



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

João Bosco Andrade de Moraes

**VULNERABILIDADE E RISCOS À POLUIÇÃO / CONTAMINAÇÃO DAS  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA ÁREA DO COMPLEXO INDUSTRIAL  
PORTUÁRIO DO PECÉM – ESTADO DO CEARÁ**

Recife  
2016

JOÃO BOSCO ANDRADE DE MORAIS

Geólogo, Universidade Federal do Ceará, 1974  
Mestre em Hidrogeologia, Universidade Federal do Ceará, 2011

**VULNERABILIDADE E RISCOS À POLUIÇÃO / CONTAMINAÇÃO DAS  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA ÁREA DO COMPLEXO INDUSTRIAL  
PORTUÁRIO DO PECÉM – ESTADO DO CEARÁ**

Tese de Doutorado que apresenta à Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelo Prof. Dr. Almany Costa Santos (UFPE), e pelo Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante (UFC), como preenchimento parcial dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Geociências. Área de Concentração: Hidrogeologia e Geologia Aplicada.

Recife

2016

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M827v    Morais, João Bosco Andrade de.  
          Vulnerabilidade e riscos à poluição / contaminação das águas subterrâneas na  
          área do complexo industrial portuário do Pecém – Estado do Ceará / João  
          Bosco Andrade de Morais. – 2016.  
          240 folhas, il., gráfs., tabs.

          Orientador: Prof. Dr. Almany Costa Santos.  
          Coorientador: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.  
          Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
          Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2016.  
          Inclui Referências, Apêndices e Anexos.

          1. Geociências. 2. Águas subterrâneas. 3. Aquífero. 4.  
          Poluição. 5. Vulnerabilidade. I. Santos, Almany Costa. (Orientador).  
          II. Cavalcante, Itabaraci Nazareno. (Coorientador). III. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2016-233

**JOÃO BOSCO ANDRADE DE MORAIS**

**VULNERABILIDADE E RISCOS À POLUIÇÃO / CONTAMINAÇÃO DAS  
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA ÁREA DO COMPLEXO INDUSTRIAL  
PORTUÁRIO DO PECÉM – ESTADO DO CEARÁ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Geociências.

Aprovada em: 01 / 07 / 2016

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Almany Costa Santos (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Valdir do Amaral Vaz Manso (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

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

---

Prof. Dr. Enéas Oliveira Lousada (Examinador Externo)  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria da Conceição Rabelo Gomes (Examinador Externo)  
Universidade Federal do Cariri

A minha família, em especial meus pais, que sempre acreditaram no meu potencial e me dedicaram carinho e apoio em todos os momentos da minha vida, tendo papel importante no êxito da minha trajetória profissional.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por entender e captar minhas angústias, transformando-as em energia criadora e com sabedoria iluminar meu caminho.

Gostaria em especial de agradecer aos meus pais pelo exemplo de vida pela solidez de princípios que sempre me guiaram pelo caminho do amor, carinho, respeito, responsabilidade, confiança e solidariedade.

À minha mulher Inah Abreu, pelo carinho e o respeito diante de minha opção por envolver-me com a produção da Tese.

Ao orientador Prof. Dr. Almany Costa Santos (UFPE), pela paciência, disponibilidade, ajuda e conhecimento dispensados.

Ao orientador, Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante (UFC), que com sabedoria e profissionalismo não mediu esforços para que este trabalho pudesse ser concluído.

Ao Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos da Assembleia Legislativa do Ceará (CAECE), na pessoa do Presidente ex-Deputado Lula Moraes, que permitiu a participação do autor na equipe técnica do Pacto pelo Pecém.

A Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará, nas pessoas dos Eng.º Otacílio Borges e André Pierre, que disponibilizaram o acesso ao acervo técnico da Secretaria.

Aos membros da Banca Examinadora, pela contribuição ao aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Luís Parente, pelas orientações técnicas e incentivos dados nos momentos decisivos.

Aos colegas: Amélia Menezes, Marcos Alves, Maria Clara, Homero Benevides, Cecílio, Evilázio, Joel, Vitoriano Brito, Marcelo, Rafael Mota e Mariana Aquino, pela contribuição nesta Tese.

Ao Geólogo Zoltan Romero pela revisão do método de Vulnerabilidade GATENK, utilizado na Tese.

Ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, em especial o orientador Prof. Dr. Almany Costa Santos e o Secretário do Curso de Pós-Graduação Igor Bandim, por nos conduzir a novos conhecimentos e informações, com dinamicidade e profissionalismo, por suas colaborações para que pudéssemos nos tornar profissionais responsáveis, com um conjunto enorme de conhecimentos e informações agregados durante o curso.

Reconheço todas as dificuldades que enfrentei durante o meu curso de Doutorado e sei, também, que a conquista do meu sonho está sendo alcançada pelo apoio e incentivo que recebi. A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, o meu eterno agradecimento.

O conhecimento e o saber, vem dos livros e professores, a sabedoria da vida e dos humildes

A sabedoria não se alcança com os acertos mas com a aprendizagem dos erros.

Nós somos o que fazemos repeditas vezes. Portanto a excelência não é um ato, mas um hábito.

**(Aristóteles)**



## RESUMO

A implantação de grandes indústrias em região costeira imprime uma situação preocupante de grande envergadura. As águas subterrâneas e as poluições advindas das plantas industriais exigem avaliações que consideram o conjunto de variáveis inter-relacionadas. Nesse sentido, o desenvolvimento de métodos de avaliação da vulnerabilidade aquífera representa o primeiro passo na direção de uma gestão sustentável da água subterrânea é muito importante para produzir informações para o planejamento do uso do território e da água. Esta Tese teve como objetivo a avaliação da vulnerabilidade aquífera natural e do risco de contaminação na área do Complexo Industrial Portuário do Pecém (CIPP), concebido para abrigar diversas atividades industriais na faixa costeira dos municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia – Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará. A metodologia se encontra compartimentada em 3 (três) etapas: a de coleta de dados secundários que permitiu refletir e compreender os princípios e métodos aplicados na qualificação da vulnerabilidade; a dos indicadores primários, que se propõe obter dados empíricos com base no cadastramento de poços sendo gerado um arquivo de dados para a elaboração das bases temáticas. A etapa final da Tese, trata da avaliação da metodologia de mensuração da vulnerabilidade intrínseca, utilizando uma metodologia que comporta um elenco de variáveis, selecionadas para a aplicação do método são: Granulometria (G); Ambiente Hidrogeológico (A); Transmissibilidade (T); Nível Estático (NE); e Condutividade Hidráulica (K), a análise das variáveis propiciou o entendimento adequado para compor a equação do método utilizado, sendo o nome GATNEK um acrônimo das variáveis. Os aquíferos são representados pelos Sistemas Dunas, Barreiras e Manto de Intemperismo do Cristalino, livres e com nível estático predominantemente inferior a 10m de profundidade. A vulnerabilidade oscila de baixa a alta, sendo moderada para o Sistema Barreiras e alto para o Sistema Dunas. Este modelo permite o cálculo de vulnerabilidade natural e de risco à poluição para aquíferos granulares freáticos.

**Palavras-chave:** Águas subterrâneas. Aquífero. Poluição. Vulnerabilidade.

## ABSTRACT

The implementation of major industries in coastal region show us a worrying situation of great magnitude. Groundwater and pollution arising from industrial plants require evaluations that consider the set of interrelated variables. In this sense, the development of methods of assessment of aquifer vulnerability figures the first step towards sustainable management of groundwater which is very important to produce information for planning the use of land and water. This thesis aimed to evaluate the natural aquifer vulnerability and the risk of contamination in the area of the Complex Industrial Port of Pecém (CIPP), designed to house several industrial activities in the coastal strip of the municipalities of São Gonçalo do Amarante and Caucaia, Metropolitan Region of Fortaleza, Ceará. The methodology is compartmentalized into three (03) steps: a collection of secondary data that allowed to reflect and understand the principles and methods applied in the qualification of vulnerability; the primary indicators, which aims to obtain empirical data based on registration of wells being generated a data file for the preparation of thematic bases. The final step of the thesis deals with the evaluation of the measurement methodology of the intrinsic vulnerability, using a methodology that includes a list of variables selected for the application of the method are: Particle size (G); Lithology aquifer (A); Transmissivity (T); Static level (NE); and Hydraulic Conductivity (K), the analysis of the variables provided the proper understanding to compose the equation of the method used, and the name GATNEK acronym one of the variables. The vulnerability ranges from low to high, with moderate to high barriers system and to the Dunas System. This model allows with total security the natural vulnerability of calculation and risk of pollution to groundwater granular aquifers.

**Keywords:** Groundwater. Aquifer. Pollution. Vulnerability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### FIGURAS

FIGURA 1 -	Pátio de contêiner de minério de ferro, no porto do Pecém/CE.....	54
FIGURA 2 -	Panorâmica do terreno em construção da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP).....	59
FIGURA 3 -	Exposição do Pier marítimo e correia transportadora de minério de carvão, Energia Pecém.....	62
FIGURA 4 -	Correia transportadora de carvão mineral interceptando cordões da Formação Dunas.....	63
FIGURA 5 -	Pátio de estocagem de carvão mineral importado da Usina Termelétrica Porto de Pecém e MPX Pecém II.....	63
FIGURA 6 -	Paisagem do pátio de estocagem do carvão mineral da Termelétrica Energia Pecém.....	64
FIGURA 7 -	<i>Layout</i> da Energia Termoelétrica do Pecém.....	65
FIGURA 8 -	Visão detalhada da correia transportadora do minério de carvão que abastece a Termoelétrica Energia Pecém, extensão da correia transportadora de 12,5 Km.....	70
FIGURA 9 –	Unidade Canindé: A) Exibição da textura do muscovita-gnaisse em amostra de mão (520324mE /9596290 mN); Intercalação entre muscovita gnaisse e biotita xisto. Em (B) a intercalação ocorre em escala decamétrica, enquanto em (C) é em escala métrica (510560mE / 9592034mN); e solo marrom-escuro (D) argiloso a argilo-arenoso derivado dos muscovita gnaisses. Notar muscovita como pequenos grãos de cor creme clara na foto (519882mE / 9592368mN).....	96
FIGURA 10 -	Unidade Canindé: A) Dique pegmatítico discordante à foliação com cerca de 10 cm de espessura recortando a rocha biotita xisto (515343mE / 9597676mN); B) Corpo	

	pegmatítico lenticular concordante à foliação presente no biotita xisto (515.343mE / 9.597.676mN); C) Famílias de fraturas evidenciadas no biotita xisto; D) Bloco de pegmatito associado à lente supracitada; e detalhe de um dique pegmatítico. Notar que o centro do dique possui grande conteúdo em mica, indicando ao menos duas fases de abertura do fraturamento (515343mE / 9597676mN).....	98
FIGURA 11 -	Unidade Canindé: afloramento e blocos métricos de quartzito em corte da rodovia CE-085.....	99
FIGURA 12 -	Unidade Canindé: A) Exibição da cor rósea característica do ortognaisse e de sua textura média, com baixo grau de deformação (520974mE / 9593108mN); B) e C) Frente de lavra da empresa Britap. Notar diques de diorito recortando o pacote rochoso (522944mE / 9590513mN); e D) Visualização do plano de deslizamento do diorito, gerado ao concentrar a deformação dúctil recebida (522944mE9590513mN).....	100
FIGURA 13 -	Unidade Canindé: A) Exposição da textura do migmatito, encontrado em corte no rio Cauípe (515510mE / 9591433mN); B) Contato revelando intercalação entre gnaisse migmatítico e biotita-granada xisto (516216mE / 9591282mN); C) exibição da textura do biotita-granada xisto. Notar pontos avermelhados representando o mineral granada (515344mE / 9590820mN); D) Dique aplítico recortando gnaisse migmatítico. Não há borda de reação e o contato do dique é brusco (514605mE / 9591074mN).....	101
FIGURA 14 -	Unidade Independência: aspecto textural dos gnaisses (511033mE / 9599922mN).....	102
FIGURA 15 -	Diagrama de polo das atitudes de foliações encontradas na área de estudo. A alta concentração de polos indica as atitudes extraídas do dobramento no centro-norte da	

	área, com direção de mergulho para NE.....	103
FIGURA 16 -	Diagrama de polo e roseta para fraturas encontradas na campanha de campo. É importante notar que os sistemas de fraturamento são de modo geral subverticalizados.....	104
FIGURA 17 -	A) Rocha epidotizada evidenciando metassomatismo causado por fluido hidrotermal (517971mE/9590154mN); e B) pegmatito metassomatizado com ocorrência de epidoto (Pontos esverdeados na rocha) (517971mE / 9590154mN).....	105
FIGURA 18 -	Coluna litoestratigráfica.....	106
FIGURA 19 -	Formação Barreiras: exibição das texturas encontradas das rochas da Formação Barreiras. Em (A) é observada a fácies média com aspecto pintalgado produzido por nódulos laranja-avermelhados (521170mE/9596460mN); e em (B) a fácies fina a média, de textura mais homogênea (514251mE / 9602186mN).....	107
FIGURA 20 -	Fraturas neotectônicas na Formação Barreira, localizadas na margem esquerda da CE421, em passivos ambientais que ocorrem numa área bastante escavada Pecém/São Gonçalo do Amarante.....	108
FIGURA 21 -	Paisagem de sedimentos pertencentes a Formação Dunas, ao longo da Rodovia CE/115, Pecém/São Gonçalo do Amarante.....	110
FIGURA 22 -	Paisagem de sedimentos pertencentes a Formação Dunas, ao longo da CE/422, Pecém/São Gonçalo do Amarante.....	110
FIGURA 23 -	Reúne as informações de cota batimétrica, área e volume da lagoa do Pecém.....	116
FIGURA 24 -	Sistema adutor d'água do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). Ferrovia e CE-155. (Trecho BR-222 ao Porto do Pecém).....	119
FIGURA 25 -	Exposição dos sedimentos areno-argilosos Barreiras na Rodovia CE 155.....	132

FIGURA 26 - Exposição das dunas recobertas por densa vegetação. Visualização ao longo da CE-155.....	136
FIGURA 27 - Rodovia CE-155 de acesso ao Porto do Pecém, interceptando cordão de dunas.....	137
FIGURA 28 - Correia transportadora de minério de carvão, interligando o Porto do Pecém à Termoelétrica Energia Pecém.....	140
FIGURA 29 - Seção hidrogeológica dos poços que abastecem a CEARAPORTOS.....	142
FIGURA 30 - Poço escavado localizado em área de pequena irrigação de hortaliças no Pecém.....	144
FIGURA 31 - Sistema para avaliação do índice de vulnerabilidade de aquífero através do método GOD.....	167
FIGURA 32 - Fluxograma do processo de obtenção das variáveis e Índice de Vulnerabilidade GATNEK.....	178

## GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Variação da precipitação anual para o período de 1974 a 2014 na Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante .....	78
GRÁFICO 2 - Média mensal de precipitação no período de 2010 a 2014 para a Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante.....	79
GRÁFICO 3 - Média mensal de temperatura.....	80
GRÁFICO 4 - Balanço hídrico para o CIPP.....	85
GRÁFICO 5 - Balanço hídrico para o CIPP – período 1995-2015.....	86
GRÁFICO 6 - Profundidade (m) dos poços do conjunto dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.....	122
GRÁFICO 7 - Profundidade (m) dos poços do conjunto dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.....	123
GRÁFICO 8 - Profundidade do nível estático (m) dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.....	124
GRÁFICO 9 - Vazão (m <sup>3</sup> /h) dos poços dos sistemas aquíferos na área	

de pesquisa.....	125
GRÁFICO 10 - Tipo de poço do conjunto dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.....	125
GRÁFICO 11 - Uso das águas subterrâneas dos poços dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.....	126
GRÁFICO 12 - Profundidade do nível estático no Meio Fissural da área de pesquisa.....	128
GRÁFICO 13 - Profundidade dos poços construídos no Meio Fissural na área de pesquisa.....	128
GRÁFICO 14 - Profundidade dos poços construídos no Meio Fissural na área de pesquisa.....	129
GRÁFICO 15 - Vazão (m <sup>3</sup> /h) dos poços construídos no Meio Fissural na área de pesquisa.....	130
GRÁFICO 16 - Profundidade do nível estático (m) dos poços construídos no Aquífero Barreiras.....	132
GRÁFICO 17 - Profundidade dos poços construídos no Aquífero Barreiras na área de pesquisa.....	133
GRÁFICO 18 - Profundidade dos poços construídos no Aquífero Barreiras na área de pesquisa.....	133
GRÁFICO 19 - Vazão dos poços construídos no Aquífero Barreiras na área de pesquisa.....	134
GRÁFICO 20 - Nível estático (m) do Aquífero Dunas na área de pesquisa.....	137
GRÁFICO 21 - Profundidade (m) dos poços do Aquífero Dunas na área de estudo.....	138
GRÁFICO 22 - Profundidade (m) dos poços do Sistema Dunas na área de pesquisa.....	139
GRÁFICO 23 - Vazão (m <sup>3</sup> /h) dos poços no Aquífero Dunas na área de estudo.....	139
GRÁFICO 24 - Teor de sódio nas águas subterrâneas dos sistemas aquíferos.....	151
GRÁFICO 25 - Índice de turbidez nas águas subterrâneas dos sistemas aquíferos.....	155

## **QUADROS**

QUADRO 1 - Empresas em processo de instalação no CIPP.....	71
QUADRO 2 - Empresas instaladas no CIPP.....	73
QUADRO 3 - Dados do levantamento batimétrico.....	115
QUADRO 4 - Principais métodos de estudo da vulnerabilidade de aquíferos.....	162
QUADRO 5 - Classes de vulnerabilidade do índice GOD.....	168
QUADRO 6 - Síntese com equações e variáveis dos principais métodos.....	172

## **MAPAS**

MAPA 1 - Á área localiza-se nas sub-bacias do Gereraú e Cauípe da área do CIPP, nos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante/CE.....	31
MAPA 2 - Batimetria da lagoa do Pecém.....	117



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Distribuição de frequência de velocidade e direção dos ventos no Pecém. São Gonçalo do Amarante/Ceará.....	76
TABELA 2 - Comparação entre volumes anuais precipitados observados em quatro estações meteorológicas.....	79
TABELA 3 - Fatores para correção de evapotranspiração potencial mensal segundo Thornthwaite para a região estudada.....	82
TABELA 4 - Balanço hídrico para o CIPP. Período 1993-2016.....	85
TABELA 5 - Cotas batimétricas com respectivas áreas e volumes associados referentes à lagoa do Pecém.....	116
TABELA 6 - Volumes máximos e vazões regularizadas dos reservatórios.....	120
TABELA 7 - Valores médios do Sistema Aquífero Dunas em Pecém e São Gonçalo do Amarante, Ceará.....	141
TABELA 8 - Características gerais dos poços tubulares da CEARAPORTOS, Pecém/CE.....	141
TABELA 9 - Avaliações dos testes de aquífero realizados em 03 poços na área pesquisada. Obtenção dos parâmetros K (m/h), T (m <sup>2</sup> /h) e porosidade efetiva (%)......	142
TABELA 10 - Estatística descritiva geral das variáveis para todos os poços da área de estudo.....	146
TABELA 11 - Estatística descritiva geral das variáveis para os poços do Meio Fissural da área de estudo.....	147
TABELA 12 - Estatística descritiva geral das variáveis para os poços do Aquífero Barreiras da área de estudo.....	147
TABELA 13 - Estatística descritiva geral das variáveis para os poços do Aquífero Dunas da área de estudo.....	148
TABELA 14 - Análise microbiológica das águas subterrâneas.....	156
TABELA 15 - Geoestatística descritiva geral dos parâmetros de análise de água dos poços.....	157
TABELA 16 - Pesos inferidos para os fatores DRASTIC.....	164
TABELA 17 - Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC.....	164

