



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PÂMELLA MOURA

VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS: USO DOS MÉTODOS DRASTIC E GOD
NA PORÇÃO NORTE DO COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO
PECÉM, ESTADO DO CEARÁ

FORTALEZA

2014

PÂMELLA MOURA

VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS: USO DOS MÉTODOS DRASTIC E GOD
NA PORÇÃO NORTE DO COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM,
ESTADO DO CEARÁ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, do Departamento de Geologia, Centro de Ciências, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Geologia. Área de Concentração: Geologia.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Beltrão Sabadia
Co-Orientadora: Dra. Maria da Conceição Rabelo Gomes

Fortaleza
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- M889v Moura, Pâmella.
 Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na porção norte do
 Complexo Industrial e Portuário do Pecém, estado do Ceará / Pâmella Moura. – 2014.
 128 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de
 Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2014.
 Área de Concentração: Geologia.
 Orientação: Prof. Dr. José Antonio Beltrão Sabadia.
 Coorientação: Profa. Dra. Maria da Conceição Rabelo Gomes.
1. Águas subterrâneas. 2. Aquíferos. 3. Hidrogeologia . I. Título.

PÂMELLA MOURA

VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS: USO DOS MÉTODOS DRASTIC E GOD
NA PORÇÃO NORTE DO COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM,
ESTADO DO CEARÁ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, do Departamento de Geologia, Centro de Ciências, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Geologia. Área de Concentração: Geologia.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Dra. Maria da Conceição Rebelo Gomes (Co-Orientadora)
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Prof^a. Dra. Sonia Maria Vasconcelos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Maria de Lourdes,
MULHER, Mãe e Avó:
Meu grande exemplo de vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Célia e Kilson, meu irmão Vinícius, e todos os queridos da minha grande família (Selma, Lourdes, Alzira, Maria, Sandra, Sérgio, Expedito (*in memoriam*), Sérgio Junior e Beatriz), pelo afeto, pelos exemplos que me tornaram o que sou e porque mesmo na saudade me apoiaram e torceram pelas minhas realizações.

Ao meu querido Daniel, amigo, companheiro, parceiro, confidente e professor: pela paciência e zelo, e por toda a sua ajuda e ensinamentos na construção deste trabalho. Obrigada por tudo!

Aos amigos de sempre, lá de Ribeirão Pires, e aos amigos de graduação, que mesmo longe torceram pelo sucesso desta empreitada.

Aos companheiros de Pós-Graduação, principalmente à grande amiga Rosângela Viera (PUC-SP), por compartilhar as angústias, ansiedades, dúvidas, alegrias, e tantas outras emoções que esta experiência é capaz de proporcionar. E meus sinceros agradecimentos aos demais colegas do Laboratório de Hidrogeologia e do Departamento de Geologia, e a todos que contribuíram de alguma forma no desenvolvimento deste trabalho.

Ao orientador José Antonio Beltrão Sabadia.

A Maria da Conceição Rabelo Gomes, pela co-orientação e todo apoio na etapa final deste trabalho, e ao professor Itabaraci N. Cavalcante, pela valiosa contribuição e ensinamentos hidrogeológicos.

Ao Instituto de Pesquisas e Estratégia Econômica do Ceará, na pessoa de Cleyber N. Medeiros, pela disponibilidade da base cartográfica do Pólo Ceará Costa do Sol; e meus agradecimentos póstumos ao Sr. José Alberto Ribeiro da CPRM, pelo auxílio com o banco de dados do SIAGAS.

E por fim, agradeço a CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio e ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará.

“São todos maus descobridores, os que pensam que não há terra quando conseguem ver apenas o mar”.

(Francis Bacon)

RESUMO

O Complexo Industrial e Portuário do Pecém, localizado nos municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia, Região Metropolitana de Fortaleza (CE), abriga diversas atividades industriais que, somadas à expansão urbana impulsionada por sua construção, apresentam-se com grande potencial de poluição das águas subterrâneas locais. Em vista disto, este trabalho foi realizado na área que abrange a porção norte deste Complexo, e teve por objetivo avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos por meio dos métodos DRASTIC e GOD e caracterização do perigo de contaminação. Realizou-se quatro etapas de monitoramento em 24 poços ao longo de 2013, onde verificou-se a presença de três sistemas aquíferos: Dunas, Barreiras e Fissural. Os parâmetros monitorados foram: pH, temperatura, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, salinidade e nível estático. As medidas de pH permitiram classificar as águas subterrâneas como ácidas, com 42% dos poços fora da faixa recomendada pelos padrões de potabilidade. As concentrações de Sólidos Totais Dissolvidos encontram-se dentro dos padrões de potabilidade e permitiram classificar as águas como “águas doces”. O método DRASTIC apresentou índices entre muito baixo a muito alto, com predomínio de vulnerabilidade alta a muito alta, associadas ao Aquífero Dunas, e vulnerabilidade moderada associada ao Aquífero Barreiras. As áreas de baixa e muito baixa vulnerabilidade ocorrem em porções do Barreiras com nível estático mais profundo e no Aquífero Fissural. O nível estático, a recarga e zona vadosa foram os parâmetros que mais influenciaram estes resultados. O método GOD apresentou índices entre moderado e alto, com alta vulnerabilidade associada ao Aquífero Dunas, e vulnerabilidade moderada associada aos Aquíferos Barreiras e Fissural. O nível estático foi o parâmetro que mais influenciou os resultados deste método. Nos dois métodos, o mapeamento da vulnerabilidade apresentou contornos muito próximos aos do mapeamento geológico, o que sugere forte influência da litologia no processo de avaliação. As atividades presentes na área foram classificadas com potencial de carga contaminante entre moderado e elevado. O perigo de contaminação obtido pelo método GOD e pelo potencial de carga contaminante indicou o predomínio de áreas de perigo moderado. Os resultados sugerem que a vulnerabilidade dos aquíferos e o perigo de contaminação foram subestimados na instalação do complexo, no que concerne à área onde cada atividade industrial poderia ser instalada. Na comparação entre os métodos, o método DRASTIC apresentou melhores resultados para estudos que requeiram maior detalhamento, como EIA/Rimas e Planos Diretores. O método GOD apresentou resultados mais satisfatórios para estudos regionais, como zoneamentos territoriais. Os resultados também reiteram a

fragilidade ambiental de grande parte da área destinada à instalação do complexo industrial, e reforçam a necessidade de monitoramento das atividades industriais no que diz respeito a prevenção de contaminações.

Palavras-chave: Vulnerabilidade. Águas Subterrâneas. GOD. DRASTIC. Pecém.

ABSTRACT

The Industrial and Portuary Complex of Pecém, located in the cities of São Gonçalo do Amarante and Caucaia, Fortaleza Metropolitan Region, Ceará State, Brazil, has several industries that, associate to urban sprawl stimulated by its construction, present strong potential for pollution of local groundwater. Therefore, this work was carried out in the northern portion of this Industrial Complex and aims to evaluate aquifer vulnerability through DRASTIC and GOD methods, and characterization of aquifer pollution hazard. In 2013, four steps of monitoring were made for 24 wells, from which it was possible to identify three main aquifer systems: Dunas, Barreiras and Fraturado. The monitored parameters were: pH, electrical conductivity, total dissolved solids, temperature, salinity, and water table. The pH results allowed classifying the groundwater as acids, with about 42% wells outside the recommended range of the potability pattern. Total dissolved solids concentrations are inside of the potability pattern and allowed classifying the groundwater as fresh water. The major acidity and salt concentrations were found during the dry season. The water table has average depth around 5 meters. The DRASTIC method showed indices between very low and very high, with predominance of high and very high vulnerability associated to the Dunas Aquifer, and moderate vulnerability associated to the Barreiras Aquifer. Areas with low and very low vulnerability occur in portions of the Barreiras Aquifer where the water table is most deep, and in the Fraturado Aquifer. Water table, recharge, and vadose zone were the parameters that most influenced these results. The GOD method showed indices between moderate and high, with high vulnerability associated to the Dunas Aquifer, and moderate vulnerability associated to the Barreiras and Fraturado aquifers. Water table was the parameter that most influenced the results of this method. In both methods, the vulnerability mapping showed contours very close to the ones of the geologic map, suggesting strong influence of the lithology in the evaluating process. Activities developed in the area were classified with subsurface contaminant load potential moderate and high. Aquifer pollution hazard obtained by GOD vulnerability and subsurface contaminant load potential indicates the dominance of areas with moderate pollution hazard. The results suggest that aquifer vulnerability and aquifer pollution hazard were underestimated during the construction of the industrial complex, regarding the area where each activity should be building. Comparing both methods, DRASTIC showed better results for studies that requires greater details, as EIAs and Master Plans. The GOD method showed better results for regional studies, as land zonings. The results also reaffirms the environmental fragility the most part of the area intended to the

industrial complex, and reinforce the need for monitoring the industrial activities regarding pollution prevention.

Keywords: Vulnerability. Groundwater. GOD. DRASTIC. Pecém.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização e acesso à área de estudo

Figura 2. Plano Diretor e demais instalações na área do CIPP e entorno

Figura 3. Fluxograma para avaliação de vulnerabilidade de aquíferos pelo método GOD

Figura 4. Variação da precipitação anual para o período de 1982-2012 na Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante

Figura 5. Média mensal de precipitação no período de 1982-2013 para a Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante.

Figura 6. Média mensal de temperatura estimada para o município de São Gonçalo do Amarante

Figura 7. Mapa Geológico da região da área de estudo

Figura 8. Balanço hídrico para a região estudada com dados da Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante, período: 1982-2013

Figura 9. Relação entre as médias pluviométricas e a infiltração eficaz a partir do balanço hídrico de São Gonçalo do Amarante, período: 1982-2013

Figura 10. Tempo de construção dos poços cadastrados na área de pesquisa

Figura 11. Perfil esquemático litológico/construtivo para um poço alocado adjacente à área de pesquisa, baseado nas informações do SIAGAS.

Figura 12. Tipo de revestimento dos poços cadastrados na área de pesquisa

Figura 13. Profundidade dos poços cadastrados na área de pesquisa

Figura 14. Situação atual de uso dos poços cadastrados na área de pesquisa

Figura 15. Localização dos poços na área de estudo

Figura 16. Variação periódica da profundidade do nível estático nos poços tubulares alocados em área de exposição do aquífero Dunas

Figura 17. Variação periódica da profundidade do nível estático nos poços manuais alocados em área de exposição do aquífero Dunas

Figura 18. Variação periódica da profundidade do nível estático nos poços alocados em área de exposição do aquífero Barreiras

Figura 19. Variação periódica da profundidade do nível estático nos poços alocados em área de exposição do aquífero Fissural

Figura 20. Zoneamento tendencial do nível estático dos poços monitorados na área de estudo no ano de 2013

Figura 21. Mapa das isolinhas da recarga calculada para a região

Figura 22. Variação periódica do fluxo da água subterrânea no ano de 2013

Figura 23. Mapa das relações de declividade

Figura 24. Variação espacial tendencial do pH nas águas subterrâneas da área de estudo no ano de 2013

Figura 25. Variação periódica do pH medido nos poços manuais alocados em área de exposição do Aquífero Dunas

Figura 26. Variação periódica do pH medido nos poços tubulares alocados em área de exposição do Aquífero Dunas

Figura 27. Vista do poço tubular P-25

Figura 28. Variação periódica do pH medido nos poços tubulares e manuais alocados em área de exposição do Aquífero Barreiras

Figura 29. Variação periódica do pH medido nos poços tubulares e manuais alocados em área de exposição do Aquífero Fissural

Figura 30. Variação espacial tendencial de STD (mg/L) nas águas subterrâneas da área de estudo no ano de 2013

Figura 31. Variação periódica do STD medido nos poços manuais alocados em área de exposição do Aquífero Dunas

Figura 32. Variação periódica de STD medido nos poços tubulares alocados em área de exposição do Aquífero Dunas

Figura 33. Variação periódica de STD (mg/L) medido nos poços tubulares e manuais alocados em área de exposição do Aquífero Barreiras

Figura 34. Variação periódica de STD (mg/L) medido nos poços tubulares e manuais alocados em área de exposição do Aquífero Fissural

Figura 35. Distribuição das áreas por intervalo de vulnerabilidade pelo índice DRASTIC. A relação percentual considera a área de estudo (53,4 km²)

Figura 36. Relação entre o número de poços por intervalo de vulnerabilidade DRASTIC

Figura 37. Vulnerabilidade natural pelo método DRASTIC

Figura 38. Distribuição das áreas x intervalo de vulnerabilidade pelo índice GOD. A relação percentual considera a área de estudo (53,4 km²)

Figura 39. Relação entre o número de poços por intervalo de vulnerabilidade GOD

Figura 40. Vulnerabilidade natural pelo método GOD

Figura 41. Relação entre as classes de perigo e a área mapeada

Figura 42. Perigo de contaminação e indicação das cargas contaminantes

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1.** Principais métodos para determinação de vulnerabilidade de aquíferos
- Quadro 2.** Descrição dos parâmetros e índices de ponderação do método DRASTIC
- Quadro 3.** Descrição dos valores para cada faixa dos parâmetros do método DRASTIC
- Quadro 4.** Intervalos de vulnerabilidade do índice DRASTIC
- Quadro 5.** Descrição dos parâmetros do método GOD
- Quadro 6.** Descrição dos índices de vulnerabilidade do método GOD
- Quadro 7.** Classificação das fontes de contaminação: pontuais e difusas, segundo o sistema POSH

LISTA DE TABELAS

- Tabela 01.** Volumes anuais e valor médio de precipitação para as Estações Meteorológicas do Pecém, São Gonçalo do Amarante e Caucaia, no período de 1998 até 2005
- Tabela 2.** Valores calculados para o balanço hídrico a partir dos dados da Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante, período 1982/2012
- Tabela 3.** Medidas periódicas do nível estático no ano de 2013 (valores em metros)
- Tabela 4.** Recargas estimadas por unidade aquífera no ano de 2013
- Tabela 5.** Valores de pH medidos *in situ* durante as quatro etapas de monitoramento
- Tabela 6.** Valores de Condutividade Elétrica a 25°C, STD e Salinidade medidos *in situ* durante as quatro etapas de monitoramento (valores em $\mu\text{s/cm}$, mg/L e ppt, respectivamente)
- Tabela 7.** Classes, valores e pesos atribuídos neste trabalho para os parâmetros utilizados no mapeamento da vulnerabilidade pelo método DRASTIC
- Tabela 8.** Classes e pesos atribuídos neste trabalho para os parâmetros utilizados no mapeamento da vulnerabilidade pelo índice de vulnerabilidade GOD
- Tabela 9.** Relação percentual das áreas dos intervalos de vulnerabilidade pelos índices DRASTIC e GOD nos aquíferos da área de estudo
- Tabela 10.** Principais potenciais fontes de contaminação da área de estudo e sua avaliação quanto o potencial da carga contaminante no subsolo, baseado no método POSH

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivo.....	20
1.2	Objetivos Específicos.....	20
2.	ÁREA DE ESTUDO.....	21
2.1	Aspectos sócio-econômicos.....	22
2.2	Complexo Industrial e Portuário do Pecém	23
2.3	Unidades de Conservação.....	25
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
3.1	Vulnerabilidade de Aquíferos e Perigo de Contaminação.....	28
3.2	Método de Vulnerabilidade DRASTIC.....	32
3.3	Método de Vulnerabilidade GOD.....	36
3.4	Estudo de Casos.....	39
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
4.1	Métodos de Vulnerabilidade	45
4.1.1	Método de Vulnerabilidade DRASTIC.....	45
4.1.2	Método de Vulnerabilidade GOD.....	46
4.2	Caracterização e mapeamento das potenciais fontes de contaminação.....	47
4.3	Balanço Hídrico.....	48
5.	CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTAIS.....	51
5.1	Aspectos Climáticos Regionais	51
5.2	Caracterização Climática Local.....	51
5.2.1	Precipitação.....	52
5.2.2	Temperatura.....	53
5.3	Geologia.....	54
5.3.1	Complexo Ceará.....	54
5.3.2	Formação Barreiras.....	56
5.3.3	Sistemas Depositionais Costeiros.....	57
5.4	Geomorfologia.....	58
5.5	Solos.....	60

5.6	Vegetação.....	61
5.7	Águas Superficiais.....	63
6	HIDROGEOLOGIA.....	64
6.1	Sistema Aquífero Aluvionar.....	64
6.2	Sistema Aquífero Dunas.....	65
6.3	Sistema Aquífero Barreiras.....	66
6.4	Sistema Aquífero Fissural.....	67
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
7.1	Balanço Hídrico.....	68
7.2	Situação Atual das Obras de Captação e Uso das Águas Subterrâneas.....	70
7.3	Nível Estático e Recarga	75
7.4	Mapeamento da Superfície Potenciométrica e Declividade do Terreno.....	81
7.5	Características Físico-Químicas das Águas Subterrâneas.....	84
7.5.1	pH.....	84
7.5.2	Condutividade Elétrica, Sólidos Totais Dissolvidos e Salinidade.....	90
7.6	Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas.....	95
7.6.1	Método DRASTIC.....	95
7.6.2	Método GOD.....	99
7.6.3	Comparação entre os resultados dos métodos de determinação dos Índices de Vulnerabilidade.....	103
7.6.4	Classificação do Potencial de Contaminação e Mapeamento do Perigo de Contaminação dos Sistemas Aquíferos com indicação das Cargas Contaminantes.....	106
8	CONCLUSÕES.....	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
	APÊNDICE A - Poços cadastrados em campo.....	121
	APÊNDICE B - Medidas de temperatura, avaliação organoléptica e carga hidráulica dos poços monitorados (Fevereiro/Maio/Setembro/Dezembro).....	123
	ANEXO A – Cadastro de poços obtido por meio do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS/2013).....	127

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, o desenvolvimento social esteve atrelado à demanda e a disponibilidade de água doce em determinada região. Seja antes ou após a revolução industrial, a maioria das grandes cidades se desenvolveu próximo ao leito de grandes rios (STANLEY; WARNE, 1998; DAY *et al.*, 2007). Entretanto, em lugares onde a água superficial era escassa, foram desenvolvidas técnicas para aproveitamento das águas subterrâneas, com registros arqueológicos de poços escavados no Oriente Médio que remontam a 4500 a.C. (MACHADO, 2005).

Com a evolução das técnicas de construção de poços e de captação, as águas subterrâneas passaram a ter um papel primordial no suprimento das necessidades hídricas em diversas cidades, principalmente em regiões áridas e semi-áridas que abrigam grandes centros urbanos ou agrícolas como, por exemplo, a Califórnia e a Cidade do México. No Brasil, a Região Nordeste possui um problema histórico de escassez de água, que em parte é sanado pela captação de águas subterrâneas, realizada por quase 49 mil poços¹, de acordo com os dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (SIAGAS). Especificamente no estado do Ceará, o mesmo Banco de Dados aponta para um número de aproximadamente 21 mil poços, sendo em grande maioria destinado para o uso doméstico e abastecimento urbano, o que não foi suficiente para evitar que 175 dos 184 municípios do estado entrassem em situação de emergência devido à seca, conforme o Decreto Estadual nº. 31.214 de 21 de maio de 2013 (CEARÁ, 2013). Entretanto, nos últimos anos, o estado do Ceará tem passado por processos de crescimento econômico que se refletem numa série de ações estatais para investimento em infra-estrutura, produção industrial, comércio e prestação de serviços, que repercute diretamente na ocupação do espaço territorial do estado, sendo a construção do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) uma das principais ações.

Este Complexo, localizado nos municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia, 60 km distante de Fortaleza, constitui-se de um pólo industrial atrelado ao Porto do Pecém, que agregará empresas de diversos setores industriais, como siderúrgicas, metalúrgicas, termoeletricas e refinarias. A região onde o CIPP está inserido é formada principalmente por terrenos sedimentares, onde encontram-se campos de dunas,

¹ De acordo com pesquisa realizada no SIAGAS em janeiro de 2014, dos 94.115 poços cadastrados na região Nordeste, 26.618 estavam em situação de bombeamento e 22.285 estavam equipados, totalizando 48.903 aptos para captação das águas subterrâneas.

caracterizados como a principal área de recarga das águas subterrâneas da região, com presença de lagos interdunares; e tabuleiros pré-litorâneos, constituídos por rochas da Formação Barreiras, sobrepostas à terrenos cristalinos pré-cambrianos. Tal configuração geológica possibilita o desenvolvimento de três sistemas aquíferos na região: Dunas, Barreiras e Fissural. Em seu perímetro leste e norte, o CIPP é circundado por duas Unidades de Conservação: a Estação Ecológica do Pecém e a Área de Proteção Ambiental (APA) Lagamar do Cauípe, além de abrigar em sua área o Jardim Botânico de São Gonçalo do Amarante. Ao redor do CIPP existem alguns loteamentos residenciais, principalmente nos setores nordeste, norte e noroeste, com áreas demarcadas para expansão desses bairros. Já as antigas comunidades existentes em sua área central estão em fase de desapropriação total ou parcial, a depender da localidade. Parte da demanda de água requerida pelo CIPP será atendida pelo Sistema Adutor Canal Sítios Novos/Pecém, construído especificamente para este fim. No entanto, de acordo com o Relatório de Impacto Ambiental (CEARÁ, 2009), há previsão de um déficit hídrico de 3.916 L/s para atendimento da demanda industrial após a consolidação plena do CIPP, sem contar o aumento da demanda de água por parte do crescimento populacional que vem se estabelecendo no entorno do Complexo.

Além da questão quantitativa, que reflete a relação entre demanda e oferta de água, é sabido que um dos principais problemas atuais que envolvem as águas subterrâneas em muitos países é decorrente da contaminação de diversos corpos aquíferos. Dentro deste aspecto, as atividades industriais, os postos de armazenamento de combustíveis e a falta de saneamento básico se configuram entre as atividades de grande potencial poluidor das águas subterrâneas, e por tal razão, medidas de planejamento ambiental são imprescindíveis no processo de uso e ocupação do solo, no intuito de mitigar os potenciais impactos ambientais, principalmente em situações de grandes instalações industriais e expansão urbana, como é o caso do CIPP.

No âmbito da hidrogeologia, a proteção dos aquíferos ganhou destaque a partir da segunda metade do século passado, quando os primeiros casos graves de contaminação das águas subterrâneas por metais pesados, compostos clorados e hidrocarbonetos causaram prejuízos financeiros e ambientais nos Estados Unidos e Europa. No Brasil, essa preocupação se iniciou somente no final da década de 80, impulsionados pela Política Nacional do Meio Ambiente e pela realização da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente, no Rio de Janeiro, em 1992 – ECO 92, que desencadeou uma série de ações a respeito do meio ambiente no país.

Da preocupação com a qualidade das águas subterrâneas várias pesquisas e procedimentos foram desenvolvidos com vistas à prevenção da poluição das águas, identificação de contaminações e a remediação de águas já contaminadas, como estabelecimento de perímetro de proteção de poços, modelagens matemáticas, classificação das fontes de poluição, métodos para a caracterização e mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos e das áreas de maior perigo de contaminação, a exemplo de BERROCAL *et al.*, 2013; FOSTER *et al.*, 2002; HIRATA; REBOUÇAS, 1999; LÓPEZ-VERA, 2002; MULLER *et al.*, 2013; SABADIA, 2001, entre outros. Dentre os procedimentos citados, os três últimos apresentam-se como objetos deste estudo. Em linhas gerais, a vulnerabilidade de um aquífero representa sua sensibilidade frente aos possíveis impactos causados por uma carga de substâncias contaminantes; a caracterização das fontes de contaminação define o potencial impacto dessas cargas contaminantes levando em consideração as características físico-químicas das substâncias poluidoras; e o perigo de contaminação é determinado pela interação destes dois fatores.

Sob o viés legal, a proteção das águas subterrâneas, bem como superficiais, é norteada pela Lei Federal nº. 9.433 de 1997, que dispõe sobre a Política Nacional dos Recursos Hídricos, e trata em seu Artigo 3º sobre a necessidade de integração da gestão dos recursos hídricos com a gestão ambiental e articulação da gestão dos recursos hídricos com o uso do solo. Em termos locais, a Política Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (Lei Estadual nº. 11.996 de 1992) tem entre seus objetivos compatibilizar a ação humana com o ciclo hidrológico do Estado, assegurando o desenvolvimento socioeconômico, em equilíbrio com o meio ambiente; e planejar e gerenciar, de forma integrada, descentralizada e participativa, o uso múltiplo, controle, conservação, proteção e preservação dos recursos hídricos.

Desta forma, em função das características geo-ambientais da área do CIPP, das mudanças no uso territorial da região em decorrência de sua instalação e do potencial poluidor das atividades industriais, e do atendimento das leis ambientais, a avaliação da vulnerabilidade e perigo de contaminação de aquíferos apresenta-se como instrumento útil no planejamento de uso e ocupação territorial e preservação da qualidade das águas subterrâneas, de forma a orientar as áreas mais adequadas para o desenvolvimento de atividades potencialmente poluidoras.

1.1 Objetivo

O principal objetivo deste estudo consiste na caracterização das águas subterrâneas e da hidrogeologia local para posterior avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos, por meio da aplicação dos métodos DRASTIC (ALLER *et al.*, 1985) e GOD (FOSTER; HIRATA, 1988), e mapeamento do perigo de contaminação das águas subterrâneas na porção norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém.

1.2 Objetivos Específicos

São os objetivos específicos deste estudo:

- Cadastro de poços e posterior criação de arquivo de dados;
- Caracterização das obras de captação cadastradas e uso das águas subterrâneas;
- Cálculo do Balanço Hídrico;
- Caracterização físico-química das águas subterrâneas locais, por meio de medição periódica *in situ* dos parâmetros: pH, temperatura, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e salinidade;
- Monitoramento do nível estático de poços cadastrados;
- Elaboração de mapa de localização dos poços;
- Elaboração de mapa do comportamento no nível estático e de fluxo da água subterrânea;
- Elaboração de mapas de zoneamento dos parâmetros físico-químicos;
- Identificação e classificação das potenciais fontes de contaminação (presentes e planejadas);
- Classificação da vulnerabilidade e desenvolvimento de mapas pelos métodos GOD e DRASTIC;
- Classificação e desenvolvimento de mapa do perigo à contaminação das águas subterrâneas.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se a aproximadamente 60 km a oeste de Fortaleza, nos Municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante, na Região Metropolitana de Fortaleza. Perfaz cerca de 50 km² e compreende a porção norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), a área do Jardim Botânico de São Gonçalo do Amarante e parte da Estação Ecológica do Pecém. O polígono que compreende a área é definido pelas coordenadas 9607582m N, 9597404m S, 520380m L e 511208m O, representadas no Datum SAD 69 e limita-se a norte com a CE-348, a sul pela Rodovia Estruturante CE 085, a Leste com a CE-421 e a oeste pela CE-156. A área está contida na carta topográfica AS 24-Z-C-IV-Folha Fortaleza (SUDENE). O acesso ao local, a partir da capital, pode ser realizado pela Rodovia Estadual Estruturante CE-085, a partir da CE 090 e Avenida Sol Poente (Figura 1).

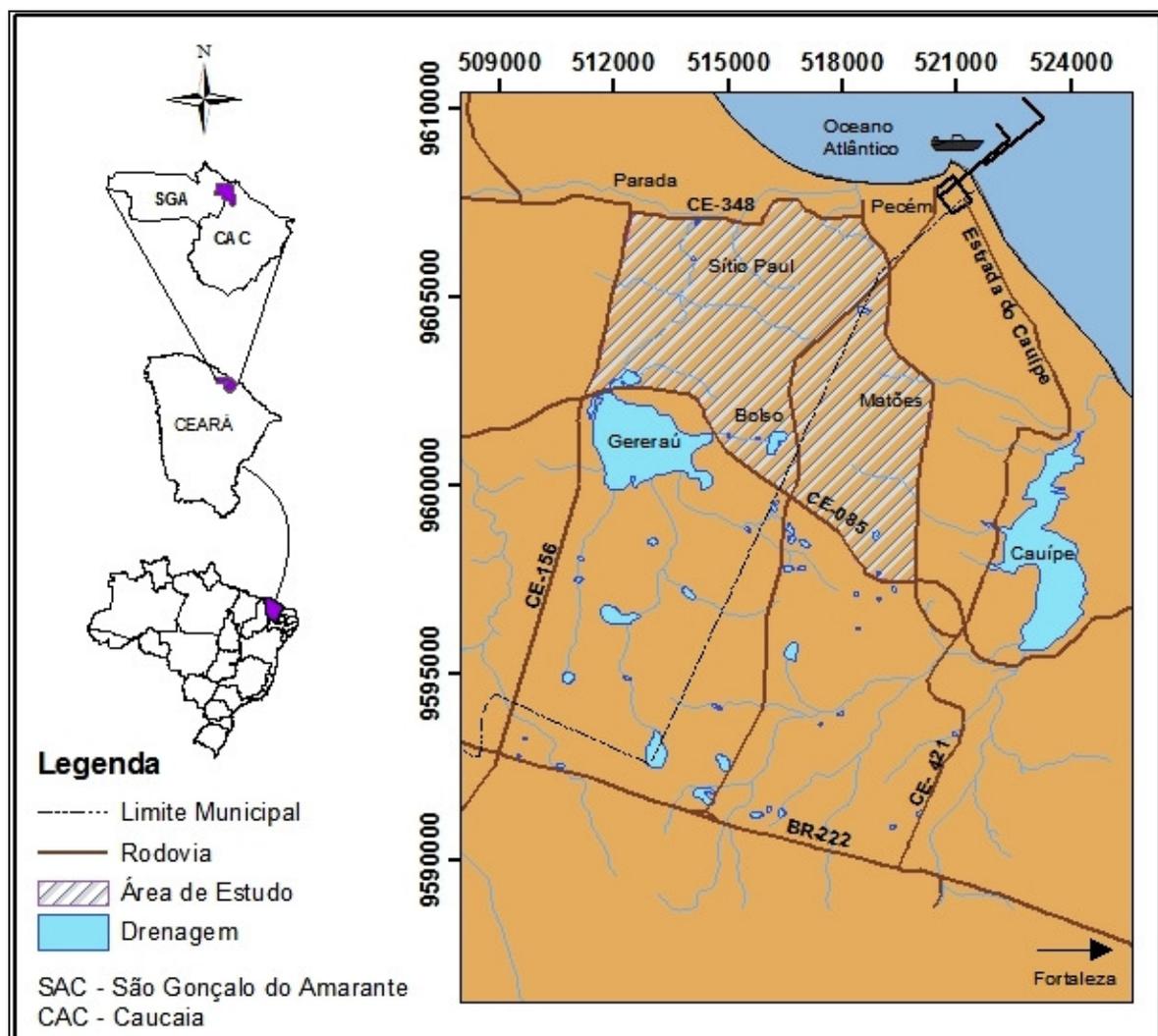


Figura 1. Localização e acesso à área de estudo. (Fonte: Baseado em IPECE, 2009. Base Cartográfica Ceará Costa do Sol)

2.1 Aspectos sócio-econômicos

O Município de São Gonçalo do Amarante compreende território de 834.448 km² e limita-se com os Municípios de Caucaia, Pentecoste, São Luiz do Curu, Trairi, Paraipaba, Paracuru e com o Oceano Atlântico. Sua população é de 43.890 habitantes, onde 65% residem em área urbana, sendo a densidade demográfica de 52,34 hab/km² (IBGE, 2010). No ano de 2010 o PIB do município chegou a R\$ 1.117.611, o que resulta um PIB per capita, em valores correntes, de R\$ 25.430,88 (IBGE, 2010). Entretanto, o IDH do município é de 0,665, o que confere a São Gonçalo o 2776º lugar no ranking brasileiro do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (ONU, 2013). Segundo o Instituto de Pesquisa Estratégica Econômica do Ceará (IPECE), a taxa de cobertura de abastecimento de água é de 50,2% e o total de domicílios com esgotamento sanitário adequado é de apenas 17,8%, sendo que no distrito do Pecém esse percentual atinge os 31% dos domicílios. O percentual de domicílios com serviço de coleta de lixo é de aproximadamente 71% (IPECE, 2012).

O Município de Caucaia compreende 1.228.506 km² e limita-se com os Municípios de Fortaleza, Maracanaú, Maranguape, Pentecoste e São Gonçalo do Amarante, bem como com o Oceano Atlântico. De acordo com o último censo (IBGE, 2010), sua população é de 325.441, onde 89,2% residem em área urbana, e a densidade demográfica atinge 265,93 hab/km². No ano de 2010 o PIB do município chegou a R\$ 2.597.520, o que resulta um PIB per capita de R\$ 7.998,82 (IBGE, 2010). De acordo com o IPECE a taxa de cobertura de abastecimento de água é de aproximadamente 82% e o percentual de domicílios com esgotamento sanitário adequado é de 39%. A coleta domiciliar de lixo atinge 82% (IPECE, 2012). Quanto ao IDH, Caucaia atingiu o valor de 0,682 e ocupa o 2382º lugar no ranking dos municípios brasileiros (ONU, 2013).

No que diz respeito à atividade industrial, no ano de 2000 haviam 57 indústrias registradas no município de São Gonçalo e 524 em Caucaia. Em 2009, o número subiu para 102 e 974, respectivamente (IPECE, 2010), o que configura um crescimento de aproximadamente 82% em quase uma década.

2.2 Complexo Industrial e Portuário do Pecém

O CIPP, integrante do Programa de Desenvolvimento do Estado do Ceará, foi inaugurado em 2001 e constituiu-se de um pólo industrial associado ao sistema portuário do Pecém, abrangendo aproximadamente 13.337 ha. Segundo a Companhia de Integração Portuária do Ceará (CEARÁPORTOS), sua implantação tem por objetivo fortalecer e dar sustentabilidade ao crescimento do parque industrial do Ceará e do Nordeste, possibilitando a promoção de atividades industriais integradas. Conforme consta no Plano de Desenvolvimento do Complexo (CEARÁ, 2006), espera-se que a implantação do CIPP possa promover o emprego, elevar a renda da população e descentralizar a atividade econômica dos arredores de Fortaleza para todo o Estado do Ceará. Gifoni (2001) aponta que a construção do CIPP irá contribuir para a redução do desemprego e fixação da população em seus municípios de origem. No que concerne à localização do CIPP, o Zoneamento Ecológico Econômico Costeiro do Ceará (ZEEC), elaborado em 2006, que dividiu o litoral cearense em setores e definiu algumas áreas de uso estimulado, aponta que os municípios do CIPP estão inseridos no Setor 2 – Costa Metropolitana e fazem parte do Pólo de Desenvolvimento Industrial e Portuário, o que justifica a implantação do empreendimento nesta área. Porém, o ZEEC foi elaborado após o início da implantação do CIPP adjacente à área do Porto Pecém, o que de certa forma, pode ter direcionado o ZEEC, aquém das reais condicionantes ecológicas locais.

Quanto à instalação do parque industrial, o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) elaborado pelo Instituto Centro de Ensino Tecnológico (CENTEC, 2009) para a Secretaria de Infra-Estrutura do Estado do Ceará (SEINFRA), apresenta os grupos industriais a serem implantados no Complexo, são eles: indústrias siderúrgicas; usinas termelétricas; refinaria de petróleo; indústrias petroquímicas; terminal de tancagem e distribuição de hidrocarbonetos; terminal de regaseificação de gás natural liquefeito (GNL); indústrias metal-mecânicas; zona de processamento de exportação; terminal intermodal de cargas (TIC); e outras indústrias, preferencialmente têxteis, de couro e calçados, de fertilizantes e processamento de pedras ornamentais.

A Figura 2 apresenta o Plano Diretor com a disposição dos grupos industriais, bem como apresenta as Unidades de Conservação existentes no CIPP e no seu entorno, como o Jardim Botânico de São Gonçalo, a Estação Ecológica do Pecém, a Área de Proteção Ambiental do Pecém e a Área de Proteção Ambiental do Lagamar do Cauípe.

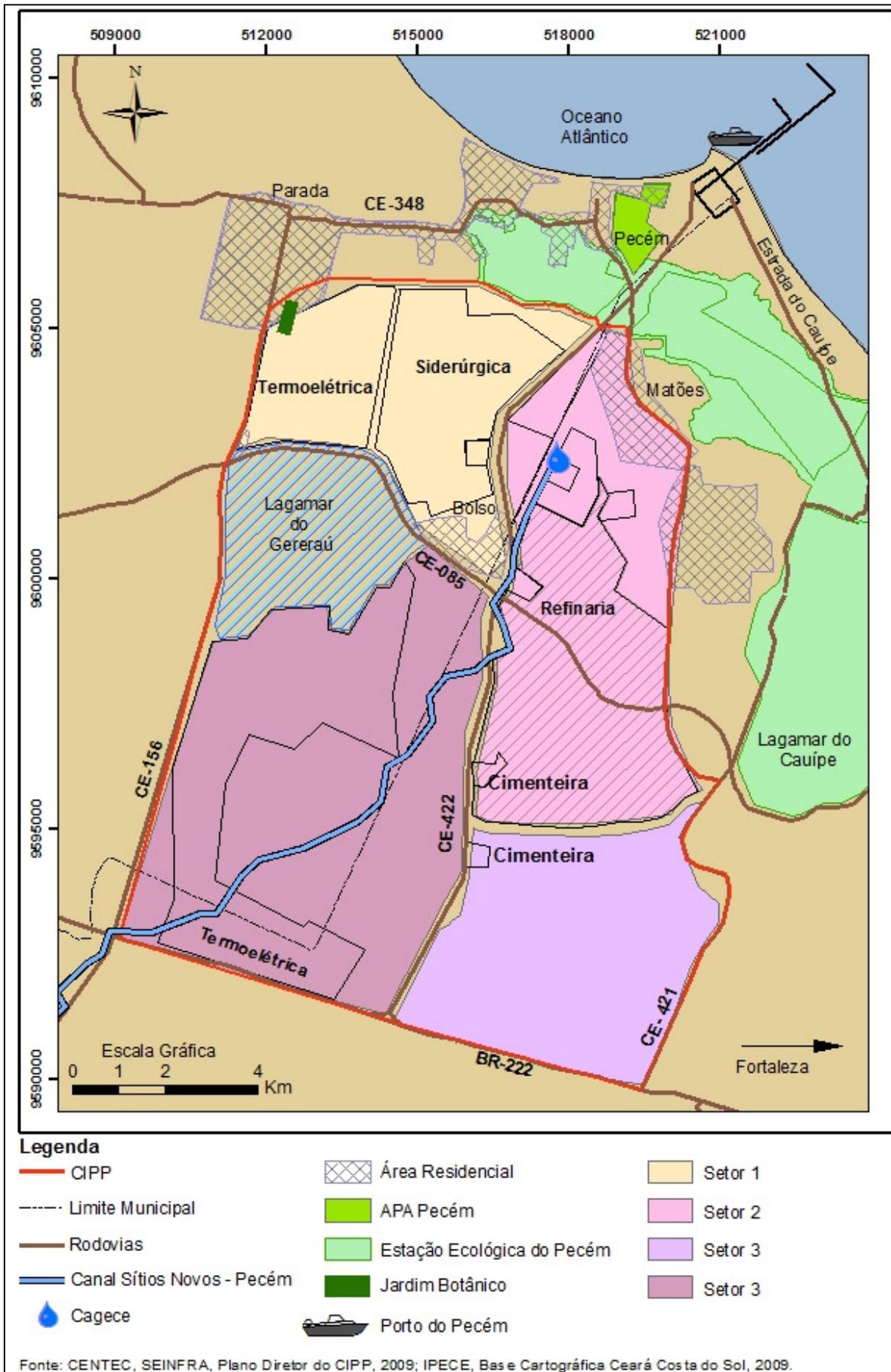


Figura 2. Plano Diretor e principais estruturas do CIPP e entorno.

2.3 Unidades de Conservação

No Brasil as Unidades de Conservação (UCs) são regulamentadas pela Lei Federal nº 9985 de Julho de 2000, que define o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) e as divide em dois grandes grupos: Unidades de Proteção Integral e Unidades de Uso Sustentável. As Unidades de Proteção Integral têm por objetivo a preservação da natureza, admitindo somente o uso indireto dos recursos naturais. Por sua vez, as Unidades de Uso Sustentável têm por objetivo compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais. Existem três Unidades de Conservação (UCs) impactadas diretamente pela instalação do CIPP: Estação Ecológica do Pecém, Área de Proteção Ambiental do Pecém (APA Pecém) e a Área de Proteção Ambiental do Lagamar do Cauípe (APA Lagamar do Cauípe), além do Jardim Botânico de São Gonçalo do Amarante (Figura 2).

A Estação Ecológica do Pecém possui 956 ha e foi criada pelo Decreto Estadual nº 25.708 do ano de 1999. De acordo o Artigo 9º do SNUC, a Estação Ecológica pertence à modalidade de Proteção Integral e tem por objetivo a preservação da natureza e a realização de pesquisas científicas, sendo proibida a visitação pública, exceto quando com objetivos educacionais. A área está localizada entre a APA do Lagamar do Cauípe e APA do Pecém e como consta nos Relatórios de Monitoramento da Biota Terrestre do CIPP (CEARÁPORTOS/IEPRO, 2005, *apud* CEARÁ, 2009) foram catalogados no local 30 espécies de aves, 08 espécies de mamíferos e 15 de répteis, além de 31 espécies de vegetais. Segundo a SEMACE, o objetivo específico desta unidade de conservação é proporcionar o equilíbrio ecológico do ecossistema de dunas, móveis e fixas, que compõem as áreas próximas à construção do CIPP. Neste aspecto, a manutenção da Estação Ecológica do Pecém pode-se tornar um desafio para o poder público responsável, visto o alto potencial de impacto que à instalação do CIPP poderá causar ao entorno, seja pela especulação imobiliária ou por possíveis contaminações. No mais, a Estação é considerada de caráter estratégico para o desenvolvimento do turismo na região, por garantir a manutenção da paisagem, embora inicialmente pareça contraditório o incentivo ao turismo em uma região industrial e portuária.

As Áreas de Proteção Ambiental integram a modalidade de Uso Sustentável e conforme o Artigo 15º do SNUC, as APAs são definidas como áreas com certo grau de ocupação e dotadas de atributos abióticos, bióticos, estéticos ou culturais especialmente importantes para a qualidade de vida e bem-estar das populações humanas, e tem como

objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais.

