



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS- CTG
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS-PPGEOC

Ana Gabriella dos Santos Batista

ANÁLISE DA VARIAÇÃO POTENCIOMÉTRICA
E DA QUALIDADE DA ÁGUA DO AQUÍFERO
FREÁTICO NA ÁREA DA REFINARIA ABREU E LIMA

Recife
2017

Ana Gabriella dos Santos Batista

ANÁLISE DA VARIAÇÃO POTENCIOMÉTRICA
E DA QUALIDADE DA ÁGUA DO AQUÍFERO
FREÁTICO NA ÁREA DA REFINARIA ABREU E LIMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Pernambuco. Como preenchimento parcial dos preceitos para obtenção do grau de Mestre em Geociências.

Área de concentração: Hidrogeologia e Geologia Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. José Geilson Alves Demetrio

Recife
2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

B333a Batista, Ana Gabriella dos Santos.
Análise da variação potenciométrica e da qualidade da água do aquífero freático na área da Refinaria de Abreu e Lima / Ana Gabriella dos Santos. - 2017.
140 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Geilson Alves Demetrio.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2017.
Inclui Referências e Anexos.

1. Geociências. 2. Monitoramento. 3. Suape. 4. Refinaria Abreu e Lima. 5. Qualidade da água. I. Demetrio, José Geilson Alves (Orientador). II. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-298

ANA GABRIELLA DOS SANTOS BATISTA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO POTENCIOMÉTRICA
E DA QUALIDADE DA ÁGUA DO AQUÍFERO
FREÁTICO NA ÁREA DA REFINARIA ABREU E LIMA**

Banca Examinadora.

Aprovado:

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Prof. Dr. José Geilson Alves Demetrio

Prof. Dr. Marcelo Reis Rodrigues da Silva.

Data da aprovação: 14 / 07 / 2017

AGRADECIMENTOS

Este presente trabalho representa concretização de uma caminhada difícil, exigiu muita dedicação. No entanto, no meu caminho encontrei o apoio de muitas pessoas, que sem elas jamais teria conseguido, por isso não posso esquecer-me de agradecê-las de todo meu coração.

Agradeço primeiramente a Deus por ter fornecido forças em todo percurso de minha vida.

Aos meus pais Ivanildo Jose Batista e Maria do Socorro Santos Batista por ter me ensinado os verdadeiros valores da vida.

Ao meu irmão Carlos Eduardo dos Santos Batista por me apoiar.

Ao meu noivo José Acioli Bezerra de Menezes Filho que com sua alegria torna minha vida mais doce e feliz. Agradeço por todo o amor carinho, cuidado, respeito e amizade.

A minha tia que se mostrou ser um porto seguro nos momentos mais difíceis Adelina dos Santos.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Geilson Alves Demetrio meu agradecimento *ad eternum*, um exemplo de profissionalismo e humanidade. Palavras não serão suficientes para demonstrar toda minha gratidão, mas fica o reconhecimento de que foi e é um privilégio poder desfrutar, ao longo desses anos, de toda sua experiência e principalmente motivação na condução desse trabalho.

À banca examinadora pela contribuição para o aperfeiçoamento deste trabalho.

A minha amiga Lara Sousa, e aos amigos, Alexandre Sobreira, José Ferreira Neto, Felipe Tenório e Charles Henrique

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos

A Refinaria Abreu e Lima pelo apoio infraestrutura, disponibilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do departamento de Geologia, pelo ensinamento, pela paciência e disposição que foram fundamentais na minha formação.

RESUMO

O monitoramento da variação da superfície potenciométrica e da qualidade da água é uma atividade fundamental para a compreensão do comportamento hidrodinâmico de um aquífero. A Refinaria Abreu e Lima vem realizando o monitoramento do aquífero freático, nos domínios de suas instalações, desde maio de 2009. Infelizmente esse monitoramento não foi contínuo, mas o volume de informações obtido foi substancial, principalmente nos dois anos de monitoramento automático, com registro horário dos níveis de água. Foram realizadas dezesseis campanhas de coletas de amostras de água para análises físico-química e bacteriológica, sendo analisados cinquenta e dois parâmetros. Os dados de variação do nível da água, confrontados com os dados de precipitação, mostraram que o nível da água no aquífero está intimamente ligado ao regime das chuvas, com respostas bastante rápidas. O pico de chuva defasado em doze horas do pico de subida da água no poço. Além do mais, ficou claro que a curva de variação do nível da água no aquífero é semelhante a uma curva de variação da lâmina d'água em um rio. Uma característica marcante da qualidade da água foram os altos teores, de forma persistente, de turbidez, ferro, alumínio e manganês, e raramente, a presença de chumbo e cromo. A hipótese defendida, para explicar esses altos teores, é a natureza dos solos na área da refinaria, que são argilosos decorrentes da alteração de rochas vulcânicas máficas.

Palavras-chave: Monitoramento. Suape. Refinaria Abreu e Lima. Qualidade da água.

ABSTRACT

The monitoring of potentiometric surface variation and water quality is an essential activity for understanding the hydrodynamic behavior of an aquifer. The Abreu e Lima Refinery has been monitoring groundwater in the domains of their installations since May 2009. Unfortunately, this monitoring was not continuous, but the volume of information obtained was substantial, especially in the two years of automatic monitoring, with hourly record of the water level. Sixteen campaigns were performed to collect water samples for physical-chemical and bacteriological analyzes, and fifty-six samples were analyzed. The water level variation data, when compared to the precipitation data, shows that the water level is deeply linked to the rainfall regime, with very fast responses. The rain peak has a lapse of twelve hours from the water rising peak in the well. Moreover, it became clear that the curve of variation of the water level in the aquifer is similar to curve of variation of the water sheet in a river. Striking features of the water quality were the persistently high levels of turbidity, iron, aluminum and manganese, and rarely presence of lead and chromium. A hypothesis defended, to explain these high levels, is the nature of the soils in the refinery area, which are clayey due to alteration of mafic volcanic rocks.

Keywords: Monitoring. Suape. Abreu e Lima Refinery. Water quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01- Localização da RNEST.....	13
Figura 02 - Temperaturas médias para o posto Recife/Curado (Fonte: ANA, 2010)....	15
Figura 03- Sentido do vento na estação climatológica de Ipojuca, para o período de 1999-2007.....	16
Figura 04- Localização dos postos pluviométricos e os polígonos de Thiessen.	17
Figura 06- Espécie arbórea frutífera, cajueiro em primeiro plano (A) visão geral das espécies nativa na área da RNEST (B) Fonte: EIA, 2006.	19
Figura 07- Mapa geomorfológico da área da RNEST, Modificado do Eia 2006.....	20
Figura 08- Mapa pedológico da área da Refinaria Abreu e Lima (Modificado de Embrapa, 2006).	21
Figura 09- Ajuste distribuição Gamma à precipitação do posto Cabo/Suape-491.....	25
Figura 10- Ajuste do excedente hídrico a uma lei de distribuição de probabilidade log-normal.....	26
Figura 11- Localização da faixa costeira da Bacia Pernambuco (Modificado de Dantas, 1980; Barbosa, 2004).....	27
Figura 12- Os mapas (gravimétrico e magnetométrico respectivamente) na Bacia de Pernambuco (modificado de CPRM 2003).	30
Figura 13 - Modelo esquemático da evolução da Bacia de Pernambuco, ao sul da ZCPE, e da Bacia da Paraíba ao norte (Fonte: Barbosa & Lima Filho, 2005 e Lima Filho et al.,2005).	32
Figura 14- Carta Estratigráfica da Bacia Pernambuco Modificada de Maia (2012) e Barbosa <i>et al.</i> (2014).	35
Figura 15 – Mapa geológico da área da RNEST retirado do volume 2 do EIA (Eia, 2006,).....	36
Figura 16 - Mapa geológico da RNEST retirado da Carta Imagem-Geologia apresentado no EIA (fonte, EIA, 2006).....	36
Figura 17- Mapa Geológico em torno da RNEST retirado do Mapa Geológico da RMR, CPRM, 1999.	37
Figura 18- Vista panorâmica em torno de um dos poços de monitoramento.....	37
Figura 19 - Mapa com as posições das sondagens rotativas, SPT e trincheiras.....	38
Figura 20- Fotografias tiras nas trincheiras.....	39
Figura21- Slug utilizado nos testes dos poços da RNEST (poço PMRAL-04).....	42
Figura 22- Realização do <i>slug</i> teste.....	43
Figura 23- Geometria e parâmetros para poço parcialmente penetrante em um aquífero livre (adaptado de Bower-Rice, 1989).....	45
Figura 24- Parâmetros A, B e C, a partir de L_e/R_w , usados na equação para a determinação de $\ln(R_e/R_w)$	46
Figura 25 - Condutividade hidráulica determinada pelo método de Bouwer e Rice.....	47
Figura 26– Condutividade hidráulica determinada pelo método de Hvorslev.....	48
Figura 27 - Fluxograma para um programa de monitoramento (modificado de Foster e Gomes, 1989)	52
Figura 28 - Influência de fatores ambientais na determinação da frequência de coleta de dados de uma rede de monitoramento (modificado de Taylor e Alley,2001).	53
Figura 29 - Variação do nível estático para o poço PDW-23 (modificado de Taylor e Alley,2001).....	54
Figura 30 - Comparação entre as frequências diárias e mensais (A), bimensais (B) e trimestrais (C) do nível da água no poço PMRAL-05.....	55

Figura 31- Superfície potenciométrica gerada a partir de todos os poços com informação de NE, do estudo da Secretaria de Recursos Hídricos do RN.....	57
Figura 32- Malha padrão hexagonal para definir uma rede de monitoramento os poços marcados em azul são os selecionados.....	58
Figura 33- Comparação entre a potenciometria feita com os poços da rede de monitoramento (A) e com todos os poços disponíveis (B)	58
Figura 34 - Visão geral do canteiro de obras.....	67
Figura 35 - Colocação do pré-filtro.....	68
Figura36 –Fase de limpeza nos poços de monitoramento.....	68
Figura 37 - Desenvolvimento do poço pelo método <i>air-lift</i>	69
Figura 38 - Perfil Construtivo Original dos Poços de Monitoramento, do primeiro projeto de pesquisa. (A)- PMRAL-01 e PMRAL-02; (B)- PMRAL-02A	71
Figura 39- Indicativo de localização para a construção de poços de monitoramentos .	74
Figura 40 - Perfis do poço de monitoramento PMRAL-03.....	75
Figura 41 - Perfis do poço de monitoramento PMRAL-04.....	76
Figura 42 - Perfis do poço de monitoramento PMRAL-05.....	77
Figura 43- Perfis do poço de monitoramento PMRAL-06.....	78
Figura44 - Condições no local do PMRAL no dia 15/04/2010.....	81
Figura 45 - Variação dos níveis estáticos dos poços PMRAL-01, PMRAL-02, PMRAL-02A e da precipitação entre junho/09 e março/13.	82
Figura 46- Evolução do NEs nos poços PMRAL-03, PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06, no período de dezembro/14 e janeiro/16.	83
Figura 47 - Variação do nível da água nos poços PMRAL-03 a PMRAL-06, entre dezembro de 2014 e janeiro de 2017.	86
Figura 49- Comparação entre a variação do nível da água no poço PMRAL-06 e a variação do escoamento do rio Taquara no Paraná.	88
Figura 50- Variação do nível da água no poço PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06, frequência de observação horária, durante o mês de julho de 2015 e a precipitação diária do mesmo período.	89
Figura 52- Variação do nível da água no poço PMRAL-04 para o mês de julho de 2015.	92
Figura 53- Potenciometria simplificada na área da RNEST em 21/janeiro/2016.	94
Figura 55- Bomba utilizada para a coleta de água.	99
Figura 56- Variação da condutividade elétrica da água nos poços PMRAL-01, PMRAL-02 e PMRAL-02A, com dados das três primeiras campanhas e dados do projeto anterior.	102
Figura 57- Evolução da CE nos poços PMRAL-03, PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06.....	103
Figura 58- Evolução do Fe, Al, Mn e turbidez para os poços PMRAL-01, PMRAL-02 e PMRAL-02A.	106
Figura59- Evolução das concentrações de ferro, alumínio, manganês e da turbidez no PMRAL 03, PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06.	107
Figura 60- dendograma elaborado a partir dos coeficientes de correlação.	110
Figura 61- Localização dos poços de monitoramento da Citepe.....	111
Figura 62- Variação vertical dos teores de Pb e Cr no CPT02.....	112
Figura 63- Variação vertical dos teores de Pb e Cr no CPT04.....	112
Figura 64- Localização dos pontos de amostragem de solo.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Dados mensais de precipitação (mm) da estação Cabo-491	24
Tabela 02 - Probabilidade do excesso mensal de água na RNEST. Dados de chuva da ESTAÇÃO: 491 – Cabo/Suape	26
Tabela 03 - Dados das sondagens rotativas.	38
Tabela 04 - Valores de condutividade hidráulica (m/s) para o aquífero freático na área da RNEST.....	48
Tabela 05- Estatística básica para as duas potenciometrias.....	59
Tabela 06 - diferentes escalas de uma area a ser monitorada.	59
Tabela 07- Informações de monitoramento de vários países.....	63
Tabela 08- Coordenadas e cotas da boca dos poços de monitoramento.....	70
Tabela 09 - Coordenadas dos poços de monitoramento previstos.....	72
Tabela 10- Coordenadas e cotas da boca dos novos poços de monitoramento.	79
Tabela 11- Valores de nível estático (m) nas 16 campanhas de monitoramento.....	80
Tabela 12- Cargas hidráulicas do aquífero freático na área da RNEST.	93
Tabela 13- Data das coletas de água para análises físico-químicas e bacteriológicas...	96
Tabela 14- Determinação do tempo de purga.....	99
Tabela 15- Valores da CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$) nos poços PMRAL-01, PMRAL-02 e PMRAL-02A.	101
Tabela 16 - Valores da CE (ms/cm) nos poços PMRAL-03, PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06	102
Tabela 17- Análise por meio de símbolos das campanhas de monitoramento da qualidade da água na área da RNEST.	104
Tabela 18- Parâmetros, além do Fe, Mn, Al e turbidez, que superaram o VMP.....	108
Tabela 19- Matriz de correlação linear de Pearson.	109
Tabela 20- concentrações de Cr e Pb nos solos do Complexo Portuário de Suape.....	114
Tabela 21 - Valores orientadores Cetesb. Valores em mg/kg.	114

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	LOCALIZAÇÃO	13
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivos específicos	14
1.4	MATERIAIS E MÉTODOS	14
2	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E GEOMORFOLOGICA	15
2.1	CLIMATOLOGIA	15
2.1.1	Temperatura	15
2.1.2	Precipitação	16
2.2	VEGETAÇÃO	19
2.3	GEOMORFOLOGIA	19
2.4	SOLOS	20
2.5	BALANÇO HÍDRICO	22
3	CONTEXTO REGIONAL - BACIA PERNAMBUCO	27
3.1	ORIGEM E EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA BACIA DE PERNAMBUCO	28
3.2	ESTRATIGRAFIA	32
3.3	GEOLOGIA LOCAL	35
4	HIDROGEOLOGIA	40
4.1	HIDROGEOLOGIA REGIONAL	40
4.2	HIDROGEOLOGIA LOCAL	41
4.2.1-	Slug Teste	42
5	ASPECTOS GERAIS SOBRE MONITORAMENTO	49
5.1	MONITORAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	50
5.1.2-	Implantação de Rede de Monitoramento	52
5.1.2.1	<i>Redes para acompanhamento da variação do NE</i>	52
5.1.2.2	<i>Frequência</i>	53
5.1.2.3	<i>Espaçamento</i>	56
5.1.3	Redes de monitoramento da qualidade da água	60
5.2	MONITORAMENTO NO MUNDO	62
6	POÇOS DE MONITORAMENTO NA RNEST	65
6.1	NOVOS POÇOS DE MONITORAMENTO	71
7	MONITORAMENTO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NA RNEST	79
7.1.	MONITORAMENTO MANUAL	79
7.2	MONITORAMENTO AUTOMÁTICO	84
7.2	POTENCIOMETRIA NA ÁREA DA RNEST	92

8	QUALIDADE DA ÁGUA	95
8.1	COLETAS DAS AMOSTRAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	97
8.2	VARIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	100
9	CONCLUSÕES.....	116
	REFERENCIAS.....	120
	ANEXOS.....	126

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento da variação dos níveis da água e da sua qualidade é tarefa de fundamental importância para a compreensão do comportamento hidráulico e hidroquímico de um aquífero.

Todo estudo hidrogeológico que se realiza, normalmente, é baseado em dados de curta duração, por exemplo, teste de aquífero de vinte quatro horas de bombeamento. A rigor, os resultados só seriam válidos para esses tempos, mas a exploração da água é planejada para um alcance de 20 anos, ou mais. Assim, na realidade o que o estudo apontaria os rumos iniciais da exploração. Para refinar os resultados são indispensáveis anos de monitoramento, no caso, nível da água, qualidade da água, volumes bombeados, e nos casos de aquíferos livres, precipitações, formando uma série histórica de dados. Só com esse conjunto de informações é possível corrigir as recomendações iniciais de exploração, bem como, realizar caracterizações hidrogeológicas mais próximas da realidade, principalmente nas ampliações de sistemas de bombeamento de água subterrânea.

A Refinaria Abreu e Lima – RNEST, em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, durante sete anos, desenvolveram dois Programas Básicos Ambientais – PBA, nos quais foram realizadas dezesseis campanhas de monitoramento, utilizando sete poços de observação, nos quais foram medidos os níveis estáticos, feitas coletas de amostras de água para análises físico-químicas, medidas de parâmetros da água em campo e instalação de sensores para o acompanhamento automático da variação do nível da água.

1.1 JUSTIFICATIVA

O aquífero freático na área da RNEST, apesar de não ser utilizado para fins de abastecimento, o conhecimento do seu comportamento hidrogeológico e hidroquímico é importante pelo risco potencial que a indústria petrolífera representa, mesmo sendo observadas todas as recomendações internacionais de segurança e preservação ambiental.

Os dados levantados nos dois PBAs, entre eles os de monitoramento, permitem caracterizar o comportamento hidrogeológico e hidroquímico do aquíferofreático na área da RNEST, que é de fundamental importância para se prever os

impactos, no caso de vazamentos acidentais, de produtos tóxicos que cheguem a atingir a zona saturada.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A área da RNEST, compreendendo uma área de 630 há, está situada, no Complexo Industrial de Suape, município de Ipojuca-PE, localizada as margens do tronco rodoviário TDR sul, tem como principais vias de acesso a BR 101 e a PE-60. A Figura 01 mostra o mapa de localização da área de estudo.

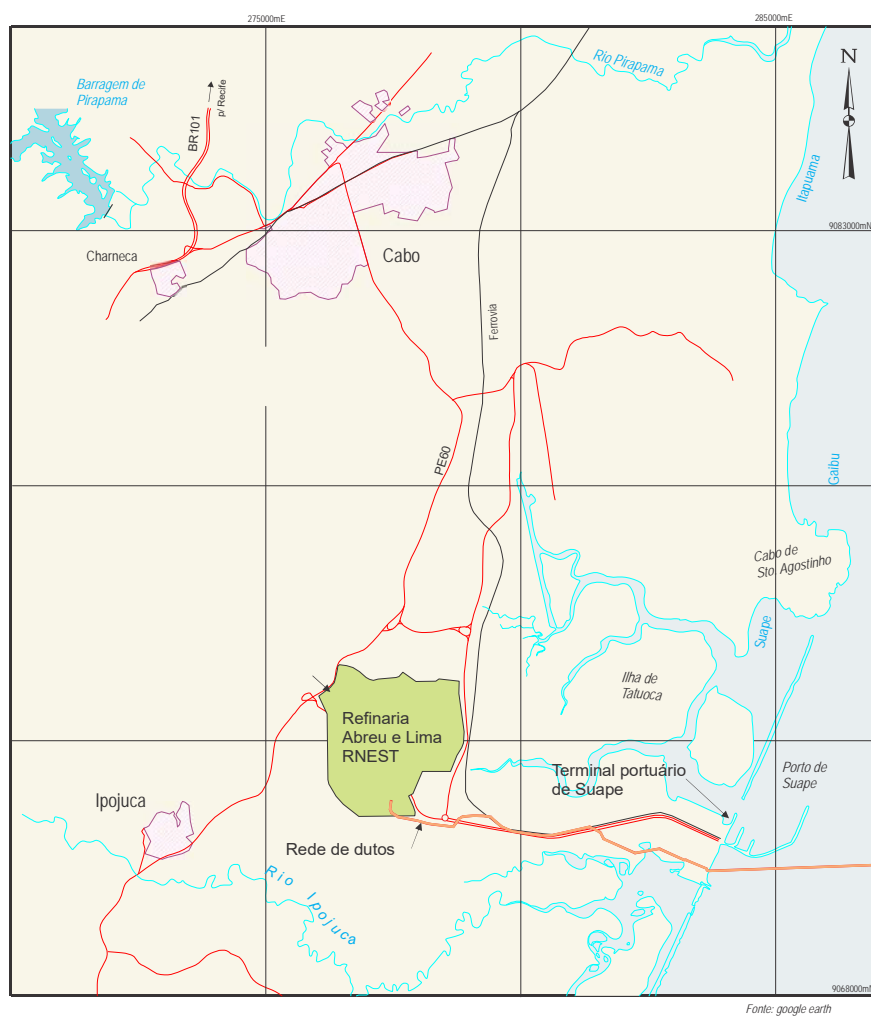


Figura 01- Localização da RNEST.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é conhecer a variação sazonal da superfície freática e a qualidade da água do aquífero freático na área da RNEST.

1.3.1 Objetivos específicos

Determinar valores da condutividade hidráulica do aquífero por meio de “slug” teste.

Verificar a variação do nível estático do aquífero freático na área da RNEST. O acompanhamento da superfície freática foi feito de duas formas: medidas manuais, utilizando medidor de nível elétrico, e por meio de sensores de pressão para registro automático

Discutir a qualidade da água do aquífero freático na área da RNEST e as suas variações durante o período de monitoramento.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para elaboração desse trabalho compreendeu as seguintes etapas:

Levantamento bibliográfico: Compreendeu a compilação de dados existentes sobre a área de estudo. Foi feita uma revisão bibliográfica, coletando dados a partir de artigos científicos, teses e dissertações e relatórios técnicos.

Trabalhos de campo:

- Locação e construção dos poços de monitoramento.
- Medidas de nível estático, condutividade elétrica d'água, pH, entre outras através do medidor de nível, condutímetro portátil e o pHmetro, respectivamente.
- Coleta de amostras de água para análises físico-químicas e bacteriológicas. Para tanto, foi utilizada uma bomba submersa própria para poços de pequeno diâmetro (2”), fabricada pela Hidrosuprimentos, modelo HSPurge II, 12V, com controlador de corrente que permite regular a vazão de bombeamento.
- Instalação de sensores automáticos para registro do nível da água, mini diver, fabricados pela *Schlumberger*.
- Realização de *Slug* teste para determinação da condutividade hidráulica do aquífero freático.
- Coleta das informações dos sensores instalados nos poços.

Análise dos resultados físico-químicos da água e da variação dos níveis da água.

Elaboração de mapa potenciométrico.

2 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E GEOMORFOLOGICA

2.1 CLIMATOLOGIA

A área de estudo está no município de Ipojuca, que por sua vez está inserido na mesorregião metropolitana de Recife, mais precisamente na Microrregião de Suape. O clima dominante, segundo a classificação de Köppen do tipo As', ou seja, clima tropical chuvoso com estação seca bem definida.

2.1.1 Temperatura

O posto meteorológico com dados de temperatura mais próximos da área de estudo está localizada no município Recife-PE, estação Recife/Curado, distante cerca de 35km. Operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia-INMET. As temperaturas médias mensais, para o período de 1961 a 2016, oscilam entre 22°C e 29°C, sendo os meses mais quentes entre setembro a dezembro e os mais frios entre abril e agosto, figura 02.

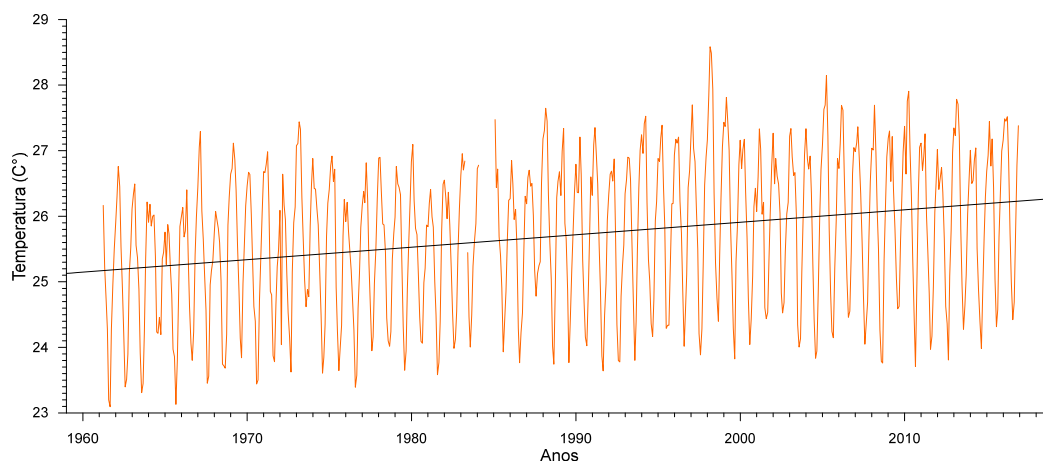


Figura 02 - Temperaturas médias para o posto Recife/Curado.

A partir dos dados de temperatura foi feito um ajuste linear, figura 02, a qual mostra nitidamente uma tendência de aumento da temperatura ao longo do período observado. Em 56 anos de observação, houve um aumento médio de cerca de 1°C.

2.1.2 Vento

“Os ventos desempenham importante papel na taxa de evaporação, sobretudo nas regiões de clima semiárido. Conforme assinalam Cunha & Millo (1984) a ação dos ventos modifica a temperatura do ar e provoca reações nas plantas. O vento, ademais, movimenta as nuvens, responsáveis pelas precipitações pluviométricas, transportando o vapor d’água para o continente, onde se condensa e precipita” (ANA, 2010).

A distribuição dos ventos na estação de Ipojuca (Porto de Galinhas), para o período de 1999-2007 é apresentada na figura 03. Os ventos mais intensos e frequentes são de SE, com velocidade máxima registrada, a 10,0 metros de altura, de 48,1 m/s, o que corresponde a 173,2 km/h.

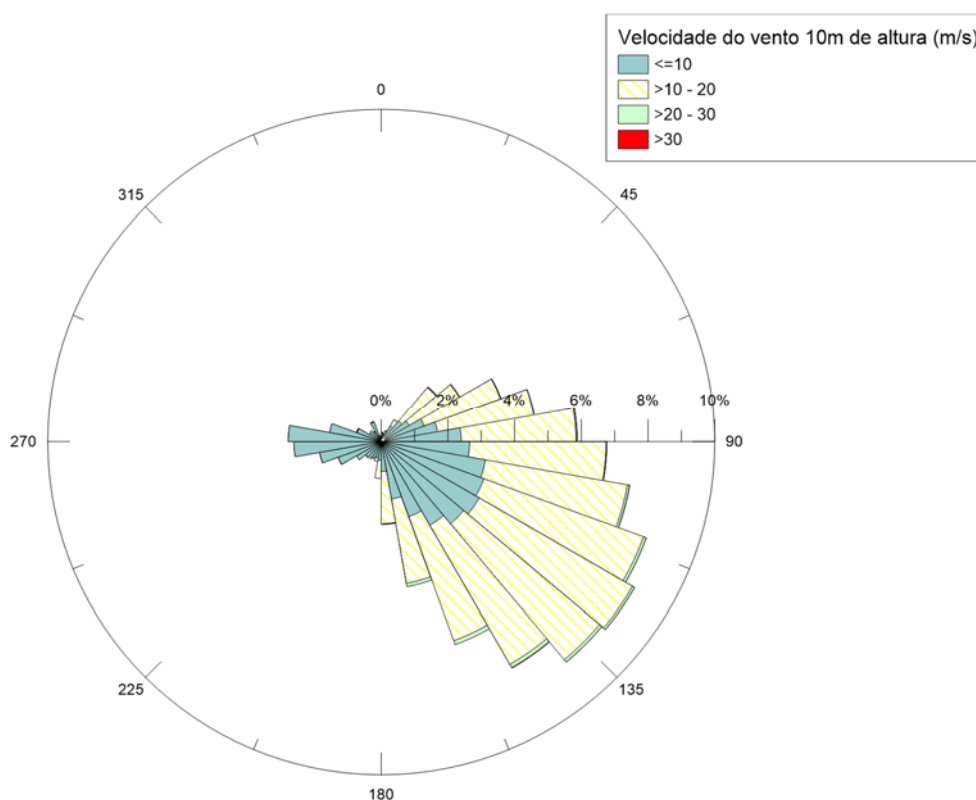


Figura 03-Sentido do vento na estação climatológica de Ipojuca, para o período de 1999-2007.

2.1.2 Precipitação

A precipitação é, sem dúvida, o parâmetro climatológico mais importante para a água subterrânea, pois é a infiltração dos excedentes hídricos que recarrega os aquíferos. Os postos pluviométricos mais próximos da área de trabalho ficam nos municípios do

Cabo de Santo Agostinho e de Ipojuca, com sete e quatro estações pluviométricas respectivamente, operadas pela Agencia Pernambucana de Águas e Climas - APAC.

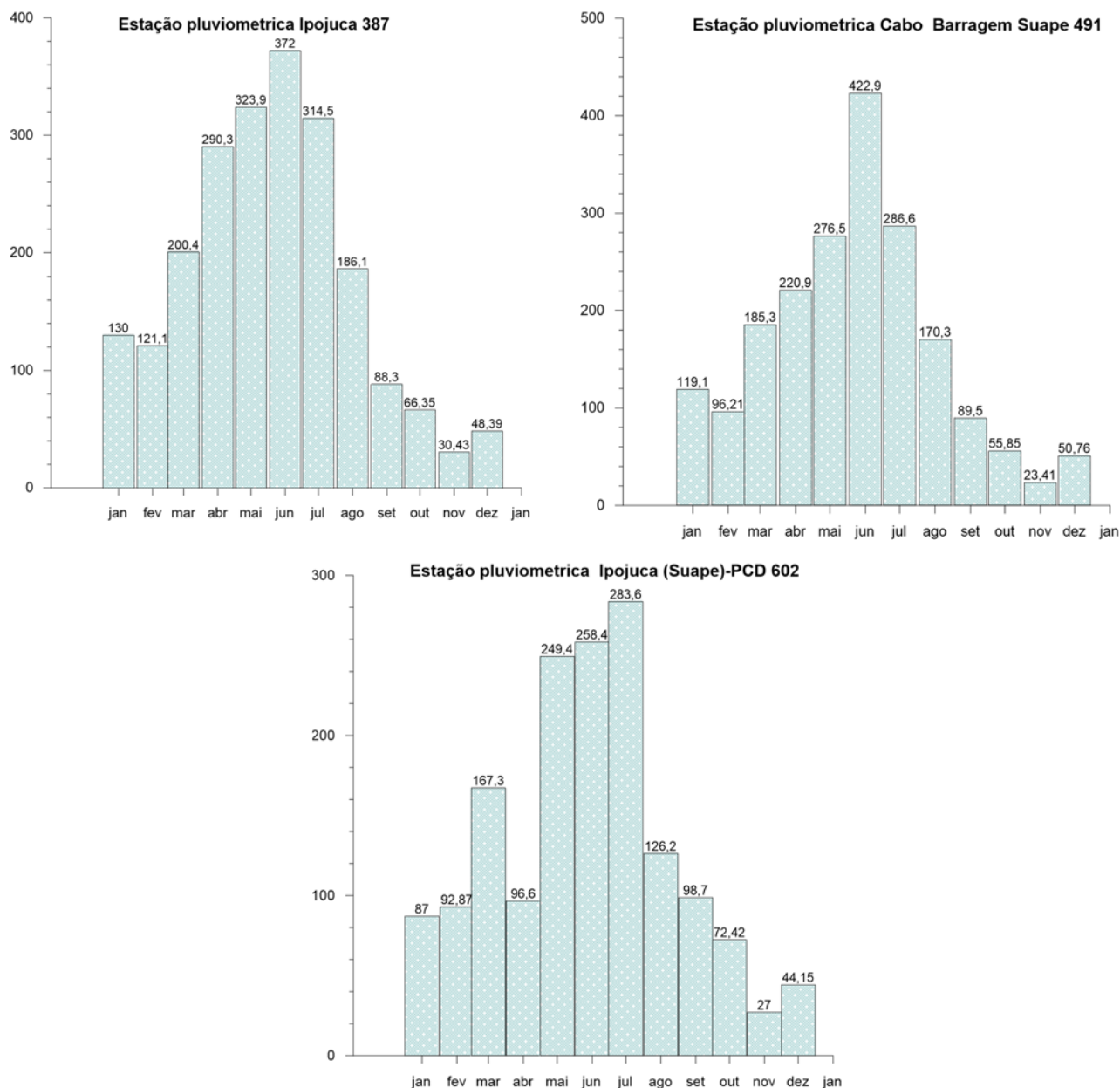
No entanto, apenas as estações Ipojuca 312, Ipojuca 387, Ipojuca 602 e Cabo Barragem Suape 491 são as mais próximas da área da RNEST. Porém, de acordo com os polígonosde Thiessen, a estação 491 é a única com influência na área da RNEST, figura 04



Figura 04- Localização dos postos pluviométricos e os polígonos de Thiessen.

Analisando os dados pluviométricos percebe-se a limitação dos mesmos, por exemplo, a estação Ipojuca 312 tem dados apenas para três anos, a estação Ipojuca 602 quatro anos e a estação 387 e 491, as mais completas, com registro de 17 anos.

Toda região de Ipojuca é caracterizada por índices pluviométricos anuais altos, com médias em torno de 2000 mm.



Na figura 05 observa-se que os valores mais altos das chuvas estão concentrados entre os meses de março a agosto. O período seco ocorre entre os meses de setembro a dezembro.

2.2 VEGETAÇÃO

Antes da instalação da RNEST, cerca de 55% da área era utilizada para o plantio de cana-de-açúcar. O restante da área era coberto com vegetação arbórea, arbustiva, sendo maior parte, 36,4%, de espécies pioneiras, além de muitas frutíferas (EIA,2006)

A vegetação arbórea arbustiva apresentava sobreposição das copas, com formação aparentemente fechada, espécies variando de 10 a 15 m de altura. As espécies mais comuns são: *Tapiria guianensis* (pau-pombo), *Schefflera morototoni* (sambaquim), *Protium heptaphyllum* (amescla de resina), *Cecropia sp.* (embaúba), *Parkia pendula* (visgueiro), entre outras. Já entre as espécies frutíferas pode-se destacar: *Mangifera indica* (manga), *Cocos nucífera* (coco), *Anacardium occidentale* (caju) *Inga bahiensis* (ingá) e *Talisia esculenta* (pitomba). (Figura 06).

Ainda se encontra floresta com vegetação em fase secundária inicial de regeneração, que foi plantada pela Empresa Suape, é onde se encontra um maior número de espécies nativas com muitas frutíferas. Apresenta ervas e subarbustos, representados pelas espécies *Chamaesyce hyssopifolia*, *Ricinus communis* (mamona), *Chamaecrista flexuosa*, *Miconia albicans* (manipueira) *Henriettea succosa*, *Piper marginatum*, *Polygala paniculata*, *Philodendron imbe* (cipó- imbé), *Anthurium affine* (pena de urubu), *Heliotropium indicum* (fedegoso).



Figura 06- Espécie arbórea frutífera, cajueiro em primeiro plano (A) visão geral das espécies nativa na área da RNEST (B) Fonte: EIA, 2006.

2.3 GEOMORFOLOGIA

A geomorfologia é controlada por diversos fatores, como o clima, geologia e o arcabouço estrutural da área. Amaral (1998) identificou oito unidades de relevo no município de Ipojuca, sendo classificadas como: Planícies Fluviais ou Flúvio-lacustres,

Planícies Flúvio-marinhas, Planícies Costeiras, Domínio de Colinas Amplas e Suaves, Domínio de Colinas Dissecadas e de Morros baixos, Domínio de Morros e de Serras baixas.

Na área da RNEST ocorrem apenas as unidades: Domínio de Colinas Suaves e Rampas de colúvio (Figura 07)

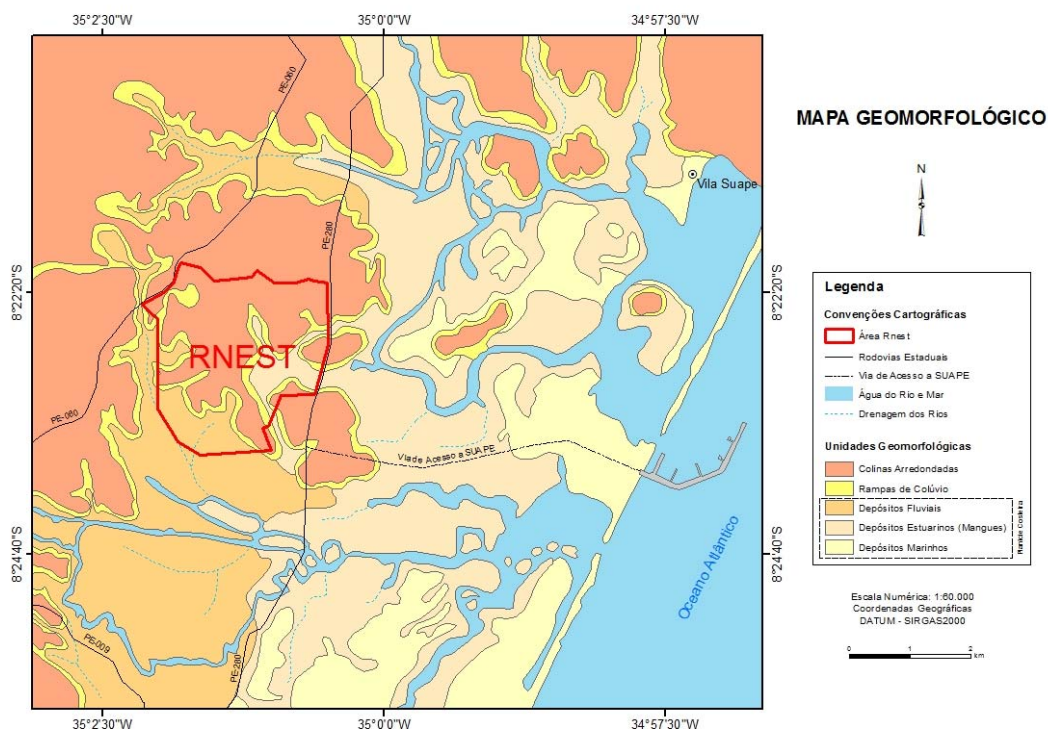


Figura 07- Mapa geomorfológico da área da RNEST, Modificado do Eia 2006.

As unidades Domínio de colinas dissecadas e de morros baixos, domínio de morros e de serras baixas ocorrem na porção central e oeste. Essas representam alterações sofridas pelas rochas pré-cambrianas do embasamento, onde existe um predomínio de fundos de vales em V, linhas de cumeadas, cumes de morros, colinas arredondada e encostas convexas, resultando em ravinamentos, deslizamentos e voçorocamentos (Amaral, 1998).

A unidade Domínio de Colinas Suaves também pode ser observada nos sedimentos da formação Cabo, onde há o predomínio de fundos de vales em “U”, cumes arredondados e angulares, morros e colinas que antecedem a Chapada da Borborema.

2.4 SOLOS

De acordo com a EMBRAPA (2006) o município de Ipojuca abrange um espectro de 20 classes de solos que são: Solos Aluviais (A), Areias Quartzosas (AQ),

Areias Quartzosas Marinhas (AQM) Cambissolos (C) Gleissolos (G) Latossolos Amarelos (LA) Latossolos Vermelho-Amarelos (LV) Brunos Não Cálcicos (NC) Podzóis (P) Podzólicos Amarelos (PA) Podzólicos Vermelho-Escuros (PE) Planossolos (P) Planossolos e Solonetz Solodizados (PL/SS) Podzóis Hidromórficos (PH) Podzólicos Vermelho-Amarelos (PV) Solos Litólicos (R) Regossolos (RE) Solos de Manguê (SM) Terras Roxas Estruturadas (TR) Vertissolos (V). Na área da RNEST predominam os solos do tipo Gleissolos, Podzólicos e Solos de Manguê (Figura 08)

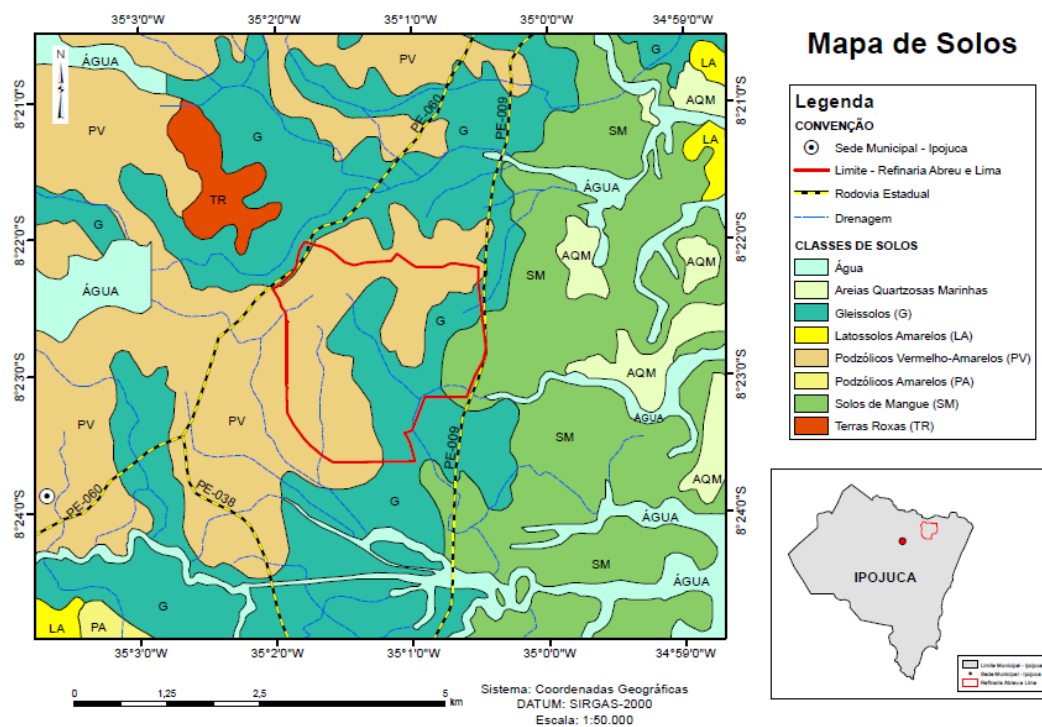


Figura 08- Mapa pedológico da área da Refinaria Abreu e Lima (Modificado de Embrapa, 2006).

1. Gleissolos:- São solos minerais, hidromórficos, desenvolvidos de sedimentos recentes não consolidados, de composição argilosa, argilo-arenosa e arenosa do período do Holoceno. Podem ocorrer com algum acúmulo de matéria orgânica, porém apresentam horizonte glei dentro de 150 cm da superfície do solo, imediatamente abaixo de horizontes A ou E. Essa hidromorfia é expressa por forte gleização, resultante de processos de intensa redução de compostos de ferro, em presença de matéria orgânica, com ou sem alternância de oxidação, por efeito de flutuação de nível do lençol freático, em condições de regime de excesso de umidade permanente ou periódico. Ocupam ambientes de várzeas úmidas, em relevo plano sob vegetação de campos hidrófilos que são

sujeitos a períodos longos de alagamento e, com menos frequência, a floresta perenifólia de várzea (Embrapa 2006).

2. Podzolicos: São solos minerais, não hidromórfico, com horizonte A ou E (horizonte de perda de argila, ferro ou matéria orgânica, de coloração clara) seguido de horizonte B textural, com nítida diferença entre os horizontes. Apresenta horizonte B de cor avermelhada até amarelada e teores de óxidos de ferro inferiores a 15%. Podem ser eutróficos, distróficos ou álicos. (Embrapa 2006)
3. Solos de mangue: São solos halomórficos muito pouco desenvolvidos, lamacentos, escuros e com alto teor de sais provenientes da água do mar, formados a partir de sedimento flúvio - marinho recente misturados com detritos orgânicos de natureza e granulometria variada, referido ao período do Holoceno. Geralmente estes solos não apresentam diferenciação de horizontes ao longo do perfil, exceto em área marginais, onde verifica-se o desenvolvimento de um horizonte superficial com textura variável, desde argilosa até arenosa. Os solos de mangue ocorrem nas várzeas de baixada litorânea, como parte dos estuários de rios, próximo às lagoas e pequenas depressões de faixa litorâneas, sob vegetação de mangues com influência das marés (Embrapa 2006).

2.5 BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico é uma contabilidade das entradas e saídas de água de um sistema (bacia hidráulica), que pode ser expresso, para um determinado período de tempo, pela seguinte expressão:

$$P - ETR - RS = R + I$$

Sendo:

P = Precipitação (mm)

R = Escoamento superficial (mm)

ETR = Evapotranspiração real (mm)

I = Infiltração (mm)

RS = Reserva do solo (mm)

Ou seja, a precipitação menos a água da reserva do solo, menos a evapotranspiração real é o que sobra para escoar e infiltrar. A parcela $R + I$ é chamada de excedente hídrico (EXC). Dessa forma a equação do balanço hídrico pode ser reescrita como:

$$P - ETR - RS = EXC$$

Das variáveis listadas a ETR é a mais difícil de ser medida, assim, existem vários métodos para fazer sua estimativa. Para o balanço hídrico mensal o método de Thornthwaite é um procedimento bastante comum para a estimativa da ETR.

