistência a Penetração			
			Nº de Golpes	0 10 20 30 40 50					
		22,00							
		23,00							
		24,00							Argila com laterita, de cor vermelha.
		25,00							
		26,00							
		27,00							
		28,00							
		29,00							
		30,00							Argila arenosa, de cor amarela.
		31,00							
		32,00							Interrompido o furo a 32,00 m
Nível de Água = 17,00 Metros			Desenhista: Leonardo Di Pace		Coordenadas: Lat. -7,183606 Log. -34,805175		Observação:		
Cota = Nível Natural do Terreno			Escala:		Escala: Sem escala		Engº Responsável:		
Data: 30/12/2016			ATECEL - Instalação Técnico Científica Unidade Litorânea de Engenharia e Projetos Rua: ... nº ... Engenheiros - CREA: ...						

P38 – R32:

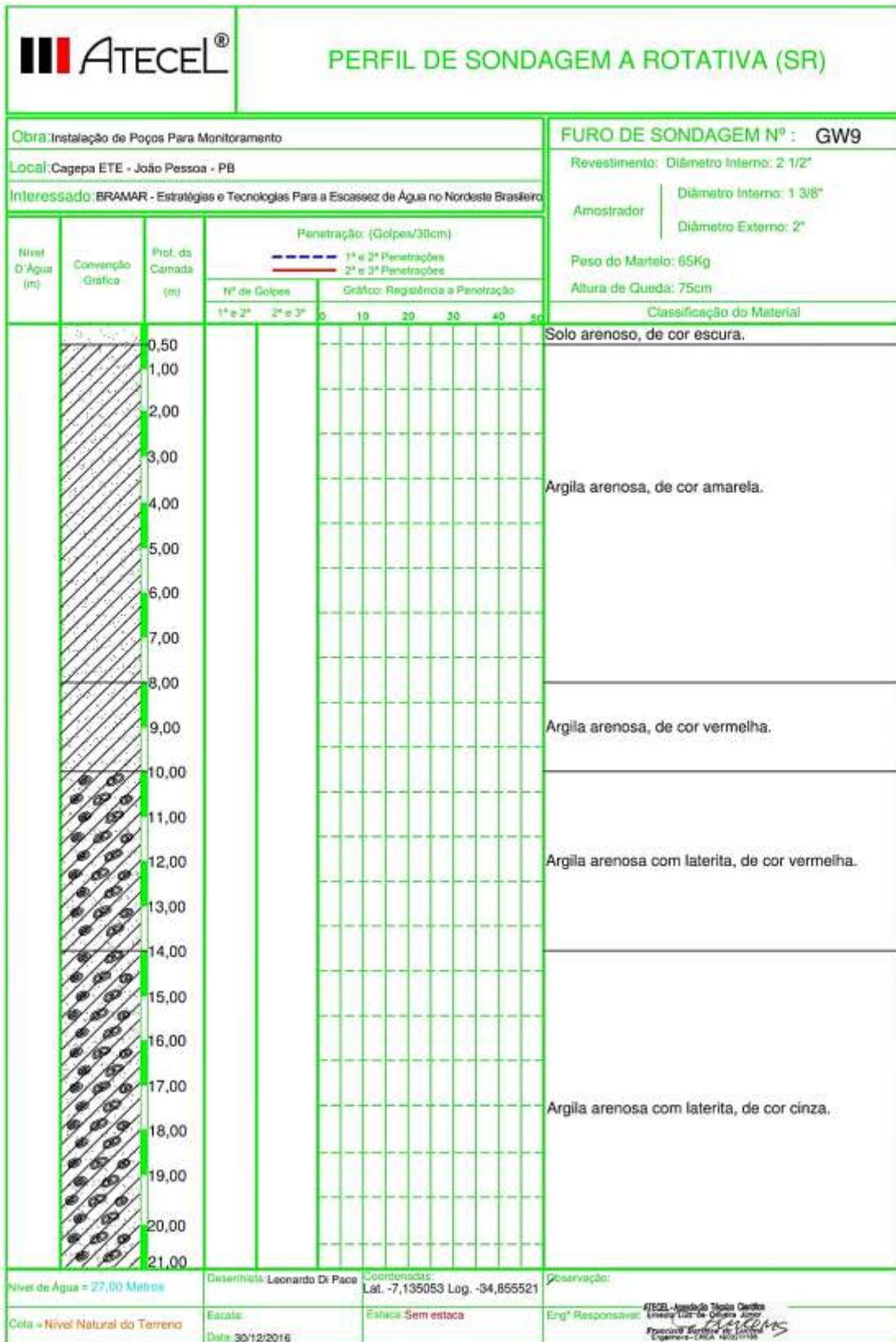




PERFIL DE SONDAAGEM A ROTATIVA (SR)