A APA do Pecém e a APA do Lagamar do Cauípe foram criadas em 1998, por meio do Decreto Estadual nº 24.957, e estão localizadas em São Gonçalo do Amarante e Caucaia, com 122,79 e 1.884,46 hectares, respectivamente. As áreas de ambas englobam ecossistemas da planície litorânea e dos tabuleiros pré-litorâneos, sendo que a APA do Pecém bordeja a lagoa homônima que abastece a Vila do Pecém e a APA do Lagamar contempla a planície flúvio-lacustre do Rio Cauípe. De acordo com o Decreto, a criação destas APAs tem por objetivos:

- I. Proteger as comunidades bióticas nativas, as nascentes dos rios, as vertentes e os solos;
- II. Garantir a conservação de remanescentes de mata aluvial, dos leitos naturais das águas pluviais e das reservas hídricas;
- III. Proporcionar à população regional métodos e técnicas apropriadas ao uso do solo, de maneira a não interferir no funcionamento dos refúgios ecológicos, assegurando a sustentabilidade dos recursos naturais, com ênfase na melhoria da qualidade de vida dessas populações;
- IV. Ordenar o turismo ecológico, científico e cultural, e das demais atividades econômicas compatíveis com a conservação ambiental;
- V. Desenvolver na população regional uma consciência ecológica e conservacionista.

Segundo o Artigo 3º do Decreto, na área da APA estão proibidas ou restringidas, entre outras atividades, a implantação ou ampliação de atividades potencialmente poluidoras; e qualquer forma de utilização que possa poluir ou degradar os recursos hídricos abrangidos pela APA, como também, o despejo de efluentes, resíduos ou detritos, capazes de provocar danos ao meio ambiente. Embora o projeto de instalação do CIPP respeite os limites das APAs, cabe ressaltar que como parque industrial o CIPP apresenta-se como potencial fonte de poluição, e sua localização imediatamente a montante das APAs pode impactar de maneira indireta seus recursos hídricos.

O Jardim Botânico de São Gonçalo do Amarante foi criado em 2003 por meio do Decreto Municipal nº 799/03. Abrange 19,8 ha localizados às margens da Rodovia CE-156. Embora os jardins botânicos não se enquadrem nas categorias do SNUC, a Resolução

CONAMA nº 339 de 2003 os apontam como instrumento para a conservação do meio ambiente, a saber:

Art. 1º Entende-se como jardim botânico a área protegida, constituída no seu todo ou em parte, por coleções de plantas vivas cientificamente reconhecidas, organizadas, documentadas e identificadas, com a finalidade de estudo, pesquisa e documentação do patrimônio florístico do País, acessível ao público, no todo ou em parte, servindo à educação, à cultura, ao lazer e à conservação do meio ambiente.

O Artigo 2º da Resolução define entre os objetivos do jardim botânico:

II - proteger, inclusive por meio de tecnologia apropriada de cultivos, espécies silvestres, ou raras, ou ameaçadas de extinção, especialmente no âmbito local e regional, bem como resguardar espécies econômica e ecologicamente importantes para a restauração ou reabilitação de ecossistemas.

Este ponto apresenta-se importante sob a perspectiva da relação entre o CIPP e Jardim Botânico de São Gonçalo, uma vez que estabelece o Jardim Botânico como uma espécie de banco de dados florístico para possíveis impactos negativos que a construção do CIPP possa causar na região. Outro fator relevante para esta relação, principalmente no tocante a possíveis projetos de ampliação da área do CIPP, diz respeito ao Artigo 14º da Resolução, onde fica estabelecido que o Jardim Botânico deva, preferencialmente, contar com áreas anexas preservadas, em forma de arboreto ou unidades de conservação, visando completar o alcance dos seus objetivos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentado o referencial teórico utilizado neste trabalho, iniciando-se pela conceituação da vulnerabilidade e perigo de contaminação, com posterior detalhamento dos métodos selecionados e revisão de alguns estudos de vulnerabilidade realizados no contexto regional e local. Também serão abordados alguns estudos ambientais e hidrogeológicos importantes para o desenvolvimento desta dissertação.

3.1 Vulnerabilidade de Aquíferos e Perigo de Contaminação

Os primeiros estudos de vulnerabilidade de aquíferos foram aplicados na década de 60 por Le Grand, nos Estados Unidos, e por Albinet e Margat na França, durante a década de 70. Desde então, diversos conceitos e métodos para a avaliação da vulnerabilidade foram desenvolvidos, os quais consideram principalmente parâmetros como profundidade e tipo de aquífero, características físicas e litológicas da zona vadosa e fatores geoambientais. Alguns desses métodos são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais métodos para determinação de vulnerabilidade de aquíferos

Método	Avaliação de	Fatores	Referências Bibliográficas
Surface Impoundment Assessment (SAI)	Sistema de disposição de águas servidas	-zona não saturada; -importância do recurso; -qualidade das águas subterrâneas; -periculosidade do material.	Le Grand (1964), USEPA (1964)
(Método Le-Grand/Brown)	Aterros Sanitários novos e em operação	-distância entre aterro e os poços; -profundidade das águas; -gradiente do aquífero.	Le Grand (1964)
Site Ranking System	Disposição de produtos químicos, em sítios novos e em operação	-solo, características hídricas, sorção e tamponamento químico; -hidrodinâmica do aquífero; -ar e população próxima.	Hagerty <i>et al.</i> (1973)
Poluição dos Lençóis Aquíferos	Vulnerabilidade geral	-geologia (litologia e estruturas).	Taltasse (1972)
Waste Soil Interaction Matrix	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias. Avaliação de Perigo	-efeitos na saúde; -características e comportamento dos produtos químicos; -capacidade de atenuação do solo; -hidrogeologia; -características locais.	Philips <i>et al.</i> (1977)
TPE	Áreas de risco de contaminação	-velocidade da água subterrânea; -porcentagem de argila; atividade potencialmente contaminante; -exploração dos aquíferos.	Silva <i>et al.</i> (1980)

Método	Avaliação de	Fatores	Referências Bibliográficas
Site Ranking Methodology (SRM)	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias	-população receptora, uso da água e do local e degradação ambiental; -caminhos, nível e tipo de contaminação - profundidade da água, pluviometria e permeabilidade do solo; -toxicidade e persistência dos resíduos; -práticas de manejo e operação.	Kulfs <i>et al.</i> (1980)
Hazard Ranking System	Áreas prioritárias para ação de limpeza de aquíferos	-migração característica do meio e do resíduo; -volume do produto; -proximidade da população; -risco de fogo e explosão; -contato direto.	Cadwell <i>et al.</i> (1981)
Mapa de Vulnerabilidade	Vulnerabilidade universal	-características litológicas; -áreas de recarga e descarga.	Duarte (1980)
DRASTIC	Vulnerabilidade Geral	-profundidade do nível d' água; -recarga; -meio aquífero; -solo; -topografia; -impacto na zona vadosa; - condutividade hidráulica.	Aller <i>et al.</i> (1987)
GOD	Vulnerabilidade geral, análise e classificação da carga contaminante	- tipo de aquífero; - litologia da zona vadosa; -profundidade do nível d' água.	Foster e Hirata (1988)
Groundwater Vulnerability Map for Nitrate	Potencial de Lixiviação do Nitrato. Vulnerabilidade a contaminante específico	-tipo de solo; -características litológicas do aquífero.	Carter <i>et al.</i> (1987)
Potential Waste Sites	Disposição de Resíduos Sólidos	-vulnerabilidade; -confinamento do aquífero; -proximidade das fontes; -tipo e volume de contaminantes; -velocidade da zona saturada; -grau de percolação.	BGS (sem data)
Sem nome	Vulnerabilidade geral, baseado na teoria do fluxo-pistão	-condutividade hidráulica da zona saturada; -profundidade da água subterrânea; -umidade do solo; -recarga.	Marcolongo e Pretto (1987)
SINTACS	Vulnerabilidade geral	- idem ao DRASTIC, mas com pesos diferentes para os fatores.	Civita <i>et al.</i> (1990)
Sem nome	Vulnerabilidade geral	-características litológicas e de permeabilidade do aquífero; -profundidade do nível d' água.	Adams e Foster (1992)
Risco Associado a Sistema de Saneamento em Situ	Avaliar áreas de maior risco por sistemas de saneamento in situ	-vulnerabilidade (GOD); -densidade demográfica; -análise de indicadores físico-químicos.	Ferreira e Hirata (1993)

Fonte: Hirata e Rebouças (1999)

No trabalho que apresentou o método GOD, além de outros métodos para avaliação do risco de contaminação e preservação das águas subterrâneas, Foster e Hirata (1988) definiram que a vulnerabilidade de aquíferos à contaminação representa sua sensibilidade para ser adversamente impactado por uma carga de contaminantes.

Auge (2004) discorreu sobre diferentes conceitos de vulnerabilidade. O primeiro considera a vulnerabilidade intrínseca (adotada neste trabalho), onde o termo é determinado em função das características do meio, sem considerar as características da potencial carga de contaminantes. O segundo, trata a vulnerabilidade de maneira específica, isto é, ela é determinada em função das características do meio e da potencial carga de contaminantes. Tais considerações de Auge (2004) estão em consonância com as apresentadas por Hirata e Fernandes (2008), onde a vulnerabilidade é classificada como:

- Relativa, quando apenas se comparam as vulnerabilidades entre si, sem valores absolutos;
- Geral (natural), com as mesmas características da vulnerabilidade intrínseca de Auge (2004);
- Específica, com as mesmas características da vulnerabilidade específica de Auge (2004);
- Absoluta, onde estaria associada à capacidade de degradação de um ou grupo de contaminantes.

De acordo com diversos autores, como por exemplo, Aller *et al.* (1985); Foster e Hirata (1988) e Foster *et al.* (2002), a vulnerabilidade de um aquífero é resultado da interação de dois fatores principais: *i*) a acessibilidade hidráulica da zona saturada e *ii*) a capacidade de atenuação dos contaminantes acima da zona saturada do aquífero, em decorrência da retenção física e reações químicas sobre os contaminantes, durante o período de transição na zona vadosa.

Em sua grande maioria, os estudos de vulnerabilidade ocorrem acompanhados da avaliação do risco/perigo de contaminação à que os aquíferos estão submetidos. Sob esse aspecto, o Instituto Geológico (1997) define que o termo vulnerabilidade e risco a contaminação compreende a associação da vulnerabilidade natural e da carga poluidora, que acarrete uma concentração de contaminantes na água subterrânea, em valores analíticos, acima dos padrões de potabilidade definidos em lei. A representação da vulnerabilidade e

perigo à contaminação é realizada por meio da sobreposição de mapas temáticos que, de acordo com Viana (2007), facilitam a identificação das áreas mais susceptíveis à contaminação, e serve de subsídio para planos futuros de ocupação do solo, de forma a apresentar setores mais ou menos apropriados para instalação de estabelecimentos geradores de poluentes.

Foster *et al.* (2002) adotaram o uso do termo “perigo” em detrimento do uso do termo “risco”, onde o perigo de contaminação é definido pela probabilidade de um aquífero sofrer impactos negativos decorrentes de determinada atividade humana, de forma que sua água subterrânea se torne imprópria para consumo em termos de potabilidade. Nesta mesma linha, Costa (2007) define que o perigo é representado pelas diferentes cargas contaminantes existentes em uma região e suas possíveis consequências para as águas subterrâneas, como agente receptor e transmissor da contaminação. Este perigo é atribuído à interação entre dois fatores fundamentais: primeiro, a carga de contaminantes lançada no solo como resultado de atividade humana, segundo, a vulnerabilidade natural do aquífero frente a essa carga contaminante. (FOSTER *et al.*, 1988; COSTA, 2007, etc.). Por sua vez, a carga de contaminantes é caracterizada em função de sua classe, intensidade, modo de disposição no terreno e duração (HIRATA; FERNANDES, 2008). Cabe salientar que, segundo Foster *et al.* (2002), o estudo de vulnerabilidade e perigo de contaminação dos aquíferos se restringe à avaliação dos perigos de contaminação e não considera os impactos potenciais na população humana, ou nos sistemas aquáticos dependentes dos aquíferos, tampouco se refere aos problemas de conotação econômica dos recursos hídricos subterrâneos.

Para a identificação e caracterização das cargas de contaminantes, Foster e Hirata (1988) e Foster *et al.* (2002) apresentaram um método baseado na origem do contaminante e na sobrecarga hidráulica que ela exerce no sistema. Conhecido como POSH (*Origem do Poluente, Sobrecarga Hidráulica*), esse método tem sido utilizado em diversos trabalhos, como em Cutrim e Campos (2010 b), Barbosa *et al.* (2011) e Carvalho *et al.* (2009), sempre associado aos índices de vulnerabilidade dos aquíferos. Tal método relaciona a possível presença de substâncias contaminantes com o tipo de atividade desenvolvida, sendo que a sobrecarga hidráulica é estimada em função do uso da água desta atividade, e classifica o potencial de contaminação em reduzido, moderado ou elevado.

As fontes de contaminação se dividem entre pontuais e difusas, de acordo com sua distribuição espacial e intensidade. As fontes difusas não apresentam plumas de contaminação definidas e geralmente ocorrem como resultado de longo período de infiltração de substâncias contaminantes. Chamam-se difusas por não apresentarem uma fonte específica e geralmente

não apresentam altas concentrações de substâncias contaminantes, tem como exemplo clássico as plumas de nitrato oriundas da falta de saneamento básico em grandes cidades, como a apresentada por Gomes (2013) para o município de Fortaleza. Por sua vez, as fontes pontuais apresentam plumas de contaminação definidas, alta concentração dos compostos contaminantes e, geralmente, ocorrem em curtos períodos de infiltração. Apresentam-se atreladas, principalmente, a áreas industriais, postos de abastecimento de combustíveis e áreas de deposição de resíduos sólidos, e podem ser caracterizadas pelo tipo de atividade industrial desenvolvida. Pode-se citar como exemplo a contaminação por metais pesados estudada por Berrocal *et al.* (2013) em uma antiga área industrial no município de Cubatão.

3.2 Método de Vulnerabilidade DRASTIC

O Índice de Vulnerabilidade denominado DRASTIC, desenvolvido por Aller *et al.* (1987), para a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), é um método de avaliação sistemática do potencial de poluição obtido a partir de diversos parâmetros, com o intuito de avaliar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos, independentemente do risco associado. O método baseia-se em uma composição de parâmetros que descreve os principais fatores de influência no movimento da água subterrânea em uma área e considera que os possíveis contaminantes possuam as mesmas características de mobilidade da água. A sigla DRASTIC representa um anagrama dos parâmetros descritos no Quadro 2. Cada parâmetro possui um peso (*weight*) definido de acordo com a sua significância, nomeado de índice de ponderação, sendo peso 5 para os de maior significância e 1 para os de menor significância.

Quadro 2 - Descrição dos parâmetros e índices de ponderação do método DRASTIC

	Parâmetros	Índice de Ponderação (w)
<i>Depth</i>	Profundidade do Nível Estático	5
<i>Recharge</i>	Recarga	4
<i>Aquifer</i>	Litologia do Aquífero	3
<i>Soil</i>	Solo	2
<i>Topography</i>	Topografia	1
<i>Impact</i>	Impacto sobre a Zona Saturada	5
<i>Conductivity</i>	Condutividade Hidráulica	3

Fonte: (Aller *et al.*, 1987)

Em linhas gerais, a vulnerabilidade obtida por este método é produto da relação de três condicionantes: *a*) capacidade de atenuação do meio, dada em função do tipo de solo, do declive do terreno e dos volumes de recarga; *b*) resistência vertical ao fluxo, que depende das

características da zona vadosa e da profundidade do nível estático; e c) transporte de contaminantes, dado em função da litologia do aquífero e da condutividade hidráulica.

O parâmetro *profundidade* refere-se ao nível estático e determina o espaço que será percorrido pelos compostos contaminantes até o aquífero. Tal comprimento (espessura a ser percorrida) irá influenciar o tempo de transporte vertical como também o tempo de ação dos agentes de atenuação natural. Em aquíferos livres, a profundidade no nível estático corresponde ao nível freático, e em geral, apresentam grande sensibilidade às alterações ambientais ocorridas em superfície.

A *recarga* pode ser definida pela quantidade de água por unidade de área que penetra no solo e abastece o aquífero (infiltração), e representa um parâmetro importante na avaliação do transporte do contaminante na zona não saturada, bem como atua no transporte horizontal dentro do aquífero e apresenta relação direta com a capacidade de dispersão e diluição dos contaminantes. De acordo com Cutrim e Campos (2010a), para aquíferos livres a recarga pode ser estimada pelo produto da variação do nível estático ao longo de um determinado período, e a porosidade efetiva do aquífero (razão entre volume de água drenado por gravidade e volume total da rocha), conforme a Equação 1:

[Equação 1]

$$R = \Delta h \cdot \eta_e$$

R=recarga

η_e = S_y = porosidade efetiva média

Δh = variação do nível estático em cada poço durante determinado período

A *litologia do aquífero* determina a direção, extensão e o tempo que o fluxo levará para percorrer determinada extensão do aquífero. Neste aspecto, as relações entre porosidade primária (formada durante a consolidação da rocha) e secundária (formadas por fraturas e dissoluções após os processos de consolidação do corpo rochoso) atuam de forma relevante, principalmente nos aquíferos fissurais e cársticos.

As *características do solo* adjacente ao aquífero, bem como sua espessura, influenciam diretamente no potencial de contaminação do aquífero. Seja por funcionar como um filtro durante a passagem da água pelo pacote pedológico, com a adsorção de partículas contaminantes nos grãos do solo, ou pela ação da atividade biológica, que pode degradar alguns compostos contaminantes, o solo pode atenuar possíveis contaminações. O solo também influencia nas condições de recarga dos aquíferos, uma vez que sua composição

mineralógica e estrutura determinam a quantidade de água infiltrada que será retida em sua zona não saturada e interfluxo, ou será transmitida para o aquífero.

A topografia esboça as variações de declive na superfície do terreno, representada por seu percentual de inclinação, que influenciam diretamente a direção e velocidade do transporte da água na superfície e, portanto, atua no potencial de infiltração da água e demais substâncias líquidas no solo, sendo que, de modo geral, áreas que apresentam pouca declividade tendem a apresentar maior potencial poluidor, pois facilitam a percolação vertical de líquidos. A topografia também é responsável pelo direcionamento preferencial do fluxo das águas subterrâneas, principalmente nos aquíferos livres em regiões de grande variação topográfica.

No que se refere ao parâmetro impacto na zona vadosa, na classificação do método DRASTIC, é avaliada a porção (sedimentos e rochas) que se localiza abaixo do horizonte do solo e acima da superfície freática, preenchida parcialmente por gases e água. Além de condicionar o tempo de deslocamento da água subterrânea ou dos contaminantes, tal região é de importância para diversos processos de atenuação natural, como biodegradação, volatilização e reações de oxidação-redução.

A condutividade hidráulica determina o movimento da água no meio e define a capacidade de um líquido fluir em um determinado corpo através de seus vazios (porosidade). É influenciada pela porosidade (primária ou secundária), tamanho, forma e arranjo dos grãos, bem como pelo peso específico e viscosidade do fluido. A partir da condutividade hidráulica, pode-se estimar a velocidade do fluxo da água subterrânea, fator de importância nos estudos de contaminação dos aquíferos.

Os parâmetros do índice de vulnerabilidade DRASTIC estão divididos por intervalos determinados ou características específicas (*range*) e para cada intervalo ou característica é definido um valor (*rating*), conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Descrição dos valores para cada faixa dos parâmetros do método DRASTIC

Parâmetro	Intervalos / Características	Valor (r)
Profundidade do nível estático (m)	<1,5	10
	1,5 - 4,5	9
	4,5 - 9	7
	9 -15	5
	15 -23	3
	23 - 30	2
	>30	1
Recarga (mm)	0 - 50	1
	50 - 100	3
	100 - 180	6
	180 - 254	8
	> 254	9
Litologia do Aquífero	Folhelho Maciço	1 – 3
	Rochas Ígneas e Metamórficas	2 – 5
	Rochas Ígneas e Metamórficas Alteradas	3 – 5
	Sucessões finamente acamadadas de arenitos, calcários e folhelhos	5 – 9
	Arenitos Maciços	4 – 9
	Calcários Maciços	4 – 9
	Areias e Cascalhos	6 – 9
	Basaltos	2 – 10
Calcários Cársticos	9 – 10	
Tipo de Solo	Argila não Expansiva e/ou Não Agregada	1
	Marga Argilosa	3
	Marga Siltosa	4
	Marga	5
	Marga Arenosa	6
	Argila Expansiva e/ou Agregada	7
	Solo arenoso	9
	Solo com Cascalhos	10
Solo Fino ou Ausente	10	
Topografia (inclinação do terreno em %)	0 - 2	10
	2 - 6	9
	6 - 12	5
	12 -18	3
	>18	1
Impacto na Zona Vadosa	Argilas e Siltes	1 – 2
	Xistos	2 – 5
	Calcários	2 – 7
	Arenitos	4 – 8
	Calcários, arenitos e folhelhos acamadados	4 – 8
	Areias e Cascalhos com teor significativo de silte e argila	4 – 8
	Rochas Ígneas e Metamórficas	2 – 8
	Areias e Cascalhos	6 – 9
Basaltos	2 – 10	
Calcários Cársticos	8 – 10	
Condutividade Hidráulica (m/s)	5×10^{-7} - 5×10^{-5}	1
	5×10^{-5} - 1×10^{-4}	2
	1×10^{-4} - 3×10^{-4}	4
	3×10^{-4} - 5×10^{-4}	6
	5×10^{-4} x 10×10^{-4}	8
	$>10 \times 10^{-4}$	10

O índice de vulnerabilidade DRASTIC é obtido pela soma do produto entre os índices de ponderação (*weight*) e o valor de cada intervalo dos parâmetros utilizados (*rating*), de acordo com a Equação 2:

[Equação 2]

$$\text{Índice de Vulnerabilidade} = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw$$

O valor obtido é comparado com as faixas de vulnerabilidade propostas pelo método, que variam entre 23 (todos os parâmetros com peso 1) e 230 (todos os parâmetros com peso 10) e classifica o aquífero desde a vulnerabilidade insignificante até a vulnerabilidade extrema (Quadro 4).

Quadro 4 - Intervalos de vulnerabilidade do índice DRASTIC adotados neste trabalho

≤100	>100 ≤119	≥120 ≤139	≥140 ≤159	≥160 ≤179	≥180 ≤199	≥200
Insignificante	Muito Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta	Extrema

3.3 Método de Vulnerabilidade GOD

O método GOD foi desenvolvido em 1988 por Foster e Hirata para o Programa Regional de Prevenção e Controle de Poluição das Águas Subterrâneas do Centro Pan Americano de Engenharia Sanitária e Ciências Ambientais (CEPIS), sendo utilizado massivamente no Caribe e América Latina devido sua simplicidade de aplicação, frente outros métodos. Sua aplicabilidade está baseada na avaliação de dois parâmetros principais: o nível de acessibilidade hidráulica da zona saturada, que depende do grau de confinamento do aquífero e da profundidade do nível estático; e a capacidade de atenuação dos contaminantes ao longo do estrato acima da zona saturada, que depende das características litológicas e do grau de consolidação, como a presença de fraturas e porosidade primária, por exemplo. A descrição dos parâmetros representados pela sigla GOD pode ser observada no Quadro 5.

Quadro 5 - Descrição dos parâmetros do método GOD

<i>Groundwater Confinement</i>	Grau de Confinamento da Água Subterrânea
<i>Overlying Strata</i>	Litologia e grau de consolidação da zona vadosa
<i>Depth Groundwater</i>	Profundidade do nível estático da água subterrânea

Assim como no método DRASTIC, o parâmetro *D* (profundidade) corresponde à *profundidade do nível estático*. O parâmetro *O* descreve a *litologia da zona vadosa* (zona não saturada), considerando o grau de consolidação, porosidade e fraturamento dos litotipos

aquíferos. O parâmetro *G*, *grau de confinamento*, avalia o quão protegido encontra-se o aquífero quanto à presença ou ausência de camadas confinantes e nível de cobertura do aquífero. Desta forma, aquíferos livres (não confinados e sem cobertura) seriam mais susceptíveis à contaminação, devido a grande influência das atividades desenvolvidas em superfície. Por sua vez, aquíferos semi-confinados por um pacote argiloso, por exemplo, seriam menos susceptíveis à contaminação, pois se encontrariam mais protegidos. Este método também considera que os possíveis contaminantes possuam as mesmas características de mobilidade da água. Neste método todos os parâmetros possuem a mesma significância e apresentam valores que variam de 0 a 1. Os parâmetros são divididos em índices de classificação, por meio de intervalos determinados de acordo com características específicas. O índice de vulnerabilidade é obtido pelo produto dos índices de classificação estabelecidos para cada parâmetro, conforme a Equação 3:

[Equação 3]

$$\text{Índice de Vulnerabilidade} = G_i \times O_i \times D_i$$

O valor obtido é comparado com as faixas de vulnerabilidade propostas pelo método, que variam de 0 a 1, e classifica o aquífero desde a vulnerabilidade insignificante até a vulnerabilidade extrema (Quadro 5); e o sistema para classificação da vulnerabilidade dos aquíferos pelo método GOD é apresentado na Figura 3.

Quadro 6 - Descrição dos índices de vulnerabilidade do método GOD

Grau de Vulnerabilidade	Definição	Índice
Insignificante	Camadas confinantes sem percolação significativa, exceto em zonas de fraturas (sais e nitratos)	0 – 0,1
Baixa	Somente vulnerável a contaminantes persistentes em longo prazo, quando continua e amplamente lançados e lixiviados (sais e nitratos)	0,1 – 0,3
Moderada	Vulnerável a alguns poluentes quando continuamente lançados e lixiviados (sais, nitratos e hidrocarbonetos)	0,3 – 0,5
Alta	Vulnerável a muitos poluentes, exceto os pouco móveis e persistentes (hidrocarbonetos, compostos aromáticos, bactérias, vírus, sais e nitratos)	0,5 – 0,7
Extrema	Vulnerabilidade a muitos poluentes, incluindo os degradáveis, com rápido impacto em muitos cenários de contaminação (pesticidas, metais pesados, hidrocarbonetos, compostos aromáticos, bactérias, vírus, sais e nitratos)	0,7 – 1,0

Fonte: Adaptado de Hirata e Fernandes, 2008

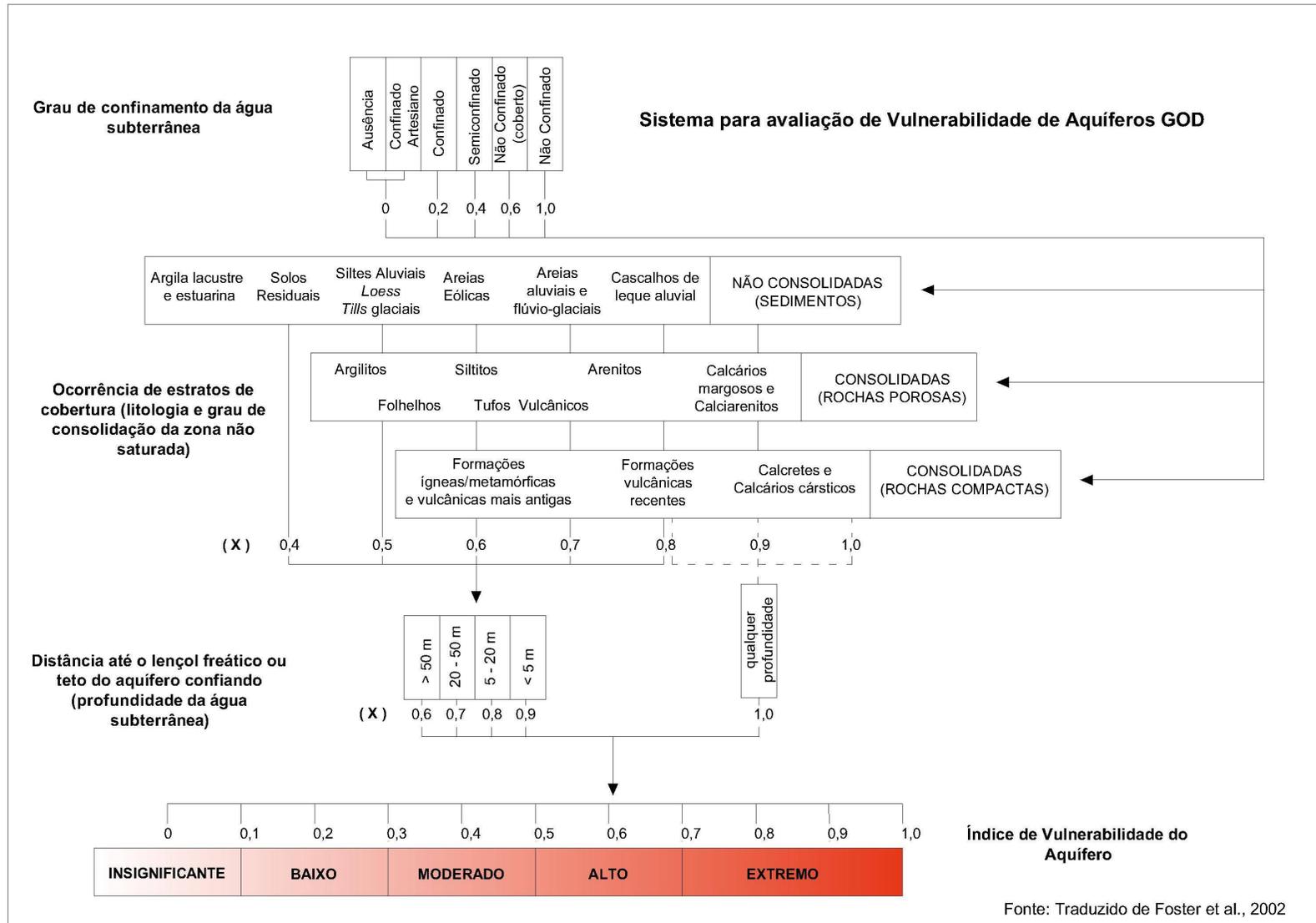


Figura 3. Fluxograma para avaliação de vulnerabilidade de aquíferos pelo método GOD

3.4 Estudos de Caso

Em termos de Brasil e América Latina diversos trabalhos de vulnerabilidade foram realizados nos últimos anos, como Auge (2004), Russo (2009), Cutrim e Campos (2010 b), Ribeiro *et al.* (2011), Barbosa *et al.* (2011) e Santos e Oliveira (2013) etc. Dentre estes trabalhos destacam-se os estudos de XAVIER *et al.* (2004), que compararam os resultados da aplicação dos métodos GOD e DRASTIC em um aquífero poroso no Paraguai. Os autores concluíram que o método GOD foi satisfatório para estudos preliminares de escala regional, e por sua vez, o método DRASTIC apresentou melhores resultados em estudos de detalhe, devido a maior complexidade dos parâmetros envolvidos na avaliação.

Mais recentemente, Reginato e Ahlert (2013) aplicaram os métodos GOD e DRASTIC para avaliação da vulnerabilidade em porção do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), de caráter fraturado, localizado no noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Os resultados obtidos permitiram classificar a vulnerabilidade da área como baixa e média para ambos os métodos, com ocorrência de divergência no índice de vulnerabilidade em algumas porções da área devido a maior complexidade do método DRASTIC. Eles concluíram que ambos os métodos são adequados para a avaliação da vulnerabilidade de aquíferos fraturados, sendo que o DRASTIC apresentou os melhores resultados. Embora os autores supracitados tenham aplicado o método GOD e DRASTIC em aquíferos fraturados e obtidos resultados considerados satisfatórios, alguns autores como Hirata e Fernandes (2008), têm considerado os métodos existentes insuficientes para caracterizar a vulnerabilidade de aquíferos de estrutura geológica complexa, como aquíferos cristalinos e cársticos, dada à heterogeneidade e anisotropia apresentada por esses corpos.

Alguns estudos de vulnerabilidade foram realizados no estado do Ceará, como Leite e Möbus (1998), Oliveira e Abreu (2006), Braga (2006), Viana (2007), Cunha (2009) e Gomes *et al.* (2010). Em Leite e Möbus (1998), o método DRASTIC foi adaptado para a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos porosos na Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, com a remoção dos parâmetros recarga, solo e condutividade hidráulica e adição de um parâmetro para avaliação da cobertura vegetal. Como resultado, o trabalho indicou áreas de alta vulnerabilidade associadas aos aquíferos da Formação Barreiras, e áreas de extrema vulnerabilidade junto aos terrenos quaternários.

O trabalho de Braga (2006) consistiu na aplicação do método GOD nos sistemas hidrogeológicos da APA de Ponta Grossa, no município de Icapuí. O autor dividiu a área de estudo em três setores: o primeiro, de alta vulnerabilidade, associado aos terrenos de

sedimentos porosos (aluviões) e nível freático raso (menor que 5 metros); o segundo, de vulnerabilidade média a alta, onde o terreno ainda é formado de sedimentos poroso (dunas), mas o nível d'água é mais profundo (acima de 5 metros); e o terceiro setor, de vulnerabilidade baixa, ocorrendo em terrenos da Formação Barreiras.

Por sua vez, Oliveira e Abreu (2006) realizaram estudos de cartografia digital para a avaliação da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos de Fortaleza por meio do método DRASTIC, onde os resultados indicaram alta vulnerabilidade para o Sistema Dunas, média para o Sistema Barreiras e alta para o Sistema Cristalino. O mapeamento obtido foi comparado com as áreas atendidas pelo Programa de Infra-Estrutura Básica de Saneamento de Fortaleza, realizado entre os anos de 1993 e 2000, a fim de verificar se as áreas mais susceptíveis à contaminação foram atendidas pela nova rede de saneamento.

No trabalho de Viana (2007), o estudo de vulnerabilidade e risco à poluição foi desenvolvido no Sistema Aquífero Médio na Bacia do Araripe, que abastece os municípios de Crato, Barbalha, Juazeiro do Norte e Missão Velha. A aplicação do método GOD indicou índices de vulnerabilidade insignificantes, associados às camadas argilosas confinantes, e índices altos, em regiões onde o nível estático é aflorante, sendo que 30% da área apresentaram índices de baixa vulnerabilidade, com maior risco de contaminação no município de Juazeiro do Norte.

Cunha (2009) realizou uma análise crítica e detalhada de três métodos de vulnerabilidade (DRASTIC, SINTACS e GOD) aplicados na região litorânea do Pecém, o que resultou no desenvolvimento de um método adaptado às condições locais, chamado de SORETO e propôs o uso do mapeamento de vulnerabilidade como ferramenta de gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Em Gomes *et al.* (2010), o método DRASTIC foi aplicado no Complexo Industrial e Portuário do Mucuripe, localizado em Fortaleza. O estudo averiguou alta vulnerabilidade para o aquífero local e perigo de contaminação por hidrocarbonetos em decorrência da atividade industrial, e por esgoto doméstico oriundo da comunidade de baixa renda existente no entorno do Complexo e que não está interligada a rede de coleta de esgoto.

No que concerne aos trabalhos pertinentes à região do CIPP e ao escopo deste estudo, Marinho (2000) realizou estudo hidrogeológico e geofísico na Bacia Hidrográfica do Rio Cauípe, leste da área deste estudo, onde foram identificadas espessuras saturadas entre 20 e 30 metros nos aquíferos formados da planície litorânea (sedimentares) e espessuras quase nulas nos aquíferos próximos à CE-085 (Fissural). O trabalho também classificou como

própria para consumo humano as águas dos aquíferos sedimentares da região (Dunas e Barreiras).

Nogueira *et al.* (2004; 2005) apresentaram uma caracterização geoambiental e hidrogeológica da área do Pecém a fim de reconhecer as áreas mais susceptíveis à contaminação de hidrocarbonetos e concluíram que a instalação do CIPP pode representar um risco às águas subterrâneas em detrimento da sensibilidade ambiental da região, principalmente nas zonas de depósitos eólicos, que apresentaram valores de condutividade hidráulica e capacidade de infiltração bastante elevadas.

Puerari (2005) desenvolveu na área do CIPP destinada a refinaria um estudo de vulnerabilidade de aquíferos a contaminação por derivados de petróleo por meio da aplicação do método DRASTIC, adaptado em detrimento das propriedades físico-químicas dos hidrocarbonetos, o que foi chamado pela autora de DRASTIC/PETRO. Como resultado gerou-se mapas de vulnerabilidade para gasolina com etanol, gasolina, diesel e óleo cru, onde foi possível identificar em todas as situações áreas de maior vulnerabilidade associada aos terrenos sedimentares (dunas) com lençol freático raso, e áreas de menor vulnerabilidade em terrenos cristalinos e em porções da Formação Barreiras que apresentam níveis de água mais profundos. O mapeamento também indicou índices maiores de vulnerabilidade para a situação gasolina com etanol, e índices menores para a situação óleo cru.

Cavalcante (2006) realizou a caracterização do aquífero costeiro em área a leste do Porto Pecém, por meio de monitoramento geofísico eletromagnético e monitoramento de piezômetros, a fim de determinar o avanço da cunha salina em direção ao continente. Dentre os resultados do seu trabalho identificou-se a concentração de cunha salina entre 10 e 50 metros de profundidade, espessura de 20 metros para o Aquífero Dunas e de 77 metros para o Aquífero Barreiras, além do aumento das concentrações de condutividade elétrica medida nos piezômetros no período chuvoso.

Em estudo hidrogeológico no Sistema Aquífero Dunas da Região Metropolitana de Fortaleza, que incluiu o Aquífero Dunas da região do Pecém (entre o Riacho Cauípe e o Rio São Gonçalo), Morais (2011) caracterizou este sistema como de extremo risco de poluição das águas subterrâneas, devido à ocorrência de nível freático raso e uso e ocupação do solo de maneira desordenada. Este trabalho também apresentou valores de vazão entre 1,63 e 4,32 m³/h para os poços da região e reservas hídricas totais da ordem de 105x10⁶ m³.

Devido o uso industrial deferido para a área, a literatura dos trabalhos existentes para o Pecém é formada, em grande parte, por trabalhos técnicos, principalmente Estudos de Impactos Ambiental (EIA), com destaque para o Plano de Desenvolvimento do Complexo

Industrial e Portuário do Pecém, desenvolvido pela Agência de Cooperação Internacional Japonesa (JICA), para o Governo do Estado em 2006; EIA/RIMA do Complexo Industrial do Pecém desenvolvido pelo CENTEC em 2009, EIA/RIMA da Refinaria Premium e Dutovia, desenvolvido pela Universidade Federal do Ceará, em 2012; e a Avaliação Hidrogeológica Quali-quantitativa do Campo de Dunas Pecém/Paracuru, no Estado do Ceará, desenvolvida pela COGERH em 2011 (ver CEARÁ, 2011).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste estudo se iniciou com o levantamento bibliográfico, pela consulta principalmente em banco de teses, livros-textos e publicações recentes de hidrogeologia e áreas afins, bem como trabalhos técnicos, como EIA-RIMAs, protocolados na biblioteca da Secretaria de Meio Ambiente do Estado (SEMACE). Concomitante foi realizada a consulta e avaliação do cadastro de poços disponível no Banco de Dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (SIAGAS/CPRM) e da Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará. Os dados obtidos foram tabulados em planilhas eletrônicas onde foram submetidos a tratamentos estatísticos e elaboração de gráficos. Também foram realizadas consultas ao banco de dados da base cartográfica do Pólo Ceará Costa do Sol, desenvolvido pelo IPECE e a demais bases cartográficas pertinentes ao estudo, como o Mapa Geológico do Estado de Ceará (BRASIL, 2003) e o Mapa de Solos do Brasil (EMBRAPA, 2011). Por fim, foram confeccionados mapas preliminares para auxílio das atividades de campo.

Os dados meteorológicos para a caracterização climática da área foram obtidos no banco de dados da Estação Meteorológica da São Gonçalo do Amarante (nº 338008, coordenadas Lat/Log -3.583/-38.9667), disponibilizado pela FUNCEME. Dada à ausência de dados consistentes na série histórica de temperatura da Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante, as médias mensais foram estimadas por regressão linear, por meio de planilha de cálculo desenvolvida pelo Laboratório de Climatologia, do Departamento de Geografia da UFC. Com as médias mensais de temperatura e precipitação estimadas para a área foi realizado o cálculo do balanço hídrico, a partir dos dados de evapotranspiração potencial obtidos pelo método proposto por Thornthwaite e Matter (1955), considerando-se o valor de 100 mm como capacidade de retenção de água pelo solo (CAD).

As atividades de campo se iniciaram com uma visita preliminar para reconhecimento das principais feições geoambientais, infra-estrutura e indústrias instaladas, áreas residenciais e demais temas de interesse. As atividades de campo para cadastro de poços, coleta de dados e medição do nível estático e dos parâmetros físico-químicos foram realizadas em quatro etapas ao longo do ano: duas na estação chuvosa (fevereiro e maio) e duas na estação seca (setembro e dezembro). Em cada etapa foram medidos os parâmetros: nível estático, pH, Temperatura, Condutividade Elétrica (CE), Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e Salinidade, além da avaliação imediata de parâmetros organolépticos.

A primeira etapa de campo foi realizada em fevereiro de 2013, onde foram cadastrados 25 poços, entre tubulares e manuais, e realizadas leituras do nível estático e medição dos parâmetros físico-químicos *in situ*. Nas três etapas de campo posteriores, realizadas em maio, setembro e dezembro, os poços foram revisitados e novas medições físico-químicas e medidas do nível estático foram realizadas, a fim de avaliar possíveis alterações no comportamento e nas características das águas subterrâneas ao longo do ano. Como um dos poços cadastrados foi obstruído entre as etapas de fevereiro e maio, optou-se por excluí-lo do arquivo de dados.

Para as medições dos parâmetros físico-químicos realizadas *in situ* foram utilizados dois equipamentos: um condutivímetro digital *Mettler Toledo SG7* com o qual se realizou as medidas de CE, STD e salinidade, e um aparelho multi parâmetros *Oakton Waterproof PC10*, utilizado para as medidas de pH e temperatura. Os equipamentos foram calibrados antes das etapas de campo, com soluções-padrão específicas. As leituras de nível estático foram realizadas por meio de um medidor de nível d'água graduado da marca HidroSuprimentos.