O Método de Thornthwaite foi desenvolvido com base em dados de evapotranspiração medidos e dados de temperatura média mensal, para dias com 12 horas de brilho solar e mês com 30 dias. A evapotranspiração potencial é calculada pela seguinte expressão:

$$ETP = F_c \cdot 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T}{I}\right)^a$$

Sendo:

ETP = Evapotranspiração potencial (mm/mês)

F_c = Fator de correção em função da latitude e mês do ano.

$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 0,01791 \times I + 0,492$ (mm/mês)

I = índice anual de calor, correspondente a soma de doze índices mensais.

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1,514}$$

T = Temperatura média mensal (°C)

Dessa forma:

Se $P \geq ETP$, logo $ETR = ETP$

Se $P < ETP$, logo $ETR = P - ETP - RS_a$; $ETR = P$ e $EXC = 0$

Se $P - ETP + RS \leq 0$, logo $RS = 0$; $ETR = P$ e $EXC = 0$

Admitindo que RS igual a 100 mm se tem as seguintes condições:

Se $P - ETP + RS_a \geq 100$ resulta que $RS = 100$ mm,

$ETR = ETP$ e $EXC = P - ETP$

Se $P - ETP + RS_a > 0$ resulta que $RS =$

Sendo:

RS_a = O saldo da reserva do solo do mês anterior.

Como visto, apenas o posto Cabo-491 exerce influência na área da RNEST. Porém, só existe uma série de dados de janeiro de 2000 até a data atual, o que totaliza um pouco mais de 17 anos de observação, que é relativamente pouco para uma caracterização hidrológica consistente. Apesar da quantidade de anos de observação ser pequena, julga-se que os mesmos sejam mais adequados do que utilizar dados, por exemplo, de estações situadas em Recife, com séries históricas de precipitação mais completas.

A unidade do balanço hídrico é a bacia hidrográfica, porém como a RNEST situa-se em uma área elevada, de onde partem pequenas drenagens radialmente, ou seja, a RNEST faz parte e várias pequenas bacias, sendo assim, o alvo foi à área da própria refinaria, em detrimento das áreas das bacias, uma vez que, o objeto do balanço seria a determinação do excedente hídrico, e se possível a infiltração. Na tabela 01 são apresentados os dados da Estação Cabo-491 até dezembro de 2016.

Tabela 01- Dados mensais de precipitação (mm) da estação Cabo-491

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2000	147,2	9,3	168,6	261,7	256,8	660,2	442,2	276,8	276,2	41,2	13,2	112,2
2001	50,3	10,5	170,5	260,1	44,1	514,5	218,5	188,7	36,6	74,3	7,4	25,4
2002	211,5	118,9	252,8	71,9	251,2	615,4	279,4	92,6	31,0	17,0	59,0	6,3
2003	57,3	176,0	284,1	-	-	-	-	131,0	171,3	-	12,8	83,0
2004	311,0	202,4	243,7	278,8	323,8	469,8	433,8	228,1	148,9	19,4	14,2	15,0
2005	1,2	52,2	121,8	168,1	422,4	677,1	146,7	293,9	15,0	48,4	9,2	218,2
2006	33,8	41,8	70,0	172,2	378,6	362,9	191,1	113,0	67,7	8,6	42,8	70,6
2007	143,1	165,0	188,6	313,0	206,8	447,5	258,3	211,7	121,8	28,8	16,0	48,7
2008	62,4	22,4	455,8	174,8	451,8	270,5	258,9	295,7	56,7	88,2	10,8	31,2
2009	167,2	174,6	175,6	359,9	295,1	385,3	266,9	146,2	64,6	16,8	22,5	25,0
2010	120,5	50,1	78,0	265,7	126,2	642,7	173,4	133,3	57,2	77,2	13,5	10,2
2011	175,0	164,5	61,4	442,4	600,8	220,0	499,6	113,0	54,8	32,4	80,4	7,0
2012	183,8	91,4	48,6	49,9	134,6	317,6	283,4	98,2	10,0	52,8	7,8	37,8
2013	54,6	9,6	133,8	196,7	205,9	326,3	402,0	209,0	153,6	118,6	53,0	49,0
2014	101,8	225,8	141,9	278,8	278,8	322,7	131,7	189,0	177,6	217,4	22,9	49,3
2015	68,0	73,4	302,8	20,9	154,7	420,4	485,4	133,5	42,6	29,7	6,7	72,9
2016	135,7	47,7	252,6	219,8	291,7	114,3	114,6	42,0	35,9	22,8	5,7	15,9
min	1,2	9,3	48,6	20,9	44,1	114,3	114,6	42,0	10,0	8,6	5,7	6,3
Max	311,0	225,8	455,8	442,4	600,8	677,1	499,6	295,7	276,2	217,4	80,4	218,2
Media	119,1	96,2	185,3	220,9	276,5	423,0	286,6	170,3	89,5	55,9	23,4	51,6
desPad	77,7	74,3	105,3	112,0	139,7	165,9	128,0	74,5	73,1	52,8	21,9	52,2

Na tabela 01 também são apresentados os mínimos, máximos, média e desvios padrões a cada mês. Pelos valores médios, o período chuvoso inicia-se no mês de março e vai até agosto, ou seja, o ano hidrológico se inicia em março.

O histograma das precipitações mensais mostra uma forte assimetria dos dados para esquerda, ou seja, uma concentração nas baixas precipitações, ajustando-se muito bem a uma distribuição de probabilidade Gamma, como se pode ver na figura 09 a seguir:

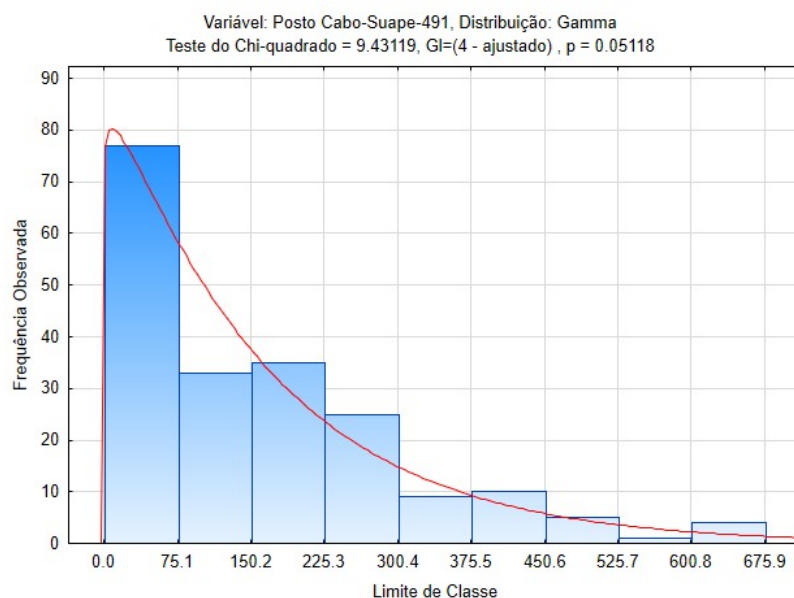


Figura 09- Ajuste distribuição Gamma à precipitação do posto Cabo/Suape-491.

Para esse ajuste o parâmetro de forma (α) foi 1,05, enquanto do fator de escala (β) foi 156,33.

Na equação de Thornthwaite prevê também o uso das temperaturas mensais, neste caso, como dito, o posto mais próximo com dados disponível é a Estação Recife/Curado. Sendo utilizado o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2016, para coincidir com período dos dados de precipitação.

Usando a planilha Excel, desenvolvida por Rolim *et al*,1998, os dados de temperatura do posto Recife/Curado, as precipitações da tabela 01 e admitindo-se a reserva do solo em 100 mm, chega-se aos valores do excedente hídrico mensal, calculados pelo método de Thornthwaite.

Os dados de excedente hídrico ajustam-se muito bem a uma distribuição de frequência log-normal, como mostrada na figura 10.

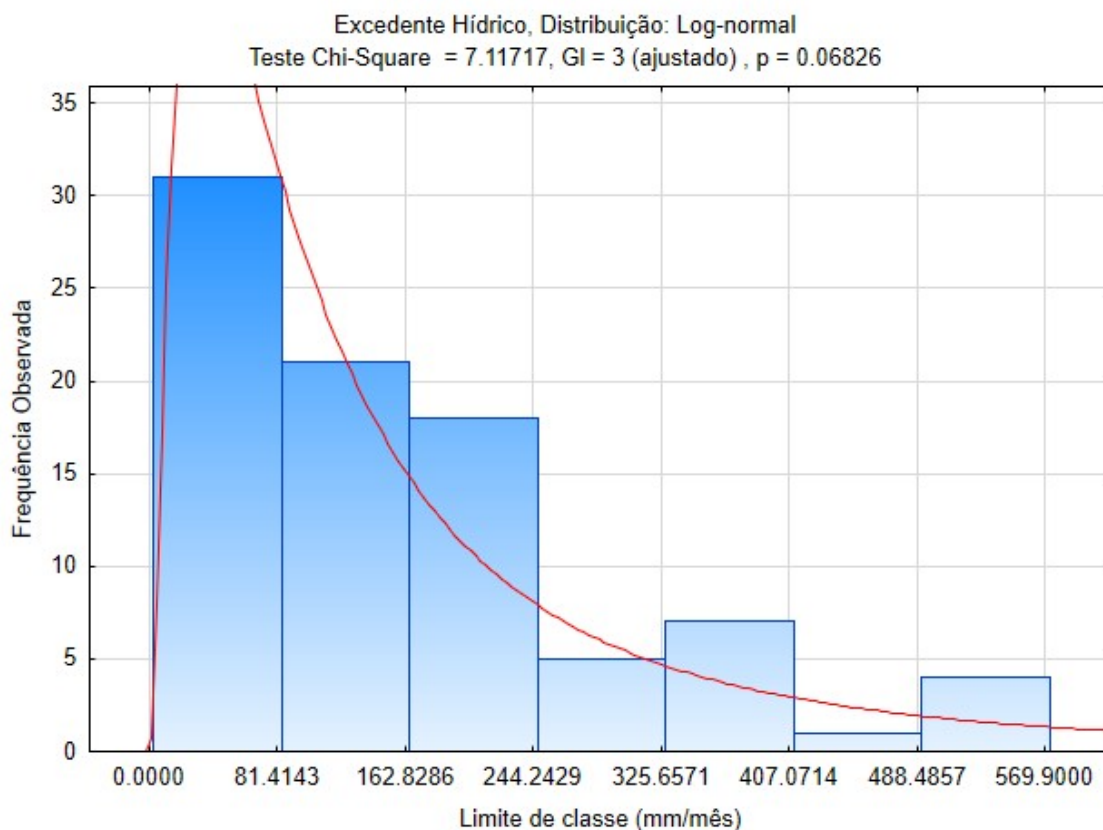


Figura 10- Ajuste do excedente hídrico a uma lei de distribuição de probabilidade log-normal.

Na tabela 02 são apresentados os excedentes hídricos, para diferentes probabilidades, conforme a lei de frequência ajustada.

Tabela 02 - Probabilidade do excesso mensal de água na RNEST. Dados de chuva da ESTAÇÃO: 491 – Cabo/Suape

Probabilidade ($X \geq a$) (%)	50	80	90	95	99
Excedente (mm/mês)	107,0	43,9	27,6	18,8	9,1

O excesso de água variou de 107,0 mm/mês a 9,1 mm/mês, para as probabilidades de 50 e 99%, respectivamente.

O excedente hídrico corresponde, como dito, a soma da infiltração e do escoamento superficial, ou seja, representa a potencialidade hídrica de uma bacia hidrográfica. Para esse estudo o interesse maior é a infiltração, porém devido à ausência de dados a sua estimativa fica prejudicada. Devido à natureza dos solos na RNEST, é lícito admitir que a infiltração represente uma pequena parte do excedente hídrico, algo

abaixo dos 10%. Sendo assim, a infiltração variaria entre 10,7 mm/mês e 0,91 mm/mês, para as mesmas probabilidades do parágrafo anterior.

3 CONTEXTO REGIONAL - BACIA PERNAMBUCO

A Bacia Pernambuco (BPE) está localizada na porção do litoral sul do estado de Pernambuco, está inserida totalmente na Província Borborema, no domínio meridional, do Terreno Pernambuco-Alagoas (Figura 11).

A BPE ocupa em sua porção emersa uma área de aproximadamente de 900 km². É limitada a norte pelo ramo leste da Zona de Cisalhamento Pernambuco (ZCPE), próximo à cidade de Recife, e a sul pelo Alto de Maragogi- Barreiros, no município de São José da Coroa Grande. A BPE na porção emersa possui uma forma alongada na direção N40E, numa extensão de cerca 80 km e a maior largura com cerca de aproximadamente 12 km (Lima filho 1998).

Na sua porção submersa a bacia se estende para leste através do Platô de Pernambuco, que representa uma feição desenvolvida sobre crosta continental estirada com aproximadamente 250 a 300 km de extensão (Alves & Costa, 1986; Lima Filho, 1998; Barbosa & Lima Filho, 2006).

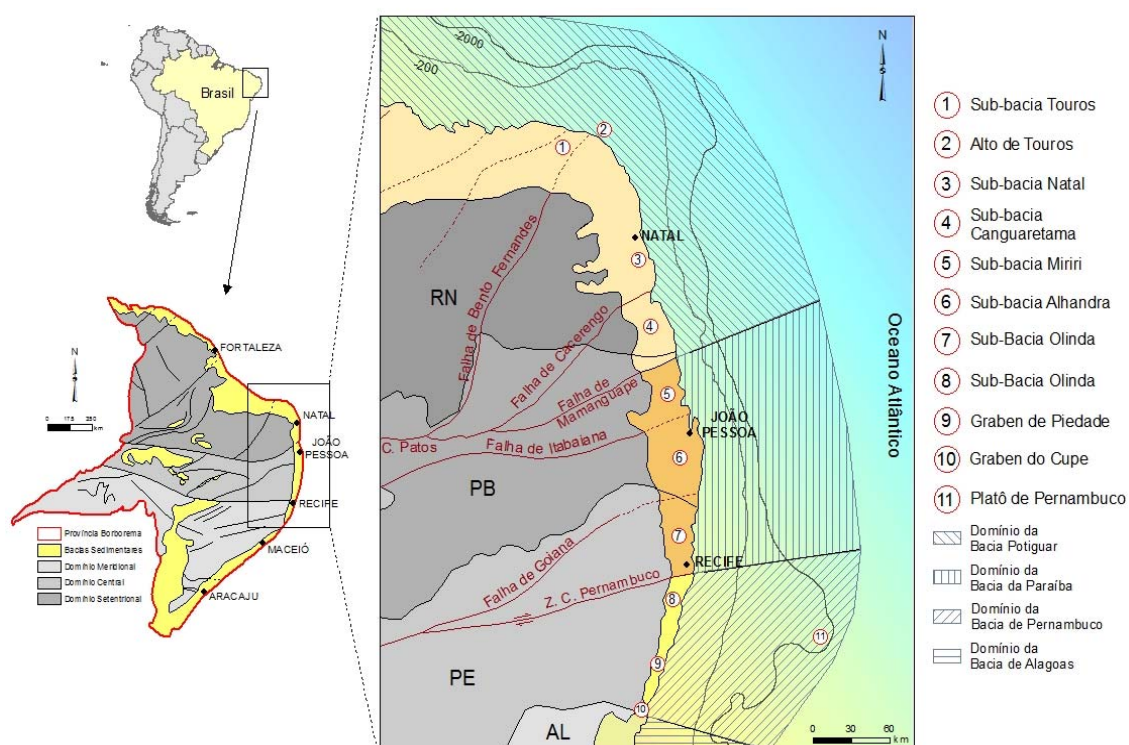


Figura 11- Localização da faixa costeira da Bacia Pernambuco (Modificado de Dantas, 1980; Barbosa, 2004).

3.1 ORIGEM E EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA BACIA DE PERNAMBUCO

A BPE tem sua origem e evolução geológica análoga às demais bacias da margem leste brasileira e está diretamente associada à abertura do Oceano Atlântico Sul e por consequência, a formação das plataformas continentais da América do Sul e África (Maia, 2012). Inúmeros autores elaboraram modelos na tentativa de elucidar a evolução do Atlântico Sul (Rabinowitz & Labrecque 1979; Szatmari *et al.* 1987; Cainelli & Mohriak 1998; Karner & Driscoll 1999; Bueno 2004). Brito Neves *et al.* (1991) com base em dados estruturais, sedimentológicos e geofísicos, identificaram fraturas e falhamentos que formavam dois lineamentos E-W, a sul e a ZCPE a norte, delimitando a Bacia de Pernambuco, em dois conjuntos de falhas principais com *trends* N40W e N50E. Essas falhas NW-SE foram provavelmente geradas pelo *rifteamento*, e são observadas no limite oeste da bacia, em contato com o Maciço PE/AL, ocorrendo de forma a controlar a deposição da primeira unidade a ser depositada, a Formação Cabo.

Sistemas de falhas com comportamento semelhante desenvolveram-se, também, nas rochas do próprio Maciço PE/AL, de forma a influenciar na construção da compartimentação e arcabouço estrutural da Bacia de Pernambuco, dando limites até ao posicionamento do Granito de Santo Agostinho, que funciona como elemento particionador da BPE em duas porções: as Sub-bacias Norte e Sul. Desse modo, a Sub-bacia Norte estaria posicionada entre a ZCPE, a norte, e a Falha de Santo Agostinho (NW - SE) a sul do Granito de Santo Agostinho. Já a Sub-bacia sul iria do Granito de Santo Agostinho até o Lineamento Maragogi, que apresenta um alto gravimétrico-estrutural que corresponde ao Alto Estrutural de Maragogi-Barreiros.

Assim sendo, a sub-bacia Norte estaria posicionada entre a ZCPE, a norte, e a Falha de Santo Agostinho (NW - SE) a sul do Granito de Santo Agostinho. Já a sub-bacia sul iria do Granito de Santo Agostinho até o Lineamento Maragogi, que apresenta um alto gravimétrico-estrutural que corresponde ao Alto Estrutural de Maragogi-Barreiros (Lima Filho, 1998).

Segundo Oliveira (1994) também encontrou feições com anomalias negativas, identificadas na bacia, seccionadas pela linha de costa e sofrendo deslocamentos E-W e NW-SE, indicando a ocorrência de várias sub-bacias desconectadas por falha de transferência e também pelo Alto Estrutural de Santo Agostinho.

Lima Filho (1998) mapeou as falhas de borda da BPE, verificando que a grande maioria apresenta direção NE com rejeitos normais, e que além destas ocorre outro

sistema que apresenta direção NW/NNW com rejeito direcional e são predominantemente dextrais, compatíveis assim com estruturas de transferência. Ainda de acordo com autor concluiu-se que a borda da BPE possui uma direção NE coincidindo com a estruturação dúctil do embasamento e as falhas NW correspondem às falhas de transferência. De acordo com os autores Sá, *et al.*(2002) definiram quatro diferentes tipos de relações de bordas para a Bacia de Pernambuco: a primeira por falhas normais com direção NE, à segunda por falhas de transferência com direção NW, à terceira por não conformidade e a última por zonas de deslocamento distencionais.

Conforme (Lima Filho *et al.* 2006), os eventos tectono-magmáticos relacionados à evolução tectônica da Bacia de Pernambuco, sendo eles:

- a) O evento tectônico inicial correspondente ao *rifteamento* que é marcado pela discordância na base da seção *rifte*;
- b) O evento tectono-magmático do Albiano;
- c) O evento que ocorreu no Cenomaniano-Turoniano
- d) O evento do Turoniano Superior-Coniaciano que marca o início da fase *drifte*,
- e) O evento que corresponde à discordância final do Turoniano, e que é correlacionado ao evento Pré-Calumbi na Bacia de Alagoas

A seção *rifte* encontrada na Bacia de Pernambuco é que está inserida na bacia interna desta, possivelmente alonga-se até a região da plataforma da Bacia da Paraíba, entretanto nesta região a deposição da fase *riftenão* evoluiu (Lima Filho *et al.*, 2006; Barbosa & Lima Filho, 2006).

Assim como afirmam (Lima Filho, 1998; CPRM, 2003) o depocentro pode alcançar entre 3000 e 4000 m. alinhamento das bordas das anomalias negativas a oeste, permitem deduzir que estes são referentes às falhas normais, com orientação NNE-SSW, que formam a borda da bacia. Também é possível observar alinhamentos com orientação NW-SE, que condizem com falhas de transferência que condicionaram a formação de *grábens* e *horsts* (Fig. 12).

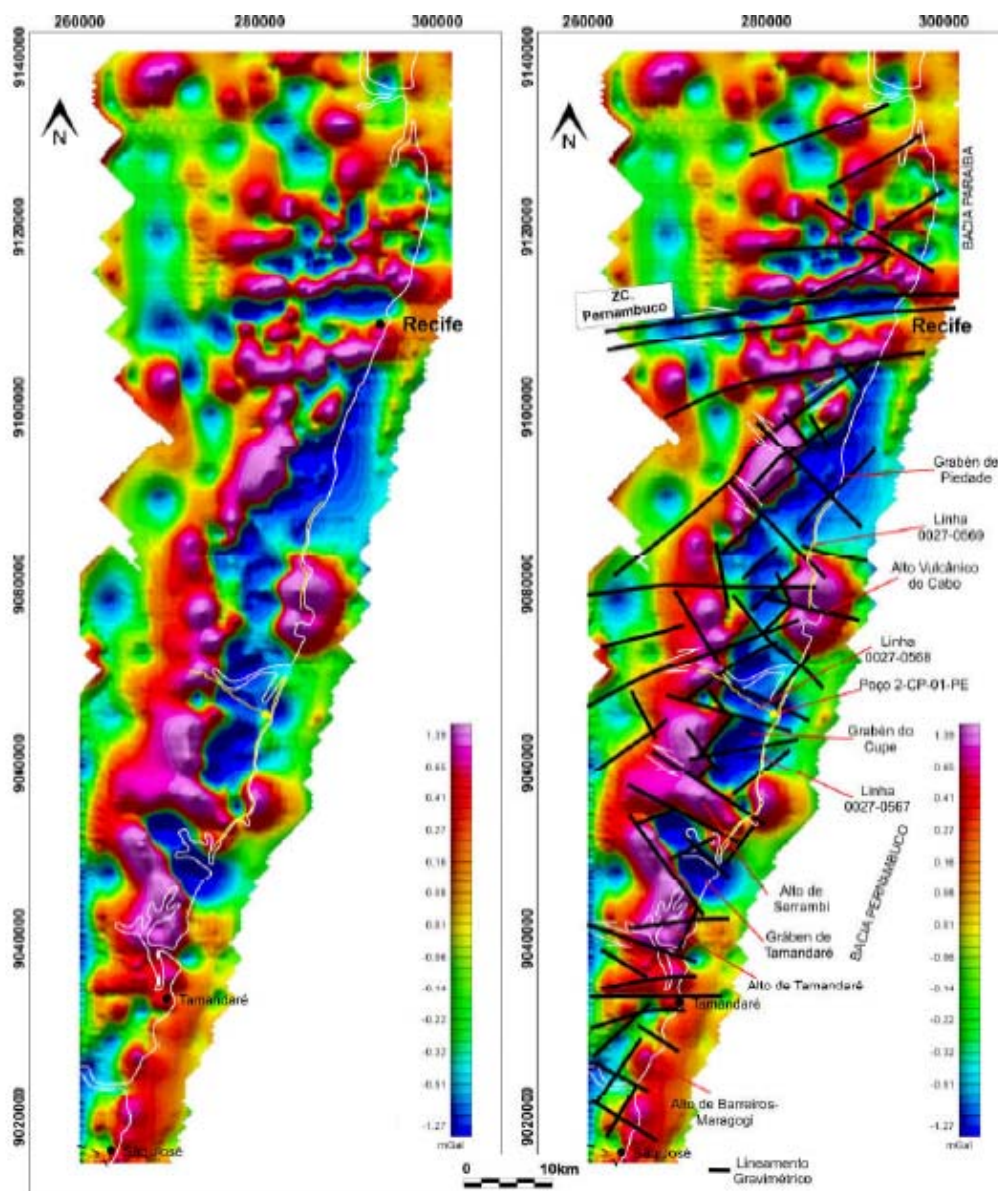


Figura 12- Os mapas (gravimétrico e magnetométrico respectivamente) na Bacia de Pernambuco (modificado de CPRM 2003).

Lima Filho *et al.* (2006) propuseram uma sequência evolutiva comparativa para a geologia observada na faixa costeira das bacias de Pernambuco e da Paraíba (Fig. 13)

- A. Na BPE o preenchimento na região da atual faixa costeira se deu num *rifte* estreito gerado por movimentos transcorrentes dextrais. Estes movimentos formaram um pequeno rombóide que se estendeu até a ZCPE.

- B. Durante o Aptiano, possivelmente a ZCPE se movimentou na área afetada pelo *rifteamento* (Bacia de Pernambuco), e avançou um pouco além da ZCPE, sendo abortado na plataforma em frente à *sub*-bacia de Olinda. Neste período, os esforços foram de direção NW (Matos, 1999).
- C. Durante o Albiano, os esforços extensionais continuaram na Bacia de Pernambuco, com presença de um magmatismo cujo pulso principal tem sua idade Ar-Ar em torno de 100 Ma. (Nascimento, 2003) este magmatismo não ultrapassou a ZCPE. No final do Albiano o *rifte* interno sofreu uma parada na sedimentação principalmente na sua porção norte, enquanto que no Gráben do Cupê houve subsidência.
- D. Do final do Turoniano ao Santoniano, ocorreu uma subsidência ao norte alcançando a Bacia da Paraíba, devido à flexão da plataforma entre a ZCPE e o alto de Touros, provocada por um deslocamento distensional entre as placas sul-americana e africana. Na Bacia da Paraíba, as depressões provocadas pela subsidência de alguns blocos foram preenchidas por sedimentos clásticos, inclusive recobrimdo o Gráben de Olinda. A região ao norte do alto de Mamanguape, até Natal, começou a receber sedimentação transicional devido ao início da transgressão marinha provocada pela continuidade de flexão da rampa.
- E. No Campaniano, a transgressão se instala em toda Bacia da Paraíba, devido à rápida subsidência da rampa. Durante o Maastrichtiano, ocorre uma calma tectônica, sendo depositados na Bacia da Paraíba os carbonatos plataformais. Na Bacia de Pernambuco, a partir do Turoniano, houve levantamentos epirogenéticos que foram responsáveis pela erosão que atingiu os sedimentos da fase *rifte* e as rochas da Suíte Magmática de Ipojuca, juntamente com movimentos distensionais que causaram a deposição da Formação Algodóais de idade ainda não definida.

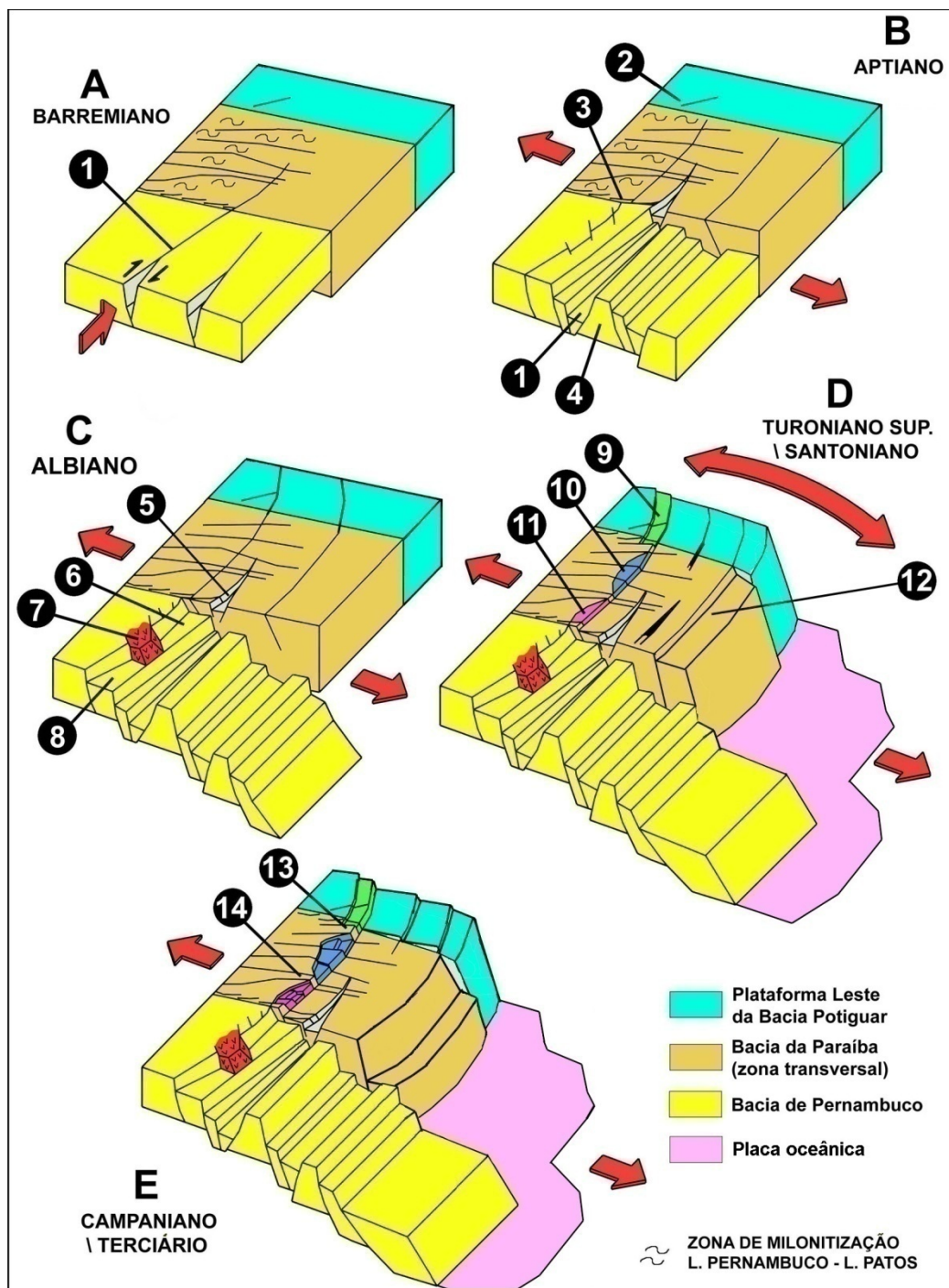


Figura 13-Modelo esquemático da evolução da Bacia de Pernambuco, ao sul da ZCPE, e da Bacia da Paraíba ao norte (Fonte: Barbosa & Lima Filho, 2005 e Lima Filho et al.,2005).

3.2 ESTRATIGRAFIA

Em trabalhos mais antigos (*e.g.*, Alheiros 1988; Feijó 1994; Lima Filho, 1998; Almeida, 2005), a Bacia de Pernambuco era composta por apenas três unidades estratigráficas: as Formações Cabo (Aptiano-Albiano), Estiva (Cenomaniano-Turoniano) e Algodóais (Santoniano-Campaniano?) além da Suíte Magmática Ipojuca.

No entanto, a carta estratigráfica adotada neste trabalho, tem como base a recente revisão proposta por (Maia *et al.*, 2012; Barbosa *et al.*, 2014; Correia Filho 2016).

De acordo com os autores foi possível verificar que o intervalo siliciclástico Aptiano-Albiano, que envolve a fase *rifte*, comporta três unidades estratigráficas distintas:

- 1- Formação Cabo, que continuou sendo representada pelos depósitos grossos, conglomeráticos, e de arenitos arcóseos formados na primeira etapa do *rifte* (Barremiano?-Aptiano). Um aspecto distintivo dessa unidade é a participação de blocos oriundos do embasamento em seus depósitos;
- 2- Formação Suape, que representa a segunda fase do *rifte* (Albiano Inferior e Médio). Esta unidade está separada da Formação Cabo por uma discordância, como é possível observar nas linhas sísmicas terrestres e em afloramentos. A participação de blocos do embasamento foi reconhecida apenas nos depósitos mais basais dessa unidade, quando o processo do *rifte* ainda ocorria durante o Albiano basal. Esta unidade é formada por arenitos e argilas depositadas em ambiente fluvial, possivelmente do tipo *braided*.
- 3- A Formação Paraíso, que representa a primeira unidade pós-*rifte* (Albiano Superior), é que, conforme o dado sísmico, também está separado da Formação Suape por uma discordância, e que conforme o registro do poço 2 CP-01-PE seria composta por arenitos médios e finos, e por argilitos.

A continuação dos processos distensivos no interior da BPE, somada ao efeito da anomalia térmica associada ao Hot Spot de Santa Helena (Sial, 1976; Long *et al.*, 1986; Sial *et al.*, 1988), permitiu a ascensão de material magmático, que produziu abundante quantidade de intrusões e de derrames em superfície. Algumas dessas intrusões ocorreram em profundidades crustais mais rasas, de 1 a 2 km (Sial, 1976; Long *et al.*, 1986; Sial *et al.*, 1988). Segundo Nascimento (2003) a Suíte Magmática de Ipojuca é, geoquimicamente, dividida em dois grandes grupos:

- 1- Uma suíte transicional, alcalina, subdividida em basaltos e traqui-andesitos e monzonitos, nos quais apresentam textura porfírica, com fenocristais de olivina, clino-piroxênio e plagioclásio.

- 2- Associação vulcânica-plutônica alcalina, de composição ácida bastante fracionada é formada por quatro sub-grupos, o primeiro, formado por rochas originadas a partir de fluxospiroclásticos (ignimbritos), o segundo por riolitos de textura fina a média, ambos portadores de fenocristais de quartzo e sanidina, o terceiro sub-grupo é formado pelo Granito do Cabo, e por fim, o quarto grupo é representado pelos riolitos tardios.

Conforme Lima Filho (1998), após o *rifte*, e o término do magmatismo cretáceo, iniciou-se a instalação de uma plataforma carbonática rasa, formada por calcários dolomíticos com uma ampla variação de fácies (Menor & Boujo, 2002; Barbosa *et al.*, 2008) que apresentam uma área aflorante bastante reduzida ao longo da região *onshore* da BPE. Esta unidade foi posteriormente reconhecida como uma sucessão marinha Cenomaniana-Turoniana denominada de Formação Estiva.

As ocorrências da Formação Barreiras na faixa costeira da bacia, ainda necessitam de mais investigações. Lima Filho (1998) assentiu a ocorrência de depósitos dessa unidade nos flancos da bacia, ligada aos altos estruturais que a limitam, e na região central, sobre a região do Alto do Cabo de Santo Agostinho.

De acordo com a literatura esta unidade está relacionada a sistemas de leques aluviais e sistemas fluviais, que possivelmente gradavam para sistemas deltaicos (Rossetti & Santos Jr., 2004; Rossetti *et al.*, 2013). Sua variação faciológica compreende desde conglomerados até argilitos, e sua idade foi estimada como Miocênica-Pleistocênica (Arai *et al.*, 1988, 1994; Arai, 1997; Leite *et al.*, 1997a, b), entretanto alguns estudos mais recentes consideram esta unidade Oligo-Miocênica (Rossetti *et al.*, 2013).

Com o avanço do conhecimento sobre essa unidade, principalmente com a utilização de métodos de datação (luminescência opticamente estimulada - LOE), foi possível determinar a existência de três sucessões sedimentares distintas dos depósitos da Formação Barreiras;

- 1 - Sedimentos de 84.000 e 38.000 anos associada ao máximo transgressivo após o último Interglacial por volta de 84.000 e 70.000 anos;

- 2 - Sedimentos de 29.000 e 16.000 anos associadas ao rebaixamento do nível do mar que culminou com o último glacial;

3 - Sedimentos com 11.000 a 500 anos associados ao aumento do nível do mar que culminou na transgressão do meso-holoceno (Rosseti *et al.*, 2013).

Estes depósitos atualmente são denominados como uma unidade de Pós-Barreiras, que seriam o produto da formação de coberturas sedimentares após a formação da unidade Barreiras, envolvendo processos eólicos, gravitacionais e marinhos em reentrâncias costeiras (Sá, 1969; Rossetti *et al.*, 1989; Rossetti, 2013).

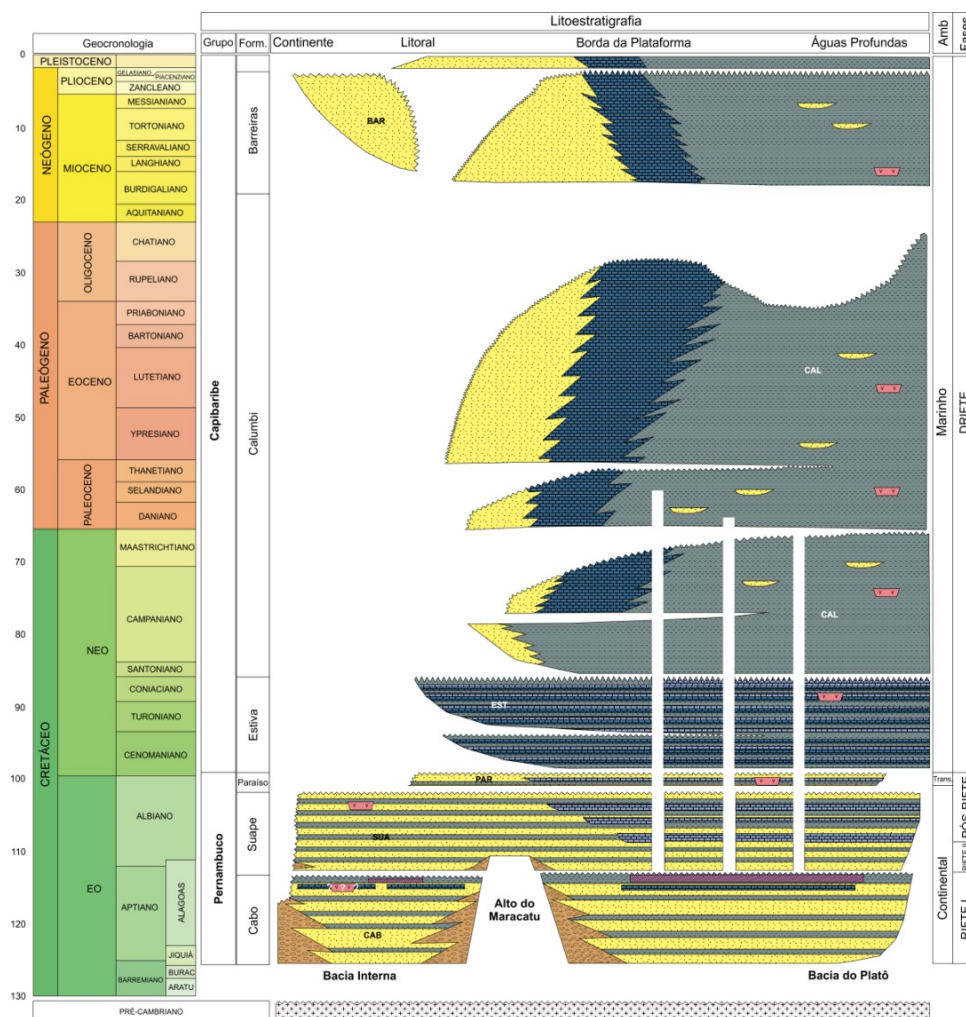


Figura 14- Carta Estratigráfica da Bacia Pernambuco Modificada de Maia (2012) e Barbosa *et al.* (2014).

3.3 GEOLOGIA LOCAL

A consulta de vários mapas geológicos da área da RNEST mostra grandes diferenças entre eles, ao ponto de ser apresentados no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) da RNEST dois mapas geológicos totalmente diferentes, os quais são mostrados nas figuras 15 e 16. A diferença entre esses dois mapas não se resume apenas à

geologia, mas até no formato da área da RNEST. No primeiro mapa domina os sedimentos da formação Cabo, com uma pequena porção de sedimentos de mangue no extremo norte da área. Não consta nenhuma ocorrência de rocha vulcânica. Já no segundo mapa a formação Cabo não aparece e quem domina é formação Algodoads. Há uma mancha de vulcânicas na porção SE da área, na porção norte sedimentos de mangue, e uma pequena mancha de aluvião na porção SW.

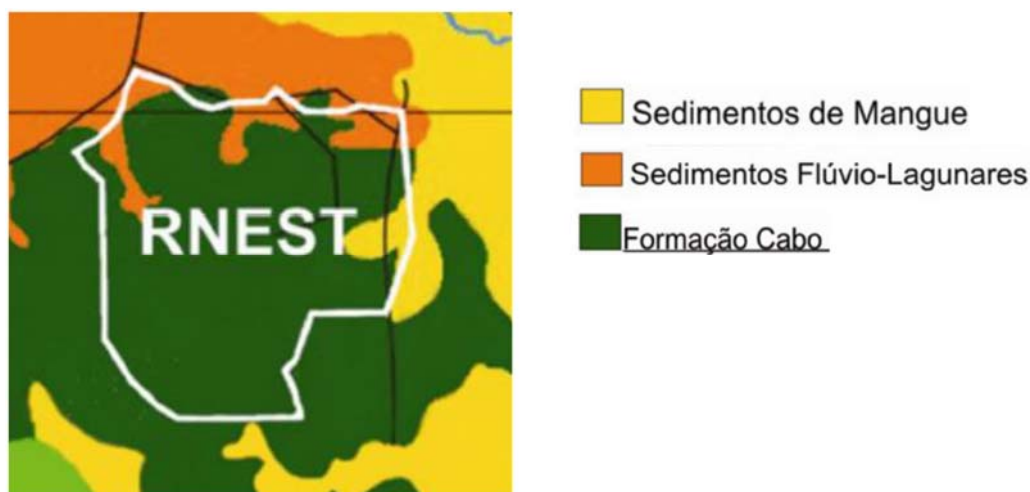


Figura 15 – Mapa geológico da área da RNEST retirado do volume 2 do EIA (Eia, 2006,).

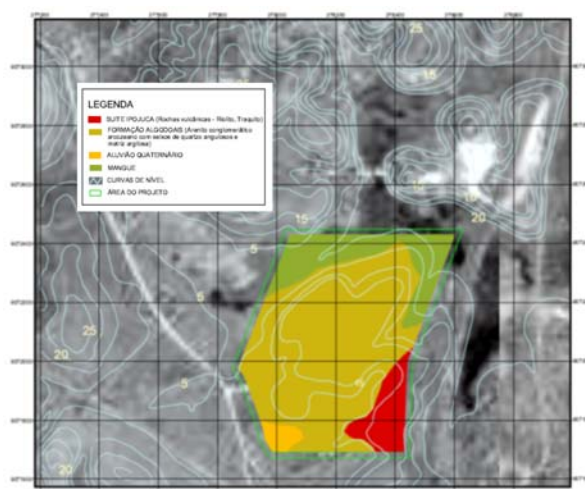


Figura 16 - Mapa geológico da RNEST retirado da Carta Imagem-Geologia apresentado no EIA (fonte, EIA, 2006).

O Serviço Geológico do Brasil – CPRM apresentou em 1999, antes da elaboração do EIA, o Mapa Geológico da Região Metropolitana do Recife, no âmbito do Projeto Singre II, do qual foi retirada a porção no entorno da RNEST, apresentada na figura 17.

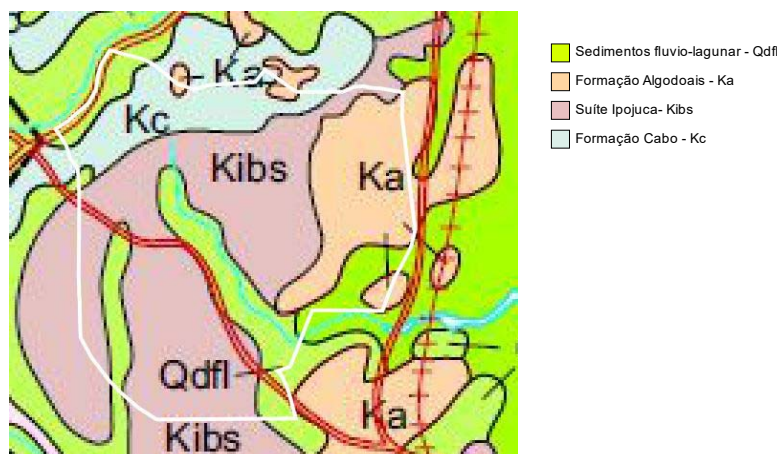


Figura 17- Mapa Geológico em torno da RNEST retirado do Mapa Geológico da RMR, CPRM, 1999.

Como se pode notar esse é totalmente diferente dos outros dois. Nele dominam as rochas da suíte magmática Ipojuca, com a presença das formações Algodão, Cabo e de sedimentos flúvios lagunares.

Entretanto, mesmo não estando previsto no trabalho de monitoramento do freático, foi observado na área da RNEST que o domínio das rochas vulcânicas é bem mais expressivo do que o apresentado nos mapas anteriores. Presença da formação Cabo foi percebida em pequenas porções em cotas mais elevadas.

Na figura 18 são mostrados os aspectos litológicos em torno de um dos poços de monitoramento (PMRAL-02), onde se percebe claramente a natureza dos solos de alteração de traquitos/basaltos.