Obra: Instalação de Poços Para Monitoramento				FURO DE SONDAAGEM Nº: GW8														
Local: Cagepa - R32 - Cidade Verde - João Pessoa - PB				Revestimento: Diâmetro Interno: 2 1/2"														
Interessado: BRAMAR - Estratégias e Tecnologias Para a Escassez de Água no Nordeste Brasileiro				Amostrador: Diâmetro Interno: 1 3/8" Diâmetro Externo: 2"														
Nível D'Água (m)	Convenção Gráfica	Prof. da Camada (m)	Penetração: (Golpes/30cm)															
			Nº de Golpes		Gráfico: Registro e Penetração													
			1ª e 2ª	2ª e 3ª	0	10	20	30	40	50								
N.A. 25,00		25,00																Arenito pouco argiloso, de cor amarela.
		33,22																Argila arenosa, de cor amarela.
																		Interrompido o furo a 33,22 metros
Nível de Água = 25,00 Metros		Desenhista: Leonardo Di Pace		Coordenadas: Lat. -7,185052 Log. -34,823259		Observação:												
Cota = Nível Natural do Terreno		Escala:		Escala: Sem escala		Engº Responsável:												
		Data: 30/12/2016				ATECEL - Indústria Técnica Civil Rua José de Oliveira Junior Praça do Brasil de Joazeiro Engenheiro - CREA 10327196												

P39 - ETE:





PERFIL DE SONDAGEM A ROTATIVA (SR)

Obra: Instalação de Poços Para Monitoramento				FURO DE SONDAGEM Nº : GW9							
Local: Cagepa ETE - João Pessoa - PB				Revestimento: Diâmetro Interno: 2 1/2"							
Interessado: BRAMAR - Estratégias e Tecnologias Para a Escassez de Água no Nordeste Brasileiro				Amostrador: Diâmetro Interno: 1 3/8" Diâmetro Externo: 2"							
Nível D'Água (m)	Convenção Gráfica	Prof. da Cima da (m)	Penetração: (Golpes/30cm)						Peso do Martelo: 65Kg Altura de Queda: 75cm Classificação do Material		
			Nº de Golpes		Gráfico: Resistência a Penetração						
			1ª e 2ª	2ª e 3ª	0	10	20	30	40	50	
	[Hatched Pattern]	22,00									Argila arenosa com laterita, de cor cinza.
		23,00									
		24,00									
		25,00									
		26,00									
N.A. 27,00		27,00									
		28,00									
		29,00									
		30,00									
		31,00									
		32,00									
		33,00									
		34,00									Argila arenosa, de cor amarela.
		35,00									
		36,00									
		37,00									
		38,00									
		39,00									
		40,00									Interrompido o furo a 40,00 m
Nível de Água = 27,00 Metros			Desenhista: Leonardo Di Pace		Coordenadas: Lat. -7,135053 Log. -34,855521		Observação:				
Cota = Nível Natural do Terreno			Escala:		Escala: Sem escala		Engº Responsável:				
			Data: 30/12/2016				ATECEL - Instituto Técnico Científico Unidade Litorânea de Engenharia Praça José Bonifácio de Andrada e Silva Engenharia - LICA 400/0198				

APÊNDICE A

MODELO DA FICHA UTILIZADA PARA O CADASTRAMENTO DOS POÇOS

Tabela 23 – Modelo da ficha cadastral dos poços

<u>Ficha cadastral de poços</u>			
Identificação	Localização:	Tipo de medição	
Código do poço: _____	Latit. (km): _____	Medição automática: <input type="checkbox"/> Sim	
Data do cadastro: _____	Long (km): _____	<input type="checkbox"/> Não	
Proprietário do Poço: _____	Altitude (m): _____	Medição pressão atm.: <input type="checkbox"/> Sim	
Data de Perfuração: _____	Município: _____	<input type="checkbox"/> Não	
	Localidade: _____		
	Referência: _____		
Uso		Código do sensor: _____	SN: _____
		Lcabo: _____	
Diâmetro: _____ m	Profundidade: _____ m	Código do barômetro: _____	SN: _____
Vazão Captada: _____ l/s		Lcabo: _____	
Finalidade: Consumo Humano <input type="checkbox"/>	Estado do poço: Em uso <input type="checkbox"/>		
Uso doméstico <input type="checkbox"/>	Abandonado <input type="checkbox"/>		
Industrial <input type="checkbox"/>	Manutenção <input type="checkbox"/>		
Irrigação <input type="checkbox"/>	Uso da água: Abast. Público <input type="checkbox"/>		
Possui lastro de Concreto ao redor? Sim <input type="checkbox"/>	Abast. Privado <input type="checkbox"/>		
Não <input type="checkbox"/>	Outro: <input type="checkbox"/>		
População Atendida: _____ hb	Possui tampa? Sim <input type="checkbox"/>		
	Não <input type="checkbox"/>		
Possui bomba instalada? <input type="checkbox"/> Sim			
<input type="checkbox"/> Não			
Tipo de Bomba Instalada (se houver): _____			
Tempo de Funcionamento da Bomba: _____ min			

Condições no entorno do poço

Uso do Solo: _____

Há fonte de contaminação nas proximidades?