TABELA 18 - Classes de vulnerabilidade do índice SINTACS.....	165
TABELA 19 - Pesos em função de parâmetros e vulnerabilidade.....	166
TABELA 20 - Índice de vulnerabilidade do método Maia.....	169
TABELA 21 - Índices de vulnerabilidade da profundidade da superfície freática no E.Kv.....	170
TABELA 22 - Índices de vulnerabilidade da zona saturada.....	170
TABELA 23 - Valores representativos das classes granulométricas em sedimentos ou litotipos.....	179
TABELA 24 - Valores representativos do ambiente hidrogeológico.....	180
TABELA 25 - Valores representativos das classes de transmissibilidade na área do CIPP.....	181
TABELA 26 - Valores representativos das classes de nível estático na área do CIPP.....	182
TABELA 27 - Valores representativos de condutividade hidráulica.....	183
TABELA 28 - Índice de vulnerabilidade do ambiente hidrogeológico Dunas com aplicação do método GATNEK em área no CIPP/RMF/Ceará, Brasil.....	185
TABELA 29 - Índice de vulnerabilidade do ambiente hidrogeológico Barreiras com aplicação do método GATNEK em área no CIPP/RMF/Ceará, Brasil.....	186
TABELA 30 - Índice de vulnerabilidade do ambiente hidrogeológico do Cristalino com aplicação do método GATNEK em área do CIPP/RMF/Ceará, Brasil.....	187

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAS -	Associação Brasileira de Águas Subterrâneas
ANEEL -	Agência Nacional de Energia Elétrica
APA -	Área de Proteção Ambiental
APP -	Área de Proteção Permanente
BH -	Balanço Hídrico
CAGECE -	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CE -	Ceará
CENTEC -	Instituto Centro de Ensino Tecnológico
CFN -	Companhia Ferroviária do Nordeste
CIP -	Complexo Industrial do Pecém
CIPP -	Complexo Industrial Porto do Pecém
CIPS -	Complexo Industrial Portuário do Suape
COGERH -	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos
CONAMA -	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONDEPE -	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco
CPRM -	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSP -	Companhia Siderúrgica do Pecém
DHN -	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DNAPL -	<i>Dense Non Aqueous Phase Liquids</i>
EFC -	Estrada de Ferro Carajás
EIA/RIMA -	Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto no Meio Ambiente
EMAP -	Empresa Maranhense de Administração Portuária
ENE -	Este-Nordeste
ESE -	Este-Sudeste
ETP -	Evapotranspiração Potencial
ETR -	Evapotranspiração Real
EUA -	Estados Unidos da América
EVA -	Estado de Viabilidade Ambiental
EXC -	Excedente Hídrico

FIDEM -	Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife
FNS -	Ferrovias Norte-Sul
FUNCEME -	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GASFOR -	Gasoduto Guamaré-Pecém
GIS -	Sistema de Informação Geográfica
GNL -	Gás Natural Liquefeito
GPS -	Sistema de Posicionamento Global
IAH -	Associação Internacional de Hidrogeologia
IBGE -	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH -	Índice de Desenvolvimento Humano
le -	Infiltração eficaz
IEPRO -	Instituto de Estudos, Pesquisas e Projetos
INPH -	Instituto Nacional de Pesquisas Hidráulicas
It -	Infiltração Total
JICA -	Agência de Cooperação Internacional Japonesa
LII -	Limite Inferior de Inflamabilidade
LSI -	Limite Superior de Inflamabilidade
MAPITOBA -	Maranhão, Piauí, Tocantins e Bahia
MEU -	Macrozona de Expansão Urbana
MHC -	Macrozona Especial de Proteção do Patrimônio Histórico-Cultural
MLT -	Macrozona Especial de Lazer e Turismo
MPA -	Macrozona Especial de Proteção Ambiental de Uso Sustentável
MPR -	Macrozona Especial de Proteção Ambiental Rigorosa
MR -	Macrozona Rural
MS -	Ministério da Saúde
MU -	Macrozona Urbana
NE -	Nível Estático
PAC -	Programa de Aceleração do Crescimento
PE -	Pernambuco
PDPFOR -	Plano Diretor Participativo de Fortaleza
pH -	Potencial Hidrogeniônico

PIB -	Produto Interno Bruto
PPP -	Perímetro de Proteção de Poço
PRAD -	Plano de Recuperação da Área Degradada
PRODETUR -	Programa de Desenvolvimento do Turismo
PROGERIRH -	Programa de Gestão de Recursos Hídricos
QAV -	Querosene de Avião
RMF -	Região Metropolitana de Fortaleza
SEINFRA -	Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará
SEMA -	Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Ceará
SEMACE -	Superintendência do Meio Ambiente do Estado do Ceará
SEP -	Secretaria Especial dos Portos
SGA -	São Gonçalo do Amarante
SIAGAS -	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG -	Sistema de Informação Geográfica
SIN -	Sistema Interligado Nacional
SIRGAS -	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SRH -	Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará
STD -	Sólidos Totais Dissolvidos
SUAPE/PE -	Complexo Industrial Portuário de Suape em Pernambuco
UFBA -	Universidade Federal da Bahia
UFC -	Universidade Federal do Ceará
UFMA -	Universidade Federal do Maranhão
UFPE -	Universidade Federal de Pernambuco
UTE -	Usina Termoelétrica
VMP -	Valor Máximo Permitido
ZCTI -	Zona de Convergência Intertropical
ZPE-	Zona de Processamento de Exportação
ZPEC -	Zona de Proteção Ecológica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	26
1.1	RELEVÂNCIA / CONTEXTUALIZAÇÃO.....	27
1.2	CONTRIBUIÇÃO DA TESE.....	29
1.3	ASPECTOS GERAIS E LOCALIZAÇÃO.....	31
1.4	OBJETIVOS.....	32
1.4.1	<i>Geral</i> .....	32
1.4.2	<i>Específicos</i> .....	32
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	34
2.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	34
2.2	CADASTRO DE POÇOS.....	35
2.2.1	<i>Etapas de campo</i> .....	35
2.2.2	<i>Cadastro das fichas de poços</i> .....	35
2.3	ETAPA DE LABORATÓRIO.....	36
2.4	ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS.....	36
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	38
3.1	NA ÁREA DO CIPP E NO ESTADO DO CEARÁ.....	38
3.2	NO BRASIL E NO MUNDO.....	41
<b>4</b>	<b>EXPERIÊNCIAS AMBIENTAIS NOS PORTOS E COMPLEXOS INDUSTRIAIS DA REGIÃO NORDESTE BRASILEIRA</b> .....	49
4.1	COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DE CAMAÇARI/BA	49
4.2	SISTEMA PORTUÁRIO DE ITAQUI/MA.....	51
4.3	COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM/CE...	53
4.3.1	<i>Caracterização ambiental do CIPP</i> .....	54
4.3.2	<i>Aspectos hidrogeológicos</i> .....	54
4.3.3	<i>Unidades de conservação</i> .....	55
4.3.3.1	Estação Ecológica do Pecém.....	55
4.3.3.2	Área de Proteção Ambiental do Pecém.....	56
4.4	COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DE SUAPE/PE....	56
<b>5</b>	<b>CONCEPÇÃO DAS PRINCIPAIS INDÚSTRIAS IMPLANTADAS E EM FASE DE IMPLANTAÇÃO</b> .....	59

5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	59
5.2	REGASEIFICAÇÃO.....	60
5.3	USINA TERMELÉTRICA ENERGIA PECÉM.....	62
5.3.1	Impactos ambientais causados por usinas termelétricas.....	66
5.4	TANCAGEM.....	67
5.5	INDÚSTRIA CIMENTEIRA.....	67
5.6	GASODUTOS.....	68
5.7	ÁREA PORTUÁRIA.....	69
<b>6</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA.....</b>	<b>74</b>
6.1	CLIMATOLOGIA.....	74
6.1.1	<i>Condições meteorológicas e hidrológicas.....</i>	<i>74</i>
6.1.2	<i>Ventos.....</i>	<i>76</i>
6.1.3	<i>Precipitação.....</i>	<i>77</i>
6.1.4	<i>Temperatura.....</i>	<i>80</i>
6.1.5	<i>Balanco hídrico.....</i>	<i>81</i>
6.1.6	<i>Metodologia.....</i>	<i>81</i>
6.1.7	<i>Resultados e discussão.....</i>	<i>84</i>
6.2	VEGETAÇÃO.....	86
6.2.1	<i>Ambientes do Complexo Litorâneo Setentrional.....</i>	<i>87</i>
6.2.2	<i>Ambiente praiano.....</i>	<i>87</i>
6.2.3	<i>Planície litorânea.....</i>	<i>87</i>
6.2.4	<i>Campos dunares.....</i>	<i>88</i>
6.2.5	<i>Tabuleiro pré-litorâneo.....</i>	<i>89</i>
6.3	GEOMORFOLOGIA.....	89
6.3.1	<i>Planície litorânea.....</i>	<i>90</i>
6.3.2	<i>Planície fluvial.....</i>	<i>91</i>
6.3.3	<i>Tabuleiros pré-litorâneos.....</i>	<i>91</i>
6.3.4	<i>Depressão sertaneja.....</i>	<i>93</i>
6.4	GEOLOGIA.....	93
6.4.1	<i>Unidades Paleoproterozóicas.....</i>	<i>94</i>
6.4.1.1	<i>Unidade Canindé.....</i>	<i>95</i>
6.4.1.2	<i>Unidade Independência.....</i>	<i>101</i>
6.4.2	<i>Geologia estrutural.....</i>	<i>102</i>

6.4.3	<i>Litoestratigrafia</i> .....	105
6.4.4	<i>Formação Barreiras</i> .....	107
6.4.5	<i>Dunas</i> .....	109
6.4.6	<i>Aluviões</i> .....	111
6.5	<b>HIDROGRAFIA</b> .....	111
6.5.1	<i>Bacia hidrográfica do rio Cauípe</i> .....	112
6.5.2	<i>Micro bacia hidrográfica do rio Gereraú</i> .....	112
6.5.3	<i>Lagoas interdunares</i> .....	113
6.6	<b>ÁGUAS SUPERFICIAIS</b> .....	113
6.6.1	<i>Batimetria da lagoa do Pecém</i> .....	114
6.6.2	<i>Disponibilidade hídrica superficial e uso das águas</i> .....	117
6.6.3	<i>Demandas hídricas e outorgas</i> .....	120
<b>7</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA</b> .....	122
7.1	<b>DOMÍNIOS SISTÊMICOS HIDROGEOLÓGICOS</b> .....	126
7.1.1	<i>Manto de Intemperismo</i> .....	127
7.1.2	<i>Sistema hidrogeológico Barreiras</i> .....	131
7.1.3	<i>Aquífero Dunas</i> .....	136
7.1.4	<i>Sistema Aluvionar</i> .....	144
7.2	<b>ESTATÍSTICA DOS SISTEMAS</b> .....	145
7.2.1	<i>Parâmetros Estatísticos Gerais</i> .....	145
7.2.2	<i>Parâmetros Estatísticos do Sistema Manto de Intemperismo</i>	146
7.2.3	<i>Estatística do Aquífero Barreiras</i> .....	147
7.2.4	<i>Estatística do Aquífero Dunas</i> .....	147
<b>8</b>	<b>QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS</b> .....	149
8.1	<b>CLASSIFICAÇÃO DE POTABILIDADE</b> .....	149
8.1.1	<i>Análises físico-químicas</i> .....	149
8.1.1.1	<i>Cloreto</i> .....	149
8.1.1.2	<i>Sódio</i> .....	150
8.1.1.3	<i>Potássio, Cálcio e Magnésio</i> .....	151
8.1.1.4	<i>Dureza total</i> .....	152
8.1.1.5	<i>Ferro total</i> .....	152
8.1.1.6	<i>N-Nitrato</i> .....	152
8.1.1.7	<i>pH</i> .....	153



8.1.1.8	Sólidos totais dissolvidos.....	154
8.1.1.9	Turbidez.....	155
8.1.1.10	Fluoreto.....	155
8.1.2	<i>Análises bacteriológicas</i> .....	156
8.2	ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS QUÍMICOS.....	157
<b>9</b>	<b>PRINCIPAIS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS</b> .....	<b>158</b>
9.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS E CONCEITOS.....	158
9.2	CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS PARA AVALIAR A VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS.....	160
9.3	CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS MÉTODOS.....	163
9.3.1	<i>Método DRASTIC</i> .....	163
9.3.2	<i>Método SINTACS</i> .....	165
9.3.3	<i>Método GOD</i> .....	166
9.3.4	<i>Método Maia</i> .....	168
9.3.5	<i>Método Superfície Freática (E) Permeabilidade (K) – Índice EKa</i> .....	170
9.3.6	Método Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI).....	171
<b>10</b>	<b>PROPOSTA DO MÉTODO DE VULNERABILIDADE (GATNEK) EM AMBIENTES HIDROGEOLÓGICOS</b> .....	<b>173</b>
10.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	173
10.2	VARIÁVEIS ADOTADAS NO MÉTODO GATNEK.....	174
10.3	EQUAÇÃO DO MÉTODO GATNEK.....	175
10.4	APLICAÇÃO DO MÉTODO GATNEK NO CIPP/RMF/CE.....	178
10.4.1	<i>Granulometria (G)</i> .....	178
10.4.2	<i>Ambiente Hidrogeológico (A)</i> .....	179
10.4.3	<i>Transmissibilidade (T)</i> .....	180
10.4.4	<i>Nível Estático (NE)</i> .....	181
10.4.5	<i>Condutividade hidráulica (K)</i> .....	182
10.4.6	<i>Discussão e resultados</i> .....	183
10.5	RISCO DE POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	189
<b>11</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>192</b>
11.1	CONCLUSÕES.....	192

11.2	RECOMENDAÇÕES.....	196
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>198</b>
	<b>LISTA DE APÊNDICES E ANEXOS.....</b>	<b>209</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A sociedade convive com diversos e grandes desafios, notadamente aqueles afetos à crescente demanda de água em quantidade e qualidade como consequência do aumento da taxa de crescimento populacional, implantação de indústrias, acréscimo da pegada hídrica, produção de alimentos, enfim, desenvolvimento, especialmente em áreas de escassez, em regiões áridas e semiáridas, como no caso da área pesquisada.

A previsível e constatada escassez de água em escala global é um dos muitos problemas complexos que estão intrinsecamente ligados aos processos econômicos, sociais e ambientais, o que amplia o necessário debate sobre a temática da água e o desenvolvimento sustentável.

Realiza três funções ambientais básicas (PEARCE; WARFORD, 1993):

- Fornecer insumo ao sistema produtivo;
- Prover utilidades estéticas e de lazer;
- É recurso natural essencial à vida humana e desempenha um papel fundamental de substrato à vida em diferentes ecossistemas e, por meio do ciclo hidrológico e da circulação atmosférica global, é elemento essencial para a regulação climática do planeta.

A pressão sobre a demanda dos recursos hídricos não cessa de aumentar com a expansão da economia, o que de maneira geral pressupõe mudanças nos padrões de consumo e no modo de utilização da água, fato visivelmente constatado na área do estudo.

Discussões forçam o direcionamento ao desenvolvimento de novos estudos, conceitos e ferramentas de gerenciamento que monitore o uso, a eficiência e a disponibilização física da água, notadamente na região do semiárido nordestino.

As técnicas atuais para o mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos são de pouca eficácia quando se deseja o gerenciamento e definição de prioridades quanto ao uso de um sistema aquífero que já se encontra sob exploração desordenada.

Com isso, ressalva-se que as ações preventivas são as mais indicadas para um gerenciamento sustentável dos recursos hídricos, com menor custo para a sociedade, evitando que poluentes de diversas origens atinjam as principais fontes de abastecimento de água numa região. Essas questões levam à necessidade urgente de medidas de proteção de aquíferos, de forma geral e, principalmente, das captações mais importantes para uma exploração sustentável.

Cabe ainda ressaltar que o uso dos mananciais subterrâneos em larga escala requer uma gestão adequada dos aquíferos em nível regional, incluindo o grau de vulnerabilidade intrínseca do aquífero, o conhecimento dos montantes de recarga e descarga nas bacias hidrográficas, os usos múltiplos de água e o conhecimento das questões relativas à qualidade da água derivada de fontes de contaminações diversas, incluindo a intrusão marinha.

O tema relativo à proteção e zoneamento de aquíferos vem sendo discutido no âmbito legal em nosso país. Ademais, os dispositivos institucionais para controle e fiscalização das atividades de exploração de águas subterrâneas são ainda incipientes. As primeiras iniciativas com vistas ao zoneamento de águas subterrâneas foram tratadas no Código Brasileiro de Águas (Decreto n.º 24.643/1934). Os artigos 96 a 101 já abordavam a questão da distância mínima entre os poços, além de problemas relacionados à poluição das águas dos poços de abastecimento.

De acordo com o Código Brasileiro de Águas, a construção de poços em terrenos públicos era permitida somente através de concessão administrativa. O Projeto de Lei nº 7.127/86, elaborado e proposto pela Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), foi um dos primeiros específicos para a gestão dos mananciais subterrâneos, destacando a necessidade de restrições da captação dessas águas através da delimitação de áreas de controle.

## 1.1 RELEVÂNCIA / CONTEXTUALIZAÇÃO

O Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) está concebido para abrigar atividades industriais diversas, numa área de 161,08 Km<sup>2</sup>, tendo como principais infraestruturas âncoras, as seguintes plantas industriais:

refinaria da Petrobrás; tancagem de derivado de petróleo e gás natural; indústrias distribuidoras de petróleo e gás; Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP); Polo Metal Mecânico; Termelétrica da Energia Pecém movida a carvão mineral; gasoduto; e três cimenteiras (Apodi, Votorantim e Mizu).

Atualmente, alguns projetos industriais desenvolvidos para a área estudada já foram implementados ou estão em fase de implantação. O conjunto das indústrias produzirá uma carga impactante aos sistemas ambientais, especialmente nos recursos hídricos da área potencialmente afetada e da sua área de influência, sendo que a magnitude destes efeitos irá também depender dos métodos e tecnologias a serem adotadas durante a execução de cada ação dos empreendimentos.

Assim, estão previstos vários tipos de cargas contaminantes correspondendo a resíduos sólidos e líquidos oriundos das plantas industriais. A disposição geológica, a pequena profundidade dos aquíferos Dunas e Barreiras, tipos de aquíferos, o relevo, o solo e a natureza da zona não saturada, dentre outros, constituem elementos que influem na vulnerabilidade dos aquíferos da região.

A crescente demanda de recursos ambientais como consequência da instalação do CIPP torna o meio ambiente subterrâneo, onde se destacam as águas subterrâneas, um patrimônio de valor imensurável funcionando como reserva estratégica, já que o abastecimento será, prioritariamente, de fonte superficial de água captada do açude Sítios Novos e do Sistema Castanhão através do canal de adução. Também é oportuno lembrar que o Estado do Ceará passa por um período de cinco anos de escassez de chuvas e que o Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto no Meio Ambiente (EIA/RIMA) do Complexo Industrial do Pecém aborda este assunto referindo-se a um déficit hídrico de 4m<sup>3</sup>/s para o CIPP.

O papel dos recursos hídricos como fator de desenvolvimento se torna relevante, desde que sejam protegidos de forma integrada com a ocupação do meio físico. A qualidade da água, aliada à prioridade de uma ocupação sustentável na concepção e implantação da área de estudo escolhida, evidencia a importância e relevância de estudar caracteres de vulnerabilidade de poluição/contaminação das águas subterrâneas.

Assim, é condição principal e urgente que se proceda a um estudo da vulnerabilidade e risco das águas subterrâneas, pois estas preocupações implicam na razão maior de desenvolvimento desta Tese.

A relevância para o desenvolvimento da presente Tese reside na importância de conhecer a suscetibilidade dos recursos hídricos subterrâneos aos efeitos adversos de cargas contaminantes impostas aos mesmos, principalmente, porque os sistemas aquíferos (Dunas, Aluvião e Barreiras) da área de estudo se encontram localizados em região do semiárido nordestino onde a escassez das águas de superfície é característica peculiar e a água subterrânea representa, muitas vezes, a única fonte alternativa de abastecimento.

Acredita-se que só se pode estar alerta diante de vulnerabilidade se houver consciência e informação, decorrentes das pesquisas sobre as mesmas.