Figura 18- Vista panorâmica em torno de um dos poços de monitoramento.

Para corroborar essas afirmações são apresentadas na figura 19 as posições das sondagens rotativas, com testemunho e das trincheiras. Como está indicado no mapa, domina a presença das rochas vulcânicas. Na tabela 03, são apresentadas as coordenadas e profundidades das sondagens.

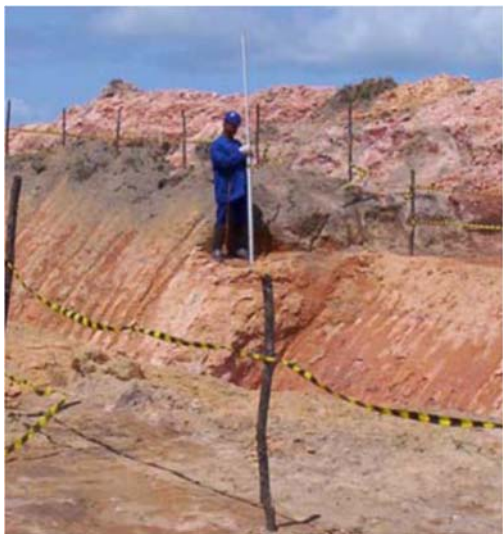


Figura 19 - Mapa com as posições das sondagens rotativas, SPT e trincheiras.

Na figura 20 são apresentadas algumas fotografias, nas quais se percebe facilmente a origem dos solos típico resultante das alterações das vulcânicas da suíte Ipojuca.

Tabela 03 - Dados das sondagens rotativas.

Sondagem	UTMX (m)	UTMY (m)	PROF (m),	Sondagem	UTMX (m)	UTMY (m)	PROF, (m)
SR-05	278186	9074150	11,2	SR-18	278655	9073150	19,0
SR-07	276216	9073650	15,3	SR-20	276686	9072650	17,4
SR-08	276681	9073645	12,5	SR-23	278186	9072650	5,7
SR-14	276681	9073145	7,9	SR-40	277476	9072843	12,2



Trincheira 02



Trincheira 04



Trincheira 03



Trincheira 03

Figura 20- Fotografias tiras nas trincheiras

4HIDROGEOLOGIA

4.1 HIDROGEOLOGIA REGIONAL

Hidrogeologicamente a Região Metropolitana do Recife – RMR pode ser dividida em duas porções. Uma ao norte do Lineamento Pernambuco e outra ao sul. Esse limite coincide também com as separações das bacias sedimentares Paraíba e Pernambuco, respectivamente (Barbosa, 2004). Na porção norte destaca-se o aquífero Beberibe, que é o responsável pelo abastecimento de água de vários conjuntos habitacionais, o município de Itamaracá, diversos empreendimentos industriais e engarrafamentos de água mineral. O aquífero Barreiras é o segundo aquífero da Bacia Paraíba, principalmente nos locais onde dominam fácies arenosa.

Na porção sul, Bacia Pernambuco, se tem os aquíferos Cabo, Boa Viagem, Algodois e Barreiras. Sendo o aquífero Cabo o mais importante.

O Boa Viagem (Costa, 1994), ocorre nos municípios de Recife, zona sul e oeste, e Jaboatão dos Guararapes, bairros de Piedade e Candeias.

O aquífero Boa Viagem é um caso particular, uma vez que, o mesmo ocorre tanto na porção ao sul do lineamento Pernambuco, quanto na porção norte, mas, limitado ao município do Recife.

Na porção sul do lineamento Pernambuco, a faixa sedimentar é mais estreita do que ao norte, assim, é comum a presença do embasamento cristalino nos municípios da RMR sul. O aquífero fissural formado pelo embasamento, mesmo estando em uma área úmida (Zona da Mata) é um manancial de água subterrânea de pouca capacidade produtiva, sendo utilizado para pequenos abastecimentos doméstico ou rural.

O aquífero Cabo apresenta uma baixa condutividade hidráulica ($1,1 \times 10^{-5}$ m/s), devido à presença da argila e caulim na composição do cimento, bem como por intercalações de camadas ou lentes siltico-argilosas. Essa variação faciológica ocorre tanto na vertical como na horizontal, fazendo com que se apresente ora com maior permeabilidade, onde predomina a fácies arenosa ora com menor permeabilidade, onde predomina a fácies siltico-argilosa (Borba *et al.*, 2012).

O maior problema que vem afetando as águas do aquífero Cabo é a variação da composição hidroquímica, principalmente a partir da década 90, provocada pela exploração descontrolada e pela construção mal executada de poços tubulares. (Costa, 1994.)

A recarga desse aquífero, em parte, ocorre pela passagem de água, por drenança vertical descendente, do aquífero Boa Viagem de maneira muito lenta, uma vez que as camadas siltico-argilosas, que ocorrem na porção superior do aquífero, possuem condutividade hidráulica muito baixa. A outra forma de recarga se dá em áreas onde o aquífero aflora.

Segundo Costa, *op.cit.*, o aquífero Boa Viagem é formado por sedimentos recentes como aluviões, terraços fluviais, terraços marinhos, areias de praia, paleomangues e dunas antigas, ora recobrindo os sedimentos do aquífero Beberibe e Cabo e ora sobre o embasamento cristalino na região mais a oeste. Apresenta uma condutividade hidráulica de $1,7 \times 10^{-4}$ m/s devido a sua variação faciológica que vai desde a fração argilosa até a fração de areia grosseira, com níveis de cascalho, sobretudo nos terraços fluviais.

Um dos aquíferos que vem sendo explorado intensamente na RMR é o aquífero Barreiras. Esse manancial ocupa uma área de 18,16 km² na zona sul da cidade do Recife, possui uma condutividade hidráulica $3,4 \times 10^{-5}$ m/s (Monteiro, 2002). Este aquífero apresenta uma alternância de camadas bem estratificadas ou com estratificação incipiente, de constituição arenosa, argilosa ou siltosa, podendo ocorrer níveis de seixos. Em função da predominância da variação de fácies, o mesmo possuirá maior ou menor condição de armazenamento e de permeabilidade.

4.2 HIDROGEOLOGIA LOCAL

A hidrogeologia local é uma consequência da geologia, portanto, o aquífero freático, na sua maioria, tem origem a partir dos solos de alteração das rochas vulcânicas, que são de natureza essencialmente siltico/argiloso. Dos poços de monitoramento construído, apenas um (PMRAL-01) ficou em uma área, próxima a uma região de mangue, que tinha um perfil mais arenoso, com sedimentos mostrando algum grau de transporte.

Os solos da RNEST, devido ao caráter argiloso, a rigor, não se poderia chamar de aquífero, uma vez que, por definição, estes são formações que podem

armazenar e ceder água em quantidades razoáveis, (Fetter, 2001). O mais adequado seria o usar o termo aquítardo, que segundo Fetter, op. cit., é a formação de baixa permeabilidade que pode armazenar e ceder água lentamente. Porém, esses conceitos não são rígidos, permitem uma certa flexibilidade. O termo aquítardo, normalmente é utilizado para uma camada semipermeável que separa dois aquíferos, nunca sozinho. Em uma área onde não haja uma formação arenosa que permita a construção de poços de boa vazão, mas haja uma camada siltica-argilosa da qual se consegue retirar alguma água para se abastecer, esta, com certeza, será denominada de aquífero. Por essas razões, nesse trabalho empregou-se o termo aquífero freático, ou simplesmente freático, para se denominar a formação na qual os poços de monitoramento foram construídos e se monitorou a variação do nível e a qualidade da água.

Do ponto de vista hidráulico, o aquífero freático na área da RNEST, como todo freático, é livre.

4.2.1 Slug Teste

O princípio do método baseia-se na retirada ou injeção de um determinado volume de água do poço instantaneamente. A principal dificuldade desse método é a condição da retirada ou injeção instantânea. Na prática, a forma mais usada, é a introdução, ou retirada, de um cilindro no poço, denominado de *slug*. Para os testes foi utilizado um *slug* de PVC de um metro de comprimento e 25,4mm de diâmetro, tamponado nas duas extremidades, mostrado na figura 21 O *slug* foi preenchido com areia para não flutuar.



Figura21- Slug utilizado nos testes dos poços da RNEST (poço PMRAL-04).

A introdução do *slug* é o equivalente a injeção de igual volume de água e a retirada ao esvaziamento. No caso da RNEST só foi feita a introdução do *slug*, que ao entrar na água causa a elevação do nível da água correspondente ao volume do *slug*. Com o nível da água mais elevado dentro do poço em relação ao aquífero, causa-se um desequilíbrio de carga, gerando um fluxo do poço para o aquífero, fazendo com que o nível da água dentro do poço vá diminuindo gradativamente até voltar ao nível inicial, antes da introdução do *slug*. A análise da evolução da recuperação do nível da água em relação ao tempo gera uma curva que a partir dela é feita a determinação da condutividade hidráulica do aquífero.

A figura 22 mostra, de forma esquemática, como se realiza o *slug* teste. Além do *slugs* são necessários um medidor de nível e um sensor automático para registro da variação da coluna de água dentro do poço. Esses sensores são imprescindíveis quando se trata de aquíferos produtivos, pois nestes casos a recuperação do nível da água se dá de forma muito rápida e o teste dura menos de um minuto, sendo impossível acompanhar a recuperação do nível da água com o medidor de nível manual.

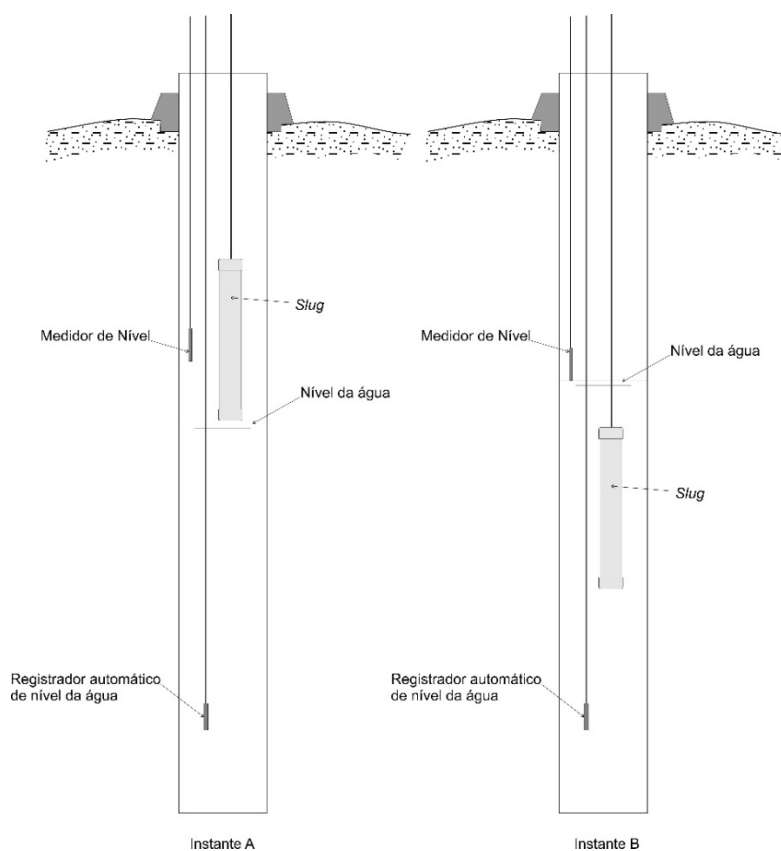


Figura 22- Realização do *slug* teste.

No instante A o *slug* é posicionado o mais próximo possível do nível da água dentro do poço. A instalação do registrador automático é feita antes da colocação do *slug* dentro do poço. Tudo pronto, solta-se o *slug* para ele descer o mais rápido possível.

Como o *slug* tinha um metro de comprimento foi liberado cerca de um metro e vinte centímetros do cabo de sustentação, de forma que o *slug* quando submerso fique com o topo abaixo do nível da água original. O nível da água sobe dentro do poço e tem início o registro da variação da coluna de água dentro do poço, instante B.

Os métodos de Bouwer-Rice e Horslev são os mais utilizados para a interpretação do *slug* teste.

O método de Bouwer-Rice foi desenvolvido em 1976 e atualizado em 1989. Ele é utilizado para estimativa da condutividade hidráulica de aquíferos livres, utilizando um único poço, que pode ser parcial ou totalmente penetrante, pela equação:

$$K = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{R_w}\right)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln \frac{y_0}{y_t}$$

Sendo:

K= condutividade hidráulica da formação aquífera

y₀= o rebaixamento máximo no tempo zero

y_t= rebaixamento no tempo t

R_e= raio efetivo, que é a distância a partir da qual os efeitos da variação de carga são dissipados

R_w= raio da perfuração do poço

r_c= raio do revestimento onde a elevação ou descida do nível da água são medidas

L_e= comprimento do pacote do pré-filtro (cascalho)

A figura 23 é utilizada para mostrar a posição de cada uma das variáveis citadas em relação ao poço e ao aquífero.

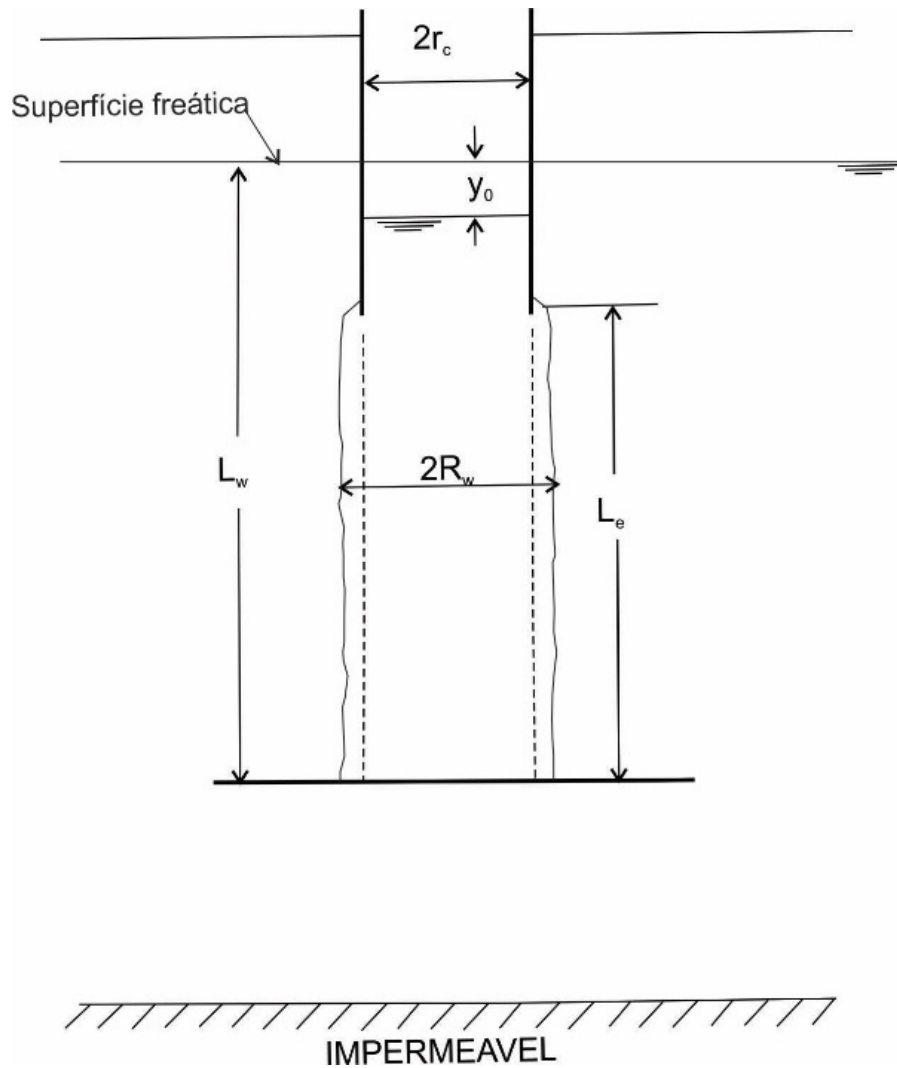


Figura 23- Geometria e parâmetros para poço parcialmente penetrante em um aquífero livre (adaptado de Bower-Rice, 1989).

O método Bower-Rice pode ser utilizado tanto para poços totalmente penetrantes ($L_w=h$), ou parcialmente penetrantes ($L_w<h$). A diferença é feita no termo $\ln(R_e/R_w)$, no primeiro caso este fator é calculado pela seguinte expressão:

$$\ln \frac{R_e}{R_w} = \left[\frac{1,1}{\ln \frac{L_w}{R_w}} + \frac{C}{L_e/R_w} \right]^{-1}$$

Para a parcialmente penetrante utiliza-se a seguinte expressão:

$$\ln \frac{R_e}{R_w} = \left[\frac{1,1}{\ln \frac{L_w}{R_w}} + \frac{A + B * \ln(h - L_w) R_w}{L_e/R_w} \right]^{-1}$$

A, B e C são funções de L_e/R_w , adimensionais, obtidos a partir do seguinte gráfico (figura 24):

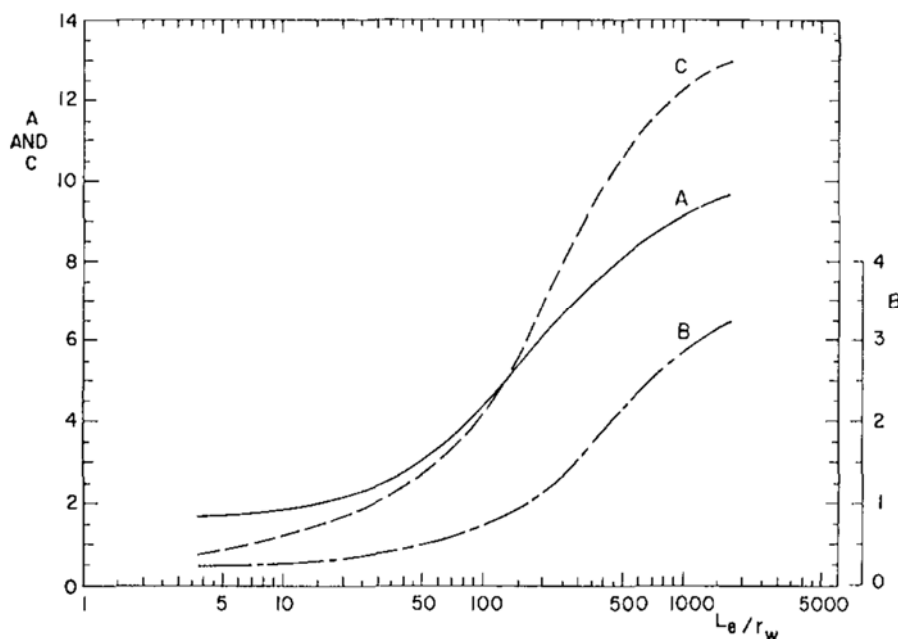


Figura 24- Parâmetros A, B e C, a partir de L_e/R_w , usados na equação para a determinação de $\ln(R_e/R_w)$.

O método Hvorslev é considerado um dos métodos mais usados para interpretação de *Slug* teste (Wheigh e Sonderegger, 2000). É utilizado para estimativa da condutividade hidráulica da zona dos filtros de um poço, e pode ser aplicado tanto para aquífero livre como confinado.

$$K = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_0}$$

Onde:

K= condutividade hidráulica

r= raio do revestimento

R= raio efetivo (raio do filtro+ espessura do pacote de pré-filtro)

L= comprimento do filtro

T_0 = tempo para atingir 37% de H_0

Esta equação produz resultados satisfatórios quando o $L/R > 8$, o que normalmente é observado, a não ser quando o poço possui extensão de filtro muito pequena.

A fim de avaliar a condutividade hidráulica do freático na área da RNEST foram realizados, no dia 26/02/2016, quatro *slug* testes, utilizando os poços PMRAL-03, 04, 05 e 06.

Para a medição da variação da carga hidráulica foi utilizado um registrador automático (transdutor de pressão) da *Schlumberger*, denominado de *micro diver*.

As análises dos *slugs* testes foram feitas pelos métodos de Bouwer-Rice e Horslev.

Na figura 25 são mostrados os gráficos dos testes para os quatro poços para o método Bouwer-Rice.

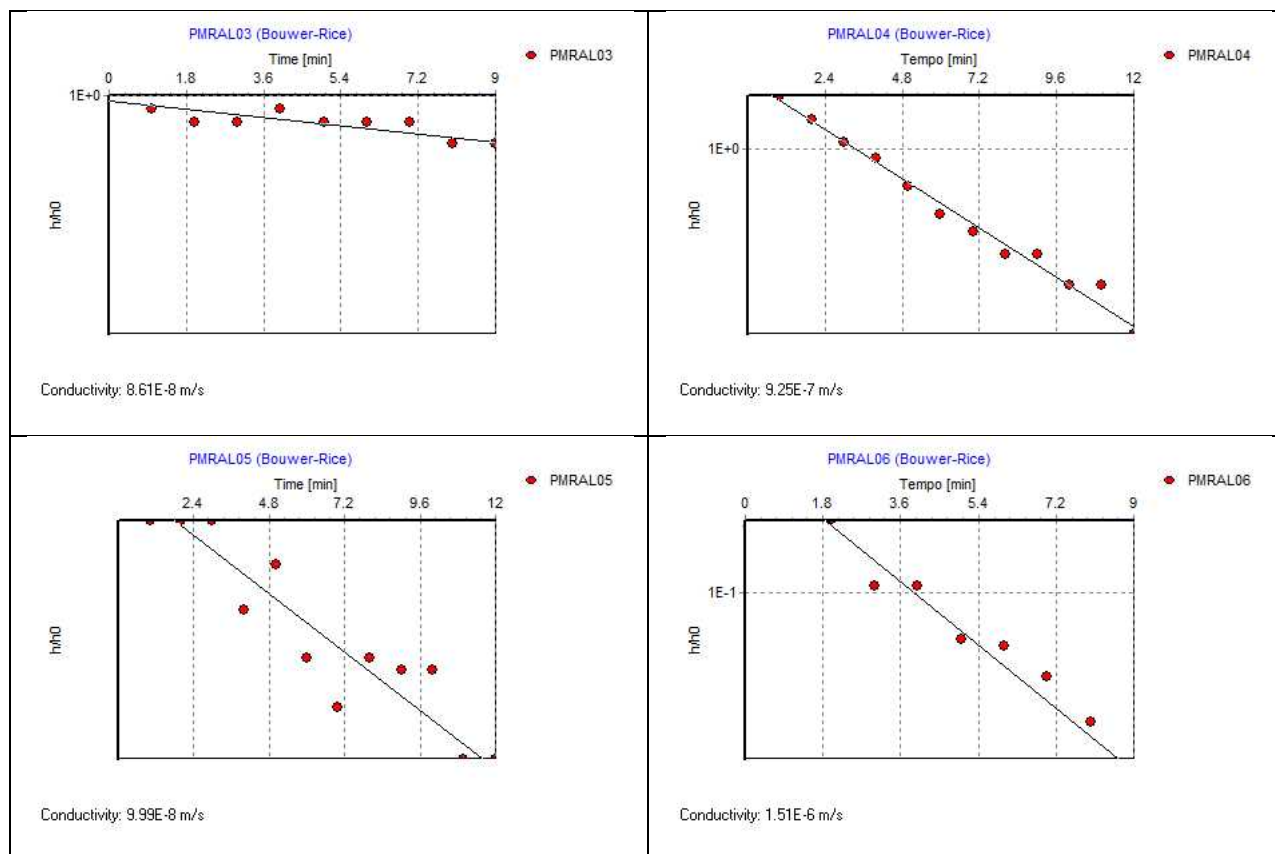


Figura 25 - Condutividade hidráulica determinada pelo método de Bouwer e Rice.

Na figura 26 são mostrados os gráficos dos testes para os quatro poços para o método Hvorslev.

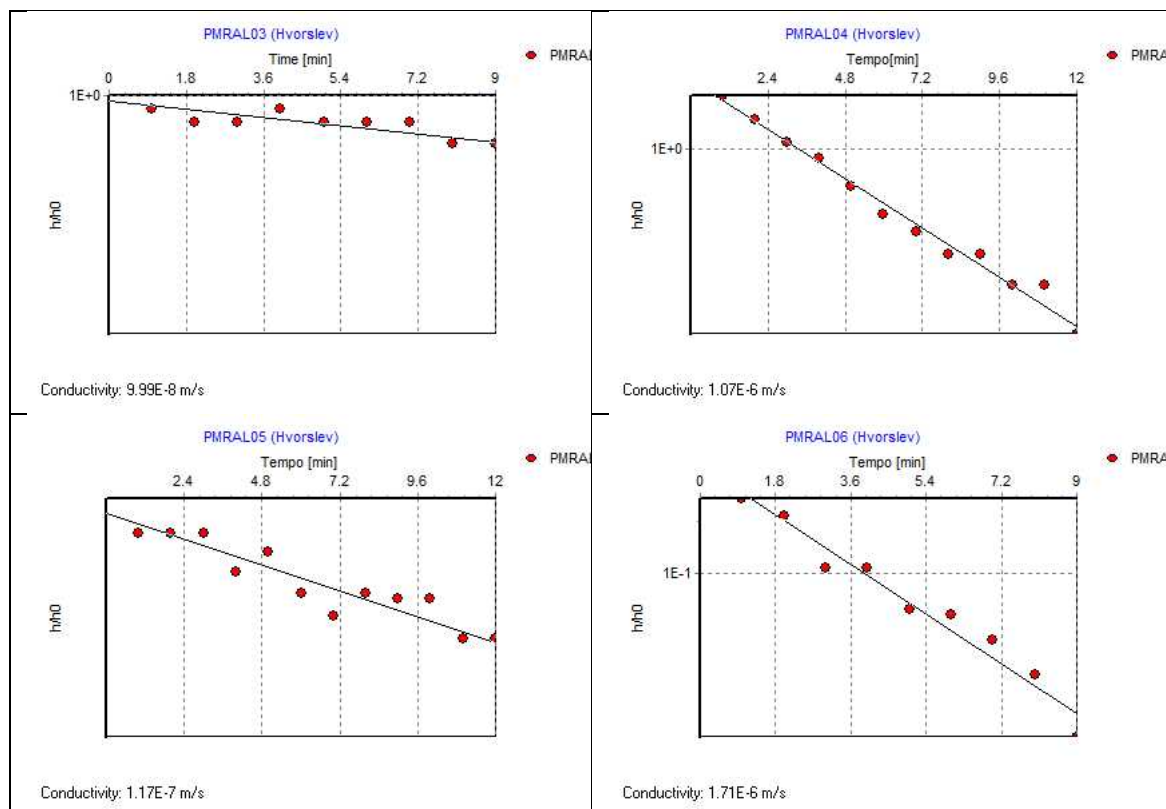


Figura 26– Condutividade hidráulica determinada pelo método de Hvorslev.

A partir dos gráficos foram determinadas a condutividades hidráulicas, cujos valores são apresentados na tabela 04.

Tabela 04 -Valores de condutividade hidráulica (m/s) para o aquífero freático na área da RNEST.

POÇO	Método		Média
	Bower-Rice	Hvorslev	
PMRAL-03	$8.61\text{E-}08$	$9.99\text{E-}08$	$9.30\text{E-}08$
PMRAL-04	$9.25\text{E-}07$	$1.07\text{E-}06$	$9.98\text{E-}07$
PMRAL-05	$9.99\text{E-}08$	$1.17\text{E-}07$	$1.08\text{E-}07$
PMRAL-06	$1.51\text{E-}06$	$7.10\text{E-}07$	$1.11\text{E-}06$

Os valores obtidos mostram condutividade hidráulica muito baixa, compatíveis com os solos silticos/argilosos da área. Como dito, os solos provenientes da decomposição das rochas vulcânicas da suíte Ipojuca não deveriam, a rigor, ser denominados de aquíferos. São argilosos e produzem pouca água e com elevada turbidez, ratificado pelos valores de condutividades hidráulicas encontrados.

Da tabela 04 constata-se que é possível separar dois valores de condutividades hidráulicas, um entorno de $1,0 \times 10^{-6}$ m/s e o outro $1,0 \times 10^{-7}$ m/s. O primeiro determinado no local dos poços PMRAL-04 e PMRAL-06, o segundo nos poços PMRAL-03 e

PMRAL-05. Como esses poços foram construídos após os serviços de terraplanagem, foi verificado se esses valores de condutividades hidráulicas poderiam ter sido influenciados por material de aterro. A partir do mapa planialtimétrico da área da RNEST, com curvas de nível a cada um metro, foi determinada a cota do terreno original, no local de cada poço, e comparada com a cota atual. Essa análise mostrou que só houve aterro no local do poço PMRAL-04, cuja cota original era de 8,0 metros, ou seja, sofreu um aterro de 9,8 metros. No local dos demais poços o terreno foi rebaixado, 9,2 metros no PMRAL-03, 3,5 metros no PMRAL-05 e 2,2 metros no PMRAL-06. O material de aterro, que não se sabe a origem, utilizado no local o PMRAL-04, foi um dos responsáveis pelo maior valor de condutividade hidráulica. Em relação aos outros poços, os valores encontrados são decorrentes da variação natural do solo.

5 ASPECTOS GERAIS SOBRE MONITORAMENTO

O gerenciamento de qualquer recurso passa, necessariamente, pelo seu adequado conhecimento. Com os recursos hídricos subterrâneos é da mesma forma. A gestão de um aquífero só pode ser feita de forma satisfatória se o gestor tiver o mínimo de informações de como o aquífero comporta-se diante dos bombeamentos, além das características hidroquímicas.

A água, em especial a subterrânea, apesar de ser um bem vital, não tem o valor econômico de outros bens minerais. Para a implantação de uma mineração se faz necessário o dimensionamento da jazida com um alto grau de conhecimento, pois, o empreendedor não irá investir se não tiver um mínimo de certeza do retorno do capital empregado. Para tanto, é necessário o investimento de somas consideráveis na cubagem das reservas. Para a água, devido ao seu caráter fluido, além do seu baixo valor econômico, a definição do manancial é feita, muitas vezes, apenas com um poço, por exemplo, o aproveitamento da água mineral.

Como os estudos realizados para as caracterizações hidrogeológicas são calcados em poucos dados e de curta duração, faz-se necessário implementar medidas para obter as respostas do aquífero aos bombeamentos de longa duração. A única maneira para conseguir essas informações é por meio de um monitoramento.

Segundo UNEP/WHO,1996, o monitoramento é um processo programado de amostragem, medições e armazenamento de dados sobre várias características do aquífero.

De acordo com Uil, *et al.*, (1999), um monitoramento deve prover informações sobre a dinâmica do aquífero em relação às variações sazonais e efeitos antrópicos.

Para Mestrinho, 2008, o monitoramento em águas subterrâneas “*é um processo sistemático que engloba a coleta, o armazenamento, a análises e a interpretação de dados*”.

Resumindo, o monitoramento é um processo contínuo que fornece dados de diversos aspectos do aquífero

Assim, o monitoramento é o procedimento que proverá os gestores da água subterrânea com as informações de longa duração necessárias para embasar as tomadas de decisões. O monitoramento é que permitirá detectar a presença de uma drenança consistente para o aquífero, ou a superexploração, mudanças significativas na qualidade da água ou até mesmo flagrar processos de contaminação, entre outras possibilidades.

5.1 MONITORAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

As variações do nível da água em um aquífero, bem como a qualidade das suas águas, dependem de vários fatores, que podem ser de períodos e amplitudes variados. As mudanças climáticas, as estações do ano, a evapotranspiração, a precipitação, a pressão atmosférica, ventos, marés, bombeamentos, infiltrações, entre outros, são exemplos de fatores que influenciam na qualidade e no nível da água de um aquífero (Silva e Loureiro, 2006)

Para a água subterrânea dois aspectos são importantes a ser monitorados, a variação de nível e a qualidade da água. O primeiro reflete a resposta do aquífero às diferentes solicitações, principalmente, a recarga e aos bombeamentos, enquanto o segundo as variações físico-químicas da água, no caso de aquíferos rasos também o conteúdo bacteriológico.

A realização do monitoramento se faz através das medidas de nível da água nos poços, que podem ser feitas de forma manual ou automática. Outra medida importante, muitas vezes esquecida em programas de monitoramento, são as descargas dos poços, que podem ser obtidas facilmente com a instalação de hidrômetros. Além do mais, principalmente para aquíferos livres, é fundamental o registro das precipitações ao longo do monitoramento, o que permitirá visualizar as relações das variações do NE com as precipitações, bem como estimar a recarga do aquífero. Com isso se fecha o

circuito completo, ou seja, se tem informações das ações sobre o aquífero, bombeamentos e infiltração, e da sua resposta, variação do NE.

O monitoramento da qualidade da água é feito, normalmente, através da coleta de amostra água periódicas, que são enviadas para laboratório. Sensores automáticos ainda são caros e restringe-se a poucos parâmetros, entre eles o mais comum é a condutividade elétrica da água.

Os monitoramentos podem ser divididos, quanto aos objetivos, em dois grandes grupos, o geral e o específico. O primeiro é simplesmente acompanhar a evolução dos NE, as descargas bombeadas e as chuvas, bem como a qualidade da água. Este conjunto de informações permitirá a compreensão do comportamento hidráulico e hidrogeoquímico do aquífero a longo prazo. O monitoramento específico tem uma finalidade definida, e normalmente está mais ligado as questões da qualidade da água, como por exemplo, plumas de contaminação. Segundo Foster e Gomes, 1989, o monitoramento específico pode ser enquadrado em duas classes, são elas:

Monitoramento de detecção: que é realizado em torno de uma suposta contaminação para determinar a ocorrência e a intensidade da mesma (detecção ofensiva), ou ainda em torno de fontes importantes de água subterrânea a fim de detectar a chegada de possíveis contaminações (detecção defensiva).

Monitoramento de avaliação: Tem por objetivo detectar a grau, a extensão e migração de uma pluma de contaminação.

O desenho de uma rede de monitoramento é iniciado a partir do conhecimento atual do sistema aquífero, modelo conceitual inicial, e à medida que os dados vão sendo coletados, processos de calibração e validação vão aperfeiçoar o modelo inicial, o desenho da rede também pode evoluir (Mestrinho, 2008; Foster e Gomes, 1989), sugeriram um fluxograma de desenvolvimento de um programa de monitoramento, figura 27.

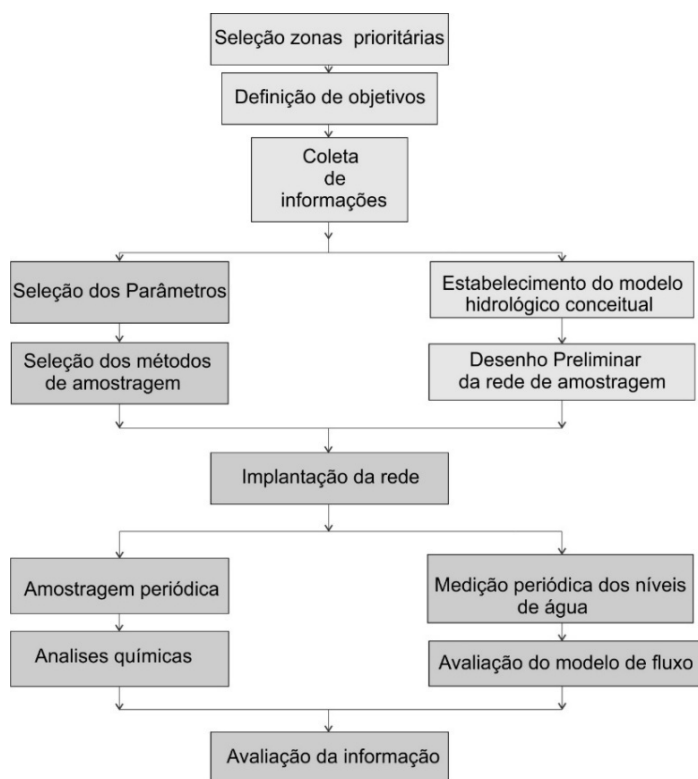


Figura 27 - Fluxograma para um programa de monitoramento (modificado de Foster e Gomes, 1989)

5.1.2 Implantação de Rede de Monitoramento

A implantação de uma rede de monitoramento é fortemente dependente dos objetivos do monitoramento. A abordagem para monitorar a variação do NE é diferente do acompanhamento da variação da qualidade.

5.1.2.1 Redes para acompanhamento da variação do NE

Uma rede de monitoramento de nível de água tanto pode ser composta por poços existentes como por poços construídos especificamente para esse fim, ou ainda um misto dos dois. Uma desvantagem de usar poços existentes é que estes normalmente estão instalados, assim o NE medido será afetado pelo bombeamento, mesmo que a bomba seja desligada algumas horas antes da medida. Assim, o ideal é que a rede de monitoramento seja composta apenas por poços existentes sem equipamento de bombeamento ou por poços construídos especificamente para comporem a rede. Quando a condição ideal não for possível, e se tiver que usar poços de bombeamento na rede de monitoramento de NE é importante tentar fazer as medidas sempre em condições semelhantes de utilização do poço, e que estas sejam registradas para facilitar a interpretação da evolução dos níveis. O uso de poços de monitoramento sem

equipamento bombeamento e afastados de poços de produção, forneceram dados fundamentais para calibração de modelo numéricos de fluxo.

Na definição da rede é importante observar a geometria do aquífero ou do sistema aquífero, para se saber o que cada informação representa realmente, por exemplo, se o poço de monitoramento está observando o aquífero bombeado o significado da evolução dos níveis será diferente caso o poço estivesse em um aquífero drenado. Conhecer também o tipo de aquífero é fundamental. Aquíferos confinados ou semiconfinados estão menos sujeitos as variações sazonais do que os aquíferos livres.

Tão importante quanto o tipo de poço a ser usado na rede de monitoramento é a quantidade. Porém essa definição não passa apenas por critérios técnicos, sendo levados em considerações os aspectos econômicos. Operar uma rede monitoramento não é barato, a aquisição de equipamentos, pessoal, implementação e manutenção da rede, coleta de informação, análise e processamento dos dados levantados exigem volumes substanciais de recursos financeiros (Kim, *et. al.*, 2007).

5.1.2.2 Frequência

Duas variáveis importantes a serem observadas na implantação de uma rede de monitoramento são a frequência da coleta de dados e o espaçamento dos poços de observação. A definição dessas variáveis passa necessariamente pelos objetivos do monitoramento e pelos custos (Taylor e Alley, 2001). As frequências devem permitir o registro das variações de curta duração, bem como as flutuações sazonais. Na figura 28 é mostrado um gráfico que mostra a influência de alguns fatores ambientais na frequência de coleta dos dados.

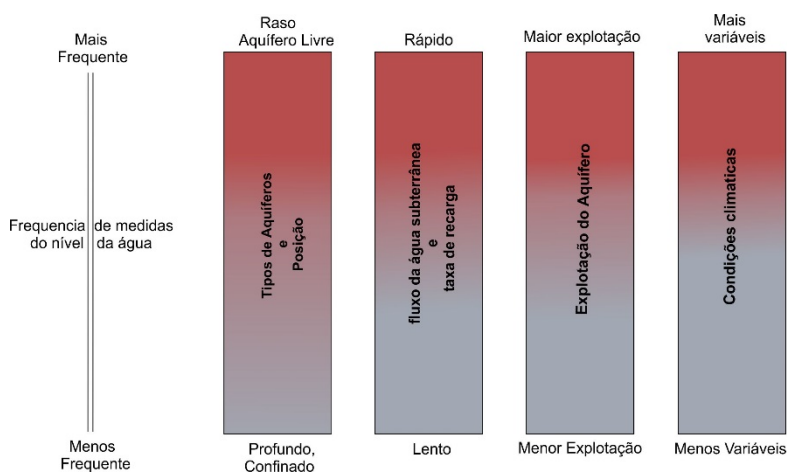


Figura 28 -Influência de fatores ambientais na determinação da frequência de coleta de dados de uma rede de monitoramento (modificado de Taylor e Alley,2001).

A escolha de um intervalo longo entre as observações implicará na perdadas respostas hidráulicas do aquífero para as variações de curta duração, mas poderão flagrar as variações de longa duração, ou sazonal.

Taylor e Alley (2001), apresentaram em seu trabalho o exemplo do poço PDW-23, situado no oeste do Estado de Massachusetts, uma série histórica com seis anos de monitoramento, com dados diários. Ele fez uma comparação dessa frequência de observação com medidas mensais e trimestrais, cujo resultado é apresentado na figura 29.

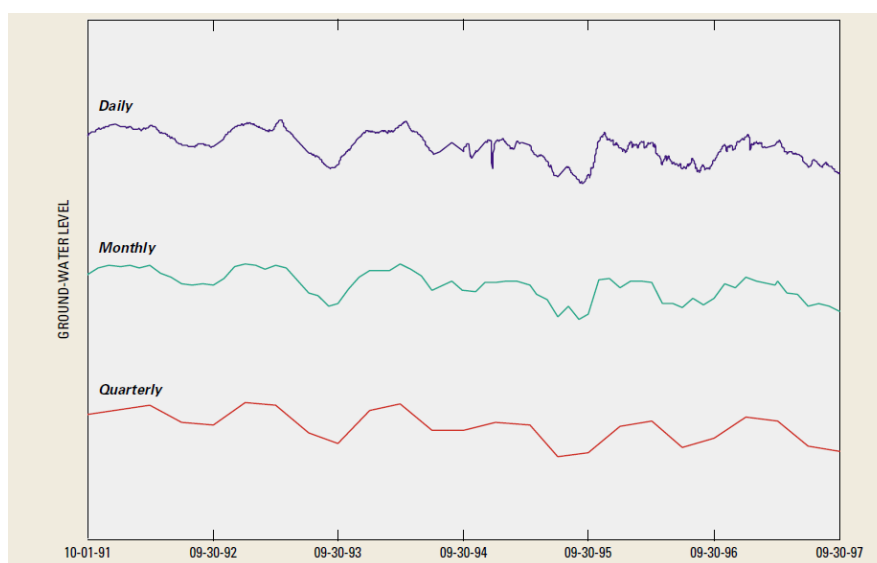


Figura 29 -Variação do nível estático para o poço PDW-23 (modificado de Taylor e Alley,2001).

Segundo Taylor e Alley, 2001, a curva para a frequência mensal permite discernir padrões sazonais da variação dos níveis de água. Já para a frequência trimestral de monitoramento há uma diminuição na gama das flutuações nos níveis de água.

Utilizando-se os dados de monitoramento, realizado na RNEST, mais especificamente os dados do PMRAL-05, foi feita uma comparação na variação da frequência de observação, para dados diários, mensais, bimestral e trimestrais, figura 30. Para a frequência mensal, bimestral e trimestral os dados foram aqueles registrados no dia 10 de cada mês.

A partir da análise da figura 30 percebe-se que a frequência mensal (figura 30-A) apresenta com boa representatividade as variações de longa duração, (variações

sazonais). Já para uma frequência maior a representatividade cai significativamente. Para a frequência trimestral (figura 30-C), quase não se percebe a variação sazonal. Esses intervalos maiores de monitoramento, talvez, sejam importantes para flagrar variações de nível de mais longa duração, por exemplo, as decenais.

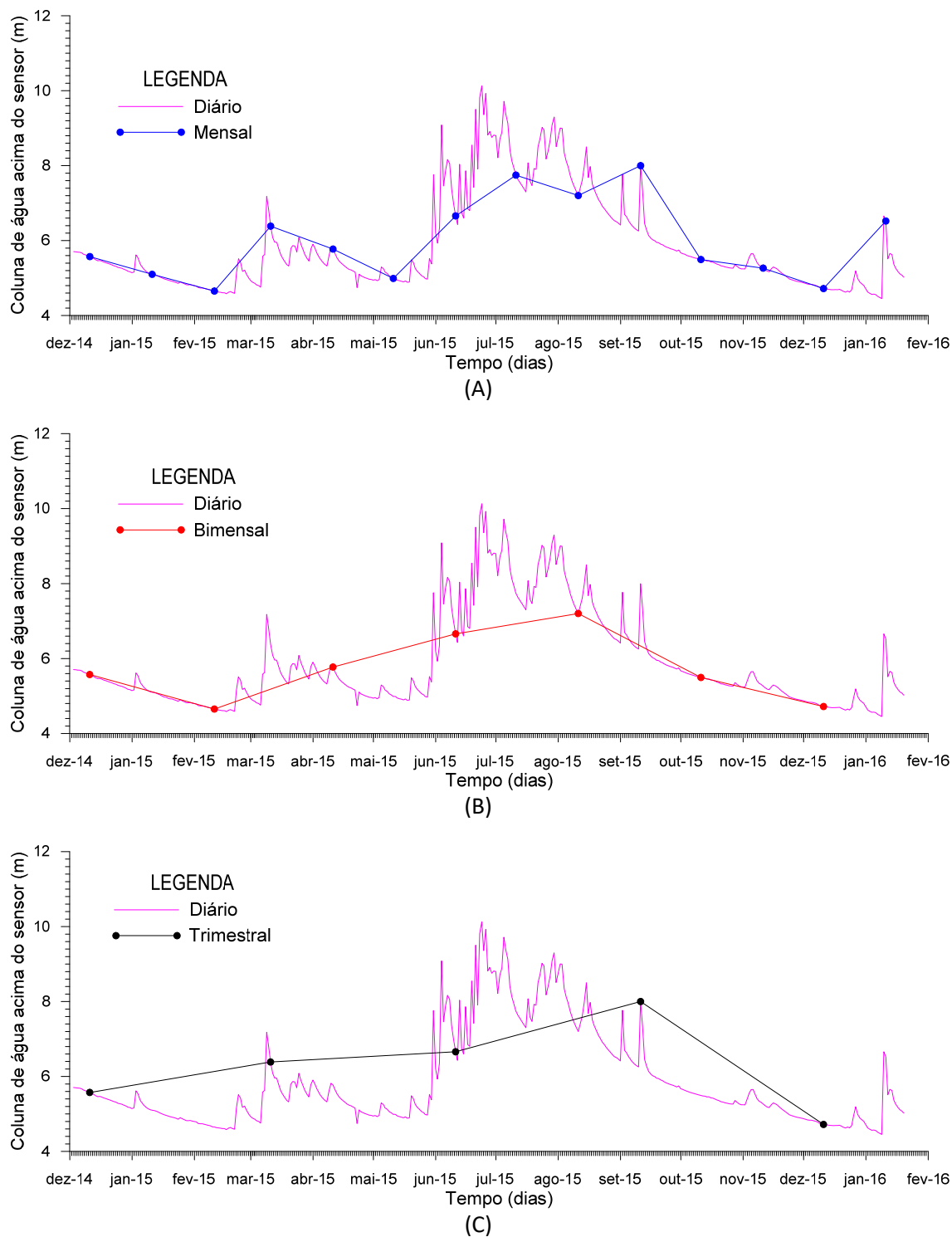


Figura 30 - Comparação entre as frequências diárias e mensais (A), bimensais (B) e trimestrais (C) do nível da água no poço PMRAL-05.