Os poços cadastrados foram construídos com fins de obtenção de água, e não apresentam descrição detalhada da litologia atravessada e, portanto, da diferenciação entre Dunas e Barreiras, por exemplo. Inúmeras vezes não se têm o posicionamento das colunas filtrantes, o que facilitaria a interpretação da profundidade de captação da água. Desta forma, na interpretação do comportamento periódico dos níveis estáticos e demais parâmetros medidos em campos, os poços foram agrupados em detrimento da área de exposição dos aquíferos nos quais estão alocados e foram subdivididos entre poços tubulares e manuais.

A cartografia temática foi desenvolvida em ambiente SIG por meio da utilização dos programas ArcGIS (ArcMap)TM 9.3 e Surfer 8. Os mapas de zoneamento dos parâmetros físico-químicos, nível estático e fluxo das águas subterrâneas foram obtidos por operações de interpolação conhecidas como krigagem. Este método está baseado no princípio de que pontos próximos no espaço tendem a apresentar valores semelhantes, se comparados com os pontos mais afastados. Landim (1998) define krigagem como um procedimento exato de interpolação que leva em consideração todos os valores observados, e que pode ser a base para cartografia automática por computador quando se dispõe de valores de uma variável regionalizada dispostos por uma determinada área.

No caso do mapeamento de fluxo, desenvolveu-se um mapa de isolinhas de carga hidráulica e vetores de fluxo para cada período de monitoramento, considerando-se os valores medidos ao longo de 2013 nos 18 poços que apresentam medidas da profundidade do nível

estático para as quatro etapas de campo. A base altimétrica utilizada neste mapeamento consta de uma carta topográfica com isolinhas de 5 metros, desenvolvida pelo IPECE.

Para o mapeamento da vulnerabilidade criou-se um arquivo em formato *shape* para cada um dos parâmetros utilizados nos métodos. Os arquivos foram convertidos para formato tipo *raster*, onde para cada classe de feições foi atribuído um valor de acordo com os valores propostos por cada método, resultando em imagens individuais para cada parâmetro. Posteriormente, os dados foram submetidos a operações matemáticas em ambiente SIG (álgebra de mapas), com a multiplicação dos dados no formato *raster*, de acordo com as expressões propostas para o cálculo da vulnerabilidade. Como resultado, gerou-se uma imagem integrada em formato *raster*, onde cada pixel tem como valor atribuído o resultado da multiplicação das imagens iniciais.

4.1 Métodos de Vulnerabilidade

Para o desenvolvimento deste projeto, foram selecionados dois métodos para a obtenção do índice de vulnerabilidade, a saber: DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987) e GOD (FOSTER; HIRATA, 1988). Os métodos selecionados para este estudo refletem a vulnerabilidade intrínseca (natural) ou geral de forma qualitativa, sendo possível realizar uma comparação relativa entre os índices.

4.1.1 Método DRASTIC

A partir dos parâmetros definidos pelo método DRASTIC, a profundidade do nível estático (D) foi dividida em 4 classes, com valores <1,5 até 15 metros. Os valores são os mesmos utilizados no índice GOD, porém divididos em um número maior de intervalos. O parâmetro recarga (R) foi estimado pela porosidade e variação do nível estático nos poços monitorados ao longo de 2013, que apontou valores médios distintos para cada sistema aquífero: Dunas, Barreiras e Fissural.

A litologia do aquífero, que corresponde ao parâmetro (A), foi classificada relacionando-se a descrição litológica apresentada no método e as características litológicas dos aquíferos da área. O Aquífero Barreiras foi correlacionado aos arenitos, e devido sua grande variação granulométrica e faciológica recebeu um valor intermediário para a avaliação; o Aquífero Dunas foi correlacionado às areias e recebeu o maior valor do intervalo.

O Aquífero Fissural, associado com a descrição de rochas ígneas e metamórficas, foi classificado com o maior valor do intervalo, dado a captação de água em porções do manto de alteração e a ausência de medidas que indiquem o grau de fraturamento deste aquífero, o que poderia orientar a avaliação de sua susceptibilidade a contaminação.

O tipo de solo (S) foi classificado a partir da simplificação do mapeamento da EMBRAPA, associando-se a litologia do terreno e a principal ocorrência pedológica, e partir disso, foi realizada a comparação com as características pedológicas apresentadas no método. Desta forma, os Neossolos Quartzarênicos correspondem ao tipo de solo descrito como Areia, pelo método DRASTIC. Os Argissolos e Planossolos foram associados às Margas Argilosas e receberam o mesmo valor de quantificação.

Quanto ao parâmetro (T) que diz respeito à declividade do terreno, foi realizada uma estimativa a partir do mapa topográfico da área, com cotas a cada 5 m, e aplicação de técnicas de triangulação da superfície (*Triangulated Irregular Network*) em ambiente SIG. O TIN é uma representação da superfície a partir de pontos espaçados irregularmente e feições não uniformes, e no caso deste trabalho, as relações de declividade foram expressas em porcentagem, adequadas ao intervalo proposto pelo método DRASTIC.

O parâmetro (I), que classifica o impacto na zona vadosa, foi determinado através do mapeamento geológico, relacionando-se mais uma vez a descrição apresentada no método e as características locais. Ressalta-se que a Formação Barreiras foi associado aos arenitos, e devido o teor significativo de silte e argila não recebeu o valor máximo de avaliação do método. Os terrenos cristalinos (rochas ígneas e metamórficas) receberam um valor intermediário, dado a presença de cobertura pedológica.

Por fim, para o parâmetro (C), que trata da condutividade hidráulica, foram utilizados valores conhecidos na literatura para os aquíferos da região, a serem apresentados no Capítulo 6.

4.1.2 Método GOD

A partir dos parâmetros propostos no sistema de avaliação de vulnerabilidade GOD, considerando o parâmetro G, os Aquíferos Dunas, Barreiras e Fissural foram classificados como não confinados, dado o caráter livre e nível freático raso.

A respeito da litologia e consolidação da zona vadosa, pertinente ao parâmetro O, a área de estudo recebeu três classificações, sendo o Aquífero Dunas correspondente às areias eólicas. Para o Aquífero Barreiras, determinou-se um valor médio entre os parâmetros argilito

e siltito, e para o Aquífero Fissural considerou-se a classe correspondente às formações ígneas e metamórficas. O último parâmetro (D) que avalia o nível estático classificou a área em duas faixas: a primeira, com valores médios menores que 5 metros, principalmente nas áreas do Aquífero Dunas; e a segunda, com valores entre 5 e 20 metros, com ocorrência principalmente nos Aquíferos Barreiras e Fissural.

4.2 Caracterização e Mapeamento das Potenciais Fontes de Contaminação

A identificação das potenciais fontes de contaminação foi realizada em duas fases: a primeira consistiu no levantamento das empresas instaladas, em fase de instalação ou em operação na área, e a segunda fase consistiu na verificação em campo de locais com atividades potencialmente poluidoras. Após o levantamento dessas informações, as áreas foram tabeladas e classificadas de acordo com o método POSH (FOSTER *et al.*, 2002), que classifica o potencial de carga contaminante no subsolo em três níveis qualitativos: reduzido, moderado e elevado (Quadro 7).

Quadro 7 - Classificação das fontes de contaminação: pontuais e difusas, segundo o Sistema POSH

Potencial de carga contaminante no subsolo	Áreas Industriais	Áreas Urbanas	Saneamento <i>in situ</i>
ELEVADO PESO 3	<i>Indústrias tipo 3</i> : oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, produtos químicos/plásticos farmacêuticos /pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas e processamento de metal	-	Cobertura da rede de esgoto inferior a 25% e densidade demográfica superior a 100 hab/há
MODERADO PESO 2	<i>Indústrias tipo 2</i> : fábricas de borrachas, papel e celulose, têxteis, fertilizantes, usinas elétricas, detergentes e sabão	Postos de gasolina, vias de transporte com tráfego regular de produtos perigosos	Intermediário entre elevado e reduzido
REDUZIDO PESO 1	<i>Indústrias tipo 1</i> : madeireiras, indústrias de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de matérias não metálicas	Cemitérios	Cobertura da rede de esgoto superior a 75% e densidade demográfica inferior a 50 hab/há

(Fonte: Adaptado de Foster *et al.*, 2002)

Após a caracterização das potenciais fontes, o mapeamento do perigo de contaminação foi realizado em ambiente SIG por meio da multiplicação do mapeamento da

vulnerabilidade (obtida pelo método GOD) com a classificação das cargas poluidoras, (classificadas pelo método POSH), seguindo o mesmo método apresentado para o mapeamento da vulnerabilidade.

A fim de quantificar o perigo de contaminação e possibilitar a aplicação das ferramentas de cálculo do programa, foram determinados pesos para cada índice de vulnerabilidade: os índices de alta vulnerabilidade receberam peso 3, os moderados receberam peso 2 e os baixos receberam peso 1. Desta forma, o perigo foi quantificado em uma escala relativa que variou de 2 a 9 (valor mínimo e máximo obtido pelo produto da vulnerabilidade GOD pelo peso da carga contaminante), e pode ser classificado em baixo, moderado e elevado, a depender dos intervalos obtidos. Neste trabalho foram adotados os seguintes intervalos de perigo: baixo (resultados entre 2,0 e 3,99), moderado (resultados entre 4,0 e 6,99) e elevado (resultados entre 7,0 e 9).

4.3 Balanço Hídrico

O Balanço Hídrico tem por objetivo estabelecer um saldo entre o aporte e a saída de água de um determinado sistema, sendo realizado por meio de um balanço de massa onde se torna possível, entre outras atividades, avaliar as variações anuais do nível estático (Castany, 1975). No caso dos aquíferos livres, o balanço mostra-se importante para o cálculo dos volumes de precipitação pluviométrica que podem ser convertidos em volumes de recarga dos aquíferos, como proposto em Lerner *et al.* (1990), onde a recarga foi definida como o fluxo descendente de água que alcança o nível de água do aquífero, gerando adição ao reservatório de água subterrânea. A expressão geral do balanço hídrico pode ser expressa pela Equação 4.

[Equação 4]

$$P = Es + ETR + It$$

Onde:

P = Precipitação

Es = Escoamento

ETR = Evapotranspiração Real

It = Infiltração Total

A Evapotranspiração Real representa a parcela de água que será perdida entre a precipitação e a infiltração. A Infiltração Total (It) consiste na parcela de água capaz de infiltrar no solo, e é dividida na parcela de água retida pelo solo (ARM) e na parcela que infiltra até o nível freático (Infiltração eficaz - Ie). Esta última parcela pode ser considerada como o potencial de recarga das águas subterrâneas, representando a altura da lâmina de água que oscila ao longo do ano hidrológico. Uma vez que Castany (1975) considera o escoamento superficial insignificante, principalmente em áreas de terrenos permeáveis, o balanço hídrico para este estudo hidrogeológico pode ser calculado por meio da equação 5:

$$I_e = P - ETR - ARM$$

[Equação 5]

A ETR pode ser estimada a partir do volume potencial que pode ser evapotranspirado, isto é, a Evapotranspiração Potencial (ETP). Para tanto, foi utilizado o método de Thornthwaite e Matter, expresso pela equação 6.

$$ETP = 16K (10T/I)^\alpha$$

[Equação 6]

$$\alpha = 0,49239 + (1792 \times 10^{-5} I) - (771 \times 10^{-7} I^2) + (675 \times 10^{-9} I^3)$$

Onde:

ETP = Evapotranspiração Potencial

T = Temperatura (°C)

I = Índice Térmico

K = Fator de Correção da Latitude

α = Termo obtido em função do índice térmico

O Índice Térmico (I) é obtido pela somatória de índices térmicos mensais, que variam de acordo com a média de temperatura mensal.

$$I = \sum_{i=1}^{12} I_i \quad \text{onde} \quad I_i = (T_i/5)^{1,5}$$

Vasconcelos (1994) aponta este método como o mais adequado para o cálculo da ETP da região, uma vez que considera a peculiaridade da alternância de estações secas e chuvosas, de forma a fornecer uma proporção de infiltração mais próxima da realidade, no que se refere ao comportamento durante o ano.

5. CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTAIS

A análise das condições naturais do ambiente, considerando as características climáticas e os principais compartimentos fisiográficos e geológicos, são de extrema importância no desenvolvimento de estudos hidrogeológicos, onde a interação entre as diversas características ambientais reflete diretamente na disponibilidade hídrica e comportamento dos sistemas aquíferos. Como apontado por Lima *et al.* (2000), a análise das condições hidrológicas e geo-hidrológicas do território são indispensáveis para a compreensão satisfatória do ambiente e aproveitamento dos recursos naturais renováveis.

5.1 Aspectos Climáticos Regionais

De acordo com a classificação climática de Köppen (1948), o clima da região litorânea do Ceará se enquadra como tropical quente e úmido (Aw'), caracterizado por uma estação seca no inverno e chuvosa no verão, temperatura média mensal superior a 18°C em todos os meses do ano e precipitação média inferior a 60 mm em pelo menos um dos meses do ano. Quatro sistemas sinóticos principais são responsáveis por tal configuração: as Frentes Frias, com formação no Pólo Sul, o Centro de Vorticidade Ciclônica, os Ventos Alísios de sudeste e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), estes dois últimos responsáveis pela regulação dos períodos de chuva (IPLANCE, 1997).

5.2 Caracterização Climática Local

A série histórica selecionada para os dados pluviométricos compreende o período entre 1982 e 2013 e foram coletados na Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante. Inicialmente a pesquisa foi realizada no Banco de Dados da Estação Meteorológica do Pecém, contudo, devido à escassez de dados disponíveis nesta estação (apenas sete anos, entre 1998 e 2005, sendo que não há medições para todos os meses do ano de 2003), realizou-se o levantamento de dados junto as Estações Meteorológicas de São Gonçalo do Amarante e de Caucaia, a fim de determinar qual das estações apresentaria condições meteorológicas mais próximas à área de interesse. A partir dos resultados dos volumes de precipitação, averiguou-se que a Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante possui valores mais próximos aos obtidos na Estação Meteorológica do Pecém, apresentando volume médio de precipitação

15% menor para o período (1998/2005), enquanto na comparação entre a Estação Meteorológica do Pecém e Caucaia, a diferença é de 23% (Tabela 1).

Tabela 01 - Volumes anuais e valor médio de precipitação para as Estações Meteorológicas do Pecém, São Gonçalo do Amarante e Caucaia, no período de 1998 até 2005

Ano	São Gonçalo do Amarante (mm/ano)	Pecém (mm/ano)	Caucaia (mm/ano)
1998	488	419	745
1999	848	1417	977
2000	946	1435	1749
2001	838	1128	1494
2002	1103	1003	1494
2004	1068	926	1584
2005	675	661	934
Média	852	998	1292

(Fonte: Baseado em dados da FUNCEME, 2013)

5.2.1 Precipitação

Os dados da série histórica indicam média pluviométrica anual de 1020 mm/ano. O ano de 1986 apresentou a maior precipitação, com 2097 mm; e 1993 apresentou o menor volume, com apenas 434 mm (Figura 4).

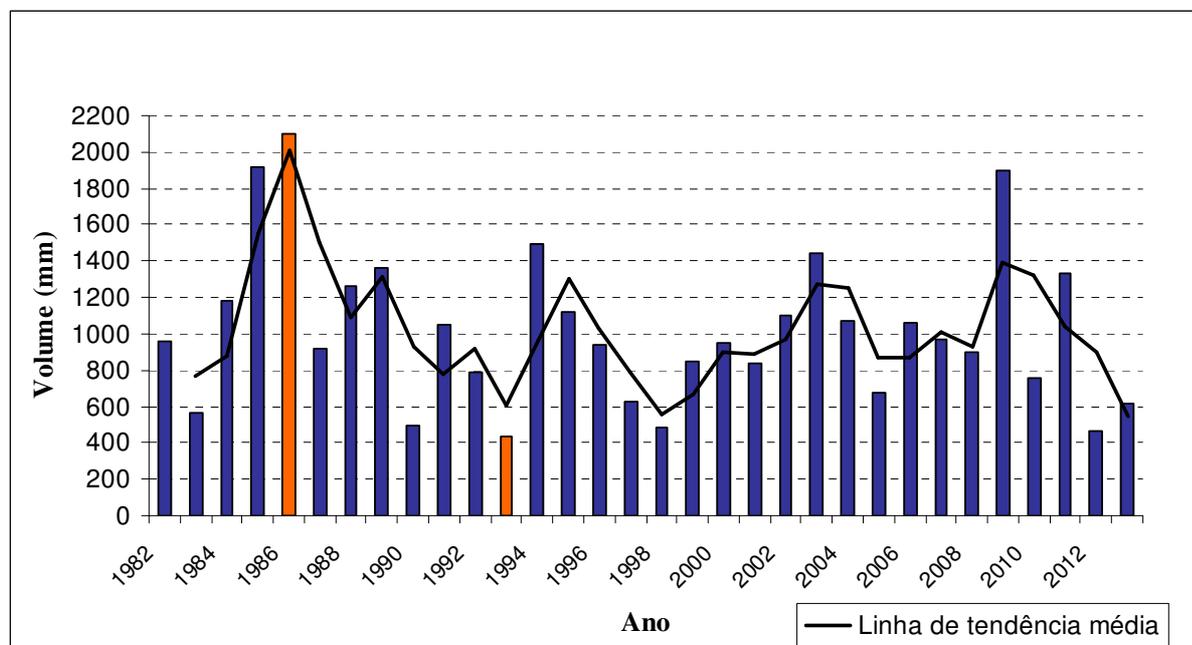


Figura 4. Variação da precipitação anual para o período de 1982-2013 na Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante (Fonte: FUNCEME, 2013)

Os anos com menor precipitação total anual podem ser relacionados aos anos de influência do fenômeno El Niño sobre a ZCIT, da mesma maneira que os anos de maior precipitação podem ter sofrido influência do fenômeno La Niña.

Os dados para o mesmo período indicam a maior média mensal de precipitação para março, com 250 mm; e a menor para novembro, com apenas 2,0 mm (Figura 5). Os dados também demonstram que o regime de chuvas é controlado por uma estação seca, de junho a dezembro, e outra chuvosa, iniciada em janeiro, com aproximadamente 75% das precipitações entre fevereiro e maio.

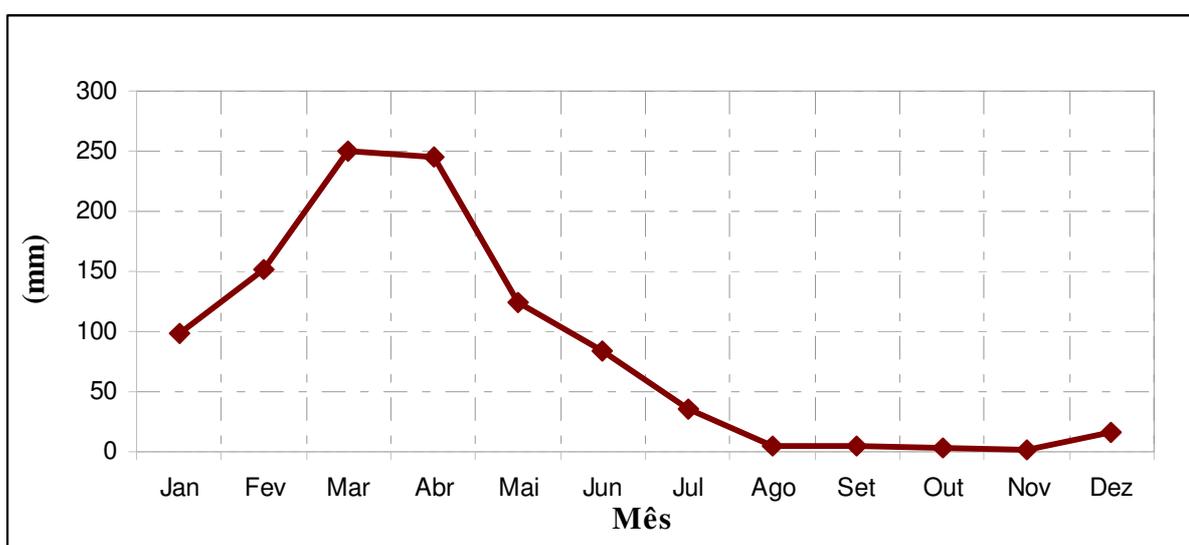


Figura 5. Média mensal de precipitação no período de 1982-2013 para a Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante. (Fonte: FUNCEME, 2013)

5.2.2 Temperatura

O regime térmico apresenta-se regular, com pequenas variações ao longo do ano (Figura 6). A temperatura média anual atinge 27°C, sendo as maiores temperaturas registradas nos meses de novembro e fevereiro, e as menores temperaturas nos meses de abril e julho (26,6°C e 26,1°C, respectivamente). A amplitude térmica diária oscila entre 23 e 31°C.

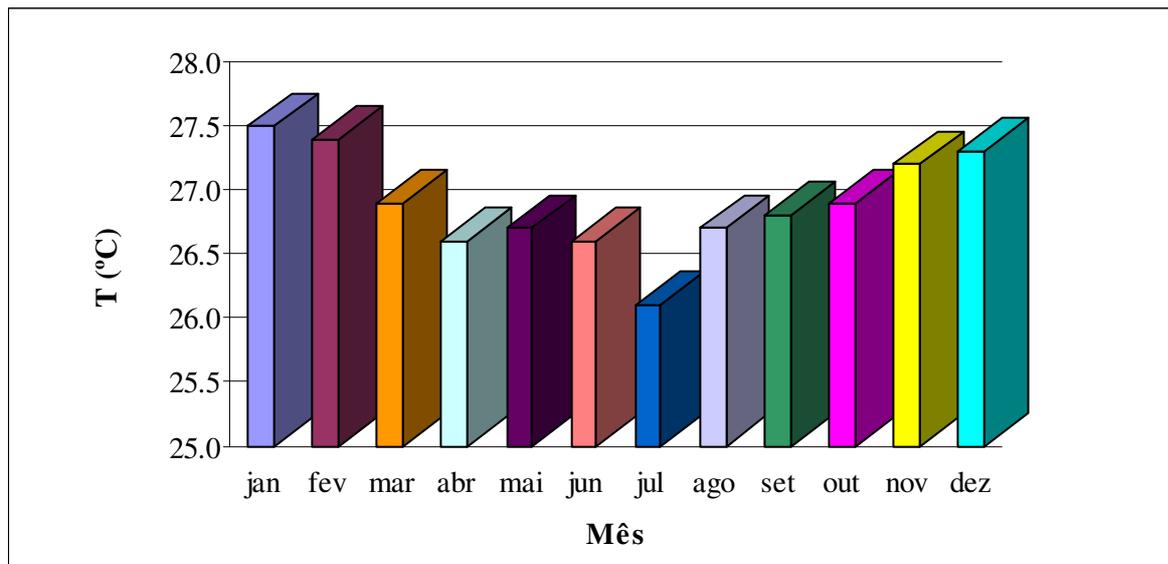


Figura 6. Média mensal de temperatura estimada para o município de São Gonçalo do Amarante

5.3 Geologia

A área de estudo apresenta terrenos cristalinos pré-cambrianos e coberturas sedimentares cenozóicas, sendo representada por três unidades litoestratigráficas: Complexo Ceará, Formação Barreiras e Sistemas Depositionais Costeiros, como apresentado na Figura 7. O mapeamento foi baseado no Mapa Geológico do Estado do Ceará, Escala 1:500.000 (CPRM, 2003), em imagens de satélite e em observações de campo.

5.3.1 Complexo Ceará

O Complexo Ceará se configura como o embasamento para os depósitos sedimentares cenozóicos da região e é caracterizado por Brandão (1995) como uma associação petrotectônica constituída por gnaisses aluminosos, em parte migmatizados, frequentemente intercalados por níveis quartzíticos e calcissilicáticos, em jazimentos lenticulares de pequenas dimensões e conformáveis ao bandamento. Está associado geomorfologicamente aos terrenos da Depressão Sertaneja, sendo representado na área por duas Unidades litológicas: Independência e Canindé.

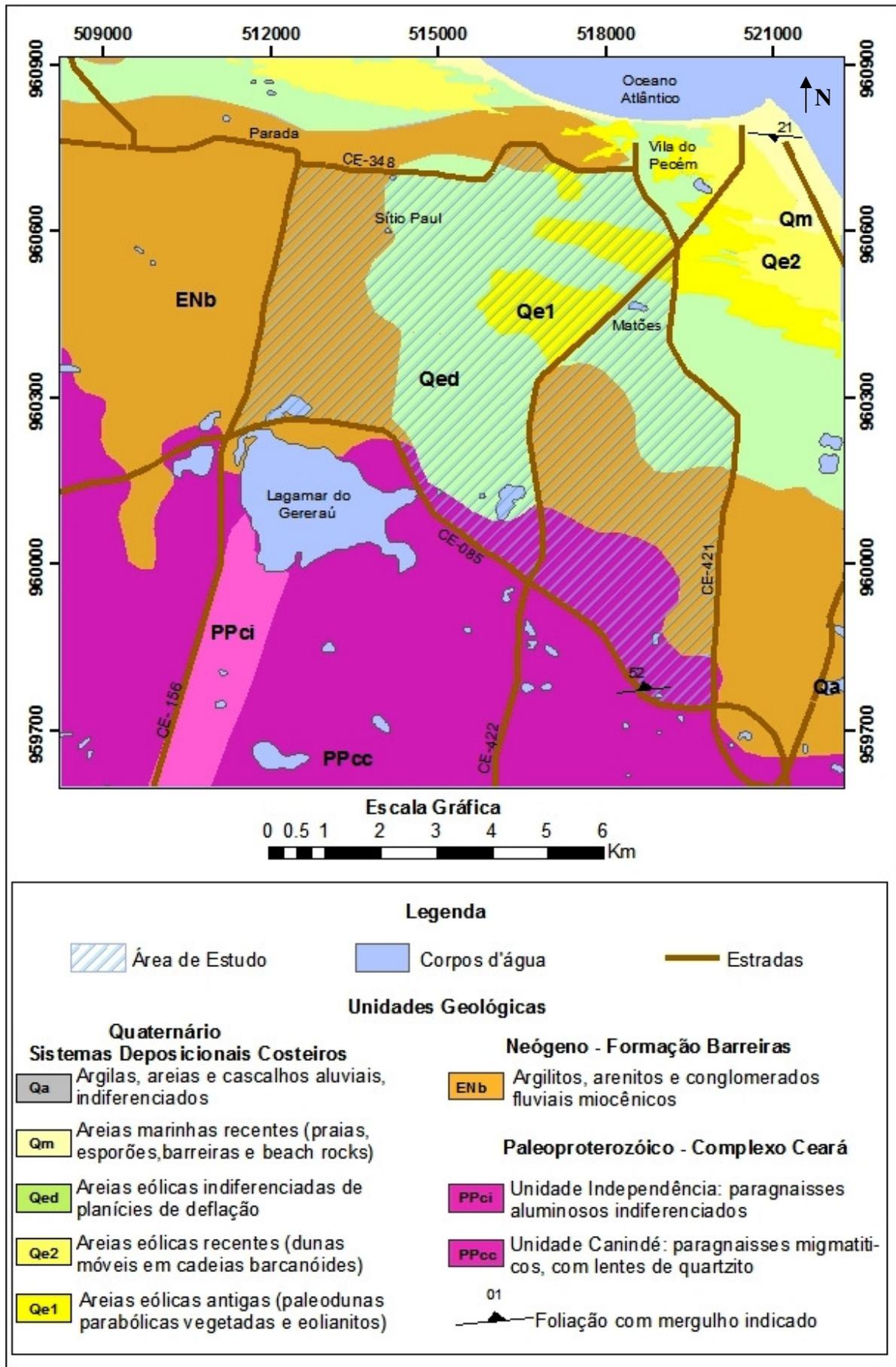


Figura 7. Mapa geológico da região de estudo

A Unidade Independência (PPci) ocorre na porção sudoeste da área, sendo constituída por paragnaisses aluminosos indiferenciados, além quartzitos, metacalcários, rochas calcissilicáticas, e eventualmente anfibolitos. Em Ceará (2009) seus litotipos são descritos com cores marrom-avermelhadas a marrom escuras, indicativas de um aumento de teores de íons de ferro, provavelmente devido a maior concentração de minerais como magnetita e limonita, sendo que nas áreas onde prevalecem os paragnaisses e mica-xistos sobressaem-se cores alaranjadas e amareladas, demonstrando uma resposta combinada à ocorrência de argilas, carbonatos e óxidos de ferro.

A Unidade Canindé (PPcc), abrange a porção sul da área e é composta por paragnaisses migmatíticos, ortognáisses ácidos e rochas metabásicas, com presença de lentes de quartzito. Barros (1986) descreve os quartzitos desta unidade com a mineralogia predominante de quartzo (98%) e raras palhetas de muscovita. A Unidade ocorre exposta em afloramentos ao longo da CE-085, e no promontório rochoso observado próximo ao Porto do Pecém, local conhecido como Ponta do Pecém.

5.3.2 Formação Barreiras

A Formação Barreiras (ENb) é uma unidade sedimentar de idade miocênica (ARAI, 2006), constituída por depósitos textural e mineralogicamente imaturos, compostos de argilitos, arenitos e conglomerados, de diversas tonalidades, com presença de nódulos e níveis lateríticos em meio à unidade (ALHEIROS *et al.*, 1988). A presença de estruturas sedimentares primárias indicativas de correntes com rumo para o mar sugere origem predominantemente continental, principalmente por canais fluviais entrelaçados, como proposto por Alheiros e Lima Filho (1991), porém, alguns autores, como Arai (2006), sugerem um ambiente deposicional marinho para esta formação, devido a presença de fósseis marinhos e restos de vegetação costeira. Entretanto, o mesmo autor salienta que na região Nordeste não há evidências claras desse caráter marinho, sugerindo um ambiente costeiro transicional.

Na região de estudo, a Formação apresenta-se disposta em uma superfície topograficamente plana e está associada à unidade geomorfológica conhecida por Tabuleiros Pré-Litorâneos (BRANDÃO, 1995). Ocorre de leste a oeste na porção centro-sul, sendo que a oeste se estende até o limite norte. Em sua porção mais oriental, próximo a CE-421, pode-se observar um nível de arenitos conglomeráticos de tonalidade avermelhada, caracterizado pela presença de lateritas ferruginosas. Em meio ao pacote, observou-se a presença de uma lente

conglomerática formada por blocos de quartzito, de tamanhos variados, provavelmente oriundo dos terrenos gnáissico-migmatíticos localizados ao sul da área. Logo acima deste pacote, encontrou-se um nível homogêneo formado por arenitos de granulação fina média e tonalidade alaranjada, sendo possível observar uma discordância planar entre os pacotes sedimentares. Em outro ponto próximo a CE-421, pode-se observar um pacote homogêneo, formado por arenitos de granulação fina a média, com tonalidade alaranjada, sem ocorrência de níveis conglomeráticos.

5.3.3 Sistemas Depositionais Costeiros

Os sistemas deposicionais costeiros presentes na região de estudo são representados por depósitos marinhos, eólicos e aluviais de idade quaternária. Estes sistemas iniciam-se a partir da linha de costa e dispõem-se discordantemente sobre unidades litoestratigráficas mais antigas, a exemplo de dunas empoleiradas sobre o embasamento cristalino.

Os depósitos de areias marinhas recentes (Qm) delineiam a linha de costa onde constituem praias, esporões e barreiras. São formados por sedimentos bem selecionados, de granulação grossa a fina, composição quartzosa a bioclástica, e concentrações pontuais de minerais pesados. Parte destes depósitos encontra-se cimentada em carbonato de cálcio, destacando-se proeminentemente na forma de terraços baixos de *beach rocks*, por vezes como blocos fendidos.

Os depósitos eólicos são formados por areias quartzosas muito bem selecionadas, de granulação fina a média, eventualmente compostas por bioclastos marinhos retrabalhados. Seus depósitos mais recentes (Qe2), dispostos na porção mais próxima à linha de costa, constituem campos de dunas móveis na forma de cadeias barcanóides. Ainda nesta porção, ocorrem depósitos antigos isolados, dispostos em camadas de areias bem estratificadas e levemente cimentadas em carbonato de cálcio, eventualmente portadoras de níveis de rizoconcreções de mesma constituição. Tais depósitos são classificados como eolianitos.

Os depósitos eólicos antigos (Qe1) ocorrem, em sua maior parte, na porção mais distante da linha de costa, e englobam campos de paleodunas parabólicas fixas, densamente vegetadas, onde processos pedogenéticos são notórios pela presença de horizontes texturais de neossolos quartzarênicos.

Na porção entre os depósitos de areias marinhas recentes e os campos de dunas e paleodunas, encontram-se planícies de deflação constituídas pelas aqui denominadas areias eólicas indiferenciadas (Qed). Ocorrem em áreas aplainadas, por vezes alagadiças, cobertas por camadas delgadas de areias residuais do caminhamento das dunas dos depósitos eólicos recentes e antigos.

Ao longo das áreas rebaixadas dos terrenos cristalinos, dos vales aplainados da Fm. Barreiras e nas planícies de deflação eólica são encontradas drenagens de pequeno porte, influenciadas pelas marés em suas porções mais próximas a linha de costa. Devido seu caráter flúvio-marinho indistinto neste trabalho, seus depósitos são aqui referidos como aluviais indiferenciados (Qa), formados por sedimentos de granulação variada, desde argilas até cascalhos, de composição variada e muitas vezes associados à presença de matéria orgânica vegetal.

5.4 Geomorfologia

A área do CIPP comporta três Unidades Geomorfológicas principais: a Planície Litorânea, os Glacis Pré-Litorâneos e a Depressão Sertaneja sendo que, de acordo com Brandão (1995), os limites de cada unidade estão estabelecidos com base na homogeneidade das formas de relevo, altimetria, estrutura geológica, tectonismo, bem como características de solo e vegetação.

A Planície Litorânea é formada pelas praias, campos de dunas e planícies flúvio-marinhas. As praias apresentam-se como depósitos sedimentares contínuos, localizados a partir da linha da maré baixa até a base das dunas móveis. Os campos de dunas encontram-se alinhados subparalelamente à linha de costa, formados sucessivamente por dunas móveis e fixas. As dunas móveis estão dispostas mais próximas ao mar e são caracterizadas por feições barcanóides. As dunas fixas, de formação mais antiga em relação às dunas móveis, são caracterizadas por feições parabólicas e pelo início do desenvolvimento de processos pedogenéticos.

Os campos de dunas (móveis e fixas) apresentam-se contínuos, sendo localmente interrompidos pelas planícies flúvio-marinhas da Lagamar do Cauípe e Lagamar do Gereraú e pela Ponta do Pecém, que representa um promontório parcialmente aflorante do embasamento cristalino. Em suas planícies de deflação, ainda pode-se observar a presença de retrocordões (*gegenwalle*), rastros lineares e feições ruineformes de eolianitos retrabalhados pelo vento. Estas feições ruineformes, em particular, podem ocorrerem dômicas ou alongadas

paralelamente ao vento, neste caso conhecidas como *yardangs*. Por sua vez, as planícies flúvio-marinhas são formadas por sedimentos depositados em ambientes onde ocorre o encontro das águas doces continentais como as águas salgadas marinhas, que adentram no continente por ação das marés. Como citado, as principais planícies flúvio-marinhas correspondem a Lagamar do Cauípe e do Gereraú e suas drenagens associadas.

Localizados no centro da área de estudo, os Glacis Pré-Litorâneos constituem-se de uma planície de deposição sedimentar, neste caso sedimentos da Formação Barreiras, que configuram terrenos tabulares cobertos por espessa camada de areia e entrecortados pela rede de drenagem, conhecidos como Tabuleiros Pré-Litorâneos e Planícies Fluviais, respectivamente. Os Tabuleiros Pré-Litorâneos situam-se à retaguarda dos campos de dunas, apresentam topos planos e horizontais, vales alongados e pequena variação topográfica em relação às feições geomorfológicas adjacentes. Embora, regionalmente, possam atingir a linha de costa expondo-se em forma de falésias, essa feição não é observada na região de estudo. As Planícies Fluviais são vales entalhados pelas drenagens que permeiam os Glacis. Tais drenagens possuem feições retilíneas, com eventual exposição de material ferralítico (SOUZA, 1988) e caracterizadas por Lima (2000) como cataclinal por excelência e com padronagem paralela. Brandão (1995) aponta que essas áreas abrigam boas condições de solo e de oferta hídrica.

A Depressão Sertaneja ocorre ao sul da região de estudo e corresponde a uma superfície de aplainamento, de topografia plana ou pouco ondulada, desenvolvida sobre os terrenos cristalinos. Brandão (1995) a caracteriza como extensas rampas pedimentadas inclinadas suavemente em direção aos fundos dos vales e ao litoral. Dentre diversas características da Depressão Sertaneja relacionadas por Lima (2000), destaca-se na área de estudo o truncamento indistinto das litologias por processos de morfogênese mecânica, acentuadas variações litológicas e pequena espessura do manto de alteração das rochas.

5.5 Solos

A área de estudo apresenta três grandes Classes de solo, conforme o Mapa Exploratório – Reconhecimento dos Solos no Estado do Ceará, em escala 1:600.000, desenvolvido pelo IPECE (2007) e o Mapa de Solos do Brasil, desenvolvido pela EMBRAPA (2011). A nomenclatura adotada está de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2006), a saber: Argissolos, Neossolos e Planossolos.

Argissolos são solos constituídos por material mineral e apresentam horizonte B textural de argila e saturação por bases baixas ou caráter alítico. Na área de estudo os argissolos são classificados como Argissolos Vermelho-Amarelo Distróficos (antigo podzólico vermelho amarelo distrófico), ocorrem associados aos sedimentos da Formação Barreiras e apresentam saturação por base abaixo de 50% no primeiro metro do horizonte B. Brandão (1995) os classifica como solos de profundidade alta a moderada, bem drenados, ácidos, porosos e com textura média a argilosa.

Os Neossolos são solos constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso, que devido à baixa intensidade de processos pedogenéticos não apresentam alterações significativas em relação ao material originário. Na área de estudo, tem-se a presença de três subordens de Neossolos: Flúvicos, Litólicos e Quartzarênicos. Para efeitos da avaliação da vulnerabilidade, em detrimento da escala, adotou-se o mapeamento apenas dos Neossolos Quartzarênicos.

Os Neossolos Quartzarênicos ocorrem associados aos sedimentos eólicos e de praia, e anteriormente eram classificados como Areias Quartzosas Distróficas. São solos sem contato lítico até 0,50 m de profundidade e que apresentam textura arenosa em todos os horizontes, até 1,50 metros. A composição é essencialmente quartzosa e praticamente não há presença de minerais primários menos resistentes ao intemperismo. Nas porções em que este solo apresenta saturação com água permanente dentro de 0,50 m da superfície ou se tem a presença de lençol freático dentro de 1,50 m de profundidade na época seca, pode ser classificado como Neossolo Quartzarênico Hidromórfico.

Os Planossolos são solos minerais, imperfeitamente ou mal drenados, com superfície ou subsuperfície eluvial, resultando em horizonte A moderadamente fraco, seguidos de horizonte B plânico, isto é, apresenta acentuada concentração de argila, cores acinzentadas ou escurecidas, baixa permeabilidade e mudança textural abrupta. Os Planossolos em questão são classificados como Planossolos Háplicos Eutróficos, ou seja,

apresentam saturação pos bases no horizonte B. Ocorrem preferencialmente em áreas de relevo plano ou levemente ondulado, haja vista, estão desenvolvidos sobre os terrenos gnáissico-migmatíticos presentes na região.

5.6 Vegetação

De acordo com Lima (2000), a vegetação cearense ocorre em faixas paralelas, sucessivas e alongadas, sendo que a influência física sobre a vegetação se manifesta, principalmente, em função dos fenômenos associados com a proximidade do mar e com a direção e deslocamento dos ventos que dirigem as condições de pluviosidade da costa para a depressão sertaneja. Na região de estudo a vegetação apresenta elementos de diferentes domínios fitoecológicos, resultado das condições geoambientais locais, sendo caracterizada por Castro (2012) como uma região ecotonal. Figueiredo (1997 *apud* CASTRO, 2012) aponta a presença de um grupo heterogêneo de fitofisionomias, desde vegetação herbácea de pós-praia, matas dunares, caatinga, até elementos de cerrado. As unidades fitoecológicas locais serão classificadas conforme proposto por Lima (2000), a saber: Complexo Vegetacional Litorâneo, Vegetação de Tabuleiros, Matas Ciliares e Caatinga.

O Complexo Vegetacional Litorâneo refere-se à vegetação que encobre a faixa de praia e os campos de dunas. Compreende a vegetação pioneira psamófila, com presença de espécies herbáceas campestres até arbóreas florestais. O Atlas do Ceará, elaborado pelo IPLANCE (1997) divide o Complexo Vegetacional Litorâneo em três unidades: Vegetação Pioneira Psamófila; Floresta de Retaguarda das Dunas e Vegetação dos Tabuleiros Litorâneos, contudo Lima (2000) divide-o em quatro unidades: vegetação da faixa praial; vegetação das dunas fixas e semifixas; vegetação das planícies lacustres e flúviolacustres; e vegetação dos mangues das planícies fluviomarinhas.

A vegetação da Faixa Praial desenvolve-se esparsamente nas áreas próxima ao mar e sofrem maior influência das condições do terreno em detrimento das condições climáticas. Entre as espécies mais comuns pode-se listar a *Iresine portulacoides* (brejinho de praia), *Remirea marítima* (cipó de praia) e *Borreria marítima* (cabeça branca). A vegetação de Dunas Semi Fixas e Fixas caracteriza-se por suportar ventos de grandes velocidades, umidade salina e pouca oferta de água. As dunas semifixas possuem vegetação esparsa, em tufo, composta de plantas herbáceas e espécies de porte arbustivo, parcialmente enterradas pelo fluxo de sedimentos. Destacam-se as espécies: *Indigofera macrocarpa* (anil miúdo), *Ipomoea pescapre* (salsa de praia), *Sesuvium portulacastrum* (beldroega da praia) e *Canavalia*

obtusifolia (fava de boi). Já a vegetação das dunas fixas compreende espécies de porte arbóreo, relativamente denso, e ocorrem sob a influência de processos pedogenéticos. As espécies mais comuns são: *Anacardium occidentale* (cajueiro), *Tocoyena formosa* (jenipapim), *Lantana câmara* (camará), *Hymenoe courbaril* (jatobá), *Ziziphus joazeiro* (juazeiro), *Buchenavia capitata* (amarelão) e *Basanacantha spinosa* (espinho de carneiro).