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Sim
Não

Especifique: _____

Curso d'água mais próximo: _____

Distância do curso d'água: _____ m

Acompanhamento do Nível Estático:

Altura tampa-solo: _____ m

Nível _____ m

Data _____

Nível _____ m

Data _____

Nível _____ m

Data _____

Obs:

Nível _____ m

Data _____

APÊNDICE B

TABELA COM OS VALORES DE NÍVEL ESTÁTICO

	ID	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09
Data/NE	15/12/2016									
Data/NE	14/12/2016	4.66	4.70	1.74	16.77	10.24	7.43	4.00	6.05	9.42
Data/NE	13/12/2016									
Data/NE	09/12/2016									
Data/NE	01/12/2016									
Data/NE	29/11/2016									
Data/NE	24/11/2016					10.12	7.37		5.54	9.28
Data/NE	11/11/2016									
Data/NE	17/10/2016									
Data/NE	06/10/2016	4.67	4.10	1.57	16.25	9.58	7.27	3.73	4.77	8.98
Data/NE	20/09/2016									
Data/NE	13/09/2016									
Data/NE	05/09/2016									
Data/NE	31/08/2016	4.86	3.89	2.36	16.16	9.20	7.26	3.43	4.64	8.73
Data/NE	22/08/2016									
Data/NE	08/08/2016							3.25		
Data/NE	01/08/2016									
Data/NE	29/07/2016	4.99	3.63	0.84	16.26	8.86	7.27	3.16	4.17	8.50
Data/NE	28/07/2016									
Data/NE	8/07/2016									
Data/NE	29/06/2016	4.89	2.80	1.77	16.75	8.88	7.25	2.80	3.97	7.81
Data/NE	27/05/2016	5.16	4.25							
Data/NE	20/05/2016	5.31								
Data/NE	12/05/2016									
Data/NE	06/05/2016	5.16	3.00	2.29	18.31	10.63	10.05	3.14	5.26	8.93
Data/NE	04/05/2016									
Data/NE	15/04/2016							4.17		
Data/NE	12/04/2016	5.23	4.21	2.35	18.20	10.78	8.33		6.18	9.84
Data/NE	18/03/2016							3.83		
Data/NE	16/03/2016	5.28	4.08	5.22	18.04	10.60	8.15		6.41	9.76
Data/NE	24/02/2016									
Data/NE	19/02/2016	5.36			17.97					
Data/NE	04/02/2016	5.22	4.25	1.68	17.87	10.41	7.52		6.19	9.75
Data/NE	18/11/2015									
Data/NE	16/11/2015									
Data/NE	13/11/2015									
Data/NE	04/11/2015							3.97		
Data/NE	30/10/2015	5.30	3.84	2.05	17.38	9.50				

P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21
6.30	12.51	5.25	2.70	2.46	6.37	9.08	19.60	18.31	1.74	6.44	2.23
6.10								17.50			
	12.15	5.01	2.05				19.22	17.62			
5.01				2.69	6.58	7.89				5.30	1.95
				2.48	6.46	7.67					1.93
4.77	12.00	4.89	1.75				19.24	17.05	1.06	5.04	
		4.81						17.10			
						7.22					1.74
4.00	11.95	4.78	1.43	2.28	5.80		19.40	17.10	0.85	4.63	
2.95	12.24		1.24	2.03	6.00	7.06	20.20	17.59	0.58	4.14	1.56
							22.60	17.69	0.48		
								17.76	0.62	4.19	
3.19	13.40		1.38	1.80	5.62			17.87	0.63	4.67	
						8.65					1.50
	13.67		1.85				21.32				
5.50				2.11	6.43	9.83		17.16	1.29	6.39	1.89
	13.40		1.53				21.51				
5.67				2.29	5.62	9.85		17.82	1.30	6.15	1.86
						9.90					
5.93						9.93		17.67	1.44	6.07	
6.87				2.25	7.05	9.96		19.48	1.35	5.93	1.99
	12.97			2.69	6.48	8.94					2.01
			2.21				20.78	17.88		5.57	