## 1.2 CONTRIBUIÇÃO DA TESE

A presente Tese identificou a vulnerabilidade à poluição/contaminação industrial das águas subterrâneas freáticas na área do CIPP, no Estado do Ceará, importante para definir a localização de futuras plantas industriais, conhecendo o potencial poluidor das atuais; caracterizando e mapeando as fontes potenciais e efetivas de poluição; cadastrando as captações de água subterrânea na área do CIPP; elaborando o mapa do fluxo hídrico subterrâneo, importante para conhecer a direção de escoamento da água subterrânea; identificando as áreas de recarga e exutório das águas subterrâneas; e ações preventivas com a finalidade de proteger das ações de superexploração, contaminação pelo processo industrial, caracterizando e identificando, através da elaboração de uma base georreferenciada atualizada, a vulnerabilidade natural e o risco de poluição, advindos das plantas industriais inseridas nos cenários atual e futuro.

Nesta direção, foram avaliados os métodos clássicos de mensuração da vulnerabilidade com modificações das variáveis locais e individualizadas por sistema aquífero, a fim de se escolher a melhor metodologia que se

aplique às características físicas da área, abrangendo as ferramentas de pesquisa (Geologia, Hidrogeologia, e Hidroquímica) que simula, considerando os cenários (atual e futuro) as ofertas, demandas e usos da água subterrânea na área em estudo e oferece subsídios ao planejamento e a gestão dos recursos hídricos.

Outra contribuição da Tese trata-se da implantação do Método de Vulnerabilidade denominado GATNEK, onde as variáveis propostas para a determinação dos parâmetros relacionados ao cálculo do índice de vulnerabilidade, bem como o resultado para a equação do cálculo da mesma a partir das relações existentes aplicadas à área do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), resultando no método de vulnerabilidade GATNEK.

Este método tem a vantagem da adaptabilidade para uma escala de detalhe, diferente de outros métodos generalistas, que em escalas de projeto executivo podem resultar em uma única classe de vulnerabilidade. Com esta metodologia, qualquer área pode ser mapeada, pois a vulnerabilidade é um conceito relativo.

Nesta metodologia a vulnerabilidade é relativa à área da pesquisa, ou seja, classifica o ambiente de acordo com as características próprias. Por exemplo, pode indicar quais áreas de um mesmo sistema aquífero são mais, ou menos, vulneráveis, partindo da análise comparativa das variáveis propostas.

As variáveis selecionadas para a aplicação do método proposto são:

- G: Granulometria;
- A: Ambiente Hidrogeológico;
- T: Transmissibilidade;
- NE: Nível Estático; e
- K: Condutividade Hidráulica.

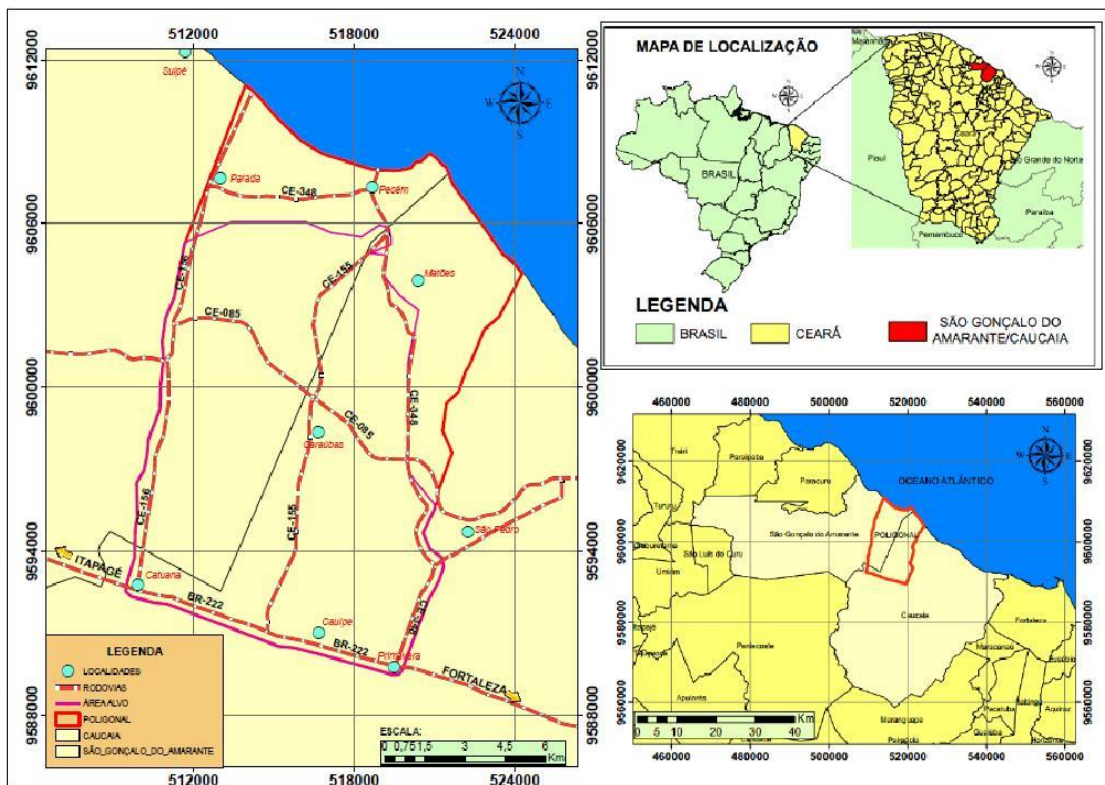
A análise das variáveis propiciou o entendimento do papel que cada uma exerce sobre os fatores naturais de proteção e suas relações com a vulnerabilidade, adequada para compor a equação do método utilizado. Utilizado sendo o nome – GATNEK um acrônimo das variáveis.

Esta Tese também será útil na otimização de decisões na área de gestão de recursos hídricos subterrâneos, sobretudo no aspecto de poluição de aquíferos. Pode-se destacar que o seu conteúdo é essencialmente técnico, sem deixar de lado os aspectos teóricos da ciência.

### 1.3 ASPECTOS GERAIS E LOCALIZAÇÃO

O Complexo Industrial Portuário do Pecém (CIPP) localiza-se nos municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia, 161,08 km<sup>2</sup>, na porção norte do Estado do Ceará e inserido na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Entretanto, a área estudada engloba 201,54 Km<sup>2</sup>. Seu acesso a partir da capital cearense, Fortaleza, pode ser feito pela BR-222. Em continuação à BR-222 tem-se acesso à porção Sul, tendo a porção Norte acesso pela CE-085 (Mapa 1).

Mapa 1 – Área localiza-se nas sub-bacias do Gereraú e Cauípe da área do CIPP, nos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante/CE.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.



## 1.4 OBJETIVOS

Esta pesquisa mensura a vulnerabilidade aquífera do CIPP, empenhando se tratar de uma ação bastante necessária para o planejamento ocupacional da área e na otimização de decisões na área de gestão de recursos hídricos subterrâneos, sobretudo no aspecto de poluição de aquíferos.

### 1.4.1 Geral

Realizar o mapeamento da vulnerabilidade e risco da área e aspectos da poluição advindos das plantas industriais, analisando os riscos inseridos nos cenários atual e futuro.

### 1.4.2 Específicos

- Elaborar mapas temáticos de Zoneamento tais como: Mapa de Fluxo, Mapa de Zoneamento de Cloretos, Mapa de Zoneamento de Dureza Total, Mapa de Zoneamento de Ferro Total, Mapa de Zoneamento de Nitrato, Mapa de Zoneamento de pH, Mapa de Zoneamento de STD, Mapa de Zoneamento de Nível Estático, Mapa de Zoneamento de Profundidade de Poços, Mapa de Zoneamento de Vazão, Mapa de Sistemas Hidrogeológicos, Mapa de Vulnerabilidade dos Sistemas Hidrogeológicos, Mapa de Risco das Águas Subterrâneas.
- Elaborar o Mapa de Sistemas Hidrogeológicos, Mapa de Distribuição dos Poços, Mapa de Fluxo Hídrico Subterrâneo, Mapa Tendencial de Qualidade de Água, Mapa de Uso e Ocupação do Solo, Mapa de Solos, Mapas da Vulnerabilidade, e Mapas de Risco das Águas Subterrâneas.
- Identificar áreas de recarga e descarga das águas subterrâneas, e ações preventivas com a finalidade de proteger das ações de superexploração, salinização pela cunha salina e poluição pelo processo industrial;

- Caracterizar as fontes potenciais e efetivas de poluição / contaminação;
- Aplicar modelo de vulnerabilidade, adequando seus parâmetros, na área do CIPP.
- Implantação do Método de Vulnerabilidade denominado GATNEK, onde as variáveis propostas para a determinação dos parâmetros relacionados ao cálculo do índice de vulnerabilidade, bem como o resultado para a equação do cálculo da mesma a partir das relações existentes aplicadas à área do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), resultando no método de vulnerabilidade GATNEK.
- Este método tem a vantagem da adaptabilidade para uma escala de detalhe, diferente de outros métodos generalistas, que em escalas de projeto executivo podem resultar em uma única classe de vulnerabilidade. Com esta metodologia, qualquer área pode ser mapeada, pois a vulnerabilidade é um conceito relativo.
- Nesta metodologia a vulnerabilidade é relativa à área da pesquisa, ou seja, classifica o ambiente de acordo com as características próprias. Por exemplo, pode indicar quais áreas de um mesmo sistema aquífero são mais, ou menos, vulneráveis, partindo da análise comparativa das variáveis propostas
- As variáveis selecionadas para a aplicação do método proposto são:
  - G: Granulometria;
  - A: Ambiente Hidrogeológico;
  - T: Transmissibilidade;
  - NE: Nível Estático;
  - K: Condutividade Hidráulica.
- A análise das variáveis propiciou o entendimento do papel que cada uma exerce sobre os fatores naturais de proteção e suas relações com a vulnerabilidade, adequada para compor a equação do método utilizado. Utilizado sendo o nome – GATNEK um acrônimo das variáveis.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia aplicada no presente trabalho abrangeu uma ampla diversidade de atividades direcionadas no sentido de facilitar a obtenção de subsídios para o desenvolvimento dos tópicos propostos, atingindo os objetivos do estudo.

### 2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente, foi realizada junto aos órgãos públicos e empresas privadas como Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Serviço Geológico do Brasil, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), monografias, dissertações e teses das universidades, principalmente da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e Universidade Federal do Ceará (UFC), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Secretarias Estadual e Municipal de Saúde, um levantamento bibliográfico de trabalhos de cunho hidrogeológico, geológico, hidrogeoquímico, bem como de trabalhos de pesquisa científica pertinentes à área de estudo.

Vale destacar o vasto levantamento de informações existente em estudos e projetos de infraestrutura e ambientais, EIAS/RIMAS, Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD), Estudo de Viabilidade Ambiental (EVA), Auditorias Ambientais e outros relatórios e documentos técnicos realizados para o Governo do Estado do Ceará na Área do CIPP, principalmente na Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA).

Nessas etapas foram atualizados e detalhados os mapas temáticos da área e as características hidrogeológicas imprescindíveis ao desenvolvimento da Tese. Tal material serviu para a composição de um arquivo de dados em meio digital que proporcionou a elaboração das bases temáticas específicas. As informações e/ou dados foram tratados, distribuídos e organizados em um

arquivo de dados em planilha *Excel*, gerando gráficos diversos, com levantamento planialtimétrico com o Sistema de Posicionamento Global (GPS) de precisão (Anexo I).

## 2.2 CADASTRO DE POÇOS

O cadastro dos poços teve a etapa de escritório que tratou de cadastrar as fichas técnicas de poços perante órgãos públicos (CPRM, SRH/CE, COGERH/SRH etc.). Em seguida, teve o desenvolvimento da etapa de campo, onde foram visitados os poços para complementar e confirmar os dados conseguidos na primeira etapa.

### 2.2.1 *Etapas de campo*

As etapas de campo ocorreram durante o primeiro semestre dos anos de 2014 e 2015 onde foram realizados cadastramento de poços e mapeamento hidrogeológico (Apêndice I).

Além das fichas técnicas de poços, foram cadastrado em campo, outros poços. Neste cadastro foram obtidas informações referentes à localização e propriedade dos poços, além de seus dados construtivos: profundidade, nível estático (NE), tipo de poços diâmetro de revestimento, descrição do perfil litológico, vazão, situação do poço e finalidade.

Em campo, também foram realizadas descrições litológicas e estruturais, para compor mais fielmente possível, o contexto hidrogeológico.

### 2.2.2 *Cadastro das fichas de poços*

O cadastro de poços contou com o auxílio de material bibliográfico, além de visitas *in loco*, com entrevista da comunidade, buscando informações como: construção do poço, nível estático, vazão, profundidade, idade, tipo de demanda e contexto hidrogeológico. Todos os poços foram georreferenciados e em 31 poços foram realizadas amostragem de água para análises laboratoriais dos caracteres químicos.

## 2.3 ETAPA DE LABORATÓRIO

As 31 (trinta e uma) amostras foram coletadas nas saídas diretas do sistema de bombeamento, acondicionadas em garrafas plásticas de 1.000 mL para as análises físico-químicas e além destas 9 (nove) amostras foram coletadas em garrafas esterilizadas de 200 mL para análises bacteriológicas. Após a coleta, as garrafas foram mantidas refrigeradas, hermeticamente fechadas, etiquetadas e acondicionadas em caixa térmica com gelo para, em seguida, serem encaminhadas ao Laboratório Bio Análise Pascoal, localizado em Fortaleza/CE, para a realização dos procedimentos laboratoriais.

Foram realizadas análises para 28 parâmetros físico-químicos, sendo eles: cor, sabor, odor, alcalinos em bicarbonato, alcalinos em carbonatos, alcalinos hidróxidos, alcalinidade total, cálcio, cloretos, condutividade elétrica, CO<sub>2</sub> livre, dureza de cálcio, dureza de magnésio, dureza total, ferro total, fluoretos, magnésio, nitratos, nitritos, oxigênio dissolvido, pH, potássio, residual de cloro, sódio, sólidos totais dissolvidos, salinidade e turbidez.

Para a avaliação da qualidade microbiológica das águas subterrâneas foi determinada a presença ou ausência de coliformes totais, coliformes fecais e bactérias heterotróficas.

Os resultados físico-químicos e microbiológicos foram comparados com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde e classificados em potáveis ou não potáveis.

## 2.4 ELABORAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS

Os dados obtidos foram convertidos para mapas temáticos (Mapa de Fluxo, Mapa de Zoneamento de Cloretos, Mapa de Zoneamento de Dureza Total, Mapa de Zoneamento de Ferro Total, Mapa de Zoneamento de Nitrato, Mapa de Zoneamento de pH, Mapa de Zoneamento de STD, Mapa de Zoneamento de Nível Estático, Mapa de Zoneamento de Profundidade de Poços, Mapa de Zoneamento de Vazão, Mapa de Sistemas Hidrogeológicos, Mapa de Vulnerabilidade dos Sistemas Hidrogeológicos, Perfis Hidrogeológico, Mapa de Risco das Águas Subterrâneas).

Tais mapas oferecem parâmetros técnicos de forma eficiente para maior entendimento do uso e ocupação do solo auxiliando os gestores na escolha de áreas apropriadas para instalação de indústrias, a fim de minimizar os riscos de contaminação dos aquíferos.

Complementando a metodologia foi implantado o Método de Vulnerabilidade denominado GATNEK, onde as variáveis propostas para a determinação dos parâmetros relacionados ao cálculo do índice de vulnerabilidade, bem como o resultado para a equação do cálculo da mesma a partir das relações existentes aplicadas à área do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), resultando no método de vulnerabilidade GATNEK.

Este método tem a vantagem da adaptabilidade para uma escala de detalhe, diferente de outros métodos generalistas, que em escalas de projeto executivo podem resultar em uma única classe de vulnerabilidade. Com esta metodologia, qualquer área pode ser mapeada, pois a vulnerabilidade é um conceito relativo.

Nesta metodologia a vulnerabilidade é relativa à área da pesquisa, ou seja, classifica o ambiente de acordo com as características próprias. Por exemplo, pode indicar quais áreas de um mesmo sistema aquífero são mais, ou menos, vulneráveis, partindo da análise comparativa das variáveis propostas.

As variáveis selecionadas para a aplicação do método proposto são:

- G: Granulometria;
- A: Ambiente Hidrogeológico;
- T: Transmissibilidade;
- NE: Nível Estático; e
- K: Condutividade Hidráulica.

A análise das variáveis propiciou o entendimento do papel que cada uma exerce sobre os fatores naturais de proteção e suas relações com a vulnerabilidade, adequada para compor a equação do método utilizado. Utilizado sendo o nome – GATNEK um acrônimo das variáveis.

### 3 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo procura-se relacionar os estudos científicos elaborados na região do CIPP e no Ceará, e parcela significativa dos principais trabalhos realizados nos países mais evoluídos no tema vulnerabilidade e risco de aquíferos.

#### 3.1 NA ÁREA DO CIPP E NO ESTADO DO CEARÁ

Marinho e Vasconcelos (2000) realizaram estudo hidrogeológico e geofísico na Bacia Hidrográfica do rio Cauípe, leste da área do CIPP, onde foram identificadas espessuras saturadas entre 20 e 30 metros dos aquíferos formados da planície litorânea (sedimentares). O trabalho também classificou como própria para consumo humano as águas dos aquíferos sedimentares da região (Dunas e Barreiras).

Nogueira e Augusto (2004); Nogueira *et al.* (2005) apresentaram uma caracterização geoambiental e hidrogeológica da área do Pecém a fim de reconhecer as áreas mais suscetíveis 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 à refinaria, um estudo de vulnerabilidade de aquíferos a contaminação por derivados de petróleo por meio da aplicação do método DRASTIC/PETRO e enfocou a confecção de mapas de vulnerabilidade de aquíferos a contaminação por derivados de petróleo, mais adequados para a área estudada. Como resultado foram gerados mapas de vulnerabilidade onde foi possível identificar em todas as situações, as áreas de maior vulnerabilidade associadas aos terrenos sedimentares (Dunas) com lençol freático e áreas de menor vulnerabilidade em terrenos cristalinos e em porções do Barreiras que apresentam níveis de água mais profundos.

Cavalcante (2006) realizou a caracterização do aquífero costeiro em área a leste do Porto de Pecém, por meio de monitoramento 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 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.

Cunha (2009) determinou a vulnerabilidade intrínseca à poluição e contaminação dos aquíferos na área do CIPP. Trata da avaliação da sensibilidade dos métodos semiquantitativos de determinação da vulnerabilidade do aquífero à poluição em zonas costeiras.

Morais (2011), em estudo hidrogeológico do 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), caracterizou este sistema como de extrema vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas freáticas, devido à ocorrência de nível freático e uso e ocupação do solo de maneira desordenada. Este trabalho também apresentou valores de vazão entre 1,6 e 4,3 m<sup>3</sup>/h para os poços da região e reservas hídricas totais da ordem de 105x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

Lousada (2011), através da “Avaliação Hidrogeológica Quali-quantitativa dos Campos de Dunas de Pecém / Paracuru, no Estado do Ceará”, desenvolvida para a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), destacando a lagoa do Pecém, que possui contribuição do Aquífero Dunas e abastece o distrito do Pecém em épocas em que o volume hídrico armazenado permitia, sendo explorada pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE).

Moura (2014) por sua vez avaliou a vulnerabilidade dos aquíferos à caracterização do perigo de contaminação, através dos métodos DRASTIC e GOD na porção norte da área do CIPP, que aborda a área industrial do CIPP com grande possibilidade de contaminação.



Decorrente da implantação do CIPP, a literatura técnica da área é constituída, em sua maioria, por Estudos de Impacto Ambiental (EIAs), e seus respectivos Relatórios de Impacto no Meio Ambiente (RIMAs), 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 (CIP), desenvolvido pela Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará / Instituto Centro de Ensino Tecnológico (SEINFRA/CENTEC) em 2009, EIA/RIMA da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP) (2009), EIA/RIMA da Usina Termoelétrica MPX (2006), EIA/RIMA da Refinaria Premium e DutoVia, desenvolvido pela Universidade Federal do Ceará (2002).