Apesar de não constar na classificação de Lima (2000), o Atlas do Ceará (IPLANCE, 1997) descreve para a área espécies vegetais de serras úmidas e da caatinga arbórea que ocorrem na transição do campo de dunas fixas com os tabuleiros, classificando-as como Floresta da Retaguarda das Dunas.

A vegetação das Planícies Lacustres e Flúviolacustres: corresponde às espécies que se desenvolvem dentro e nas adjacências dos corpos lagunares. Caracteriza-se pela presença de espécies herbáceas, principalmente gramíneas e formas variadas de algas. Por sua vez, a vegetação dos Mangues das Planícies Fluviomarinhas é composta por árvores e arbustos de porte variado, distribuídas de maneira densa e intrincada. As espécies típicas desta vegetação são: *Avicenna schaueriana* (mangue canoé), *Rhizophora mangle* (mangue verdadeiro), *Conocarpus erecta* (mangue de botão) e *Laguncularia racemosa* (mangue sapateiro).

A vegetação das Matas Ciliares consiste dos carnaubais e vegetação ribeirinha que bordejam as drenagens, tanto nos Campos de Dunas, como nos Tabuleiros. Desenvolvem-se em solos férteis, de boas condições hídricas (SILVA, 2000). As principais espécies são *Copernicia prunifera* (carnaúba), *Lonchocarpus sericeus* (ingazeira), *Ziziphus joazeiro* (juazeiro) e a *Erythrina velutina* (mulungu), entre outras.

A vegetação de Tabuleiros ocorre sobre os Tabuleiros Litorâneos e, segundo Fernandes (1990, *apud* LIMA, 2000 e BRANDÃO, 1995), pode ser dividida em duas unidades ecológicas em função da relação argila/areia existente no solo: a vegetação subperinifólia ou Floresta de Tabuleiros, de porte arbóreo/arbustivo, que se desenvolve nas porções de solo mais argilosas, e vegetação caducifólia, de menor porte e com características de espécies da caatinga, que se desenvolve nas porções de solo mais arenosas. Dentre as espécies da Vegetação de Tabuleiros destacam-se o *Cereus mandacaru* (mandacaru), *Ziziphus joazeiro* (juazeiro), *Anacardium occidentale* (cajueiro), *Solanum paniculatum* (jurubeba), *Byrsonima crassifolia* (murici), *Ceasalpinia bracteosa* (catingueira), *Ximenia americana* (ameixa) e *Hitella racemosa* (azeitona do mato).

A Vegetação de Caatinga ocorre a partir do contato dos Tabuleiros (Formação Barreiras) com a Depressão Sertaneja (terrenos cristalinos), e desenvolve-se em terrenos de

baixa oferta hídrica, solos rasos, altas temperaturas e taxas de evaporação. É caracterizada por espécies arbustivas, caducifólia a subcaducifólia, sendo as mais comuns: *Copernicia prunifera* (carnaúba), *Ceasalpinia bracteosa* (catingueira), *Licania rígida* (oiticica), *Caesalpinia férrea* (jucá), *Cereus mandacaru* (mandacaru), *Ploceurus gounelli* (xique-xique) e *Pilocereus squamosus* (facheiro).

5.7 Águas Superficiais

A área de estudo está inserida na Microbacia do Rio Gereraú, entre as Bacias do rio Cauípe e do rio São Gonçalo, dentro do contexto da Bacia Hidrográfica Metropolitana. Representa uma bacia litorânea, com aproximadamente 120 km² de drenança, delimitando-se ao norte pelo Serrrote Olho d'Água, e ao sul pelo mar. Ao longo de seu curso compreende 32 espelhos d'água que perfazem 71,45 km² e possui reservatório estimado em 5,89 hm³ de água (ROCHA *et al.*, 2012). A maior parte das drenagens da região é representada por canais estreitos e rasos, com destaque para o Rio Cauípe, localizado a sudeste, e a Lagoa do Gereraú (280 ha), localizada a sudoeste.

Ainda nesta região podem ser observados outros corpos hídricos de menor porte, como a Lagoa do Bolso e Lagoa do Sumidouro, e os riachos Ipióca, dos Feios, dos Matões, Coité e Lagoa do Pecém (embora localizada fora da área de estudo, é de extrema importância para a população local). Na porção norte da área, onde ocorre influência da maré e o desenvolvimento de planícies flúvio-marinhas, encontram-se pequenos córregos e lagoas sazonais, com destaque para o Riacho dos Guaribas.

Assim como a maior parte das drenagens do território cearense, as drenagens superficiais desta micro-bacia são regidas pela combinação do embasamento geológico e regime de chuvas. Na porção onde ocorre o predomínio dos terrenos cristalinos, as drenagens encontram-se congruentes as zonas de fraturas, de maneira que apresentam padrões dendríticos e possuem um caráter intermitente, dependendo inteiramente das descargas pluviométricas para sua recarga. Já na porção onde ocorre o predomínio de terrenos areno-argilosos e campos de dunas ocorre o predomínio do padrão fluvial paralelo. As drenagens são mantidas durante a estiagem pela recarga das águas subterrâneas, o que possibilita a perenização de alguns desses corpos hídricos ao longo do ano, embora os riachos e lagoas de pequeno porte tendam a ser intermitentes.

6 HIDROGEOLOGIA

A área de estudo é caracterizada pela presença de dois domínios hidrogeológicos: Poroso Clástico e Fraturado (Fissural). O primeiro é formado por sedimentos não consolidados (Sistema Aquífero Dunas e Aluvionar) ou por litotipos sedimentares (Sistema Aquífero Barreiras) e apresentam porosidade intergranular primária. Por sua vez, o Domínio Fraturado (Sistema Aquífero Fissural) engloba os litotipos ígneos e metamórficos (rochas cristalinas) e seus subprodutos (solos residuais e saprólitos), sua porosidade é secundária e a circulação da água ocorre ao longo de fraturas interconectadas. Neste trabalho o termo sistema aquífero foi adotado considerando a interação entre as águas subterrâneas e superficiais, isto é, das unidades aquíferas com o meio ambiente, conforme proposto por Cavalcante (1998) e consoante com os trabalhos de Sabadia (2001), entre outros.

6.1 Sistema Aquífero Aluvionar

Este sistema constitui-se de aquíferos livres, muitas vezes com o nível freático aflorante, que se desenvolvem ao longo das margens de corpos hídricos superficiais. Na área de estudo ocorrem associados aos Neossolos Flúvicos, muitas vezes com a presença de carnaubais, e devido a escala adotada neste trabalho, esses aquíferos não encontram-se representados no mapeamento. São formados por sedimentos quaternários de tamanhos variados, desde cascalhos até argilas, eventualmente associados à matéria orgânica. Cavalcante (1998) ressalta que esta composição litológica permite grande variação das características hidrodinâmicas, crescente na medida em que ocorrer a alternância mais frequente do material clástico.

Em regiões próximas ao mar, na região de Fortaleza, as águas subterrâneas aluvionares estão sujeitas ao aumento de salobridade devido à infiltração de água salgada durante a subida da maré, comprometendo a qualidade das águas (BELTRÃO E MANOEL FILHO, 1973 *apud* CAVALCANTE, 1998). Além do alto teor salino, Sabadia (2001) descreve outros aspectos restritivos ao uso das águas deste sistema, como sua relação direta com os corpos hídricos superficiais utilizados como receptores das águas residuais domésticas e industriais; e em alguns casos mais incomuns, estas águas podem conter concentrações elevadas de sulfeto de hidrogênio (H₂S), resultante dos processos de decomposição da matéria-orgânica presente nos aluviões.

A recarga deste sistema é proveniente principalmente de precipitações pluviométricas, drenagens influentes e da transferência de águas de outros aquíferos adjacentes, enquanto os exutórios são representados principalmente pela rede de drenagens e pela evapotranspiração.

6.2 Sistema Aquífero Dunas

Este Sistema recobre aproximadamente 49,8% da área de estudo e constitui-se de aquíferos livres formados por sedimentos quaternários, principalmente areias quartzosas de granulação fina a média, bem selecionadas, com intercalações ocasionais de níveis silte-argilosos a argilosos. Apesar de geologicamente envolver as unidades dunas e paleodunas, este sistema pode ser considerado como um sistema único de aquíferos, uma vez que possuem características hidrodinâmicas similares (MORAIS, 2011). Em Cavalcante (1998), o Sistema é caracterizado com dupla função hidrogeológica, tanto como aquíferos principais, como aquíferos de transferência para as unidades sotopostas, isto é, ele pode assumir a função de reservatório, onde por meio de infiltração vertical descendente irá recarregar a unidade aquífera inferior, no caso, o Aquífero Barreiras.

Segundo o mesmo autor, este Sistema apresenta o maior potencial hidráulico produtivo da região litorânea da RMF, com vazão média obtida em poços de 6,0 m³/h, sendo que o valor médio para o Pecém é de 2,4 m³/h. Já para a condutividade hidráulica e transmissividade, Cavalcante (1998) obteve os valores de 1,4x10⁻⁴m/s e 3,88 m²/h, respectivamente. Os ensaios realizados por Nogueira *et al.* (2005) resultaram no mesmo valor para a condutividade hidráulica e 1.600 mm/h para capacidade de infiltração. Em estudo realizado por CEARÁ (2011), a porosidade efetiva para o aquífero Dunas obtida por meio de testes de aquífero na região no Pecém é de aproximadamente 13%, considerando a média de porosidade dos pontos P-1, P-2 e P-6.

Dado os elevados coeficientes de condutividade hidráulica, transmissividade e porosidade efetiva, associados aos níveis estáticos extremamente rasos, Morais (2011) caracteriza este Sistema como altamente susceptível à poluição, resultantes do uso e ocupação do meio físico. Sabadia (2001) aponta os riscos de contaminação deste Sistema dada à falta de saneamento básico e a profundidade dos níveis freáticos.

Entre outros fatores, a importância hidroambiental deste meio ao longo da costa é fundamental para que, com recarga facilitada em função da elevada permeabilidade, sejam mantidos os gradientes de fluxo capazes de afastar do continente a água salgada marinha. A

recarga é realizada principalmente por precipitações pluviométricas e os exutórios naturais são representados por lagos interdunares, pela rede de drenagem e pela ação da evapotranspiração nos locais onde o nível estático é sub-aflorante, enquanto o exutório artificial é representado pela exploração a partir dos poços.

6.3 Sistema Aquífero Barreiras

Este Sistema recobre aproximadamente 36,3% da área de estudo, sendo formado por rochas sedimentares pouco consolidadas, composto principalmente por intercalação de camadas arenosas a silte-argilosas, de forma a constituir um pacote heterogêneo tanto vertical, quanto horizontalmente, o que lhe confere comportamento hidrodinâmico bastante variável. (CAVALCANTE, 1998). Apresenta baixa porosidade e permeabilidade intrínseca, podendo ser classificado regionalmente como um aquitarde, com valores de condutividade hidráulica estimados em $1,8 \times 10^{-6}$ m/s e porosidade efetiva em torno de 10% (BIANCHI *et al.*, 1984). De acordo com Cavalcante (Op. Cit.) a vazão média obtida em poços é de 2,8m³/h, porém em alguns locais a vazão pode ultrapassar os 10 m³/h.

Segundo Marinho *et al.* (1986), as possibilidades hidrogeológicas aquíferas deste Sistema estão restritas as fácies arenosas, geralmente intercaladas por sucessões silte-argilosas, o que permite caracterizá-lo como meio hidrodinâmico livre. E são nestas fácies, quando encontradas em locais onde o relevo pouco inclinado apresenta maiores perspectivas de armazenamento de água, que Guerra Jr. (2005) aponta as maiores potencialidades deste sistema.

Em algumas porções tem-se a presença de nódulos e níveis lateríticos, principalmente ferruginosos. Essa laterização em subsuperfície torna-se perceptível no momento de captação das águas subterrâneas, quando ocorre a oxidação do ferro e formação de uma película de tonalidade rosa a amarelada na superfície da água, popularmente conhecida como “capa rosa”. Sua recarga é oriunda da precipitação pluviométrica, de rios influentes e lagos, e também por infiltração vertical descendente de unidades sedimentares aquíferas sobrepostas (Dunas), que funcionam como meio de transferência (Sabadia, 2001). Seus exutórios naturais são representados por lagos e pela rede de drenagem e os artificiais pelos poços.

6.4 Sistema Aquífero Fissural

Este Sistema abrange aproximadamente 13,8% da área de estudo e corresponde aos litotipos formados por rochas ígneas e metamórficas do embasamento Pré-Cambriano, além dos solos residuais e saprólitos oriundos de tais rochas cristalinas. A formação de aquíferos nesta unidade é feita por meio do acúmulo de água nas zonas de fraturas interconectadas, e segundo Cavalcante (1998), o enquadramento dos terrenos cristalinos como aquíferos depende da existência de estruturas rúpteis, abertas e interconectadas com a zona de recarga. Devido à ausência quase total de porosidade e condutividade hidráulica primárias, em alguns casos este sistema pode ser definido como aquífugo.

Em estudo hidrogeológico para a região Metropolitana de Fortaleza, Cavalcante (1998) caracterizou a vazão média obtida em poços deste sistema em 2,0 m³/h. Os registros do banco de dados do SIAGAS utilizado neste estudo indicam a vazão de 1,1 m³/h. Cavalcante (1997) apresenta a condutividade hidráulica com valores menores que 10⁻⁵ m/s e porosidade menor que 1%. Sua recarga pode ser realizada diretamente das precipitações pluviométricas e das águas de drenagens congruentes às fraturas do embasamento cristalino, bem como por infiltração de aquíferos adjacentes, principalmente do Sistema Aluvionar. Embora sua vocação hidrogeológica não seja significativa, esses aquíferos são bastante explorados por meio de poços tubulares profundos e oferecem maior proteção às suas águas subterrâneas, em comparação aos aquíferos porosos, como o Aquífero Dunas, devido a menor porosidade e maiores profundidades.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Balanço Hídrico

Os resultados obtidos no cálculo do balanço hídrico indicam que apenas 11,8% da média anual de precipitação pluviométrica são infiltrados, isto é, 120,6 mm de recarga eficaz. A ETR é responsável pelo consumo de 78,4% do volume precipitado, sendo que 9,8% deste mesmo volume são armazenados pelo solo, conforme apresentado na Tabela 2 (considerando o CAD de 100 mm).

Tabela 2 – Valores calculados para o balanço hídrico a partir dos dados da Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante, período 1982/2013.

Mês	PPT	T	Correção	Índice	ETP	PPT-ETP	CAD	ETR	Ie
	(mm)	(°C)	Latitude	Térmico	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Jan	99	27.50	1.06	12.90	162	-63	0	99	0
Fev	151	27.40	0.95	12.83	143	8	8	143	0
Mar	250	26.90	1.05	12.48	148	102	100	148	10.3
Abr	245	26.60	1.00	12.27	135	110	100	135	110.3
Mai	124	26.70	1.02	12.34	140	-15	85	124	0
Jun	84	26.60	0.99	12.27	134	-50	35	84	0
Jul	35	26.10	1.02	11.93	128	-94	0	35	0
Ago	5	26.70	1.03	12.34	141	-136	0	5	0
Set	4	26.80	1.00	12.41	139	-135	0	4	0
Out	3	26.90	1.05	12.48	148	-145	0	3	0
Nov	2	27.20	1.03	12.69	151	-149	0	2	0
Dez	17	27.30	1.06	12.76	158	-141	0	17	0
Total	1020	-	-	149.69	1726	-	327	799	120.6
Média	85	27	-	-	144	-	-	67	-

LEGENDA: PPT (precipitação); T (temperatura); ETP (evapotranspiração potencial); ARM (armazenamento mensal de água pelo solo); ETR (evapotranspiração real); DEF (déficit hídrico); Ie (infiltração eficaz).

A representação gráfica do balanço hídrico que demonstra as relações entre a pluviometria, ETP e ETR pode ser observada na Figura 8. Verifica-se que a precipitação pluviométrica é superior a ETR somente nos meses de março e abril, sendo equiparada entre maio e fevereiro. Entre os meses de junho e janeiro, a ETP é superior a ETR, indicando a tendência de evaporação da água precipitada.

O período de reposição hídrica se iniciou em fevereiro, sendo que apenas os meses de março e abril apresentam excedente hídrico e contribuem potencialmente com a recarga das águas subterrâneas dos litotipos de porosidade primária, uma vez que a recarga dos litotipos fraturados depende da disponibilidade e interconexão entre as fraturas.

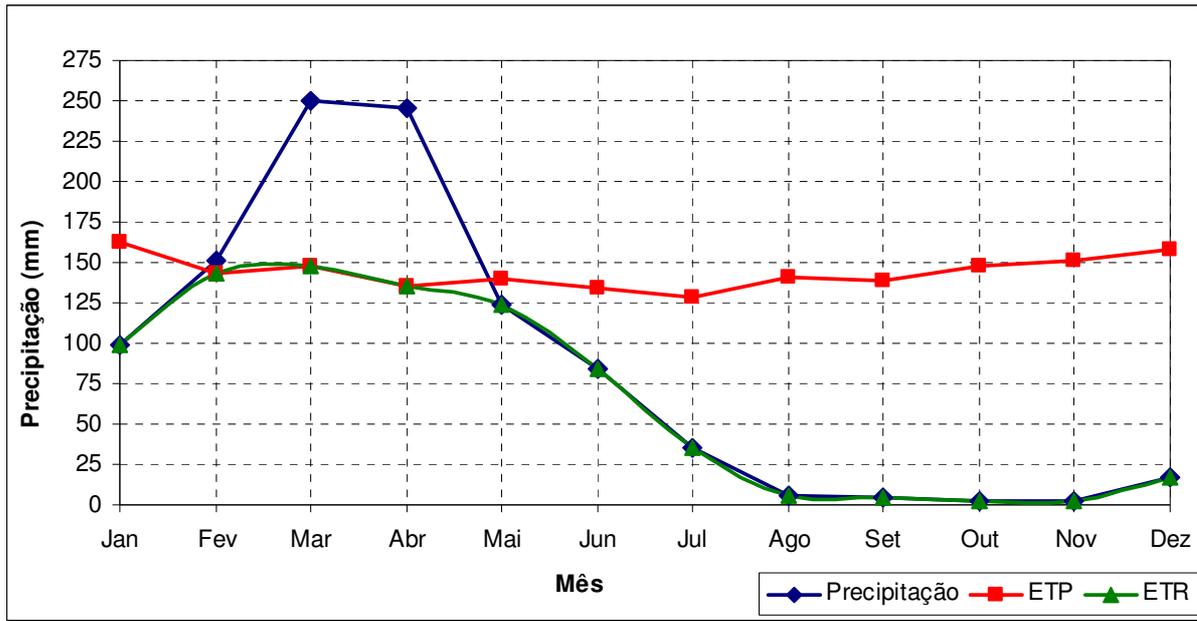


Figura 8. Balanço hídrico para a região estudada com dados da Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante, período: 1982-2013.

Na Figura 9 observa-se que o pico da infiltração ocorre no mês seguinte (abril) ao de maior precipitação pluviométrica (março). Neste período, o volume de precipitação é maior ao volume calculado de ETP. Apesar de abril apresentar a segunda maior média pluviométrica do ano, maio não apresenta volume de infiltração, pois a ETP é superior ao volume médio de precipitação, como apontado na figura anterior.

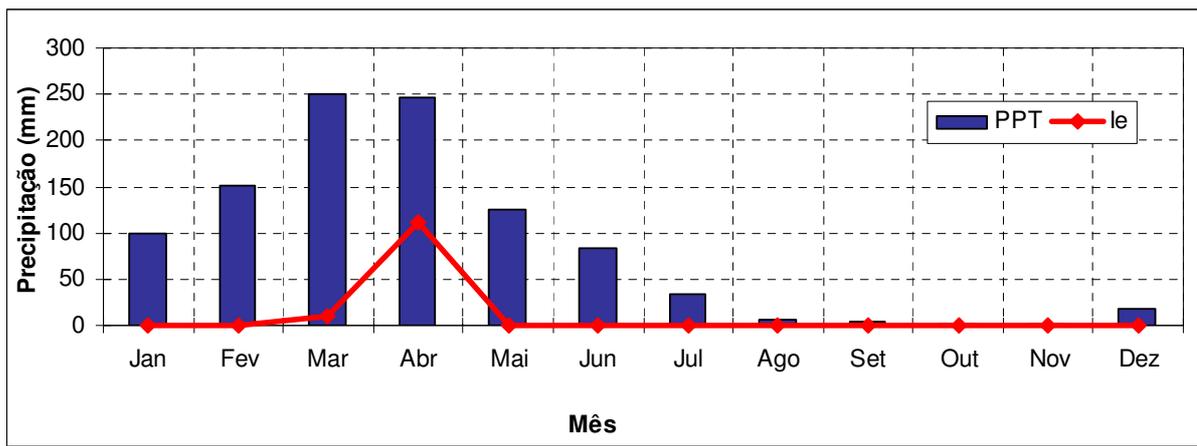


Figura 9. Relação entre as médias pluviométricas e a infiltração eficaz a partir do balanço hídrico de São Gonçalo do Amarante, período: 1982-2013

7.2 Situação Atual das Obras de Captação e Uso das Águas Subterrâneas

A avaliação da situação atual das obras de captação foi realizada a partir de um arquivo de dados composto de 63 poços, formado por 39 poços contidos no Banco de Dados do SIAGAS/CPRM e 24 poços cadastrados em campo. Do total, 35 poços estão alocados no município de Caucaia e 29 estão alocados no município de São Gonçalo do Amarante. Os dados sobre a evolução temporal indicam que aproximadamente 53% dos poços do arquivo de dados (33 poços) foram instalados nos últimos 25 anos, sugerindo a relação entre o crescimento populacional da região e o aumento do número de poços instalados, embora 28 poços não apresentem essa informação (Figura 10).

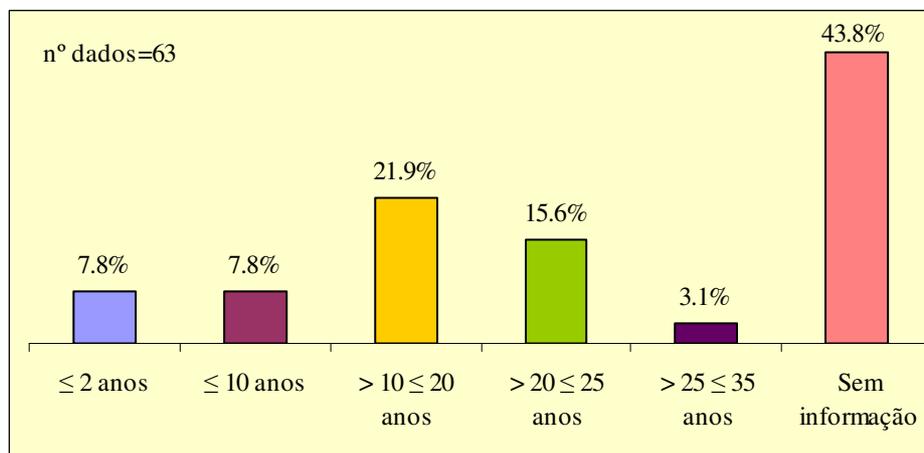


Figura 10. Tempo de construção dos poços dos cadastrados na área de pesquisa

Um número reduzido de poços possui o perfil litológico/construtivo disponível para consulta (apenas três perfis em toda a área), o que dificulta o estudo mais detalhado sobre a litologia do aquífero, espessura das zonas vadosa e saturada e sobre os materiais utilizados na construção dos poços. Como exemplo, a Figura 11 apresenta o perfil esquemático litológico/construtivo de um poço localizado adjacente à área de estudo, baseado nas informações disponíveis no SIAGAS.

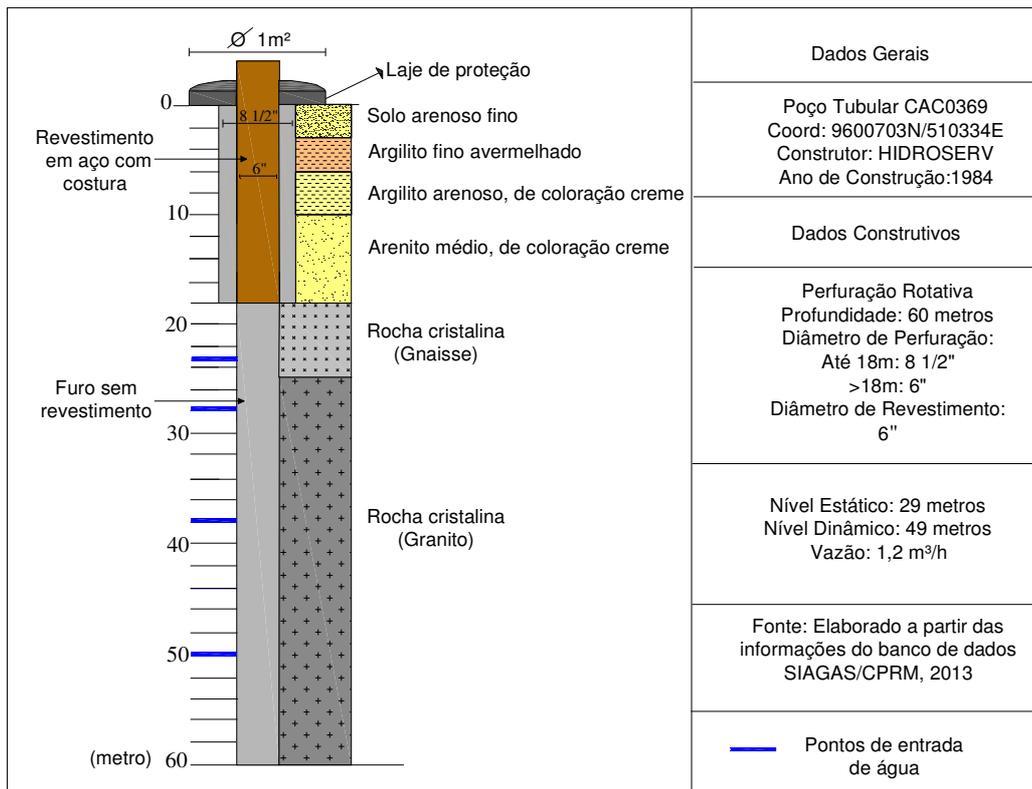


Figura 11. Perfil esquemático litológico/construtivo para um poço alocado adjacente à área de pesquisa (porção sudoeste, próximo a Lagamar do Gereraú), baseado nas informações do SIAGAS.

A respeito das técnicas de construção, 55 poços são do tipo tubular e apresentam revestimento de aço ou de PVC (branco ou geomecânico), sendo que 54,5% dos poços (30) encontram-se no município de Caucaia. Os demais poços (oito) foram construídos de maneira manual, revestidos com anéis de pré-moldado de 1 metro de diâmetro, denominados de cacimbas, à exceção de um poço denominado de amazonas (Figura 12). Neste caso, 62,5% dos poços manuais encontram-se no município de Caucaia.

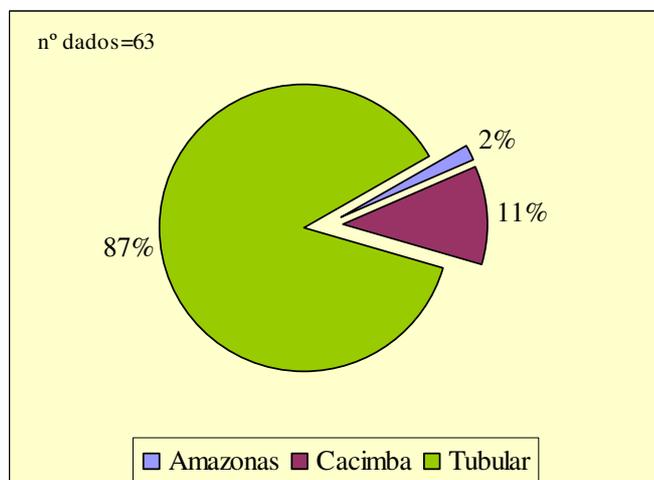


Figura 12. Tipo dos poços cadastrados na área de pesquisa

Quanto ao tipo de sistema de bombeamento, existem informações disponíveis para 61 poços. Deste total, 35 poços estão equipados com bombas elétricas ou manuais, 19 poços não possuem sistema de bombeamento e sete dos poços cadastrados estão tamponados.

Existem informações disponíveis sobre a profundidade de 52 poços. Entre os poços tubulares, a profundidade média é de 21,7 m com valores entre 5 e 80 m. Entre os poços manuais a profundidade média é de 8,8 m, e apresenta valores entre 6 e 12 m. O poço amazonas apresenta 3,7 m de profundidade. Conforme classificação do Decreto Estadual nº. 23.068 de 1994 da Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (CEARÁ, 1994), 64% (40 poços) possuem profundidade menor que 20 m, sendo classificados como rasos; 5% (três poços) são medianamente profundos (profundidade entre 20 e 50 m); e 14% (nove poços) podem ser classificados como poços profundos (profundidade maior que 50 m) (Figura 13). Ressalta-se novamente que grande parte dos poços não possui esta informação disponível.

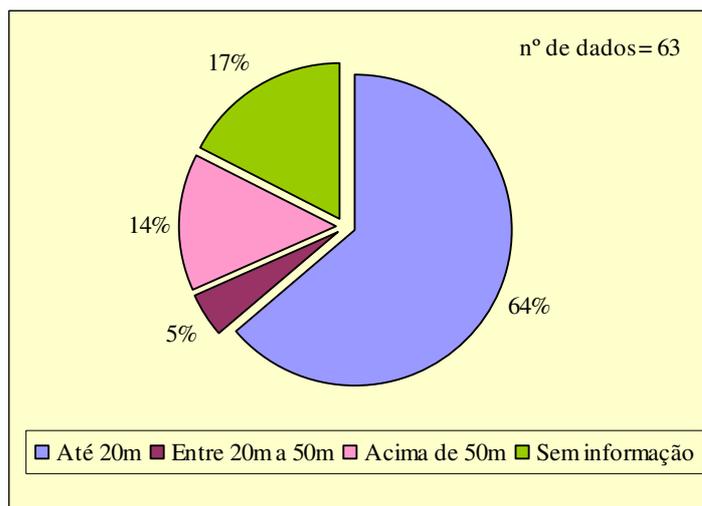


Figura 13. Profundidade dos poços cadastrados na área de pesquisa

No que diz respeito ao uso atual, verifica-se que 70% dos poços são destinados para uso exclusivamente doméstico; 8% possuem uso múltiplo; 8% são destinados à irrigação e 3% são destinados ao uso doméstico/irrigação (Figura 14). A partir da relação entre a instalação dos poços e o uso atual, tem-se que o uso doméstico é realizado por poços tubulares em 86% dos casos, contudo, seis dos sete poços do tipo manual são destinados para este fim. A finalidade de uso múltiplo é realizada somente por poços tubulares, e em 80% dos casos, os poços destinados à irrigação são tubulares.

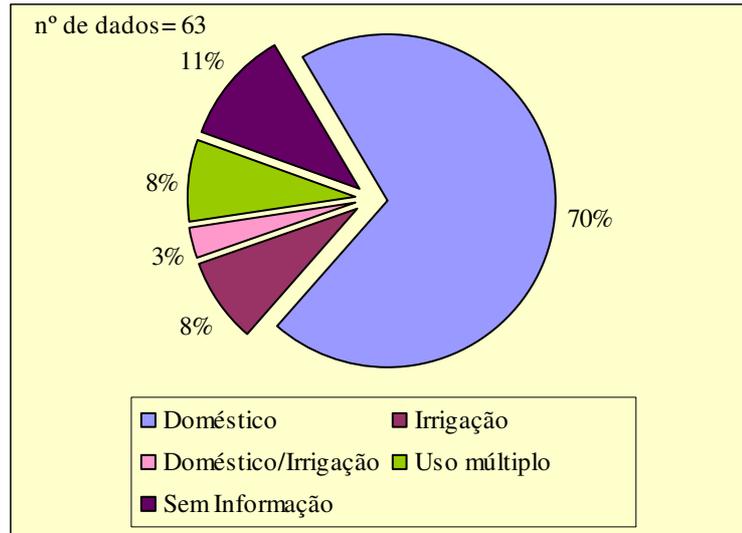
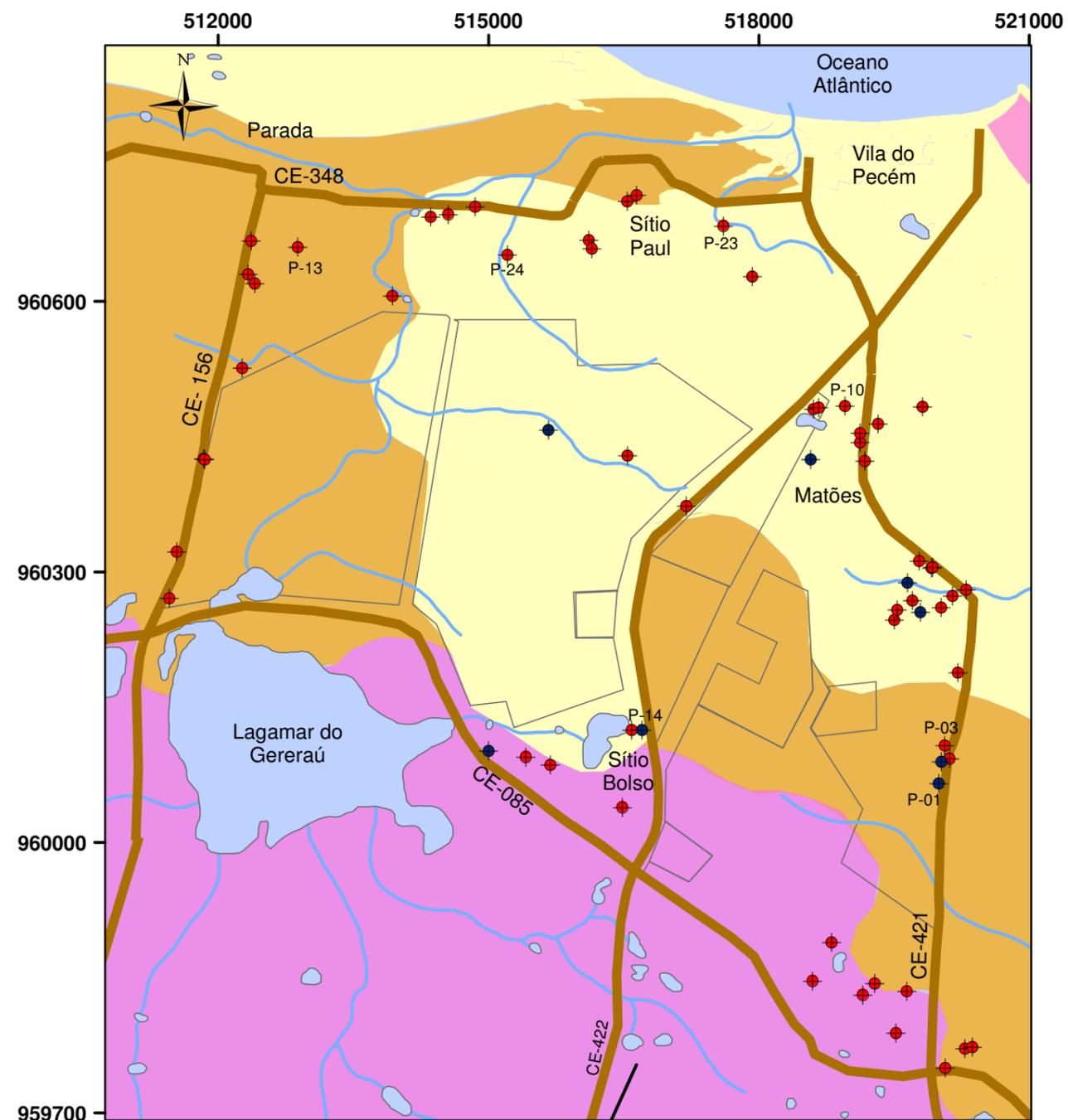


Figura 14. Situação atual de uso dos poços cadastrados na área de pesquisa

Existem apenas cinco medidas de vazão disponíveis no cadastro. Todas as medidas referem-se aos poços instalados no aquífero fissural, com valor médio de 1,1 m³/h, à exceção de um poço que possui vazão de 13,2 m³/h, localizado em Itapara, no município de Caucaia, próximo ao entroncamento das CE-085 e CE-421.

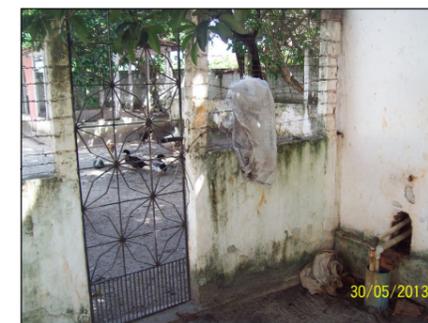
A Figura 15 apresenta a localização dos poços, bem como a distribuição por tipo de construção e revestimento.



P-23. Vista interna (Dez/2013)
Loc: 517608/9606841



P-10. Vista externa (Maio/2013)
Loc: 518955/9604838



P-03. Vista externa (Maio/2013)
Loc: 520062/9601074



P-13. Vista interna (Fev/2013)
Loc: 512881/9606603



P-14. Vista interna (Fev/2013)
Loc: 516705/9601249



P-01. Vista externa (Fev/2013)
Loc: 519996/9600657



P-24. Vista externa (Maio/2013)
Loc: 515209/9606516

Legenda

- Área de Estudo
- Espelho d'água
- Áreas Industriais
- Estradas estaduais
- Poços cacimbas
- Poços tubulares

Aquífero	Descrição
Quaternário	
Dunas (Poroso) Qd	Aquíferos livres formados por areias quartzosas de granulação fina à média, e níveis silte-argilosos. Compreende as unidades Dunas e Paleodunas.
Neógeno	
Barreiras (Poroso) ENb	Aquíferos formados por intercalação de camadas arenosas e silte-argilosas, com ocorrência livre e semi-confinada. Presença de hidróxido de ferro em suas águas
Paleoproterozóico	
Fissural (Fraturado) PPci	Aquíferos formados pelo acúmulo de água em zonas de fraturas interconectadas em litotipos ígneos e metamórficos.



Universidade Federal do Ceará
Centro de Ciências - Departamento de Geologia
Programa de Pós-Graduação em Geologia
Dissertação de Mestrado

Título: Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na Porção Norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará

Figura 15: Localização dos poços na área de estudo

Datum Horizontal: South American 69,
Projeção Universal Transversa de Mercator,
Zona 24 S, Meridiano Central 39° W

Fonte: Baseado no Mapa Geológico do Estado do Ceará (CPRM, 2003) e neste trabalho

Autora: Pâmella Moura

Orientador: José A. B. Sabadia

Local: Fortaleza/CE

Data: Agosto, 2014

7.3 Nível Estático e Recarga

O monitoramento periódico do nível estático foi iniciado com a leitura da medida em 23 poços (sete manuais e 16 tubulares) ao longo de 2013; contudo a coleta de dados em todas as etapas do monitoramento foi possível em apenas 18 poços, com total de 88 registros. As medidas coletadas indicam a profundidade média de 5,17 m para a região, com níveis mais profundos em fevereiro e dezembro. Maio foi o mês que apresentou o maior número de poços com nível estático mais raso, com média de 4,84 m, e dezembro apresentou os valores mais profundos, com média de 5,59 m, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Medidas periódicas da profundidade do nível estático no ano de 2013 (valores em metros)

Poço	Prof. do poço (m)	Cota (m)	Estação Chuvosa		Estação Seca		Média por poço	Variação do NE
			Fevereiro	Maió	Setembro	Dezembro		
P-01	-	30,0	8,30	8,50	8,40	9,30	8,63	1,00
P-02	12,0	35,0	9,93	10,05	-	10,63	10,20	0,70
P-03	60,0	30,0	7,43	6,83	6,86	7,65	7,19	0,82
P-05	-	25,0	5,20	6,18	6,45	6,60	6,11	1,40
P-06	6,0	20,0	2,17	2,1	2,21	2,45	2,23	0,35
P-07	10,0	20,0	1,58	1,12	1,39	1,75	1,46	0,63
P-08	6,0	25,0	2,26	1,90	2,10	-	2,09	0,36
P-09	-	25,0	9,00	6,52	5,80	-	7,11	3,20
P-10	12,0	25,0	5,42	8,44	5,75	6,3	6,48	3,02
P-11	12,0	10,0	4,64	3,97	-	-	4,31	0,67
P-12	10,0	10,0	1,7	0,93	1,1	1,37	1,28	0,77
P-13	6,0	15,0	5,27	4,80	4,60	7,30	5,49	2,70
P-14	9,0	30,0	2,14	1,50	1,80	2,37	1,95	0,87
P-16	-	30,0	5,52	5,00	5,50	6,17	5,55	1,17
P-17	-	25,0	6,65	3,00	3,77	6,69	5,03	3,69
P-18	-	20,0	3,80	2,70	-	3,58	3,36	1,10
P-19	7,0	25,0	4,35	3,56	3,90	4,70	4,13	1,14
P-20	7,0	20,0	5,27	4,70	4,65	5,30	4,98	0,65
P-21	9,0	35,0	7,51	8,29	7,18	8,00	7,75	1,11
P-22	9,0	25,0	12,74	12,60	12,75	13,12	12,80	0,52
P-23	8,0	10,0	4,00	3,70	4,75	4,70	4,29	1,05
P-24	12,0	10,0	3,76	3,4	3,55	3,70	3,60	0,36
P-25	16,0	10,0	3,24	2,46	2,5	3,08	2,82	0,78
Média * -			5,13	4,84	4,84	5,59	5,10	1,22

* As médias foram calculadas apenas para poços que possuíam medidas nas quatro etapas de monitoramento (18 poços)

De modo geral, os dados indicam a elevação da coluna d'água nos meses de maio e setembro e posterior rebaixamento em dezembro para um nível estático médio próximo ao medido em fevereiro. Na comparação por período, entre fevereiro e maio 78% dos poços

apresentaram elevação da coluna d'água, com valor médio de 0,82 m; enquanto de setembro para dezembro, 73% dos poços apresentaram rebaixamento, com valor médio de 0,79 m.