5.1.2.3 Espaçamento

A escolha da quantidade de poços de uma rede de monitoramento é uma tarefa complexa, pois diversas podem ser as razões para a implantação dessa rede (Taylor e Alley 2001), por exemplo, a rede pode ser para acompanhar a variação de nível da água no aquífero ou para detectar, especificamente, fontes potenciais de contaminação, ou ambos, por exemplo. Para o primeiro caso, geralmente a rede de monitoramento é projetada a partir de poços existentes, já no segundo a quantidade dos poços e sua disposição vai depender de cada caso estudado. Nestes casos, em geral a variação potenciométrica não é o fator mais importante para definir a quantidade de poços, mas a direção geral do fluxo da água subterrânea. Normalmente são utilizados poços construídos a montante e jusante da possível fonte de contaminação. A norma da ABNT NBR 13895/1997, que foi substituída pela NBR 15495/2007, prever a construção de três poços a jusante e um a montante.

Para definir uma rede de monitoramento a partir de poços existentes, pode-se utilizar técnicas estatísticas, apesar de apresentarem algumas limitações, tais como a quantidade de poço insuficiente para estimar, de forma confiável, o tamanho da rede de monitoramento, e geralmente, por ter múltiplos objetivos, alguns dos quais difíceis de expressar quantitativamente. Apesar destas limitações, a análise estatística dos dados existente das redes podem fornecer orientações úteis na definição de uma rede de monitoramento e uma base mais firme para aprimoramento desta (Taylor e Alley, *op.cit.*).

Duas técnicas estatísticas muito utilizadas são: análise geoestatística e análise de componentes principais. Nesse trabalho será apresentando apenas um exemplo da análise geoestatística, pois a técnica da componente principal é necessário vários poços com uma série histórica de dados de níveis de água, o que não é comum no Brasil, além do mais, se já dispomos de poços com séries históricas já se tem uma rede de monitoramento. Assim, julga-se que essa técnica seria mais utilizada para o refinamento de uma rede de monitoramento, do que propriamente para defini-la.

A Geoestatística é um conjunto de técnicas probabilísticas para fazer estimativas de dados espaciais (por exemplo, a carga hidráulica) em locais não medidos, a partir de dados conhecidos na vizinhança. Uma aplicação típica de geoestatística é avaliar a relação entre o número de poços e a incerteza de um mapa potenciométrico. A Secretaria de Estado de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte apresentou

orelatório técnico, em outubro de 2003, Cadastramento de Poços e Diagnóstico Preliminar das Causas que Afetam o Rebaixamento do Nível Potenciométrico do Aquífero Jandaíra Região de Baraúna/RN, no qual foram cadastrados e nivelados cento noventa e sete poços com dados de nível estático.

A disposição dos mesmos, e a superfície potenciométrica traçada, é mostrada na figura 31.

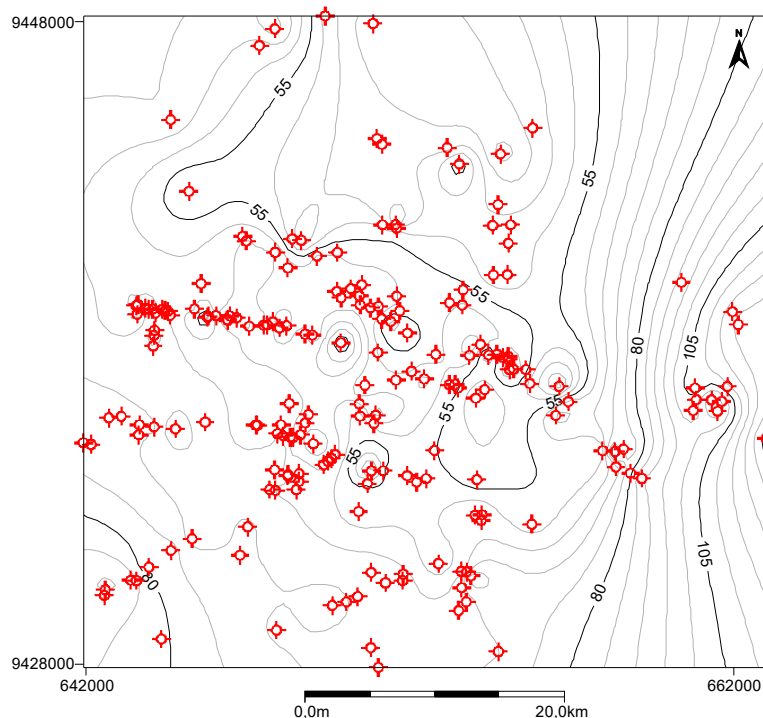


Figura 31- Superfície potenciométrica gerada a partir de todos os poços com informação de NE, do estudo da Secretaria de Recursos Hídricos do RN.

Fazer o monitoramento de todos os poços implicaria em um custo elevado, o que provavelmente inviabilizaria a sua realização. Este caso será utilizado para exemplificar a técnica de redução dos dados utilizando o padrão hexagonal (Olea, 1984). Esta consiste em dividir a área, proporcionalmente em hexágonos, e escolher, aleatoriamente, apenas um poço por hexágono.

Na figura 32 são apresentados os poços selecionados, marcados em azul, utilizando o padrão hexagonal, dessa forma, a rede de observação seria de apenas de trinta e quatro poços, sem dúvidas o que representaria um custo bem menor para operação da rede. Para demonstrar que a rede escolhida representaria de forma satisfatória a potencimetria do aquífero Jandaíra, na figura 33 é mostrada a comparação entre o mapa potencimétrico elaborado a partir dos trinta e quatro poços selecionados

para a rede de monitoramento e a potenciometria elaborada com todos os poços disponíveis.

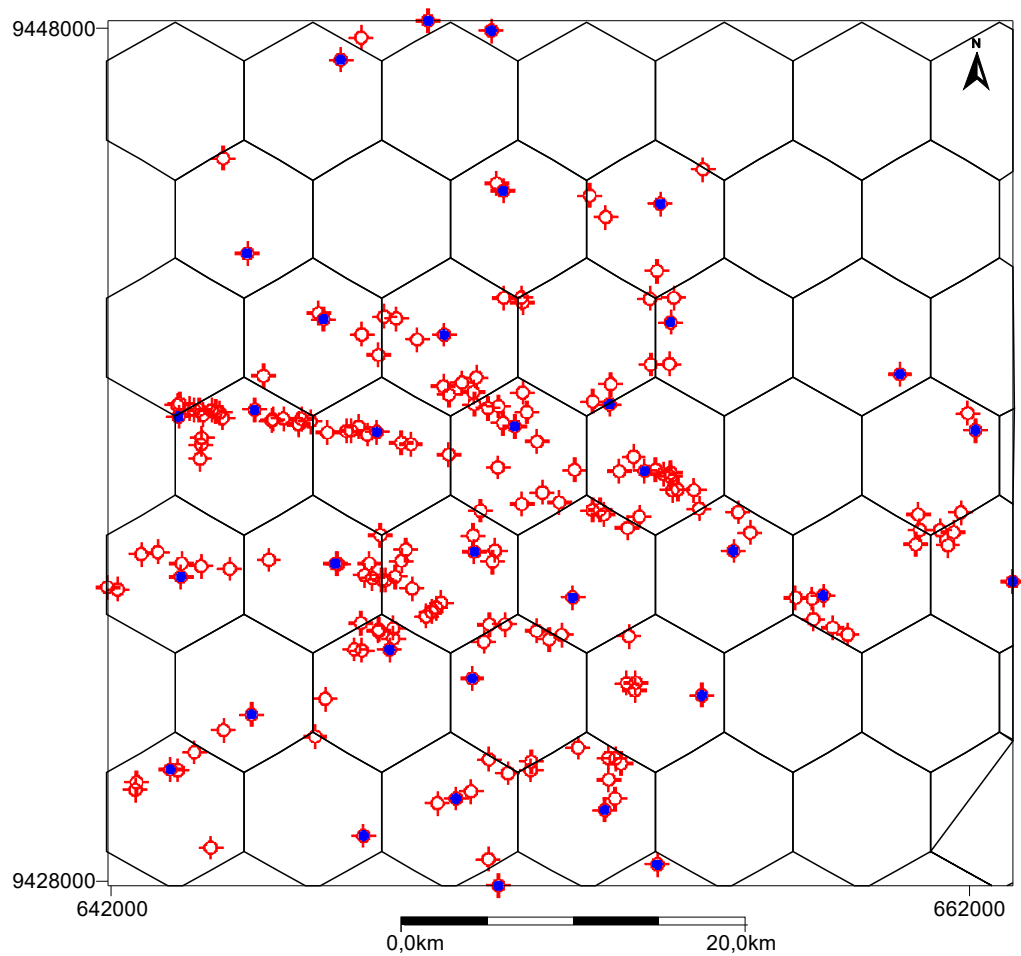


Figura 32- Malha padrão hexagonal para definir uma rede de monitoramento os poços marcados em azul são os seleccionados.

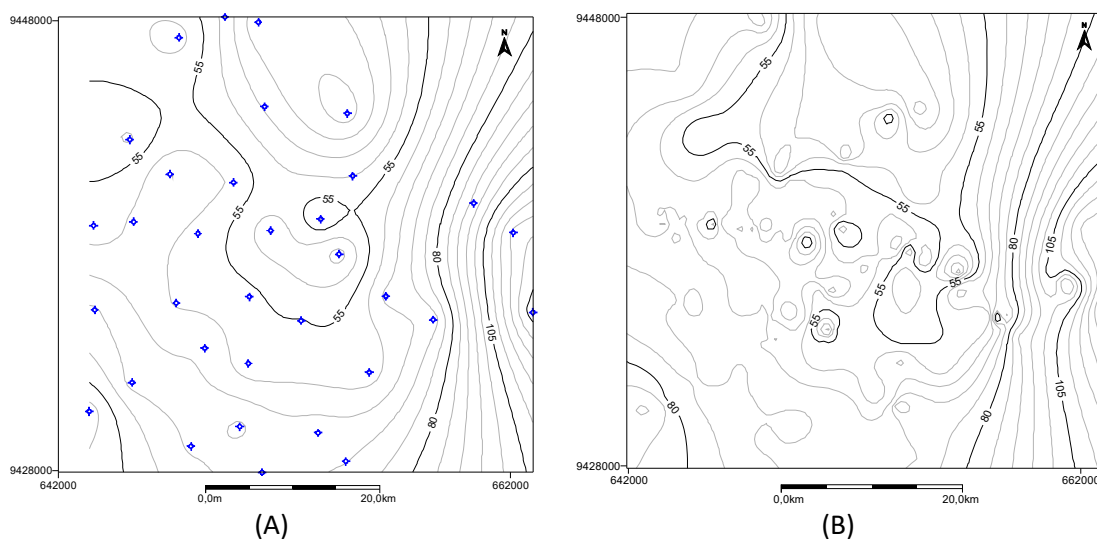


Figura 33- Comparação entre a potenciometria feita com os poços da rede de monitoramento (A) e com todos os poços disponíveis (B)

A comparação entre as duas potenciometrias mostra que ambas apesar de diferentes no traçado são semelhantes, ou seja, as direções gerais do fluxo subterrâneo são preservadas. A potenciometria com cento e noventa e seta poços é sem dúvida mais detalhada, porém em um monitoramento não é o detalhamento que se busca, e sim que a rede seja representativa. Na tabela 05 são mostrados alguns parâmetros estatísticos calculados a partir dos dois conjuntos de poços.

Tabela 05- Estatística básica para as duas potenciometrias.

Parâmetros	Potenciometria	
	c/ 197 poços	c/ 34 poços
Mínimo	32,08	32,13
Máximo	133,36	133,36
Média	64,79	63,87
Mediana	64,29	60,63
Desvio padrão	14,74	20,37
Erro Padrão médio	1,05	3,49
Coefficiente de variação	0,23	0,32

O caso de Baraúna parte do princípio que se dispõe de um conjunto de poços existentes e a partir destes se extrai os que irão compor a rede de monitoramento. Contudo, no caso de estabelecer uma rede de monitoramento em uma área onde ainda não se tem poços, ou que a quantidade deles ainda seja pequena, utilizar a técnica descrita nos parágrafos anteriores não seria possível, simplesmente pela ausência de dados.

Segundo Auge, 2006, a quantidade de poços da rede de monitoramento tem haver com a relação entre o tamanho da área. Assim, quanto maior a região a ser monitorada menor o detalhe e a escala de reprodução. O tamanho da área a ser monitorada e o grau de detalhe desejado, são os principais condicionantes da escala de trabalho. Auge, 2006, sugeriu a seguinte tabela 06:

Tabela 06 - diferentes escalas de uma área a ser monitorada.

Maior do 1:25.000	De 1:25.000 a 1:100.000	De 1:100.000 a 1:500.000	Menor de 1:500.000
Detalhe	Semidetalhe	Semiregional	Regional

A construção de poços específicos para monitoramento só se justifica para trabalhos na escala de detalhe ou semidetalhe. Para as demais escalas utilizam-se poços existentes.

Para a escala regional, ou seja, estudos de reconhecimento, que podem abranger grandes áreas, às vezes ocupando mais de um estado, ou mesmo país, o objetivo é traçar o comportamento geral da água subterrânea, com finalidade de auxílio à gestão do recurso hídrico subterrâneo, normalmente utiliza-se um poço a cada 1500,0 km².

Trabalhos a nível semiregional são aqueles que ocupam desde milhares a centenas de milhares de quilômetros quadrados, para estes casos a densidade oscila entre um poço para cada 65 a 1500 km², considerando os valores extremos da escala.

Os trabalhos de monitoramentos em escala de semidetalhe são utilizados para estudos de bacias hidrogeológicas ou unidades aquíferas individualizadas, cobrindo áreas que oscilam entre centenas a poucos milhares de quilômetros quadrados, nesses casos a densidade varia entre 04 a 65 poços por km².

Para a escala de detalhe, ou seja, estudos para avaliação de áreas específicas, como zonas urbanas, plantações, ou áreas industriais, que geralmente ocupam alguns hectares até centenas km², a densidade de monitoramento varia de 01 poço para cada 400 m² a 04 poços por km².

5.1.3 Redes de monitoramento da qualidade da água

Tal como para o monitoramento da variação potenciométrica a definição do monitoramento da qualidade depende dos objetivos, a começar pela definição dos parâmetros a serem observados. A densidade de poços de monitoramento de qualidade é definida de forma semelhante à rede de monitoramento de nível.

Um programa de coleta de amostras de água subterrânea deve ser cuidadosamente planejado, pelo menos, devem ser seguidos os quatro passos a seguir (Fetter, 2001):

1. Determinar o propósito do programa de coleta de amostras.
2. Definir os pontos de amostragem.
3. Definir os parâmetros a serem monitorados
4. Estabelecer critérios para o controle de qualidade dos resultados fornecidos pelos laboratórios

Quanto aos propósitos, pelo menos, há quatro razões principais para o monitoramento da qualidade da água subterrânea, são eles (Fetter, 2001): a) Determinação da qualidade e da química da água e uma região; b) Determinação da qualidade e da química da água de poços de abastecimento; c) estabelecer a extensão de uma pluma de contaminação; d) Monitoramento de fontes potenciais de contaminação, como forma de prevenção.

Segundo a resolução do Conama nº396 de 2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências, especifica no seu artigo 12:

Os parâmetros a serem selecionados para subsidiar a proposta de enquadramento das águas subterrâneas em classes deverão ser escolhidos em função dos usos preponderantes, das características hidrogeológicas, hidrogeoquímicas, das fontes de poluição e outros critérios técnicos definidos pelo órgão competente.

Parágrafo único. Dentre os parâmetros selecionados, deverão ser considerados, no mínimo, Sólidos Totais Dissolvidos, nitrato e coliformes termotolerantes.

No artigo 13 estabelece as condições de monitoramento:

Os órgãos competentes deverão monitorar os parâmetros necessários ao acompanhamento da condição de qualidade da água subterrânea, com base naqueles selecionados conforme o artigo 12, bem como pH, turbidez, condutividade elétrica e medição de nível de água.

§ 1o A frequência inicial do monitoramento deverá ser no mínimo semestral e definida em função das características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas dos aquíferos, das fontes de poluição e dos usos pretendidos, podendo ser reavaliada após um período representativo.

Foster e Gomes, 1989, afirmam que o requisito fundamental dos programas de monitoramento é determinar a variação espacial e temporal da qualidade das águas subterrâneas.

A frequência de amostragem dependem dos objetivos do monitoramento e da profundidade dos poços (Harter, 2003). Poços de bombeamento com mais de 100 m de profundidade a amostragem pode ser feita anualmente, uma vez que a variação da qualidade da água é lenta. Nos poços rasos, principalmente para abastecimento doméstico, a amostragem deve ser feita uma, ou duas, vezes ao ano. Quando há possibilidade da variação da qualidade da água ocorrer em um curto prazo de tempo, por exemplo, contaminação bacteriológica, ou por ferro, ou outra fonte de poluição

qualquer, uma amostragem mais curta é necessária. Nestes casos, a amostragem pode variar de mensal a quadrimensal. Situações particulares necessitaram de abordagem específica.

5.2 MONITORAMENTO NO MUNDO

Koreimann *et al.*, 1996, publicaram o relatório *Groundwater monitoring in Europe*, para a Agência Ambiental Europeia-AAE, para apresentar a situação e os procedimentos adotados pelas redes de monitoramento de qualidade e quantidade da água subterrâneas nos países membros da Comunidade Europeia - CE. O trabalho foi baseado em um questionário enviando a dezessete países, de um total de dezoito, da CE. Foi constatado que as redes de monitoramento da qualidade da água subterrânea são mais recentes, a maioria delas implantadas entre os anos de 1970 e 1980, exceto a da França, que é a mais antiga, foi iniciada em 1902. Por outro lado, as redes de monitoramento dos níveis de água são bem mais antigas, sendo primeira delas instalada em 1845, na França, e as demais instaladas no início do século XX.

Uma deficiência percebida foi a falta de padronização entre as agências dos países da CE. Em 1998 foi criada a EUROWATERNET, que é uma rede para o monitoramento integrado da qualidade e da quantidade dos recursos hídricos, superfície e subterrâneo. Cujo guia de implementação foi lançado pela AAE (Nixon, *et al.*, 1998)

Em 22 de dezembro de 2000, entrou em vigor a Diretiva 2000/60/EC (*“Water Framework Directive”*), *“que estabelece ações comunitárias no domínio da política da água, visando proteger e melhorar as condições dos corpos d’água na Europa e estabelece como unidade básica, a Bacia Hidrográfica.”* (Dias, *et al.*, 2008)

Jousma e Roelofsen (2004) fizeram um levantamento em cento e oitenta países, por meio de questionários, dos quais apenas quarenta responderam. Em uma fase posterior, com base na literatura, encontram sessenta países com programa de monitoramento. Perceberam também que a quantidade de artigos científicos sobre o monitoramento das águas subterrâneas era pequena. Explicaram esse fato justificando que um programa nacional de monitoramento, muitas vezes fornece dados para as estratégias de gestão, apresentados na forma de relatórios técnicos e raramente publicados como artigos científicos. Concluíram também que os programas de monitoramento mais abrangentes estão na Europa, Estados Unidos e Ásia e os mais deficientes na África, América Central e do Sul.

Nos Estados Unidos da América o monitoramento da água subterrânea fica ao encargo do Serviço Geológico Americano-USGS, que vem lentando dados de nível da água há mais de um século. Existem também redes locais, cujos objetivos e operação dependem dos projetos a elas associados. O USGS trabalha fortemente para integrar essas redes e que sejam obtidos registros de níveis de água de forma sistemática e abrangente. A rede de monitoramento nos Estados Unidos é composta por mais de vinte mil poços, que é operado pelo próprio USGS e entidades parceiras. A frequência de observação é bastante variada, mas no mínimo anual. A rede automática conta com mais de mil e cem poços (CPRM, 2009).

Na tabela 07 são apresentados alguns países com redes de monitoramento de qualidade e/ou de nível da água subterrânea, onde é indicado o foco do monitoramento e a frequência de observação. Koreimann *et.al*, 1996; Jousma e Roelofsen 2004.

Tabela 07- Informações de monitoramento de vários países.

Países	Foco	Frequência
Dinamarca	Qualidade/Quantidade	Trimestral
Itália	Qualidade	Semestral
China	Qualidade/Quantidade	
Holanda	Qualidade	Anual
Áustria	Qualidade	Trimestral
Coreia do Sul	Qualidade/Quantidade	6h (automático)
Noruega	Qualidade	Semestral
França	Qualidade/Quantidade	Semestral
Grã-Bretanha	Qualidade	Anual
Letônia	Qualidade	
Estados Unidos	Qualidade/Quantidade	Automático
Canadá		
Espanha	Qualidade/Quantidade	Trimestral (automático)
Portugal	Qualidade/Quantidade	Semestral
Alemanha	Qualidade/Quantidade	Semestral
Finlândia	Qualidade/Quantidade	Mensal (automático)
Grécia	Qualidade	Trimestral
Suécia	Qualidade/Quantidade	Automático

A estrutura e os objetivos dos diferentes programas de monitoramento de águas subterrâneas no mundo, diferem consideravelmente entre si, a começar pelos objetivos. A maioria dos programas concentram-se no aspecto da qualidade. Essas diferenças refletem principalmente os problemas em cada país. Onde a água é mais escassa o foco

principal e a quantidade, mas onde é abundante e há riscos de contaminação antropogênica, com ameaça a saúde pública, inevitavelmente o foco principal e a qualidade (Jørgensen e Stockmarr, 2009).

5.3 MONITORAMENTO NO BRASIL

No Brasil o monitoramento de água subterrânea sempre foi uma atividade marginal. Mas que gradativamente vem ganhando a devida importância. No Brasil os programas de governo se sobrepõem aos programas de Estado, e a implantação de uma rede de monitoramento é eminentemente uma atividade de longo prazo e contínua. Devido a sua natureza subterrânea, não desperta a atenção dos gestores, que preferem deslocar recursos financeiros para programas que possuam mais visibilidade e que atraiam mais votos.

Em 2006 a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas organizou o I Simpósio Latino-Americano de Monitoramento dos Recursos Subterrâneos, na cidade de Belo Horizonte, MG. Como não despertou a devida atenção essa iniciativa não vingou, sendo essa a única edição do evento.

Uma das ações que apontam para uma mudança de paradigma é a Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas – RIMAS, coordenada e planejada pela Agência Nacional de Águas – ANA, e implantada e operada pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Os primeiros poços foram implantados em 2009, sendo previstos, inicialmente, duzentos poços, dos quais, cem seriam poços já existentes e cem construídos especificamente para esse fim (CPRM, 2009). Atualmente a rede dispõe de trezentos e oitenta poços, ultrapassando a previsão inicial (<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/>).

São realizadas medidas diárias do nível estático, registrado em sensor automático. O monitoramento da qualidade é feito por amostras de água coletadas a cada cinco anos, sendo a primeira no momento da instalação do poço (CPRM, *op. cit.*)

No Estado de Pernambuco há treze poços da RIMAS, sendo dois na bacia de Mirandiba, aquífero Tacaratu, três em Recife e um em Itapissuma, na Bacia Paraíba, aquífero Beberibe, dois em Serra Talhada e um em Calumbi, na Bacia de Betânia, aquífero Tacaratu, um em Inajá, um em Ibimirim, um em Tupanatinga, um em Buíque, Bacia do Jatobá, aquífero Tacaratu (<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/>).

Além da RIMAS, há as iniciativas estaduais, destacando-se São Paulo e Minas Gerais. Em São Paulo o monitoramento da Qualidade da água e o nível da água são monitorados em cento e oitenta e quatro poços tubulares que é realizado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental-CETESB, semestralmente (CPRM, 2009)

Em Minas Gerais o monitoramento vem sendo feito pela Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais – COPASA, que monitora 600 poços há vinte anos, vazão, nível dinâmico e horas de funcionamento. (CPRM, *op. cit.*)

No Rio Grande do Norte a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – Semarh-RN monitora o aquífero Jandaíra, na região de Baraúna/Mossoró. É monitorado apenas nível da água e a rede é composta por cento e trinta e quatro poços, com início dos registros em maio de 2003. No entanto, a observação sistemática é feita apenas em uma parcela reduzida, cerca de cinquenta poços. Há poços que desde do início das observações até a data de hoje tem apenas um único registro. Nos poços com maior frequência de observação o intervalo médio é de sessenta dias. (Demetrio, *et al.*, 2016).

A APAC iniciou em 2012, na Região Metropolitana do Recife, a instalação, em setecentos e trinta e seis poços, sensores para monitoramento da vazão e do nível da água, operados por telemetria. Em alguns dos poços também foram instalados sensores para monitorar a condutividade elétrica da água. Devido à problemas contratuais com a empresa responsável pela instalação dos equipamentos, o contrato foi suspenso sem a instalação de todos os poços. A rede ainda chegou a operar por algum tempo. A partir de 2017 uma nova empresa foi contratada para concluir os trabalhos, fazer a manutenção nos equipamentos instalados e colocar a rede para operar. Infelizmente até o momento esses dados ainda não estão disponíveis na internet. (Mateus Souza, APAC, informação pessoal).

De um modo geral as companhias de abastecimento estaduais no Brasil, quando utilizam poços tubulares, normalmente fazem, ou já fizeram, algum tipo de monitoramento, porém, sem nenhum compromisso com a continuidade dos registros dos dados, que são fortemente influenciados pela disponibilidade de recursos financeiros, e de decisões das diretorias às quais os serviços de monitoramento ficam subordinados.

6 POÇOS DE MONITORAMENTO NA RNEST

Para a execução do monitoramento do freático na área da RNEST, e outras atividades distintas, foi elaborado um projeto de pesquisa com a Universidade Federal de Pernambuco, que ficou sob a coordenação do prof. Dr. Moacir Cunha de Araújo Filho, do Departamento de Oceanografia. A vigência do projeto foi de janeiro de 2008 a dezembro 2010. Em 2011 foi elaborado um segundo projeto que vigeu até maio de 2016.

No primeiro projeto foi previsto a construção de cinco poços, sendo dois na área da RNEST e três em uma área no Porto de Suape, por onde passariam os oleodutos. O objetivo desses poços seria investigar possíveis contaminações do solo e da água subterrânea, uma vez que, a área era utilizada para abastecimento de caminhões de transporte de combustíveis. Portanto, sem nenhuma relação com as recomendações do EIA.

Como os poços da área do Porto de Suape fogem ao escopo desse trabalho, não serão mais citados nos próximos parágrafos.

A escolha da posição dos poços foi feita pelos pesquisadores do Laboratório de Hidrogeologia-Labhid, em conjunto com o pessoal da RNEST e do Consórcio de Construção. A participação desse grupo teve como um dos objetivos não atingir, durante a construção dos poços, estruturas construídas no subsolo, principalmente dutos com produtos inflamáveis.

Para a denominação dos poços de monitoramento foi utilizada a sigla **PM** de **Poço de Monitoramento**, seguida da sigla **RAL** de **Refinaria Abreu e Lima**, mais o número de ordem da locação.

A construção dos poços de monitoramento foi feita pela Empresa de Geologia e Perfuração de Poços – Emgepp, utilizando o método rotativo, com fluido de perfuração à base de CMC e circulação direta. A figura 34 mostra uma visão geral do canteiro de obras, no momento da construção do poço PMRAL-01.

A construção dos poços foi conduzida de acordo com normas técnicas da ABNT NBR-13.895 de julho de 1997 (Norma para Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem).



Figura 34 - Visão geral do canteiro de obras.

Foram coletas amostras a cada 0,5m de profundidade. Por conta da dominância das argilas os poços produzem águas turvas. Com o perfil litológico praticamente da mesma natureza, não foi possível selecionar trechos preferenciais para a instalação dos filtros, dessa forma, todos os poços seguiram o projeto padrão previamente elaborado.

A água utilizada para preparação do fluido de perfuração, bem como para os demais processos que necessitam de água, como a limpeza do poço, cimentação, descida do pré-filtro, entre outros, foi de origem conhecida (poço tubular e caminhão pipa de água potável), de forma a evitar possíveis contaminações.

Todos os poços foram perfurados com broca tricônica de 4³/₄” e revestidos com tubos geomecânicos de 2 polegadas de diâmetro e filtros com ranhura de 0,5mm. O pré-filtro utilizado teve a granulometria variando de 1 a 3mm. A Figura 35 mostra o momento da colocação do pré-filtro no poço PMRAL-02.



Figura 35 - Colocação do pré-filtro.

Após a instalação dos revestimentos, filtros e pré-filtro, seguiu-se a fase de limpeza, Figura36, que é a injeção de água limpa para retirada do fluido de perfuração, que em geral durou cerca de uma hora, seguindo-se imediatamente o desenvolvimento do poço, feito com um compressor, Figura37. Nos poços em que o teor de argila era alto, como esperado, não se conseguiu deixar a água limpa por completa, sendo o poço PMRAL-02 o que apresentou a maior dificuldade para desenvolver, devido ao alto teor de argila da formação. O uso do compressor, em geral, foi por cerca de duas horas.



Figura36–Fase de limpeza nos poços de monitoramento.



Figura 37 - Desenvolvimento do poço pelo método *air-lift*.

Como dito, no primeiro projeto de pesquisa estava prevista a construção de apenas dois poços de monitoramento na área da RNEST. Durante a construção do poço PMRAL-02 a sonda atingiu aos quatro metros de profundidade rocha vulcânica, provavelmente riolito. Com insistência se conseguiu chegar aos cinco metros. Devido a possibilidade desse poço secar ao longo do ano foi feita uma nova locação e construindo um novo poço. A perfuração inicial do poço PMRAL-02 não foi lacrada, mas foram colocados filtros e revestimento, a expectativa seria no caso do poço não secar ele servir como mais um poço de monitoramento, e foi denominado de PMRAL-02A. Ao longo do tempo a expectativa se concretizou, e apesar de ter apenas cinco metros de profundidade, não secou no período de estiagem.

Após a conclusão desses três poços foi feita, pela equipe de cartografia do consórcio responsável pela construção da RNEST, a determinação das coordenadas e cotas dos poços. Foram niveladas as bocas dos poços, porção do revestimento acima do terreno.

Devido aos aterros no local do poço PMRAL-01, em fevereiro de 2010, foi necessário colocar mais um metro de tubo, passando a cota da boca do poço de 5,450m

para 6,450m. No caso do PMRAL-02, as obras no local, em junho de 2010, obrigaram a retirada de dois metros de tubo, assim, a cota da boca do poço passou de 11,905m para 9,905m. As cotas apresentadas na tabela 08 são, portanto, as cotas atuais, já com as devidas correções.

Tabela08- Coordenadas e cotas da boca dos poços de monitoramento.

Poço	Utm E (m)	Utm N (m)	Cota (m)
PMRAL-01	277628,872	9071891,427	6,450
PMRAL-02	277109,922	9072047,050	9,905
PMRAL-02A	278334,336	9072638,962	4,883

Obs.: (Datum SAD69)- Zona: 25L

Os poços PMRAL-01 e PMRAL-02 têm o mesmo perfil construtivo que é apresentado na figura 38 (A) (perfis originais, sem a retirada e a colocação de tubos adicionais, comentada no item anterior). Pela sua particularidade, o poço PMRAL-02A foi o único que ficou com o perfil construtivo diferente, conforme apresentado na figura 30(B).

Foram colocadas duas seções de filtro em cada poço: a seção superior com quatro metros de comprimento e a inferior com dois metros de comprimento. A mais rasa, entre 1,0 e 5,0 metros de profundidade e a mais profunda de 7,5 a 9,5m de profundidade. O objetivo dessa disposição foi dotar cada poço com a capacidade de monitorar o freático em dois níveis de profundidade diferentes. Em princípio, as amostras de água coletadas serão uma mistura dos dois níveis, com a maior contribuição da primeira zona, a mais rasa, uma vez que, a bomba será colocada nessa seção. Caso se detecte alguma anomalia na composição da água será possível coletar água de uma seção específica para se verificar qual a contribuição de cada uma delas na anomalia detectada.

No caso do poço PMRAL-02A, devido à pouca profundidade, foi colocada apenas uma seção de filtro com quatro metros de extensão, no intervalo de um a cinco metros de profundidade.

As fichas desses poços são apresentadas nos anexos01 a 03.

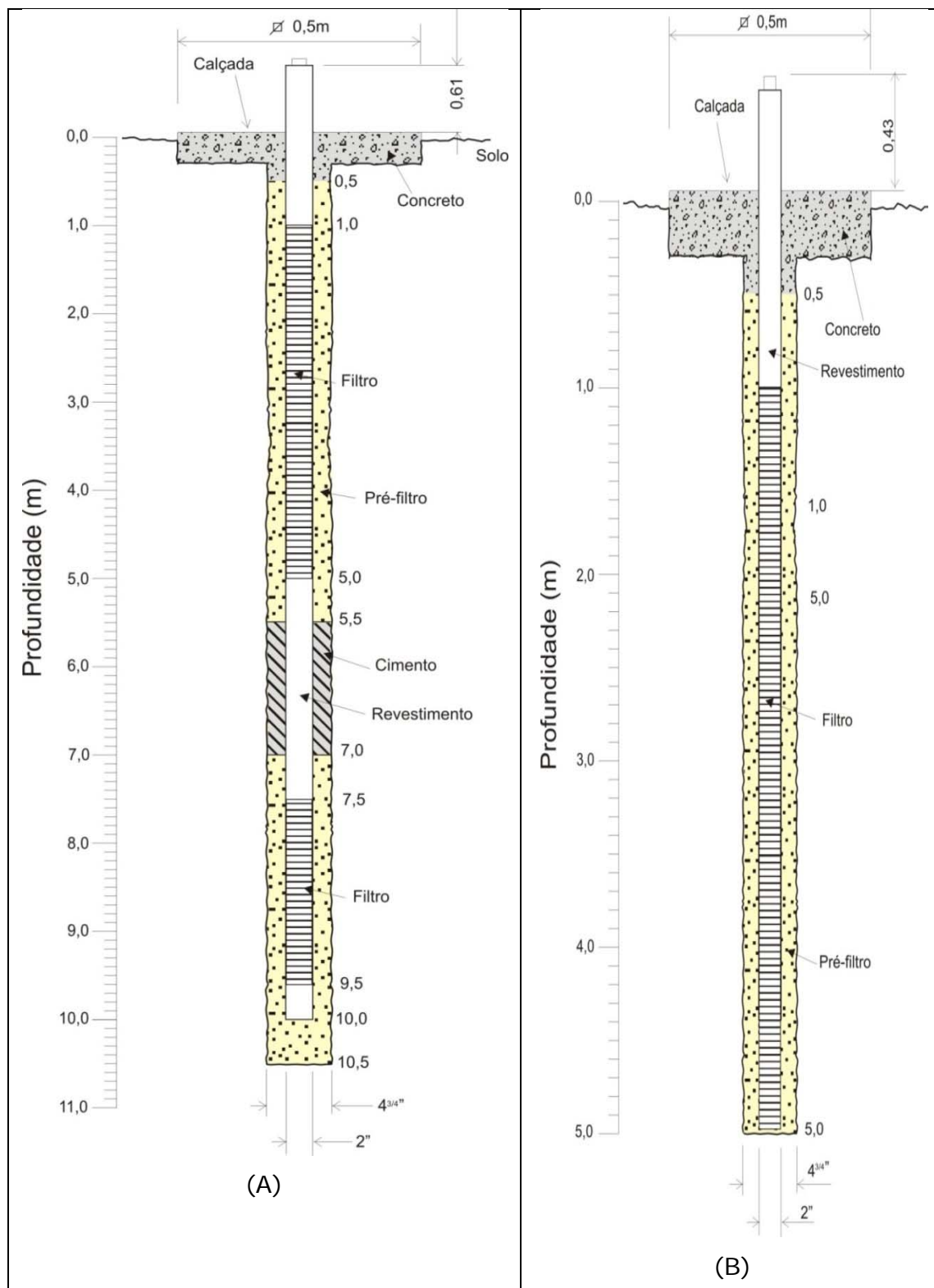


Figura 38 -Perfil Construtivo Original dos Poços de Monitoramento, do primeiro projeto de pesquisa. (A)- PMRAL-01 e PMRAL-02; (B)- PMRAL-02A .

6.1 Novos poços de monitoramento

No segundo projeto de pesquisa foi prevista a construção de quatro novos poços de monitoramento, dos dez previstos nas recomendações do projeto anterior. Esperava-se que esses novos poços se juntassem aos três poços existentes, para compor uma rede

de monitoramento de sete poços. Porém, o poço PMRAL-02 foi desativado entre a segunda e terceira campanha de monitoramento do segundo projeto, devido a modificações no *layout* da planta da refinaria, inviabilizando o uso do poço. Sobraram, portanto, os poços PMRAL-01 e PMRAL-02A, que foram ainda utilizados até a terceira campanha de monitoramento. Assim, esperava-se para o segundo projeto a utilização de seis poços de monitoramento. Devido a entraves burocráticos, o início da construção dos quatro novos poços de monitoramento levou cerca de um ano e meio. A coordenação do projeto, por parte da RNEST, assim como por parte da UFPE, decidiu que não haveria sentido continuar o monitoramento apenas com dois poços, e que o mesmo seria suspenso até a construção dos novos poços. Concluída a construção dos poços, constatou-se, apesar da busca detalhada no local, que os primeiros poços haviam sido danificados, nem mesmo sendo encontrados vestígios dos mesmos. Acredita-se que os poços tenham sido danificados pelo tráfego de veículos pesados e posteriormente aterrados.

No segundo projeto de pesquisa, no momento de selecionar os locais para os quatro novos poços, foi decidido, juntamente com a fiscalização da RNEST, selecionar logo a posição dos dez poços previstos.

Por medida de prevenção, considerando possíveis alterações no *layout* da RNEST, foram acrescentadas mais cinco posições, totalizando dessa forma quinze posições para se escolher os locais dos futuros dez poços de monitoramento.

As quinze posições foram denominadas de PZ-01 a PZ-15, cujas coordenadas são apresentadas na tabela 09, a seguir:

Tabela 09 - Coordenadas dos poços de monitoramento previstos

Poço	UTMX(m)	UTMY(m)	Poço	UTMX(m)	UTMY(m)
PZ-01	277750	9072075	PZ-09	277269	9072361
PZ-02	277598	9072386	PZ-10	276922	9072115
PZ-03	276982	9072725	PZ-11	277191	9072295
PZ-04	277411	9072085	PZ-12	276635	9072749
PZ-05	277404	9072641	PZ-13	277281	9072725
PZ-06	278124	9073052	PZ-14	278411	9073096
PZ-07	277973	9072562	PZ-15	277572	9073531
PZ-08	276956	9073405			

Obs.: Datum SAD69

No mapa da figura 39 é mostrado o posicionamento das quinze localizações, das quais foram escolhidas as quatro para construir os novos poços, que foram denominados

de PMRAL-03, PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06, que correspondem às posições PZ-08, PZ-05, PZ-07 e PZ-06, respectivamente.

Construção dos novos poços foi feita pela mesma empresa que construiu os três primeiros, utilizando os mesmos procedimentos e técnicas.

Dos quatro poços construídos três ficaram com 15 metros de profundidade e apenas um, o poço PMRAL-03, ficou com 7,15 metros de profundidade. Este poço teve apenas uma seção de filtro enquanto os demais ficaram com duas seções de filtro, sendo separadas, no espaço anular, por um tampão de cimento de meio metro de espessura. O objetivo das duas seções filtrantes, tal como nos primeiros poços, é permitir estudar o aquífero, no caso da ocorrência de alguma contaminação, em duas seções separadamente.

A locação dos poços foi feita utilizando-se três critérios, evitar atingir alguma estrutura enterrada, para tanto, técnicos da RNEST avaliavam previamente os locais dos poços, proximidade com possíveis fontes de contaminação, por exemplo, tanques de armazenamento de óleo cru e combustíveis, e, por último, que o poço tivesse mais de sete metros. Para este critério foram utilizadas as informações de 1.294 sondagens do tipo SPT.

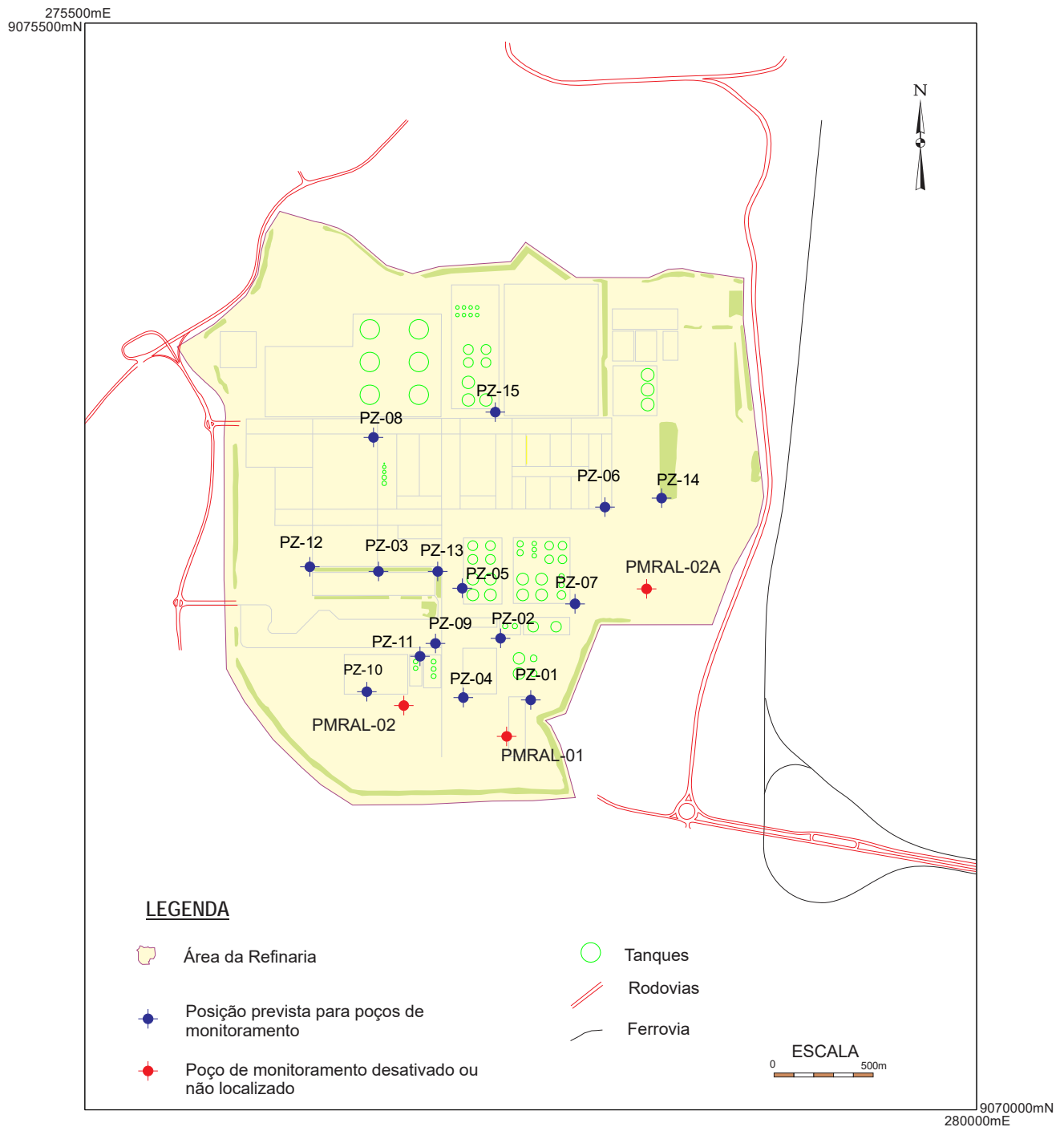


Figura 39- Indicativo de localização para a construção de poços de monitoramentos

Nas figuras 40, 41, 42 e 43 são apresentados os perfis litológicos, construtivos e do tempo de penetração dos novos poços. Nos anexos 04 a 07 são apresentadas as fichas dos poços.