APÊNDICE C

POÇOS ONDE NÃO FOI POSSÍVEL CALCULAR A RECARGA

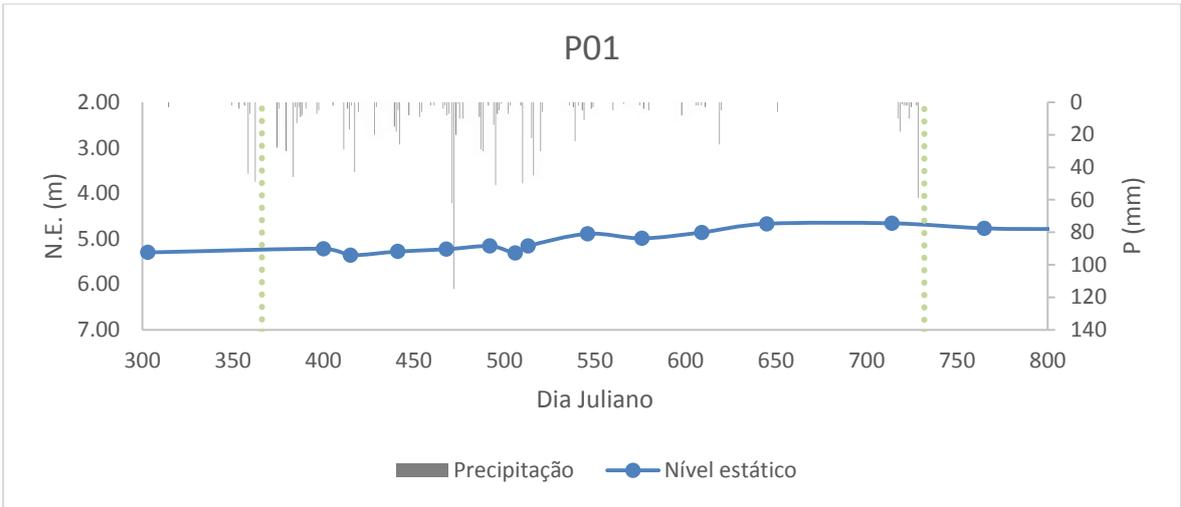


Figura 85 – Variação do nível freático do poço P01

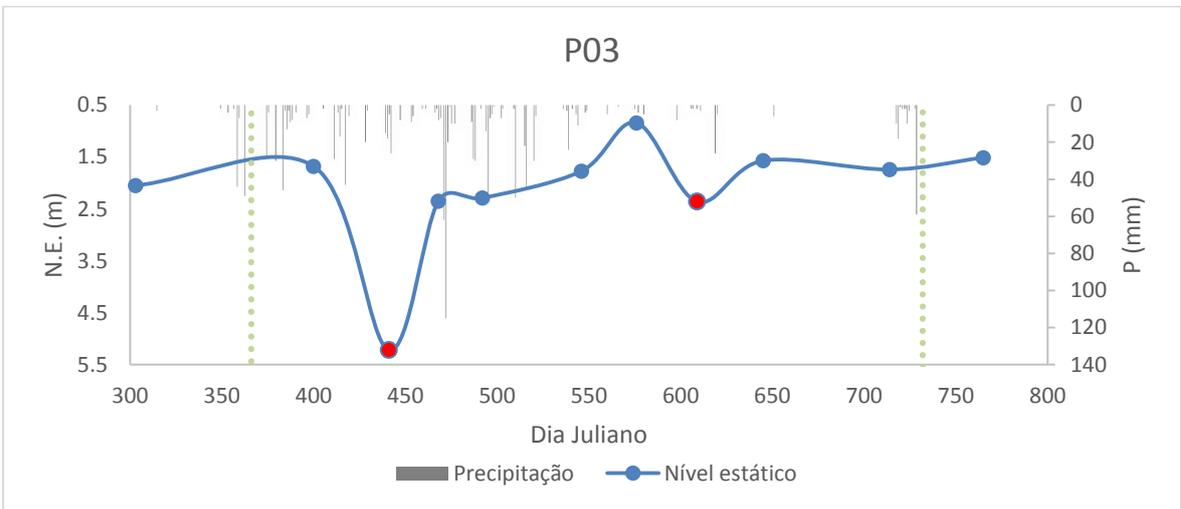


Figura 86 – Variação do nível freático do poço P03

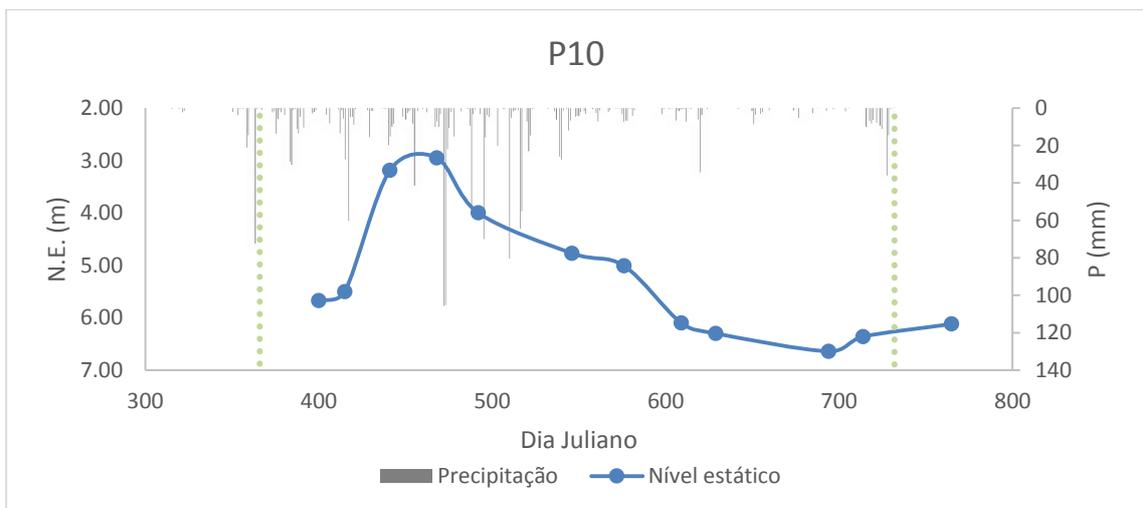


Figura 87 – Variação do nível freático do poço P10

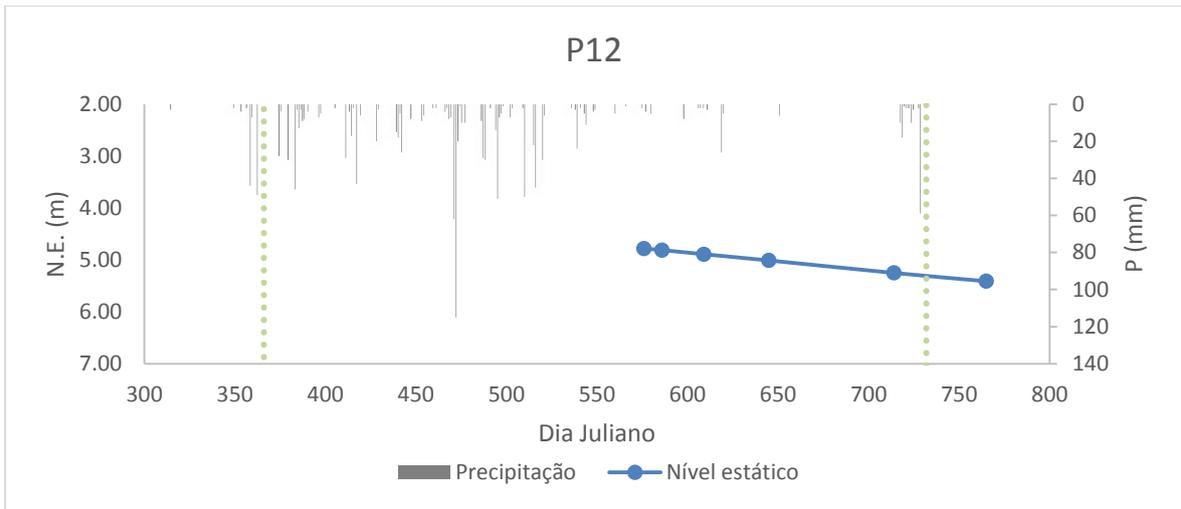


Figura 88 – Variação do nível freático do poço P12

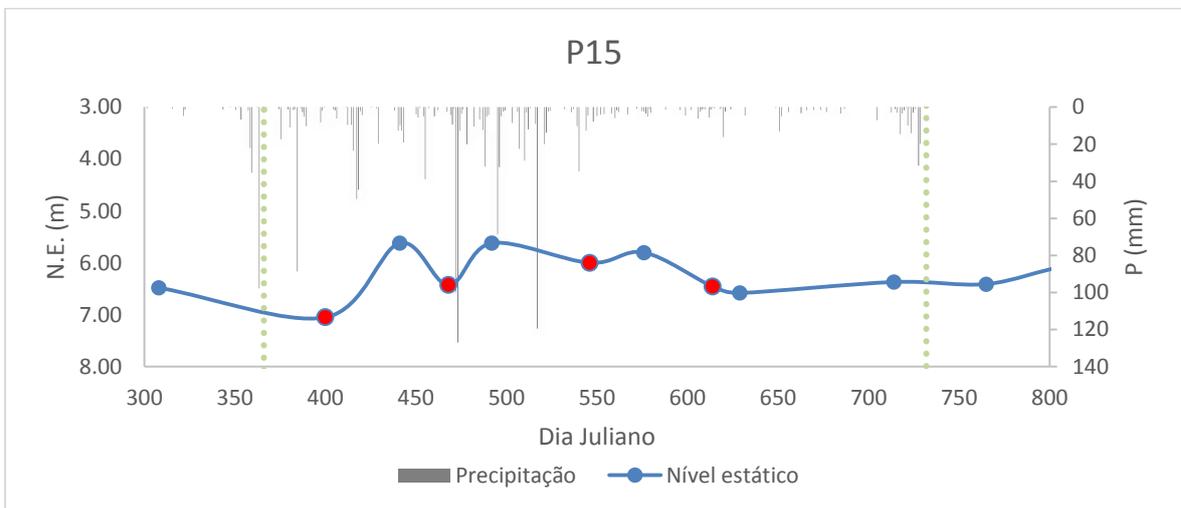


Figura 89 – Variação do nível freático do poço P15

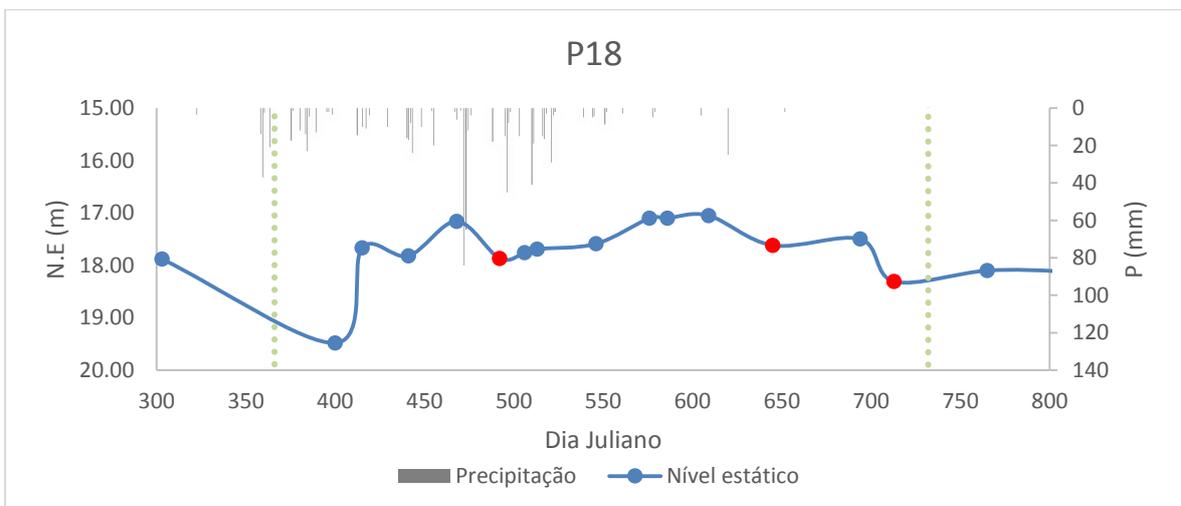


Figura 90 – Variação do nível freático do poço P18