Os poços alocados em área de exposição do Aquífero Dunas apresentaram nível estático médio de 3,35 m para os poços manuais, com variação média de 0,50 m; e nível estático médio de 5,34 m para os poços tubulares, com uma variação média de 0,40 m. Os poços que apresentaram a menor variação (P-06 e P-24) estão alocados próximos a pequenas drenagens, o que sugere a influência de águas superficiais na recarga durante o período de estiagem. O poço P-06 encontra-se à beira do Córrego dos Matões e o poço P-24 encontra-se muito próximo ao canal do Sítio Paul. Um dos poços que apresentou a maior variação (P-25) localiza-se muito próximo a uma empresa de exploração de água mineral, o que pode ter influenciado o rebaixamento dos níveis estáticos na região próxima a área de captação. (Figuras 16 e 17)

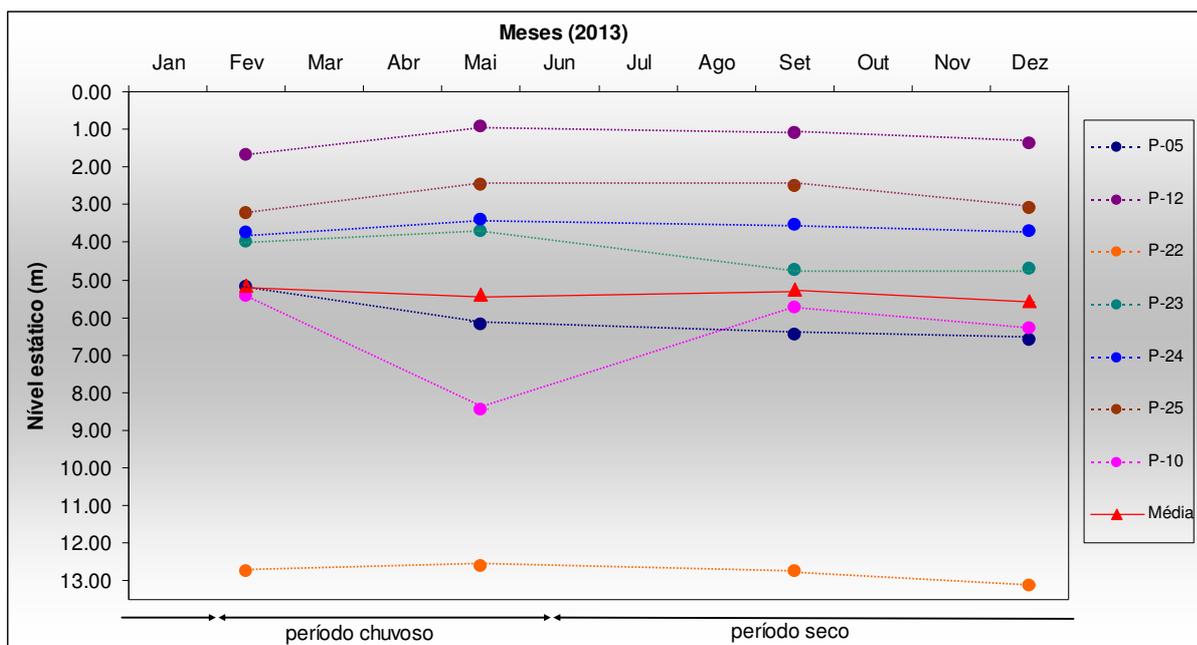


Figura 16. Variação periódica da profundidade do nível estático nos poços tubulares alocados em área de exposição do aquífero Dunas. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

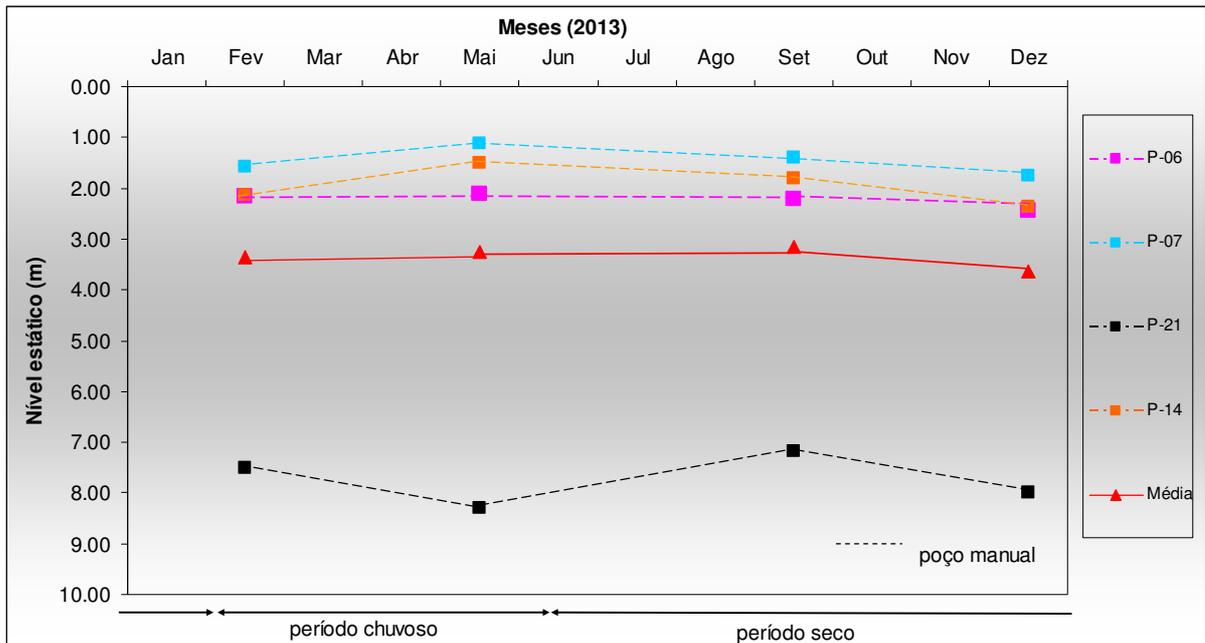


Figura 17. Variação periódica da profundidade do nível estático nos poços manuais alocados em área de exposição do aquífero Dunas. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

Na área de exposição do Aquífero Barreiras, o nível estático dos poços apresentou-se mais profundo na comparação com os poços do Aquífero Dunas. A média durante o ano foi de 6,08 m, considerando-se os poços tubulares e manuais, com variação média de 1,17 m (Figura 18).

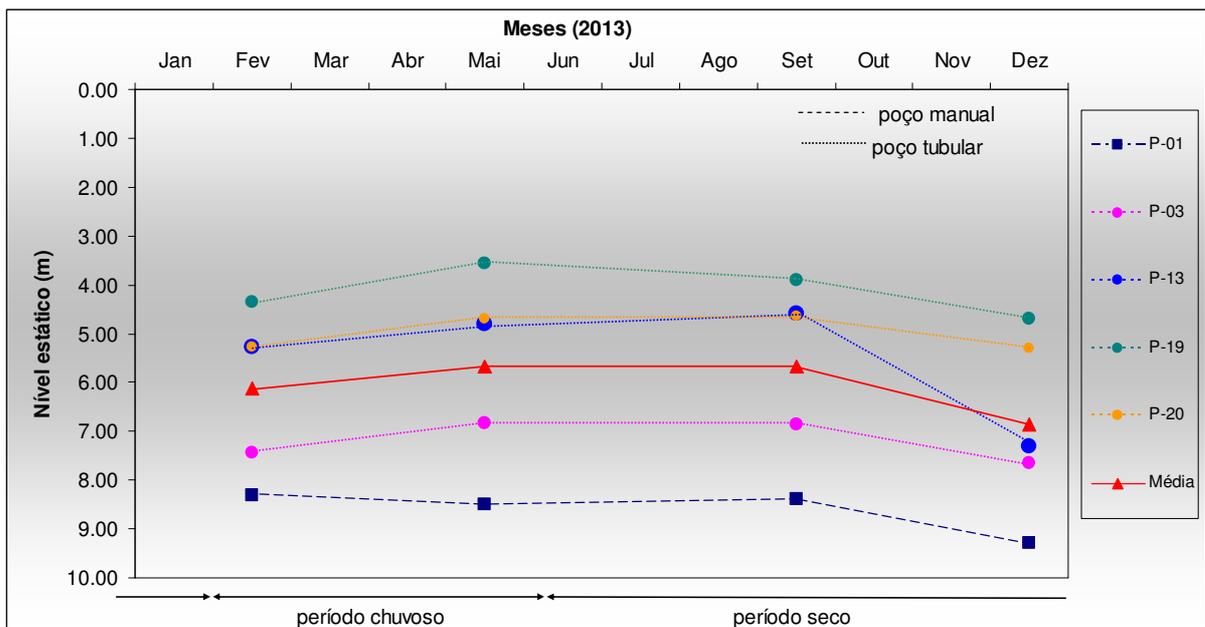


Figura 18. Variação periódica da profundidade do nível estático nos poços alocados em área de exposição do aquífero Barreiras. A linha de curva média considera os poços tubulares e manuais. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

A maior variação foi observada no P-13 que apresentou rebaixamento de 2,70 m na coluna d'água de setembro para dezembro, e a menor variação foi observada no P-20, com apenas 0,65 m. No caso do P-13, não foram observados fatores ambientais que justificassem tal variação acima da média, o que pode ser explicado por um possível aumento nas taxas de extração de água por bombeamento.

Na área de exposição do Aquífero Fissural o nível estático apresentou média de 5,29 m, com uma variação média de 2,43 m. Ali, o poço manual P-17 aparece com a maior variação do nível estático observada em toda a área de estudo, de 3,69 m. (Figura 19). Esse comportamento também foi registrado na região por Cunha (2009), principalmente na interface entre o Aquífero Fissural e o Aquífero Barreiras.

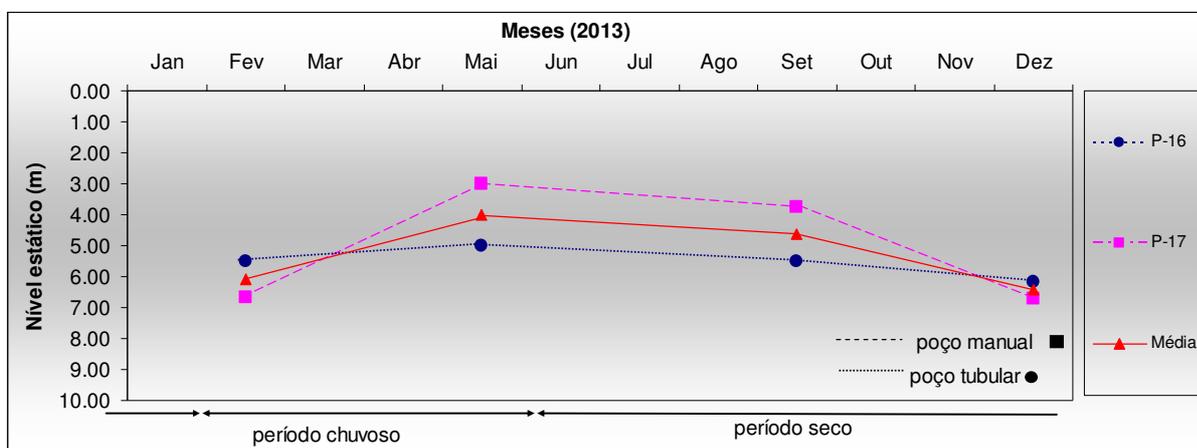


Figura 19. Variação periódica da profundidade do nível estático nos poços alocados em área de exposição do aquífero Fissural. A linha de curva média considera os poços tubulares e manuais. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento.

O comportamento apresentado em todos os casos sugere a interferência direta das águas pluviais na dinâmica do nível estático da região, onde a quadra chuvosa é responsável pela recarga desses níveis freáticos, como apontado pelo balanço hídrico. No mês de abril ocorre o pico de infiltração das águas pluviais, que elevam o nível estático. Essa recarga é suficiente para manter o patamar do nível estático até meados de setembro, onde já no período de estiagem sua profundidade começa a aumentar, atingindo em dezembro valores parecidos com os medidos em fevereiro.

A Figura 20 apresenta o zoneamento tendencial do nível estático por meio de sua distribuição espacial para cada período monitorado ao longo do ano, que reflete espacialmente o comportamento sazonal apresentado. Na área central, verifica-se o avanço das isolinhas de 3,0 e 4,0 m de fevereiro para maio e o posterior recuo das mesmas isolinhas de setembro para dezembro, de acordo com os valores médios apresentados e o comportamento sazonal.

apontado nas figuras 16, 17, 18 e 19. A variação das isolinhas a sudoeste da área, próximo a CE-085, reflete a variação do nível estático do Aquífero Fissural, que se mostrou como a mais expressiva da região. Já no setor nordeste, a variação das isolinhas sofre influência, principalmente, da variação no nível estático apresentada pelo poço P-10.

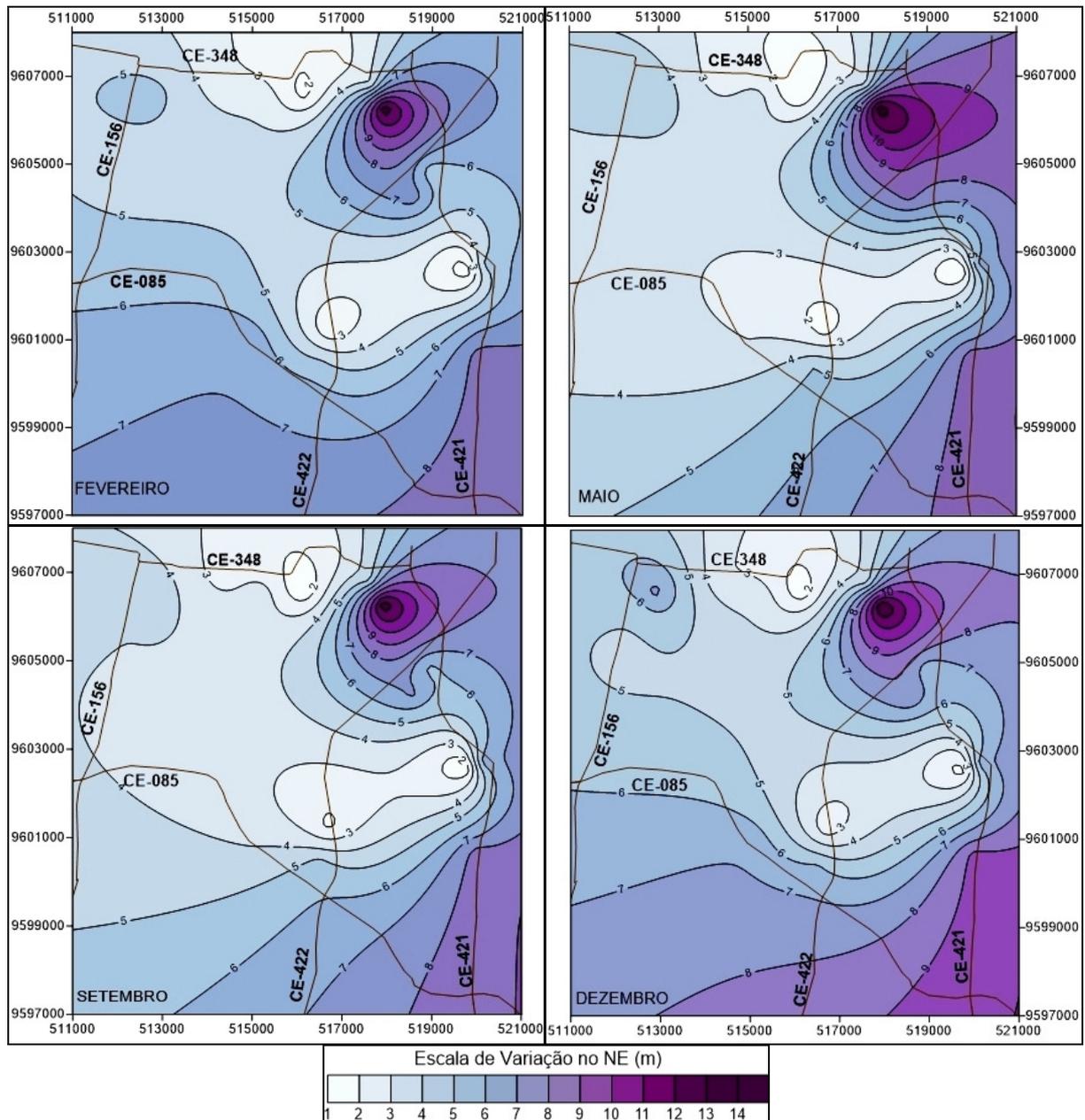


Figura 20. Zoneamento tendencial do nível estático dos poços monitorados na área de estudo no ano de 2013

A estimativa das recargas, a partir da variação do nível estático em 23 poços, resultou o valor médio de 122 mm, muito próximo ao valor estimado pelo balanço hídrico para a região (120.6 mm). Os resultados apontam recarga média para o Aquífero Dunas de 144 mm, com alguns valores pontuais da ordem de 200 a 400 mm. Para o Aquífero Barreiras,

a recarga média se apresentou com 110 mm com apenas um único ponto acima de 200 mm e para o Aquífero Fissural, as estimativas indicam apenas 24 mm. (Tabela 4).

Tabela 4 – Recargas estimadas por unidade aquífera no ano de 2013

Sistema Aquífero	n°. de Poços	Porosidade (%)	Variação do NE (m)			Recarga (mm)		
			Média	Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima
Dunas	13	13%	1,11	0,35	3,20	144	46	416
Barreiras	8	10%	1,10	0,65	2,70	110	65	270
Fissural	2	1%	2,43	1,17	3,69	24	12	37

* Estimativas realizadas a partir das medidas de nível estático em 23 poços

A Figura 21 apresenta o zoneamento dos valores de recarga calculados para a área. Como apresentado na tabela anterior, os maiores intervalos de recarga correspondem às porções do Aquífero Dunas (acima de 200 mm), com predomínio do intervalo entre 50 e 100 mm. O mesmo intervalo é predominante em áreas do Aquífero Barreiras, enquanto os menores valores encontram-se na região do Aquífero Fissural.

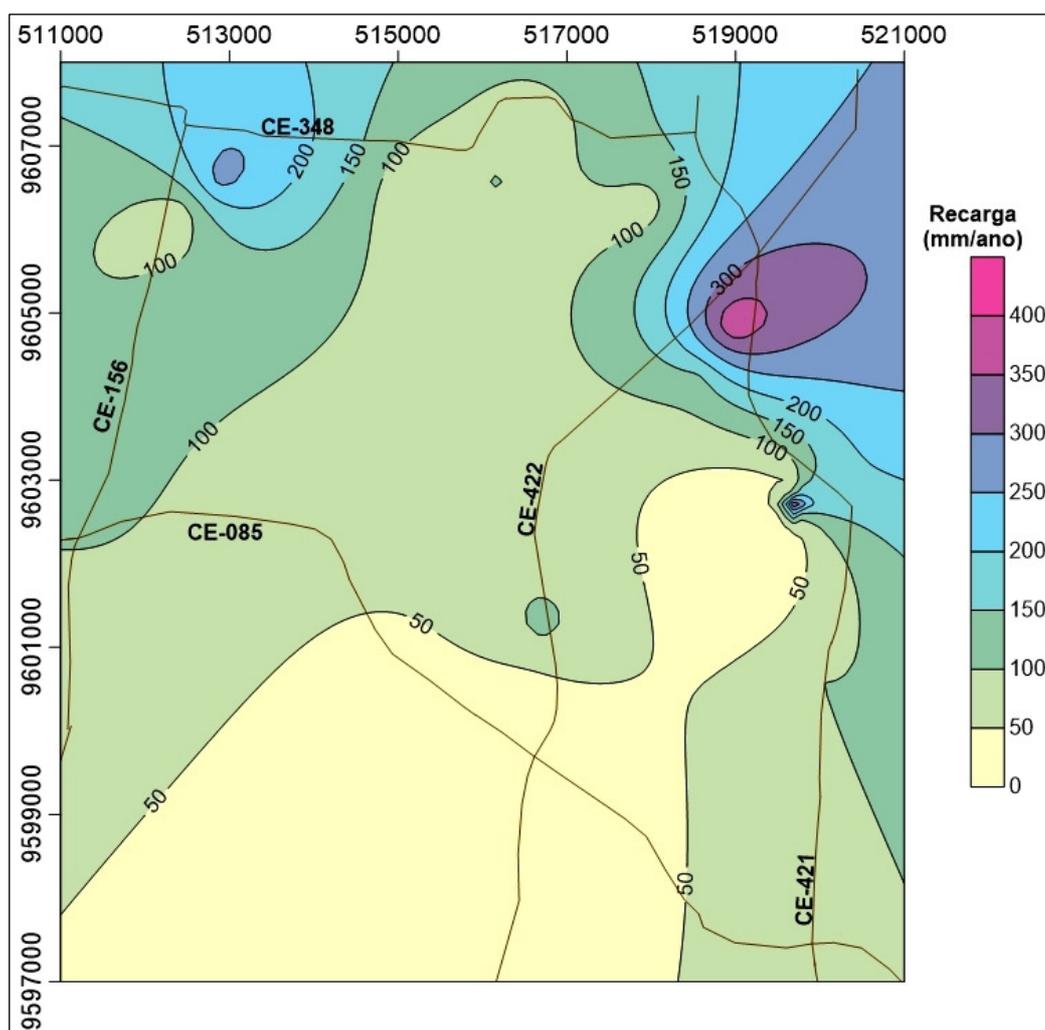
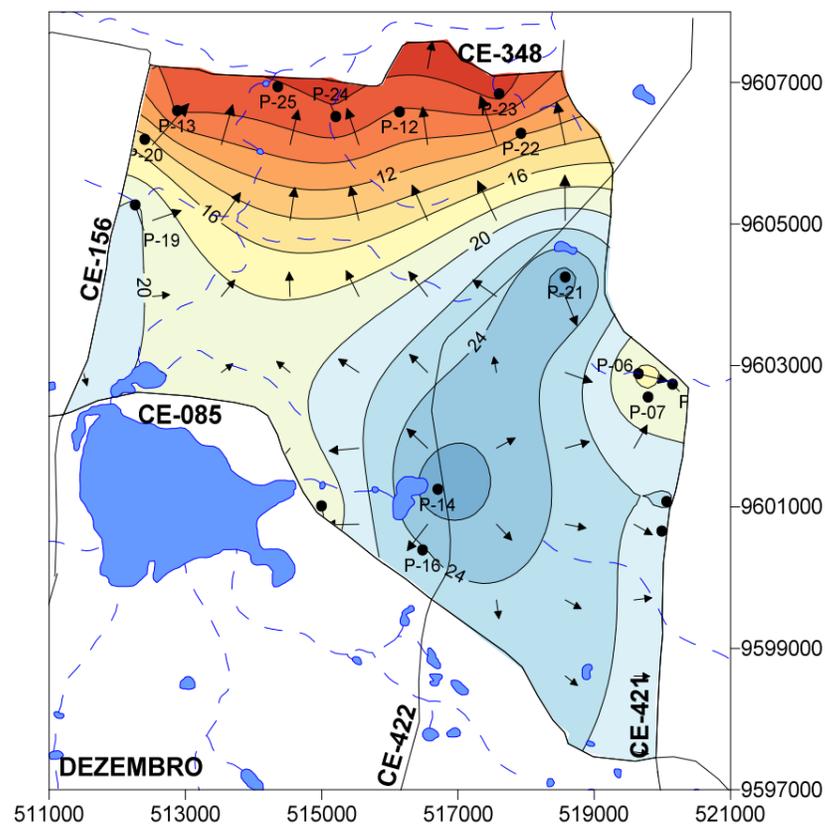
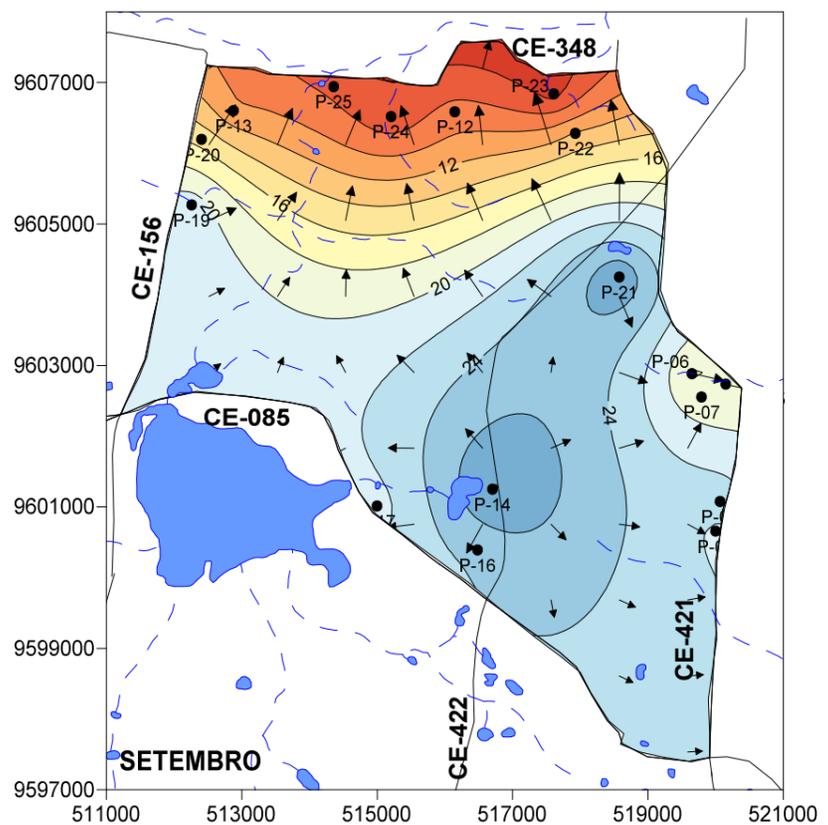
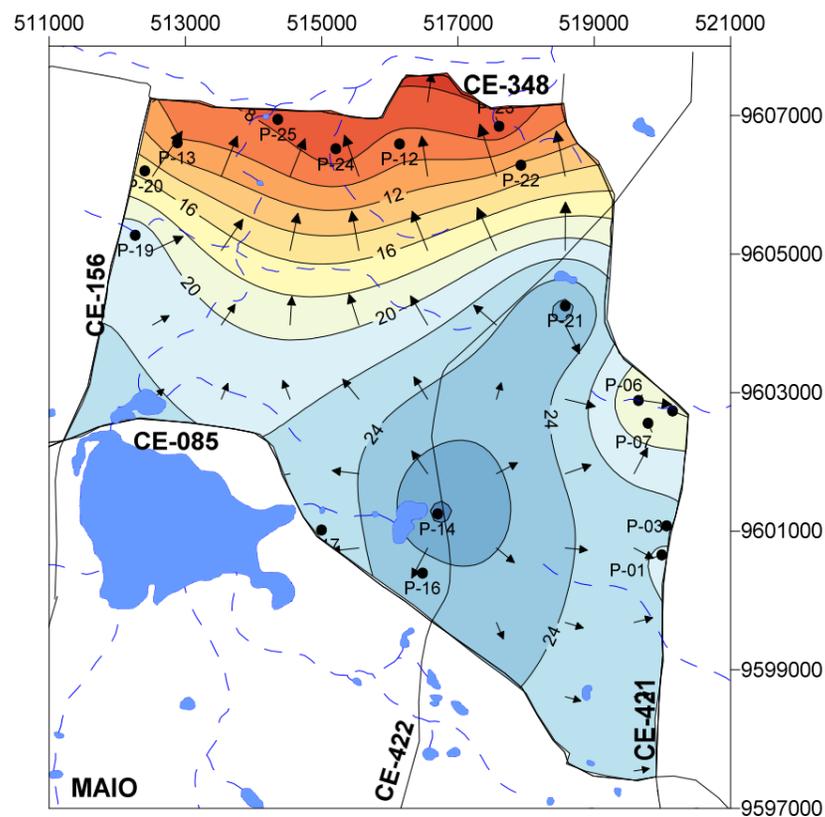
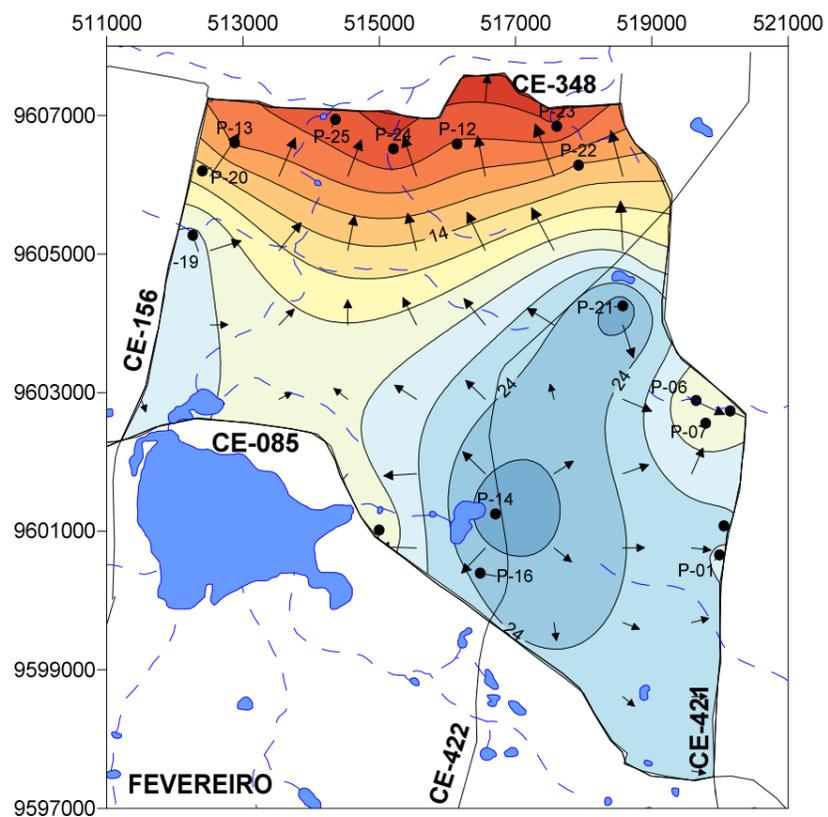


Figura 21. Mapa das isolinhas da recarga para o ano de 2013 calculada para a região de estudo

7.4 Mapeamento da Superfície Potenciométrica e Declividade do Terreno

Os resultados do mapeamento da superfície potenciométrica indicam que a direção preferencial do fluxo das águas subterrâneas locais apresenta três padrões principais: na porção norte o fluxo preferencial converge de sul para norte, sentido ao mar; na porção centro-oeste o fluxo converge localmente, com padrão quase circular, convergindo para o Lagamar do Gereraú; e na porção centro-leste o fluxo apresenta sentido leste, sugerindo convergência para o Lagamar do Cauípe. Nota-se nessa região a presença de um divisor de águas, nas isolinhas de 24 e 26 metros, concordando com um alto topográfico formado pelas dunas. Este divisor de águas, onde o sentido o fluxo torna-se divergente, é observado pela presença de áreas com declividade intermediária e alta apresentadas na Figura 22.

Quanto à variação periódica, o fluxo não apresentou mudanças significativas ao longo de 2013, com a principal variação relacionada ao avanço e recuo sentido litoral da isolinha de 20 metros, que reflete diretamente a variação do nível estático do P-17 ao longo do ano, conforme apresentado na Figura 22.



Legenda

- Poços monitorados em 2013
- - - Drenagem
- Espelhos d'água

Magnitude dos Vetores

Fevereiro		Maio	
→	→	→	→
6.17E-005	0.00961	3.89E-005	0.0094
Setembro		Dezembro	
→	→	→	→
3.29E-005	0.0108	3.35E-005	0.0112



Escala Gráfica



Universidade Federal do Ceará
 Centro de Ciências - Departamento de Geologia
 Programa de Pós-Graduação em Geologia
 Dissertação de Mestrado

Título: Vulnerabilidade de Aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na porção norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará

Figura 22: Variação periódica do fluxo da água subterrânea no ano de 2013

Datum Horizontal: South American 69
 Projeção Transversa de Mercator
 Zona 24 S
 Meridiano Central 39°W

Fonte: IPECE (2009) e neste trabalho

Autora: Pâmella Moura

Orientador: José A. B. Sabadia

Local: Fortaleza

Data: Agosto, 2014

Os resultados obtidos pelo modelo de declividade apontam para o predomínio de áreas planas, com declividades no intervalo entre 0 e 2%. As áreas de declividade intermediária, com intervalos entre 2 e 6% concentram-se na porção leste da área: a nordeste, ocorrem associadas ao campo de dunas; e a sudeste, ocorrem junto às porções do afloramento do embasamento cristalino. As áreas de topografia mais elevada, com intervalos entre 6 e 12% ocorrem pontualmente na porção nordeste da área, também associada ao campo de dunas. As áreas de menor porcentagem de declividade apresentam-se potencialmente mais sensíveis a possíveis contaminações, pois possuem maior potencial de infiltração (Figura 23).

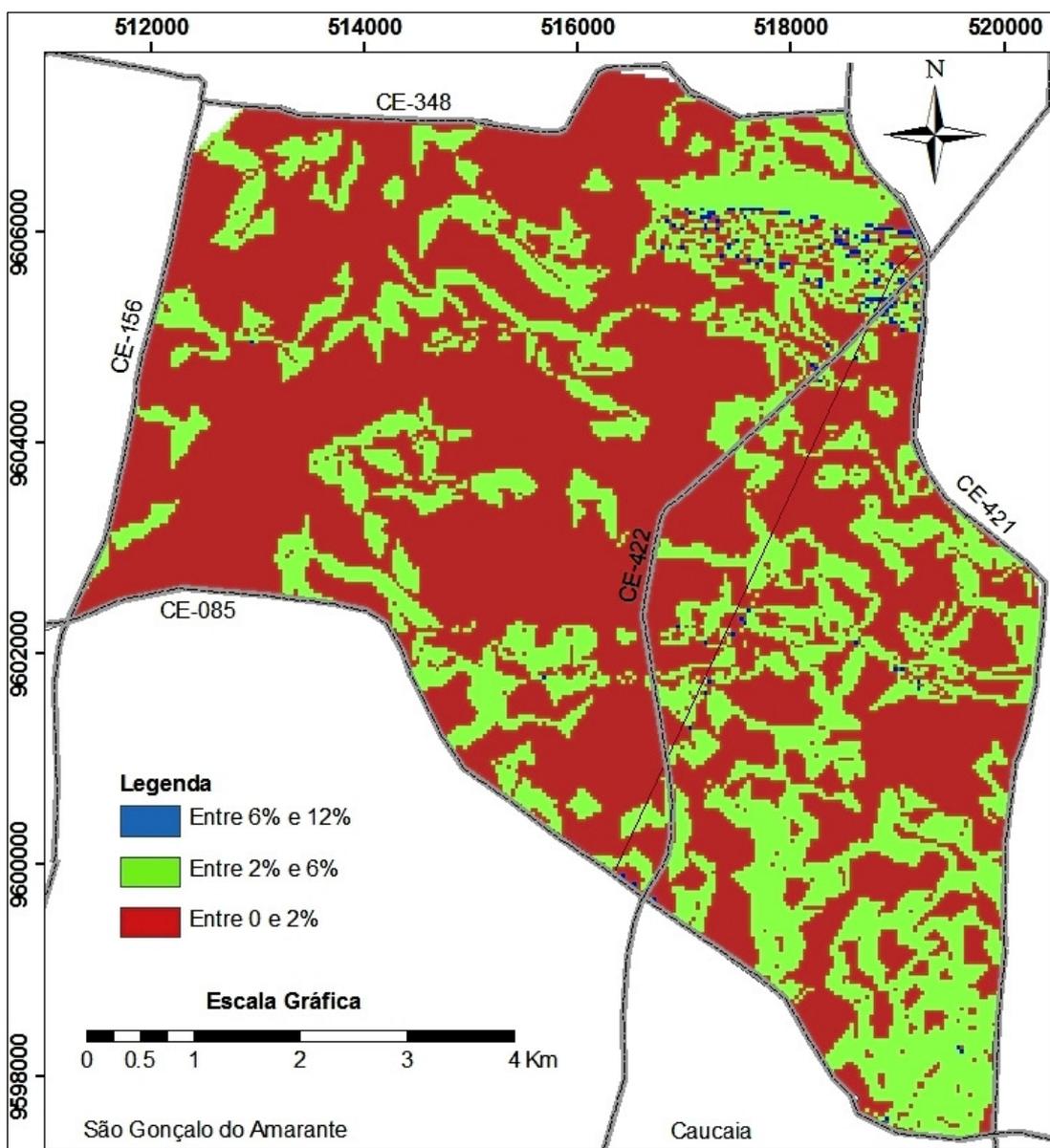


Figura 23. Mapa das relações de declividade

7.5 Características Físico-Químicas das Águas Subterrâneas

Ao longo do ano de 2013 foram realizadas 87 medições de cada parâmetro físico-químico, distribuídas em 24 poços; contudo, em apenas 17 poços (11 tubulares e 6 manuais) foi possível realizar a medida dos parâmetros em todas as etapas de campo. Durante a avaliação organoléptica os poços P-7, P-9, P-10, P-12 (dezembro) e P-14 (setembro) apresentaram águas de coloração amarelada em uma ou mais etapas, e os poços P-6, P-8, P-12, P-14 (dezembro), P-17, P-21, P-23 e P-24 apresentaram águas esbranquiçadas em uma ou mais etapas, porém a grande maioria apresentou águas incolores em todas as etapas de monitoramento. Os poços P-1, P-2, P-7, P-11, P-9, P-10, P-12, P-13, P-14, P-19, P-20, P-23 e P-24 apresentaram águas com cheiro ácido e sulfuroso, que pode estar associado à decomposição de matéria-orgânica, em pelo menos uma das etapas de monitoramento. Os poços P-4, P-6, P-8, P-9, P-10, P-12, P-14, P-16, P-18, P-20, P-21, P-22 e P-25 apresentaram cheiro ferroso, sendo que nos poços P-6, P-7, P-9, P-19, P-20 e P-24 detectou-se a presença de uma lâmina de impurezas suspensa na água, oriunda da oxidação do ferro, conhecida popularmente como “capa rosa”, em pelo menos uma das etapas de monitoramento. A partir das medições realizadas, verificou-se que a temperatura média da água subterrânea da área de estudo é de 29,3°C. As maiores temperaturas foram medidas em fevereiro, com média de 29,5° e as menores em setembro, com média de 29°C.

7.5.1 pH

As águas subterrâneas da área de estudo podem ser caracterizadas como ácidas, dado que 90% (78 leituras) das medidas realizadas em campo apresentaram pH entre 6,9 e 4,7. Somente 10% (9 leituras) das medidas de campo apresentaram caráter alcalino, com valor máximo de 9,3. Em comparação com os padrões de potabilidade da Portaria nº. 2914 de 2011 do Ministério da Saúde, 41,7% dos poços (10 poços) apresentaram pH médio fora da faixa recomendada (entre 6 e 9,5).

De modo geral as águas subterrâneas apresentam-se levemente mais ácidas na estação seca, com valor mínimo de pH de 4,7 medido no poço P-16; na estação chuvosa o pH mínimo foi de 5,1, medido no poço P-19. Os resultados apontam um aumento da acidez de fevereiro para maio, com variação do valor médio de 6,6 para 6,0. Entre maio e dezembro o valor médio de pH apresenta-se quase estável, com um pequeno aumento da acidez em dezembro. Os valores de pH medidos *in situ* podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de pH medidos *in situ* durante as quatro etapas de monitoramento

Poço	Estação Chuvosa		Estação Seca		Média por poço
	Fevereiro	Maió	Setembro	Dezembro	
P-01	6,1	5,7	6,7	5,2	5,9
P-02	5,8	5,5	-	5,8	5,7
P-03	6,8	5,9	7,5	6,0	6,6
P-04	6,3	5,7	-	-	6,0
P-05	6,0	6,9	6,8	5,9	6,4
P-06	6,9	5,8	6,1	5,9	6,2
P-07	7,2	6,9	7,1	7,1	7,1
P-08	6,0	5,8	6,2	-	6,0
P-09	6,4	6,0	6,3	-	6,2
P-10	6,1	5,9	6,2	6,1	6,1
P-11	5,6	6,5	-	-	6,1
P-12	6,8	7,1	6,9	6,0	6,7
P-13	5,7	5,2	5,3	5,3	5,4
P-14	5,6	5,5	5,4	5,2	5,4
P-16	5,4	5,5	4,9	4,7	5,1
P-17	9,3	6,0	5,9	7,8	7,3
P-18	6,6	5,3	-	5,4	5,8
P-19	6,7	5,1	5,3	5,1	5,6
P-20	5,7	5,4	5,5	5,4	5,5
P-21	6,9	5,8	6,3	6,0	6,3
P-22	7,9	6,7	6,0	7,5	7,0
P-23	6,6	6,4	6,1	6,0	6,3
P-24	5,7	5,7	5,5	-	5,6
P-25	6,3	5,4	6,6	5,0	5,8
Média mensal*	6,6	6,0	6,1	5,9	6,1

* As médias foram calculadas apenas para poços que possuíam medidas nas quatro etapas de monitoramento (17 poços). Em negrito, o valor mínimo e máximo medido em cada mês.

A acidez observada nos dados de campo pode estar correlacionada ao predomínio de águas pluviais na recarga dos aquíferos da área, que aumenta a quantidade de matéria orgânica e dióxido de carbono (CO₂) dissolvido, e conseqüentemente diminui o pH. Gomes (2013) corrobora neste aspecto, ao atentar que águas subterrâneas com valores de pH na faixa de 5 e 6 são águas recentes, provavelmente, oriundas da infiltração das chuvas. No Aquífero Barreiras a acidez também pode sofrer influência das lentes argilosas presentes no aquífero. No Aquífero Fissural o pH é menos ácido, porém o aporte de íons salinos, comum neste tipo de aquífero, não se apresenta suficiente para aumentar o pH das águas subterrâneas analisadas.

A Figura 24 apresenta a variação espacial tendencial do pH, onde se observa uma tendência sazonal, com predomínio de áreas com intervalos entre 4 e 6 em maio e dezembro (50% e 49%, respectivamente), predomínio de áreas com intervalo entre 6 e 7 em setembro (44%), e predomínio de zonas de alcalinidade, com intervalo entre 7 e 8 em fevereiro (51%). Zonas de acidez (intervalo de pH entre 4 e 6) ocorrem principalmente nos setores oeste e sul,

associados aos terrenos de exposição dos Aquíferos Barreiras. Nos setores leste e norte, zonas de pH com intervalo entre 6 e 7 apresentam-se mais estáveis, e correspondem, em maior parte, as áreas de exposição do Aquífero Dunas. Essa variação reflete a amplitude das leituras de pH em cada um dos aquíferos, uma vez que as médias periódicas das medidas do Aquífero Dunas apresentam-se mais estáveis ao longo do ano, em comparação com os demais aquíferos da área.