Em relação aos trabalhos científicos desenvolvidos no Estado do Ceará, não inseridos na região do CIPP, pode-se destacar:

Cavalcante (1998) estudou as águas subterrâneas da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e definiu a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos.

Leite e Möbus (1998) aplicaram o método DRASTIC adaptado para a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos porosos na Bacia Hidrográfica do rio Mundaú, com a subtração 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 ao Aquífero Barreiras e áreas de extrema vulnerabilidade no Sistema Dunas.

Braga (2006) abordou a aplicação do método GOD nos sistemas hidrogeológicos da Área de Proteção Ambiental (APA) de Ponta Grossa, no município de Icapuí/CE. 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 do que 5 metros); o segundo, de vulnerabilidade média a alta, onde o terreno ainda é formado de sedimentos porosos (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.

Abreu *et al.* (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 Meio Cristalino. O mapeamento obtido foi comparado com as áreas atendidas pelo Programa de Infraestrutura Básica de Saneamento de Fortaleza, realizado entre os anos de 1993 e 2000, a fim de verificar se as áreas mais suscetíveis à contaminação foram atendidas pela nova rede de saneamento.

Viana (2007) desenvolveu estudo de vulnerabilidade e risco à poluição no Sistema Aquífero Médio na Bacia do Araripe, que abastece os municípios de Crato, Barbalha, Juazeiro do Norte e Missão Velha no Estado do Ceará. 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 sub-aflorante, sendo que 30% da área apresentaram índices de baixa vulnerabilidade, com maior risco de contaminação no município de Juazeiro do Norte/CE.

O Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos da Assembleia Legislativa do Ceará (CAECE, 2014) desenvolveu na área do CIPP, o Pacto pelo Pecém, que elaborou a Agenda Estratégica para o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP).

Sousa (2016) teve como principal objetivo realizar um estudo comparativo entre os métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero DRASTIC, AVI, GOD e GODS para o Aquífero Serra Grande no município de Tianguá, Ceará.

### 3.2 NO BRASIL E NO MUNDO

Os conceitos e definições de vulnerabilidade de aquíferos foram iniciados nos anos 70 nos Estados Unidos da América (EUA), sendo Le Grand (1964) o pioneiro, enquanto que na França, Albinet e Margat (1970); na década de 90, Foster (1987); Lobo Ferreira e Cabral (1991); Adams e Foster (1992); Carbonell (1993); Vrba e Zaporozec (1994); Custódio (1995); Foster *et al.* (2002), valendo também destacar os trabalhos desenvolvidos

por Foster e Hirata (1998), sendo estes elencados entre os mais divulgados.

Seller e Canter (1980), Le Grand (1983) e Carter, Palmer e Monkhouse (1987) sugeriram o desenvolvimento de vários mapas de vulnerabilidade de certos poluentes em forma de atlas. Ainda que para a realização desse trabalho possam ser necessário mais recursos financeiros e de alguma forma dificultar a interpretação ambiental, os resultados são significativamente melhores do ponto de vista da Ciência e da Tecnologia. Outra abordagem seria a de desenvolver métodos para analisar apenas um tipo de poluente.

Foster e Hirata (1987) definem o risco como o perigo de perda da qualidade da água armazenada em um aquífero pela existência real ou potencial de substâncias contaminantes em seu entorno. Os mesmos autores embora se referissem à suscetibilidade relativa dos aquíferos à contaminação antropogênica, o termo inicialmente era usado sem nenhum objetivo de definição formal.

A expressão passou a ter diferentes significados para diferentes pessoas (FOSTER *et al.*, 2006).

Entretanto, a caracterização mais aproximada da ideia de risco de poluição de água subterrânea consiste na associação e interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante aplicada no solo ou em subsuperfície (FOSTER; HIRATA, 1988).

Muitas vezes, um aquífero pode configurar uma situação de alta vulnerabilidade, porém sem risco de poluição, pela ausência de carga poluidora significativa, ou vice-versa.

Ainda nesta perspectiva, enfatiza-se que todos os aquíferos são vulneráveis a médio ou longo prazo a contaminantes que apresentam características persistentes e móveis, gerados por uma atividade amplamente distribuída em uma região. A carga poluidora pode ser controlada ou modificada. O mesmo não ocorre com a vulnerabilidade natural, que é uma propriedade intrínseca do aquífero. Os mesmos autores reconhecem também que as águas subterrâneas constituem uma reserva estratégica e vital para o abastecimento público e remete a uma especial preocupação com a proteção dos aquíferos (FOSTER; HIRATA, 1988).

O perigo de contaminação da água subterrânea seria então definido como a probabilidade da água subterrânea, na parte superior de um aquífero, atingir níveis inaceitáveis de contaminação em decorrência das atividades que se realizam na cobertura imediata da superfície do solo (FOSTER; HIRATA, 1988; ADAMS; FOSTER, 1992; FOSTER *et al.*, 2006).

Carbonell (1993) destaca ainda, que a vulnerabilidade à contaminação e a tendência dos contaminantes disseminaram-se nas águas subterrâneas, após serem derramados na cobertura superior do aquífero. E, neste caso o autor considera somente a ação dos contaminantes.

Segundo a NRC (1993) toda água subterrânea é vulnerável, em maior ou menor grau, à contaminação; a incerteza é inerente a qualquer avaliação de vulnerabilidade à contaminação; os sistemas mais complexos de avaliação da vulnerabilidade apresentam o risco de obscurecer o óbvio e tornar indistintas as sutilezas.

A vulnerabilidade é definida como uma propriedade intrínseca do sistema de água subterrânea que depende da sensibilidade do mesmo aos impactos humanos e/ou naturais, os autores incluem na definição, tanto o sistema subterrâneo como os contaminantes, incluindo aí os naturais e artificiais (VRBA; ZAPOROZEC, 1994).

Custódio (1995) enfatiza que a vulnerabilidade à poluição expressa a incapacidade do sistema de absorver as alterações, tanto naturais como artificiais. Voltam a aparecer, aqui, processos naturais e/ou artificiais, como potenciais geradores de alterações.

A atenção dos pesquisadores, principalmente nos últimos 30 anos, tem sido uma consequência da crescente preocupação da sociedade com a degradação dos recursos hídricos subterrâneos, tanto no meio urbano quanto rural. É cada vez mais clara a consciência dos responsáveis pela gestão das águas subterrâneas, das limitações técnicas, econômicas e de disponibilidade de mão de obra especializada para remediar a contaminação existente, sobretudo em países em desenvolvimento (HIRATA, 2001).

Para assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos subterrâneos é necessária uma adequada proteção, conhecendo-se as zonas

de maior vulnerabilidade à contaminação e estabelecendo programas específicos de inspeção e monitoramento sobre possíveis fontes de contaminação (AGÜÊRO-VALVERDE; MESALLE, 2002).

Os autores acima ainda complementam os diferentes modelos propostos para a determinação da vulnerabilidade à contaminação de um aquífero. São modelos matemáticos que fazem uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG), para gerar mapas de vulnerabilidade e desta forma, estimar o perigo de contaminação (AGÜÊRO-VALVERDE; MESALLE, 2002).

A vulnerabilidade específica inclui parcialmente o conceito de risco toda vez que se refere ao perigo de deterioração do aquífero com relação a substâncias contaminantes específicas (AUGE, 2003).

Neste sentido, a maioria dos autores considera a vulnerabilidade uma propriedade qualitativa, que indica o grau de proteção natural de um aquífero em relação à contaminação, e de maneira geral, qualificando-a como baixa, média, alta e às vezes, muito alta e muito baixa (AUGE, 2004).

Segundo Auge (2004) tem surgido inúmeras definições, qualificações e metodologias sobre a vulnerabilidade dos aquíferos, entretanto, não há um consenso sobre o alcance do termo.

Neste sentido, existem duas grandes correntes: aqueles investigadores que consideram a vulnerabilidade como uma propriedade referente ao meio (vulnerabilidade intrínseca) e outros que consideram, além do comportamento do meio aquífero, a carga contaminante (vulnerabilidade específica).

A síntese de toda investigação sobre os recursos naturais é a sua representação cartográfica. Esta é uma importante aplicação para a hidrologia em geral e particularmente para a vulnerabilidade da água subterrânea. Os mapas de vulnerabilidade são denominados vulgarmente de semáforos, dado que a maioria utiliza as cores verde, amarelo e vermelho (AUGE, 2004).

A obtenção de variáveis, vinculadas à litologia e aos solos, por meio de tabelas, produz valores repetidos que associados aos efeitos dos fatores de ponderação, distorcem os índices de vulnerabilidade produzindo resultados

semelhantes em áreas com o mesmo tipo de solo e de rocha.

Ainda existem divergências em relação às representações cartográficas e se a vulnerabilidade deve manter-se em termos qualitativos ou quantitativos. Neste sentido, durante o Congresso da Associação Internacional de Hidrogeologia (IAH) realizado em Bratislava (Eslováquia em 1999), houve uma forte controvérsia entre as escolas alemã e checa. A primeira sustentava a necessidade de novas tecnologias para transformar a vulnerabilidade em uma variável quantitativa. A Escola Checa propunha a manutenção do alcance qualitativo, devido ao inconveniente de se atribuir grandezas aos componentes e processos que incidem sobre a vulnerabilidade (AUGE, 2004).

Auge (2004) observa que o avanço no desenvolvimento de modelos numéricos e as vantagens que oferecem sistemas como o Sistema de Informação Geográfica (SIG), que permitem armazenar grande quantidade de informação e processá-las rapidamente, para a obtenção de produtos atualizados no espaço e no tempo, faz prever uma tendência à formulação de metodologias quantitativas no futuro.

Seria desejável que eles tivessem enunciado o uso do termo de maneira mais clara, por exemplo, associando-o especificamente às características intrínsecas dos estratos (zona não saturada ou camadas confinantes) que separam o aquífero saturado da superfície do solo. Assim, teria se estabelecido uma relação direta entre o termo e o impacto potencial das decisões sobre o uso do solo nos locais voltados para a água subterrânea imediatamente subjacente (FOSTER *et al.*, 2006).

Foster *et al.* (2006) afirmam que é preciso enfatizar que os mapas regionais de vulnerabilidade do aquífero à contaminação destinam-se a fornecer um instrumento que possa embasar as medidas para proteção da água subterrânea. Trata-se, no entanto, de duas coisas distintas, tanto em termos conceituais quanto funcionais. A primeira deve consistir numa representação simplificada, embora factual, dos melhores dados científicos disponíveis sobre o ambiente Hidrogeológico.

Os dados necessários para a avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação e para os cadastros de cargas contaminantes de subsolo devem, sempre que possível, ser desenvolvidos numa plataforma SIG adequada, a fim de facilitar a interação, a atualização e a apresentação dos resultados.

As estratégias voltadas para o aquífero têm aplicações mais universais, já que buscam alcançar um grau de proteção para todo o manancial subterrâneo e todos os usuários desse manancial. O primeiro passo é mapear a vulnerabilidade do aquífero à poluição nas áreas mais extensas incluindo um ou mais aquíferos importantes, trabalhando em uma escala adequada, se o interesse se limitar a informações gerais e ao planejamento. O mapeamento normalmente é seguido de um cadastro da carga contaminante em escala mais detalhada, pelo menos nas áreas mais vulneráveis (FOSTER *et al.*, 2006).

Nobre (2006) apresenta uma proposta metodológica inovadora para a avaliação de risco de contaminação de solo e águas subterrâneas, através de modelagem hidrológica conceitual, aplicado a um domínio de 292 km<sup>2</sup> na cidade de Maceió/AL.

Para Russo (2009), o termo “vulnerabilidade natural de um aquífero” pode ser definido como o primeiro passo para a avaliação da susceptibilidade do aquífero a vir a ser contaminado. Dependente de diversos fatores ambientais, a estimativa da avaliação da vulnerabilidade da água subterrânea, é caracterizada como uma predição do processo que está ocorrendo abaixo da superfície da Terra. Esta depende de diversos fatores tais como: geologia, geomorfologia, espessura da camada não saturada, recarga natural, escoamento superficial e exploração da água, dentre outros.

Maia (2011) desenvolveu uma tese com foco em mapas de vulnerabilidade intrínseca que se deriva das características peculiares dos aquíferos e de seu entorno, mas não levam em conta os efeitos dos contaminantes. Já a vulnerabilidade específica passa a considerar a ação dos contaminantes e as características do meio aquífero.

Indica que as avaliações não são suficientes para definir a potencialidade dos poluentes e quais medidas serão adotadas para sua contenção. Afirma que esses mapas apenas visam indicar possíveis riscos potenciais à contaminação da água subterrâneas (MAIA, 2011).

Entende que muitos autores têm sua atenção voltada à vulnerabilidade dos aquíferos devido à sociedade com a degradação dos mesmos. Uma maneira de compatibilizar as atividades antrópicas com a capacidade de atenuação do terreno seria a cartografia de vulnerabilidade, como uma maneira de gerenciar e proteger os aquíferos (MAIA, 2011).

Corroborar com a crítica de Auge (2004), em relação ao método DRASTIC, pois variáveis obtidas por meio de tabelas tais como litologia e solos, produzem valores repetidos que, associados aos efeitos dos fatores de ponderação, distorcem os índices de vulnerabilidade produzindo resultados semelhantes em áreas com o mesmo tipo de solo e de rocha.

Um dos problemas enfrentados em desenvolver mapas de vulnerabilidade de aquífero é encontrar um índice de vulnerabilidade onde sejam priorizados os aspectos quantitativos sobre os qualitativos e que os mesmos possam ser indicadores de vulnerabilidade de todos para qualquer tipo de aquífero.

Destaca que os métodos mais tradicionais são utilizados por todos, sem o mínimo questionamento e emprego de suas funcionalidades. O mesmo autor ressalta ainda que, desde os anos 70, houve uma predominância pela procura por sistemas qualitativos mais genéricos e menos refinados para o mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos pelo fato de serem mais facilmente aplicáveis (AUGE, 2004).

O primeiro passo de uma gestão sustentável da água subterrânea é a escolha de uma escala adequada para o mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos, que por sua vez fornecerá informações gerais para o uso e ocupação do território e da água.

Ressalta que os autores do DRASTIC e demais métodos só consideram este parâmetro recarga como fator negativo, pois não levam em conta a dispersão e a diluição dos contaminantes solúveis e a remoção destes do



aquífero por meio do fluxo subterrâneo. Outro fator que o mesmo autor chama a atenção é a capacidade de proteção nas zonas de exudação do aquífero, devido ao fluxo ascendente que não permitem a penetração dos contaminantes (AUGE, 2004).

Segundo Maia (2011) as variáveis litológicas do aquífero, impacto da zona vadosa e solo, estão diretamente relacionados e se o solo tiver sua origem a partir do material do próprio aquífero, devido aos valores serem obtidos a partir de tabelas, há certa repetição com tendências de produzirem índices de vulnerabilidades com valores repetidos ou muito próximos.

## 4 EXPERIÊNCIAS AMBIENTAIS NOS PORTOS E COMPLEXOS INDUSTRIAIS DA REGIÃO NORDESTE BRASILEIRA

O presente capítulo apresenta informações e reflexões decorrentes da pesquisa realizada nos quatro principais portos e complexos industriais portuários no Nordeste brasileiro, que são: Camaçari, Itaqui, Pecém e Suape, vistoria de campo realizada para conhecer a experiência e práticas da concentração industrial, *in loco*, do Complexo Industrial e Portuário de SUAPE, do Polo Petroquímico de Camaçari e Complexo Portuário de Itaqui localizados, respectivamente, nos Estados de Pernambuco, Bahia e Maranhão.

Conhecer estas experiências, com processos diferenciados - porto e polo petroquímico - se evidencia importante na medida em que auxilia a reflexão sobre as diretrizes e prioridades para uma ocupação sustentável do território na atual fase de concepção de implantação do Complexo Industrial e Portuário do Pecém no Ceará, bem como para elaboração de cenários futuros para a fase de operação e gestão, principalmente em relação ao aspecto ambiental.

### 4.1 COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DE CAMAÇARI/BA

A área desta unidade industrial é de 13.800 ha e possui 6.500 ha de unidade de conservação que compõe o Anel Florestal.

O sistema de gestão e licenciamento ambiental do Polo de Camaçari é coletivo. O abastecimento de água, cuja vazão é da ordem de 4.300m<sup>3</sup>/h, é realizado pela captação superficial nos rios Joanes e Jacuípe, bem como captação de água subterrânea no Aquífero São Sebastião (formação sedimentar arenosa),

As águas subterrâneas são componentes fundamentais da regulação do ciclo hidrológico e, em termos socioeconômicos, constituem reservas estratégicas de importância vital. O estudo para utilização dos recursos hídricos subterrâneos ou para avaliação dos tipos de impactos induzidos

pelas atividades humanas se faz, a partir do conhecimento de como esses recursos variam no espaço e no tempo.

Constituem-se em entradas as recargas naturais do aquífero, como as chuvas, ou artificiais, como a recarga induzida por bombeamento, a infiltração de águas poluídas e os vazamentos de redes de esgotos. Já as saídas podem ser naturais, como a recarga de base dos rios e as perdas por evapotranspiração, ou artificiais, como os volumes extraídos de poços e outras obras de captação.

Quando comparado com o escoamento superficial, o qual corresponde a uma fração da precipitação pluviométrica no âmbito da bacia hidrográfica com tempo de trânsito relativamente curto, o escoamento subterrâneo poderá ter maior tempo de trânsito devido às pequenas velocidades de circulação no subsolo, contribuindo com importantes componentes de escoamento por vários anos e até milênios, dependendo das condições hidrogeológicas impostas ao meio.

Os pacotes sedimentares subjacentes ao Pólo são: Grupo Barreiras, Formação Marizal e Formação São Sebastião. A Formação São Sebastião, com uma espessura média de 3.000m, apresenta-se saturada com água doce até a profundidade em torno de 1.000m. O Pólo está totalmente situado nos domínios dos Sistemas Aquíferos São Sebastião/Marizal e a produtividade dos poços profundos pode ser considerada alta. Em sua maioria, apresentam vazões acima de 30 m<sup>3</sup>/h com água de excelente qualidade físico-química, com teores de sais inferiores a 200 mg/L. Esses sistemas aquíferos têm um comportamento confinado, semiconfinado e também de aquífero livre em diversas áreas do Pólo. A profundidade do nível estático, varia de 0,5 a 40m.

Por causa de suas pequenas espessuras, Formação Barreiras e a Formação Marizal não se constituem aquíferos importantes nessas áreas, porém do ponto de vista de proteção à contaminação, eles são de extrema importância. Por estarem topograficamente mais elevadas, funcionam como áreas de recarga dos Sistemas Aquíferos São Sebastião, principalmente na área do Pólo. A função de proteção aos processos de migração de contaminantes, pode ser um pouco prejudicada pelo caráter arenoso destas formações.

O alto padrão de estabilidade de escoamento dos rios na região de influência do sistema Aquífero São Sebastião justifica-se pela grande proporção de descargas de águas subterrâneas para os rios.

A importância do Sistema Aquífero São Sebastião é demonstrável através dos seus múltiplos usos: no abastecimento público integral das cidades de Camaçari, Dias D'Ávila, Pojuca, São Sebastião do Passé, Mata de São João, Catu, Alagoinhas, e inúmeros povoados; no suprimento da indústria petroquímica, de metalurgia, automotiva e de bebidas; e nas termoelétricas para a geração de energia.

Rebouças (1991), avaliando a evolução do quadro ambiental na região de Camaçari, relata que a água subterrânea limpa e a água de superfície, associada a essa, são como sangue na vida das comunidades urbanas, dos povoados em geral, e também das indústrias, e a proteção da água subterrânea não pode ter importância menor do que a dedicada a outros sistemas públicos como os de transportes ou de energia elétrica.