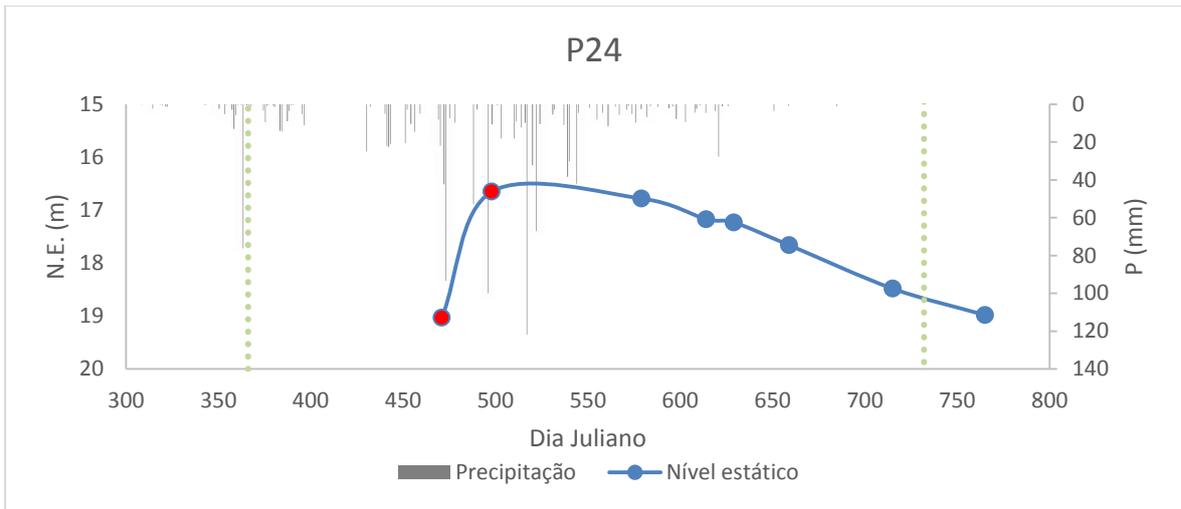


Figura 91 – Variação do nível freático do poço P24

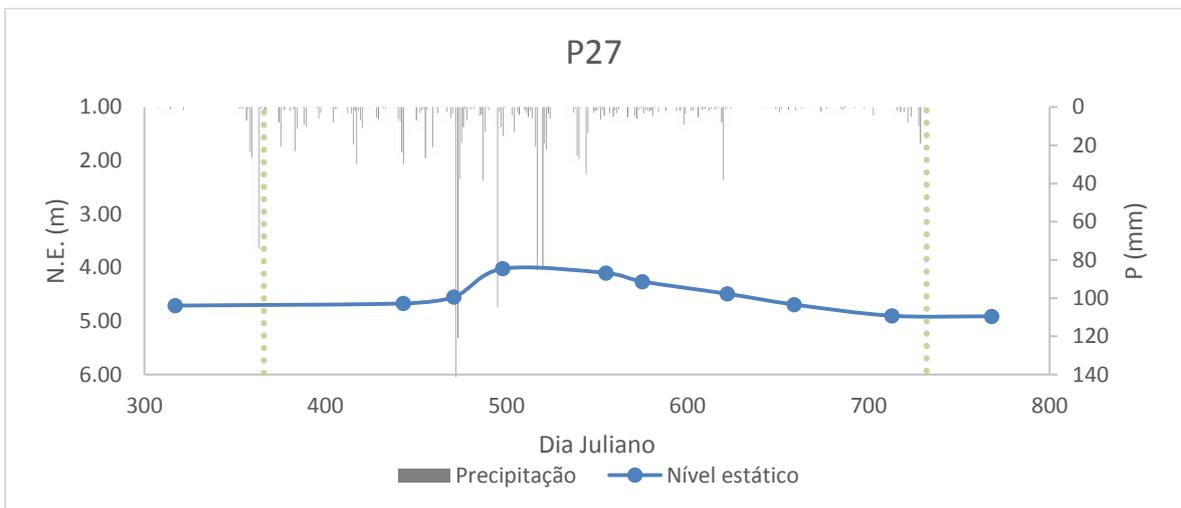


Figura 92 – Variação do nível freático do poço P27

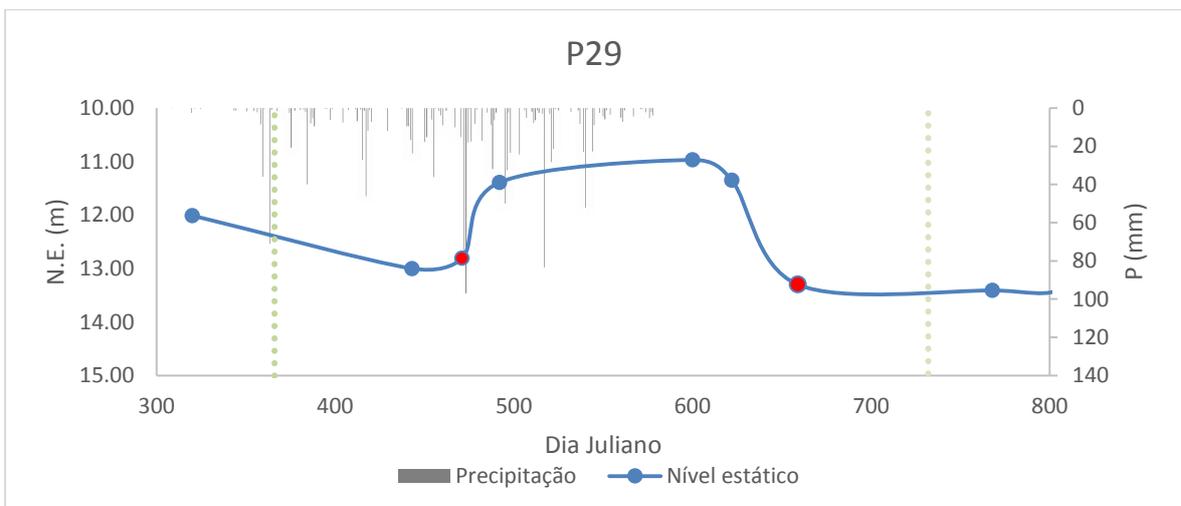


Figura 93 – Variação do nível freático do poço P29

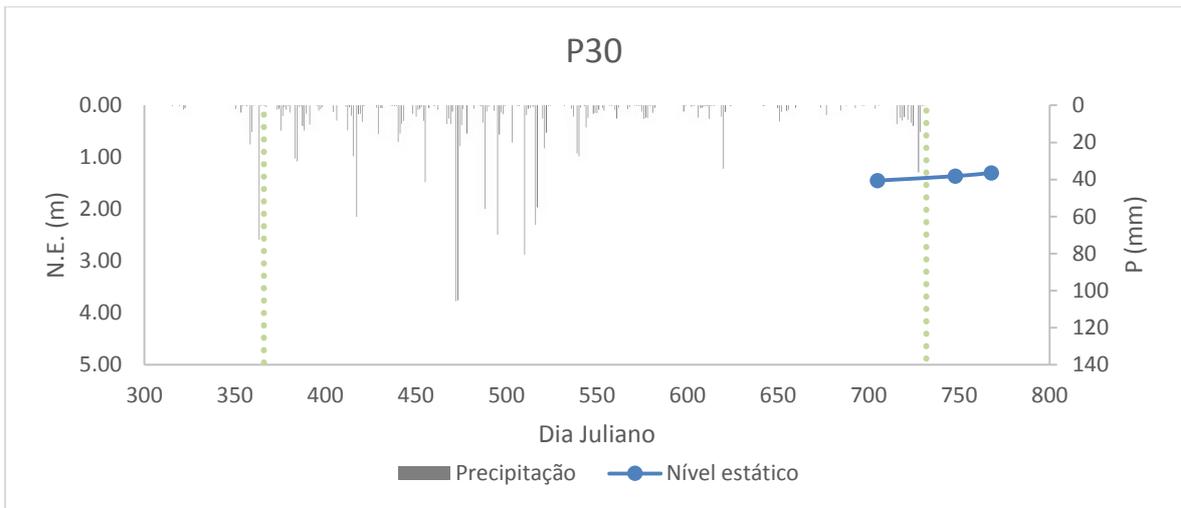


Figura 94 – Variação do nível freático do poço P30

APÊNDICE D
NOMES DE REFÊNCIA DOS POÇOS

ID	Long. X	Lat. Y	Bacia hidrográfica	Tipo	Nome de Referência
P01	-35,0664	-7,2257	Gramame	Cacimbão	Cleide
P02	-35,0954	-7,2459	Gramame	Cacimbão	P02 Victor