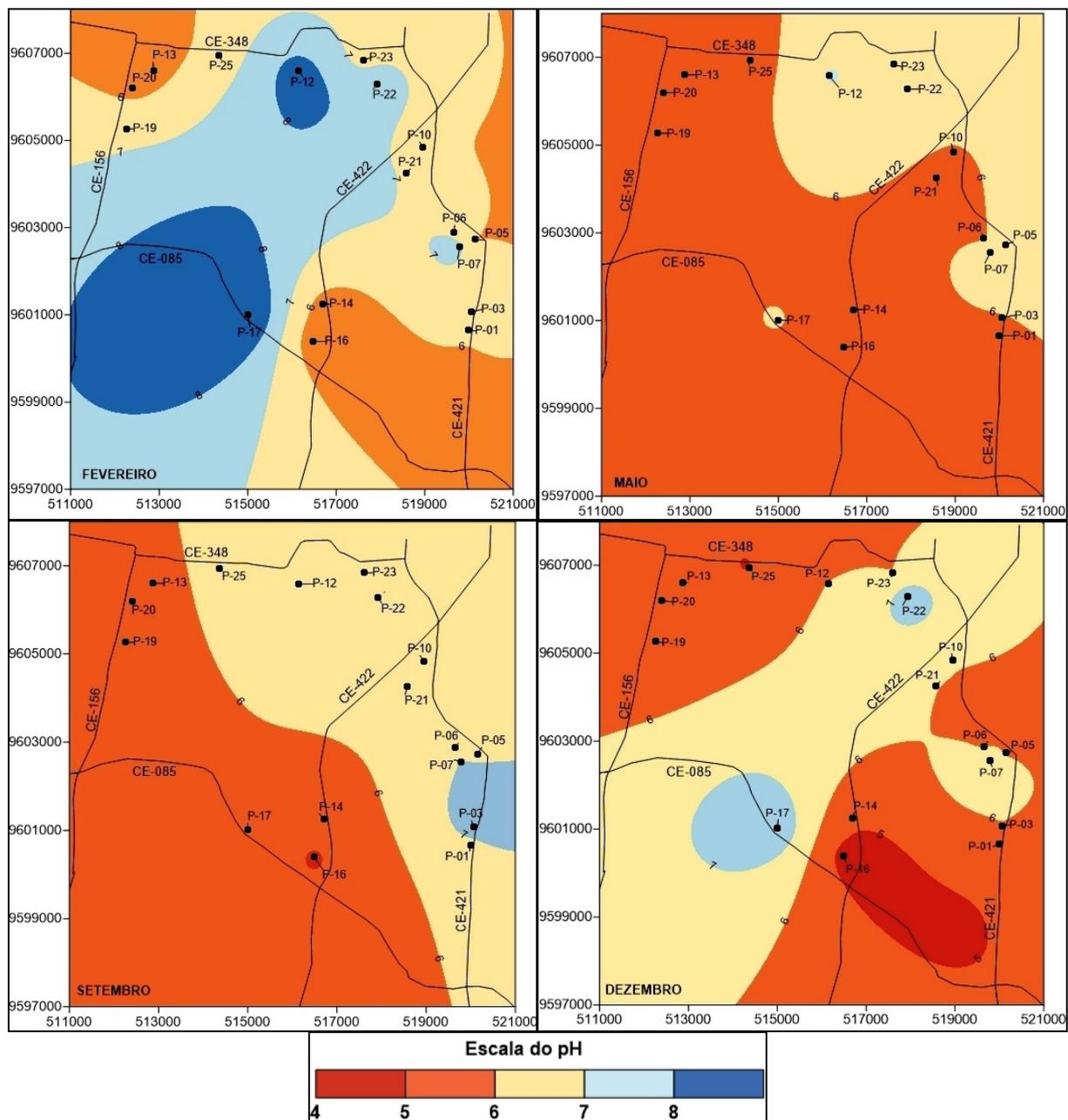


Figura 24. Variação espacial tendencial do pH nas águas subterrâneas da área de estudo no ano de 2013

As águas subterrâneas dos poços alocados na área de exposição do Aquífero Dunas apresentam-se ligeiramente ácidas, com pH médio de 6,3. As Figuras 25 e 26 demonstram maior variação e amplitude do pH entre os poços tubulares em comparação com os poços manuais, que por serem mais rasos, se encontram mais susceptíveis às águas das chuvas e aos ácidos orgânicos do solo.

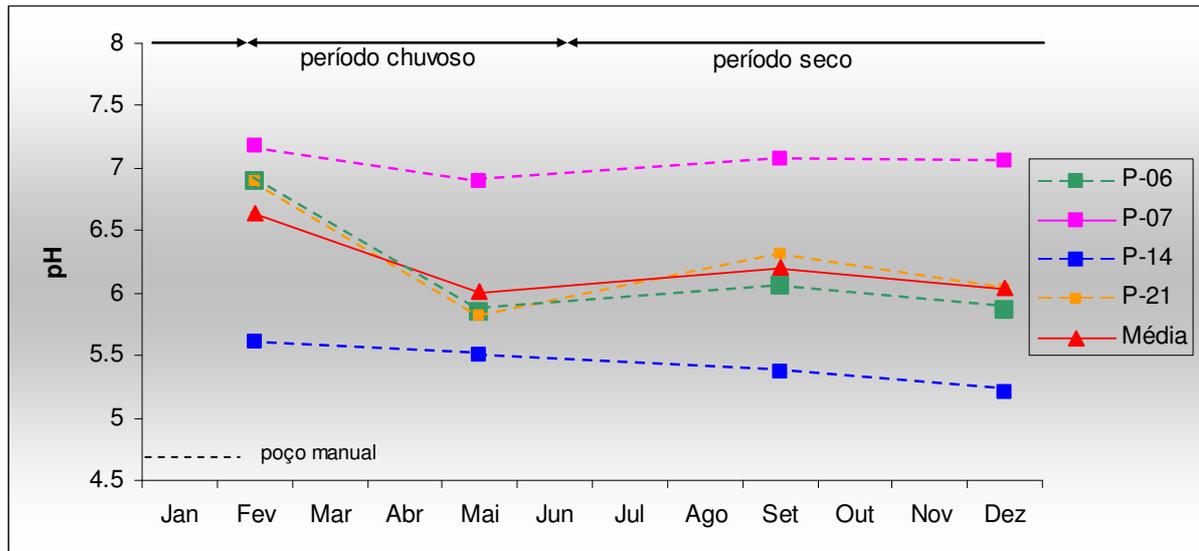


Figura 25. Variação periódica do pH medido nos poços manuais alocados em área de exposição do Aquífero Dunas. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

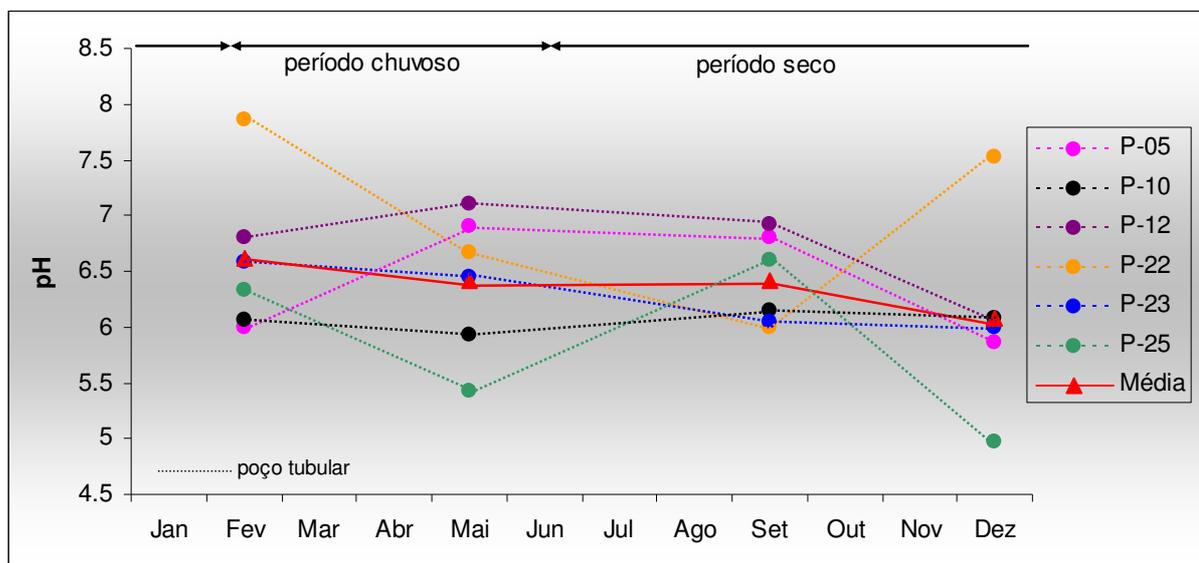


Figura 26. Variação periódica do pH medido nos poços tubulares alocados em área de exposição do Aquífero Dunas. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

Entre os poços tubulares, os poços P-22 e P-25 apresentam as variações mais significativas ao longo do ano. Para o poço P-22 não se observou nenhuma condicionante que explicasse tal situação, por outro lado, as más condições sanitárias apresentadas pelo P-25 e a

presença de efluentes domésticos próximos ao poço sugerem uma possível alteração na qualidade da água, que só poderá ser confirmada por meio de análises químicas laboratoriais (Figura 27).



Figura 27. Vista do poço tubular P-25 (foto superior). No detalhe a direita, efluente doméstico observado próximo ao poço. No detalhe a esquerda, vista superior do poço. Coord. UTM: 514358N/9606940E (Dezembro/2013).

Na área de exposição do Aquífero Barreiras as águas subterrâneas apresentam pH médio de 5,8, com valores entre 6,2 (média para fevereiro) e 5,4 (média para dezembro), similar ao comportamento sazonal das águas subterrâneas do Aquífero Dunas. A Figura 28 apresenta a variação do pH durante o ano de 2013, onde se observa um padrão de comportamento para os poços P-01 e P-03 (Grupo 1) e outro para os poços P-13, P-19 e P-20 (Grupo 2). Os poços do Grupo 1 encontram-se a sudeste da área de estudo, próximos a CE-421, local em que o Aquífero Barreiras encontra-se mais próximo à interface com o Aquífero Fissural, o que explicaria a presença de águas menos ácidas. Corrobora com isto, a profundidade do poço P-03 (em torno de 60 m), que possibilita a captação de água tanto do

Aquífero Barreiras quanto do Fissural. O Grupo 2 encontra-se à noroeste da área, entre a CE-156 e CE-348, e além da presença de drenagens superficiais, estes poços possuem profundidade máxima de 9 m, isto é, captam água apenas do Aquífero Barreiras, o que explicaria sua maior acidez.

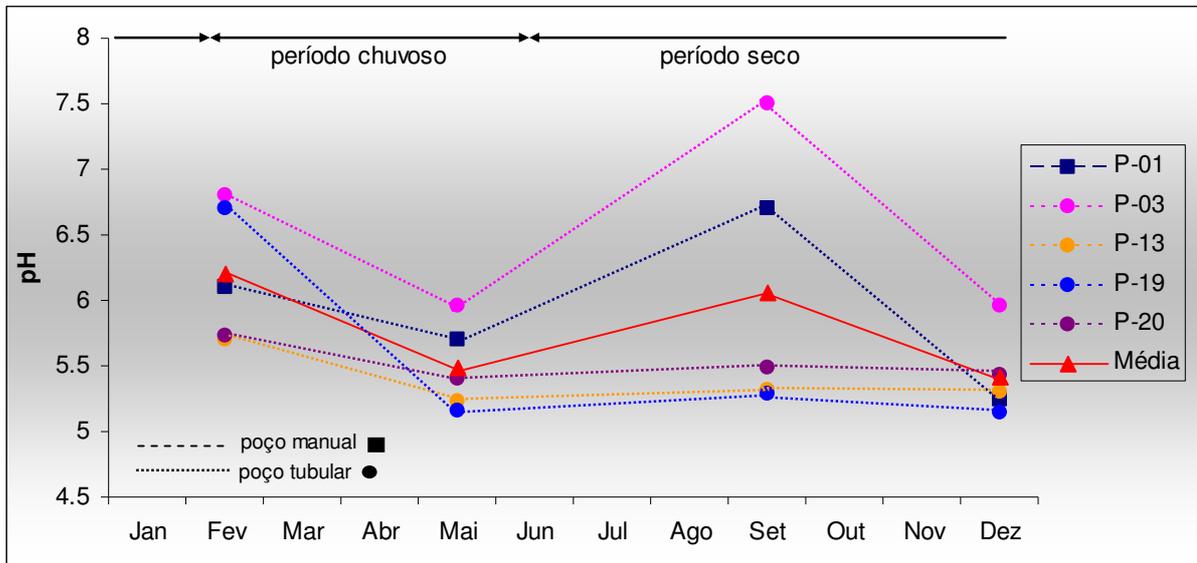


Figura 28. Variação periódica do pH medido nos poços tubulares e manuais alocados em área de exposição do Aquífero Barreiras. A linha de curva média considera os poços tubulares e manuais. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

As águas subterrâneas dos poços alocados na área de exposição do aquífero Fissural apresentam pH médio de 6,2, porém, com diferenças significativas nas medidas entre os poços, de forma a não ser possível estabelecer padrões sobre o comportamento do pH nesse aquífero (Figura 29).

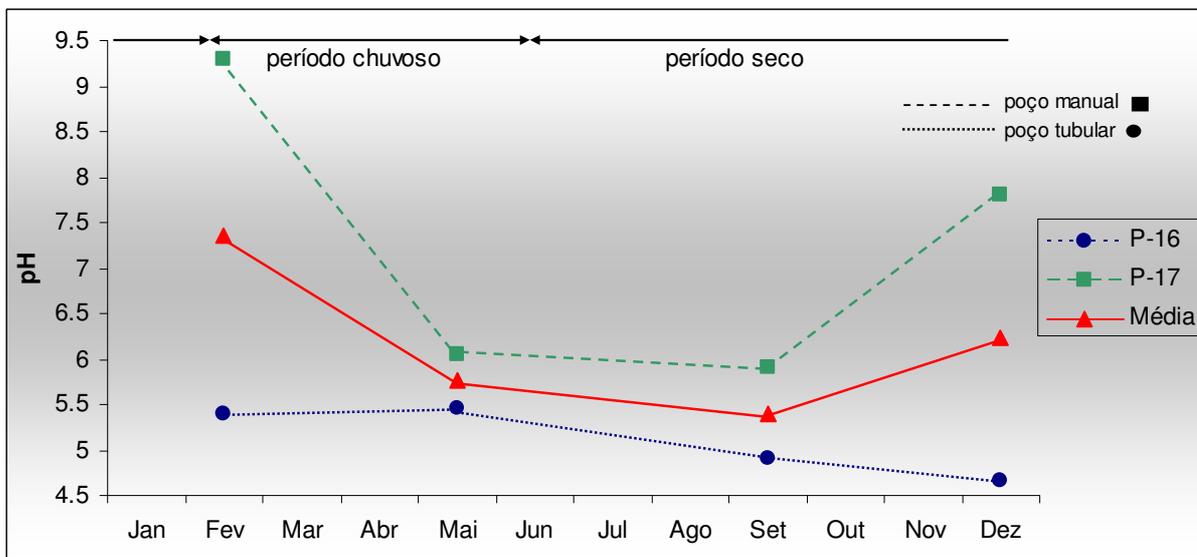


Figura 29. Variação periódica do pH medido nos poços tubulares e manuais alocados em área de exposição do Aquífero Fissural. A linha de curva média considera os poços tubulares e manuais. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

7.5.2 Condutividade Elétrica, Sólidos Totais Dissolvidos e Salinidade

Os resultados obtidos durante o monitoramento indicam os valores médios para águas subterrâneas da região: 247 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de CE, 138 mg/L de STD e de 0,13 ppt de salinidade, com as maiores concentrações registradas em dezembro e as menores em maio (Tabela 6). As medidas de CE e STD são diretamente proporcionais e, neste trabalho, relacionam-se por um fator numérico de 0,5, isto é, os valores de STD correspondem à metade dos valores da CE a 25°C.

Tabela 6 – Valores de Condutividade Elétrica a 25°C, STD e Salinidade medidos *in situ* durante as quatro etapas de monitoramento (valores em $\mu\text{S}/\text{cm}$, mg/L e ppt, respectivamente)

Poço	Estação Chuvosa						Estação Chuvosa					
	Fevereiro			Maio			Setembro			Dezembro		
	CE	STD	SAL	CE	STD	SAL	CE	STD	SAL	CE	STD	SAL
P-01	158,2	79,4	0,08	166,8	83,4	0,08	212,0	105,9	0,10	310,0	154,8	0,15
P-02	282,0	140,8	0,14	220,0	109,9	0,11	-	-	-	198,40	99,30	0,10
P-03	522,0	261,0	0,25	192,1	96,0	0,09	559,0	279,0	0,27	243,0	121,4	0,12
P-04	109,7	54,8	0,06	112,3	56,2	0,06	-	-	-	-	-	-
P-05	135,4	67,7	0,07	122,5	60,7	0,06	119,2	59,6	0,06	214,0	107,1	0,10
P-06	335,0	167,3	0,16	288,0	143,9	0,14	314,0	157,2	0,15	372,0	185,8	0,18
P-07	278,0	139,0	0,13	392,0	196,1	0,19	316,0	158,1	0,15	365,0	182,6	0,18
P-08	222,0	111,6	0,11	204,0	102,2	0,10	266,0	133,1	0,13	-	-	-
P-09	166,6	83,3	0,08	177,7	88,9	0,09	224,0	111,9	0,11	-	-	-
P-10	465,0	232,0	0,22	769,0	384,0	0,37	721,0	359,0	0,35	766,0	383,0	0,37
P-11	155,3	77,7	0,08	213,0	106,3	0,10	-	-	-	-	-	-
P-12	374,0	186,8	0,18	102,9	51,5	0,05	102,7	51,4	0,05	110,2	55,1	0,06
P-13	72,6	36,3	0,04	131,7	65,9	0,07	125,5	67,2	0,06	174,6	87,3	0,09
P-14	164,5	82,3	0,08	213,0	106,7	0,10	156,2	78,1	0,08	163,9	81,9	0,08
P-16	90,5	45,2	0,05	76,0	38,0	0,04	86,5	43,2	0,05	86,4	43,2	0,05
P-17	737,0	369,0	0,36	826,0	413,0	0,40	756,0	378,0	0,37	798,0	398,0	0,34
P-18	98,3	49,1	0,05	91,3	45,6	0,05	-	-	-	106,00	53,00	0,06
P-19	86,1	43,0	0,05	80,4	40,2	0,04	76,5	38,2	0,04	61,7	30,8	0,04
P-20	104,3	52,1	0,05	109,7	54,8	0,06	154,6	77,3	0,08	113,4	56,9	0,06
P-21	183,5	91,8	0,09	139,2	69,6	0,07	119,3	59,7	0,06	119,0	59,5	0,06
P-22	272,0	136,1	0,13	288,0	143,8	0,14	277,0	138,4	0,13	455,0	228	0,22
P-23	538,0	269,0	0,26	567,0	283,0	0,27	594,0	297,0	0,29	480,0	240,0	0,23
P-24	217,0	108,4	0,11	385,0	192,7	0,19	228,0	114	0,11	-	-	-
P-25	58,8	29,4	0,03	71,4	35,7	0,04	94,5	47,3	0,05	64,2	32,1	0,04
Média*	269	135	0,13	267	133	0,13	281	141	0,14	288	144	0,14

* As médias foram calculadas apenas para poços que possuíam medidas nas quatro etapas de monitoramento (17 poços). Em negrito, o valor mínimo e máximo medido em cada mês.

Embora a amplitude entre os valores seja pequena, verifica-se um aumento sutil da concentração de sais no período de estiagem, reiterando a influência que as águas das chuvas exercem sobre a qualidade das águas subterrâneas na área de estudo.

Quanto ao STD, todas as concentrações encontram-se abaixo dos valores máximos permitidos (VMP) de potabilidade da Portaria n°. 2914 de 2011 do Ministério da Saúde (até 1000 mg/L); e em comparação com a Resolução CONAMA n°. 357 de 2005, pode-se classificar essas águas subterrâneas como *águas doces* (STD ≤ 500 mg/L).

Dada a correlação entre os parâmetros, o comportamento periódico entre a CE, o STD e a salinidade é similar, portanto, a variação espacial e a variação periódica da concentração de sais serão representadas a partir dos resultados obtidos para o STD, expressos em mg/L. A Figura 30 apresenta a variação espacial da concentração de sais.

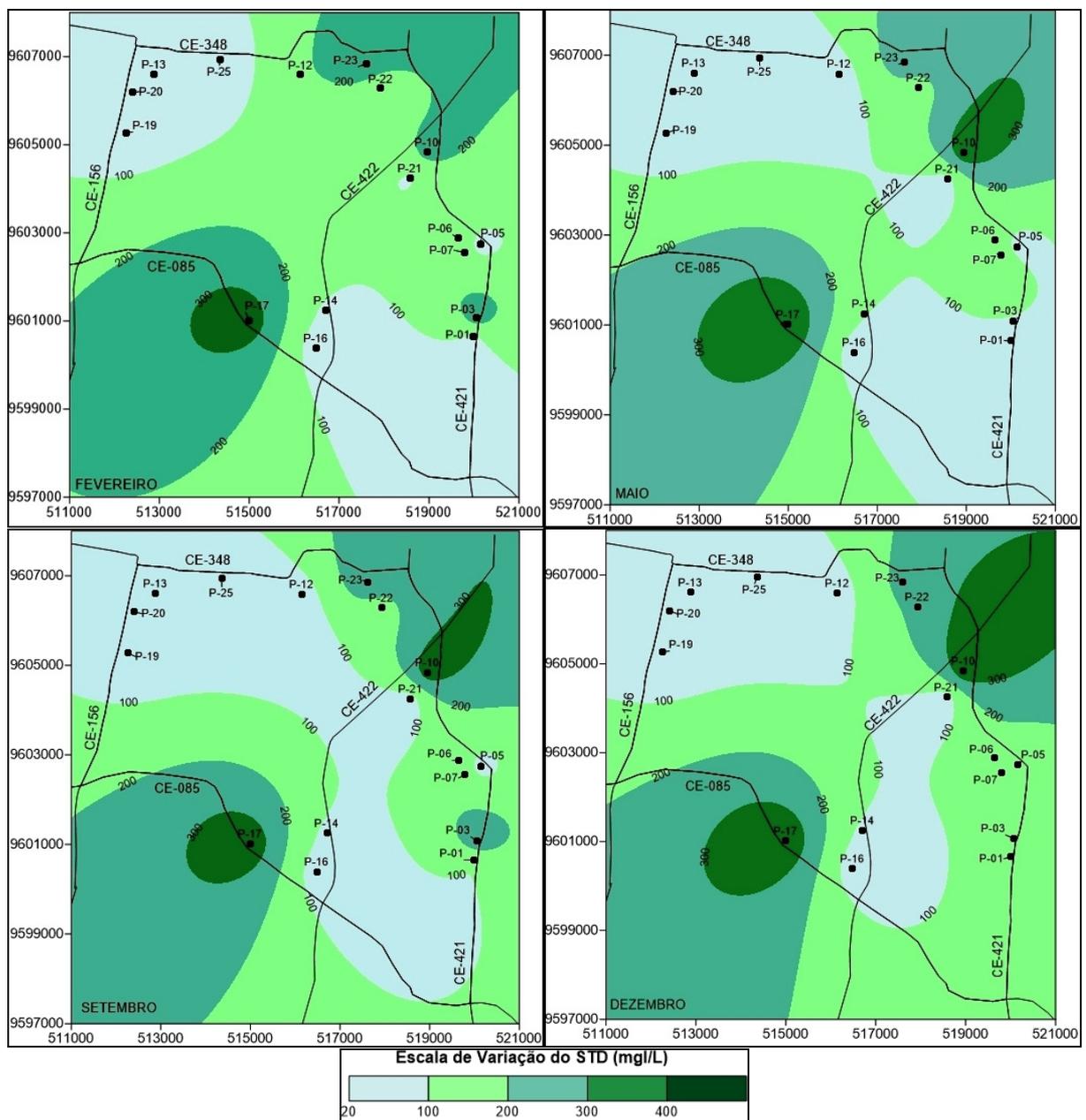


Figura 30. Variação espacial tendencial de STD (mg/L) nas águas subterrâneas da área de estudo no ano de 2013

A partir da figura anterior verifica-se o predomínio de áreas com intervalo de concentração entre 100 e 200 mg/L, de acordo com as médias calculadas para a região. Observa-se também o avanço do intervalo de 20 até 100 mg/L no sentido noroeste-sudeste, nos meses de fevereiro e maio, e posterior recuo em dezembro. As áreas de maior concentração salina encontram-se a nordeste, junto a CE-422; e a sudoeste, junto a CE-085, refletindo diretamente as concentrações obtidas nos poços P-10, P-23 e P-17, respectivamente, e que se mostraram as mais altas durante todo período de monitoramento. As áreas de menor concentração de sais se assemelham às áreas de maior acidez apresentadas na variação espacial tendencial do pH (Figura 24, pág 86), o que demonstra a correlação entre tais parâmetros.

No que se trata da variação periódica, as águas subterrâneas dos poços alocados na área de exposição do Aquífero Dunas apresentam, em média, 146 mg/L de STD, 292 μ S/cm de CE e 0,14 ppt de salinidade, sem variações médias significativas ao longo de 2013. Nas Figuras 31 e 32 verifica-se que as águas dos poços tubulares apresentam concentração média de STD aproximadamente 40% superior aos poços manuais, 162 e 122 mg/L, respectivamente.

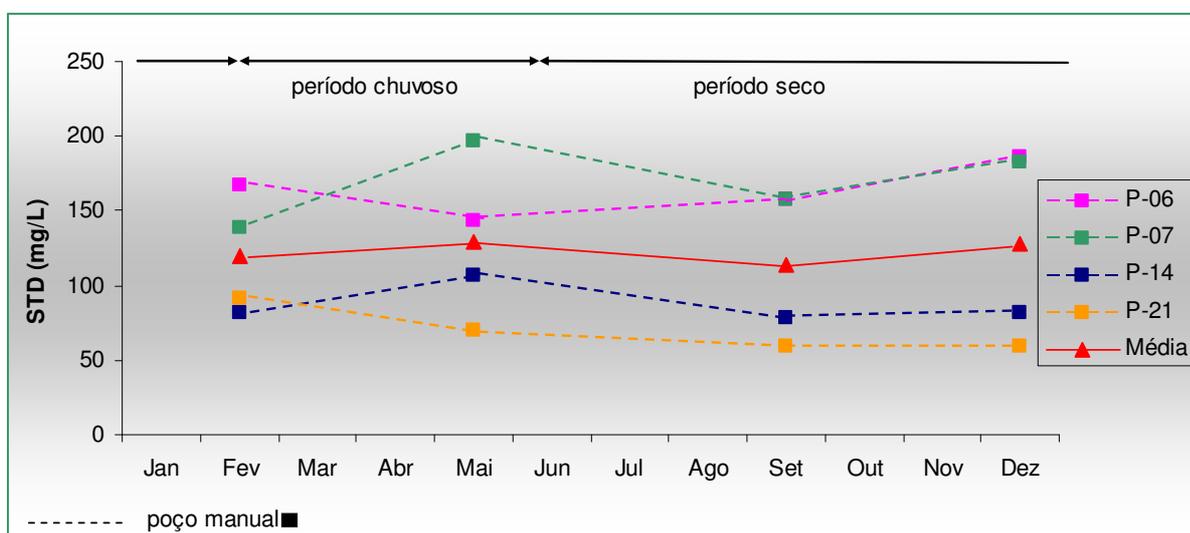


Figura 31. Variação periódica do STD medido nos poços manuais alocados em área de exposição do Aquífero Dunas. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

Entre os poços tubulares, se destacam as concentrações apresentadas na água do poço P-10, que embora estejam dentro dos padrões de potabilidade (Portaria nº. 2914/11 do Ministério da Saúde), encontram-se acima das médias locais. Este poço encontra-se dentro de

uma propriedade destinada à produção de ervas e hortaliças (vide Fig. 15), onde o uso de fertilizantes pode acarretar o aumento de sais nas águas subterrâneas.

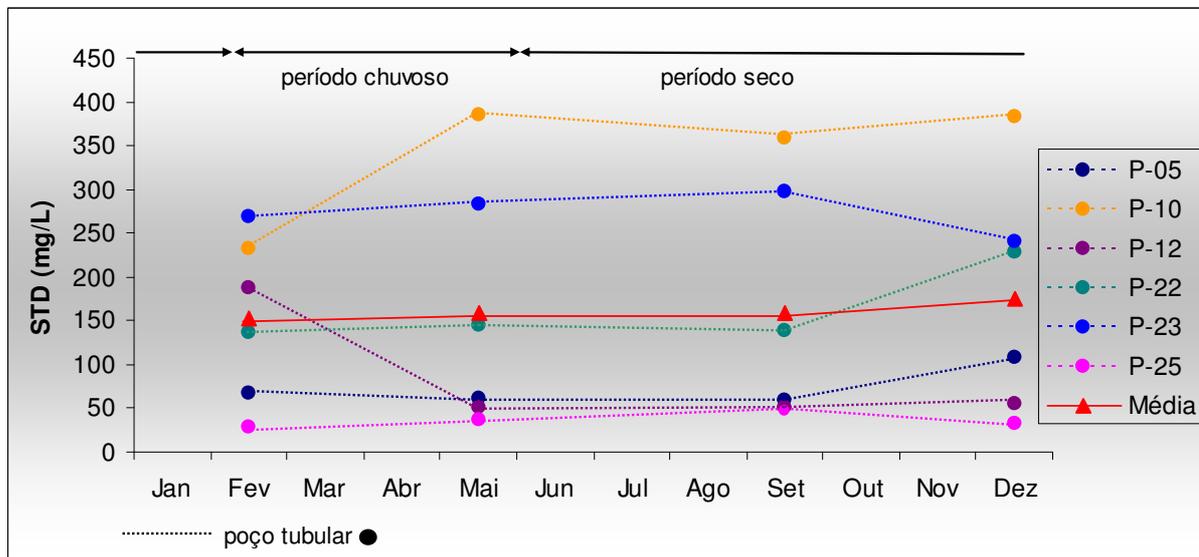


Figura 32. Variação periódica de STD medido nos poços tubulares alocados em área de exposição do Aquífero Dunas. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

Nos poços monitorados em área de exposição do Aquífero Barreiras, as águas subterrâneas apresentam concentrações médias de 92 mg/L de STD, 183 μ S/cm de CE e 0,09 ppt de salinidade. A Figura 33 apresenta a variação sazonal para os poços tubulares e manuais.

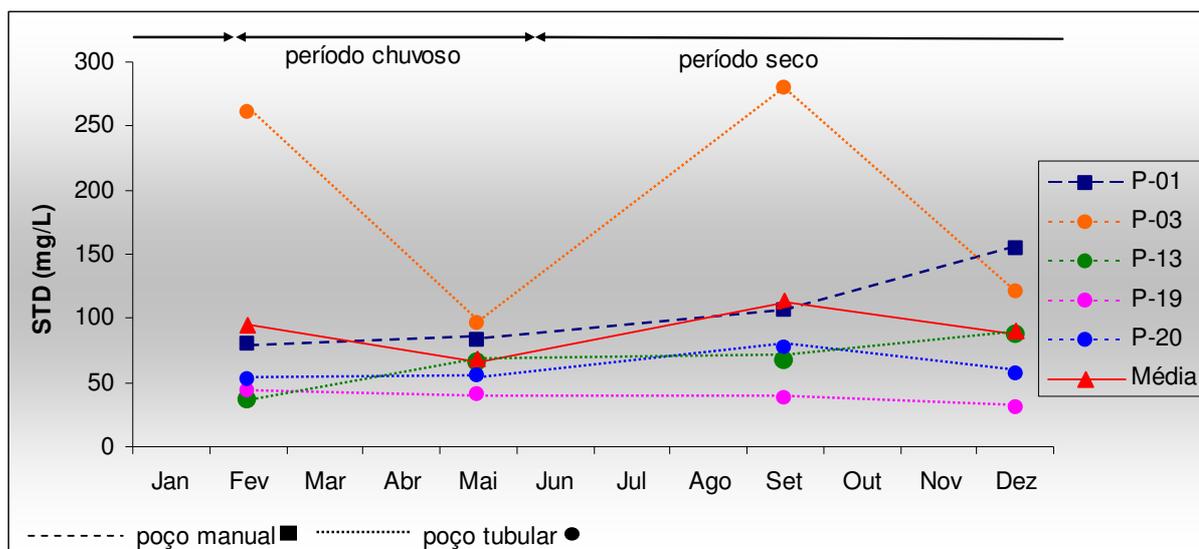


Figura 33. Variação periódica de STD (mg/L) medido nos poços tubulares e manuais alocados em área de exposição do Aquífero Barreiras. A linha de curva média considera os poços tubulares e manuais. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

Os poços da figura anterior apresentam pequena amplitude de valores, que se concentra entre 43 e 155 mg/L, à exceção do P-03 que apresentou valores fora do comportamento padrão. Assim como para o caso do pH, a profundidade deste poço pode ser o fator determinante para tal comportamento.

Na área de exposição do Aquífero Fissural, as águas subterrâneas apresentam concentrações médias de 216 mg/L de STD, 432 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de CE e 0,21 ppt de salinidade. Como no caso do pH, as águas destes poços também apresentam resultados divergentes para os parâmetros salinos. Embora estejam sobre a mesma área de exposição, os resultados apresentados sugerem que os poços capturem suas águas de porções distintas do Fissural: o poço P-16 deve possuir sua seção filtrante em porções de solo residual (que por ser argiloso, explicaria a maior acidez e as menores concentrações salinas); e o poço P-17 deve realizar a captação junto ao manto de alteração das rochas cristalinas, o que explicaria a maior concentração de sais e alcalinidade. Entretanto, essa hipótese só pode ser verificada com a análise criteriosa dos perfis técnico-constructivos dos poços, não disponíveis até o momento (Figura 34).

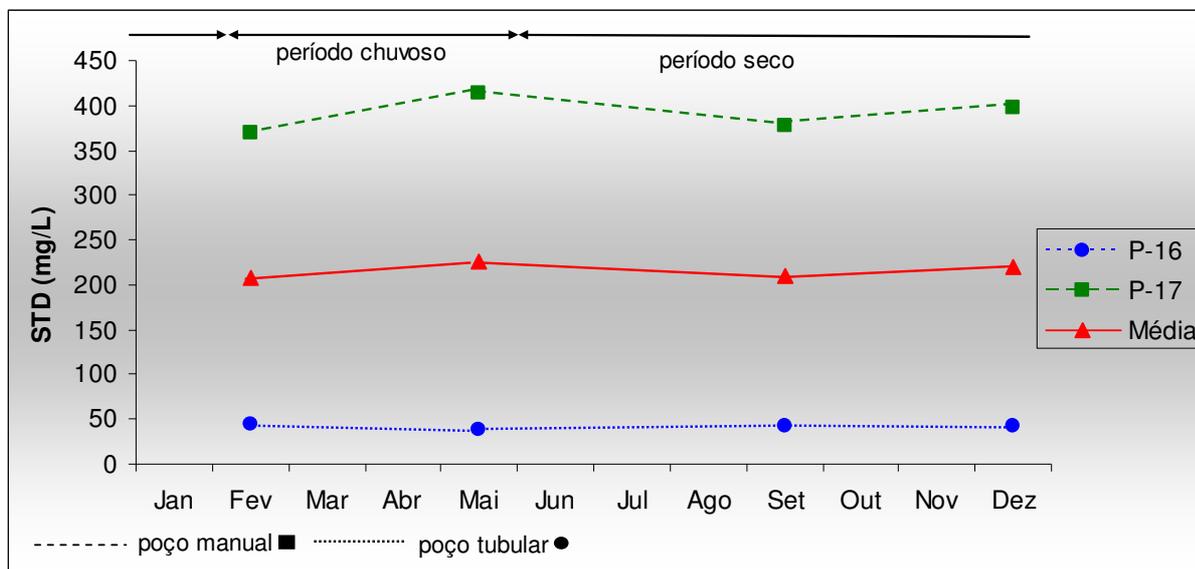


Figura 34. Variação periódica de STD (mg/L) medido nos poços tubulares e manuais alocados em área de exposição do Aquífero Fissural. A linha de curva média considera os poços tubulares e manuais. O gráfico considera apenas os poços que possuem medidas para as quatro etapas de monitoramento

7.6 Vulnerabilidade dos Sistemas Aquíferos

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com o mapeamento da vulnerabilidade pelos métodos DRASTIC e GOD, bem como as respectivas discussões e comparação entre os resultados de cada método. Também serão apresentados a classificação das potenciais fontes de contaminação e o mapeamento do perigo que essas fonte representam para os aquíferos locais.

7.6.1 Método DRASTIC

Os resultados obtidos indicam que a vulnerabilidade da área pelo índice de vulnerabilidade DRASTIC varia de muito baixa a muito alta (101 a 199), com predomínio de áreas de vulnerabilidade alta a muito alta (25,1 e 24,7%, respectivamente), seguido por áreas de baixa vulnerabilidade (23,8%). Os índices de vulnerabilidade moderada e muito baixa correspondem em área 13,7% e 12,7% do terreno, respectivamente (Figura 35).

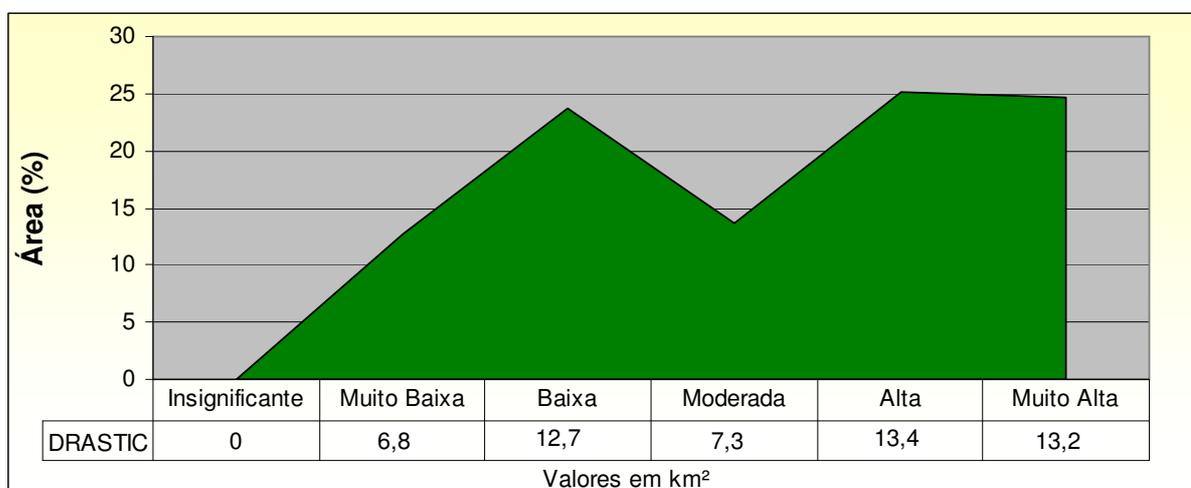


Figura 35. Distribuição das áreas x intervalo de vulnerabilidade pelo índice DRASTIC. A relação percentual considera a área de estudo (53,4 km²)

As áreas de vulnerabilidade muito alta (entre 180 e 199) predominam na área central (85%) e ocorrem também a leste (15%). Representam áreas do Aquífero Dunas onde o nível estático ocorre em profundidades de até 5 m. Compreende parte da área destinada para a siderurgia e das áreas residenciais, especialmente próximas ao Sítio Paul. As áreas de vulnerabilidade alta (entre 160 e 179) também ocorrem associadas ao aquífero Dunas, em porções do terreno onde o nível estático predominante se encontra entre 5 e 9 m de profundidade. Compreende parte da área destinada a siderurgia.

As áreas de vulnerabilidade moderada (entre 140 e 159) ocorrem associadas às porções do Aquífero Barreiras onde predominam níveis estáticos com até 5 m de profundidade e taxas de recarga estimada entre 100 e 180 mm. Abrange parte do terreno destinado às termelétricas, além de porção do terreno ao norte da refinaria e áreas residenciais, principalmente na Colônia do Pecém.

As áreas de vulnerabilidade baixa (entre 120 e 139) ainda ocorrem junto ao Aquífero Barreiras e compreende parte do terreno destinado às termelétricas e a refinaria, além de áreas residenciais próximas a Parada. Na porção sudeste estes índices sofrem influência do predomínio de níveis estáticos entre 4,5 e 9 m e taxas de recarga entre 50 e 100 mm. Na porção noroeste, ocorre o predomínio de níveis estáticos mais rasos (< 5 m), porém as taxas de recarga estimada são maiores (entre 100 e 200 mm).

As áreas de vulnerabilidade muito baixa (entre 101 e 119) ocorrem associadas ao Aquífero Fissural (solo e manto de alteração), onde predominam níveis estáticos entre 4,5 e 9 m e as taxas de recarga são inferiores a 50 mm. Abrangem parte do terreno destinado a refinaria e áreas residenciais próximas a CE-085. A Tabela 7 apresenta as classes e valores atribuídos para os parâmetros do método GOD.