Lima (2001) também ressalta a importância da proteção dos recursos hídricos subterrâneos da Região Metropolitana de Salvador, quando afirma que estes são intensamente explorados para abastecer as indústrias do Centro Industrial de Aratu e do Pólo Industrial de Camaçari, as populações das cidades de Camaçari, Dias D'Ávila, Simões Filho e outras sedes municipais e distritais. Além disso, este aquífero abastece a indústria alimentícia para a produção de água mineral, refrigerantes e cervejas.

#### 4.2 SISTEMA PORTUÁRIO DE ITAQUI/MA

O Porto do Itaqui está situado na cidade de São Luís, Maranhão, na baía de São Marcos, a 11 km do centro da cidade. O Itaqui tem uma posição estratégica na costa da Região Nordeste, localizado próximo aos mercados da Europa, América do Norte e canal do Panamá.

A região potencialmente influenciada pela atividade portuária considera as Bacias Hidrográficas do Itaqui e do Bacanga, junto às principais ligações fluviais com o porto do Itaqui, abrangendo os rios Grajaú, Pindaré, Mearim e dos Cachorros, bem como a plataforma continental adjacente ao município de

São Luís.

O acesso hidroviário não conta com a formação de barra, tem aproximadamente 55 milhas náuticas de extensão na direção sul-sudoeste, a largura do canal em quase toda a extensão é de 1.000 m, exceto em alguns poucos trechos, nos quais mede 500 m, profundidade natural mínima de 23 m e largura aproximada de 1,8 km.

Estudos ambientais servem para direcionar as ações preconizadas no sentido de obter-se o menor nível possível de impactos, tanto sobre o meio ambiente quanto sobre as comunidades por ele afetadas. Todas as obras realizadas na área poligonal do Porto do Itaqui necessitam de estudos ambientais e os mesmos devem ser aprovados pelo órgão ambiental competente para que sejam realizadas.

Esse sistema hidrogeológico, constituído por depósitos sedimentares inconsolidados das formações Barreiras (Terciário) e Itapecuru (Cretáceo), cobre 907 km<sup>2</sup> e abriga dois aquíferos (um livre e outro confinado) susceptíveis de serem captados.

O manancial tem uma vazão de exploração da ordem de 1,14x10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>/ano utilizada, complementarmente ao sistema produtor ITALUÍS, como fonte de abastecimento de água da população da Ilha.

A potencialidade estimada em 2,1x10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>/ano tem condições de atender parcialmente a demanda prevista. Suas águas prestam-se para todos os fins, sendo a qualidade química o fator limitante. Problemas de salinização a partir das bordas (setor noroeste) e riscos de contaminação, em áreas urbanizadas, são os principais fatores limitantes para a utilização das águas do manancial.

Tendo em vista que as águas subterrâneas são muito vulneráveis à poluição, observou-se que a aplicação de conhecimentos e medidas de proteção, são fatores importantes para o desenvolvimento dos recursos hídricos da Ilha do Maranhão, e conseqüentemente, do Porto de Itaqui.

As licenças ambientais do Porto do Itaqui são emitidas pela Secretaria de Meio Ambiente (SEMA) considerando as Resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), de nº 001/86 e 237/97. Devido a esse documento o Porto está apto a operar em conformidade ambiental.

O monitoramento ambiental é um processo de coleta de dados, estudo e acompanhamento contínuo e sistemático das variáveis ambientais, com o objetivo de identificar e avaliar - qualitativa e quantitativamente - as condições dos recursos naturais em um determinado momento, assim como as tendências ao longo do tempo. A maior parte dos monitoramentos ambientais realizados pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA) são feitos no Porto do Itaqui.

#### 4.3 COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM/CE

O Estado do Ceará possui um litoral composto por cordões dunares que se estendem por cerca de 573 km desde o município de Icapuí até o município de Barroquinha (total de 18 municípios litorâneos). As correntes marítimas no litoral do Porto do Pecém são no sentido leste para oeste. Caso em um cenário futuro ocorram contaminações, estas serão no mesmo sentido e direção do Porto do Pecém, que trata-se de um porto com 161,08 Km<sup>2</sup>, com percentual de área de unidade de conservação de 22,49%. É um porto *off-shore* na América do Sul, com águas profundas em torno de 20m, exporta 45% de frutas do Brasil, trata-se de *Hubport*, portanto se apresenta como sendo estratégico para as Regiões Norte e Nordeste.

O Plano Diretor Industrial (PDI) do CIPP, concebeu sua implantação originalmente em dois empreendimentos âncoras, a Refinaria da Petrobras – Premium, e a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), mas a luz dos dias atuais, sabe-se que a implantação da Refinaria está suspensa, e a Siderúrgica do Pecém, voltada para a industrialização de barras de aços com fins de exportação, se encontra na Zona de Processamento de Exportação, e iniciará a produção até dezembro de 2016.

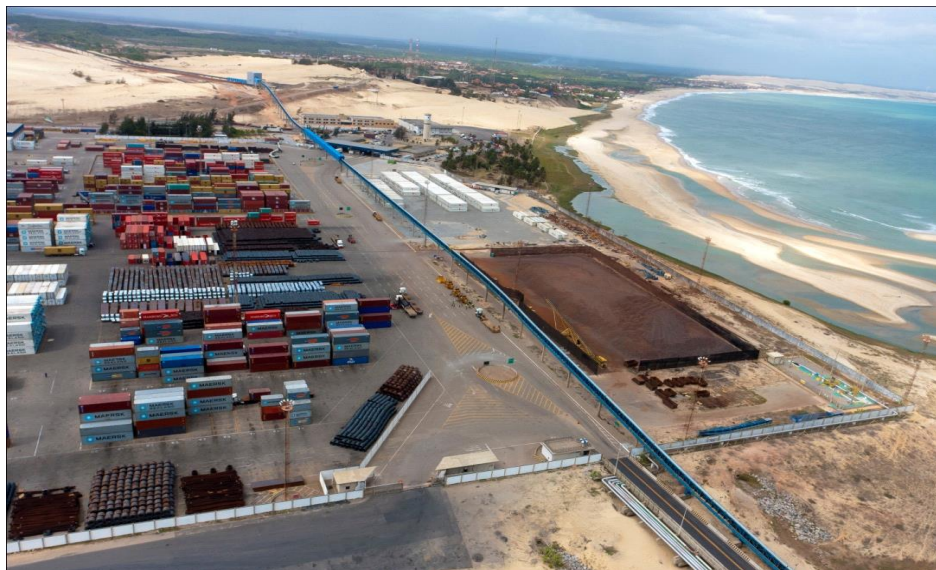
Especialistas afirmam que com a descoberta da reserva de petróleo na camada do pré-sal, o Brasil se tornará em 2035 o sexto maior produtor de petróleo do mundo. O Complexo do Pecém terá papel fundamental no escoamento da produção estimada em mais de 120 bilhões de barris de Petróleo (AGÊNCIA BRASIL, 2014).

#### 4.3.1 Caracterização ambiental do CIPP

Os municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante apresentam três paisagens naturais distintas divididas, praticamente pela BR-222 e pela CE-085. Na faixa litorânea entre o mar e a CE-085, estão os cordões de dunas, e as planícies.

Próximo ao mar encontra-se uma ocupação do solo mais intensiva por edificações de veraneio e o Porto do Pecém e industrial do CIPP (Figura 1). No setor entre a BR-222 e a CE-085, nas áreas não ocupadas por atividades urbanas, encontram-se chácaras, pequenos sítios e algumas grandes propriedades que desenvolvem a agropecuária intensiva.

FIGURA 1 – Pátio de contêiner de minério de Ferro, no porto do Pecém/CE.



Fonte: Acervo do pesquisador.

#### 4.3.2 Aspectos hidrogeológicos

O diagnóstico ambiental realizado na área afetada pelo Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), onde os efeitos produzidos pela instalação e operação do Complexo serão, em sua grande parte, de ordem direta, conduz às seguintes conclusões:

- A área comporta uma variedade de solos, conferida por oito classes principais, distribuídos por segmentos distintos da paisagem que os insere.

- A área do projeto está inserida nas Bacias Hidrográficas dos rios São Gonçalo e Cauípe, além do Sistema Hidrográfico do Gereraú, todos pertencentes às Bacias Metropolitanas de Fortaleza.
- No tocante à fauna, o inventário aponta a identificação de 210 espécies, sendo 162 de aves, 23 de répteis, 13 de anfíbios e 12 de mamíferos.

Da análise dos dados e informações coletadas no decorrer da pesquisa, além do conhecimento hidrogeológico de campo, podem-se distinguir nas áreas de influência, compreendendo duas bacias hidrográficas (rio Cauípe e da microbacia do Gereraú), quatro domínios hidrogeológicos principais (Apêndice VI): Meio Fissural (composto por granitoides diversos e rochas metamórficas representadas pelas Unidades Independência e Canindé); Barreiras (composto por Unidades clásticas variadas, com predomínio de lentes silto-argilo-arenosas); Dunas (sedimentos arenosos); e Aluviões (sedimentos clásticos variáveis). No Domínio Sedimentar identificam-se Sistemas Hidrogeológicos formados pelos Aquíferos Dunas, Aluviões e Barreiras, com comportamento de aquíferos livres.

O Aquífero Dunas é livre e recebe recarga pluviométrica e dos recursos hídricos superficiais, tais como a Lagoa do Gereraú, e as lagoas do Tucum e do Bolso, que são os principais acumuladores de água superficial. O Aquífero Barreiras é composto por sedimentos arenoargilosos a argiloarenosos, inconsolidados ou pouco consolidados, sua espessura é variável em função do paleo-relevo do substrato cristalino, comumente inferior a 60 metros. A porção superior é arenosa e, portanto, sua exploração é intensa com vazões geralmente oscilando abaixo de 10cm<sup>3</sup>/h.

#### *4.3.3 Unidades de conservação*

##### *4.3.3.1 Estação Ecológica do Pecém*

Foi criada pelo Decreto Estadual nº 25.708, de 17 de dezembro de 1999. Localiza-se a 57 km de Fortaleza, na Zona Costeira Oeste, e apresenta área total de 956,04 hectares, com o principal acesso pela a Rodovia CE-085.



A Unidade é uma área de interfase do desenvolvimento do CIPP e de corredor ecológico para as Unidades de Conservação de Área de Proteção Ambiental (APA) do Lagamar do Cauípe e APA do Pecém, considerando sua situação geográfica entre essas duas APAs. A Estação Ecológica do Pecém ocupa uma área de grande riqueza biológica, com diversidade faunística e florística.

Embora não seja permitida a visitação em massa, pois se trata de uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, onde a visitação só é permitida para fins educativos e científicos, a criação da Estação Ecológica do Pecém garante a manutenção da paisagem natural da área, uma vez que a Estação Ecológica representa um suporte essencial ao turismo, sendo, por este motivo, preservada.

#### 4.3.3.2 Área de Proteção Ambiental do Pecém

A Área de Proteção Ambiental (APA) do Pecém foi criada através do Decreto Estadual n.º 24.957, de 05 de junho de 1998, e está localizada no município de São Gonçalo do Amarante. A Unidade de Conservação apresenta como principal acesso à Rodovia CE-085. Com 122,79 hectares, a APA do Pecém é caracterizada como uma Unidade de Conservação de Uso Sustentável, dela fazendo parte comunidades pesqueiras e casas de veranistas. A cobertura vegetal básica é composta por espécies típicas de áreas de dunas e tabuleiros pré-litorâneos.

#### 4.4 COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DE SUAPE/PE

A área desta unidade industrial é de 13.500 ha e possui uma Unidade de Conservação de 7.965 ha, ou 59% que compõem o anel florestal.

A forma de destinação de resíduos sólidos é realizada individualmente pela indústria. A gestão e governança ambiental estão a cargo da Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco / Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife / Secretaria Especial dos Portos (CONDEPE/FIDEM/SEP), vinculada à Secretaria de

Desenvolvimento Econômico do Governo de Pernambuco (SDEC/PE).

O Plano Diretor do Suape foi elaborado (a primeira versão) na década de 70. Em setembro de 2011 foi publicado o Plano Diretor Portuário Governador Eraldo Gueiros – Suape, Decreto n.º 37.160, Diário Oficial de 24/09/2011, sendo o documento elaborado pelas empresas PROJETEC e PLANAVE.

O território estratégico do Suape/PE compreende oito municípios: Cabo de Santo Agostinho, Ipojuca, (zona de influência direta), Jaboatão dos Guararapes e Moreno (zona de influência indireta), Ribeirão, Sirinhaém e Rio Formoso (território expandido).

O Plano Diretor de Suape/PE no âmbito do meio ambiente ampliou a Zona de Proteção Ecológica (ZPEC) de 48 para 50% e delimitação, das Áreas de Proteção Permanente (APPs), criação de corredores ecológicos ampliação de áreas destinadas à compensação ambiental. O Plano Diretor prevê também o monitoramento atmosférico e da rede hidrográfica.

Está instalado sobre terrenos sedimentares e topograficamente encontra-se sobre formações geológicas bastante onduladas e uma rede de drenagem intensa. Portanto, terrenos com acentuado grau de vulnerabilidade e riscos, sujeitos aos agentes contaminantes.

A Província Costeira de Pernambuco, onde se insere a área de influência do empreendimento, divide-se em dois grandes elementos geológicos: o embasamento cristalino e uma sequência mesocenozóica, acumulada nas Bacias Pernambuco/Paraíba (norte) e Cabo (sul). As bacias fanerozóicas são separadas pelo Lineamento Pernambuco e diferenciadas segundo critérios geofísicos e geotectônicos.

A área de influência do empreendimento está caracterizada pela ocorrência de sedimentos quaternários, sedimentos plio-pleistocênicos da Formação Barreiras e de uma sequência vulcano sedimentar cretácica (Formações Cabo, Estiva, Ipojuca). Este conjunto constitui a chamada Bacia Sedimentar Cabo. Esta sequência foi depositada sobre um embasamento de rochas graníticas e migmatíticas pré-cambriana, que afloram na porção oeste da área do Complexo Industrial Portuário do Suape (CIPS).

As rochas do embasamento cristalino são plutônicas que variam de quartzossienitos a granodioritos. Ocorrem na porção leste da área de influência do empreendimento.

## 5 CONCEPÇÃO DAS PRINCIPAIS INDÚSTRIAS IMPLANTADAS E EM FASE DE IMPLANTAÇÃO

### 5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Até o momento merece destaque a consolidação da implantação de Energia Pecém, as cimenteiras Companhia de Cimento Apodi e Votorantim, Cimentos N/NE, Hydrostec – Tubos e Equipamentos Ltda., e em fase de implantação a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), sendo que a implantação da Refinaria Premium II da Petrobrás está suspensa por tempo indeterminado.

FIGURA 2 - Panorâmica do terreno da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP).



Fonte: Disponível em: <<http://googleearth.com.br>> Acesso em: 12 dez. 2015.

No perfil siderúrgico foram identificados os seguintes potenciais de danos ambientais: contaminação da água subterrânea e superficial, do ar e do solo; superaquecimento da atmosfera local e vazamento de gases, dentre outros.

A CSP tem como objetivo impulsionar o crescimento econômico do Ceará para um novo patamar de desenvolvimento, permitindo maior competitividade do Estado no Brasil e no exterior. A instalação da siderúrgica também promoverá aumento da arrecadação de impostos e tributos que geram ampliação e melhoria nas ofertas de serviço público, como educação, transporte, saúde, saneamento básico, cultura e lazer.

Quando em funcionamento, a CSP trará aumento de 48% no Produto Interno Bruto (PIB) industrial do Estado. Na primeira fase, serão três milhões de toneladas de placas de aço fabricadas por ano. Para isso, a CSP irá empregar diretamente 2.800 (dois mil e oitocentos profissionais), além de abrigar 1.200 (mil e duzentas) vagas terceirizadas. Serão também geradas também na região 12.000 (doze mil) empregos indiretos com infraestrutura adequada para ter essa quantidade dobrada. A previsão é de que a usina entre em operação em julho de 2016.

Foram estimados 23.000 empregos diretos e indiretos durante a fase de construção da usina. Durante a operação, foram 14.000 empregos. A prioridade é utilizar o máximo de mão de obra local, de forma a contribuir para o crescimento e o desenvolvimento da região. A obra tem o investimento total previsto em US\$ 5,1 bilhões.

As questões ambientais serão prioridade. Cerca de 25% dos investimentos serão aplicados em equipamentos modernos e de alta eficiência para controle e monitoramento das emissões atmosféricas, descarte de efluentes e gerenciamento de resíduos.

Já o Programa de Educação para a Sustentabilidade (PES) investe na educação ambiental como ferramenta para a construção de soluções sustentáveis que visem o desenvolvimento da região. São oficinas, cursos e mutirões de plantio de mudas e de coleta seletiva, tendo como público-alvo empregados da CSP, trabalhadores da obra, comunidade e lideranças.

## 5.2 REGASEIFICAÇÃO

A tecnologia para liquefação do gás foi desenvolvida na primeira metade do século XX, com o intuito de extrair Hélio do ar. Na década de 40,

esta tecnologia foi adaptada pela indústria americana de gás natural, inicialmente para armazenar quantidades substanciais de gás em espaço pequeno, tendo em vista as variações diárias e sazonais da demanda. Em 1959, a primeira carga de Gás Natural Liquefeito (GNL) foi transportada dos Estados Unidos para a Inglaterra em navio especialmente preparado para este produto. Trata-se do processo físico que por meio de elevação da temperatura, o Gás Natural na fase líquida, retorna ao estado original gasoso. O êxito desta viagem conduziu à construção da primeira unidade de GNL na Argélia, no início da década de 60.

A partir da Argélia, o GNL chegou inicialmente à Inglaterra, depois à França e outros países europeus. No final da década, uma unidade construída no Alasca iniciou o abastecimento do Japão, que se tornou ao longo do tempo o maior importador de GNL, absorvendo 60% da produção mundial, que chegou a 112,9 milhões de toneladas em 2000. O mercado americano, por outro lado, que era inicialmente considerado o maior consumidor potencial de GNL, não se desenvolveu.

Hoje, apenas 2% da produção mundial fluem para os Estados Unidos (EEUU), mas esta situação está mudando rapidamente. Com o crescimento do consumo acelerado pelo uso em geração elétrica e esgotamento das reservas americanas de gás natural, o GNL está em fase de retomada nos Estados Unidos, havendo perspectiva de que, nos próximos quinze anos, atinja 20% do consumo do país.

Temos hoje onze países importadores de GNL e outros doze que são produtores (Indonésia, Argélia, Malásia, Qatar, Austrália, Brunei, Nigéria, Abu Dhabi, Trinidad e Tobago, Oman, Alaska (US) e Líbia). Neles estão operando cerca de 20 plantas, várias delas em ampliação, abastecendo a Europa e o Extremo Oriente (Coréia, Japão e Taiwan), e já agora iniciando o abastecimento da costa leste americana.

O primeiro terminal flexível de regaseificação de gás natural liquefeito (GNL) no Brasil tem capacidade de transferir até 7 milhões de m<sup>3</sup>/dia de gás natural para o Gasoduto Guamaré-Pecém (GASFOR). Atende principalmente às Termelétricas Ceará e Fortaleza no CIPP

### 5.3 USINA TERMELÉTRICA ENERGIA PECÉM

A Usina Termelétrica Energia Pecém está localizada no município de São Gonçalo do Amarante, nas margens da Rodovia CE-085, km 37. O empreendimento é fruto de uma parceria entre a EDP - Energias do Brasil S/A e a MPX Energia S/A, com um investimento total de R\$ 3 bilhões.

Uma das obras do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), do Governo Federal, a termelétrica visa suprir o crescimento da demanda no consumo de energia elétrica da Região Nordeste e do Sistema Interligado Nacional (SIN). Permitirá ainda que o Ceará aumente sua produção de energia em 90%, passando para a posição de exportador de energia no lugar de importador. O transporte do Porto à usina é através de correia transportadora (Figuras 3, 4 e 5).

FIGURA 3 - Exposição do pier marítimo e correia transportadora de minério de carvão, Energia Pecém.



Fonte: Acervo do pesquisador.

FIGURA 4 - Correia transportadora de carvão mineral interceptando cordões da Formação Dunas.



Fonte: Acervo do pesquisador.