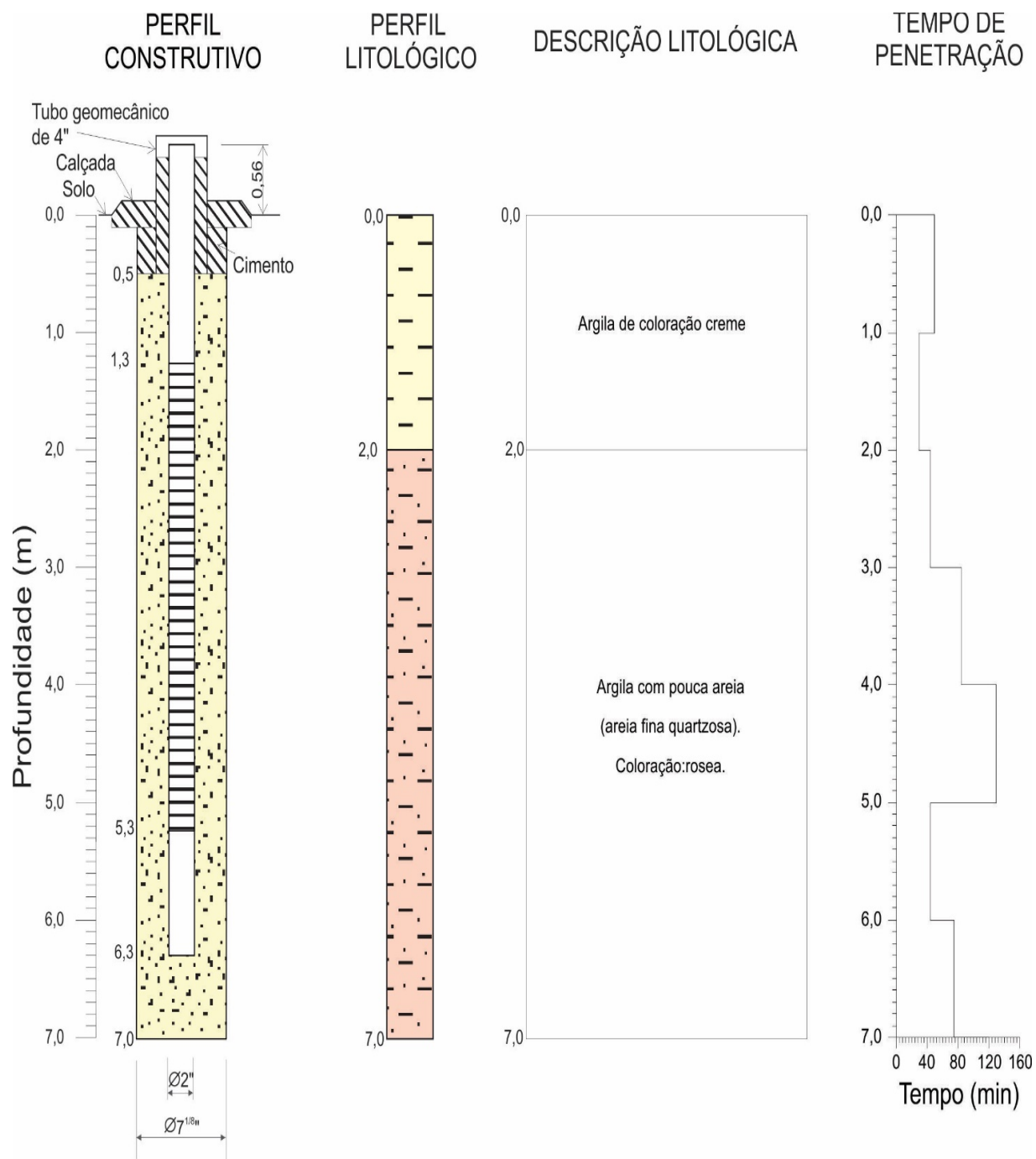


Figura 40 -Perfis do poço de monitoramento PMRAL-03.

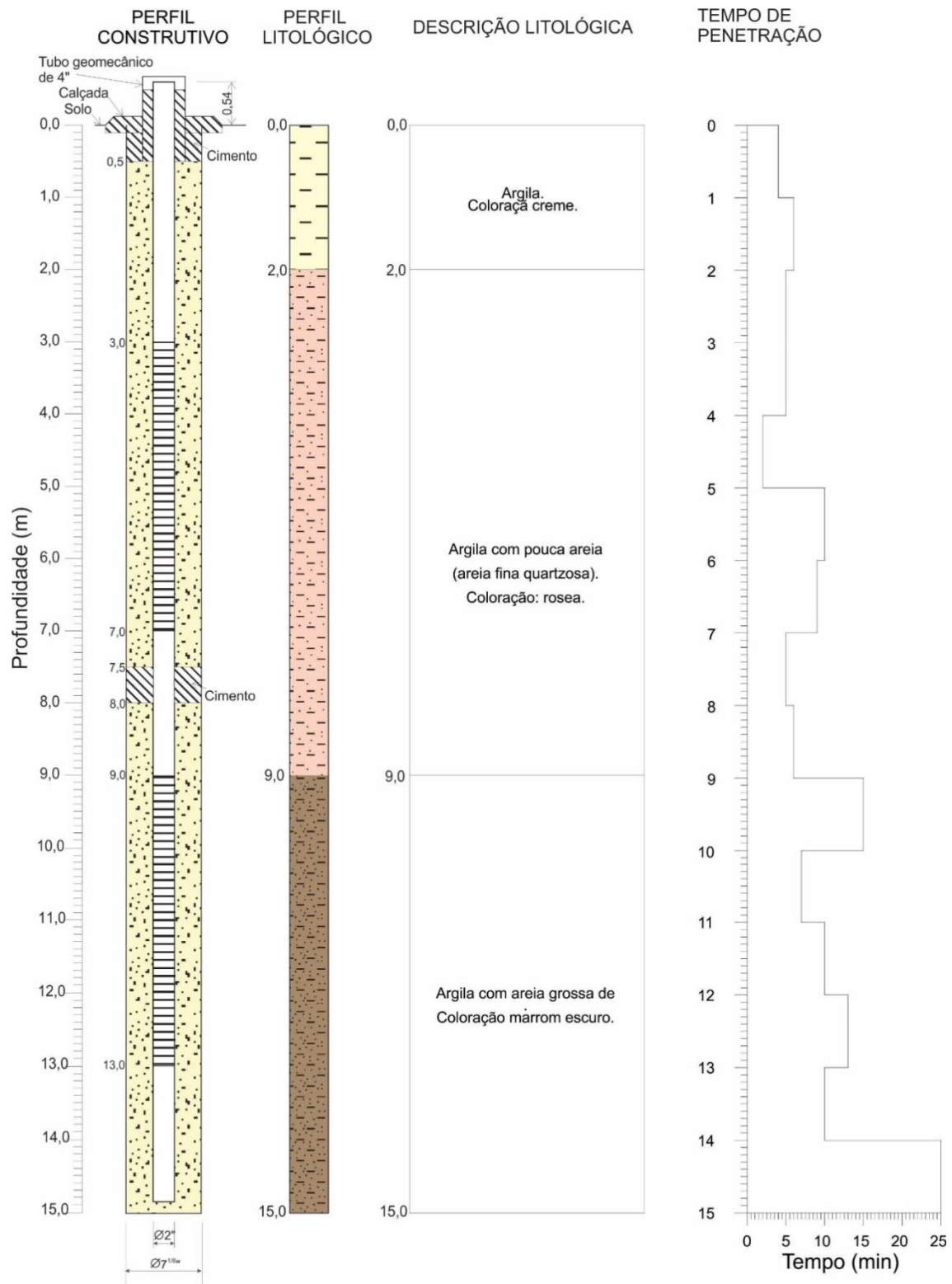


Figura 41 - Perfis do poço de monitoramento PMRAL-04.

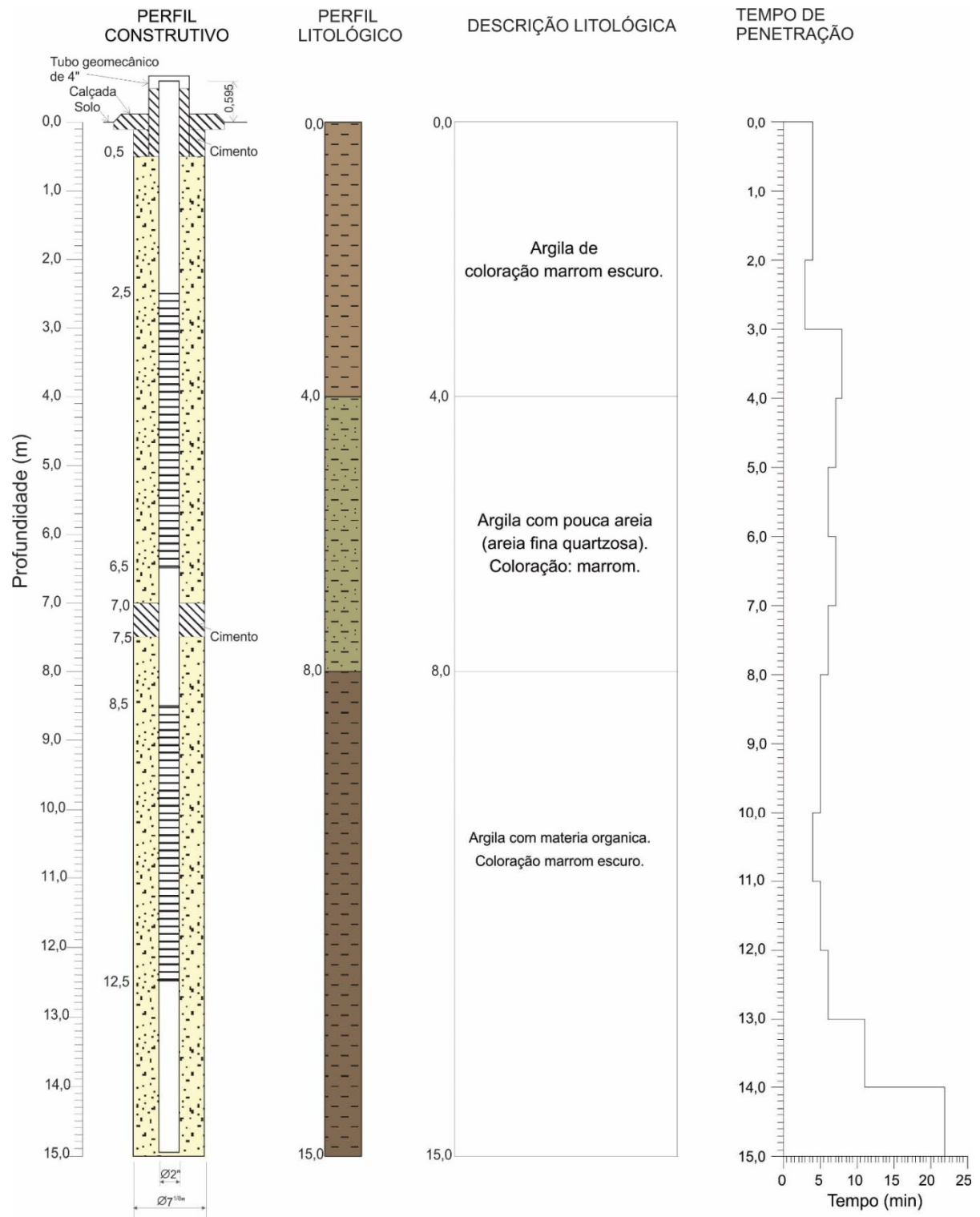


Figura 42 -Perfis do poço de monitoramento PMRAL-05.

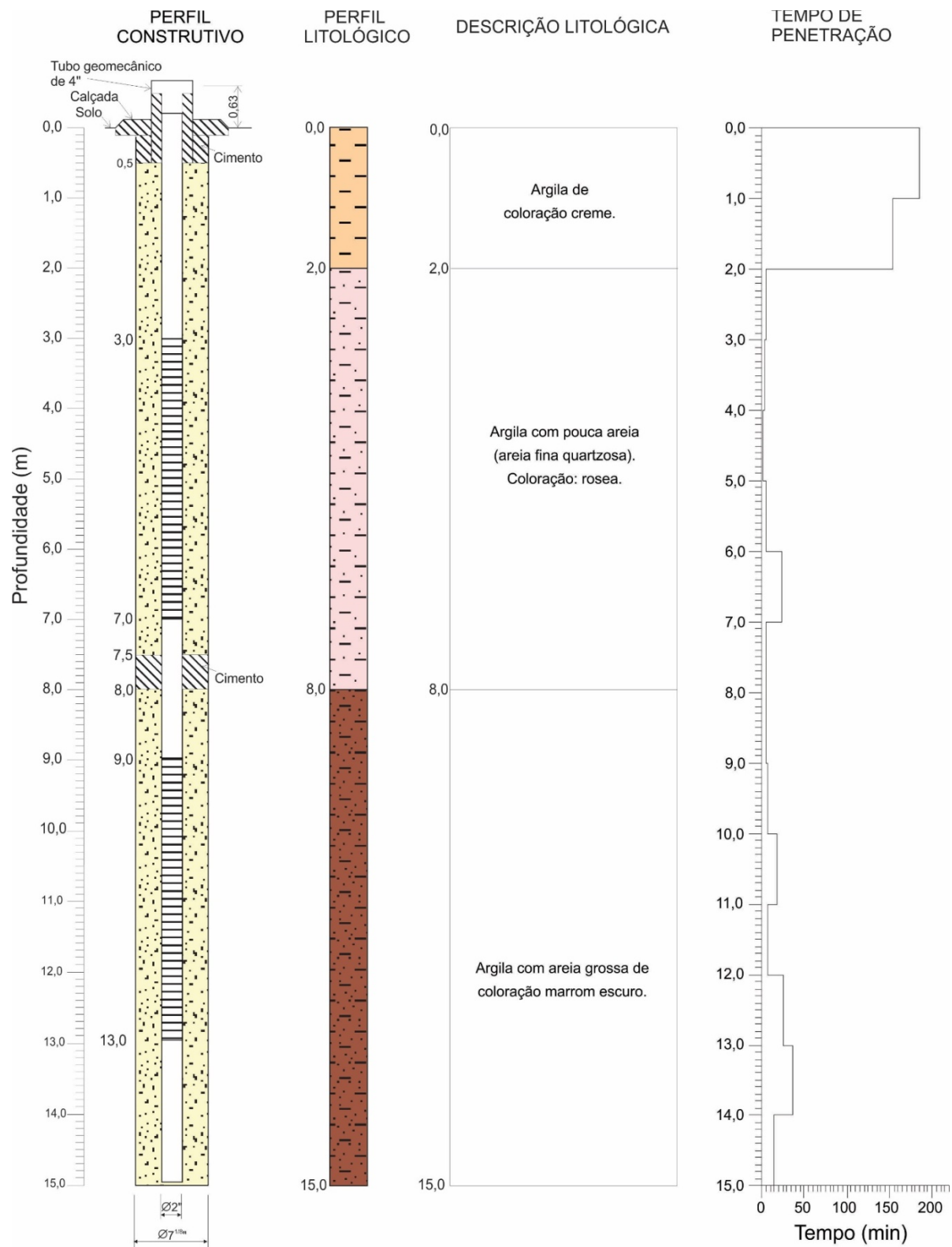


Figura 43- Perfis do poço de monitoramento PMRAL-06.

Como ao final da construção dos novos poços não se pode contar mais com a equipe de topografia do consórcio de construção da RNEST, as cotas dos poços foram

inferidas a partir dos mapas da RNEST, cujos resultados são apresentados na tabela 10, a seguir:

Tabela 10- Coordenadas e cotas da boca dos novos poços de monitoramento.

Poço	Utm E (m)	Utm N (m)	Cota Terreno(m)
PMRAL-03	276956	9073405	17,8
PMRAL-04	277404	9072641	17,8
PMRAL-05	277973	9072562	17,8
PMRAL-06	278124	9073052	17,8

Obs.: (Datum Sirgas2000)- Zona: 25L

7 MONITORAMENTO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NA RNEST

Durante os dois PBAs foram realizadas dezesseis campanhas de monitoramento, nas quais foram medidos os níveis estáticos nos poços de observação e coletadas amostras para análise físico-química e bacteriológica.

A partir da do segundo PBA, mais precisamente em dezembro de 2014 além das medidas manuais, utilizando medidor de nível elétrico, foram instalados sensores de pressão para registro automático das variações da superfície freática. Dessa forma, a análise do monitoramento de nível foi dividida em manual e automática.

7.1. MONITORAMENTO MANUAL

Como dito, ao longo dos seis anos e sete meses de monitoramento, não contínuos, foram realizadas dezesseis campanhas de campo para coleta de dados. Na tabela 11 são mostradas as datas das campanhas e os respectivos níveis estáticos (NE).

Tabela 11- Valores de nível estático (m) nas 16 campanhas de monitoramento.

	Data	Poços de observação						
		PMRAL-01	PMRAL-02	PMRAL-02A	PMRAL-03	PMRAL-04	PMRAL-05	PMRAL-06
PBA-01	16/06/2009	0,600	2,484	1,977				
	31/08/2009	0,468	1,939	1,833				
	07/10/2009	0,609	2,629	2,211				
	09/12/2009	0,895	3,930	2,761				
	23/02/2010	0,538(*)	2,815	2,753				
	15/04/2010	0,483(*)	SA	2,647				
	10/06/2010	0,368(*)	3,83(*)	2,206				
	27/07/2010	0,203(*)	3,357(*)	1,678				
PBA-02	13/09/2011	1,374(*)	6,025(*)	1,431				
	31/01/2012	2,418(*)	5,925(*)	2,037				
	14/02/2013	1,960(*)	SA	3,032				
	02/12/2014				3,385	6,493	7,900	6,380
	09/02/2015				2,740	6,940	8,630	6,842
	22/04/2015				3,450	6,780	8,160	6,420
	10/09/2015				3,350	6,120	7,190	5,685
	21/01/2016				3,390	6,505	8,360	7,635

Obs.: SA – Poço sem acesso para medir NE; (*) Boca do poço foi alterada devido às modificações do terreno no entorno do poço.

Conforme indicado na tabela 11, e descrito anteriormente foi necessário corrigir algumas medidas de NE por conta de obras no entorno dos poços PMRAL-01 e PMRAL-02. No primeiro houve necessidade de aterro, o que obrigou a colocação de um metro a mais de revestimento, fazendo com que a boca do poço subisse na mesma proporção, assim as medidas de NE desse poço, a partir de fevereiro de 2010, foram corrigidas para a boca de poço original, ou seja, as medidas realizadas em campo foram diminuídas de um metro.

Para o poço PMRAL-02 foi o contrário, houve um rebaixamento do terreno em cerca de três metros, conforme mostrado na figura 44, o que obrigou a retirada de dois metros de revestimento, consequentemente a posição da boca do poço também diminuiu. Devido a nova referência dos NEs, a partir de junho de 2010 as medidas de campo foram corrigidas para se manter o mesmo referencial (boca de poço na época da sua construção), tal como no poço PMRAL-01.



Figura44 - Condições no local do PMRAL no dia 15/04/2010.

Como todos os poços de monitoramento não foram construído em uma mesma época, nem tão pouco os primeiros poços construídos não permaneceram até o final do PBA02, será feita inicialmente a análise dos poços PMRAL-01, PMRAL-02 e PMRAL-02A, que foram utilizados durante todo o PBA 01 e nas três primeiras campanhas do PBA 02. No gráfico da figura 45, são apresentadas as curvas desses três poços. Na parte superior é apresentado o hietograma do posto 491¹, para o mesmo período de observação.

¹ Dados obtidos na página da APAC: <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>

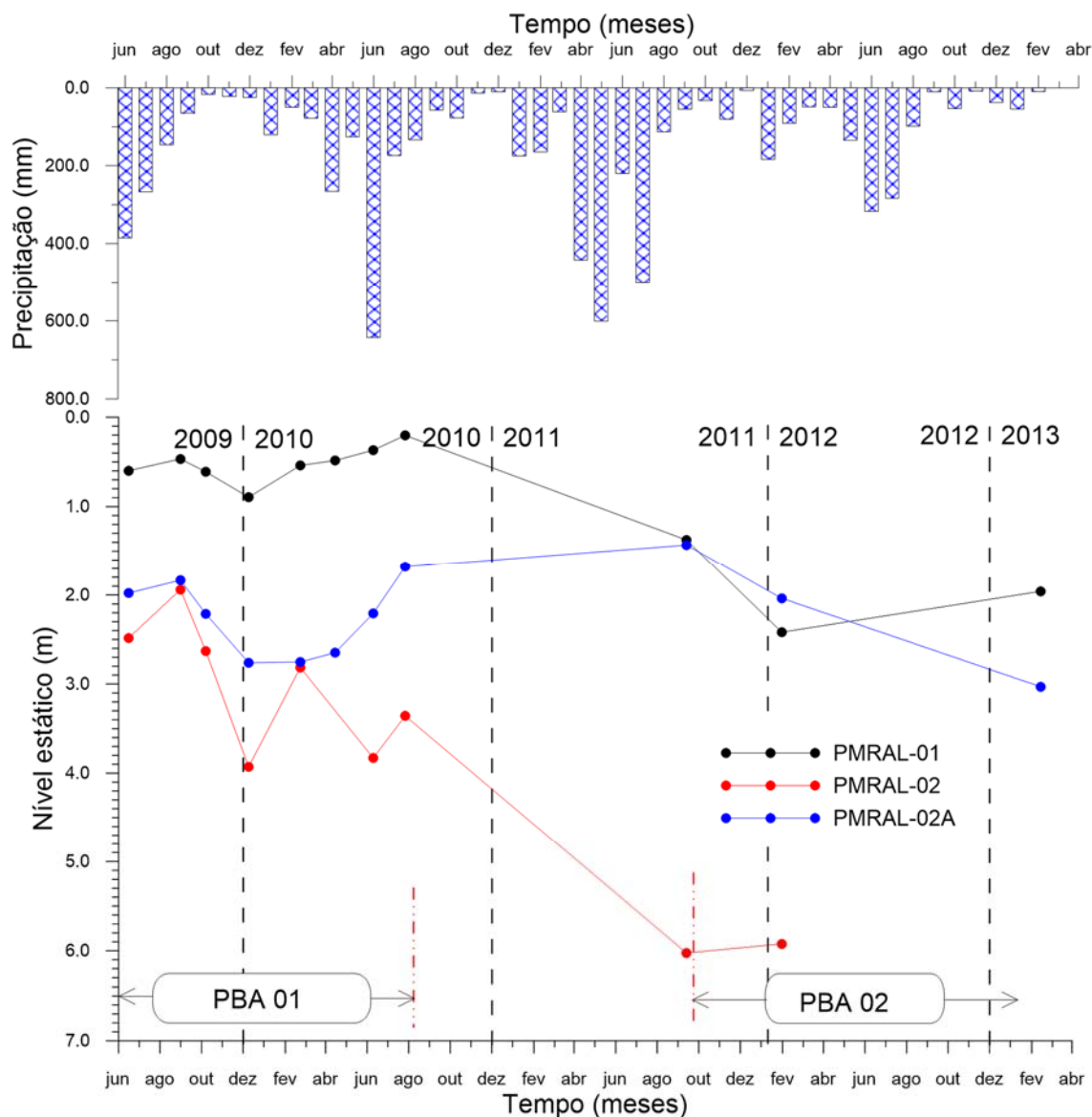


Figura 45 - Variação dos níveis estáticos dos poços PMRAL-01, PMRAL-02, PMRAL-02A e da precipitação entre junho/09 e março/13.

A análise da figura 45 mostra que o poço PMRAL-02 foi o que apresentou maior oscilação do NE, cerca de quatro metros. Isto deve-se basicamente as alterações da topografia no local do poço, conforme comentários anteriores. Além do rebaixamento do terreno, também foram feitas escavações para instalação das tubovias, isso provocou uma drenagem do terreno e consequentemente o rebaixamento da superfície freática.

Para poço PMRAL-01 observa-se patamares diferentes do NE entre os dois PBAs. No segundo os NEs estão mais profundos, isso por conta de rebaixamento do freático para construção das fundações de prédios que ficam em sua vizinhança.

Por último, o PMRAL-02A apresenta uma curva sem grandes variações de NE, ficando estes entre dois e três metros de profundidade. Entre o final de 2009 e meados de 2010, observa-se uma depressão na curva de monitoramento desse poço, o que se pode explicar pela diminuição das precipitações no período. Com o retorno das chuvas o NE voltou a subir. Em 2013 foi quando se registrou o NE mais baixo nesse poço, que também pode ser explicado por estar num período de forte estiagem, como mostra o hietograma.

Como visto, apenas o poço PMRAL-02A, por estar em uma área afastadas de canteiro de obras não sofreu influências externas. Porém, os dados observados não permitem estabelecer com segurança uma correlação do NE com as chuvas, isso apenas por conta da frequência de observação, que, para tanto, deveria ser mensal, conforme demonstrado no item 5.1.2.2

No gráfico da figura 46 são apresentadas as evoluções dos NEs para os quatro poços construídos no PBA-02.

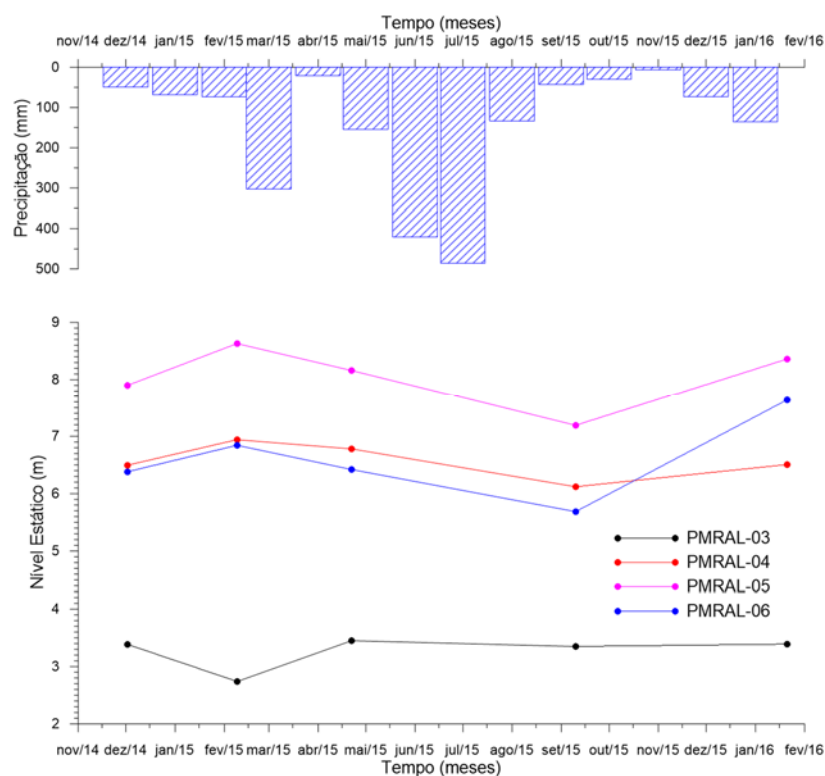


Figura 46- Evolução do NEs nos poços PMRAL-03, PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06, no período de dezembro/14 e janeiro/16.

Em nenhum dos quatro poços percebe-se qualquer tipo de tendência de aumento ou de diminuição dos NEs. As curvas são relativamente planas, com pequenas variações do NE, em geral, em torno de um metro. A maior variação registrada foi de

1,95 metros, no poço PMRAL-06. A evolução das curvas não mostra de forma clara se há alguma relação com a precipitação. Como mencionado, isto se deve a frequência da observação, que foi superior a dois meses, chegando a mais de quatro meses entre a sexta e sétima campanha de monitoramento.

7.2 MONITORAMENTO AUTOMÁTICO

A partir de 02 de dezembro de 2014 foram instalados, nos quatro poços, sensores automáticos para o registro da variação do NE. Esses sensores, na realidade registram a pressão da coluna de água sobre eles mais a pressão atmosférica. Para corrigir o efeito da pressão atmosférica, foi instalado um sensor específico no PMRAL-03. Fazendo-se a correção da pressão atmosférica obtém-se o registro apenas da variação da coluna de água, que é a informação desejada.

A pressão atmosférica entre 21/01/2016 e 16/01/2017, na área da RNEST, variou 0,156 metros, enquanto a variação máxima diária foi de 0,054m e a variação mínima diária foi de 0,020m. Esses valores demonstram que nos casos em que as oscilações do NE são pequenas a variação da pressão atmosférica pode ser uma fonte de erro e consequentemente levar à falsas interpretações.

Foram utilizados sensores da Schlumberger, denominados de Diver e Baro, este último apenas para o registro da pressão atmosférica. Ambos foram programados para registro horário dos dados. No caso do Diver foram registrados a data, hora, coluna de água mais pressão atmosférica e a temperatura. Para o Baro foram registrados os mesmos dados, apenas com a diferença dele registrar a pressão atmosférica sem a coluna de água, uma vez ele fica instalado acima do nível da água no poço.

Na confecção dos gráficos foram utilizados dados diários, para tanto foi escolhido o registro das 22 horas de cada dia. Esta escolha não foi baseada em nenhum critério técnico, apenas se evitou horas da manhã, ou da tarde, por conta dos dias das coletas de amostras de água. Nestes dias os níveis seriam afetados pelo bombeamento para a coleta das amostras de água.

A última leitura realizada foi no dia 16 de janeiro de 2017, totalizando 776 dias de monitoramento contínuo, um pouco mais de dois anos e um mês.

Nos gráficos da figura 47 são apresentadas as variações diárias do nível da água. Na parte superior são apresentadas as precipitações mensais para o posto 491-Cabo (Barragem de Suape), obtidas na página da APAC.

Infelizmente alguns sensores apresentaram problemas e só foi possível o registro completo de todo o período de monitoramento, no poço PMRAL-06. Nos poços PMRAL-03 e PMRAL-05 se conseguiu o registro dos níveis da água por um período de pouco mais de um ano, enquanto para o PMRAL-04 se foram observados oito meses.

Apesar da falha em alguns sensores o volume de informação foi substancial e serviu para caracterizar muito bem que as variações do nível da água nos poços da RNEST estão intimamente ligadas com as precipitações. Percebe-se nitidamente que períodos de precipitação maiores resultam em elevação do nível da água nos poços, e que essa elevação é proporcional à intensidade das chuvas. Isto é percebido claramente no gráfico do poço PMRAL-06. O período chuvoso de 2015 foi mais intenso do que o de 2016, o que se reproduziu na variação dos níveis da água no poço. Como os eixos da coluna de água sobre os sensores estão na mesma escala nos diferentes gráficos, é possível se fazer uma comparação visual da oscilação do nível da água do aquífero. Inicialmente percebe-se que os poços PMRAL-03 e PMRAL-04, apesar das ausências de dados de alguns períodos, tem variações semelhantes, da mesma forma que os poços PMRAL-05 e PMRAL-06 são semelhantes entre si. Porém, a intensidade das oscilações no PMRAL-03 e PMRAL-04 são menores do que no PMRAL-05 e PMRAL-06. Enquanto nos primeiros as oscilações ficaram em torno de dois metros nos outros ficaram entre quatro e cinco metros.

Inicialmente imaginava-se que o comportamento hidráulico do poço PMRAL-03 fosse semelhante ao PMRAL-05, e o PMRAL-04 semelhante ao PMRAL-06, por conta das condutividades hidráulicas determinadas no Slug teste. Nos dois primeiros poços a condutividade hidráulica foi da ordem de $1,0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, nos dois últimos em torno de $1,0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

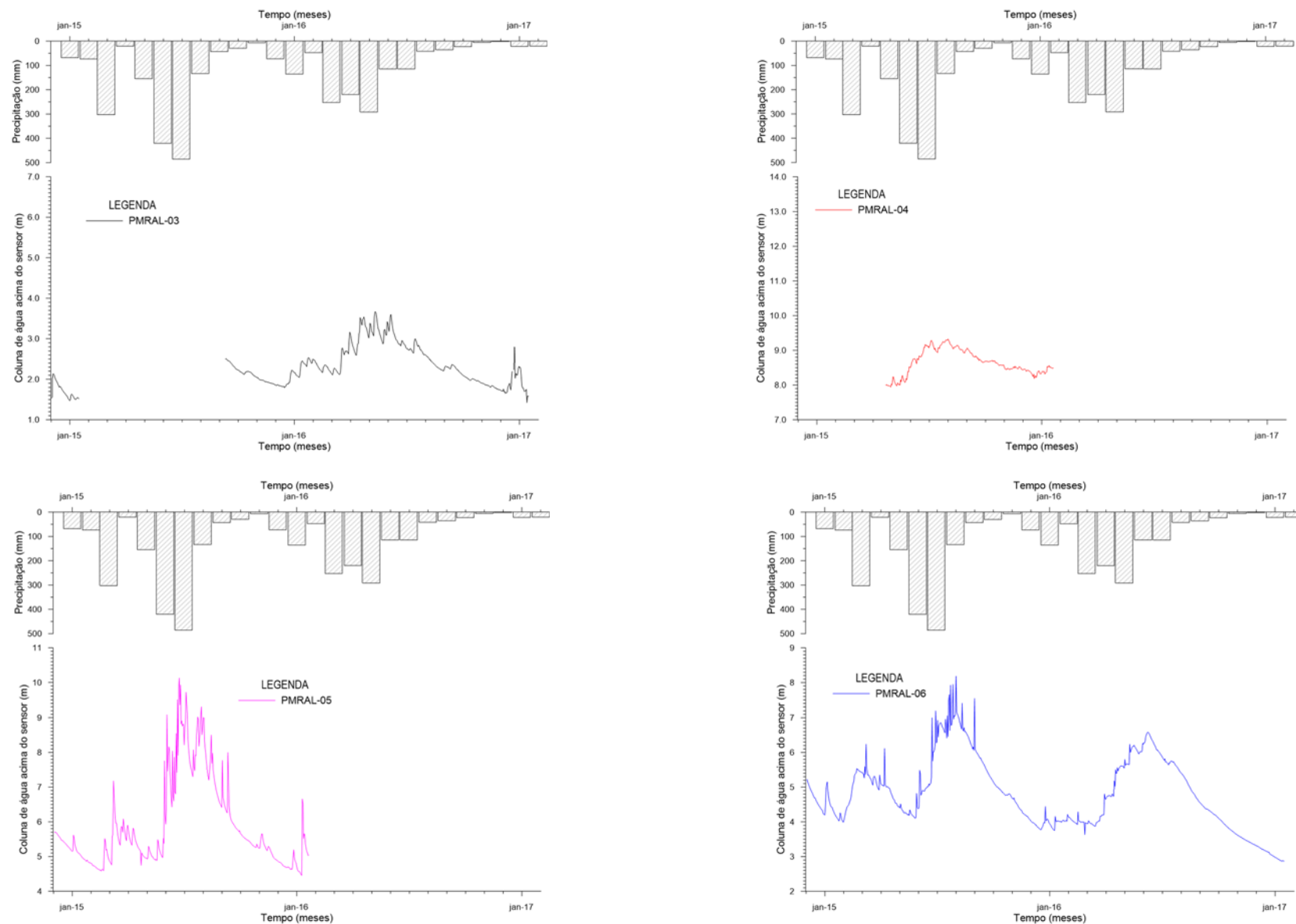


Figura 47 - Variação do nível da água nos poços PMRAL-03 a PMRAL-06, entre dezembro de 2014 e janeiro de 2017.

Porém, outro fator deve ser mais decisivo para o controle da variação do nível da água no aquífero. A hipótese provável é a proximidade dos poços PMRAL-03 e PMRAL-04 com as tubovias, conforme mostrado na figura 48. Estas são escavações com cerca de quatro metros de profundidade, e aproximadamente cinquenta metros de largura, onde são instalados um conjunto de tubos, por onde flui o óleo que vem do porto de Suape, bem como os produtos que são embarcados, além de outros fluidos. Essas escavações funcionam como dreno do freático, daí a pequena oscilação do nível da água nos poços que ficam a menos de vinte metros de distância.



Figura 48- Localização dos poços de monitoramento em relação com as tubovias.

Uma característica marcante da variação dos níveis da água nos poços de monitoramento é a semelhança com as curvas de recessão de um rio. Como não se conseguiu encontrar dados diários de descarga de rio na área de Suape, ou mesmo na Região Metropolitana do Recife, se utilizou para visualizar essa semelhança a curva do PMRAL-06 e a curva do rio Taquara, na região de Londrina, no Paraná, figura 49. Como é apenas para a visualização das formas, não há problema de utilizar dados de região tão diferentes. A curva do rio Taquara apresenta-se mais alongada porque o período de observação é de um ano, enquanto a do poço é de um pouco mais de dois anos, por isso, a forma mais comprimida.

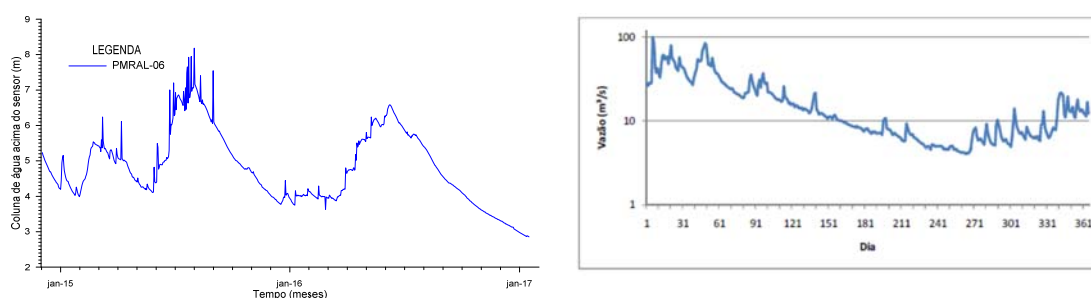


Figura 49- Comparação entre a variação do nível da água no poço PMRAL-06 e a variação do escoamento do rio Taquara no Paraná.

Quando se analisa os gráficos a nível mensal observa-se que o tempo de resposta do aquífero a precipitação é de aproximadamente de um mês. Os picos de elevação da superfície freática são defasados de um pouco mais de trinta dias do pico da chuva. Essa resposta parece compatível com a natureza argilosa do freático na área da RNEST. No entanto, quando se observa a variação do nível da água para uma frequência horária a reação parece ser bem diferente. Para realçar essa característica foi selecionado o mês de julho de 2015, por ser um mês chuvoso e ser comum a três poços. Não se conseguiu, dentro da estação chuvosa, nenhum período que abrangesse os quatro poços.

No gráfico da figura 50 é apresentado um zoom da curva para o mês de julho de 2015, dos poços PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06. Essas curvas foram elaboradas com os dados horários, enquanto a chuva mostrada na parte superior da figura é para uma frequência diária, do posto 491. As escalas do eixo tempo e coluna de água acima do sensor são as mesmas para os três poços, o que facilita a comparação visual.

É nítida a diferença da reação do aquífero no local dos três poços. São formatos e amplitudes totalmente distintos. Como a maior distância entre os poços é de cerca de 1300,0 metros (PMRAL-03 – PMRAL-05), admite-se que as precipitações não variaram ao ponto de produzirem curvas tão diferentes, assim, o mais provável que o comportamento observado nas curvas da figura 50 devam-se as variações nas características do aquífero.

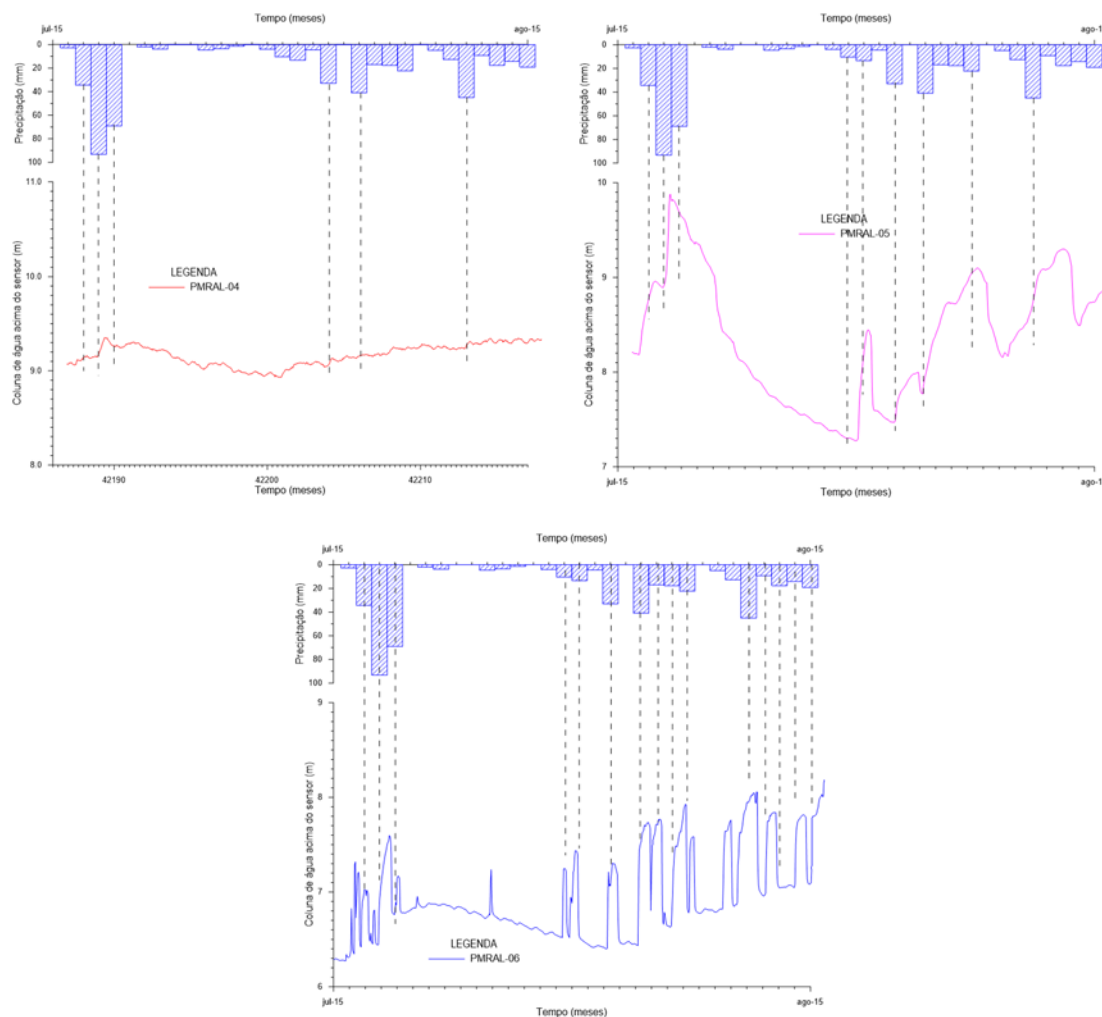


Figura 50- Variação do nível da água no poço PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06, frequência de observação horária, durante o mês de julho de 2015 e a precipitação diária do mesmo período.

A curva do poço PMRAL-06, sem os picos da variação horária, é bastante semelhante à curva do poço PMRAL-04, como se pode verificar na figura 51 a seguir:

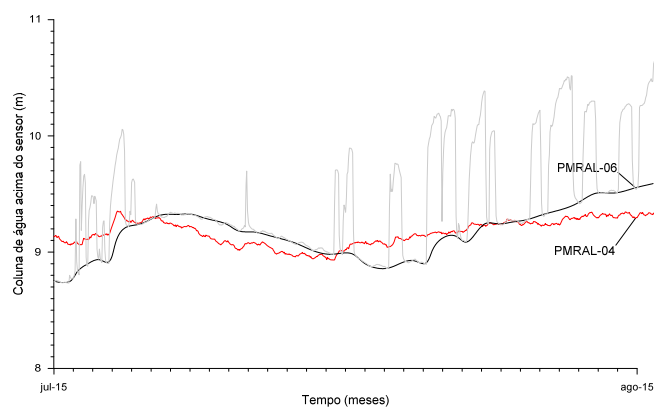


Figura 51 - Comparativo entre as curvas do PMRAL-04 e PMRAL-06 sem os picos horários.

Uma hipótese para justificar a semelhança entre essas curvas poderia ser a proximidade das condutividades hidráulicas determinadas, nos locais desses dois poços, pelo *Slug* teste, porém, quando as curvas foram analisadas para um período maior de observação, o poço PMRAL-04 foi mais parecido com o poço PMRAL-03 do que com o poço PMRAL-06. Continuando no campo das hipóteses, essa contradição aparente poderia ser explicada da seguinte forma: No período curto de observação prevaleceriam no formato das curvas a semelhança hidráulica, porém, para o período longo a drenagem pelos canais das tubovias dominariam a evolução da curva nos poços.

Outro fato que chama a atenção é a diferença de variação do nível entre os poços PMRAL-06 e PMRAL-05, sendo neste visivelmente maiores. Como a condutividade hidráulica (K) é maior no PMRAL-06, conseqüentemente a infiltração seria mais favorável, que deveria resultar em variações maiores do nível da água no poço. Todavia, não se pode esquecer da porosidade efetiva, que é o volume de água que se poder retirar, por drenagem gravitacional, de um metro cúbico do aquífero. Como K é menor no PMRAL-05, provavelmente isto se deve ao aumento do teor de silte/argila do aquífero. A porosidade efetiva, para os materiais finos, decresce com a diminuição dos grãos. Assim, a porosidade efetiva no PMRAL-05 é menor do que no PMRAL-06.