P03	-35,1099	-7,2264	Gramame	Cacimbão	Severina
P04	-35,1166	-7,2622	Gramame	Cacimbão	Campo Verde
P05	-35,1331	-7,3546	Gramame	Cacimbão	Balneário
P06	-35,1335	-7,3752	Gramame	Cacimbão	Lajedo
P07	-35,0867	-7,1488	B. Paraíba	Cacimbão	Linha do trem
P08	-35,0979	-7,3900	Gramame	Cacimbão	Bar de Carlinhos
P09	-35,0905	-7,3489	Gramame	Cacimbão	Cirene
P10	-35,0904	-7,3360	Gramame	Tubular	Zé Novo
P11	-35,1279	-7,1830	B. Paraíba	Cacimbão	Pastor
P12	-35,1289	-7,2002	B. Paraíba	Cacimbão	Cleubo
P13	-35,1721	-7,1842	B. Paraíba	Cacimbão	Acerola
P14	-35,0130	-7,2277	Gramame	Cacimbão	Porteira
P15	-35,0038	-7,2235	Gramame	Tubular	Escola
P16	-34,9845	-7,2445	Gramame	Cacimbão	Jiraia
P17	-35,1145	-7,2019	B. Paraíba	Cacimbão	Vaquejada
P18	-35,1322	-7,3958	Gramame	Cacimbão	EP11 – Escola de Pedras de Fogo
P19	-35,0219	-7,2976	Gramame	Tubular	EP04 – Poço de Geraldo
P20	-35,0446	-7,2816	Gramame	Cacimbão	Maria José
P21	-34,9579	-7,3332	Gramame	Cacimbão	Tampa que caiu
P22	-34,9587	-7,3242	Gramame	Cacimbão	Rosa
P23	-34,8805	-7,2079	Gramame	Tubular	Valentina
P24	-34,8332	-7,2412	Gramame	Tubular	Manoel Suica
P25	-34,9170	-7,2908	Gramame	Cacimbão	Utinga
P26	-34,8004	-7,1646	Gramame	Tubular	Penha
P27	-34,8463	-7,0626	B. Paraíba	Tubular	Dra. Nanci
P28	-34,8389	-7,0368	B. Paraíba	Tubular	Roma Garden
P29	-34,9056	-7,1609	B. Paraíba	Tubular	Ary Guinchos
P30	-35,0325	-7,3143	Gramame	Tubular	EP30
P31	-34,8451	-7,0641	B. Paraíba	Tubular	Igreja
P32	-34,8485	-7,0931	B. Paraíba	Tubular	Interpa
P33	-34,8559	-7,0630	B. Paraíba	Tubular	ICMBio
P34	-34,8279	-7,1343	B. Paraíba	Tubular	Escola do Altiplano
P35	-34,8401	-7,1339	B. Paraíba	Tubular	UFPB
P36	-34,8571	-7,1365	B. Paraíba	Tubular	Sudema
P37	-34,8042	-7,1857	B. Paraíba	Tubular	Centro de Convenções
P38	-34,8184	-7,1845	B. Paraíba	Tubular	R32
P39	-34,8369	-7,1889	B. Paraíba	Tubular	ETE