FIGURA 5 - Pátio de estocagem de carvão mineral importado da Usina Termelétrica Porto de Pecém e MPX Pecém II.



Fonte: Acervo do pesquisador.

Com uma potência instalada de 720 megawatts e uma capacidade máxima de geração de energia na ordem de 6.307 gigawatts-hora, é



suficiente para abastecer uma cidade com mais de 5 milhões de habitantes. A usina entrou em operação em 2012. Em dezembro/2014, a Energia Pecém conquistou a autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para operação comercial da primeira unidade, em fevereiro/2015, foram iniciados os testes de sincronismo da segunda unidade. A obra também passou por minuciosos estudos de Engenharia e Impacto Ambiental, certificados pela Superintendência do Meio Ambiente do Estado do Ceará (SEMACE).

A Energia Pecém foi concebida a partir de um projeto que prevê a minimização dos impactos ambientais, além do uso de alta tecnologia para tornar o processo mais limpo e eficiente. A usina é composta por duas caldeiras ou geradores de vapor, além de duas unidades turbogeradoras, acionadas por turbinas.

O combustível utilizado é o carvão mineral, importado atualmente da Colômbia. O transporte do carvão é feito através de uma correia transportadora, instalada no Porto do Pecém até a usina, com extensão aproximada de 12,5 km (Figura 6). A correia é totalmente fechada para impedir a dispersão do pó do carvão durante o percurso até a área de descarregamento na usina.

FIGURA 6 - Paisagem do pátio de estocagem do carvão mineral da Termelétrica Energia Pecém.



Fonte: Acervo do pesquisador.

Durante a construção da usina, chegaram a ser gerados 6,5 mil empregos diretos no auge da obra, em diversas áreas, como: construção civil, montagem eletromecânica, soldagem e mecânica industrial. Para estimular o aproveitamento de mão de obra local, ao longo da construção a Energia Pecém proporcionou em torno de 400 vagas em cursos de capacitação profissional (Figura 7).

FIGURA 7 – *Layout* da Energia Termoelétrica do Pecém.



Fonte: Disponível em: <<http://www.google.com.br/imagem>>. Acesso em: 09 out. 2015.

Há vários tipos de usinas termelétricas, sendo que os processos de produção de energia são praticamente iguais, porém com combustíveis diferentes: carvão mineral, gás natural, vapor, óleo combustível.

Os acidentes registrados nas usinas termelétricas têm em geral como causas iniciadoras a falha de material e/ou falhas humanas. Segundo a tipologia acidental foram identificados casos para termelétricas a gás natural, resultando em sua maioria em incêndios, explosões confinadas e vazamentos; estes contaminam o solo e o subsolo.

Uma termoelétrica a carvão pode produzir poluição atmosférica, contaminação de águas subterrâneas superficiais e do solo. A Termelétrica Energia Pecém, que utiliza como fonte de energia o carvão mineral, produz a

solubilização de diversos metais pesados, como Ferro (Fe) e Cobre (Cu), que podem migrar para os riachos e lagoa do Gereraú e causar danos ambientais e à saúde humana.

Esta poluição quando acontece não se restringe somente ao tempo de operação da termoelétrica, pois a intensidade e a duração podem perdurar por séculos, até que a fonte de enxofre seja totalmente consumida.

Este tipo de contaminação causa degradação dos recursos hídricos e sérios impactos ambientais na fauna da região, pois a acidificação das águas pode levar ao desaparecimento de peixes, crustáceos e demais população da área (POLZ, 2008).

Portanto, é um sério problema de contaminação ambiental, já que a Oxidação da Pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e outros minerais sulfatados é extremamente acidificado (pH inferior a 2,0) aumentando conseqüentemente, a mobilidade dos elementos da fração. Com isso é gerado um efluente bastante ácido e com concentração de sulfatos de metais como: Ferro, Cobre, Cobalto, Manganês, Chumbo, Zinco etc.

### *5.3.1 Impactos ambientais causados por usinas termoelétricas*

Em seu funcionamento a termoelétrica apresenta alguns pontos negativos quanto aos impactos causados no meio ambiente e até mesmo ocasionando problemas na saúde do ser humano. Entre tais problemas, têm-se:

- Emissões aéreas de material particulado: problemas respiratórios, interferências na fauna e flora, cheiro irritante, efeito estético ruim;
- Emissão de óxido de enxofre: problemas respiratórios, cardiopulmonares, interferência na fauna e flora, acidificação de chuva;
- Emissão de dióxido de carbono;
- Emissão de óxido de nitrogênio, hidrocarbonetos e monóxido de carbono: chuvas ácidas;

- Percolação das águas das chuvas nas áreas de estocagem: contaminação das águas subterrâneas, dos cursos de água superficiais, elevação do pH, metais pesados, sólidos totais dissolvidos;
- Sistema de resfriamento locais das águas: interferência na fauna e flora aquáticas;
- Sistema de remoção das cinzas pesadas;
- Resíduos sólidos do processo: minas e usinas;
- Pirita ( $\text{FeS}_2$ ).

#### 5.4 TANCAGEM

O parque de tancagem ou área de tancagem são áreas destinadas ao armazenamento de combustíveis líquidos, gasosos e outros derivados do processo de refino do petróleo. Os riscos de poluição e acidentes nesta unidade estão associados aos líquidos inflamáveis operacionalizados nesta atividade, razão da qual se tem os riscos de vazamentos, incêndios e explosões.

Tancagem de combustíveis – os principais impactos são perda de combustíveis no solo e na atmosfera.

#### 5.5 INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Existem implantadas e em funcionamento três indústrias cimenteiras no CIPP, quais sejam: Apodi, Mizu e Votorantim.

O cimento é uma *commodity* de baixa substitutibilidade e está presente em todo tipo de construção. As operações das fábricas de cimento trazem impactos ambientais negativos em todas as fases da fabricação. Entre os processos produtivos da fábrica de cimento, os três maiores problemas onde se localizam os maiores índices de poluição, consistem no processo de mineração (extração do calcário), transporte de material particulado ao longo da cadeia produtiva e no forno de clínquerização onde é lançado um grande

volume de gases.

Em todas as etapas ocorre a poluição do ambiente através de material particulado e ruídos gerados pelas máquinas e equipamentos, ocorre também a degradação da fauna e flora devido a exploração das minas de calcário.

Os principais poluentes emitidos durante o processo de fabricação do cimento são: material particulado, dióxido de carbono, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio. Segundo órgãos ambientais, os principais poluentes atmosféricos perigosos liberados pela indústria cimenteira são as dioxinas, furanos, metais pesados (Mercúrio, Chumbo, Cádmiio, Arsênio, Antimônio e Cromo), resíduos de combustão incompleta e ácidos halogenados.

Entre os processos produtivos da fábrica de cimento, os três maiores problemas onde se localizam os maiores índices de poluição, consistem no processo de mineração (extração do calcário), transporte de material particulado ao longo da cadeia produtiva e no forno de clinquerização.

Sabendo que a etapa mais poluente se encontra no processo de clinquerização (forno rotativo), devido ao seu alto consumo de combustíveis, as cimenteiras devem introduzir em seu processo de fabricação de clínquer uma ação denominada co-processamento, onde a mesma consiste na incineração dos resíduos industriais gerados por outras empresas, substituindo boa parte do combustível.

## 5.6 GASODUTOS

Os vazamentos ocorrem toda vez em que aparecem as liberações de produtos não planejados para o ambiente externo ao duto e suas principais causas são: a corrosão, as movimentações de terreno, as não conformidades operacionais, as ações de terceiros e o crescimento de amassamentos.

Quatro fatores são importantes no que diz respeito a danificação de gasodutos:

- A possibilidade de a população local danificar o gasoduto, intencionalmente ou não, aumenta com a densidade populacional;
- Atividade agrícola ao longo da rota do gasoduto aumenta a

probabilidade de acidentes;

- O risco de acidente aumenta quando no gasoduto o trecho é mais extenso e existem mais pontos de inflexão na rota;
- A probabilidade de acidente é maior quando a topografia é mais acidentada e menor quando plana.

Quanto às tipologias da poluição envolvendo transporte de gás natural em dutos pressurizados, ocorrem incêndios e explosões como as mais frequentes.

Os danos ambientais são possíveis de acontecer em todos os empreendimentos localizados na área de abrangência do CIPP, sejam no meio biótico ou antrópico, resultado principalmente de vazamentos de insumos e/ou produtos manuseados dentro ou nas imediações, para o caso de transporte do empreendimento.

Com relação à vulnerabilidade, os principais riscos identificados referem-se à formação de nuvens inflamáveis, ocorrência de incêndios (radiação térmica) e ocorrência de explosões (sobre pressão).

De acordo com os estudos realizados, os alcances máximos de nuvem inflamável para efeitos decorrentes de vazamento de combustíveis são correlacionáveis à usina de gaseificação que apresentou um Limite Inferior de Inflamabilidade (LII) de 1.113,60m e a indústria metal-mecânica a qual apresentou um Limite Superior de Inflamabilidade (LSI) de 0,17m.

## 5.7 ÁREA PORTUÁRIA

Quanto à ocorrência de incêndio (radiação térmica) se verificou que algumas das atividades desenvolvidas na área do Porto do Pecém potencializam as maiores condições de geração de radiação térmica de tal forma que a distância de segurança mínima deve ser de 1.187 m. A menor distância mínima, 70,0 m, é referente ao empreendimento de termelétrica a carvão mineral.

Sobre o aspecto da geração de explosões (sobre pressão), experiências anteriores apontam que as atividades portuárias e a usina de

gaseificação, considerada em separado, representam as áreas de ocorrências mais críticas para as quais se vê a necessidade de uma maior distância mínima de segurança, 2.500 e 2.480m, respectivamente. Novamente a usina termelétrica a carvão apresenta um resultado de menor distância mínima, 92,0 m (Figura 8). A indústria Metal Mecânica não gerou curva quanto ao nível de segurança no que tange a explosão (sobre pressão).

FIGURA 8 - Visão detalhada da correia transportadora do minério de carvão que abastece a Termoelétrica Energia Pecém, extensão da correia transportadora de 12,5 Km.



Fonte: Acervo do pesquisador.

A seguir apresentam-se as relações das indústrias de empresas em processo de instalação e empresas instaladas na área do CIPP (Quadro 1):

QUADRO 1 – Empresas em processo de instalação no CIPP.

NOME	SEGMENTO DE MERCADO	INVESTIMENTO (R\$)	EMPREGOS DIRETOS
CSP	Usina Siderúrgica	13.000.000.000,00	5.500
Energia Pecém	Usina Termelétrica	4.000.000.000,00	360
Transnordestina Logística	Operação de Exportação De Grãos	200.000.000,00	50
Petrobras	Refinaria	19.000.000.000,00	8.000
GLOBEST	Recepção, Armazenagem e Exportação de Minério	108.000.000,00	450
Aeris Energia	Aerogeradores	80.000.000,00	340
Fuhlander	Metalmecânica	3.000.000,00	35
Eternit	Louças Sanitárias	111.000.000,00	350
José de Alencar	Usina Termelétrica	300.000.000,00	100
<b>TOTAL</b>		<b>36.802.000.000,00</b>	<b>15.185</b>



(Continuação)

NOME	SEGMENTO DE MERCADO	INVESTIMENTO (R\$)	EMPREGOS DIRETOS
REEFERBRAS	Empresa de Manutenção e Monitoramento de Equipamentos	50.000,00	18
LOG +	Prestador de Serviço Acessório Portuário	500.000,00	12
SMARTCARGAS	Prestador se Serviço Acessório Portuário	150.000,00	12
CFN	Prestador de Serviço Acessório Portuário	50.000,00	3
REEFERCON	Empresa de Manutenção e Monitoramento de Equipamentos	50.000,00	17
Cabral Reefer	Empresa de Manutenção e Monitoramento de Equipamentos	50.000,00	3
Oliveiras Reparos	Empresa de Manutenção e Monitoramento de Equipamentos	50.000,00	17
Petrobras	Planta Flexível de Regaseificação	380.000.000,00	20
<b>TOTAL</b>		<b>1.308.630.000</b>	<b>2.076</b>

Fonte: Seinfra (2016).

QUADRO 2 – Empresas instaladas no CIPP.

NOME	SEGMENTO DE MERCADO	INVESTIMENTO (R\$)	EMPREGOS DIRETOS
Termoceará	Usina Termelétrica Destinada a Geração de Energia	173.000.000,00	35
Termofortaleza	Usina Termelétrica Destinada a Geração de Energia	381.000.000,00	110
Wobben	Fábrica de Aeroogeradores e Componentes	16.000.000,00	271
Jotadois	Fábrica de Prémoldados	4.000.000,00	54
APM	Prestador de Serviço Operacional Portuário	55.500.000,00	250
Tecer	Prestador de Serviço Operacional Portuário	29.000.000,00	170
Klinlog	Prestador de Serviço Acessório Portuário	490.000,00	10
Daniel Transportes	Prestador de Serviço Acessório Portuário	740.000,00	21
Tortuga	Fábrica de Ração	100.000.000,00	490
Votorantim	Fábrica de Cimento	45.000.000,00	55
Apodi	Cimenteiro	100.000.000,00	250
Hydrostec	Tubulação	23.000.000,00	240
<b>TOTAL</b>		<b>927.730.000,00</b>	<b>1.956</b>

Fonte: Seinfra (2016).

## 6 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA

### 6.1 CLIMATOLOGIA

A caracterização climática de uma região possui uma relevante importância para o estudo da paisagem, constituindo uma categoria geográfica de análise muito utilizada nas pesquisas de caráter hídrico-ambiental como elementos-chaves para a definição do modelo conceitual do aquífero. Por influência nos processos e feições geomorfológicas, no regime dos rios, na formação dos solos e na distribuição da cobertura vegetal, o comportamento do clima deve ser sempre incorporado nesses estudos.

De acordo com os dados coletados na Estação Meteorológica situada no município de São Gonçalo do Amarante entre os anos de 1974 a 2015, o período chuvoso inicia-se em dezembro, com média de 19,05 mm, passando para 99,75 mm em janeiro e consolidando-se a partir da segunda quinzena de fevereiro, cuja média mensal é de 158,49 mm. As precipitações de maiores expressões ocorrem entre os meses de março e maio, com a máxima ocorrendo em março apresentando média de 254,90 mm. Por outro lado, o período mais seco ocorre entre agosto e novembro, sendo este último mês de menor média histórica, com apenas 1,90 mm mensal. São Gonçalo do Amarante, entre os anos de 1974 a 2015, apresentou média de 1.007,69 mm/ano, com mínima de 443,3 mm/ano em 1993 e máxima de 2.203,3 mm/ano em 1974.

#### *6.1.1 Condições meteorológicas e hidrológicas*

A temperatura apresenta-se praticamente estável ao longo do ano, característica típica das regiões tropicais/equatoriais pela maior proximidade com a linha do Equador, o que repercute em baixas amplitudes térmicas mensais. A temperatura média mínima é de 26,4°C e máxima de 27,6°C. É importante destacar-se, entretanto, que embora a amplitude mensal seja baixa, a temperatura diária varia muito, apresentando valores elevados durante o dia e valores mais amenos durante a noite.

Para a caracterização climática detalhada da área de estudo foi realizada análise de parâmetros meteorológicos a partir do Banco de Dados da Estação Meteorológica da São Gonçalo do Amarante, disponibilizado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2013).

A estação está localizada a aproximadamente 20 km da Vila do Pecém, e embora exista uma estação meteorológica dentro da área de estudo (Estação Meteorológica do Pecém), a escassez de dados disponíveis (apenas sete anos, entre 1998 e 2005), corrobora para a utilização dos dados da Estação de São Gonçalo do Amarante.

Também foram utilizados dados do Instituto Nacional de Pesquisas Hídricas (INPH) e da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), apresentados nos relatórios da Secretaria de Infraestrutura (CEARÁ, 2006).

Em termos regionais, de acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da área de estudo é do tipo Aw', caracterizado como clima tropical chuvoso, isto é, clima quente e úmido marcado por uma estação de chuvas, no verão e outono, e outra estação seca, compreendendo o período de inverno e primavera. Já de acordo com a classificação climática de Gaussen, o clima da região é do tipo 4bTh e 4cTh, apresentando curva térmica sempre positiva; dias curtos secos; índice xerotérmico variando entre 0 e 200; período seco de até 8 meses consecutivos e duas estações distintas bem marcadas: uma seca e outra chuvosa.

O padrão climático de variação sazonal apontado por ambas as classificações é resultado da ação de dois sistemas sinóticos formadores de precipitações: a Zona de Convergência Intertropical (ZCTI) e o Centro de Vorticidade Ciclônica. Tal padrão apresenta variações relevantes nos anos de incidência dos fenômenos *El Niño*, responsável por secas mais intensas, e *La Niña*, responsável por elevações nos índices pluviométricos.

Morais (2011) relaciona o condicionamento dos ventos ao longo do ano com outros aspectos climáticos da região. No primeiro semestre os ventos são influenciados pela maior concentração pluviométrica, baixas taxas de insolação e evaporação, além das temperaturas mais reduzidas, e no

segundo semestre há a influência da elevação da temperatura, com intensa insolação e queda da umidade relativa do ar.

### 6.1.2 Ventos

Os ventos atuantes na área de estudo são influenciados, principalmente, pela ação do anticiclone do Atlântico Sul e pela Zona de Convergência Inter Tropical (ZCIT).

As variações sazonais da velocidade e da direção predominante do vento são influenciadas pelo comportamento da circulação geral da atmosfera ao longo do ano. Estas variações estão associadas, principalmente, à movimentação da ZCIT ao longo do ano e fortes efeitos de mesoescala, como gradientes térmicos oceano-continente no litoral e variações térmicas no interior.

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Hidráulicas (INPH, 2010), os ventos da região costeira de Pecém/São Gonçalo do Amarante – Ceará sopram de leste/nordeste para leste-sudeste em mais de 90%, com velocidade média de 4 a 8 (m/s)/ano, devendo ser ressaltado que, entre julho e novembro, esta velocidade pode superar 10 m/s. Os denominados ventos fortes, aqueles superiores a 10 m/s, concentram-se nos meses de setembro e outubro com mais de 60% (Ceará, 2006) (Tabela 1).

TABELA 1 - Distribuição de frequência de velocidade e direção dos ventos no Pecém. São Gonçalo do Amarante / Ceará.