Tabela 7 – Classes, valores e pesos atribuídos neste trabalho para os parâmetros utilizados no mapeamento da vulnerabilidade pelo método DRASTIC

Parâmetro D – Profundidade do Nível Estático	Valor	Peso	Calculado
<1,5 m	10	5	50
Entre 1,5 e 4,5 m	9		45
Entre 4,5 e 9 m	7		35
Entre 9 e 15 m	5		25
Parâmetro R - Recarga	Valor	Peso	Calculado
Entre 0 e 50 mm	1	4	4
Entre 50 e 100 mm	3		12
Entre 100 e 150 mm	6		24
Entre 150 e 204	8		32
> 250 mm	9		36
Parâmetro A – Litologia do Aquífero	Valor	Peso	Calculado
Rochas ígneas e metamórficas (Aq. Fissural)	5	3	15
Arenitos, argilitos e siltitos (Aq. Barreiras)	7		21
Areias eólicas (Aq. Dunas)	9		27
Parâmetro S – Tipo de Solo	Valor	Peso	Calculado
Argissolos	3	2	6
Neossolos quartzarênicos	9		18
Planossolos	3		6

Parâmetro T – Declividade do Terreno	Valor	Peso	Calculado
Entre 0 e 2%	10	1	10
Entre 2 e 6%	9		9
Entre 6 e 12%	5		5
Entre 12 e 18%	3		3
Parâmetro I – Impacto na Zona Vadosa	Valor	Peso	Calculado
Areias	9	5	45
Areias e cascalhos com teor significativo de silte e argila	7		35
Rochas ígneas e metamórficas	5		25
Parâmetro C – Condutividade Hidráulica	Valor	Peso	Calculado
Entre 5×10^{-7} e 5×10^{-5} m/s	1	3	3
Entre 1×10^{-4} e 3×10^{-4} m/s	4		12

A Figura 36 apresenta a relação entre o número de poços do banco de dados por intervalo de vulnerabilidade. Verifica-se que 53% dos poços se encontram em área de alta ou muito alta vulnerabilidade, o que aumenta a necessidade de cuidados sanitários com esses pontos de captação, para que não se tornem vias diretas de contaminação dos aquíferos.

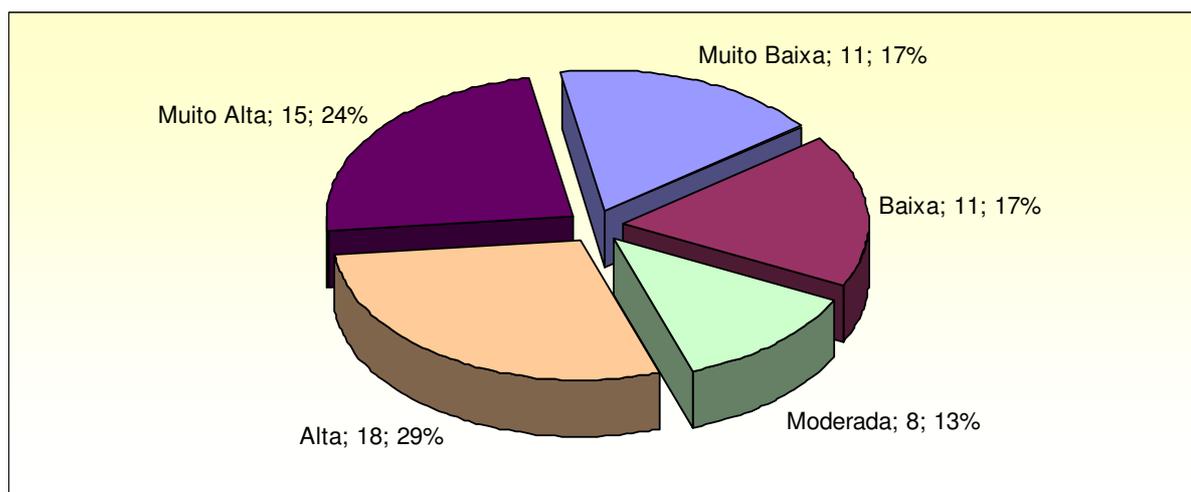
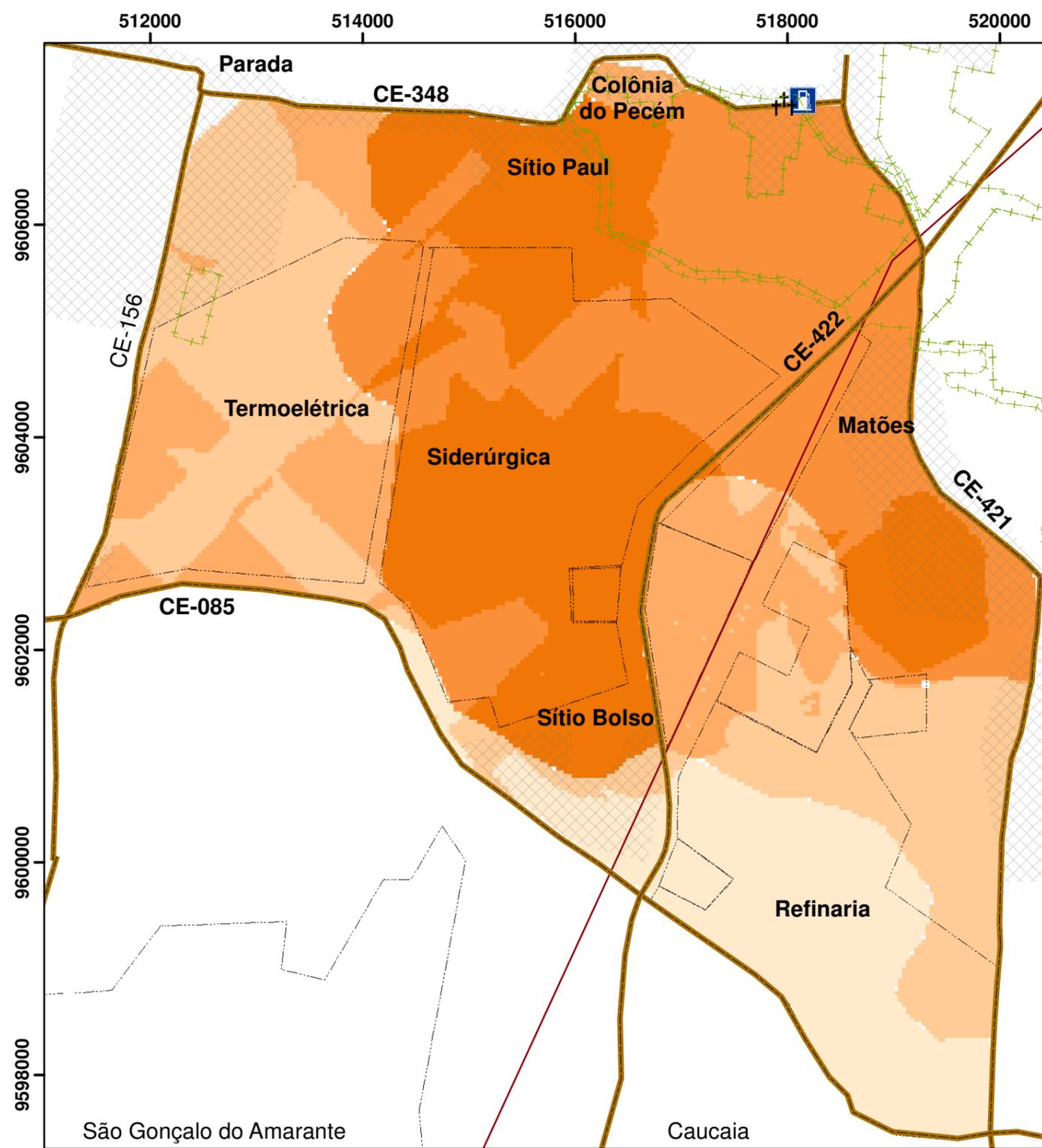


Figura 36. Relação entre o número de poços por intervalo de vulnerabilidade obtido pelo método DRASTIC (Intervalo, nº. de poços e porcentagem dos poços por vulnerabilidade, considera o total de 63 poços).

O mapeamento obtido pelo índice de vulnerabilidade DRASTIC é apresentado na Figura 37.



LEGENDA

- Estradas estaduais
- Limite Municipal
- Área urbana
- Áreas Industriais
- Limites das Unidades de Conservação
- Cemitério
- Posto de Gasolina

Índice de Vulnerabilidade DRASTIC

Intervalo

- 101 - 119 **Muito Baixa**
- 120 - 139 **Baixa**
- 140 - 159 **Moderada**
- 160 - 179 **Alta**
- 180 - 199 **Muito Alta**

Escala Gráfica



Universidade Federal do Ceará
Centro de Ciências - Departamento de Geologia
Programa de Pós-Graduação em Geologia
Dissertação de Mestrado

Título: Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na Porção Norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará

Figura 37: Vulnerabilidade natural pelo método DRASTIC

Datum Horizontal: South American 69,
 Projeção Universal Transversa de Mercator,
 Zona 24 S, Meridiano Central 39° W

Autora: Pâmella Moura

Orientador: José A. B. Sabadia

Local: Fortaleza/CE

Data: Agosto, 2014

7.6.2 Método GOD

Os resultados obtidos indicam que a vulnerabilidade pelo índice de vulnerabilidade GOD varia de moderada à alta (entre 0,44 e 0,54), com predomínio de vulnerabilidade moderada (Figura 38).

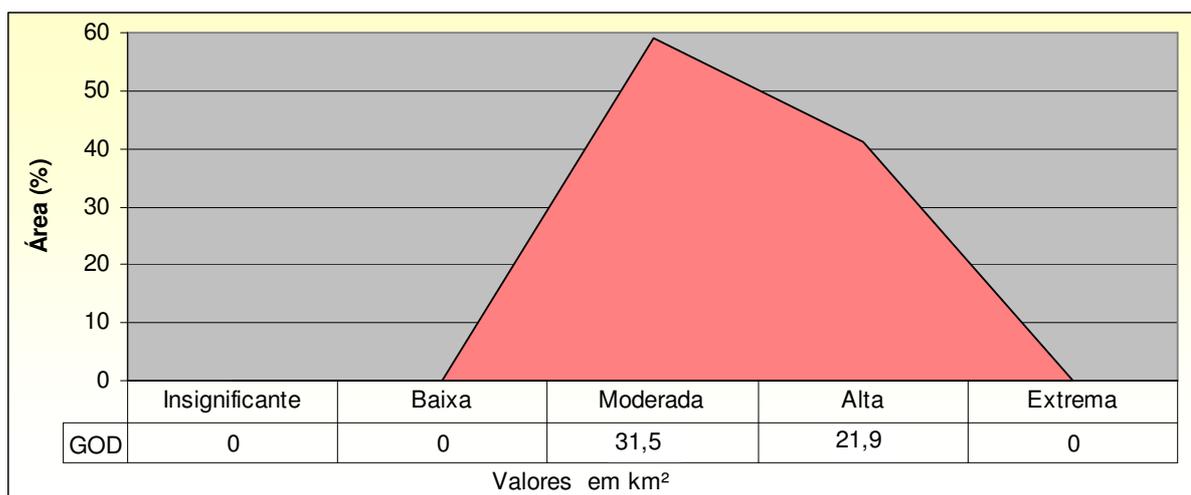


Figura 38. Distribuição das áreas x intervalo de vulnerabilidade pelo índice GOD. A relação percentual considera a área de estudo (53,4 km²)

Na porção central da área, onde ocorre predomínio do Aquífero Dunas, os índices obtidos (0,54) indicam alta vulnerabilidade em detrimento do grau de consolidação da zona vadosa, formada predominantemente por areias eólicas. A porção do terreno de alta vulnerabilidade na região leste, que também abrange parte dos aquíferos Barreiras e Fissural, sofreu influência de níveis estáticos mais rasos (<5 metros de profundidade). Compreende todo o terreno destinado à construção da siderúrgica, e uma pequena porção do terreno destinado à refinaria. Abrange também as áreas residenciais do Bolso, Matões e Sítio Paul.

As áreas de vulnerabilidade moderada (0,44, 0,48 e 0,49), ocorrem nas porções leste e oeste, associadas principalmente aos terrenos da Formação Barreiras. No sudeste da área, o índice moderado também sofreu influência de níveis estáticos mais profundos (>5 metros de profundidade) e de litologias cristalinas. A exceção ocorre somente na porção nordeste, onde apesar dos terrenos serem formados predominantemente por areias eólicas (mais vulneráveis que os demais litotipos), a profundidade do nível estático proporcionou valores mais moderados de vulnerabilidade. Este índice abrange todo o terreno destinado às termelétricas, a maior parte do terreno da refinaria (dentro da área de estudo), além de áreas residenciais (Parada, Colônia do Pecém, e parte do Matões).

A Tabela 8 apresenta as classes e valores atribuídos para os parâmetros do índice de vulnerabilidade GOD.

Tabela 8 - Classes e pesos atribuídos neste trabalho para os parâmetros utilizados no mapeamento da vulnerabilidade pelo índice de vulnerabilidade GOD

Parâmetro G – Confinamento da Água Subterrânea	Valor
Não confinado	1,0
Parâmetro O – Litologia e Consolidação da Zona Vadosa	Valor
Dunas/Paleodunas (Areias Eólicas)	0,60
Fm. Barreiras (arenito/ argilitos / siltitos)	0,55
Rochas Cristalinas	0,60
Parâmetro D – Profundidade do Nível Estático	Valor
<5 metros	0,90
Entre 5 e 20 metros	0,80

Apesar de representar o maior peso na avaliação (1,0) e ter elevado o índice de vulnerabilidade, o grau de confinamento não foi determinante na diferenciação entre os índices alto e moderado. A profundidade do nível estático foi o fator determinante na diferenciação da vulnerabilidade na área.

A Figura 39 apresenta a relação entre o número de poços do banco de dados por intervalo de vulnerabilidade. Verifica-se que a maior parte dos poços se encontra em áreas de vulnerabilidade moderada.

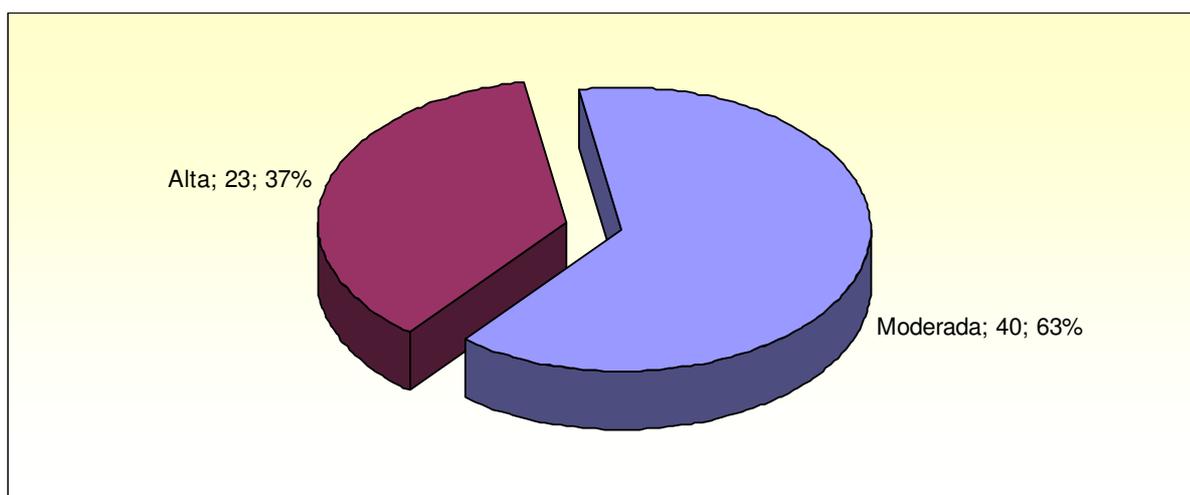
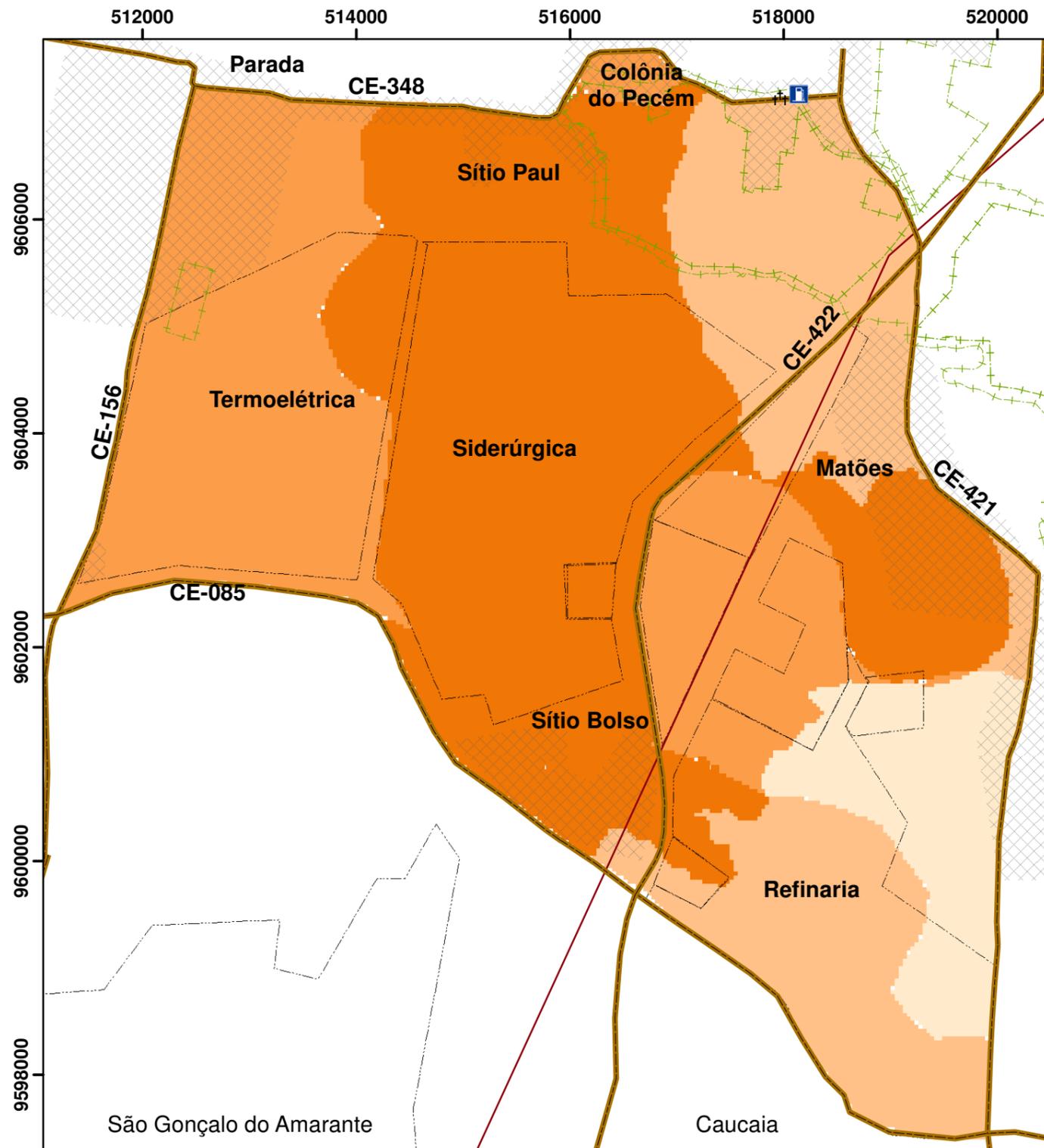


Figura 39. Relação entre o número de poços por intervalo de vulnerabilidade obtido pelo método GOD (Intervalo, nº. de poços e porcentagem dos poços por vulnerabilidade, considera o total de 63 poços).

Em detrimento do comportamento periódico do NE apresentado na seção 7.3, foram simuladas quatro situações de vulnerabilidade, considerando as médias do nível estático para: Fevereiro/Maio; Maio/Setembro; Setembro/Dezembro e Dezembro/Fevereiro.

Os resultados obtidos não apontaram nenhuma variação significativa e desta forma, desenvolveu-se apenas um mapa de vulnerabilidade, considerando a média do NE dos quatro períodos (Figura 40).



LEGENDA

- Estradas estaduais
- Limite Municipal
- Área urbana
- Áreas Industriais
- Limites das Unidades de Conservação
- Cemitério
- Posto de Gasolina

Índice de Vulnerabilidade GOD

- Valores**
- 0.44
 - 0.48
 - 0.49
 - 0.54
- Vulnerabilidade Moderada (1)
- Vulnerabilidade Alta (2)

- 1** Vulnerável a alguns poluentes se continuamente lançados e lixiviados (nitratos e hidrocarbonetos)
- 2** Vulnerável a muitos poluentes, exceto os pouco móveis e persistentes (hidrocarbonetos, compostos aromáticos, bactérias, vírus, sais e nitratos)

Escala Gráfica



Universidade Federal do Ceará
Centro de Ciências - Departamento de Geologia
Programa de Pós-Graduação em Geologia
Dissertação de Mestrado

Título: Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na Porção Norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará

Figura 40: Vulnerabilidade natural pelo método GOD

Datum Horizontal: South American 69,
 Projeção Universal Transversa de Mercator,
 Zona 24 S, Meridiano Central 39° W

Autora: Pâmella Moura

Orientador: José A. B. Sabadia

Local: Fortaleza/CE Data: Agosto, 2014

7.6.3 Comparação Entre os Resultados dos Métodos de Determinação do Índice de Vulnerabilidade

Em valores relativos, os dois métodos apresentam resultados semelhantes no mapeamento das áreas mais e menos susceptíveis, com os maiores índices obtidos nos locais onde predominam os terrenos quaternários. Neste aspecto, a variação da vulnerabilidade em função da litologia é bastante evidente, dado que o mapeamento da vulnerabilidade apresentou contornos muito próximos ao mapeamento geológico. De modo particular, no método GOD a profundidade do nível estático mostrou-se preponderante na avaliação, em detrimento dos demais parâmetros, principalmente na classificação das áreas mais susceptíveis. No método DRASTIC, além do nível estático, a zona vadosa e a recarga mostraram-se como os parâmetros mais significativos na classificação das áreas mais susceptíveis.

A aplicação do método GOD mostrou-se mais simples e objetiva, devido o pequeno número de fatores envolvidos e a presença de descrições generalizadas na classificação da zona vadosa. Por requerer um maior número de parâmetros e apresentar descrições detalhadas entre os intervalos, o método DRASTIC apresentou algumas dificuldades na aplicação, principalmente na obtenção dos dados. Os resultados indicam que a aplicação do DRASTIC mostrou-se mais restritiva quanto ao uso e ocupação do solo, por apresentar maior porcentagem de áreas com índice de vulnerabilidade mais elevado (alta e muito alta) em comparação ao método GOD, como apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Relação percentual dos intervalos de vulnerabilidade pelos índices DRASTIC e GOD nos aquíferos da área de estudo (53,4 km²)

Sistema Aquífero	Índice DRASTIC					Índice GOD	
	Muito Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta	Moderada	Alta
Dunas	-	-	-	25,1%	24,7%	12,5%	36,5%
Barreiras	-	23,0%	13,7%	-	-	36,7%	0,4%
Fissural	12,7%	0,8%	-	-	-	9,8%	4,1%
Total	12,7%	23,8%	13,7%	25,1%	24,7%	59%	41%

A partir dos resultados apresentados, verifica-se também o predomínio de áreas com vulnerabilidade baixa e moderada (23,8% no índice DRASTIC e 59% no índice GOD), associadas, principalmente, aos aquíferos Barreiras e Fissural. Entretanto, dado o uso prioritariamente industrial da região, esses aquíferos não estão isentos de possíveis contaminações, principalmente aquelas de longo prazo e originadas de contaminantes persistentes, como nitratos e hidrocarbonetos, conforme apresentado no Quadro 7 (pág. 49)

retirado de Hirata e Fernandes (2008). Com a sobreposição dos mapas de vulnerabilidade foi possível identificar relações espaciais entre os índices obtidos por cada método, a saber:

a. As áreas classificadas com vulnerabilidade muito alta pelo índice DRASTIC (13,2 km²) correspondem a 67% das áreas do Aquífero Dunas que foram classificadas com vulnerabilidade alta pelo índice GOD. Localizam-se na região central;

b. As áreas classificadas com vulnerabilidade alta pelo índice DRASTIC (13,4 km²) correspondem a 33% das áreas do Aquífero Dunas que foram classificadas com vulnerabilidade alta pelo índice GOD (6,4 km²) e a 100% das áreas do Aquífero Dunas que foram classificadas com vulnerabilidade moderada (6,7 km²) pelo mesmo índice;

c. As áreas classificadas com vulnerabilidade moderada pelo índice DRASTIC (7,3 km²) correspondem a 23,2% das áreas que foram classificadas com vulnerabilidade moderada pelo índice GOD. Essas áreas são representadas apenas pelo Aquífero Barreiras, principalmente próximo a Colônia do Pecém e adjacente a CE-422, entre as localidades Bolso e Matões;

d. As áreas classificadas com vulnerabilidade baixa pelo índice DRASTIC correspondem a 63% das áreas do Aquífero Barreiras (12,1 km²) que foram classificadas com vulnerabilidade moderada pelo índice GOD e 27,3% das áreas do Aquífero Fissural (0,6 km²) que foram classificadas com vulnerabilidade alta pelo mesmo índice.

e. As áreas classificadas com vulnerabilidade muito baixa pelo índice DRASTIC (6,8 km²) correspondem a 92% das áreas do Aquífero Fissural, enquanto o índice GOD classificou 70% das áreas deste aquífero com vulnerabilidade moderada (5,2 km²) e 30% com vulnerabilidade alta (2,2 km²).

A análise dessas relações indica que, em comparação com o método DRASTIC, o método GOD subestimou algumas áreas de maior vulnerabilidade no Aquífero Dunas e superestimou algumas áreas de menor vulnerabilidade no Aquífero Fissural. Essa situação apresenta-se como resultado da diferença de apenas 0,5 entre os valores atribuídos à litologia no método GOD, em uma situação em que os demais parâmetros se apresentam com valores similares para a área de estudo. Quanto os poços cadastrados, o mapeamento do método DRASTIC aponta a maioria dos poços em áreas de vulnerabilidade muito alta ou alta, já pelo método GOD a maior parte dos poços se encontra alocado em área de vulnerabilidade moderada. Todavia, independente da vulnerabilidade do aquífero, esses poços podem funcionar como via direta de contaminação.

De modo geral, o método DRASTIC apresentou-se mais apropriado para estudos que objetivem um maior detalhamento da vulnerabilidade, visto que o maior número de parâmetros envolvidos resultou em um número maior de intervalos. Neste aspecto, este método seria mais apropriado para estudos locais, como a aplicação em EIA/RIMAS e Planos Diretores Municipais. O método GOD se mostrou mais apropriado para estudos regionais, como por exemplo, a ser aplicado em programas de zoneamentos territoriais Federais ou Estaduais, como Zoneamentos Ecológico-Econômicos, onde a escala de trabalho é maior, e os resultados poderiam ser utilizados como norteador do planejamento de uso e ocupação territorial. Este método também se mostra adequado para ser aplicado nos critérios das distribuições de outorgas para águas subterrâneas propostos por Costa *et al.* (2011), onde em áreas de alta vulnerabilidade a outorga requerida seria mais restritiva do que em áreas de baixa vulnerabilidade.

Salienta-se que ambos os métodos devem ser utilizados apenas como um primeiro indicador das ações de planejamento de ocupação do espaço e proteção dos aquíferos, e não devem ser utilizados como parâmetro final para o estabelecimento de tais ações. A proteção efetiva dos aquíferos deve vir acompanhada do mapeamento das áreas de maior perigo de contaminação, da implantação do perímetro de proteção de poços, como proposto por Foster *et al.* (2002), do monitoramento periódico das águas subterrâneas (pelas indústrias, órgãos ambientais e empresas de abastecimento público), da fiscalização das obras de captação (tanto poços tubulares, quanto os manuais) e do estabelecimento e fiscalização das outorgas.

7.6.4 Classificação do Potencial de Contaminação e Mapeamento do Perigo de Contaminação dos Sistemas Aquíferos com indicação das Cargas Contaminantes

A partir dos dados obtidos com o Plano Diretor do CIPP, de imagens de satélite e das visitas realizadas em campo, identificaram-se as principais fontes potenciais de contaminação na área e classificou-se o potencial da carga contaminante no subsolo de acordo com a tabela do método POSH (Capítulo 5), conforme Tabela 10.

Tabela 10. Principais fontes potenciais de contaminação da área de estudo e sua avaliação quanto o potencial da carga contaminante no subsolo, baseado no método POSH

Atividade	Tipo de fonte	Principais tipos de contaminante	Potencial de carga contaminante no subsolo	Peso
Refinaria	Pontual	Hidrocarbonetos (BTEX, PAH, TPHs)	Elevado	3
Áreas de Estocagem de Combustíveis	Pontual	Hidrocarbonetos (BTEX, PAH, TPHs)	Moderado	2
Siderúrgica	Pontual	Metais pesados (ex: chumbo, mercúrio e cádmio), compostos fenólicos	Elevado	3
Processamento de minerais não metálicos	Pontual	Minerais não metálicos: resíduos da fabricação de cimentos	Reduzido	1
Termoelétrica	Pontual	Metais pesados (ex: chumbo, arsênio e cádmio)	Moderado	2
Metal-mecânica	Pontual	Metais pesados, solventes organoclorados, óleos e graxas	Elevado	3
Posto de Gasolina	Pontual	Hidrocarbonetos (BTEX, PAH, TPHs)	Moderado	2
Cemitério	Pontual	Cadaverina + putrecina (necrochorume), amônia, nitrato, microorganismos patogênicos	Reduzido	1
Saneamento <i>in situ</i> (áreas residenciais)	Difusa	Nitrato e nitrito	Moderado	2

Fonte: Autora

Pode-se verificar o predomínio de atividades com potencial de carga contaminante entre moderada a elevada, com apenas uma atividade classificada com potencial de contaminação reduzido. Destaca-se entre os compostos contaminantes oriundos de tais atividades o uso de hidrocarbonetos, solventes clorados e metais pesados. Com relação ao potencial de contaminação do saneamento *in situ* das áreas residenciais, optou-se classificá-lo como moderado em detrimento dos baixos índices de domicílios ligados a rede de esgoto apresentados na região (31% no distrito do Pecém e de 39,35% no município de Caucaia), embora a densidade populacional esteja abaixo dos valores apresentados no método. A área demarcada como Estação Ecológica foi incluída no mapeamento de perigo (descontada a área

demarcada como zona de amortecimento que se sobrepõe parcialmente a algumas áreas residenciais), dado que nenhuma atividade possa ser desenvolvida no local, o que garante à área potencial reduzido de contaminação de origem superficial.

A avaliação do perigo de contaminação considerou o mapeamento da vulnerabilidade obtida pelo índice de vulnerabilidade GOD (Figura 38). Os resultados indicam o predomínio de áreas de perigo moderado e pequena incidência de áreas com baixo perigo de contaminação. Por não apresentarem uso atual, ou por não possuir uso planejado definido, ou pelo uso planejado não se enquadrar dentro das atividades potencialmente poluidoras, algumas áreas não tiveram o perigo mapeado, sendo classificado como não determinado (Figura 41).

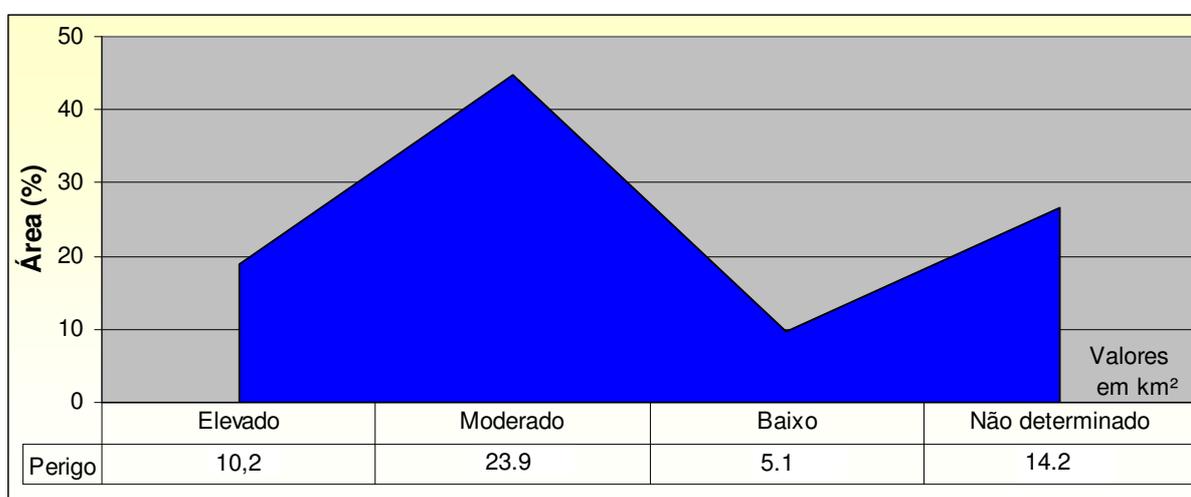
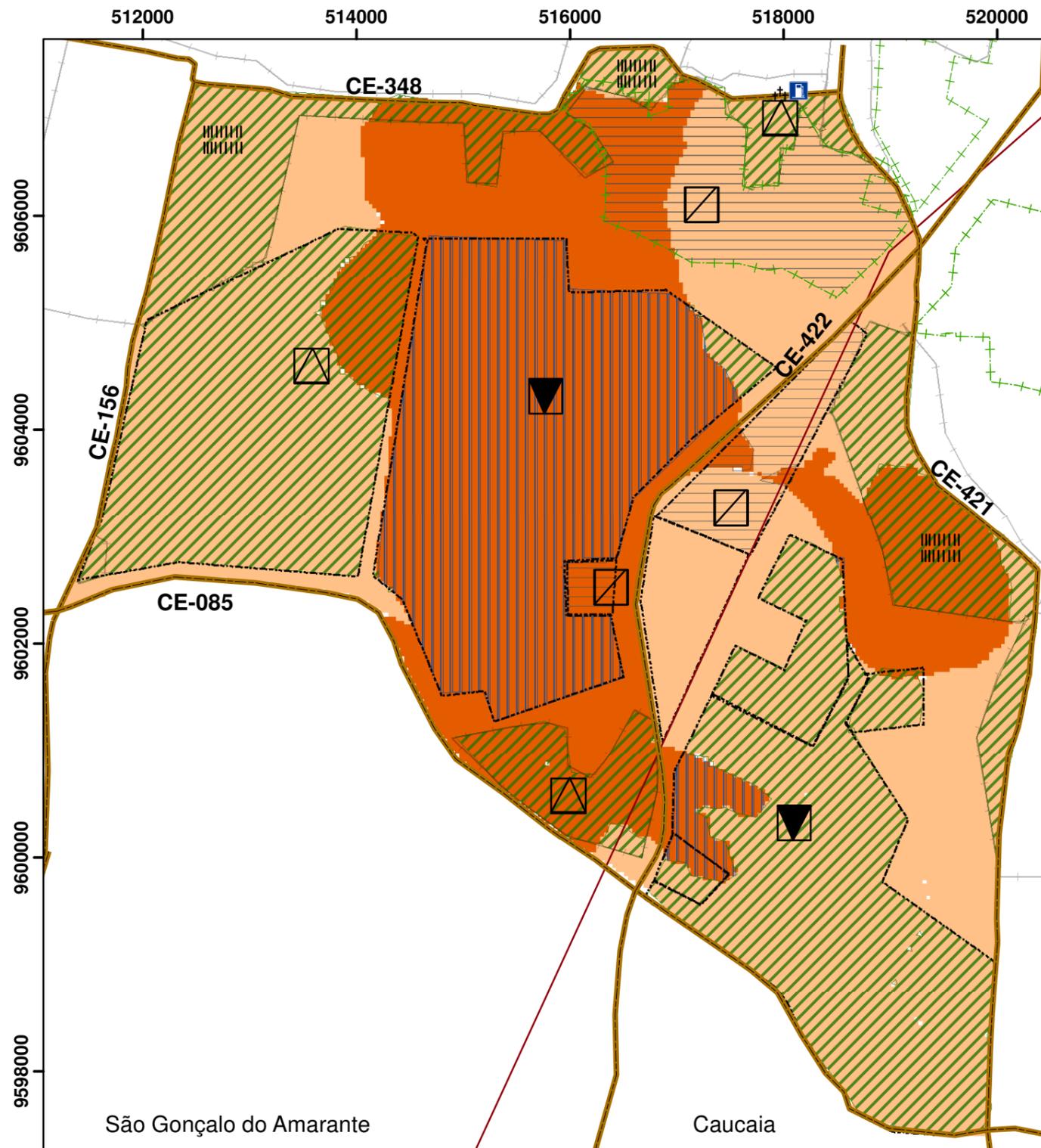


Figura 41. Relação entre as classes de perigo e a área mapeada. A relação percentual considera a área de estudo (53,4 km²)

Na área central, ocupada pela siderúrgica, e a leste da rodovia CE-422, onde será instalada uma parte da refinaria, o perigo de contaminação apresentou-se elevado, em decorrência da alta vulnerabilidade (areias eólicas e níveis estáticos rasos) e do elevado potencial da carga contaminante no subsolo. Nas áreas industriais próximas as rodovias CE-156 e CE-421 (área das termelétricas e da refinaria), o perigo de contaminação apresentou-se moderado pela combinação de vulnerabilidade moderada com potencial de carga contaminante no subsolo também moderado. Nas áreas residenciais, o perigo de contaminação apresentou-se moderado independente da vulnerabilidade dos aquíferos. Apenas duas pequenas porções centrais da área, à margem da CE-422, foram mapeadas com baixo perigo de contaminação em decorrência do potencial de carga contaminante reduzido, embora se localizem em parte sobre aquíferos de alta vulnerabilidade. O mapeamento do perigo de contaminação com a indicação das cargas contaminantes é apresentado na Figura 42.



Legenda

- Estradas estaduais Limite Municipal
- Limites da Estação Ecológica
- Área urbana Cemitério
- Áreas Industriais Posto de Gasolina

Índice de Vulnerabilidade GOD (simplificado)

- Vulnerabilidade Moderada
- Vulnerabilidade Alta

Potencial de Carga Contaminante no Subsolo

- Reduzido Elevado
- Moderado Moderado (Fonte Difusa)

Perigo de Contaminação

- Elevado
- Moderado
- Baixo

Escala Gráfica



Universidade Federal do Ceará
Centro de Ciências - Departamento de Geologia
Programa de Pós-Graduação em Geologia
Dissertação de Mestrado

Título: Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na Porção Norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará

Figura 42: Perigo de Contaminação e Indicação das Cargas Contaminantes

Datum Horizontal: South American 69,
 Projeção Universal Transversa de Mercator,
 Zona 24 S, Meridiano Central 39° W

Autora: Pâmella Moura

Orientador: José A. B. Sabadia

Local: Fortaleza/CE

Data: Agosto, 2014

8 CONCLUSÕES

As águas subterrâneas da área de estudo encontram-se armazenadas em três Sistemas Aquíferos principais: Dunas, Barreiras e Fissural. Apesar de se fazer presente na região, o Sistema Aquífero Aluvionar não se apresentou representativo neste estudo em virtude da escala de trabalho adotada. A caracterização das obras de captação foi realizada por meio de um arquivo de dados, formado por 63 poços: 24 cadastrados em campo e 39 do Banco de Dados do SIAGAS. Entre os poços, 55 são tubulares e 8 são poços manuais. A maioria dos poços foi construída com profundidades inferiores a 25 metros, sendo classificados como poços rasos, de acordo com a legislação estadual vigente. A idade de construção da maior parte dos poços é inferior a 25 anos, acompanhando o crescimento populacional da região. O uso das águas subterrâneas para fins domésticos é preponderante, realizado por poços tubulares em 86% dos casos. A irrigação, principalmente destinada à agricultura familiar, é o segundo uso mais comum para as águas subterrâneas da região, e também é realizado predominantemente por meio de poços tubulares (80% das vezes). Por sua vez, a maioria dos poços manuais é destinada para uso doméstico.

As águas subterrâneas da área apresentam-se ácidas, sendo que a maioria dos poços apresentou águas com medidas de pH fora dos valores máximos permitidos para a potabilidade pela Portaria nº. 2914 de 2011 do Ministério da Saúde. As águas do Aquífero Dunas apresentaram pH mais ácido entre os poços manuais, se comparado aos valores medidos entre os poços tubulares. O Aquífero Barreiras apresentou águas subterrâneas com a maior acidez da região, sendo possível observar uma acidez ligeiramente superior entre os poços alocados próximos à interface entre os aquíferos Barreiras e Dunas (porção noroeste da área), enquanto próximo à interface entre os aquíferos Barreiras e Fissural as águas apresentaram menor acidez. Com aumento das taxas de urbanização e industrialização da área em andamento, é provável que a situação de acidez das águas subterrâneas aumente nos próximos anos. No que concerne à concentração de sais (CE, STD e salinidade), as águas estão dentro dos padrões de potabilidade, conforme portaria supracitada, e podem ser classificadas como “águas doces” de acordo com padrão da Resolução CONAMA nº. 357 de 2005. As maiores concentrações de sais ocorrem na porção nordeste e a sudoeste, área de domínio do Aquífero Dunas e Fissural, respectivamente; e as menores concentrações foram medidas nos terrenos associados ao Aquífero Barreiras. Entre os poços alocados no Aquífero Dunas, os poços tubulares apresentaram maiores concentrações de sais em comparação aos poços manuais.

Em linhas gerais, as águas subterrâneas apresentaram-se mais ácidas, condutivas e com maiores concentrações de sais (STD e Salinidade) no período de estiagem. Fevereiro se apresentou como o mês de águas mais quentes e menos ácidas. Maio apresentou a menor média de condutividade e de sais, em contraponto a dezembro, que se apresentou como o mês de águas mais ácidas, condutivas (CE) e salinas (STD e salinidade). A menor média de temperatura das águas foi registrada em setembro. No mapeamento das isolinhas, é evidenciado o comportamento sazonal dos parâmetros físico-químicos monitorados ao longo do ano, onde se identificou uma tendência similar para os meses de fevereiro e dezembro, e outra para os meses de maio e setembro. O monitoramento periódico também indicou a presença de níveis estáticos rasos, com média entorno de 5 m de profundidade. O nível estático médio do Aquífero Dunas apresentou-se como o mais raso entre os aquíferos da área de estudo, sendo que entre os poços deste aquífero, os tubulares apresentaram nível estático mais profundo na comparação com os poços manuais. O Aquífero Barreiras apresentou o nível estático médio mais profundo entre os poços monitorados, dado que os poços do Aquífero Fissural atravessam o solo e as rochas alteradas, e por esse motivo também apresentam níveis estáticos rasos.