A porosidade pode ser escrita da seguinte forma:

$$S_y = \frac{V_d}{V_t} \quad (1)$$

Sendo:

S_y = porosidade efetiva

V_d = volume drenado (L^3)

V_t = volume total (L^3)

No caso da precipitação o volume drenado corresponde a infiltração efetiva no aquífero. Admitindo-se que por m^2 foram infiltrados volumes semelhantes no local dos poços analisados, se tem:

$$S_y = \frac{I}{A*\Psi} \quad (2)$$

Sendo:

S_y = posidade efetiva

I = infiltração (L^3)

A = área de ocorrência da infiltração (L^2)

Ψ = altura da coluna de água que sobe devido a infiltração (L)

Da equação (2) se tem que S_y é inversamente proporcional a Ψ . Assim, a maior oscilação dos níveis da água no poço PMRAL-05, provavelmente, está associada a uma menor porosidade efetiva, em decorrência do aquífero conter um teor mais alto de silte/argila.

Os picos observados, principalmente, nas curvas dos poços PMRAL-05 e PMRAL-06, que mostram uma resposta do aquífero, quase que imediata, à precipitação, apenas com poucas horas de defasagem entre os picos de chuva e da subida do nível da água no poço. Esse fenômeno não se pode aferir melhor porque o registro das chuvas é diário. Se os registros da precipitação também fossem horários se poderia definir com precisão o tempo de reação do freático. Chama a atenção as intensidades de reação, a variação de nível foi de aproximadamente de um metro, porém bastante curto o tempo de duração da resposta. O nível da água sobe tão rápido quanto desce, mas nunca voltando a posição anterior, sempre acima. Também se observa que a intensidade dos picos do nível da água nem sempre é proporcional as chuvas. Nos dias 15 e 16 de julho, figura 50, as precipitações registradas são relativamente pequenas, um pouco mais 10 mm, porém os picos no nível da água foram equivalentes aos observados no dia 04 de julho, quando a precipitação foi superior a 90 mm. Uma possibilidade para explicar essa incoerência seria o posicionamento do posto pluviométrico em relação aos poços. O posto 491 da APAC está cerca de 3,5 km do poço mais próximo, assim, é possível que as chuvas do dia 15 e 16, no local dos poços, tenham sido mais intensas do que as registradas. O ideal seria que a estação meteorológica fosse instalada entre os poços.

Todos os dados levantados não permitiram nem mesmo a elaboração de uma hipótese para explicar por em alguns poços aparece na curva da variação do nível da água picos tão fortes e em outros não. Uma possibilidade seria a escala utilizada em alguns gráficos. Nos gráficos da figura 51, como dito, foi utilizada a mesma escala vertical para os três poços, a fim de facilitar a comparação visual entre as curvas. Com isso, para o poço PMRAL-04, onde se observou a menor variação de nível, a curva ficou “achatada” em relação às demais. Na figura 52 é apresentada a curva do poço PMRAL-04 em uma escala diferente da anterior, de forma a eliminar o “achatamento”.

Como se pode perceber, mesmo realçada os picos praticamente não existem. Existe um “ruído” na curva que pode ser associado a precisão do equipamento, que da ordem de 2,5 cm, ou seja, a escala não favorece ou dificulta a visualização dos picos.

Diante das dificuldades encontradas, a explicação para existência desses picos será deixada para um trabalho posterior.

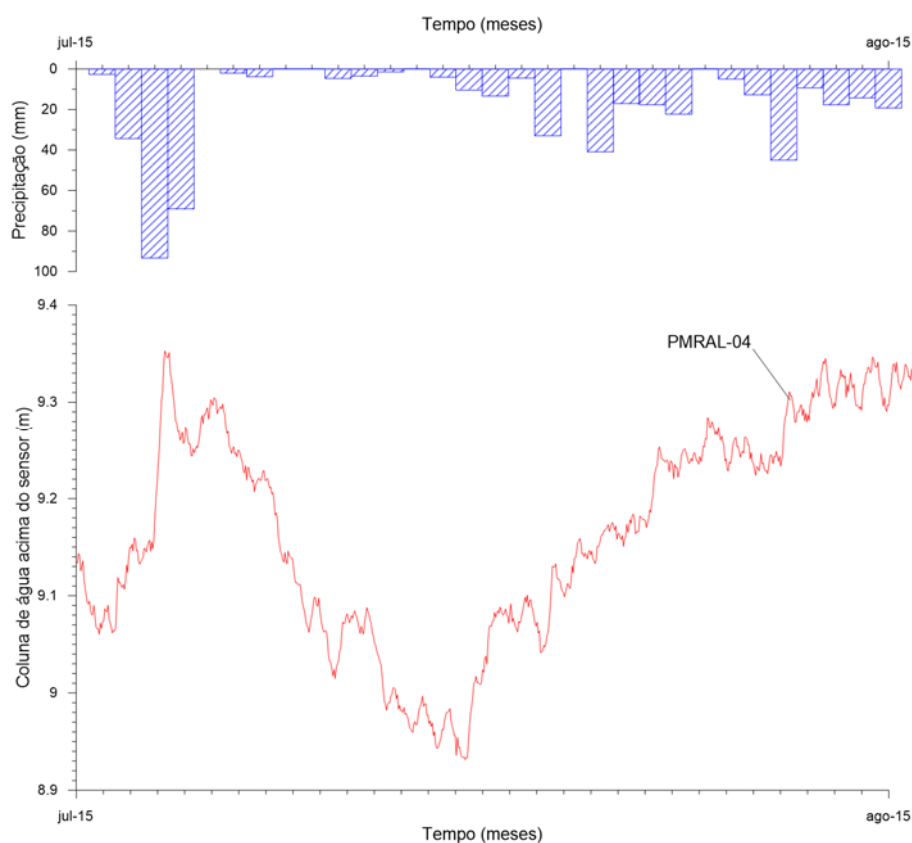


Figura 52- Variação do nível da água no poço PMRAL-04 para o mês de julho de 2015.

7.2 POTENCIOMETRIA NA ÁREA DA RNEST

Ao todo foram utilizados sete poços de monitoramento para medida do nível estático nos dois PBAs, sendo três, o PMRAL-01, PMRAL-02 e PMRAL-02A, da campanha 01 do PBA01 até a terceira campanha do PBA02, totalizando onze campanhas, e quatro poços, o PMRAL-03 a PMRAL-06, nas cinco últimas campanhas do PBA02. Infelizmente em nenhum momento os sete poços funcionaram conjuntamente, o que permitiria a elaboração de um mapa potenciométrico mais consubstanciado.

Dos dois conjuntos de poços, para o traçado da potenciometria, se deu a preferência aos do segundo PBA. Os três poços do primeiro PBA eram relativamente afastados e localizados na porção mais ao sul da RNEST, não permitindo o traçado da potenciometria de forma satisfatória. Os quatro poços do segundo PBA são mais bem distribuídos na área e foram construídos quando a topografia já estava definida, após os serviços de terraplanagem.

Cinco campanhas de monitoramento foram realizadas nos quatro poços do segundo PBA, nas quais não se percebeu grandes variações do nível estático entre as estações chuvosas e secas, como discutido no item 7.1, desse capítulo. Diante desse fato foi escolhida a última campanha, realizada no dia 21 de janeiro de 2016.

A partir das informações de cota, dados das bocas dos poços e nível estático foram calculadas as cargas hidráulicas ($h = [Z + \text{boca}] - \text{NE}$) para o freático no local de cada poço de monitoramento, apresentadas na tabela 12, a seguir:

Tabela 12- Cargas hidráulicas do aquífero freático na área da RNEST.

Poço	Boca (m)	NE (m)	Z (m)	h(21/01/16) (m)
PMRAL-03	0,560	3,390	17,8	14,970
PMRAL-04	0,540	6,505	17,8	11,835
PMRAL-05	0,595	8,360	17,8	10,035
PMRAL-06	0,610	7,635	17,8	10,775

Obs.: Boca = Extensão de tudo acima do solo; NE = nível estático; Z = cota do solo; h = carga hidráulica;

Para traçar a superfície potenciometria de um aquífero freático é importante, além das cargas hidráulicas em cada poço, observar as relações do mesmo com o relevo e a drenagem. O relevo original na área da RNEST foi completamente modificado por cortes e aterros, assim, a relação do aquífero com a drenagem das áreas no entorno da RNEST é de fundamental importância para auxiliar no traçado da potenciometria. A partir dos dados da tabela 12 e dos dados de drenagem da área foi elaborado o mapa potenciométrico simplificado na área da RNEST, apresentado na figura 53.

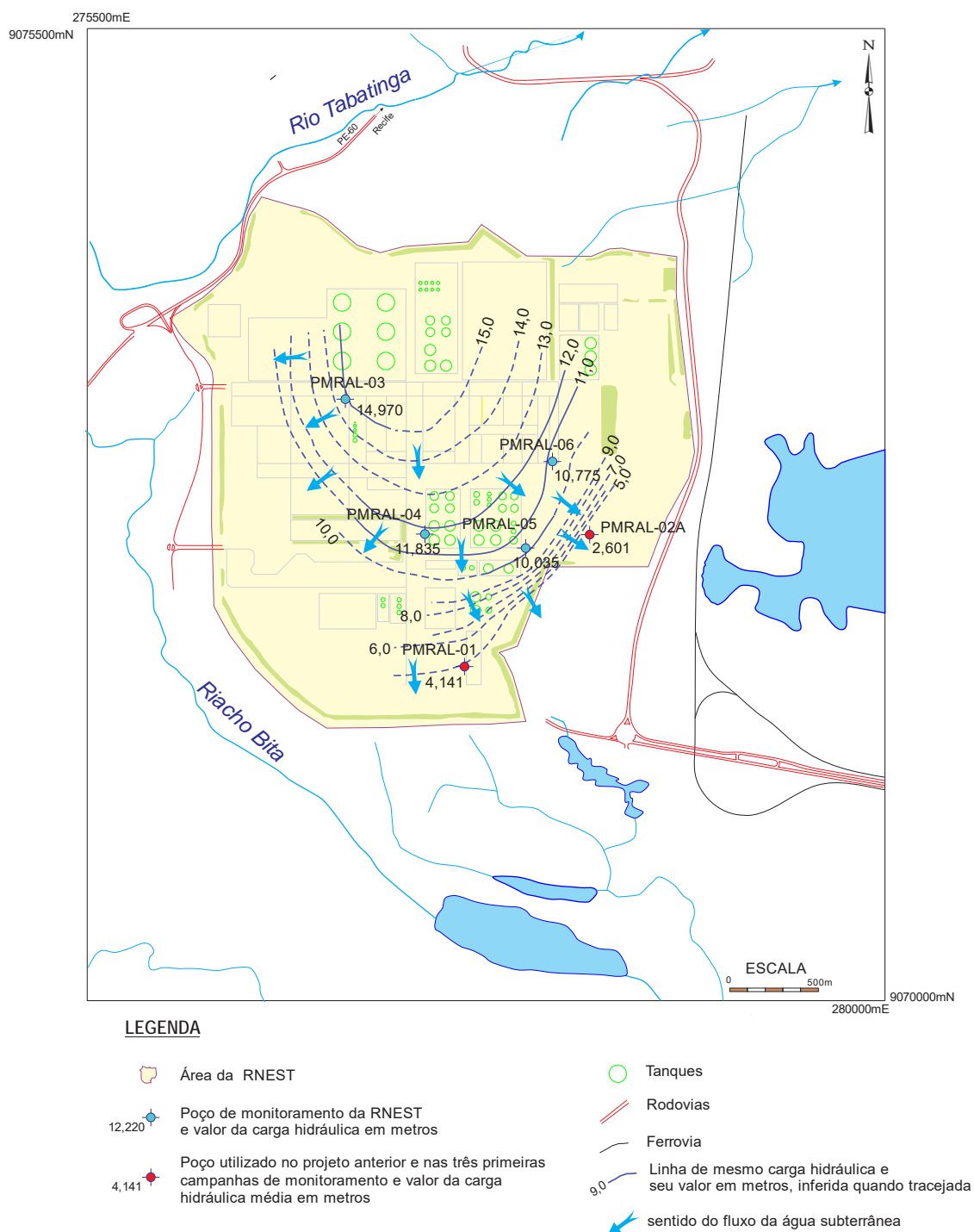


Figura 53- Potenciometria simplificada na área da RNEST em 21/janeiro/2016.

No PBA01 quem fez o nivelamento dos poços de monitoramento foi o consórcio responsável pela construção da RNEST, porém, após a construção dos poços do segundo PBA não havia mais uma equipe de topógrafos para realizar essa tarefa. Como no projeto não havia sido contemplado esse serviço a opção que restou foi utilizar as cotas dos mapas da RNEST. Como a área foi relativamente planificada, os

erros cometidos com esse procedimento não seriam significativos, permitido o traçado da potenciometria para caracterização do fluxo geral da água subterrânea.

Como se pode observar na figura 53, a drenagem é aproximadamente radial a partir da RNEST, reflexo do relevo original e do atual, que conservou a área elevada topograficamente. A consequência é que, mesmo sem nenhuma informação de carga hidráulica poder-se-ia adiantar que o fluxo da água subterrânea deveria seguir a mesma tendência da drenagem, ser radial. O levantamento das cargas, mesmo com as cotas do terreno nos locais dos poços sendo estimadas a partir de mapas, vem ao encontro dessa hipótese. Assim, o mapa potenciométrico da figura 53 mostra que o fluxo é radial a partir da área da RNEST.

Apesar de não ter sido possível medir as cargas hidráulicas nos poços PMRAL-01 e PMRAL-02A, foram utilizadas as informações históricas dos mesmos para refinar o traçado das linhas potenciométricas. No poço PMRAL-01 a variação da carga ficou entre 3,032 m e 5,520, para o poço PMRAL-02A a variação foi de 1,801 m e 3,4025m, sendo, portanto, utilizadas as médias, 4,141 m e 2,601 m, respectivamente

Observa-se um forte adensamento das curvas de mesma carga hidráulica entre os poços PMRAL-05 e PMRAL-02A, indicando um forte gradiente hidráulico, reflexo do talude existente entre os dois poços. Provavelmente, em todos os taludes que existem circundando a RNEST a potenciometria deve ter comportamento semelhante, mas que só foi detectada nesse local por conta da pequena quantidade de poços utilizada e da proximidade entre os poços PMRAL-02A, PMRAL-05 e PMRAL-06.

O mapa da figura 53 é denominado de potenciometria simplificada, basicamente por conta do número reduzido de poços utilizados, mas que junto com as informações de drenagem e relevo foi possível caracterizar, de forma representativa, a direção geral do fluxo de água subterrânea na área da RNEST.

8 QUALIDADE DA ÁGUA

Ao longo dos dois PBAs foram realizadas dezesseis campanhas de monitoramento, nas quais foram coletadas amostras de água para análises físico-químicas e bacteriológicas. Na tabela 13 são apresentadas as datas de realizações de cada campanha

Tabela 13- Data das coletas de água para análises físico-químicas e bacteriológicas.

PBA 01		PBA 02	
Data	Campanha	Data	Campanha
16/jun/2009	01	13/set/2011	01
31/ago/2009	02	31/jan/2012	02
07/out/2009	03	14/fev/2013	03
10/dez/2009	04	02/dez/2014	04
23/fev/2010	05	09/fev/2015	05
15/abr/2010	06	22/abr/2015	06
10/jun/2010	07	10/set/2015	07
27/jul/2010	08	21/jan/2016	08

Ao todo foram analisados cinquenta e dois parâmetros, porém nem todos em todas as análises.

São eles: Alcalinidade de Bicarbonatos; Alcalinidade de Carbonatos; Alumínio; Amônia; Antimônio; Arsênio total; Bário; Benzeno; Bicarbonato; Cádmio; Cálcio; Carbonato; Chumbo; Cianetos; Cloretos; Cobre; Condutividade; Cromo total; DBO; DQO; Etilbenzeno; Fenol Total; Ferro; Fluoreto Total; Fósforo; m+p-Xilenos; Magnésio; Manganês; Mercúrio; Nitrato; Nitrito; Óleos e graxas Minerais; Óleos e graxas totais; Óleos e graxas vegetal/animal; Oxigênio dissolvido; OD; o-Xileno; pH; Potássio; Selênio total; Sódio; Sólidos dissolvidos totais; Sulfeto de hidrogênio; Sulfato; Titânio; Tolueno; Turbidez; Xilenos; Zinco; Coliforme Termotolerantes; Coliforme Totais.

A nível federal o Brasil dispõe de dois instrumentos legais para estabelecer os limites das concentrações de alguns desses parâmetros para fins de abastecimento humano e ambientais, são eles: a Portaria 2914/11 do Ministério da Saúde, e a Resolução 420/09 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, respectivamente. Apesar do trabalho ser voltado mais para as questões ambientais, será utilizada a portaria do Ministério da Saúde, por ser mais abrangente e restritiva.

Nem todos os parâmetros analisados não tem valor máximo permitido (VMP) pela Portaria 2914/11, são eles: Alcalinidades, DQO, DBO, OD, Óleos e graxas, Fósforo, Titânio, Condutividade elétrica da água, Potássio e Cálcio.

8.1 COLETAS DAS AMOSTRAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A Norma ABNT NBR 15847/2010 “*estabelece métodos para a purga de poços usados para investigações e programas de monitoramento de qualidade de água subterrânea em estudos e remediação de passivos ambientais. Estes métodos podem ser usados em outros tipos de programa, mas estes não serão abordados nesta Norma*”.

Na própria Norma são estabelecidos dois métodos de purga, o de baixa vazão e o de volume determinado. No presente trabalho foi utilizado o segundo método.

Segundo a Norma, a purga de volume determinado “*consiste na remoção de determinado volume de água subterrânea do poço antes de se proceder à amostragem, com a finalidade de assegurar que água representativa da formação será coletada. Com base no diâmetro do tubo-filtro, da profundidade do poço e profundidade do nível da água, é calculado o volume de água contida no poço, que multiplicado pelo número de volumes que deve ser extraído, define o volume total de água a ser removido durante a purga. Antes do início da purga e ao final da coleta da amostra, é recomendável que sejam medidos, com sonda introduzida no poço, a turbidez e os parâmetros físico-químicos: temperatura, pH, potencial de oxirredução (ORP), condutividade elétrica (CE) e oxigênio dissolvido (OD). A quantidade de volumes de água a ser extraída do poço deve ser predeterminada no plano de amostragem e deve ser baseada em procedimentos regulatórios e nas características hidrogeológicas do local monitorado*”.

Dos parâmetros recomendados pela Norma, foram medidos em campo a CE, OD, T e pH, apenas a partir da terceira campanha, quando a sonda multiparâmetros chegou ao Laboratório de Hidrogeologia -Labhid.

Com relação ao volume de água a ser removido durante a purga, uma nota da Norma diz: “*O método de purga de volume determinado foi introduzido com base nas primeiras pesquisas desenvolvidas na década de 80 sobre amostragem de águas subterrâneas, que indicavam a necessidade de se remover em média de 3 a 5 vezes o volume de água presente no poço para assegurar que a água representativa da formação estaria presente no poço*”.

Em um poço de monitoramento, ou mesmo de produção, a água que está acima dos filtros não é renovada, ou é renovada de forma muito lenta, não sendo representativa como do aquífero. A zona de filtro permite que a água do aquífero flua através dela, mantendo a água sempre renovada, e, portanto, representativa do aquífero figura 54. Quando o sistema de coleta de amostra de água (bomba, bailer, entre outros) captam água apenas da zona de água estagnada há a necessidade de se fazer a renovação da água, de forma a se obter amostras representativas. No método do volume determinado o volume estagnado deve ser bombeado de 3 a 5 vezes, conforme já comentado.

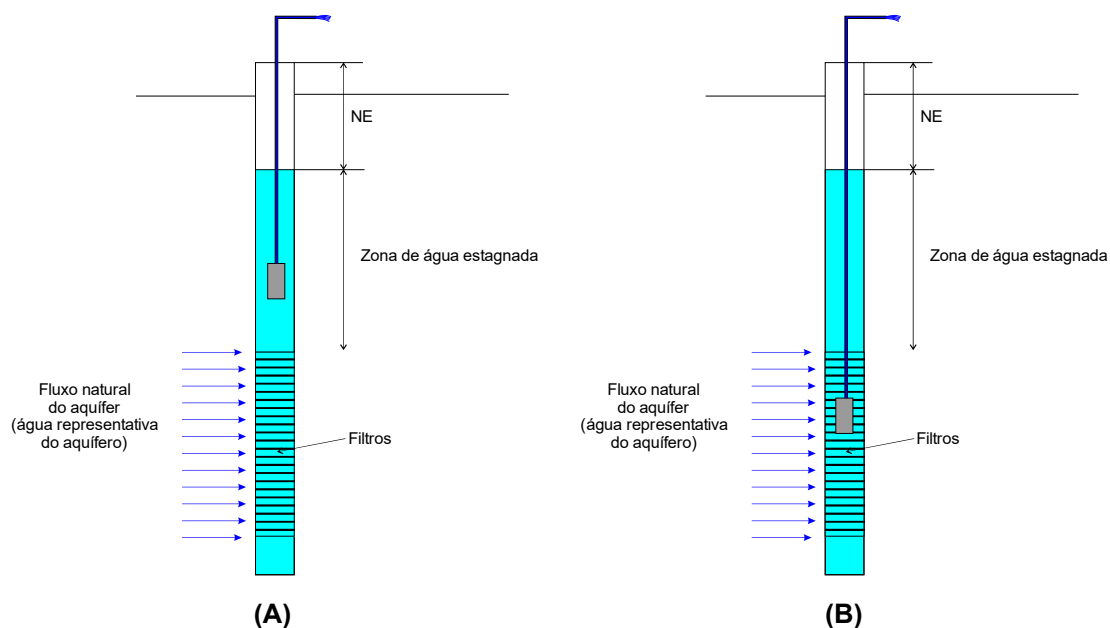


Figura 54- Diferente posicionamento do ponto de coleta.

Quando o sistema de bombeamento, para coleta de amostras de água, se posiciona diante dos filtros não há necessidade do bombeamento de um volume prévio, pois a água na zona dos filtros já é representativa. É o caso da baixa vazão.

As coletas das amostras de água foram realizadas pela equipe do Labhid, e foi utilizada uma bomba submersa de 12V, própria para ser utilizada em poços de monitoramento de 2", figura 55. Apesar da bomba ser instalada na zona dos filtros, foram bombeados duas vezes o volume de água estagnado. A vazão utilizada era de 5L/min, que apesar de baixa não é o método de baixa vazão, cujo processo de coleta é bem mais complexo e, consequentemente, mais caro.



Figura 55- Bomba utilizada para a coleta de água.

Em algumas situações, quando não foi possível coletar amostras de água utilizando a bomba, foram utilizados Bailer de polietileno descartáveis. Para cada poço foi utilizada uma única bomba, que era limpa e esterilizada no laboratório após a coleta.

Na tabela 14 são apresentados os dados utilizados para o cálculo do tempo de purga em cada poço. A profundidade utilizada não é a da perfuração, mas a da base do revestimento. O tempo de purga apresentado na tabela é o necessário para esgotar duas vezes o volume do poço. Para uniformizar a coleta foi adotado um tempo padrão de dez minutos para todos os poços.

As análises físico-químicas e bacteriológicas foram realizadas na maior parte pelo Instituto Tecnológico de Pernambuco-ITEP e pela Bioagri Ambiental Ltda, com sede em Piracicaba, São Paulo.

Tabela 14- Determinação do tempo de purga.

Poço	Prof. (m)	Diâmetro (m)	NE (m)	Volume (L)	Q (L/min)	Tempo de Purga (min)
PMRAL-01	10,0	0,0508	0,90	18,44	5,0	7,4
PMRAL-02	10,0	0,0508	3,66	12,85	5,0	5,1
PMRAL-02A	5,0	0,0508	2,23	5,61	5,0	2,2
PMRAL-03	6,3	0,0508	3,26	6,16	5,0	2,5
PMRAL-04	15,0	0,0508	6,57	17,09	5,0	6,8
PMRAL-05	15,0	0,0508	8,05	14,09	5,0	5,6
PMRAL-06	15,0	0,0508	6,59	17,05	5,0	6,8

Obs.: Prof.= Profundidade do revestimento do poço; NE= Nível estático médio; Q= vazão de bombeamento

Todos os frascos necessários para a coleta das amostras de água, com os respectivos conservantes, quando necessários, foram fornecidos pelos laboratórios. Após a coleta, as amostras eram acondicionadas em caixas térmicas com gelo, e entregues a laboratório no mesmo dia da coleta.

8.2 VARIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Tal como foi feito para a análise da variação dos níveis estáticos, a variação da qualidade da água será feita para dois grupos de poços separadamente, uma vez que, nenhum dos poços participou integralmente dos dois PBAs.

Os poços PMRAL-01, PMRAL-02 e PMRAL-02A foram utilizados em todo o PBA01 e nas três primeiras campanhas do PBA02.

O poço PMRAL-02A, por sua baixa profundidade, foi um poço que, a princípio, seria descartado, é tanto que nem foi faturado pela empresa que o construiu. Esperava-se que durante o período de estiagem os níveis da água fossem tão baixos que não seria possível a coleta de amostras de água, a exemplo de um poço semelhante, construído na área da Companhia Integrada Têxtil de Pernambuco – CITEPE, vizinho à RNEST. Por isso, ele não foi incluído no programa de coleta de amostras de água no PBA-01, sendo utilizado apenas para coleta de dados de nível estático e condutividade elétrica da água (CE). Como durante o PBA01 se percebeu que seria possível a coleta de amostras de água durante o período seco, ele foi incluído nas campanhas de monitoramento do PBA02. Sendo assim, do poço PMRAL-02A será analisada apenas a variação da CE.

Na tabela 15 são apresentados os dados da condutividade elétrica da água para os poços os três primeiros poços durante todo o PBA01 e nas três primeiras campanhas do PBA02.

Tabela 15- Valores da CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$) nos poços PMRAL-01, PMRAL-02 e PMRAL-02A.

Datas	PMRAL-01	PMRAL-02	PMRAL-02A
16/06/2009	187,5	380,0	517,0
31/08/2009	140,0	171,9	340,0
07/10/2009	126,8	170,0	216,0
09/12/2009	92,6	133,8	199,8
23/02/2010	83,8	153,2	176,7
15/04/2010	121,2	81,9	116,9
10/06/2010	111,9	87,1	185,3
27/07/2010	102,7	380,0	254,0
13/09/2011	12,5	62,5	400,0
31/01/2012	77,7	50,3	24,0
14/02/2013	96,8		285,8
Máximo	187,5	380,0	517,0
Mínimo	12,5	50,3	24,0
Variação	175,0	329,7	493,0

No gráfico da figura 56 é apresentada a variação da CE com dados dos dois PBAs. Na parte superior do gráfico é apresentada a variação das chuvas mensais ao longo do mesmo período de monitoramento

Com a composição dos dados dos dois PBAs há uma forte indicação de uma relação direta da CE com as chuvas, ou seja, quanto maior a precipitação maior a CE. Como mencionando antes, a utilização de uma frequência de observação diferente da mensal não permite uma análise mais conclusiva.

A princípio, esta relação direta pode parecer incoerente, pois, tal como os açudes, o esperado seria que as chuvas diluíssem a água do aquífero e a CE baixasse. Porém, para os aquíferos a evaporação da água precipita os sais no solo, próximo a superfície, assim, no período chuvoso o sal seria dissolvido e retornando ao aquífero, daí o aumento da CE.

A portaria 2914/11 não estabelece um VMP para a condutividade elétrica da água, mas apenas dos sólidos totais dissolvidos (STD). Porém, pode-se utilizar a seguinte relação $\text{STD} = 0,64 \cdot \text{CE}$ para se determinar o STD (Custodio e Llamas, 1983). O VMP para o STD é de 1000 mg/L. Usando a expressão anterior a CE

correspondente seria 1562,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Como se constata do gráfico da figura 56, as CE foram todas inferiores a 600,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ou seja, bem a baixo do limite estabelecido.

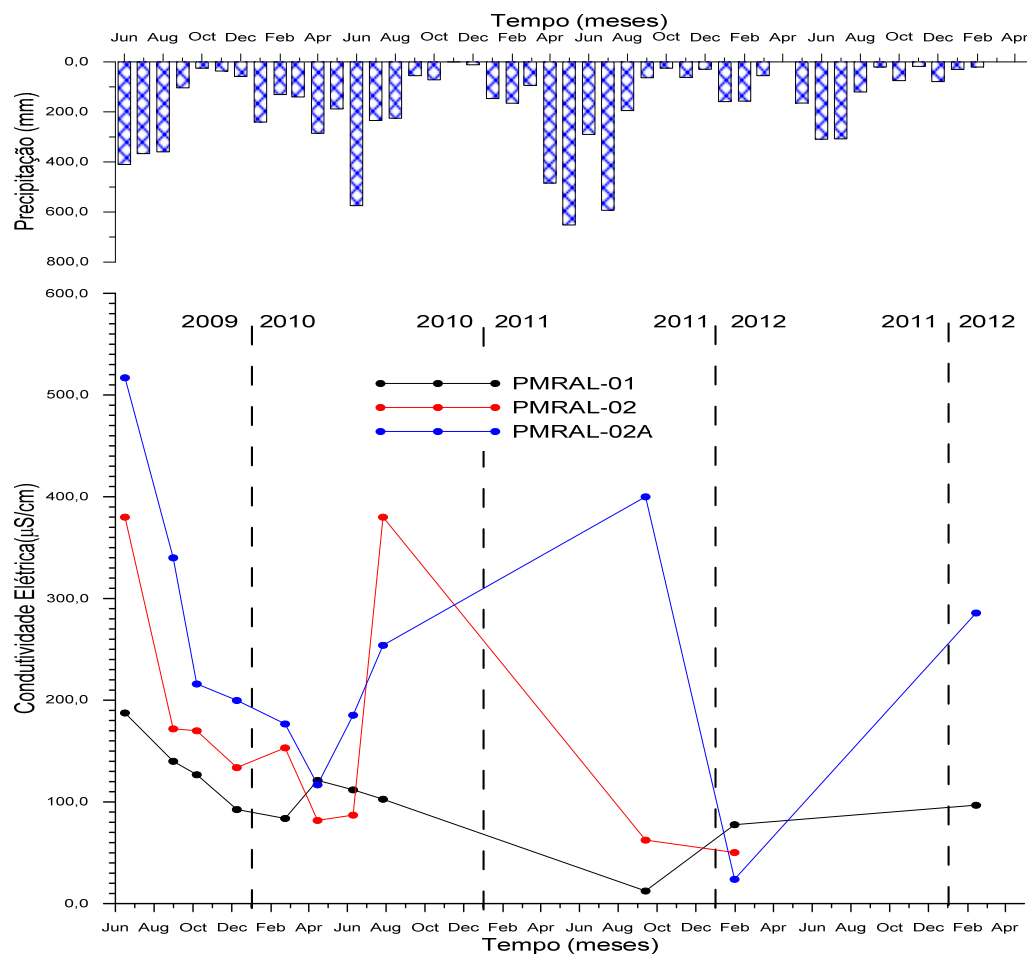


Figura 56- Variação da condutividade elétrica da água nos poços PMRAL-01, PMRAL-02 e PMRAL-02A, com dados das três primeiras campanhas e dados do projeto anterior.

As condutividades elétricas da água para o PBA02 são apresentadas na tabela 16, a seguir:

Tabela 16 - Valores da CE (ms/cm) nos poços PMRAL-03, PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06

Data	PMRAL-03	PMRAL-04	PMRAL-05	PMRAL-06
02/12/2014	737,0	242,0	476,0	126,0
03/02/2015	468,0	230,0	414,0	96,0
22/04/2015	787,0	215,0	225,0	87,0
10/09/2015	429,0	174,0	200,0	90,0
21/01/2016	715,0	227,0	189,0	100,0

A partir dos valores da tabela 16 foi elaborado o gráfico da figura 57, mostrando a evolução da CE nos quatro poços de monitoramento do PBA02.

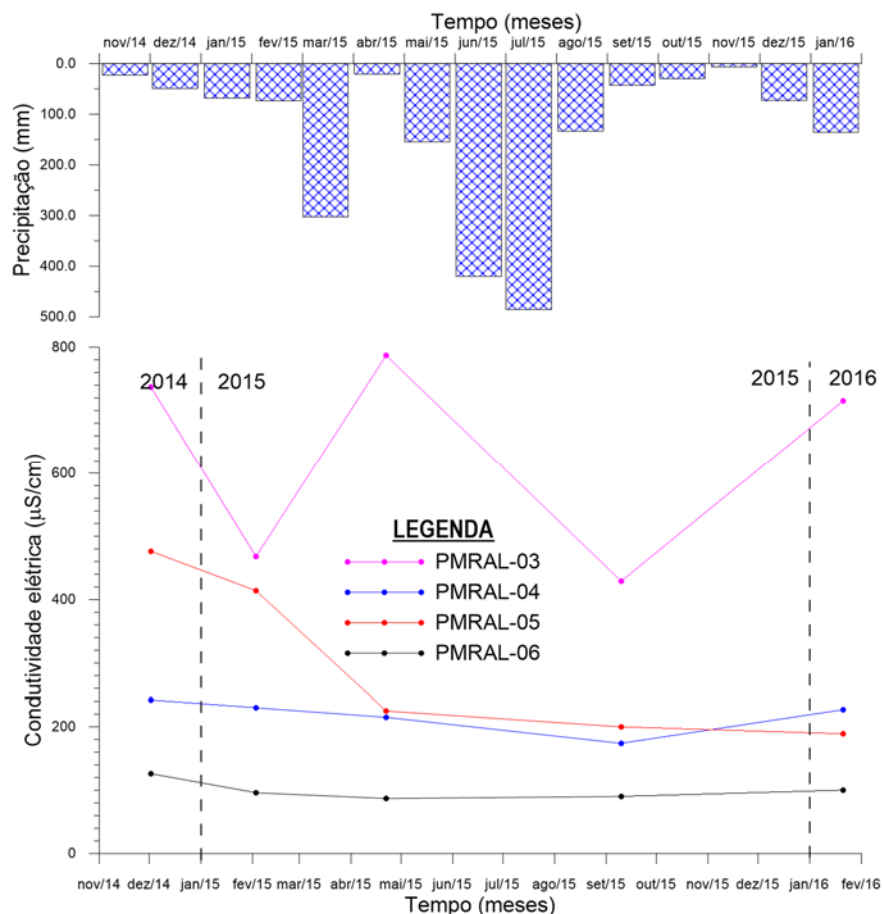


Figura 57- Evolução da CE nos poços PMRAL-03, PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06.

Como só foram cinco campanhas de monitoramento e o espaçamento entre elas superior a dois meses, chegando até quatro meses, não se pode avaliar melhor o comportamento da variação da CE nesses quatro poços. Apenas no PMRAL-05 é que esboça uma redução nos valores da CE. Nos demais poços há uma oscilação sem nenhuma tendência explícita.

Para os demais parâmetros, devido à grande quantidade de informação, 52 parâmetros, 6 poços, 16 campanhas, será feita inicialmente uma análise qualitativa dos resultados, na qual os valores serão substituídos por símbolos. Para as concentrações acima do VMP será utilizado um “X”, valores abaixo um “x”. Concentrações abaixo do limite de detecção do equipamento igual a “nd”.

Os resultados de todas as análises realizadas são apresentados no Anexo 08 ao 16.

Tabela 17- Análise por meio de símbolos das campanhas de monitoramento da qualidade da água na área da RNEST.

Parâmetros	Poço01											PMRAL 02										PMRAL02A			PMRAL03					PMRAL04					PMRAL05					PMRAL06							
	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C07	C08	C09	C10	C09	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C12	C13	C14	C15	C16	C12	C13	C14	C15	C16	C12	C13	C14	C15	C16			
Alcalinidade Bicarbonatos									x	x	x									x	x	x	x	x																							
Alcalinidade Carbonatos									x	nd	x									x	nd	x	x	x																							
Alumínio	X	x	x	nd	nd	nd	x	x	X	X	X	X	X	X	x	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	x	X	X	X	X	x		
Amônia	nd	nd	nd	x	X	nd	nd	nd	x	x	x	nd	nd	nd	x	x		nd	nd	nd	x	x	x	x	x	nd	Nd	x	x	x	x	x	x	x	x	nd	nd	X	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x		
Antimônio	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	N		
Arsênio	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	X	nd	nd		X	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	N		
Bário	x	x	x	x	nd	nd	x	x	x	x	nd	x	x	x	x	nd		x	x	x	x	x	x	x	X	X	X	x	x	nd	x	x	x	nd	x	x	x	x	x	x	x	x	nd	nd	nd	N	
Benzeno	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd																							
Bicarbonato																								x	nd	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Cádmio	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		X	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	N		
Cálcio									x	x	x									x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Carbonato																								x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Chumbo	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	X	X	x	x	nd	nd	nd	Nd	nd	X	nd	nd	nd	nd	x	X	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	
Cianeto	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	N	
Cloretos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Cobre	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	nd	nd	nd	X	nd		nd	nd	x	x	nd	x	nd	nd	nd	Nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	N	
Condutividade (Itep)									x	x	x									x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
Cromo total	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	x	X	nd	nd	nd	nd	nd	nd		x	nd	X	X	x	x	nd	x	nd	Nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	x	x	nd	x	nd	nd	X	nd	nd		N			
DBO	x	x	x	x	x	x	nd	x				x	x	x	x	x		x	x						x	x	Nd	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	nd	x	x		
DQO	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x		x	x						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Etilbenzeno	nd	nd	nd	X	x	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	X	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd																							
Fenois	nd	x	x	x	x	nd	nd	X	nd	nd	nd	nd	nd	x	x	nd		nd	x	nd	nd	nd	nd	x	x	nd	x	nd	x	x	nd	x	nd	x	x	nd	x	nd	x	nd	x	nd	nd	x	nd		
Ferro	X	x	x	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	nd	X	X	X	X	x	
Fluoretos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	nd	x	x	x		x	x	nd	nd	nd	x	x	x	x	x		nd	nd	nd	x		x	nd	nd	x		x	x	x	x					
Fósforo	x	x	x	nd	nd	nd	nd	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x	x						
m,pXilenos	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd																								
Magnésio									x	x	x									x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
Manganês	X	x	x	x	nd	nd	x	x	x	x	nd	X	X	X	X	X		X	X	X	X	x	x	x	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	x	X	X	X	x
Mercurio	nd	nd	nd	x	nd	nd	nd	nd	nd	x	nd	nd	x	nd	x	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Nitratos	x	x	x	x	x	x	x	x	nd	nd	nd	x	x	x	x	x		x	x	x	nd	nd	nd	nd	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Nitritos	x	x	x	x	x	x	x	x	nd	x	nd	x	nd	x	x	x		x	x	nd	x	nd	nd	nd																							

Dos parâmetros analisados alguns deles não têm VMP estabelecido pela portaria 2914/11, são eles: Alcalinidades, bicarbonato, cálcio, condutividade elétrica da água, DBO, DQO, fenol, fósforo, magnésio, óleos e graxas, oxigênio dissolvido, potássio, titânio,

Os parâmetros que nunca foram detectados, ressaltam-se o m,p-Xilenos, o-Xileno, Benzeno, Antimônio e Cianeto

Dos parâmetros que superam o VMP, destacam-se o alumínio, ferro, manganês e a turbidez. Das trinta e oito análises realizadas o ferro superou o VMP em trinta e cinco, o alumínio em vinte e nove, o manganês em vinte e seis e a turbidez em trinta e cinco, tal como o ferro.

A origem desses quatro parâmetros é sem dúvida natural, decorrente dos solos originados pelo intemperismo das rochas vulcânicas da suíte Ipojuca, que dominam na área da RNEST, nas quais é comum a presença dos metais encontrados. A decomposição dessas rochas gera solos argilosos, onde são elevadas as concentrações de alumínio, que é elemento primordial da composição dos argilominerais. A coloração vermelha das argilas, normalmente, deve-se a presença do ferro. Os argilominerais são, *“essencialmente, silicatos de alumínio hidratados. Em alguns casos, o alumínio é substituído parcialmente pelo magnésio ou pelo ferro, podendo estar presentes, como constituintes essenciais, os álcalis ou as terras raras alcalinas.”* (Dana,1976). O manganês normalmente é um elemento geoquímicamente associado ao ferro, e *“apresenta semelhanças tanto físicas como químicas com o ferro”* (Batista, 2003).

A turbidez deve-se, também, a natureza essencialmente argilosa do freático, que não se consegue reter com nenhum pré-filtro e filtro disponíveis no mercado. Foram feitas tentativas de filtragem no momento da coleta, mas sem sucesso.

Para se analisar a evolução desses parâmetros são apresentados os gráficos das figuras 58 e 59, para o PBA-01 e PBA-02, respectivamente

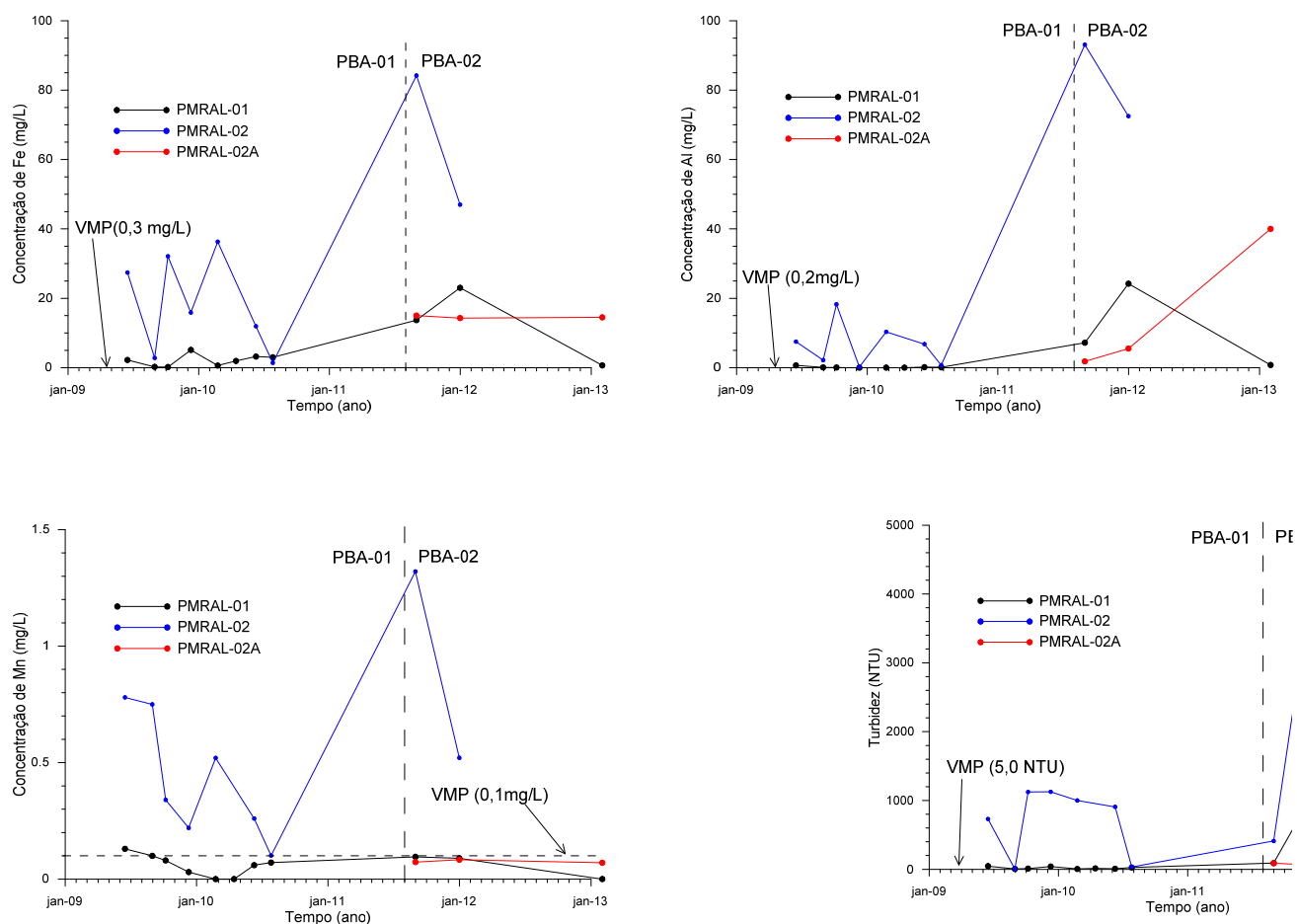


Figura 58- Evolução do Fe, Al, Mn e turbidez para os poços PMRAL-01, PMRAL-02 e PMRAL-02A.

Infelizmente nenhum poço pode ser observado ao longo das dezesseis campanhas de monitoramento, por motivos já comentados, os poços utilizados no PBA-01 só estiveram presentes nas três primeiras campanhas do PBA-02.

A primeira constatação que se faz da análise da figura 58 é que não há nenhum tipo de tendência dos quatro parâmetros analisados, entretanto, os quatro gráficos guardam entre si certa semelhança, ou seja, as variações das concentrações foram semelhantes nos quatro poços.

Para os quatro poços do PBA02, figura 58, o único poço que guardou semelhança, da evolução dos quatro parâmetros analisados, foi o PMRAL-05.