Direção	Velocidade Média (m/s)						Total (%)	Média (m/s)	
	0-2 (%)	2-4 (%)	4-6 (%)	6-8 (%)	8-10 (%)	10-12 (%)			12-14 (%)
N	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	-	0,7	11,4
NNE	0,2	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0	-	0,9	10,8
NE	0,2	1,0	1,0	0,4	0,1	0,0	0,0	2,7	12,2
ENE	0,5	2,9	6,7	5,1	1,9	0,4	0,0	17,5	13,1
E	1,4	4,7	12,9	18,1	10,2	2,9	0,1	50,3	13,3
ESE	3,9	5,4	4,8	4,1	2,7	0,7	0,0	21,6	13,9
SE	1,0	2,0	1,7	0,6	0,1	0,0	-	5,4	11,7
SSE	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	-	-	0,4	9,2

(Continuação)

Direção	Velocidade Média (m/s)							Total (%)	Média (m/s)
	0-2 (%)	2-4 (%)	4-6 (%)	6-8 (%)	8-10 (%)	10-12 (%)	12-14 (%)		
S	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	-	-	0,2	8,3
SSW	0,1	0,1	0,0	-	-	-	-	0,2	5,8
SW	0,0	0,0	-	0,0	-	-	-	0,0	6,1
WSW	0,0	0,0	-	-	-	-	-	0,0	2,8
W	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	-	0,0	6,1
WNW	0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	0,0	4,7
NW	0,0	0,1	0,0	-	0,0	-	-	0,1	9,2
NNW	0,1	0,1	0,0	-	-	-	-	0,2	5,8
<b>Total</b>	<b>7,8</b>	<b>17,0</b>	<b>27,5</b>	<b>28,5</b>	<b>15,0</b>	<b>4,0</b>	<b>0,1</b>	<b>100,0</b>	<b>13,9</b>

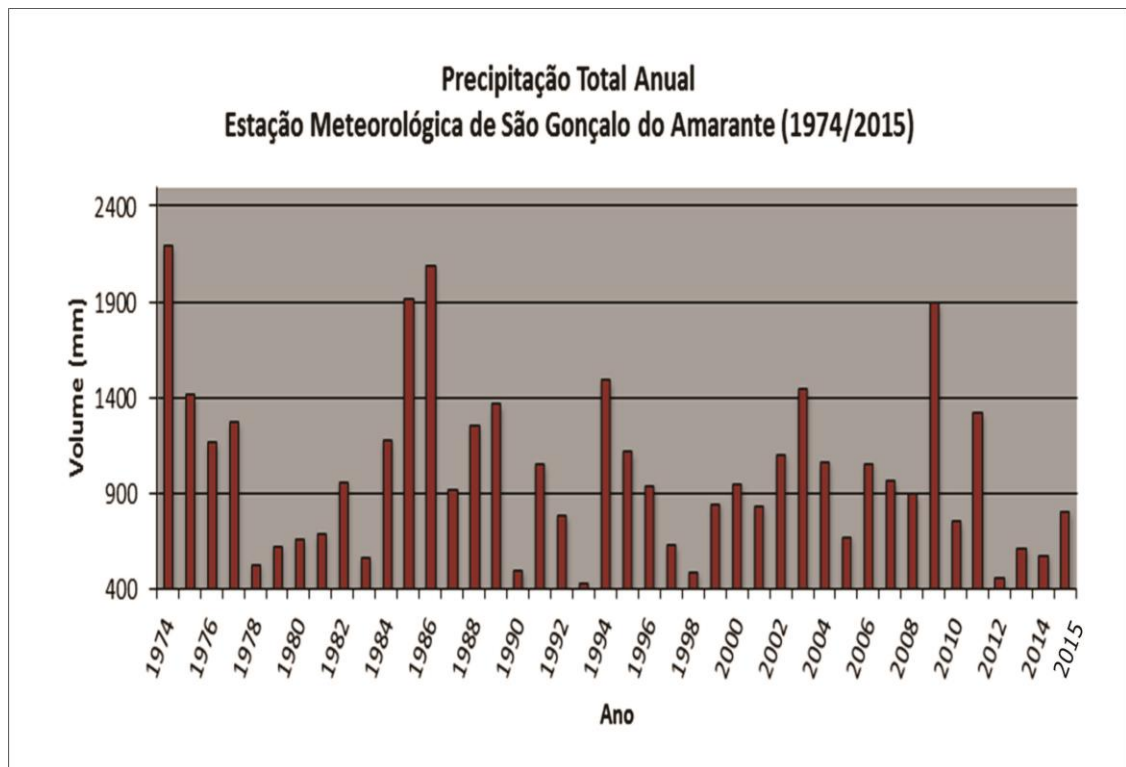
Fonte: Dados do INPH/Ceará (2010).

### 6.1.3 Precipitação

A precipitação pluviométrica é fundamental para o estudo do clima, sendo considerada o elemento de maior importância na definição do quadro climático das áreas semiáridas e subúmidas, onde a quantidade de chuvas e seu ritmo mensal representam suas características mais relevantes (MORAIS, 2011).

A série histórica selecionada para a análise dos dados pluviométricos compreende o período entre 1974 e 2015. Os resultados indicam média pluviométrica anual de 1.030 mm/ano, com 76% das precipitações entre os meses de fevereiro e maio. A variação anual das chuvas é bastante ampla, sendo que o ano de 1974 apresentou a maior precipitação, com 2.200 mm; e o menor volume foi apresentado no ano de 1993, com apenas 434 mm (Gráfico 1).

GRÁFICO 1 - Variação da precipitação anual para o período de 1974 a 2014 na Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante.

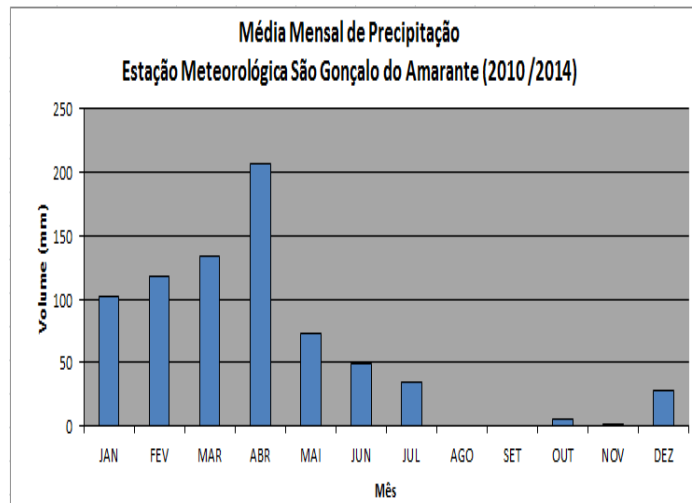


Fonte: Dados da FUNCEME (2013).

A variação mensal na distribuição das chuvas aponta para a presença de duas estações distintas no ano: a estação chuvosa, de janeiro a junho, com concentração das chuvas entre os meses de fevereiro e maio, configurando quadra chuvosa; e a estação seca, entre os meses de agosto e dezembro.

Em relação aos últimos cinco anos, os meses de março e abril apresentam os maiores volumes médios, com 133,16 e 206,04 mm, respectivamente. Já os menores valores médios são encontrados nos meses de agosto e setembro, sem registro de chuva, na estação, seguidos por outubro e novembro com 4,68 e 0,04 mm, respectivamente. (Gráfico 2).

GRÁFICO 2 - Média mensal de precipitação no período de 2010 a 2014 para a Estação Meteorológica de São Gonçalo do Amarante.



Fonte: Dados da FUNCEME (2013).

Dos dados em análise da distribuição dos volumes precipitados nos últimos 20 anos (1995 até 2015) verifica-se que em comparação ao município de Fortaleza, a partir dos dados registrados da Estação Meteorológica do Pici, o volume de chuvas na Estação de São Gonçalo do Amarante é de aproximadamente 34% menor. Caso seja comparado com a Estação Meteorológica de Caucaia, o volume precipitado é aproximadamente 16% menor (Tabela 2).

TABELA 2 - Comparação entre volumes anuais precipitados observados em quatro estações meteorológicas.

POSTO PLUVIOMÉTRICO	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
São Gonçalo do Amarante - SGA	1118	940,7	629	488	847,8	945,9	837,5	1103	1444	1068
Pici - Fortaleza	2040	1661	678	954	1031	1777	1077	1620	2171	1694
São Gonçalo do Amarante Pecém	0	0	0	419	1417	1435	1128	1003	70	926,4
Caucaia - Sede	1936	1428	771	745	976,7	1749	1494	1559	2278	1558
	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
São Gonçalo do Amarante- Sede	674,6	1058	967	897	1897	754,4	1325	464,2	617,4	577,6
Pici - Fortaleza	1095	1423	1335	1450	2219	936,6	2238	1257	714,3	1051
São Gonçalo do Amarante Pecém	661	0	0	-	-	856,1	1053	109,1	322,2	210,6
Caucaia- Sede	934,2	1150	1208	1339	2165	856,1	1053	109,1	322,2	210,6

Fonte: Dados da FUNCEME (2013).



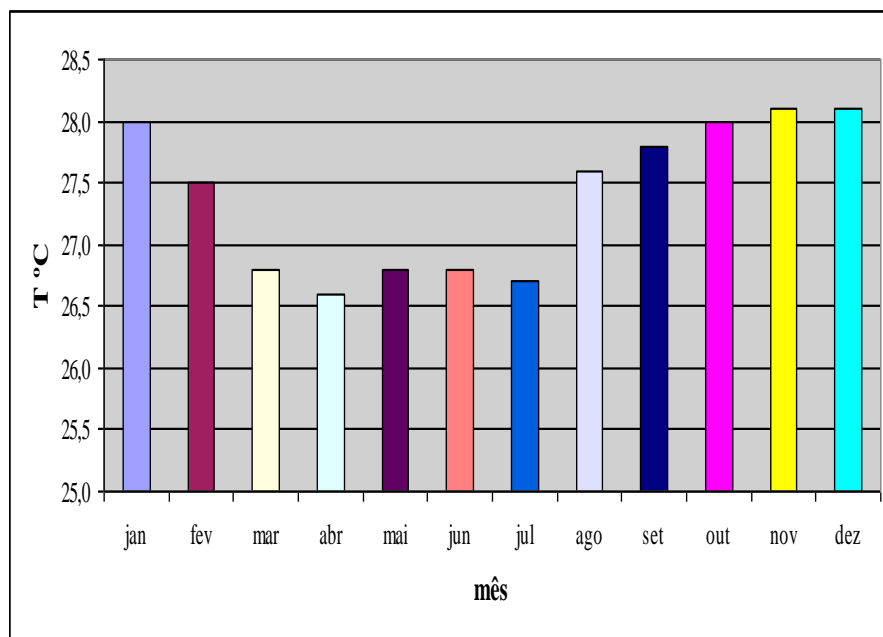
O mapa pluviométrico foi confeccionado com base em dados de 06 (seis) estações pluviométricas, são elas: Caucaia, São Gonçalo do Amarante, Pecém, Lagoa da Serra, Pitombeira, Sítios Novos, para os anos de 2000 a 2009 (Anexo IV).

O resultado obtido foi um mapa de zoneamento pluviométrico, onde as linhas isopluviais foram traçadas com auxílio de programa de geoprocessamento. No mapa é possível verificar que as linhas são traçadas no sentido norte-sul, com dois pólos distintos na poligonal de estudo, conferindo à área de estudo basicamente dois campos com pluviosidade média de 900 mm e outro de 950 mm, nas regiões adjacentes a esses pólos.

#### 6.1.4 Temperatura

O regime térmico da região apresenta-se regular, com pequenas variações ao longo do ano. A temperatura média anual atinge 27,4°C, sendo as maiores registradas nos meses de novembro e dezembro, e as menores temperaturas nos meses de abril e julho (Gráfico 3).

GRÁFICO 3 - Média mensal de temperatura.



Fonte: Dados da FUNCEME (2013).

### 6.1.5 Balanço hídrico

O balanço hídrico é caracterizado pela aplicação do princípio de conservação de massa a uma região definida por determinadas condições de contorno e tem como objetivo quantificar a água em uma dada região, contemplando o equilíbrio entre entradas e saídas do sistema. Através da contabilização do suprimento natural de água ao solo, pela chuva (P), e da demanda atmosférica, pela evapotranspiração potencial (ETP), e com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD) apropriada ao estudo em questão, o balanço hídrico fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM) (CAMARGO, 1971; PEREIRA; VILLA NOVA, SEDIYAMA, 1997).

Em função das condições climáticas da área em estudo, o método de Thornthwaite foi adotado, pois é o melhor que se adapta às áreas com as características climáticas que apresentam alternância de períodos secos e chuvosos bem diferenciados (VASCONCELOS, 1996).

### 6.1.6 Metodologia

O método de Thornthwaite requer a determinação dos seguintes parâmetros:

T = temperatura média (°C);

PPT = precipitação (mm);

I = índice térmico (mm) com base na temperatura média de cada mês do ano;

ETP = evapotranspiração potencial (mm);

ETR = evapotranspiração real (mm);

EX = excedente (mm).

Os dados de precipitação e temperatura média foram obtidos a partir da estação meteorológica da Fundação Cearense de Meteorologia

(FUNCEME) localizado no município de São Gonçalo do Amarante para o período de 1974 a 2015.

Para obtenção da evapotranspiração potencial (ETP) utilizou-se a seguinte equação:

$$ETP = 16K(10T_m/I)^a$$

Onde:

$T_m$  = temperatura média mensal (oC);

$I$  = índice térmico;

$a = 0,49239 + 1,7912 \times 10^{-2} \times I - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 6,75 \times 10^{-7} \times I^3$ ; e

$K$  = fator de correção que depende da latitude.

A região estudada encontra-se associada à latitude 5°S. Sendo assim, os valores dos fatores para correção de evapotranspiração potencial mensal segundo Thornthwaite são observadas na Tabela 3 a seguir:

TABELA 3 - Fatores para correção de evapotranspiração potencial mensal segundo Thornthwaite para a região estudada.

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
1,06	0,95	1,04	1	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06

Fonte: Villela e Mattos (1975).

O índice térmico é obtido pela equação:

$$I = (0.2T_a)$$

Onde:

$T_a$  = temperatura média de cada mês do ano.

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

Para se elaborar o balanço hídrico há a necessidade de se conhecer a capacidade de água disponível no solo (CAD). A CAD representa o máximo de água disponível que determinado tipo de solo pode reter em função de suas características físico-hídricas.

Segundo Castany (1975) solos arenosos apresentam capacidade de retenção de 50 mm e solos argilosos de 200 mm. Na ausência de valores medidos utiliza-se o valor de 100 mm como sendo o valor de CAD.

Para obtenção da evapotranspiração real (ETR), deve ser considerado que:

- a) Se  $(P-ETP) < 0 \sum ETR = P+ALT$
- b) Se  $(P-ETP) \geq 0 \sum ETR = ETP$
- c) Para preenchimento da deficiência hídrica (DEF), o cálculo é simples:

$$DEF = ETP - ETR$$

Para obter armazenamento (ARM) que representa a disponibilidade hídrica do solo são feitas as seguintes considerações:

a) Se  $\sum(P-ETP)$  anual  $\geq 0 \rightarrow ARM = CAD$  (no último mês que aparecer o valor positivo de P-ETP).

b) Nos meses com  $P - ETP > 0$ , mas com valores insuficientes para levar o ARM até o valor da CAD, segue-se com a equação:

$$ARM_n = ARM_{n-1} + (P-ETP)$$

c) Nos meses de  $P - ETP < 0$ , aplica-se a equação abaixo:

$$ARM_n = ARM_{(n-1)} \exp (P-ETP)_n / CAD$$

No Excedente Hídrico (EXC), deve-se apenas analisar os seguintes critérios:

- a) Se  $ARM < CAD \sum EXC = 0$
- b) Se  $ARM = CAD \sum EXC = (P-ETP) - ALT$

A ETR e a PPT permitem estimar a infiltração eficaz ( $I_e$ ) que está diretamente relacionada com as variações dos níveis potenciométricos que refletem a variação das reservas de água subterrânea.

Segundo Castany (1975) a infiltração eficaz  $I_e$ , pode ser mensurada a partir da precipitação (PPT), da evapotranspiração real (ETR) e do escoamento superficial (ES), segundo a equação:

$$I_e = PPT - (ETR + ES)$$

Nas situações onde as características físicas e morfológicas dos solos permitem intensa infiltração, pode-se desconsiderar a interferência do escoamento superficial (ES) no balanço. Considerando-se ainda que para a presente metodologia, que avalia a infiltração (recarga) e a evaporação (perda) a partir da precipitação, pode-se inferir que todas as massas de água estão contempladas no balanço hídrico. A infiltração eficaz corresponde à quantidade da água de precipitação disponível para a recarga subterrânea e que, na ausência de medidas diretas da variação de carga hidráulica anual, pode ser também uma estimativa para a reserva renovável do sistema aquífero (LOUSADA, 2011).

#### *6.1.7 Resultados e discussões*

Os resultados do balanço hídrico climático podem ser visualizados na Tabela 4, onde se verifica que a média anual de precipitação atinge valores de 1.048 mm, com um período de maior precipitação entre os meses de fevereiro a maio. Verifica-se um déficit hídrico anual de 519 mm, distribuído principalmente ao longo do período entre agosto a dezembro.

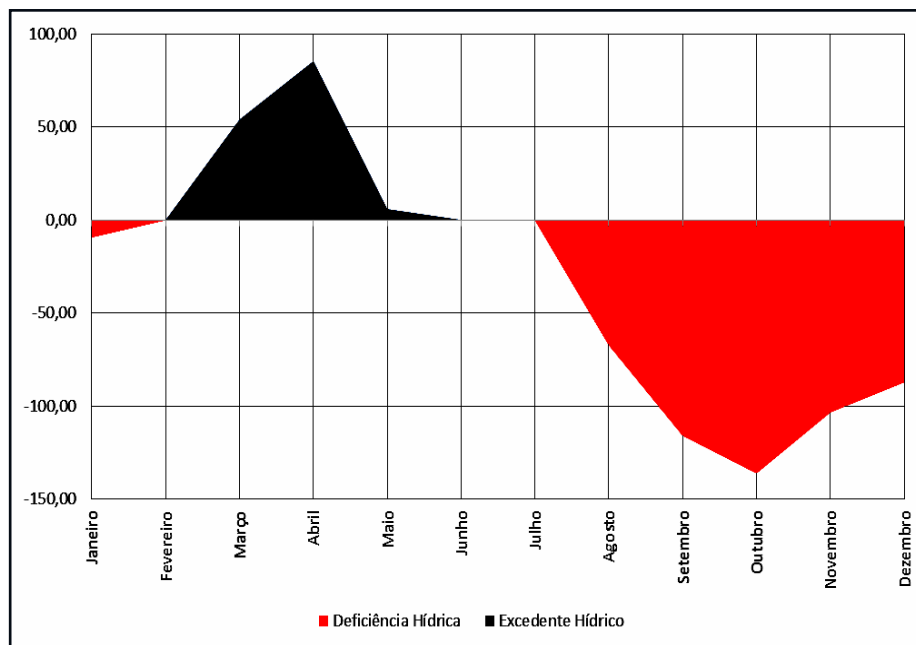
TABELA 4 - Balanço hídrico para o CIPP - período 1993 - 2016.

Meses	T	Im	K	ETP	PPT	PPT-ETP	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC	le
Jan.	24,03	10,5	1,06	105,80	96,6	-9,20	0,00	0,00	96,60	-9	0,0	0,0
Fev.	24,79	11,0	0,95	104,60	157,4	52,84	52,84	52,84	104,56	0	0,0	52,8
Mar.	26,82	12,4	1,04	146,30	247,5	101,16	100,00	47,16	146,34	0	54,0	101,2
Abr.	27,53	12,9	1	152,80	238,2	85,41	100,00	0,00	152,79	0	85,4	85,4
Mai	25,25	11,3	1,02	118,90	124,7	5,84	100,00	0,00	118,86	0	5,8	5,8
Jun.	23,96	10,5	0,99	97,90	77,5	-20,39	79,61	-20,39	97,89	0	0,0	-20,4
Jul.	22,85	9,8	1,02	86,90	38,0	-48,90	30,71	-48,90	86,90	0	0,0	-48,9
Ago.	24,00	10,5	1,03	102,40	4,5	-97,94	0,00	-30,71	35,21	-67	0,0	-30,7
Set.	25,58	11,6	1,00	121,30	5,4	-115,93	0,00	0,00	5,40	-116	0,0	0,0
Out.	26,30	12,1	1,05	139,00	2,8	-136,19	0,00	0,00	2,80	-136	0,0	0,0
Nov.	24,20	10,6	1,03	105,10	1,7	-103,38	0,00	0,00	1,70	-103	0,0	0,0
Dez.	24,05	10,6	1,06	106,10	18,9	-87,20	0,00	0,00	18,90	-87	0,0	0,0
	24,90	133,9	-	1.387,12	1.013,2	-373,92	463,17	0,00	867,94	519	145,3	145,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

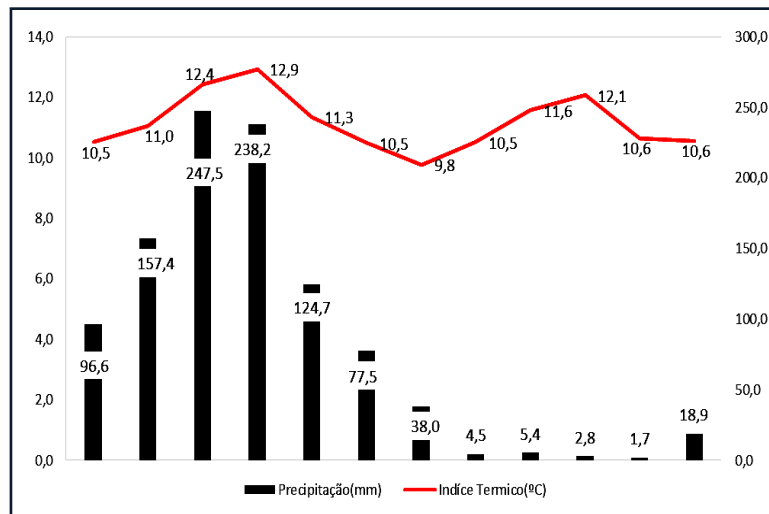
O balanço hídrico mostrou, ainda, que durante apenas nos meses de março e abril ocorre excedente hídrico, apesar de que nos meses de fevereiro, maio, junho e julho também não houve deficiência hídrica (Gráfico 4 e 5).