O balanço hídrico apontou uma taxa de infiltração efetiva de apenas 11,8% da taxa média de precipitação (1020 mm/ano), concentrada nos meses de março e abril, configurando um longo período de deficiência hídrica, entre maio e janeiro, e início da reposição hídrica em fevereiro. Março apresentou a maior taxa calculada para a Evapotranspiração Real, enquanto dezembro apresentou a maior taxa calculada para a Evapotranspiração Potencial. Com relação à recarga, as estimativas realizadas a partir da variação do nível estático e porosidade efetiva de cada aquífero indicaram valor médio de apenas 1,2% acima do valor apresentado no balanço hídrico. As zonas com maiores taxas de recarga ocorrem associadas aos terrenos quaternários. A análise da elevação e rebaixamento dos níveis estáticos ao longo do ano, em comparação com a distribuição dos índices pluviométricos e do período de infiltração estimado pelo balanço hídrico, evidencia as águas pluviais como a principal fonte de recarga das águas subterrâneas na área de estudo. Entretanto, os poços alocados próximos às drenagens apresentaram a menor variação do nível estático ao longo do monitoramento, o que demonstra a influência local das drenagens no processo de recarga das águas subterrâneas da área. Ainda neste contexto, o sentido preferencial do fluxo das águas subterrâneas não apresentou variações significativas ao longo do ano, mantendo tendência sul-norte, na porção norte da área; oeste-leste na porção leste; e

leste-oeste na porção oeste. A única variação significativa está relacionada à amplitude de variação do nível estático do poço P-17, localizado próximo a CE-085.

Quanto à vulnerabilidade, o método DRASTIC apresentou índices de vulnerabilidade entre muito baixa a muito alta, com índices de vulnerabilidade baixa associados ao Aquífero Barreiras e Aquífero Fissural, e índices mais altos associados ao Aquífero Dunas. A profundidade do nível estático, a recarga e o impacto da zona vadosa foram os parâmetros que mais influenciaram na variação da vulnerabilidade da área. O método GOD, por sua vez, apresentou índices de vulnerabilidade entre moderada a alta, com predomínio de áreas de vulnerabilidade moderada. As áreas de vulnerabilidade alta ocorrem associadas ao Aquífero Dunas, enquanto as de vulnerabilidade moderada associam-se aos aquíferos Barreiras e Fissural. O nível estático foi o parâmetro que mais influenciou os resultados desse índice, seguido pela influência da litologia da zona vadosa.

Em ambos os métodos o mapeamento da vulnerabilidade apresentou contornos muito próximos ao mapeamento geológico, o que confirma a influência na classificação deste parâmetro no processo de avaliação da vulnerabilidade. Em vista disto, mostra-se evidente a importância dos perfis litológico-estruturais das obras de captação para que a avaliação da vulnerabilidade aponte resultados mais próximos das condições reais do ambiente. O grande número de parâmetros e intervalos adotados no método DRASTIC possibilitou o maior detalhamento da vulnerabilidade, em comparação com o método GOD; no entanto, a grande demanda de dados confere dificuldade na aplicação do método, pois muitas vezes as informações requeridas não estão disponíveis, sendo necessário adotar algumas generalizações ou o uso de dados inferidos, o que por sua vez pode comprometer o resultado final. Na comparação entre os dois métodos, conclui-se que o índice DRASTIC apresenta melhores resultados para trabalhos de escala local, que requeiram o maior detalhamento da área, como por exemplo, EIA/Rimas e Planos Diretores. Já o índice GOD apresenta resultados mais satisfatórios para trabalhos regionais, como zoneamentos territoriais.

As fontes de contaminação identificadas na área de estudo foram classificadas como pontuais e com potencial de carga contaminante elevado e moderado, exceto nos casos do cemitério, classificado com potencial de carga contaminante reduzido, e do saneamento *in situ*, classificado como fonte difusa e potencial moderado. As atividades referentes à siderurgia e refinaria apresentaram os maiores potenciais de cargas contaminantes do local.

As áreas residenciais apresentaram potencial moderado de contaminação devido à baixa porcentagem de casas assistidas pela rede coletora de esgotos. Dada a ausência de atividades potencialmente contaminantes, a área demarcada como Estação Ecológica não

apresenta perigo de contaminação, mesmo situando-se em terrenos de vulnerabilidade alta e moderada pelo método GOD; porém, o sentido do fluxo das águas subterrâneas apresentado neste trabalho indica que a Estação Ecológica encontra-se a jusante das áreas de maior perigo de contaminação, o que configura uma situação de perigo potencial.

As áreas de maior perigo de contaminação também correspondem aos setores destinados à siderurgia e refinaria, embora a vulnerabilidade da área da refinaria tenha sido classificada como moderada. As áreas residenciais e aquelas destinadas as termelétricas apresentam perigo moderado de contaminação, com exceção de algumas porções que apresentaram maior perigo de contaminação em decorrência da alta vulnerabilidade. A relação entre a vulnerabilidade e o perigo de contaminação permite concluir que mesmo em áreas onde as condicionantes naturais oferecem proteção aos seus aquíferos, o uso de determinadas substâncias tóxicas, avaliado pelo potencial de contaminação da carga contaminante, pode anular as barreiras naturais nas situações em que o solo, a zona vadosa e a profundidade da água subterrânea não sejam suficientes para a atenuação de tais contaminações.

No processo de instalação do CIPP, a vulnerabilidade dos aquíferos e o perigo de contaminação foram subestimados no que diz respeito à orientação do local onde cada atividade industrial poderia ser instalada, dado que uma das atividades de maior potencial de contaminação, no caso a siderurgia, encontra-se instalada nas áreas de maior vulnerabilidade, tanto pelo índice GOD quanto pelo índice DRASTIC. Enquanto isso, as atividades ligadas às termelétricas, que apontam potencial moderado de contaminação, encontram-se alocadas em áreas mapeadas com índices de vulnerabilidade muito baixa e baixa, pelo índice DRASTIC, e moderada, pelo índice GOD.

Por fim, a aplicação dos métodos de vulnerabilidade e perigo de contaminação e a caracterização periódica das águas subterrâneas e do nível estático reiteram a fragilidade ambiental de grande parte da área destinada à instalação do CIPP e reforçam a necessidade de monitoramento intensivo das atividades industriais, no que diz respeito ao cumprimento das normas ambientais a prevenção de contaminações. Os métodos de avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos podem ser instrumentos eficazes de planejamento ambiental, com vistas à proteção dos aquíferos e conseqüente manutenção da qualidade das águas subterrâneas, desde que usados preventivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H. E PETTY, R.J. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Using Hydrogeologic Settings. **U.S. Environmental Protection Agency Report**, EPA/600/2-87/035, EUA, 1987, 163p.
- ALHEIROS, M.M.; LIMA FILHO, M. A Formação Barreiras. Estudos Geológicos: Revisão da Faixa Sedimentar Costeira de Pernambuco, Paraíba e parte do Rio Grande do Norte. **Estudos Geológicos**. Recife, n.º. 10, (Série B), 1991, pp. 77-88.
- ALHEIROS, M.M., LIMA FILHO, M., MONTEIRO, F.A., OLIVEIRA FILHO, J.S. Sistemas Depositionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. **Anais...** Belém: SBG, vol. 2, 1988, p. 753-760.
- ARAI, M. A Grande Elevação Eustática do Mioceno e sua Influência na Origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP** (Série Científica). São Paulo, vol. 6, 2006, pp. 1-6.
- AUGE, M. Vulnerabilidade de Aquíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**. Curitiba, n.º. 4, 2004, pp.85-103.
- BARROS, M.N.A. **Geologia da região de Primavera, Catuana (CE)**. 1986. 97 p. Relatório (Graduação em Geologia). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1986.
- BARBOSA, C.M.; CARVALHO, A.M. *ET AL.* Avaliação do Perigo de Contaminação do Sistema Aquífero Guarani em sua Área de Afloramento do Estado de São Paulo Decorrente das Atividades Agrícolas. **Águas Subterrâneas**. São Paulo, vol. 25, n.º1, 2011, 1-14 pp.
- BERROCAL, R.A.; HYPOLITO, R.; EZAKI, S. Comportamento de Íons de Metais Pesados (Pb e Ni) e de Compostos Nitrogenados em Área Industrial Impactada no Município de Cubatão/SP. **Águas Subterrâneas**. São Paulo, vol. 27, n.º. 1, 2013, p. 19-36.
- BIANCHI, L.; PADILHA M.W.M.; TEIXEIRA, J.E.M. Recursos de Água Subterrânea na Região Metropolitana de Fortaleza. Fatores Condicionantes. *In*: Plano de Aproveitamento dos Recursos Hídricos na RMF, Fase I Fortaleza. SEPLAN/AUMEF, vol. 1, 1984, 139 p.
- BRAGA, M.O. **Vulnerabilidade dos Sistemas Hidrogeológicos da APA de Ponta Grossa, Icapuí, CE**. 2006. 115 p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- BRANDÃO, L.R. **Diagnóstico Geoambiental e Principais Problemas de Ocupação do Meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza**. Projeto SINFOR. CPRM, Fortaleza, 1995, 88p.
- BRASIL. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS)**, 2013. Disponível em <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php> Acessado em Maio de 2012; Junho de 2013 e Janeiro de 2014.

BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria 2914 de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Publicada o DOU de 14/12/2011.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Publicada no DOU nº. 053, de 18/03/2005, p. 58-63.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº. 339, de 25 de setembro de 2003. Dispõe sobre a criação, normatização e o funcionamento dos jardins botânicos. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Publicada no DOU nº. 213, de 03/11/2005, p. 60-61.

BRASIL. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Mapa Geológico do Estado do Ceará.** Brasil, 2003. 1 mapa colorido. Escala 1:500.000.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Lei Federal nº. 9985 de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza, 2000. Publicada no DOU de 19/07/2000.

BRASIL. Lei Federal nº. 9.433 de 8 de janeiro de 1997 Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Publicado no DOU de 09/01/1997. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em 16 mai. 2012.

CASTANY, G. **Prospección y Explotación de las Águas Subterrâneas.** Barcelona: Ed. Omega S.A., 1975.

CASTRO, A.S.F.; MORO, M.F.; MENEZES, M.O.T. O Complexo Vegetacional da Zona Litorânea no Ceará: Pecém, São Gonçalo do Amarante. **Acta Botanica Brasílica.** Belo Horizonte, vol. 26, nº 1, 2012, p. 108-124.

CAVALCANTE, M.V.A. **Caracterização do Aquífero Costeiro do Pecém-CE com Base em Dados Geofísicos (FEM) e Hidrogeológicos.** 2006. 68 p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

CAVALCANTE, I.N. **Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará.** 1998. 164 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CAVALCANTE, I.N. Hidrogeologia de meios fissurados. **III Curso de Especialização em Hidrogeologia Aplicada.** Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 1997, 25 p.

CARVALHO, A.M.; CONICELLI, B.P. ET AL. Estão os Aquíferos da Região de Jurubatuba (São Paulo) sob Risco? *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO. 1, 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Revista Águas Subterrâneas (Suplemento), 2009, 10 p.

CEARÁ. Decreto Estadual nº 31.214 de 21 de maio de 2013. Declara em situação anormal, caracterizada como situação de emergência as áreas dos municípios do Estado do Ceará

afetadas pela seca e dá outras providências. Publicado no DOU de 22/05/2013. Disponível em <<http://imagens.seplag.ce.gov.br/PDF/20130522/do20130522p01.pdf>>. Acesso em 03.05.2014.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos/ Companhia de Gestao dos Recursos Hídricos. Avaliação Hidrogeológica Quali-Quantitativa do Campo de Dunas Pecém/Paracuru, no Estado do Ceará. Relatório Final. Fortaleza, 2011, 84p.

CEARÁ, CENTEC. Relatório de Impacto Ambiental do Complexo Industrial do Pecém. Elaborado para Secretaria de Infra-Estrutura (SEINFRA). Instituto Centro de Ensino Tecnológico. Fortaleza. Biblioteca da Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará, vol. 01, Tomo B1, Fortaleza, 2009.

CEARÁ. Zoneamento Ecológico Econômico do Ceará (Zona Costeira). Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR). SEMACE, Fortaleza, 2006, 150 p.

CEARÁ, SEINFRA. Plano de Desenvolvimento do Complexo Industrial e Portuário do Pecém na República Federativa do Brasil. JICA/SEPLAN/CEARAPORTOS/CIPP-GTP e SEINFRA, Fortaleza, 2006.

CEARA. Decreto Estadual nº. 25.708 de 17 de novembro de 1999. Declara de Utilidade Pública, para fins de desapropriação pelo Estado do Ceará, as áreas de terra que indica, situadas nos municípios de Caucaia e de São Gonçalo do Amarante, no Estado do Ceará. Publicado no DOU de 21/12/1999. Disponível em <http://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/2010/10/Decreto_25708.pdf>. Acesso em 15 jul 2013

CEARÁ. Decreto Estadual nº 24.957 de 05 de junho de 1998. Institui a Área de Proteção Ambiental do Pecém, 1998. Publicado no DOU de 08/06/1998. Disponível em <http://antigo.semace.ce.gov.br/biblioteca/legislacao/conteudo_legislacao.asp?cd=64>. Acesso em 15 jul.2013.

CEARÁ. Decreto Estadual nº 23.068 de 11 de fevereiro de 1994. Regulamenta o controle técnico das obras de oferta hídrica e dá outras providências. Publicado no DOU de Disponível em <<http://www.srh.ce.gov.br/index.php/component/content/article/13-legislacao/416-decreto-no-23068-de-11-de-fevereiro-de-1994>>. Acesso em 12 jul. 2013.

CEARÁ. Lei Estadual nº. 11.996 de 24 de julho de 1992. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos. Publicado no D.O.E. em 29/07/1992. Disponível em <<http://www.srh.ce.gov.br/images/legislacao/Lei11996%20Politica%20Estadual%20de%20Recursos%20Hidricos.pdf>> Acesso em 16 mai. 2012.

COSTA, W.D. Risco de Contaminação de Água Subterrânea: Conceitos e Prática. In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUL-SUDESTE, 1, 2007. Petrópolis. **Anais...** São Paulo: Revista Águas Subterrâneas (Suplemento), 2007, p. 345-351.

COSTA, M.L.M.; RIBEIRO, M.R.M.; REGO, J.C.; ALBUQUERQUE, J.P.T. Proposição de Critérios de Outorga para as Águas Subterrâneas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, vol. 16, nº.1, 2011, p. 105-113.

CUNHA, L.S. **Determinação da Vulnerabilidade Intrínseca à Poluição e Transporte de Contaminação: Uma Ferramenta para a Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos na**

Área do Porto do Pecém, CE. 2009. 166p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CUTRIM, A.O.; CAMPOS, J.E.G. (a). Aplicação dos Métodos GOD e DRASTIC para a Determinação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis/MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, vol. 15, nº. 2, 2010, 127-142 pp.

_____ (b). Avaliação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis com a Aplicação dos métodos GOD e POSH. **Revista de Geociências**. Rio Claro, vol. 29, nº. 3, 2010, 401-411 pp.

DAY, J.W.; Jr; GUNN, J.D.; FOLAN, W.J; *ET AL.* Emergence of complex societies after level-sea stabilized. EOS, Transactions, **American Geophysical Union**, vol. 8, nº. 15, 2007, p. 169-170.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Brasileiro de Classificação de solos. 2º ed., Rio de Janeiro, 2011, 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Mapas de Solos do Brasil. Rio de Janeiro, 2006. Escala 1: 5.000.000.

FOSTER, S. HIRATA, R.C.A. GOME, D. D'ELIA, M. E PARIS, M. Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Groundwater Management Advisory Team (GW-MATE). The World Bank, Washington, D.C, 2002, 101p.

FOSTER, S. HIRATA, R.C.A. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. CEPIS/PAHO/WHO. Lima, 1988, 78 p.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME) Série Histórica do Posto São Gonçalo do Amarante. Disponível em <<http://www.funceme.br/index.php/areas/tempo/download-de-series-historicas>>. Acesso em 24 mai. 2013.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PLANEJAMENTO DO CEARÁ (IPLANCE). **Atlas do Ceará**. Fortaleza, 1997, 65p.

GIFONI, F.J.M. **Logística, Transporte e Desenvolvimento: A Contribuição do Complexo Industrial e Portuário do Pecém/CE**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

GOMES, M.C.R. **Análise Situacional Qualitativa Sobre as Águas Subterrâneas de Fortaleza, Ceará/Brasil como Subsídio à Gestão dos Recursos Hídricos**. 2013. 213 p. Tese (Doutorado em Geologia). Departamento de Geologia. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

GOMES, S.A.; SABADIA, J.B.; DUARTE, C.R. Análise da Vulnerabilidade Natural das Águas Subterrâneas do Complexo Portuário Industrial do Mucuripe, Fortaleza/CE. **Revista de Geociências**. Rio Claro, vol. 29, nº. 3, 2010, p 369-374.

GUERRA JR., W.G. **Aspectos Hidrogeológicos no Município de Aquiraz, Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará**. 2005. 86 p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

HIRATA, R.C.A.; FERNANDES, A.J. Vulnerabilidade à Poluição dos Aquíferos. *In*: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3º ed. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID, 2008, 812 p.

HIRATA, R.C.A.; REBOUÇAS, A.C. La Protección de los Recursos Hídricos Subterráneos: una visión integrada, basada en perímetro de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. **Boletín Geológico y Minero**. Madrid, vol. 110, 1999, pp. 79-92.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). CENSO 2010. Departamento de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2010, 2010. Disponível em <www.ibge.gov.br> Acesso em 20 fev. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS DO CEARÁ (IPECE). Ceará em Números, 2010. Disponível em <http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara_em_numeros/2010/economico/04_1_de_produto_interno_bruto.pdf> Acesso em 14 mai. 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS DO CEARÁ (IPECE). Base Cartográfica do Pólo Ceará Costa do Sol, Fortaleza, 2009, Escala 1: 20.000.

INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS DO CEARÁ (IPECE). Ceará em Mapas. Mapa de Solos, Fortaleza, 2007, Escala 1:600.000.

INSTITUTO GEOLÓGICO DE SÃO PAULO; COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL; DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA. Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Instituto Geológico. Coord: Ricardo A. Hirata, São Paulo, 1997, 144p.

KÖPPEN, W. (1948) **Climatologia com um Estudo de los climas de la Tierra**. Version de Hendrichs, P.R. México, Fonde de Cultura Econômica. 478p.

LANDIM, P.M.B. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. 1ª ed. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998, 226p.

LEITE, C.E.S.; MOBUS, G. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da região de rochas sedimentares da bacia do Rio Mundaú/Ceará. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Revista Águas Subterrâneas (Suplemento). 1998, 8p.

LERNER, D.; ISSAI, A.; SIMMERS, I. Groundwater Recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge. **International Association of Hydrogeologist**. Hanover, vol.8, 1990, 345p.

LIMA, L.C.; MORAIS, J.O.; SOUZA, M.J.N. **Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará**. 1ª ed. Fortaleza: Ed. FUNCEME, 2000, 268p.

LÓPEZ VERA, F. Estrategias para Proteger las Águas Subterráneas de la Contaminación. **Revista Latino-Americana de Hidrogeología**, nº. 2, Curitiba, 2002, p. 9-16.

MACHADO, J.L.F. Arqueologia Geológica: As escavações e perfurações no subsolo através dos tempos, 2005. Inédito. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/rehi/simposio/pa/AGUA%20SUBTERRANEA\(Machado\).pdf](http://www.cprm.gov.br/rehi/simposio/pa/AGUA%20SUBTERRANEA(Machado).pdf)>. Acesso em: 10 jan. 2014.

MARINHO, J.M.L.; VASCONCELOS, S.M.S. Estudos Geométricos e Hidrogeológicos da Zona Costeira da Bacia do Rio Cauípe, Caucaia, Ceará, Brasil. *In*: CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1, 2000. Fortaleza. Anais... Fortaleza, 2000, 19p.

MARINHO J.M.L. *ET AL*. Resistividade Elétrica Aplicada a Prospecção de Água Subterrânea no Campus Universitário do Pici, Fortaleza/CE. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 12, 1986. João Pessoa. Anais... João Pessoa, 1986, p. 476-490.

MORAIS, J.B.A. **Fundamentos Hidrogeológicos do Aquífero Dunas para a Gestão dos Recursos Hídricos da Região Metropolitana de Fortaleza/Ceará**. 2011. 96 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MULLER, C.C.; ROSARIO, M.; CORSEUIL, H.X. Investigações Forenses e a Estimativa da Idade da Fonte em Áreas Contaminadas por Gasolina com Etanol. **Águas Subterráneas**, São Paulo, vol. 27, nº. 3, 2013, p. 88-100.

NOGUEIRA, M.L. Caracterização Geoambiental e Hidrogeológica da Zona Portuária do Pecém. **Revista de Geologia**. Fortaleza, vol. 18, nº. 2, 2005, pp. 203-212.

NOGUEIRA, M.L., AUGUSTO, V. A. **Reconhecimento de áreas mais susceptíveis a contaminação por hidrocarbonetos através da caracterização geológica e hidrogeológica na Zona Portuária do Pecém/CE**. 2004. 91 p. Relatório (Graduação em Geologia). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

OLIVEIRA, C.E.S.; ABREU, L.H.P. **Cartografia Digital aplicada ao estudo da Vulnerabilidade dos Sistemas Aquíferos do Município de Fortaleza/CE**. 2006. 92 p. Relatório de Graduação (Graduação em Geologia). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**, 2003. Disponível em <http://www.pnud.org.br/IDH/Atlas2003.aspx?indiceAccordion=1&li=li_Atlas2003> Acessado em 01 mar. 2013.

PUERARI, E. **Vulnerabilidade de aquíferos à contaminação por derivados de petróleo**. 2005. 174 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Ambiental). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

REGINATO, P.A.R.; AHLERT S. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo, vol. 27, nº. 2, 2013, p. 32-46.

RIBEIRO, D.M.; ROCHA, W.F.; GARCIA, A.J.V. Vulnerabilidade Natural à Contaminação dos Aquíferos da Sub-Bacia do Rio Siriri, Sergipe. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo, vol. 25, nº1, 2011, p. 91-102.

ROCHA, E., LUNA, R., SOUZA FILHO, F.A., STUDART, T. Avaliação do nível de saturação da aqüedagem na Bacia Hidrográfica do Acaraú/Ceará. *In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, 11, 2012, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2012, 21 p.

RUSSO, A.S. **Estimativa de Vulnerabilidade de Aquíferos utilizando Sistemas de Informação Geográfica e Geoestatística – UGRHI-PCJ**. 2009. 95 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SABADIA, J.A.B. **Impacto del Vertedero de Jangurussu en los Recursos Hídricos de la Ciudad de Fortaleza (Estado do Ceará, Brasil)**. 2001. 292 p. Tese (Doutorado em Ciências Geológicas). Facultad de Geología. Universitat de Barcelona, Barcelona, 2001.

SANTOS, P.R.P.; OLIVEIRA, I.B. Estudo de Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero Marizal na Região de Influência do Pólo Industrial de Camaçari (PIC)-Bahia. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo, vol. 27, nº. 1, 2013, 1-18 pp.

SÃO GONÇALO DO AMARANTE. Decreto Municipal nº. 799 de 08 de março de 2003. Dispõe sobre a criação do Jardim Botânico de São Gonçalo do Amarante.

SILVA, F.H.M. **Caracterização Vegetacional e Florística de uma área de Dunas da Estação Ecológica do Pecém, Litoral Cearense**. 2000. 25p. Trabalho de Graduação (Graduação em Biologia). Centro de Ciências, Departamento de Biologia. Fortaleza, 2000.

SOUZA, M.J.N. Contribuição ao Estudo das Unidades Morfo-Estruturais do Estado do Ceará. **Revista de Geologia**. Fortaleza, vol. 1, nº1, 1988, pp. 73-91.

STANLEY, D.J & WARNE, A.G. Holocene sea-level change and early human utilization of deltas. **Geol. Soc. America Today**, vol. 17, nº. 12, 1998, pp. 1-8.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. **Publications in climatology**, vol. 3, nº1, 1955, 104 p.

VASCONCELOS, S.M.S. Estimativa da Recarga Subterrânea a partir do Balanço Hídrico: Exemplo de Fortaleza, CE. **Revista de Geologia**, Fortaleza, vol. 7, 1994, p. 27-34.

VIANA, N.O. **Vulnerabilidade e Risco à Poluição do Sistema Aquífero Médio: entre o Crato e Missão Velha, Bacia do Araripe, Ceará**. 2007. 117 p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

XAVIER, J.M.; GAGLIARDI, S.; *ET AL.* Evaluación de la Vulnerabilidad a la Contaminación del Acuífero Mercedes en el Área Metropolitana de la Ciudad de Paysandú: Comparación de los Métodos GOD Y DRASTIC. **Revista Latino-Americana de Hidrogeología**. Curitiba, nº 4, 2004, p.35-45.

APÊNDICE A - POÇOS CADASTRADOS EM CAMPO

APÊNDICE A -POÇOS CADASTRADOS EM CAMPO

Dados cadastrais												
POÇO	COD	UTM (E)	UTM(N)	Município	Endereço	Uso	Tipo	Situação	Material	Idade	Prof (m)	Cota (m)
1	P-01	519996	9600657	Caucaia	CE-421	doméstico	cacimba	instalado	concreto	não sabe	9,3	30
2	P-02	520026	9600894	Caucaia	CE-421	doméstico	cacimba	instalado	concreto	25 anos	12	35
3	P-03	520062	9601074	Caucaia	CE-421 - Chácara da Vovó Nilce	doméstico	tubular	instalado	PVC	não sabe	60	30
4	P-04	520022	9602602	Caucaia	R. Paulo Ferreira da Rocha, 220	doméstico	tubular	instalado	-	6	-	25
5	P-05	520150	9602732	Caucaia	R. Paulo Ferreira da Rocha, 483	doméstico	tubular	instalado	PVC	15 anos	6	25
6	P-06	519650	9602883	Caucaia	R.Maria Neusa Miranda, 3	doméstico	cacimba	instalado	concreto	25 anos	10	20
7	P-07	519791	9602554	Caucaia	R.Maria Neusa Miranda, s/n - Matões	doméstico	cacimba	instalado	concreto	10 anos	6	20
8	P-08	519536	9602576	Caucaia	R.Maria Neusa Miranda,esq 540 Matões	doméstico	tubular	instalado	PVC	não sabe	-	25
9	P-09	519705	9602681	Caucaia	R.Maria Neusa Miranda, 541 Matões	doméstico	tubular	instalado	geomecânico	15 anos	-	25
10	P-10	518955	9604838	Caucaia	R. Francisco Sabino 09 -Baixa das Carnaúbas	irrigação	tubular	instalado	PVC	10 anos	12	25
11	P-11	516645	9607182	São Gonçalo	R. Demésia Prata - Colonia Pecém	doméstico	tubular	instalado	PVC	1 ano	10	10
12	P-12	516146	9606586	São Gonçalo	Sítio Varjota	doméstico	tubular	instalado	PVC	1 ano	6	10
13	P-13	512881	9606603	São Gonçalo	Parada (mercado J.C)	doméstico	tubular	instalado	PVC	-	9	15
14	P-14	516705	9601249	São Gonçalo	Sítio Bolso	doméstico	cacimba	instalado	concreto	30 anos	6	30
15	P-16	516484	9600391	São Gonçalo	Bolso	doméstico	tubular	instalado	PVC	1 ano	7	30
16	P-17	515000	9601013	São Gonçalo	Bolso	irrigação	cacimba	instalado	concreto	3 anos	7	25
17	P-18	511457	9602712	São Gonçalo	Acende Candeia- Chacara Vovo Barroso	irrigação / doméstico	tubular	instalado	PVC	25 anos	9	20
18	P-19	512264	9605267	São Gonçalo	R. Estrela s/n	doméstico	tubular	instalado	PVC	13 anos	9	25
19	P-20	512406	9606197	São Gonçalo	Loteamento Pecem Tropical - Quadra 20	irrigação/doméstico	tubular	instalado	PVC	20 anos	8	20
20	P-21	518577	9604250	Caucaia	R. Leodoro Freire s/n	doméstico	cacimba	instalado	concreto	-	12	35
21	P-22	517927	9606279	São Gonçalo	Pecém	doméstico	tubular	instalado	PVC	10 anos	16	25
22	P-23	517608	9606841	São Gonçalo	Sítio Retiro	doméstico	tubular	instalado	PVC	1mês	5	10
23	P-24	515209	9606516	São Gonçalo	Sítio Paul	doméstico	tubular	instalado	PVC	2 anos	6	10
24	P-25	514358	9606940	São Gonçalo	Sítio Prata - Pecém	doméstico	tubular	instalado	PVC	20 anos	6	10

OBS: O poço nº 15 foi destruído logo após o cadastro inicial

**APÊNDICE B - MEDIDAS DE TEMPERATURA, AVALIAÇÃO ORGANOLÉPTICA
E CARGA HIDRÁULICA DOS POÇOS MONITORADOS
(FEVEREIRO/MAIO/SETEMBRO/DEZEMBRO)**

APÊNDICE B - MEDIDAS DE TEMPERATURA, AVALIAÇÃO ORGANOLÉPTICA E CARGA HIDRÁULICA DOS POÇOS MONITORADOS

Dados Gerais				Fevereiro					Maio				
POÇO	COD	Prof (m)	Cota	Carga Hidráulica	T °C	Cor	Cheiro	Material em Suspensão	Carga Hidráulica	T °C	Cor	Cheiro	Material em Suspensão
1	P-01	9,3	30	21.7	29	Incolor	Não	Não	21.50	28.5	Incolor	Não	Não
2	P-02	12	35	25.07	29	Incolor	Não	Não	24.95	29	Incolor	Enxofre e ferroso	Fragmento vegetal
3	P-03	60	30	22.57	29	Incolor	Não	Não	23.17	29.0	Incolor	Não	Não
4	P-04	-	25	-	29	Incolor	Não	Não	-	29.0	Incolor	Ferroso	Não
5	P-05	6	25	19.8	30	Incolor	Não	Não	18.82	27.8	Incolor	Não	Não
6	P-06	10	20	17.83	29	Incolor	Não	Não	17.90	30.0	Esbranquiçada	Ferroso	Não
7	P-07	6	20	18.42	30	Levemente Turva	Não	Silte e argila	18.88	28.6	Amarelada	Matéria-orgânica	Não
8	P-08	-	25	22.74	29.9	Incolor	Não	Fragmento vegetal	23.10	29.0	Incolor	Ferroso	Não
9	P-09	-	25	16	30	Amarelada	Enxofre	Não	18.48	29.0	Amarelada	Ferroso	Não
10	P-10	12	25	19.58	29	Amarelada	Enxofre	Não	16.56	30.0	Amarelada	Ferroso	Não
11	P-11	10	10	5.36	30	Incolor	Não	Não	6.03	29.9	Incolor	Matéria-orgânica	Não
12	P-12	6	10	8.3	29.8	Esbranquiçada	Enxofre	Sedimentos	9.07	30.5	Esbranquiçada	Ferroso	Fragmento vegetal
13	P-13	9	15	9.73	30	Incolor	Não	Não	10.20	29.8	Incolor	Não	Fragmento vegetal
14	P-14	6	30	27.86	28.7	Turva	Ácido	Sedimentos	28.50	28.0	Incolor	Ferroso	Não
15	P-16	7	30	24.48	30	Incolor	Não	Não	25	28.3	Incolor	Enxofre e ferroso	Não
16	P-17	7	25	18.35	29.2	Turva	Não	Sedimentos	22.00	28.6	Esbranquiçada	Não	Não
17	P-18	9	20	16.2	30	Incolor	Não	Não	17.30	30.0	Incolor	Ferroso	Não
18	P-19	9	25	20.65	31	Incolor	Ácido	Não	21.44	29.5	Incolor	Não	Não
19	P-20	8	20	14.73	30	Incolor	Ácido	Não	15.30	28.9	Incolor	Ferroso	Não
20	P-21	12	35	27.49	28.3	turva	Não	Não	26.71	30.0	Esbranquiçada	Ferroso	Não
21	P-22	16	25	12.26	28.9	Incolor	Não	Não	12.40	28.4	Incolor	Ferroso	Não
22	P-23	5	10	6	29.1	Incolor	Matéria-orgânica	Não	6.30	29.4	Esbranquiçada	Não	Fragmento vegetal
23	P-24	6	10	6.24	29	Incolor	Matéria-orgânica	Não	6.6	29.6	Esbranquiçada	Matéria-orgânica	Não
24	P-25	6	10	6.76	29.7	Incolor	Não	Não	7.54	30.6	Incolor	Ferroso	Não

APÊNDICE B - MEDIDAS DE TEMPERATURA, AVALIAÇÃO ORGANOLÉPTICA E CARGA HIDRÁULICA DOS POÇOS MONITORADOS

Dados Gerais				Setembro					Dezembro				
POÇO	COD	Prof (m)	Cota	Carga Hidráulica	T °C	Cor	Cheiro	Material em Suspensão	Carga Hidráulica	T °C	Cor	Cheiro	Material em Suspensão
1	P-01	9,3	30	21.60	28.3	Incolor	Inodoro	Não	20.70	28.8	Incolor	Enxofre	Não
2	P-02	12	35	-	-	-	-	-	24.37	29.10	Incolor	Ferroso	Não
3	P-03	60	30	23.14	25,8	Incolor	Inodoro	Não	22.35	29.3	Incolor	Inodoro	Fragmento vegetal
4	P-04	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	P-05	6	25	18.55	27.2	Incolor	Ferroso	Não	18.40	31.2	Incolor	Inodoro	Não
6	P-06	10	20	17.79	29.4	Incolor	Ferroso	Fragmento vegetal	17.55	29.9	Incolor	Ferroso	Fragmento vegetal
7	P-07	6	20	18.61	27.9	Amarelada	Inodoro	Fragmento vegetal	18.25	29.6	Amarelada	Ferroso	Fragmento vegetal
8	P-08	-	25	22.90	28.8	Esbranquiçada	Ferroso	Fragmento vegetal	-	-	-	-	-
9	P-09	-	25	19.20	29.3	Incolor	Ferroso	Fragmento vegetal	-	-	-	-	-
10	P-10	12	25	19.25	31.0	Amarelada	Não	Não	-	30.0	Amarelada	Inodoro	Não
11	P-11	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	P-12	6	10	8.90	28.9	Incolor	Ferroso	Não	8.63	28.8	Amarelada	Ferroso	Não
13	P-13	9	15	10.40	29.4	Incolor	Inodoro	Não	7.70	29.9	Incolor	Ácido	Não
14	P-14	6	30	28.20	28.1	Amarelada	Enxofre	Não	27.63	27.9	Esbranquiçada	Enxofre	Não
15	P-16	7	30	24.5	28.7	Incolor	Inodoro	Fragmento vegetal / sedimentos	23.83	29.3	Incolor	Ferroso	Não
16	P-17	7	25	21.23	28.4	Esbranquiçada	Inodoro	Fragmento vegetal / sedimentos	18.31	28	Esbranquiçada	Inodoro	Fragmento vegetal
17	P-18	9	20	-	-	-	-	-	16.42	30.80	Incolor	Inodoro	Não
18	P-19	9	25	21.10	29.1	Incolor	Inodoro	Fragmento vegetal	20.30	29.7	Incolor	Ferroso	Fragmento vegetal
19	P-20	8	20	15.35	28.6	Incolor	Ferroso	Não	14.70	29.7	Incolor	Enxofre e óleo	Fragmento vegetal
20	P-21	12	35	27.82	29.3	Incolor	Inodoro	Fragmento vegetal	27.00	29.2	Incolor	Inodoro	Não
21	P-22	16	25	12.25	30	Incolor	Ferroso	Não	11.88	28.1	Incolor	Ferroso	Não
22	P-23	5	10	5.25	28.9	Incolor	Inodoro	Não	5.30	29.6	Incolor	Inodoro	Não
23	P-24	6	10	6.45	30.6	Esbranquiçada	Ferroso	Não	6.30	-	-	-	-
24	P-25	6	10	7.50	29.1	Incolor	Enxofre e	Não	6.92	30.4	Incolor	Ferroso	Não

**ANEXO A – BANCO DE DADOS DE POÇOS OBTIDO POR MEIO DO SISTEMA DE
INFORMAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (SIAGAS, 2013)**

ANEXO A - CADASTRO DE POÇOS OBTIDO POR MEIO DO SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

n° Poço	POÇO	COD	UTM (N)	UTM (E)	Município	Localidade	Construtor	Uso	Tipo	Situação	Data de construção	Prof (m)	Vazão (m ³ /h)	NE (m)	CE (μS/cm)
1	CAC/CE/105	2300018362	9602466	519502	Caucaia	Sítio Matões	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1992	8.0	-	-	-
2	CAC/CE/292	2300013918	9598464	518596	Caucaia	E.M.Io.Grau G.Pereira	-	doméstico	tubular	Não instalado	01/01/1900	60.0	-	-	-
3	CAC/CE/293	2300013922	9598891	518806	Caucaia	Itapara	-	múltiplo	tubular	Equipado	01/01/1900	32.0	13.20	-	728
4	CAC/CE/294	2300013923	9598438	519285	Caucaia	Faz. Sta. Clara/Itapara	-	múltiplo	tubular	Equipado	01/01/1900	-	-	-	1888
5	CAC/CE/295	2300013924	9598310	519153	Caucaia	Faz. Sta. Clara/Itapara	-	irrigação	tubular	Equipado	01/01/1900	-	-	-	1612
6	CAC/CE/296	2300013925	9597881	519523	Caucaia	Faz. Sta. Clara/Itapara	-	irrigação	tubular	Equipado	01/01/1900	-	-	-	-
7	CAC/CE/297	2300013926	9598350	519640	Caucaia	Sítio Suzana/Itapara	-	doméstico	tubular	Não instalado	01/01/1992	80.0	0.60	-	872
8	CAC/CE/298	2300013927	9604805	518605	Caucaia	Baixa das Carnaúbas	-	-	tubular	Fechado	01/01/1900	-	-	-	217
9	CAC/CE/299	2300013928	9604440	519124	Caucaia	Baixa das Carnaúbas	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1900	15.0	-	-	371
10	CAC/CE/300	2300013929	9603048	519916	Caucaia	Sítio Dindão/Matões	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1900	15.0	-	-	296
11	CAC/CE/459	2300014757	9601884	520208	Caucaia	Baixa da Paula	-	doméstico	tubular	Fechado	01/01/1900	15.0	-	-	-
12	CAC/CE/460	2300014758	9603120	519778	Caucaia	Baixa da Paula	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1900	15.0	-	-	128
13	CAC/CE/609	2300015271	9604540	519124	Caucaia	Baixa das Carnaúbas	-	-	tubular	Fechado	01/01/1900	-	-	-	-
14	CAC/CE/612	2300015274	9603050	519926	Caucaia	Sítio Dindão/Matões	-	-	tubular	Equipado	01/01/1900	-	-	-	-
15	CAC/CE/645	2300018357	9603730	517195	Caucaia	Sítio Giraz	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1900	9.0	-	-	-
16	CAC/CE/646	2300018358	9604822	518665	Caucaia	Sítio Baixa das Carnaúbas	-	múltiplo	tubular	Fechado	01/10/1996	18.0	-	-	-
17	PS039/1994	2300000197	9603221	511538	São Gonçalo	Acende Candeia	SOHIDRA	doméstico	tubular	-	19/04/1994	60.0	1.44	4.5	-
18	SGA/CE/064	2300017861	9600949	515413	São Gonçalo	Bolso	Diamante	múltiplo	tubular	Equipado	01/12/1997	50.0	1.20	-	640
19	SGA/CE/065	2300017862	9600856	515687	São Gonçalo	Bolso	-	doméstico	tubular	Fechado	01/08/1986	73.0	-	-	-
20	SGA/CE/113	2300018317	9606669	512364	São Gonçalo	Parada	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1996	7.0	-	-	-
21	SGA/CE/114	2300018318	9606303	512331	São Gonçalo	Parada	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1996	9.0	-	-	-
22	SGA/CE/115	2300018319	9604259	511839	São Gonçalo	Faz. Ypioca	-	-	tubular	Equipado	01/01/1900	6.0	-	-	-
23	SGA/CE/116	2300018320	9604249	511849	São Gonçalo	Faz. Ypioca	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1900	6.0	-	-	-
24	SGA/CE/135	2300018337	9606969	514553	São Gonçalo	Sítio Paul	-	Irrigação	tubular	Equipado	01/01/1995	40.0	-	-	-
25	SGA/CE/136	2300018338	9606059	513933	São Gonçalo	Sítio Prata	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1992	6.0	-	-	-
26	SGA/CE/137	2300018339	9607052	514852	São Gonçalo	E.1º.Grau Gertrudes P. Lima	-	doméstico	tubular	Equipado	01/09/1997	7.0	-	-	-
27	SGA/CE/138	2300018340	9604578	515664	São Gonçalo	Sítio Almofala	-	-	amazonas	Fechado	01/01/1992	3.7	-	-	-
28	SGA/CE/139	2300018341	9606680	516113	São Gonçalo	Sítio Varjota	-	doméstico	tubular	Equipado	01/12/1991	5.0	-	-	-
29	SGA/CE/142	2300018344	9607110	516538	São Gonçalo	Lot. Colônia do Pecém	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1900	9.0	-	-	-
30	SGA/CE/143	2300018345	9604295	516543	São Gonçalo	Sítio Gregório	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1900	7.3	-	-	-
31	SGA/CE/148	2300018350	9601244	516588	São Gonçalo	Sítio Bolso / salomão	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1991	6.0	-	-	-
32	08	2300015272	9604640	519324	Caucaia	Baixa das Carnaúbas	-	-	tubular	Equipado	01/01/1900	-	-	-	-
33	28	2300003713	9602800	520300	Caucaia	Matões	SOHIDRA	-	tubular	-	15/12/1993	60.0	2,2	7	-
34	29	2300014759	9600931	520116	Caucaia	Matões	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1900	25.0	-	-	-
35	CAC/CE/541	2300015228	9597501	520067	Caucaia	Mixira	PHD	doméstico	tubular	Equipado	15/4/1993	50.0	8	9,1	231
36	34	2300014679	9597713	520287	Caucaia	Planalto do Cauípe	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1900	-	-	-	473
37	35	2300014680	9597729	520371	Caucaia	Planalto do Cauípe	-	doméstico	tubular	Fechado	01/01/1900	50.0	-	-	-
38	37	2300018354	9604830	519818	Caucaia	Pousada Maresia	-	múltiplo	tubular	Equipado	01/01/1992	18.0	-	-	-
39	47	2300018356	9604233	519178	Caucaia	Sítio Matões	-	doméstico	tubular	Equipado	01/01/1900	9.0	-	-	-