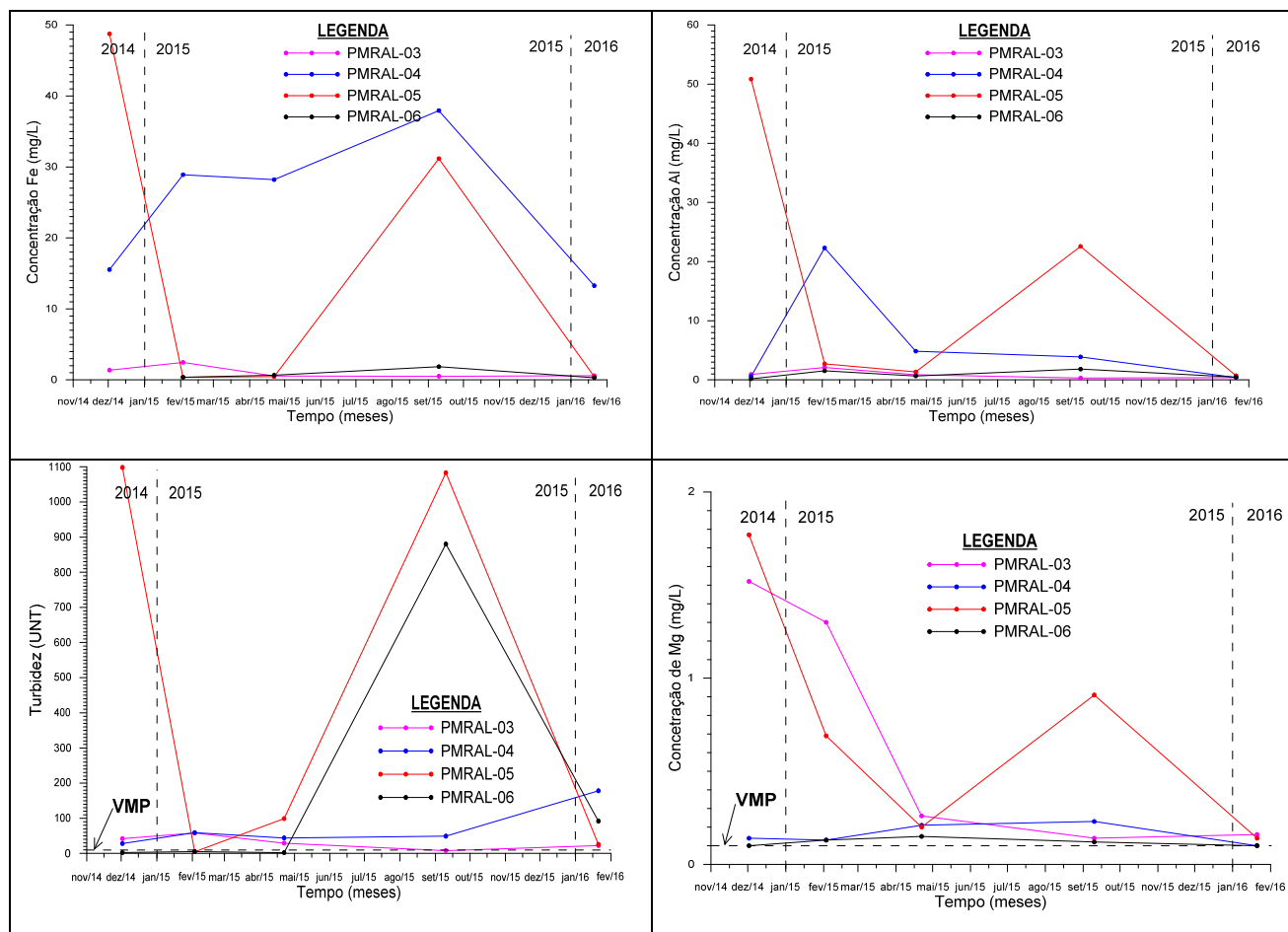


Figura59- Evolução das concentrações de ferro, alumínio, manganês e da turbidez no PMRAL 03, PMRAL-04, PMRAL-05 e PMRAL-06.

Além dos parâmetros já discutidos, são apresentados na tabela 18 aqueles que, pelo menos, em uma campanha, apresentaram concentrações acima do VMP. Dez parâmetros se enquadraram nessa condição, sendo cinco metais, dois compostos inorgânicos e dois orgânicos e os sólidos totais dissolvidos.

Os parâmetros cádmio, amônia, etilbenzeno, sólidos totais dissolvido, superaram o VMP em uma única campanha. No caso do etilbenzeno apareceu em dois poços diferentes em uma mesma campanha de monitoramento. Nesses casos de resultados isolados não se pode caracterizar que haja uma contaminação da água por esses parâmetros. Resultados eventuais podem ter as mais diversas razões, um erro de digitação, problemas de amostragem, erro de análise, entre outras. Assim, não serão feitos mais comentários sobre os resultados anômalos desses parâmetros.

O tolueno superou o VMP nas campanhas 05 e 07, do PBA01, em dois poços diferentes. Apesar desses resultados anômalos é também muito pouco para caracterizar de

forma incisiva que haja contaminação por esse parâmetro. Além do mais, esses poços na época das campanhas citadas não ficavam próximos a nenhuma obra, além do mais, a RNEST ainda não estava em operação, os trabalhos realizados à época eram de construção do empreendimento.

Tabela 18-Parâmetros, além do Fe, Mn, Al e turbidez, que superaram o VMP.

Parâmetro	Poço	PBA	Campanha
Arsênio	PMRAL-02	01	03 e 08
Bário	PMRAL-03	02	01 e 03
Cádmio	PMRAL-02	01	07
Chumbo	PMRAL-02	02	02 e 03
	PMRAL-03	02	08
	PMRAL-05	02	04
Cromo	PMRAL-01	02	02
	PMRAL-02	02	02 e 03
Sulfeto de hidrogênio	PMRAL-01	01	01
	PMRAL-02	01	08
	PMRAL-03	02	05 a 08
	PMRAL-04	02	05
	PMRAL-05	02	05 a 08
	PMRAL-06	02	05 a 08
Amônia	PMRAL-01	01	05
Tolueno	PMRAL-01	01	05 e 07
	PMRAL-02	01	05 e 07
Etilbenzeno	PMRAL-01	01	04
	PMRAL-02	01	04
Sólidos totais dissolvidos	PMRAL-01	01	05

Qual a origem dos cinco metais com concentrações anômalas? Duas são as possibilidades: natural ou antrópica. A segunda é pouco provável, pois, não há possíveis fontes de contaminação nas proximidades dos poços.

A RNEST iniciou as suas operações, parcialmente, em dezembro de 2014, ou seja, a partir da campanha 04 do PBA02. Alguns dos valores anômalos ocorreram ainda no PBA01. Além do mais não se percebe nenhuma mudança no padrão das ocorrências desses metais após início das atividades de refino, o que é indicativo de que os valores elevados não estão ligados ao funcionamento da RNEST.

Antes do início das obras, o que havia na área era plantação de cana-de-açúcar abandonada há um bom tempo, cujos fertilizantes utilizados e defensivos agrícolas não justificariam os teores dos metais encontrados.

Para entender melhor a ocorrência desses metais, foi feita uma análise da correlação linear com esses parâmetros, acrescidos do ferro, alumínio, manganês e turbidez, que também apresentaram valores anômalos. O arsênio e o cádmio foram retirados dessa análise por terem poucos dados, quatro e um, respectivamente. Os resultados são apresentados na tabela 19. Para esse tratamento estatístico foram usados os resultados das análises físico-químicas de todas as campanhas e todos os poços.

Tabela 19- Matriz de correlação linear de Pearson.

	Al	Ba	Pb	Cr	Fe	Mn	Turbidez
Al	1,00	0,35	0,33	0,88	0,84	0,48	0,60
Ba	0,35	1,00	0,44	0,54	0,20	0,70	0,13
Pb	0,33	0,44	1,00	-0,09	0,37	0,83	0,09
Cr	0,88	0,54	-0,09	1,00	0,83	0,38	0,47
Fe	0,84	0,20	0,37	0,83	1,00	0,45	0,50
Mn	0,48	0,70	0,83	0,38	0,45	1,00	0,20
Turbidez	0,60	0,13	0,09	0,47	0,50	0,20	1,00

Os valores em vermelho são as correlações significativas, que ocorrem para os pares de metais com maiores quantidades de informação. Esta verificação é feita utilizando o teste t, pela seguinte equação (Spiegel, 1979):

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{1-r^2}$$

Sendo:

t = t Student calculado

r = coeficiente de correlação linear

N = número de pares usados para calcular r

Se o t calculado pela a equação for maior do que o t crítico para 5% de significância, e um grau de liberdade N-2, a correlação é significativa.

Como se vê, a correlação entre a turbidez com os metais analisados é baixa, sendo a melhor correlação com o alumínio, o que de certa forma era esperado, pois, como dito, a turbidez deve-se a argila, cujos minerais são aluminosos.

Como se percebe da tabela 19, o manganês tem uma boa correlação com o alumínio, bário e chumbo, acima de 0,7. Porém, com o ferro a correlação não é muito boa, apenas 0,45.

A turbidez só apresentou uma correlação, e significativa, com ferro e o alumínio, corroborando a hipótese desses metais estarem associados aos argilos-minerais.

A partir da matriz de correlação foi feita uma análise de agrupamento (*cluster analysis*), cujo resultado é apresentado na forma gráfica de um dendograma da figura 60.

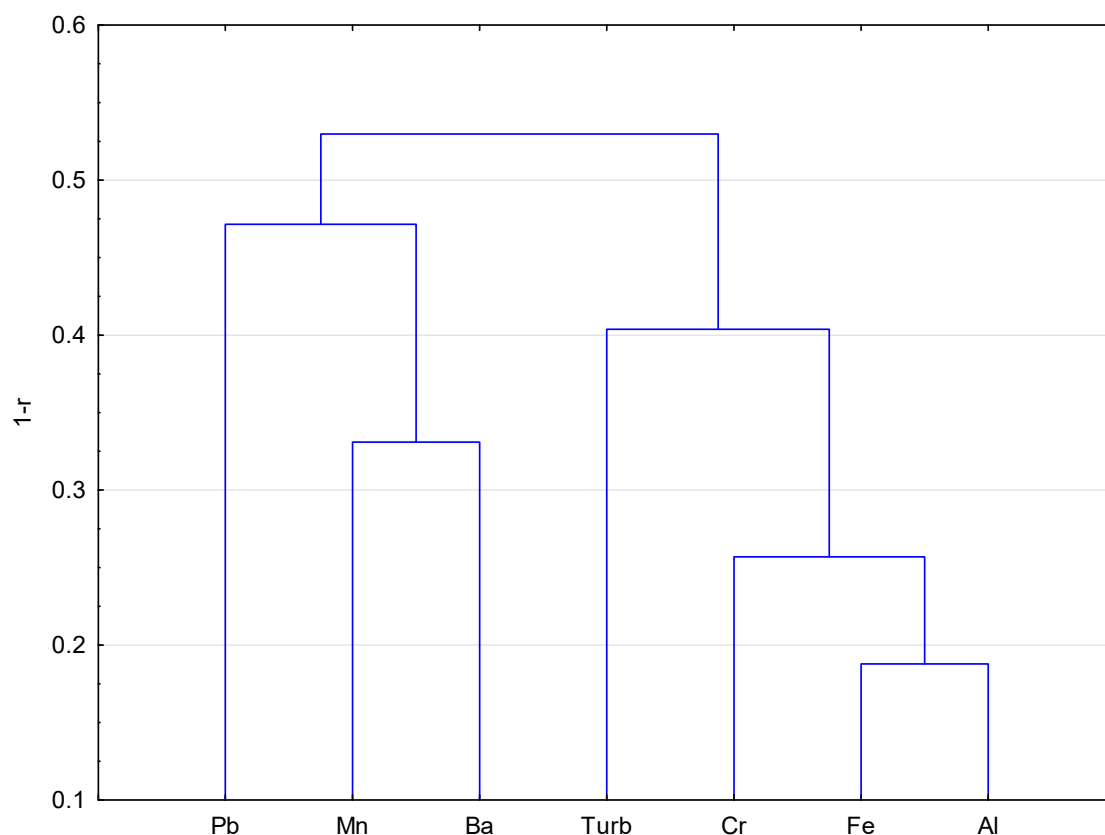


Figura 60-dendograma elaborado a partir dos coeficientes de correlação.

O dendograma mostra claramente a formação de dois grupos. O primeiro formado pelo chumbo, manganês e bário, e o segundo formado pelo alumínio, ferro, cromo e a turbidez.

A forte correlação/associação entre os metais e a ausência de uma fonte externa dos mesmos, é um forte indicativo de uma gênese semelhante para esses elementos, ou seja, a rocha mãe.

Santos, 2011, em sua dissertação de mestrado, estudou as amostras de calha, coletadas a cada 0,5 m de profundidade, de dois poços de monitoramento construídos na Companhia Integrada Têxtil de Pernambuco – Citepe, cuja localização dos poços é mostrada na figura 61.

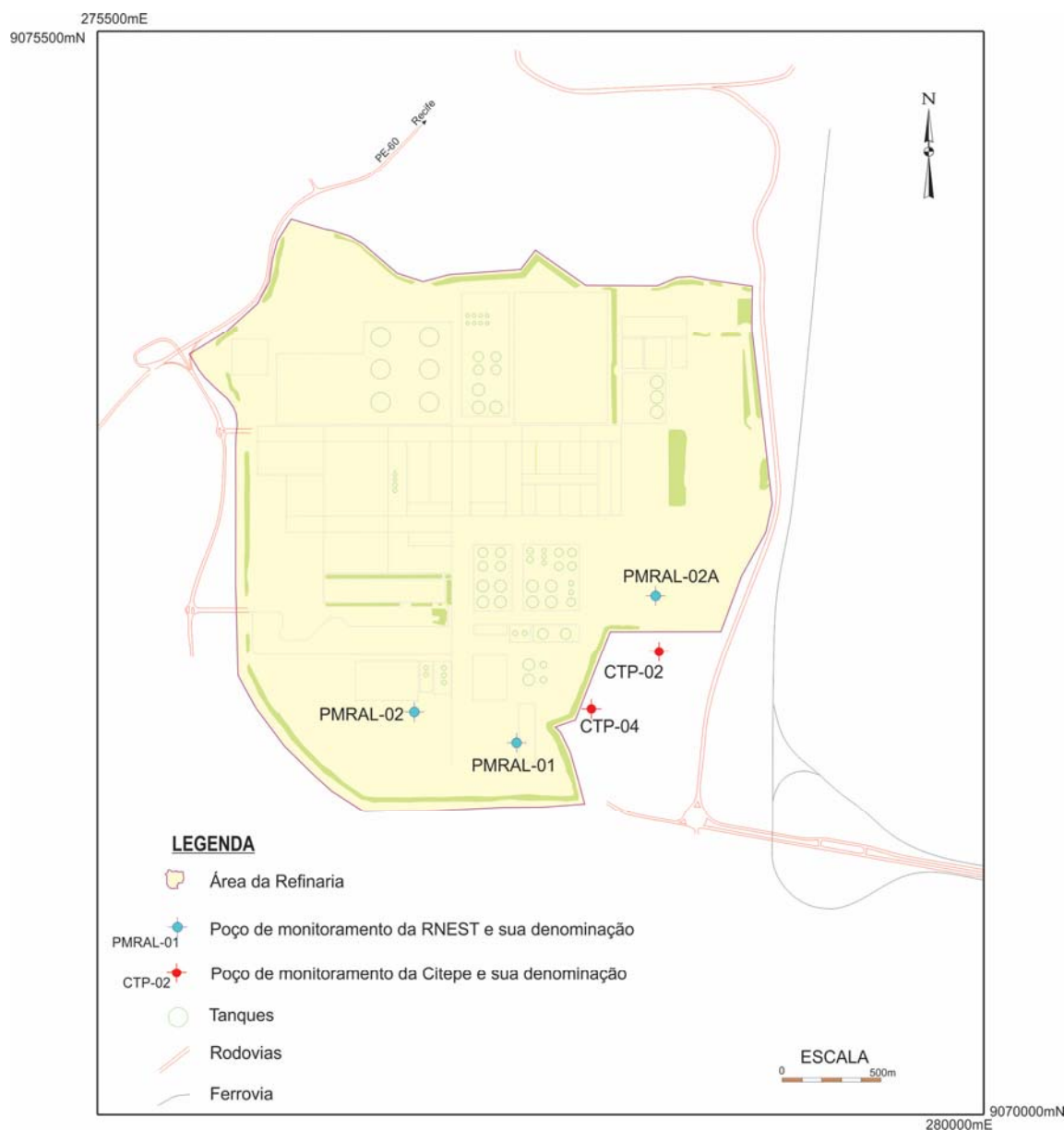


Figura 61- Localização dos poços de monitoramento da Citepe.

Vários elementos foram estudados, entre eles o cobre e o chumbo. Nas figuras 62e 63 são apresentadas a variação vertical desses dois metais, nos poços CTP-02 e CTP04, respectivamente.

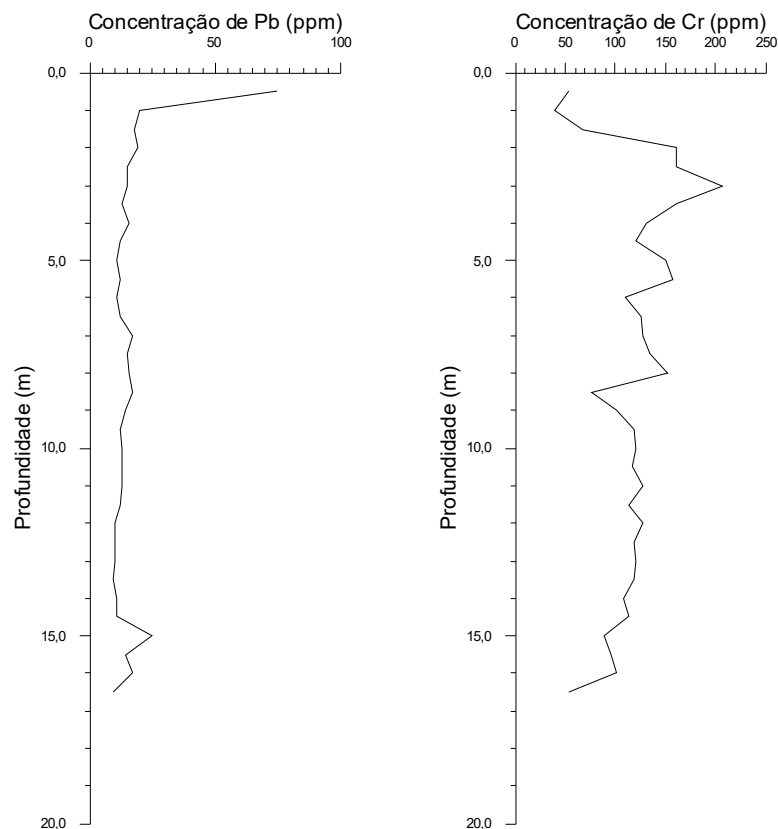


Figura 62- Variação vertical dos teores de Pb e Cr no CPT02.

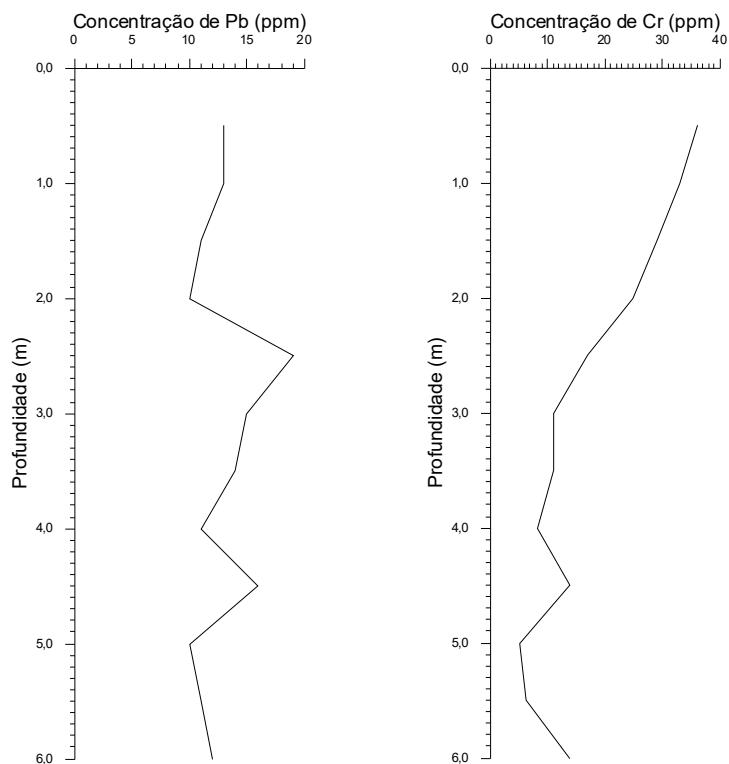


Figura 63- Variação vertical dos teores de Pb e Cr no CPT04.

Como se pode constatar nos gráficos das duas figuras, o chumbo e o cromo estão presentes ao longo de todo o perfil estudado, sendo as concentrações de cromo, em geral, maiores do que as do chumbo, tal como encontrado nas amostras de água.

Santos, 2011, conclui em seu trabalho dizendo: “Diante dos aspectos observados, pode-se dizer que a área em questão necessita de um monitoramento geoquímico, pois, mesmo não havendo enriquecimento significativo em relação a nenhum dos elementos estudados, houve concentrações absolutas distintas das camadas mais basais nas camadas mais superficiais.”

Teódulo, 2003, também em sua dissertação de mestrado, estudou a geoquímica do solo do Complexo Portuário de Suape, sendo que dois pontos de amostragem ficaram na área da RNEST e dois próximos, um na área da Citepe e outro na Petroquímica Suape. A localização desses pontos pode ser visualizada no mapa da figura 64.

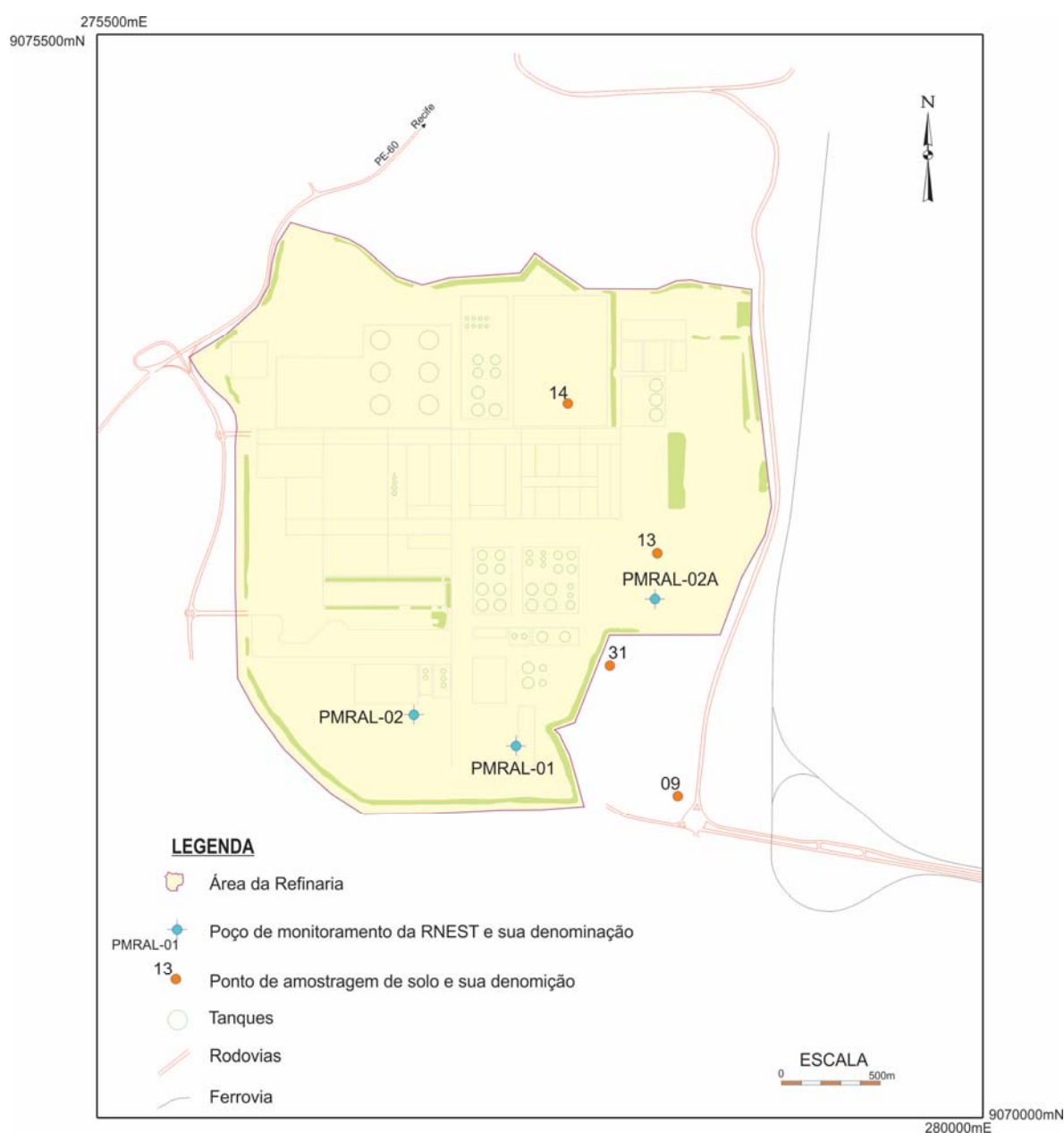


Figura 64-Localização dos pontos de amostragem de solo.

Vários elementos-traços foram estudados, entre os quais chumbo e cromo. Foram usados vários métodos de extração, porém na tabela 20 são apresentados os resultados para a extração total, usando ácido fluorídrico (HF) e ácido perclórico (HClO₄), pois, foi neste método que foram encontrados as maiores concentrações de chumbo e cromo.

Tabela 20- concentrações de Cr e Pb nos solos do Complexo Portuário de Suape.

Pontos amostrados	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)
09	45,0	94,0
13	42,0	68,0

Esse método de extração foi usado apenas nos pontos 09 e 13. Para os demais pontos foram detectadas a presença desses metais, porém, em concentrações menores, visto que, foram usados métodos de extração parcial.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - Cetesb estabelece os seguintes valores orientadores para o chumbo e cromo no solo, conforme Decisão da Diretoria nº 195/2005 apresentado na tabela 21 a seguir:

Tabela 21 - Valores orientadores Cetesb. Valores em mg/kg.

Elemento	Referência de qualidade	Prevenção	Intervenção		
			Agrícola	Residencial	Industrial
Pb	17,0	72,0	180,0	300,0	900,0
Cr	40,0	75,0	150,0	300,0	400,0

Segundo a norma da Cetesb esses limites têm os seguintes significados:

O valor referência de qualidade: é a concentração de determinada substância no solo, que define um solo como limpo, e é determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos. Deve ser utilizado como referência nas ações de prevenção da poluição do solo e de controle de áreas contaminadas.

Valor de prevenção: é a concentração de determinada substância, acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo. Este valor indica a qualidade de um solo capaz de sustentar as suas funções primárias, protegendo-se os receptores ecológicos. Deve ser utilizado para disciplinar a introdução de substâncias no solo e, quando ultrapassado, a continuidade da atividade será submetida a nova avaliação, devendo os responsáveis legais pela introdução das cargas poluentes proceder o monitoramento dos impactos decorrentes.

Valor de Intervenção: é a concentração de determinada substância no solo acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerado um cenário de exposição genérico. Foi calculado utilizando-se procedimento de avaliação de risco à saúde humana para cenários de exposição Agrícola, Residencial e Industrial. A área será classificada como Área Contaminada sob Investigação quando houver constatação da presença de contaminantes no solo em concentrações acima dos Valores de Intervenção, indicando a necessidade de ações para resguardar os receptores de risco.

Como se vê, os valores de cromo encontrados estão abaixo dos valores de prevenção e próximos aos de referência de qualidade. Para o chumbo estão próximos ao limite de prevenção, mas, todos os valores encontrados estão bem abaixo dos valores de intervenção.

Téodolo, 2003, conclui seu trabalho dizendo: *“Ainda que, quantidades substanciais de Pb, Mn, Cr, Ti e V tenham sido detectadas na fração residual, estas concentrações não comprometem os ecossistemas locais, visto que a maior parte desses elementos está na estrutura dos minerais, e não estão biodisponíveis para processos bioquímicos”*.

Um caso bem conhecido de contaminação da água subterrânea por cromo é no município de Urânia, no oeste paulista. Segundo Bertolo, *et.al.*, 2009, a maior concentração encontrada foi de 0,139 mg/L, um pouco menor do que o teor encontrado no poço PMRAL-02, na campanha de setembro/11, que foi de 0,1644 mg/L. Nesse mesmo trabalho os autores citam seis casos de água subterrânea contaminada por cromo, em vários países. Em todos os casos o cromo era proveniente de minerais presentes em rochas máficas e ultramáficas e de sedimentos oriundos da alteração dessas rochas, tal como o caso da RNEST, que está assentada sobre rochas vulcânicas da Província Magmática de Ipojuca. Segundo Nascimento *et al.*, 2003, esta província *“é constituída principalmente por traquitos a traquiandesitos e riolitos, contendo ainda rochas de fluxo piroclástico (ignimbritos), basaltos e álcali-feldspato granito (Granito do Cabo). Essas rochas ocorrem em praticamente toda a bacia, embora predominando na região de Cabo-Ipojuca e Serinhaém, sob a forma de diques, derrames, soleiras, plugs, lacólitos ou corpos semi-circulares”*.

Diante do exposto nos parágrafos anteriores, os dados disponíveis apontam para uma origem natural dos metais encontrados nas amostras de água dos poços de monitoramento na RNEST.

Entre os compostos inorgânicos o H_2S foi elevado em dezessete análise das trinta e oito realizadas, não sendo detectado apenas no poço PMRAL-01. A origem do enxofre também, tal como os metais, está associada as rochas vulcânicas, que são ricas nesse elemento. No caso do PMRAL-01, que fica em uma área mais baixa, próxima a um pequeno curso de água, os sedimentos atravessados mostraram sinais claros de transporte, sugerindo que esse poço foi construído em uma pequena aluvião.

A análise dos sólidos totais dissolvidos - STD é semelhante a análise realizado para a condutividade elétrica da água, feita no início desse capítulo. O STD foi superior ao valor máximo permitido apenas no poço PMRAL-01, na quinta campanha do primeiro PBA, tratando-se apenas de um dado isolado.

Do ponto de vista bacteriológico as águas dos poços PMRAL-03 e PMRAL-04 foram negativas para a presença de coliformes totais e termotolerantes em nenhuma das campanhas de monitoramento. Nos demais poços foi positivo pelo menos em uma campanha, destacando-se o PMRAL-05 que os coliformes totais só foram ausentes em uma campanha.

Durante a evolução dos trabalhos de monitoramento foram cogitadas as possibilidades de contaminação durante a coleta, no transporte, e até mesmo no laboratório, para justificar a presença de coliformes nas águas do PMRAL-05, uma vez que, não se percebia nenhuma fonte provável no campo. Contudo, quando se analisa todo o monitoramento percebe-se que é pouco provável que alguma das hipóteses acima tenha ocorrido com tanta frequência apenas no PMRAL-05. As concentrações de amônia, nitrito e nitrato, para este poço, que poderiam auxiliar na sustentação de uma contaminação por esgoto, foram todas muito baixas e muitas abaixo do limite de detecção dos equipamentos. Como isso, a origem dessa contaminação bacteriológica é muito mais complexa.

Assim, seria necessária uma investigação mais detalhada no entorno do PMRAL-05, bem como nos dutos que passam nas proximidades, para buscar a possível fonte de contaminação, porém, essa tarefa está fora do escopo desse trabalho.

9 CONCLUSÕES

A partir dos dados levantados e das análises realizadas chega-se as seguintes conclusões:

- A rede de monitoramento atual é insuficiente para cumprir adequadamente seu papel. Mas a ampliação da rede já está prevista e encontra-se em fase de implantação. O previsto é construir mais dez poços, para totalizar uma rede de catorze poços. A

estrutura subterrânea da RNEST (tubos, galerias, etc) é um fator que dificulta o posicionamento dos poços de monitoramento, tornando difícil conciliar os aspectos hidrogeológicos com os aspectos construtivos da refinaria.

- Ao todo foram construídos sete poços de monitoramento, ao longo de dois PBAs, e realizadas dezesseis campanhas de monitoramento. Sendo três poços construídos no primeiro PBA e quatro no segundo. Como os três primeiros poços foram danificados na fase de construção da RNEST, nenhum poço participou de todas as campanhas de monitoramento. Os três primeiros participaram das primeiras onze campanhas e os últimos quatro poços das cinco últimas campanhas.

A frequências das medidas de nível estático do aquífero freático na área da RNEST não foi suficiente para mostrar de forma clara a relação da variação da superfície freática com as precipitações. Para tanto, seria necessária uma frequência mensal. Como foram instalados sensores automáticos, com registro horário do nível da água, foi possível mostrar de forma explícita a forte relação da variação da superfície freática com as chuvas. Nos meses úmidos os níveis são mais altos, invertendo-se no período seco. Foi observado, que a nível mensal, a defasagem entre o pico de chuva e o pico de elevação do nível da água é aproximadamente de trinta dias.

Nos poços PMRAL-03 e PMRAL-04 as oscilações do nível estático, ao longo do período observado, ficaram em torno de dois metros, enquanto, no PMRAL-05 e PMRAL-06 as variações foram entre quatro e cinco metros.

A potenciometria na área da RNEST, apesar da pequena quantidade de poços, revelou que é condicionada pela drenagem que circunda a refinaria, assim, a direção de fluxo geral é aproximadamente radial. As oscilações observadas entre os períodos secos e chuvosos apenas alteram os valores de carga, mas não perturbam a direção geral de fluxo.

Dos cinquenta e dois parâmetros analisados treze deles não tem VMP estabelecido pela portaria 2914/11, são eles: Alcalinidades, bicarbonato, cálcio, condutividade elétrica da água, DBO, DQO, fenol, fósforo, magnésio, óleos e graxas, oxigênio dissolvido, potássio, titânio,

Os parâmetros que nunca foram detectados: o m,p-Xilenos, o-Xileno, Benzeno, Antimônio e Cianeto

Os parâmetros que nunca superaram o VMP: Alcalinidade Bicarbonatos, bicarbonatos, cálcio, carbonato, cloretos, condutividade elétrica, DQO, magnésio, pH, potássio e Xilenos.

Devido as características naturais dos solos na área da RNEST, que são em sua maior parte formados a partir do intemperismo de rochas vulcânicas, a água do freático apresenta alguns parâmetros com concentrações elevadas, destacando-se o ferro, alumínio, manganês e a turbidez, que foram acima dos valores de referência em qualquer norma vigente no país, em quase todas as campanhas de monitoramento.

Esporadicamente apresentaram concentrações elevadas o chumbo, cromo, bário, cádmio, arsênio, cromo, sulfeto de hidrogênio, tolueno, amônia, etilbenzeno, coliformes totais e coliformes termotolerantes. Alguns desses parâmetros apresentam concentrações acima dos valores de referência em uma única campanha, por exemplo, amônia e cádmio. O que ocorreu com maior frequência foi o sulfeto de hidrogênio, que em dezessete análises superou o valor máximo permitido pela portaria 2914/11 do Ministério da Saúde.

Para os metais a hipótese para explicar a sua origem é a rocha mãe, que deu origem ao solo que compõe o aquífero freático na área da RNEST. As rochas vulcânicas são ricas nesses elementos, que por sua vez passam para o solo e conseqüentemente para a água, como demonstrada no corpo da dissertação.

Para a amônia, orgânicos e os coliformes as suas presenças não estão ligadas a natureza do solo e/ou da matriz rochosa. Não foi possível formular uma hipótese, uma vez que, os casos registrados foram mínimos e esporádicos, não permitindo fazer qualquer tipo de associação com algum fato que justificasse a presença dos mesmos. Assim, o mais provável é que tenha sido algum tipo de erro, quer seja, na coleta, transporte ou análise

Do ponto de vista da evolução das concentrações dos parâmetros analisados, ao longo das dezesseis campanhas e monitoramento, não se percebe nenhuma variação significativa ou de tendência de evolução. No caso da condutividade elétrica da água se percebeu uma discreta relação direta com as precipitações, ou seja, nos períodos de menos chuva os valores da condutividade elétrica são menores, e vice-versa. Entretanto, o intervalo de tempo entre as campanhas, superior a três meses, quando o ideal seria mensal, não permitiu estabelecer essa relação de forma consistente.

Pela portaria 2914/11 do Ministério da Saúde, a água do freático na área da RNEST é imprópria para o consumo, uma vez que vários parâmetros superam os valores máximos recomendados.

Conforme a resolução do CONAMA 396/08, as águas do freático na área da RNEST são enquadradas na Classe 2, que são: “*águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais*”.

De acordo com a resolução do Conama 420/09, todas as águas seriam consideradas sobre investigação, por conta das concentrações encontradas para os metais.

REFERÊNCIAS

- ALHEIROS, M.M. Caracterização Sedimentológica da Formação Cabo-Pernambuco. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, p 99, 1987.
- ALMEIDA, C.B.; RABELO, L.; SÁ, E.F.J.; VASCONCELOS, P.M.P; MEDEIROS, W.E. Tectônica e relações estratigráficas na Sub-bacia de Pernambuco, NE do Brasil: contribuição ao conhecimento do Rifte Sul-Atlântico. Boletim de Geociências da Petrobras, v.13, n. 2, p.167-180, 2005.
- ALVES, E. C.; COSTA, M. P. A. Interpretação sísmo-estratigráfica da porção norte do platô de Pernambuco e suas possíveis correlações com a Bacia de Pernambuco-Paraíba. In: Congresso Brasileiro de Geologia, p. 286-297. 1986.
- AMARAL, C. A. Geomorfologia e declividade do Município de Ipojuca/Pernambuco. Recife: CPRM/FIDEM, 1998.
- ANA Avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e proposição de modelo de gestão compartilhada para os aquíferos da chapada do Apodi, entre os Estados do Rio Grande do Norte e Ceará, Vol. I - Aspectos Gerais da Área do Projeto: Hidroclimatologia, Fisiografia, Uso e Ocupação do Solo, Socioeconomia e Demandas, Processamento Digital de Imagens de Satélite, Brasília, Agência Nacional de Águas 2010.
- ARAI, M.; UESUGUI, N.; ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no nordeste do Estado do Pará. In: Anais do CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém, PA, Brasil 2, p 738–752, 1988.
- ARAI, M.; TRUCKENBRODT, W.; NOGUEIRA, A. C. R.; GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. F. Novos dados sobre a estratigrafia e ambiente deposicional dos sedimentos Barreiras, NE do Pará. In: Boletim de Resumos Expandidos do SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4, Belém, 1994.
- ARAI, M. Dinoflagelados (Dinophyceae) miocênicos do Grupo Barreiras do nordeste do Estado do Pará (Brasil). Univ Guar, Geoc2, p 98–106, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1997) Construção de poços de monitoramento e amostragem - (NBR 13895). Rio de Janeiro, ABNT. 21.
- AUGE, Miguel. Métodos y técnicas para el monitoreo de acuíferos. 2006.
- BARBOSA, J.A.. Evolução da Bacia da Paraíba durante o Maastrichtiano-Paleoceno: Formações Gramame e Maria Farinha, NE do Brasil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Dissertação de Mestrado, p 230. 2004.
- BARBOSA, J. A.; LIMA FILHO, M. F. Aspectos Estruturais e estratigráficos da faixa costeira Recife-Natal: observações em dados de poços. Boletim de Geociências da PETROBRAS, v. 14, n. 1, p. 287-306, 2006.
- BARBOSA, J.A.; FERREIRA, P.J.; LIMA FILHO, M. Dente de um picnodontiforme (Actinopterygii, Neopterygii) da Formação Estiva, Cenomaniano-Turoniano da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. GAEA Journal of Geoscience, 4(2):p 43-48, 2008.

BARBOSA, J.A.; MAIA, M.F.; LIMA FILHO, M.; MAGALHÃES, J.R.; CORREIA FILHO, O.J. Seismic stratigraphy of the onshore portion of Pernambuco Basin:evidence of break up during Middle Albian for the South Atlantic Rift in Northeast 120 Brazil. In: AAPG Annual Exhibition and Convention,Houston., 2014.

BATISTA,M. J. A. F., Comportamento de elementos químicos no sistema rocha-solo-sedimento-planta na área mineira de Neves Corvo: Implicações Ambientais, Tese doutorado, Universidade de Aveiro, Departamento de Geociências, Lisboa, 2003.

BERTOLO, R. A., MARCOLAN, L. N. O., & BOUROTTE, C. L. M. Relações água-rocha e a hidrogeoquímica do cromo na água subterrânea de poços de monitoramento multiníveis de Urânia, SP, Brasil.Geologia USP. Série Científica, 9(2), 47-62. 2009.

BRASIL, Resolução CONAMA, nº396, de 03 de Abril de 2008. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, Brasília

BRITO NEVES, B. B.; CORDANI, U. G. Tectonic Evolution of South America during the late Proterozoic. Precambrian Research, v. 53, n. 1-2, p. 23-40, 1991.

BORBA, A. L. S., DA COSTA, M. R., COSTA FILHO, W. D., de Azevedo, P. V. N. G., Jardim, F. C. F. V. Qualidade das águas do Aquífero Cabo na Região Metropolitana de RECIFE-PE. Águas Subterrâneas, 2012.

BOUWER, H. & RICE, R.C. The Bouwer and Rice slug test—an update Groundwater, v. 27, n. 3, p. 304-309, 1989.

BUENO, G.V. Diacronismo no Rife Sul-Atlântico. Boletim de Geociências daPetrobrás, v. 12, p. 203-229, 2004.

CORREIA FILHO, O.J. Analise de estruturas compressionais na região onshore da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil- Possíveis influências no potencialpetrolífero. Dissertação de mestrado no Programa de Pós-graduação em Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. 2016.

COSTA, W.D., SANTOS, A.C., COSTA FILHO, W.D.,. O Controle Estrutural na Formação dos Aquíferos na Planície do Recife. In: 8o Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Recife, p. 38-43. 1994.

CUNHA, J. B.; MILLO, J.L.. Dados climatológicos básicos do Nordeste: visão preliminar. Ministério do Interior, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 1984.

CUSTODIO, E., LLAMAS, M.R.. Hidrologia subterrânea. Ediciones Omega S.A. Barcelona. vol 1. p.1157,1976.

CAINELLI, C.; MOHRIAK, Webster Ueipass. Geology of Atlantic eastern Brazilian basins. In: Brazilian Geology Part. 1998.

CPRM – Serviço Geológico. Mapa geológico da RMR-Metropolitana de, 1:50000, 1999.Recife.Escala

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Sistema de Informações Geoambientais da RMR, Região Metropolitana de Recife - SIGA. Pfaltzgraff, P. A. S. (Coord). Recife, p. 119.2003.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil Implantação de Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. 2009.

DIAS, C. L., BARBOUR, E. D. A., MODESTO, R. P., & CASARINI, D. C. P. A importância do monitoramento das águas subterrâneas na gestão dos recursos hídricos: *Águas Subterrâneas*.2008.

DEMÉTRIO, J. G. A., DE MELO, J. G., DINIZ FILHO, J. B., DOS SANTOS BATISTA, A. G., & da C. OLIVEIRA, R.. Monitoramento do Aquífero Jandaíra na região de Baraúna - RN. *Águas Subterrâneas*, 30(2), p.261-268. 2016.

ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL. FADE/UFPE-PETROBRAS. 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo, v. 2, 2006.

FEIJÓ, F.J. Bacia de Sergipe – Alagoas. Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 8, n. 1, p. 149-162, 1994.

FETTER, C. W. Applied Hydrogeology. 4th. . Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

FOSTER, S. S., & CAMINERO GOMES, D. Groundwater quality monitoring: an appraisal of practices and costs. In:*Groundwater quality monitoring: an appraisal of practices and costs*. CEPIS. 1989.

HARTER T., Groundwater Sampling and Monitoring, University of California division of Agriculture and Natural Resources.2003.

HONORATO, T.Z., Utilização da Curva de Recessão na Bacia do Rio Taquara: Uma análise Metodológica de Aplicação na Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos Trabalha de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Ambiental, UFPR, Londrina, 2013.

JOUSMA, G.; ROELOFSEN, F. J. World-wide inventory on groundwater monitoring. International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC). Utrecht, 2004.

JØRGENSEN, L. F.; STOCKMARR, J. Groundwater monitoring in Denmark: characteristics, perspectives and comparison with other countries. *Hydrogeology journal*, p. 827-842, 2009.

KARNER, Garry D.; DRISCOLL, Neal W. Tectonic and stratigraphic development of the West African and eastern Brazilian Margins: insights from quantitative basin modelling. Geological Society, London, Special Publications, v. 153, n. 1, p. 11-40, 1999.

KIM, G. B., LEE, K. K., LEE, J. Y., & YI, M. J. Case study for determination of a water level monitoring frequency for nation wide groundwater monitoring networks in Korea. *Journal of hydrology*, 342(3), p.223-237. 2007.

KOREIMANN C.; GRATH, J; WINKER, G. NAGY W.; VOGEL W.R. Groundwater Monitoring in Europe. Topic Report nº 10/96. European Environmental Agency. Copenhagen: 1996.

LEITE, F. P. R; OLIVEIRA, M. E. B; OLIVEIRA, P. E.; SILVESTRE-CAMPELO, M. S.; ARAI, M.; TRUCKENBRODT, W. Palinofloras miocenas da Formação Pirabas e Grupo Barreiras, na Região Bragantina, Estado do Pará, Brasil. **Rev.Univ.Guar, Geoc** 2: 128–140, 1997a.

LEITE, F. P. R; OLIVEIRA, M. E. B; ARAI, M.; TRUCKENBRODT, W. Palinoestratigrafia da Formação Pirabas e Grupo Barreiras, Mioceno do nordeste do estado do Pará, Brasil. **Rev. Univ.Guar., Geoc** 2: 141–147, 1997b

LIMA FILHO, Mario Ferreira de. Análise estratigráfica e estrutural da Bacia Pernambuco. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 1998.

LIMA FILHO, MAIA, F.D; BARBOSA, J.A.; SOUZA, E.M. Eventos tectônicos e sedimentares nas bacias de Pernambuco e da Paraíba: implicações no quebraamento do gondwana e correlação com a bacia do Rio Muni. **Geociências** 25. UNESP, São Paulo, p. 117–126, 2006.

LONG, L.E.; SIAL, A.N; NEKVASIL, H.; BORBA, G.S. Origino granite at Cabo de Santo Agostinho, Northeast Brazil. **Cntrib. Mineral Petrol**, 92: p.341-350, 1986.

MAIA, M.FB. Revisão estratigráfica do intervalo Aptiano-Albiano da Bacia de Pernambuco, Nordeste do Brasil. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, p. 226, 2012.

NASCIMENTO, M.A.L. Geologia, geocronologia, geoquímica e petrogênese das rochas ígneas cretácicas da província magmática do Cabo e suas relações com as unidades sedimentares da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, PPGG-UFRN, p.235, 2003.

MANOEL FILHO, J, CORREIA, E, CORREIA, L. Avaliação hidrogeológica do sistema aquífero recife superior na praia do Paiva município do cabo de Santo Agostinho – PE. FADE/UFPE-LABHID. 2005.

MATOS, R.M.D. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break up between Brazil and west África. In: N.R. Cameron, R.H. Bate & V.S. Clure, (eds). *The oil and gas habitats of the South Atlantic*. **Geol. Soc. Spec. Pub.**, p.153:55-73, 1999.

MESTRINHO, S. S. P, FEITOSA, F.A.C. Manoel Filho, J., FEITOSA, E.C Monitoramento em água subterrânea. In: *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Feitosa, A.C.F.; Filho, J.M.; Feitosa, E.C.; Demetrio, J.G.A. (Org.) 3. ed., p. 673-686, 2008.

MENOR, E.A.; BOUJO, A. A first approach to the marine sedimentary succession of the Estivas Formation, Pernambuco Basin, Northeastern Brazil. In: **XLI Congr. Brasil. Geol.**, 2002, João Pessoa. **Anais do XLI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 2002. p. 315, 2002.

NIXON,S.; GRATH, J.; BOGESTRAND, J. Eurowaternet. The European Environment Agency's Monitoring and Information Network for Inland Water Resources. Technical Guidelines for Implementation. Technical Report nº 7. European Environment Agency. Copenhagen.1998.

OLEA, Ricardo A. Sampling design optimization for spatial functions.Mathematical Geology, v. 16, n. 4, p. 369-392, 1984.

OLIVEIRA, R.G. 1994. Levantamento gravimétrico da área sedimentar da região metropolitana do Recife. *Projeto SINGRE - Série Cartografia Temática*, p. 2: 38.

RABINOWITZ, Philip D.; LABRECQUE, John. The Mesozoic South Atlantic Ocean and evolution of its continental margins. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 84, p. 5973-6002, 1979.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, p.133-137, 1998.

ROSSETTI, D.F.; TRUCKENBRODT, W. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região Bragantina, nordeste do Pará. *Bol MusPar Emílio Goeldi, Ser Cienc Terra* p. 25–74, 1989.

ROSSETTI, D. F.; SANTOS J.R, Area. Facies architecture in a tectonically-influenced estuarine incised valley fill of Miocene age, Northern Brazil. *J South Am Earth Sci*17:p. 267–284, 2004.

ROSSETTI, D.F.; ROJAS, R.R.; SONIA, H.T. Evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na Zona de Costeira da Bacia São Luís, Maranhão, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciência Naturais*,p.11-25, 2013.

SANTOS, I.O. Avaliação Geoquímica da variabilidade das concentrações dos elementos traços ao longo dos perfis pedológico na Bacia do rio Tatuoca-PE,dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.2011.

SÁ, J.M. H. S. Contribuição à geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região bragantina, estado do Pará. *Boletim de Geologia* 3:p. 20-36, 1969.

SÁ, J.M.; BERTRAND, J.M.; LETERRIER, J.; MACEDO, M.H.F. Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the Transversal Zone, Borborema Province, Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14: p. 851-866, 2002.

SIAL, A.N. The magmatic province of Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco: A brazilian Record of the ascension plume activity.In: *LATIN AMERICAN CONGRESS OF GEOLOGY*, 3, Acapulco, abstract. 1p, 1976.

SIAL, A.N.; BORBA, G.S.; VILLARROEL, H.S.; ALBUQUERQUE, C.A.R.Geoquímica de Elementos Terras Raras do Granito do Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco. *Anais do*

XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Balneário de Camboriú, Santa Catarina, Vol.4, 1988.

SILVA, P. A.D; LOUREIRO, C. O. Pequenas Variações Piezométricas Nas Águas Subterrâneas. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2006.

SPIEGEL, M.R. Probabilidade e estatística. São Paulo. Mc Graw-Hill do Brasil.1978.

SZATMARI, P. Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. Revista brasileira de Geociências, v. 17, n. 2, p. 180-188, 1987.

TAYLOR, C. J.; ALLEY, W. M.: Ground-water-level monitoring and the importance of long-term water-level data. Geological Survey (USGS), 2001.

TEÓDULO, M. J. R., LIMA, E. S., NEUMANN, V. H. M. L., LEITE, P. R. B., & SANTOS, M. R. L. Comparação de métodos de extração parcial de metais traço em solos e sedimentos de um estuário tropical sob a influência de um complexo industrial portuário, Pernambuco, Brasil. Estudos Geológicos, p.23-34. 2003.

UIL. H.; GEER. F.C; GEHERELS J.C. KLOOSTERMAN State of the art on monitoring and assessment of groundwaters. UN/ECE Task Force on Monitoring & Assessment, Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO. Lelystad, 1999.

UNEP/WHO. Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes. Organização Mundial da Saúde. Genebra. 1996.

WEIGHT, W.D. & SONDEREGGER, J.L. Manual of applied field hydrogeology. New York: McGraw-Hill : 609 ,2000.

ANEXOS

ANEXO 01 - FICHA DO POÇO PMRAL-01

DADOS GERAIS

Poço: PMRAL-01		
Município: Ipojuca - PE	Local: Suape - Refinaria Abreu e Lima	Data construção: 20/05/09 a 22/05/09
Coordenadas: X= UTME Y= UTMN Z= m DATUM: SAD69		
Profundidade: 10,5 m	Nível Estático: 0,600 m (16.06.09)	Altura da boca: 0,630m (em relação à calçada)
Atraso na entrega do material de revestimento do poço		

DADOS DA PERFURAÇÃO

Intervalo(m)	Diâmetro (pol)
0,0 – 10,5	4 ¾
Fluído de perfuração: Polysafe	

DADOS DA COMPLETAÇÃO

Revestimento	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
+0,63 – 1,0	2
5,0 – 7,5	2
9,5 – 10,0	2
Tipo de revestimento: Geomecânico	
Filtros	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
7,5 – 9,5	2
1,0 – 5,5	2
Tipo de filtro: Geomecânico	
Ranhura: 0,5mm	

DADOS DO CASCALHO

Intervalo(m)	Granulometria(mm)
0,5 – 5,5	1 - 3
7,0 – 10,5	1 - 3

DADOS DA CIMENTAÇÃO

Intervalo(m)
0,0 – 6,5
5,5 – 7,0

ANEXO02 - FICHA DO POÇO PMRAL-02

DADOS GERAIS

Poço: PMRAL-02		
Município: Ipojuca - PE	Local: Suape - Refinaria Abreu e Lima	Data construção: 26/05/09 a 27/05/09
Coordenadas: X= UTME Y= UTMN Z= m DATUM: SAD69		
Profundidade: 10,5 m	Nível Estático: 2,484 m (16.06.09)	Altura da boca: 0,61m (em relação à calçada)
Atraso na entrega do material de revestimento do poço		

DADOS DA PERFURAÇÃO

Intervalo(m)	Diâmetro (pol)
0,0 – 10,5	4 ¾
Fluído de perfuração: Polysafe	

DADOS DA COMPLETAÇÃO

Revestimento	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
+0,63 – 1,0	2
5,0 – 7,5	2
9,5 – 10,0	2
Tipo de revestimento: Geomecânico	
Filtros	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
7,5 – 9,5	2
1,0 – 5,5	2
Tipo de filtro: Geomecânico	
Ranhura: 0,5mm	

DADOS DO CASCALHO

Intervalo(m)	Granulometria(mm)
0,5 – 5,5	1 - 3
7,0 – 10,5	1 - 3

DADOS DA CIMENTAÇÃO

Intervalo(m)
0,0 – 6,5
5,5 – 7,0

ANEXO 03 -FICHA DO POÇO PMRAL-02A

DADOS GERAIS

Poço: PMRAL-02A		
Município: Ipojuca - PE	Local: Suape - Refinaria Abreu e Lima	Data construção: 15/05/09 a 16/05/09
Coordenadas: X= UTME Y= UTMN Z= m DATUM: SAD69		
Profundidade: 10,5 m	Nível Estático: 1,977 m (16.06.09)	Altura da boca: 0,430m (em relação à calçada)
Atraso na entrega do material de revestimento do poço		

DADOS DA PERFURAÇÃO

Intervalo(m)	Diâmetro (pol)
0,0 – 10,5	4 ¾
Fluído de perfuração: Polysafe	

DADOS DA COMPLETAÇÃO

Revestimento	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
+0,63 – 1,0	2
5,0 – 7,5	2
9,5 – 10,0	2
Tipo de revestimento: Geomecânico	
Filtros	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
7,5 – 9,5	2
1,0 – 5,5	2
Tipo de filtro: Geomecânico	
Ranhura: 0,5mm	

DADOS DO CASCALHO

Intervalo(m)	Granulometria(mm)
0,5 – 5,5	1 - 3
7,0 – 10,5	1 - 3

DADOS DA CIMENTAÇÃO

Intervalo(m)
0,0 – 6,5
5,5 – 7,0

ANEXO 04 - FICHA DO POÇO PMRAL-03

DADOS GERAIS

Poço: PMRAL-03		
Município: Ipojuca - PE	Local: Suape - Refinaria Abreu e Lima	Data construção: 18/09/14 a 23/09/14
Coordenadas: X= 276956,0 UTME Y= 9073405,0 UTMN Z=17,8 m DATUM: SIRGAS2000		
Profundidade: 7,0 m	Nível Estático: 3,385m (02.12.14)	Altura da boca: 0,56m (em relação ao solo)
Observações:		

DADOS DA PERFURAÇÃO

Intervalo(m)	Diâmetro (pol)
0,0 – 7.0	7 1/8
Fluído de perfuração: Polysafe (CMC)	

DADOS DA COMPLETAÇÃO

Revestimento	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
+0,70 – 0,50	4
+0,56 – 1,30	2
5,30 – 6,30	2
Tipo de revestimento: Geomecânico	
Filtros	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
1,30 – 6,30	2
Tipo de filtro: Geomecânico	
Ranhura: 0,5mm	

DADOS DO CASCALHO

Intervalo(m)	Granulometria(mm)
0,5 – 5,5	1 - 3
7,0 – 10,5	1 - 3

DADOS DA CIMENTAÇÃO

Intervalo(m)
0,0 – 7,0

ANEXO 05- FICHA DO POÇO PMRAL-04

DADOS GERAIS

Poço: PMRAL-04		
Município: Ipojuca - PE	Local: Suape - Refinaria Abreu e Lima	Data construção: 15/10/14 a 18/10/14
Coordenadas: X= 277404,0 UTME Y= 9072641,0 UTMN Z= 17,8m DATUM: SIRGAS2000		
Profundidade: 15,0 m	Nível Estático: 6,493 m (02.12.14)	Altura da boca: 0,54m (em relação ao solo)
Observações: O local do poço teve que ser deslocado três vezes. Nas duas primeiras a broca atingiu um provável matacão a poucos metros de profundidade, não permitido o avanço da broca		

DADOS DA PERFURAÇÃO

Intervalo(m)	Diâmetro (pol)
0,0 – 15	7 1/8
Fluído de perfuração: Polysafe (CMC)	

DADOS DA COMPLETAÇÃO

Revestimento	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
+0,65 – 0,50	4
+0,54 – 3,0	2
7,00 – 9,0	2
13,0 – 15,0	2
Tipo de revestimento: Geomecânico	
Filtros	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
3,0 – 7,0	2
9,0 – 13,0	2
Tipo de filtro: Geomecânico	
Ranhura: 0,5mm	

DADOS DO CASCALHO

Intervalo(m)	Granulometria(mm)
0,5 – 7,0	1 - 3
7,5 – 15,0	1 - 3

DADOS DA CIMENTAÇÃO

Intervalo(m)
0,0 – 0,5
7,5 – 8,0

ANEXO 06 - FICHA DO POÇO PMRAL-05

DADOS GERAIS

Poço: PMRAL-05		
Município: Ipojuca - PE	Local: Suape- Refinaria Abreu e Lima	Data construção: 11/10/14 a 14/10/14
Coordenadas: X= 277973,0 UTME Y= 9072562,0 UTMN Z= 17,8m DATUM: SIRGAS2000		
Profundidade: 15,0 m	Nível Estático: 7,900 m (02.12.14)	Altura da boca: 0,595m (em relação ao solo)
Observações:		

DADOS DA PERFURAÇÃO

Intervalo(m)	Diâmetro (pol)
0,0 – 15,0	7 ^{1/8}
Fluído de perfuração: Polysafe (CMC)	

DADOS DA COMPLETAÇÃO

Revestimento	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
+0,70–0,50	4
+0,59 – 2,50	2
6,50 – 8,5	2
12,5 – 15,0	2
Tipo de revestimento: Geomecânico	
Filtros	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
2,5 – 6,5	2
8,5 – 12,5	2
Tipo de filtro: Geomecânico	
Ranhura: 0,5mm	

DADOS DO CASCALHO

Intervalo(m)	Granulometria(mm)
0,5 – 15,0	1 - 3

DADOS DA CIMENTAÇÃO

Intervalo(m)
0,0 – 0,5
7,0 – 7,5

ANEXO 07- FICHA DO POÇO PMRAL-06

DADOS GERAIS

Poço: PMRAL-06		
Município: Ipojuca - PE	Local: Suape- Refinaria Abreu e Lima	Data construção: 25/09/14 a 02/10/14
Coordenadas: X= 278124,0 UTME Y= 9073052,0 UTMN Z= 17,8m DATUM: SIRGAS2000		
Profundidade: 15,0 m	Nível Estático: 6,380 m (02.12.14)	Altura da boca: 0,610m (em relação ao solo)
Observações:		

DADOS DA PERFURAÇÃO

Intervalo(m)	Diâmetro (pol)
0,0 – 15,0	7 ^{1/8}
Fluído de perfuração: Polysafe (CMC)	

DADOS DA COMPLETAÇÃO

Revestimento	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
+0,70–0,50	4
+0,61 – 3,0	2
7,0 – 9,0	2
13,0 - 15,0	2
Tipo de revestimento: Geomecânico	
Filtros	
Intervalo(m)	Diâmetro(pol)
3,0– 7,0	2
9,0 – 13,0	2
Tipo de filtro: Geomecânico	
Ranhura: 0,5mm	

DADOS DO CASCALHO

Intervalo(m)	Granulometria(mm)
0,5 – 7,5	1 - 3
8,0 – 15,0	1 - 3

DADOS DA CIMENTAÇÃO

Intervalo(m)
0,0 – 0,5
7,5 – 8,0

ANEXO08– RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS POÇO PMRAL-01

Parâmetros	Datas das coletas								
	2009				2010				VMP
	16/jun	31/ago	07/out	10/dez	23/fev	15/abr	10/jun	27/jul	
pH	6,24	6,38	5,9	5,32	5,2	6,05	5,76	6,0	6,0-9,5 ⁽¹⁾
DQO (mg O ₂ /L)	57,33	20,68	10,3	10,0	37,24	18,6	4,1	8,27	(!)
DBO (mg/L)	4,0	6,0	1,0	3,0	4,0	2,0	<1,0	2,0	(!)
Oxigênio dissolvido (mg/L)	2,2	2,3	1,0	1,8	1,8	0,6	0,9	1,0	(!)
Óleos e graxas totais (mg/L)	13,4	<2,1	<2,1	15,3	5,4	<2,1	10,0	<2,1	(!)
Óleos e graxas Minerais					<2,1	<2,1	5,9	<2,1	
Óleos e graxas vegetal/animal					5,4	<2,1	4,1	<2,1	
Turbidez (NTU)	46,1	5,50	9,87	40,3	5,37	13,0	8,12	25,4	5,0
Sulfeto de Hidrogênio (mg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	NA	ND	0,05
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	159,5	108,0	151,0	90,0	1025,0	144,5	113,0	65,0	1000,0
Nitrato (NO ₃) (mg/L)	1,7	0,45	1,8	3,6	2,1	1,7	2,8	2,4	10,0
Nitrito (NO ₂) (mg/L)	0,07	0,01	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	1,0
Fenol Total (mg/L)	ND	0,009	0,057	0,088	0,01	ND	ND	0,078	0,3
Fluoreto Total (mg/L)	0,595	0,66	0,442	0,049	0,157	0,248	0,063	0,056	1,5
Fósforo Total dissolvido (P) (mg/L)	0,47	0,6	0,4	ND	<0,1	ND	<0,1	0,137	(!)
Manganês (Mn) (mg/L)	0,13	0,1	0,08	0,03	ND	ND	0,06	0,071	0,1
Mercurio (Hg) (mg/L)	ND	ND	ND	0,00035	ND	ND	ND	ND	0,001
Selênio total (Se) (mg/L)	<0,1	<0,1	ND	ND	ND	ND	<0,1	ND	0,01
Sódio (Na) (mg/L)	17,0	16,3	19,5	7,45	11,1	9,1	6,5	8,4	200,0
Ferro (Fe) (mg/L)	2,2	0,22	0,18	5,1	0,6	1,94	3,2	2,99	0,3
Titânio (Ti) (mg/L)	<0,5	<0,5	ND	0,03	ND	ND	<0,5	ND	(!)
Zinco (Zn) (mg/L)	0,02	0,03	0,02	0,03	ND	ND	0,02	ND	5,0
Sulfato (mg/L)	ND	<2,0	ND	ND	0,003	0,006	ND	ND	250,0
Benzeno (µg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	5,0
Tolueno (µg/L)	ND	ND	ND	0,1	1,9	ND	1,8	ND	0,17
Etilbenzeno (µg/L)	ND	ND	ND	0,4	ND	ND	ND	ND	0,2
m+p-Xilenos (µg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,3 ⁽²⁾
o-Xileno (µg/L)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Alumínio (mg/L Al)	0,65	0,08	0,05	ND	ND	ND	0,15	0,11	0,2
Amônia (mg/L NH ₃)	< 0,2	< 0,2	ND	1,25	3,5	ND	ND	ND	1,5
Antimônio (mg/L Sb)	< 0,5	< 0,5	ND	ND	ND	--	<0,5	ND	0,005
Arsênio total (mg/L As)	< 0,1	< 0,1	ND	ND	ND	ND	<0,1	ND	0,01
Bário (mg/L Ba)	0,14	0,16	0,12	0,06	ND	ND	0,03	0,049	0,7
Cádmio (mg/L Cd)	< 0,01	< 0,01	ND	ND	ND	ND	<0,01	ND	0,005
Chumbo (mg/L Pb)	< 0,1	< 0,1	ND	ND	ND	ND	<0,1	ND	0,01
Cianetos (mg/L CN)	< 0,03	< 0,03	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,07
Cloretos (mg/L Cl)	11,0	14,7	10,6	10,6	15,6	10,38	17,29	17,2	250,0
Cobre (mg/L Cu)	< 0,05	< 0,05	ND	ND	ND	ND	<0,05	ND	2,0
Cromo total (mg/L Cr)	< 0,01	< 0,01	ND	ND	ND	ND	<0,01	ND	0,05
Colif. Totais (NMP/100mL)	P	P	A	A	2,0	2,0	<1,8	<1,8	A
Colif. Termotolerantes (NMP/100mL)	A	P	A	A	2,0	<1,8	<1,8	<1,8	A

Obs.: DQO=Demanda Química de Oxigênio; DBO=Demanda Bioquímica de Oxigênio; VMP=Valor máximo permitido, Portaria 518/04 Ministério da Saúde; < - abaixo do limite de detecção; ND - não detectado; ⁽¹⁾=valor recomendado; ⁽²⁾=VMP para xileno totais; Vermelho - acima do VMP; Azul - substâncias que estava acima do VMP na penúltima coleta e que ficaram abaixo do VMP na última coleta. P= presença; A= ausência. <=abaixo do limite de detecção; NA= não analisado.

ANEXO 09– RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS POÇO PMRAL-02

Parâmetros	Datas das coletas								
	2009					2010			VMP
	16/jun	31/ago	07/out	10/dez	23/fev	15/abr	10/jun	27/jul	
pH	6,22	5,91	5,8	5,53	5,75		5,22	5,4	6,0-9,5 ⁽¹⁾
DQO (mg O ₂ /L)	29,47	24,82	12,4	10,0	51,7		14,4	12,4	(!)
DBO (mg/L)	6,0	7,0	3,0	1,0	9,0		3,0	4,0	(!)
Oxigênio dissolvido (mg/L)	NR ⁽²⁾	3,0	2,8	1,4	0,4		1,5	1,7	(!)
Óleos e graxas total (mg/L)	15,3	<2,1	5,9	11,5	<2,1		11,0	<2,1	(!)
Óleos e graxas mineral					<2,1		11,0	<2,1	
Óleos e graxas vegetal/animal					<2,1		<2,1	<2,1	
Turbidez (NTU)	730,0	3,80	1123,0	1125,0	1000,0		907,0	33,8	5,0
Sulfeto de Hidrogênio (mg/L)	0,56	ND	(nr)	ND	ND		NA	0,433	0,05
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	278,0	141,0	131	77,5	151,5		86,0	40,5	1000,0
Nitrato (NO ₃) (mg/L)	3,2	1,37	4,0	6,9	3,4		3,7	3,3	10,0
Nitrito (NO ₂) (mg/L)	0,32	<0,01	0,03	0,03	0,04		0,48	0,07	1,0
Fenol Total (mg/L)	ND	ND	0,017	0,058	ND		ND	0,063	0,3
Fluoreto Total (mg/L)	0,157	<0,1	0,092	0,466	0,099		0,026	0,202	1,5
Fósforo dissolvido (P) (mg/L)	0,17	0,6	0,2	0,1	3,6		0,3	0,08	(!)
Manganês (Mn) (mg/L)	0,78	0,75	0,34	0,22	0,52		0,26	0,101	0,1
Mercúrio (Hg) (mg/L)	ND	0,00012	ND	0,00061	ND		ND	ND	0,001
Selênio total (Se) (mg/L)	0,2	<0,1	ND	ND	ND		<0,1	ND	0,01
Sódio (Na) (mg/L)	34,0	12,8	18	9,0	15,0		6,7	8,3	200,0
Ferro (Fe) (mg/L)	27,4	2,8	32,1	15,88	36,3		11,9	1,4	0,3
Titânio (Ti) (mg/L)	0,5	<0,5	ND	0,336	ND		<0,5	0,0228	(!)
Zinco (Zn) (mg/L)	0,57	0,19	0,14	0,08	ND		0,05	ND	5,0
Sulfato (mg/L)	0,0052	3,4	ND	ND	0,009		ND	0,005	250,0
Benzeno (µg/L)	ND	ND	ND	ND	ND		ND	ND	5,0
Tolueno (µg/L)	ND	ND	ND	ND	2,8		1,5	ND	0,17
Etilbenzeno (µg/L)	ND	ND	ND	0,5	ND		ND	ND	0,2
m+p-Xilenos (µg/L)	ND	ND	ND	ND	ND		ND	ND	0,3 ⁽²⁾
o-Xileno (µg/L)	ND	ND	ND	ND	ND		ND	ND	
Alumínio (mg/L Al)	7,49	2,17	18,27	0,2	10,3		6,78	0,71	0,2
Amônia (mg/L NH ₃)	< 0,2	< 0,2	ND	1,4	0,84		ND	ND	1,5
Antimônio (mg/L Sb)	< 0,5	< 0,5	ND	ND	ND		<0,5	ND	0,005
Arsênio total (mg/L As)	< 0,1	< 0,1	0,5	ND	ND		0,2	ND	0,01
Bário (mg/L Ba)	0,12	0,07	0,21	0,08	ND		0,04	0,024	0,7
Cádmio (mg/L Cd)	< 0,01	<0,01	ND	ND	ND		0,02	ND	0,005
Chumbo (mg/L Pb)	< 0,1	< 0,1	ND	ND	ND		<01	ND	0,01
Cianetos (mg/L CN)	< 0,03	< 0,03	ND	ND	ND		ND	ND	0,07
Cloretos (mg/L Cl)	62,0	28,0	24,8	56,7	15,6		13,83	17,2	250,0
Cobre (mg/L Cu)	< 0,05	< 0,05	ND	0,02	ND		<0,05	ND	2,0
Cromo total (mg/L Cr)	< 0,01	< 0,01	ND	ND	ND		0,01	ND	0,05
Coliformes Totais	P	A	A	A	A		<1,8	<1,8	A
Coliformes Termotolerantes	A	A	A	A	A		<1,8	<1,8	A

Poço sem acesso. Sem coleta de amostra

Obs.: DQO=Demanda Química de Oxigênio; DBO=Demanda Bioquímica de Oxigênio; VMP=Valor máximo permitido, Portaria 518/04 Ministério da Saúde; < - abaixo do limite de detecção; ND – não detectado; ⁽¹⁾=valor recomendado; ⁽²⁾=VMP para xileno totais; Vermelho - acima do VMP; Azul – substâncias que estava acima do VMP na penúltima coleta e que ficaram abaixo do VMP na última coleta; (nr) = Não realizado devido a alta turbidez; P= presença; A= ausência. <=abaixo do limite de detecção; NA= não analisado

ANEXO10 – Resultados das análises PMRAL 01,PMRAL-02, PMRAL 02A
NO SEGUNDO PBA

Parâmetros	PMRAL-01			PMRAL-02A			PMRAL-02		VMP
	Campanhas PBA02								
	01	02	03	01	02	03	01	02	
pH (a 20°C)	6,56	4,55	5,1	6,92	5,44	5,8	6,17	4,78	6,0-9,5 ⁽¹⁾
Óleos e Graxas (mg/L)									(!)
Turbidez (NTU)	90	1200	8,5	88	60	406	411,0	4650,0	5,0
Sulfeto de Hidrogênio (mg/L)									0,1
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	95	78	51	422	382	175	47,0	49,0	1000,0
Condutividade (µS/cm)	120	95	92,7	608	593	318	64,0	68,0	(!)
Nitrato (como N) (mg/L)							0,6		10,0
Nitrito (como N) (mg/L)					0,09			0,13	1,0
Fenol (µg/L)									0,3
Fluoreto (mg/L)	0,2	0,1	0,2		0,3	0,3			1,5
Fósforo Total Dissolvido (mg/L)	0,16	0,46	0,07	0,24	0,15	28,8	1,4	0,71	(!)
Manganês (mg/L)	0,0955	0,089		0,073	0,0831	0,07	1,32	0,5206	0,1
Mercúrio (mg/L)									0,001
Selênio (mg/L)									0,01
Sódio (mg/L)	7,65	10,9	9,1	77,5	70,9	33,6		8,19	200,0
Ferro (mg/L)	13,7	23	0,65	15	14,3	14,5	84,2	47,0	0,3
Titânio (mg/L)	0,155	0,3152	0,0575	0,0435	0,1515	0,02	0,1450	0,2454	(!)
Zinco (mg/L)	0,0913	0,1354		0,0643	0,1274		1,08	0,444	5,0
Sulfeto de hidrogênio (mg/L)									(!)
Sulfato(mg/L)			3,1	-	12,9	5,7			250,0
Alumínio (mg/L)	7,19	24,2	0,77	1,8	5,5	40	93,1	72,5	0,2
Amônia (com NH3 mg/L)	0,26	0,66	0,4	0,35	0,72	0,92		1,06	1,5
Antimônio (mg/L)									0,005
Arsênio (mg/L)				0,0039	0,0023				0,01
Bário (mg/L)	0,1324	0,4169	0,02	0,0382	0,0627	0,14	0,6000	0,3182	0,7
Cádmio (mg/L)									0,005
Chumbo (mg/L)	0,0087	0,0102		0,0029	0,0101		0,0319	0,0195	0,01
Cianeto (mg/L)									0,07
Cloreto (mg/L)	20,1	22,4	16,7	129	126	50,5	12,3	13,7	250,0
Cobre (mg/L)	0,009	0,036			0,0027	<0,05	0,1253	0,0755	2,0
Cromo (mg/L)	0,0216	0,0708		0,0021	0,0068	<0,03	0,1644	0,1160	0,05
Potássio (mg/L)	2,03	3,7	1,9	11,4	12,4	10,5	4,16	3,61	(!)
Cálcio (mg/L)	5,19	2,13	1,5	21,3	5,9	7,3	42,3	13,0	(!)
Alcalinidade Carbonatos (mg/L)					37				(!)
Alcalinidade Bicarbonatos (mg/L)	25		4,8	178		94,5	7,0	0,0	(!)
Magnésio (mg/L)	3,59	11,9	1,2	12,4	10,7	5,9	41,4	20,4	(!)
Benzeno (µg/L)									5,0
Tolueno (µg/L)									0,17
Etilbenzeno (µg/L)									0,2
o-Xileno (µg/L)									0,3 ⁽²⁾
m,p-Xilenos (µg/L)									
Coliformes totais						P			
Coliformes termotolerantes									

Obs.: VMP=Valor máximo permitido, Portaria 2914/11 Ministério da Saúde; ⁽¹⁾=valor recomendado; ⁽²⁾=VMP para xileno totais; Valores em vermelho = acima do VMP; Valores em branco= concentrações abaixo do limite de detecção do equipamento

ANEXO 11 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS PARA O POÇO PMRAL-03.

Parâmetros	Campanhas					VMP
	02/12/2014	03/02/2015	22/04/2015	10/09/2015	21/01/2016	
DQO (mgO ₂ /L)	12	25	4	22	11	(!)
DBO (mgO ₂ /L)	6	3	<10	15	7	(!)
OD (mgO ₂ /L)	4,07	10	0,65	2,5	2,9	(!)
Alumínio (mg/L Al)	0,93	2,1	0,86	0,31	0,4	0,2
Amônia (mg/LNH ₃)	0,8	<0,2	<0,2	0,24	0,22	1,5
Bário (mg/L Ba)	0,73	0,94	0,48	0,33	0,46	0,7
Bicarbonato (mg/L)	386	<0,003	284,5	345,2	450,18	(!)
Cálcio (mg/L Ca)	41,48	32,93	60,51	51,72	44,85	(!)
Carbonato (mg/L CO ₃)	0	0	0	0	0	(!)
Cloretos (mg/L Cl)	11,59	25,32	28	28	20,96	250
Cobre (mg/L Cu)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	2,0
Condutividade (µS/cm) (Itep)	737	468	787	429	715	(!)
Condutividade em campo	789	820		512	815	(!)
Cromo total (mg/L Cr)	<0,03	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,05
Ferro total (mg/L Fe)	1,36	2,47	0,54	0,51	0,58	0,3
Fluoretos (mg/L F)	0,58	0,4	0,5	0,4	ND	1,5
Fósforo total dissolvido (mg/L)	0,09	0,3	0,07	0,1	0,24	(!)
Magnésio (mg/L Mg)	34,59	30,57	23,63	23,26	28,36	(!)
Manganês total (mg/L Mn)	1,52	1,3	0,26	0,14	0,16	0,1
Nitratos (mg/L NO ₃)	0,02	0,02	0,15	0,46	0,27	10,0
Nitritos (mg/L NO ₂)	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	1,0
pH (Itep)	6,7	6,3	7,3	5,9	6	6,0-9,5 ⁽¹⁾
pH (campo)	6,75	6,51		6,78	7	6,0-9,5 ⁽¹⁾
Potássio (mg/L K)	8,7	10,4	7,5	8	10,75	(!)
Sódio (mg/L Na)	45,05	46,35	36,2	33,1	55,45	200,0
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	514	430	480	524	299	1000,0
Sulfatos (mg/L SO ₄)	<2,0	9,06	52	29	15,8	250,0
Sulfeto de Hidrogênio (µg/L H ₂ S)	0,6	1,2	1,6	1,2	2,6	0,1
Titânio (µg/L Ti)	0,04	<0,005	<0,005	0,008	0,005	(!)
Turbidez(UNT)	42	58	29	7,8	22,3	5,0
Zinco (mg/L Zn)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	5,0
Antimônio (mg/L Sb)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005
Arsênio (mg/L As)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Cádmio (mg/L Cd)	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,005
Chumbo (mg/L Pb)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	0,01
Mercúrio (mg/L Hg)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Selênio (mg/L Se)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,001
Cianeto (mg/L CN)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,07
Óleos e graxas minerais (mg/L)	<10	<10,0	<10	<10	18	(!)
Fenois (mg/L)	0,05	0,07	<0,02	0,038	<0,01	0,3
Coliformes Totais (NMP/100ml)	A	A	A	A	A	A
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	A	A	A	A	A	A

Obs.: VMP=Valor máximo permitido, Portaria 2914/11 Ministério da Saúde;< - abaixo do limite de detecção; ⁽¹⁾=valor recomendado; ⁽²⁾=VMP para xileno totais; Vermelho - acima do VMP; P= presença; A= ausência; NA=não analisado; OD= oxigênio dissolvido; DQO=Demanda química de oxigênio; DBO=Demanda bioquímica de oxigênio. (!)=parâmetro sem referência na portaria 2914/11

ANEXO 12- RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS PARA O POÇO PMRAL-04.

Parâmetros	Campanhas					VMP
	02/12/2014	03/02/2015	22/04/2015	10/09/2015	21/01/2016	
DQO (mgO ₂ /L)	31	31	16	28	39	(!)
DBO (mgO ₂ /L)	14	19	7	14	13	(!)
OD (mgO ₂ /L)	0,04	7,24	<1,0	<1,0	<1,0	(!)
Alumínio (mg/L Al)	0,58	22,3	4,84	3,88	0,4	0,2
Amônia (mg/LNH ₃)	0,35	0,55	0,36	0,81	0,89	1,5
Bário (mg/L Ba)	<0,05	0,06	0,08	0,05	<0,05	0,7
Bicarbonato (mg/L)	0	0	0	0	0	(!)
Cálcio (mg/L Ca)	22,93	1,77	8,77	3,53	3,8	(!)
Carbonato (mg/L CO ₃)	0	0	0	0	0	(!)
Cloretos (mg/L Cl)	30,6	31,61	39	35	30,26	250
Cobre (mg/L Cu)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	2,0
Condutividade (µS/cm) (Itep)	242	230	215	174	227	(!)
Condutividade em campo	157,6	264,7		255	226	(!)
Cromo total (mg/L Cr)	<0,03	0,04	<0,03	<0,03	<0,03	0,05
Ferro total (mg/L Fe)	15,53	28,9	28,21	37,93	13,27	0,3
Fluoretos (mg/L F)	<0,2	<0,2	<0,2	0,1	ND	1,5
Fósforo total dissolvido (mg/L)	4,07	1,54	2,29	0,14	0,55	(!)
Magnésio (mg/L Mg)	5,04	1,85	3,43	2	2,01	(!)
Manganês total (mg/L Mn)	0,14	0,13	0,21	0,23	0,1	0,1
Nitratos (mg/L NO ₃)	0,06	0,03	0,04	0,03	0,05	10,0
Nitritos (mg/L NO ₂)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,0
pH (Itep)	6,4	6,5	6,2	5,7	5,5	6,0-9,5 ⁽¹⁾
pH (campo)	6,38	5,12	-	6,1	5,76	6,0-9,5 ⁽¹⁾
Potássio (mg/L K)	3,15	2,1	1,2	2,1	2,75	(!)
Sódio (mg/L Na)	15,4	14,7	10,9	15,6	19,8	200,0
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	241	125	38	285	60	1000,0
Sulfatos (mg/L SO ₄)	21	29,6	35	31	33,4	250,0
Sulfeto de Hidrogênio (µg/L H ₂ S)	0,6	0	0	0	1,0	0,1
Titânio (µg/L Ti)	0,01	0,006	0,09	0,08	0,007	(!)
Turbidez(UNT)	28	59	44	49	178	5,0
Zinco (mg/L Zn)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	5,0
Antimônio (mg/L Sb)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005
Arsênio (mg/L As)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Cádmio (mg/L Cd)	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,005
Chumbo (mg/L Pb)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01
Mercúrio (mg/L Hg)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Selênio (mg/L Se)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,001
Cianeto (mg/L CN)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,07
Óleos e graxas minerais (mg/L)	<10	<10,0	<10	<10	20	(!)
Fenóis (mg/L)	0,05	0,02	<0,02	0,031	<0,01	0,3
Coliformes Totais (NMP/100ml)	A	A	A	A	A	A
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	A	A	A	A	A	A

Obs.: VMP=Valor máximo permitido, Portaria 2914/11 Ministério da Saúde;< - abaixo do limite de detecção; ⁽¹⁾=valor recomendado; ⁽²⁾=VMP para xileno totais; Vermelho - acima do VMP; P= presença; A= ausência; NA=não analisado; OD= oxigênio dissolvido; DQO=Demanda química de oxigênio; DBO=Demanda bioquímica de oxigênio. (!)=parâmetro sem referência na portaria 2914/11

ANEXO 13 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS PARA O POÇO PMRAL-05.

Parâmetros	Campanhas					VMP
	02/12/2014	03/02/2015	22/04/2015	10/09/2015	21/01/2016	
DQO (mgO ₂ /L)	35	17	16	31	19	(!)
DBO (mgO ₂ /L)	8	11	<10	15	<1,0	(!)
OD (mgO ₂ /L)	3,4	5,25	ND	0,85	1,1	(!)
Alumínio (mg/L Al)	50,84	2,69	1,34	22,57	0,7	0,2
Amônia (mg/L NH ₃)	0,57	<0,2	<0,2	0,22	<0,2	1,5
Bário (mg/L Ba)	0,46	0,18	0,07	0,3	0,11	0,7
Bicarbonato (mg/L)	200	119,56	52,5	78,08	86,62	(!)
Cálcio (mg/L Ca)	52,99	29	18,5	36,37	17,55	(!)
Carbonato (mg/L CO ₃)	0	0	0	0	0	(!)
Cloretos (mg/L Cl)	13	18,45	18	35	11,41	250
Cobre (mg/L Cu)	0,11	0,06	<0,05	0,05	<0,05	2,0
Condutividade (µS/cm) (Itep)	476	414	225	200	189	(!)
Condutividade em campo	295	448		235	271	(!)
Cromo total (mg/L Cr)	0,04	0,03	<0,03	0,03	<0,03	0,05
Ferro total (mg/L Fe)	48,76	0,37	0,46	31,16	0,43	0,3
Fluoretos (mg/L F)	0,27	<0,2	<0,2	0,28	ND	1,5
Fósforo total dissolvido (mg/L)	1,64	0,56	0,12	0,37	0,1	(!)
Magnésio (mg/L Mg)	25,9	6,36	4,1	7,38	3,26	(!)
Manganês total (mg/L Mn)	1,77	0,69	0,2	0,91	0,14	0,1
Nitratos (mg/L NO ₃)	0,16	0,16	0,03	0,26	0,07	10,0
Nitritos (mg/L NO ₂)	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,0
pH (Itep)	5,8	6	6,2	5,8	6,66	6,0-9,5 ⁽¹⁾
pH (campo)	5,85	5,95		6,48	6,72	6,0-9,5 ⁽¹⁾
Potássio (mg/L K)	2,7	1,8	6,6	12,4	9,2	(!)
Sódio (mg/L Na)	21,4	16,6	16,9	12,6	16,65	200,0
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	223	122	110	248	338	1000,0
Sulfatos (mg/L SO ₄)	16	18,8	54	29	32,4	250,0
Sulfeto de Hidrogênio (µg/L H ₂ S)	<0,02	0,8	2,4	2,2	2,6	0,1
Titânio (µg/L Ti)	2,6	0,005	0,02	0,27	0,009	(!)
Turbidez(UNT)	1098	4,745	99	1083	25,6	5,0
Zinco (mg/L Zn)	0,3	0,13	<0,05	0,15	0,13	5,0
Antimônio (mg/L Sb)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,005
Arsênio (mg/L As)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Cádmio (mg/L Cd)	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,005
Chumbo (mg/L Pb)	0,19	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Mercúrio (mg/L Hg)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,0001	<0,001	0,01
Selênio (mg/L Se)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,001
Cianeto (mg/L CN)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,07
Óleos e graxas minerais (mg/L)	<10	<10,0	<10	<10	<10	(!)
Fenóis (mg/L)	0,01	0,01	<0,02	0,032	<0,01	0,3
Coliformes Totais (NMP/100ml)	P	A	P	P	P	A
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	A	A	P	A	P	A

Obs.: VMP=Valor máximo permitido, Portaria 2914/11 Ministério da Saúde;< - abaixo do limite de detecção; ⁽¹⁾=valor recomendado; ⁽²⁾=VMP para xileno totais; Vermelho - acima do VMP; P= presença; A= ausência; NA=não analisado; OD= oxigênio dissolvido; DQO=Demanda química de oxigênio; DBO=Demanda bioquímica de oxigênio. (!)=parâmetro sem referência na portaria 2914/11

ANEXO 14 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS PARA O POÇO PMRAL-06 .

Registros	Campanhas					VMP
	02/12/2014	03/02/2015	22/04/2015	10/09/2015	21/01/2016	
DQO (mgO ₂ /L)	31	1	3.2	27	16	(!)
DBO (mgO ₂ /L)	5	13	<10	13	9	(!)
OD (mgO ₂ /L)	3.99	1.7	0.9	0.96	1.2	(!)
Alumínio (mg/L Al)	0.17	1.53	0.66	1.81	0.45	0,2
Amônia (mg/LNH ₃)	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.33	1,5
Bário (mg/L Ba)	0.16	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0,7
Bicarbonato (mg/L)	12.2	6.1	8	13.42	8.54	(!)
Cálcio (mg/L Ca)	3.96	0.98	5.57	3.99	3.67	(!)
Carbonato (mg/L CO ₃)	0	0	0	0	0	(!)
Cloretos (mg/L Cl)	18.52	16.78	18	21	14.19	250
Cobre (mg/L Cu)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	2,0
Condutividade (μS/cm) (Itep)	126	96	87	90	100	(!)
Condutividade em campo	122	103.3		105	111.3	(!)
Cromo total (mg/L Cr)	<0.03	0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0,05
Ferro total (mg/L Fe)	<0.05	0.37	0.65	1.85	0.31	0,3
Fluoretos (mg/L F)	0.3	<0.2	0.26	0.12	ND	1,5
Fósforo total dissolvido (mg/L)	0.05	0.07	0.11	0.03	0.29	(!)
Magnésio (mg/L Mg)	1..5	1.17	1.98	1.39	1.48	(!)
Manganês total (mg/L Mn)	0.1	0.13	0.15	0.12	0.1	0,1
Nitratos (mg/L NO ₃)	0.21	0.06	<0.02	0.05	0.01	10,0
Nitritos (mg/L NO ₂)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1,0
pH (Itep)	4.9	7.2	6.1	4.95	5.93	6,0-9,5 ⁽¹⁾
pH (campo)	4.88	4.82		5.17	5.2	6,0-9,5 ⁽¹⁾
Potássio (mg/L K)	2.5	2	1.9	3	3.75	(!)
Sódio (mg/L Na)	13.65	11.35	8.5	9.9	11.35	200,0
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	129	6	47	76	274	1000,0
Sulfatos (mg/L SO ₄)	7.6	7.37	11	24	4.4	250,0
Sulfeto de Hidrogênio (μg/L H ₂ S)	0.7	0.8	1	2.4	2	0,1
Titânio (μg/L Ti)	<0.005	0.007	<0.005	0.08	0.006	(!)
Turbidez(UNT)	2.3	5.4	1.9	880	92	5,0
Zinco (mg/L Zn)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	5,0
Antimônio (mg/L Sb)	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0,005
Arsênio (mg/L As)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.014	<0.01	0,01
Cádmio (mg/L Cd)	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	0,005
Chumbo (mg/L Pb)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0,01
Mercúrio (mg/L Hg)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0,01
Selênio (mg/L Se)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,001
Cianeto (mg/L CN)	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0,07
Óleos e graxas minerais (mg/L)	<10	<10.0	<10	<10	<10	(!)
Fenois (mg/L)	0.005	<0.01	<0.02	0.032	<0.1	0,3
Coliformes Totais (NMP/100ml)	A	A	A	P	A	A
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	A	A	A	P	A	A

Obs.: VMP=Valor máximo permitido, Portaria 2914/11 Ministério da Saúde;< - abaixo do limite de detecção; ⁽¹⁾=valor recomendado; ⁽²⁾=VMP para xileno totais; Vermelho - acima do VMP; P= presença; A= ausência; NA=não analisado; OD= oxigênio dissolvido; DQO=Demanda química de oxigênio; DBO=Demanda bioquímica de oxigênio. (!)=parâmetro sem referência na portaria 2914/11