GRÁFICO 4 - Balanço hídrico para o CIPP – período 1995 - 2015.



Fonte: FUNCEME (2013).

GRÁFICO 5 - Balanço hídrico para o CIPP.



Fonte: FUNCEME (2013).

A recarga subterrânea interpretada pela infiltração eficaz ocorre principalmente nos meses de fevereiro a abril que corresponde ao período de maior precipitação na região. Observa-se que a partir de junho, a precipitação é menor que a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais de fatores atmosféricos e umidade do solo ocorre, ou seja, não existe recarga subterrânea entre junho a janeiro que corresponde ao período de estiagem da região estudada.

## 6.2 VEGETAÇÃO

O Complexo Industrial e Portuário Porto do Pecém (CIPP) encontra-se inserido no Ambiente do Complexo Litorâneo Setentrional (Litoral Setentrional do Nordeste), onde se destacam os seguintes ecossistemas: Ambiente Praiano, Ambiente da Planície Litorânea (vegetação pioneira Psamófila), Ambiente Dunar (floresta de dunas) e a Vegetação do Tabuleiro Pré-litorâneo e Plano Diretor Participativo de Fortaleza (PDPFOR).

Na região do CIPP destacam-se dentre outros os seguintes empreendimentos: Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), Termoelétrica da MPX (Energia Pecém), Terminal Portuário do Pecém e da Refinaria Premium II (Petrobras), além de outros empreendimentos.

### 6.2.1 Ambientes do Complexo Litorâneo Setentrional

O CIPP encontra-se inserido na planície costeira cearense sendo formada, sobretudo, pelo ambiente do Complexo Litorâneo Setentrional do Nordeste, destacando-se a vegetação dos campos dunares, praia, planície litorânea (vegetação pioneira Psamófila), vegetação dos tabuleiros pré-litorâneos, manguezal e mata ciliar (várzea) (MAJOR; SALES JR.; CASTRO, 2004; CASTRO; MORO; MENEZES, 2012).

Nos interflúvios destacam-se os ambientes mais florestais, com representantes arbóreo/arbustivo, com solo pouco ácido, como os Tabuleiros e Dunas, enquanto nas planícies (áreas de aporte sedimentar) sobressaem as matas ciliares devido, sobretudo, à rede de drenagem.

### 6.2.2 Ambiente praiano

O ambiente praiano situa-se entre a baixa-mar e a maré mais alta, coincidindo, geralmente, com a linha do estirâncio. A região praiana acompanha praticamente toda a linha da costa do município de São Gonçalo do Amarante, em Pecém e de Caucaia nas proximidades do rio Cauípe.

O ambiente praiano, consolidado ou rochoso, encontra-se formado por sedimentos de areias quartzosas e material orgânico como conchas; não apresenta vegetação superior. No entanto, ocorrem algumas algas marinhas dispersas. Encontra-se recoberto por uma biota bentônica bastante rica e diversificada, como moluscos (craca, ostra), equinodermas, crustáceos, anelídeos (polichaetos). Algumas aves migratórias intercontinentais passam pela região rumo ao extremo sul do continente latino, fugindo do rigor do inverno boreal, merecendo destaque os Charadriiformes, em especial *Charadriidae* (maçaricos), *Scolopacidae* (maçariquinhos) e *Laridae* (gaivotas).

### 6.2.3 Planície litorânea

A vegetação da planície litorânea (vegetação pioneira Psamófila) inicia-se logo após a linha do estirâncio (maré mais alta), entrando no continente



até o início do complexo dunar. A região litorânea do Pecém e adjacências apresentam-se com relevo de plano a levemente ondulado, com solo quartzoso, onde estão fixadas diversas herbáceas, formando um longo tapete verde.

As principais herbáceas encontradas na planície litorânea são o *Cyperus maritimum* (tiririca), *Paspalum maritimum* (gengibre), *Indigofera microcarpa* (anil), *Remirea marítima* (cipó-da-praia), *Blutaparon pontulacoides* (bredinho), dentre outras encontradas. O estrato arbustivo encontra-se formado, fundamentalmente, por *Byrsonima crassifolia* (murici), *Chrysobalanus icaco* (guajiru), *Jatropha pohliana* (pinhão) e diversas cactáceas, como *Cereus jamacaru* (mandacaru), *Pilosocereus sp* (facheiro) e *Opuntia sp* (cacto), onde se fixa em boa parte das pequenas dunas comuns na região do Pecém.

A inexistência de estrato arbóreo e do estrato arbóreo/arbustivo sobre a planície litorânea deve-se, sobretudo, ao constante movimento das areias quartzosas sobre as mesmas, pois uma vez soterradas, dificilmente sobrevivem, enquanto as gramíneas e demais herbáceas possuem uma maior capacidade de ressurgirem logo após a passagem da duna, nestas planícies costeiras do Pecém. A planície litorânea da costa de São Gonçalo do Amarante apresenta-se preservada apesar do avanço imobiliário na região (CEARÁ/SEINFRA, 2008).

#### 6.2.4 Campos dunares

O Complexo Dunas compreende a região da planície litorânea com relevo acidentado e razoavelmente ondulado, com solos arenoquartzosos. Conforme a sua tipologia vegetal recebe a denominação de dunas móveis (isenta de flora), dunas semifixas (com flora arbustiva dispersa) e dunas fixas (com espécies arbóreas e arbustivas agrupadas).

As dunas fixas situam-se, geralmente, a sota-vento dos diversos cordões dunares. Apresentam uma vegetação com dois estratos, o arbóreo podendo atingir 8,0 m, enquanto o arbustivo fica em torno dos 4,0 m, normalmente com fustes retilíneos encopados no dossel superior. Neste

ambiente verifica-se uma fina camada de húmus provinda da queda foliar local; praticamente não há herbáceas, em decorrência da competição pela luz solar, podendo ter discretos representantes da vegetação pioneira.

As principais espécies florísticas que compõem as dunas fixas nessa região são: *Ouratea fieldingiana* (batiputa), *Anacardium occidentale* (caju), *Casearia guianensis* (café-bravo), *Eugenia uvalha* (ubaia), *Ximenia americana* (ameixa), *Caesalpinia leiostachya* (pau-ferro), *Cocos nucifera* (coco), *Byrsonima crassifolia* (murici), *Cereus jamacaru* (mandacaru) e várias outras essências florestais (VALE, 2008).

#### 6.2.5 Tabuleiro pré-litorâneo

A rede de drenagem no ambiente do Complexo Litorâneo é relativamente homogênea, onde se verificam duas formações geomorfológicas predominantes: os vales e os interflúvios. Os manguezais e as matas ciliares estão situados nos vales, em uma área de aporte sedimentar mais grosseiro, enquanto nos interflúvios estão os Tabuleiros Pré-Litorâneos, assentados sobre a Formação Barreiras.

Suas principais espécies florísticas são: *Tocayena sp.* (jenipapo-bravo); *Zizyphus joazeiro* (juazeiro); *Mouraria sp.* (manipuça); *Cassia ramiflora* (pauferro); *Ximenia americana* (ameixa); *Guettarda sp.* (angélica); *Ouratea fieldingiana* (batiputa); *Anacardium occidentale* (caju); *Bromelia sp.* (croata); *Eugenia sp.* (ubaitinga); *Curatela americana* (lixeira); *Byrsonima sp.* (murici); *Cecropia sp.* (torém); *Combretum sp.* (mofumbo); *Eugenia uvalha* (ubaia); *Ouratea parvifolia* (batiputa); *Astronium fraxinifolium* (gonçalo-alves) etc. encontrados no Pecém (MAJOR; SALES JR.; CASTRO, 2004).

### 6.3 GEOMORFOLOGIA

A geomorfologia é representada pelas seguintes unidades: Planície Litorânea, Planície Fluvial, Tabuleiro Pré-Litorâneos e Depressão Sertaneja.

### 6.3.1 Planície litorânea

No extremo noroeste é possível destacar as formas de relevo correlativas à Planície Litorânea. Localizam-se próximo da linha de costa e resultam dos processos marinhos costeiros (praias e falésias), fluviomarinhos (estuário) e pela ação dos ventos (dunas e pós-praia). Dentre as formas de relevo da planície litorânea encontradas na área de influência do empreendimento destacam-se os campos de dunas (fixas/paleodunas e móveis), que representam uma unidade morfológica de acumulação caracterizada por morros de areia, eventualmente dissipados.

O solo dessa Unidade, Neossolo Quartzarênico, reflete a composição básica do depósito sedimentar essencialmente arenoquartzoso com minerais pesados, tendo a incorporação da matéria orgânica. São ambientes instáveis e com alta vulnerabilidade à erosão, sendo parcialmente submersos. As limitações da área estão relacionadas à implantação viária; loteamentos; baixo suporte para edificações; mineração desordenada; e restrições legais associadas aos terrenos de marinha.

O setor centro da área estudada apresenta a faixa de domínio dos sedimentos da Formação Barreiras. As características sedimentológicas e morfológicas, conseqüentemente a tipologia dos solos correlativos, apresentam variações que permitem a segmentação da unidade geológica: a) coberturas arenoargilosas; b) depósitos arenosos colúviais. Em termos geomorfológicos estes são qualificados como Tabuleiros Arenoargilosos e Tabuleiros Inumados, respectivamente.

Na zona de ocorrência dos Tabuleiros Inumados verifica-se a maior taxa de interferências sobre o meio, tendo em vista que nela encontram-se as principais indústrias instaladas e em instalação no CIPP, além de outros pequenos aglomerados populacionais, tendo sido afetada pelas obras de terraplenagem da Usina Siderúrgica Ceará Steel e da Usina Termelétrica (UTE) Porto do Pecém, usina termelétrica do Grupo Endesa-Energia Pecém, que se encontra implantada no CIPP.

Os maciços residuais ocorrem no contexto da área de influência do projeto, na forma de pequenos modelados com altitudes variadas, onde se pode citar: Serra da Conceição, os serrotes das Danças, Preto, Salgadinho e Camará, dentre outros.

Ocorre nas zonas mais interiores dos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante e nas faixas de terras dos demais municípios inclusos na área de influência do empreendimento. Dentre as características naturais que individualizam a unidade morfológica, podem ser assinaladas as seguintes: acentuadas variações de tipos de rochas; cobertura vegetal por caatingas que revestem solos; ocorrência frequente de chãos pedregosos; ocorrência eventual de áreas sazonalmente inundáveis.

As potencialidades hídricas da área afetada pelo empreendimento retratam as compartimentações geológicas e geomorfológicas da área estudada. Assim, verifica-se, no setor sul.

.

### *6.3.2 Planície fluvial*

As maiores planícies fluviolacustres encontradas na área são formadas pelo rio Cauípe e riachos Guaribas e Matões. O primeiro e o último se correlacionam com a formação do Lagamar do Cauípe e a lagoa formada na foz do rio Cauípe; já o segundo é formado a partir do escoamento das águas do lagamar do Gereraú, lagoa formada pelo acúmulo das águas de alguns canais de drenagem que convergem para a bacia da lagoa. A desestabilização das dunas por desmatamento pode reativar as ações erosivas e intensificar o trânsito de sedimentos arenosos assoreando manguezais, áreas urbanas e espelhos d'água e rios.

### *6.3.3 Tabuleiros pré-litorâneos*

Apresentam-se dispostos à retaguarda da planície litorânea, contatando para o interior, praticamente sem ruptura topográfica, com a depressão sertaneja. A penetração dos tabuleiros para o interior atinge, em média, 20 km. Em alguns locais, como nas praias de Iparana, Icaraí e Taíba,

eles atingem o mar, com escarpas esculpidas em falésias.

São constituídos, basicamente, pelos sedimentos da Formação Barreiras; têm altitudes variáveis em torno de 10-40m e raramente ultrapassam o nível de 40m. A área dos sedimentos mencionados evidencia-se como uma rampa suavemente inclinada para o litoral com declives que não superam a classe de 5%. Representam, assim, um típico glaces de deposição, que sulcado pela drenagem que demanda o litoral, isola interflúvios de feições tubuliformes. Daí o termo popular – tabuleiro – consagrado pela literatura geográfica brasileira.

A pequena capacidade de incisão linear, proporcionada por uma drenagem de fluxo hídrico lento, confere a inexpressiva amplitude altimétrica entre o topo dos interflúvios e os fundos de vales. Esta amplitude dificilmente supera 10 metros, mesmo quando se considera os coletores principais de drenagem como no caso dos rios São Gonçalo e Cauípe.

As vertentes que se inclinam de modo gradativo para os fundos de vales têm, quase sempre, feições retilíneas, expondo, às vezes, um material concessionário, cuja natureza ferralítica do cimento dificulta o trabalho erosivo. O que melhor identifica as feições do relevo em análise é a cobertura arenosa, cuja espessura chega a ser superior a 2,00 m.

Apenas em porções muito restritas e pequena expressão territorial, a referida cobertura é substituída por material de textura argilosa, o que dá à superfície feições irregulares, contrastantes com a uniformidade dos relevos de topos horizontais com cobertura arenosa. As boas condições para percolação da água conferem aos solos uma drenagem excessiva, limitando a ação erosiva dos processos fluviais e acentuando os efeitos da lixiviação.

Assim, o trabalho de desgaste só chega a se tornar mais pronunciado, quando os sedimentos argilosos sotopostos à cobertura arenosa chegam a aflorar. Dificulta-se a ablação superficial à custa do escoamento difuso.

Nos Tabuleiros Pré-litorâneos, as classes de solos são variadas e a distribuição dos mesmos configura a distinção notada no tocante à fisionomia do recobrimento vegetal. Essas características justificam a não ocorrência, na área em estudo, de coberturas vegetais primárias, notando-se a evidente

preponderância de ambientes em sucessão ecológica.

Os tabuleiros são sulcados por drenagem de padrão paralelo cujo poder de deposição dos rios é responsável pelo desenvolvimento das planícies aluviais que têm significativa importância para as atividades agrícolas. Essas planícies são parcialmente ocupadas pelas matas ciliares com grande frequência de *Copernicia prunifera* (carnaúba).

#### 6.3.4 Depressão sertaneja

Trata-se de áreas abrangendo os setores de contato entre o embasamento cristalino – onde se desenvolvem as depressões sertanejas – e os sedimentos da Formação Barreiras com tabuleiros. O contato não se manifesta na paisagem através de rupturas topográficas nítidas.

A espessura do manto arenoso superficial é maior próximo à linha de costa, tornando-se mais delgada para o interior no contato com o embasamento. Nos baixos vales dos rios, o entalhe de drenagem assume maiores proporções, permitindo a exumação de rochas cristalinas até próximo do mar. À medida que se penetra para o interior, as condições geoambientais assumem características típicas dos sertões. As superfícies degradacionais são submetidas aos efeitos da semiaridez e acham-se revestidas por caatingas de padrões fisionômicos e florísticos variados.

## 6.4 GEOLOGIA

A caracterização geológica reflete os aspectos das principais unidades geológicas, seus processos genéticos e as relações existentes com a hidrogeologia, bem como com o controle estrutural de drenagens.

Os trabalhos de pesquisa geológica, no tocante à abordagem das rochas cristalinas, realizados na área, estão concentrados em caracterizar rochas de origem metamórfica e reconhecer o limite destas unidades com a Formação Barreiras. As coordenadas apresentadas estão referenciadas pelo *Datum* / Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul (SIRGAS) 2000, zona 24 sul.

A Unidade Canindé está representada por biotita xistos, muscovita gnaisses, quartzitos, ortognaisses e gnaisses migmatíticos, ocorrendo em quase a totalidade da área estudada.

As rochas gnáissicas caracterizam a Unidade Independência e os afloramentos estão muito alterados, porém é possível diferenciá-los dos gnaisses da Unidade Canindé por possuírem pouca ou nenhuma mica.

A Unidade Independência ocorre ao sul da área e, em termos lito estratigráficos, comporta-se como embasamento encaixante das rochas neoproterozóicas.

A Formação Barreiras é observada como paredões em cortes de estrada, onde foram observadas a fácies fina, a muito fina, e média da mesma. Ela exibe cor creme clara avermelhada, por vezes com aspecto pintalgado, sendo este relacionado a nódulos oxidados do arenito. Os nódulos apresentam cor em tons laranja-avermelhados.

As Dunas são sedimentos recobrem discordantemente os sedimentos da Formação Barreiras e estão distribuídos de modo praticamente contínuo ao longo da faixa costeira, à retaguarda das dunas recentes, com larguras variáveis (média oscilando ente 2 a 4 km) e pequenas espessuras, no geral inferior a 20 m. São sedimentos eólicos litorâneos de granulometria fina, localmente de granulometria fina a média, apresentando extensas estratificações plano-paralelas métricas e estratificações cruzadas, raramente com níveis siltosos.

#### *6.4.1 Unidades Paleoproterozóicas*

Segundo o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) ocorrem na área as Unidades Canindé e Independência, pertencentes ao Complexo Ceará. Os dados adquiridos através de campanha de campo revelam delimitação mais precisa dos lito tipos pertencentes às Unidades supracitadas.

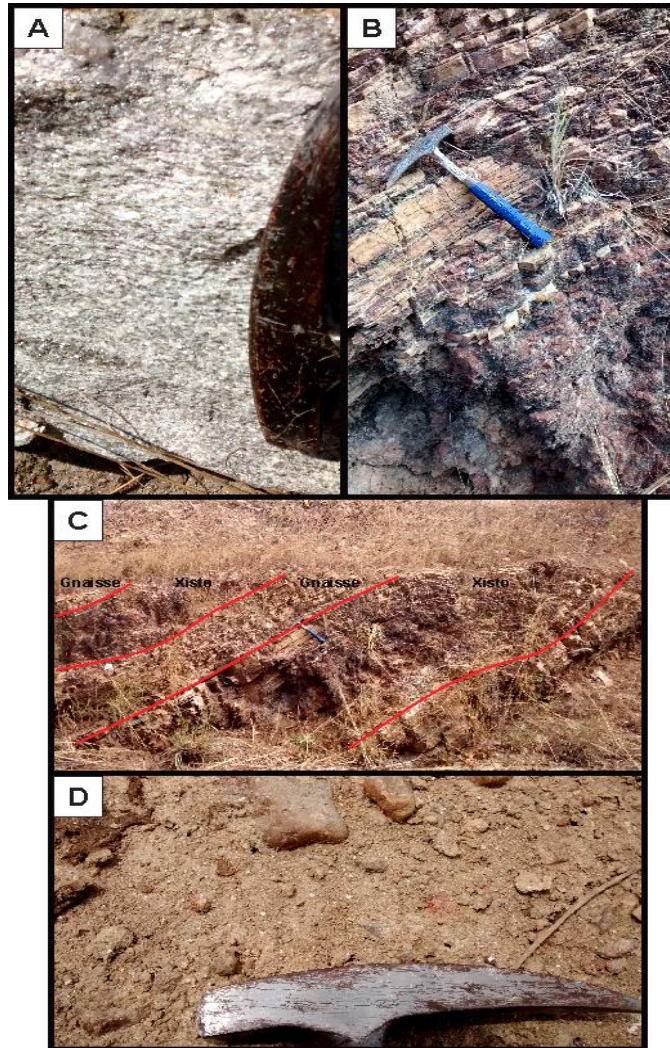
#### 6.4.1.1 Unidade Canindé

É representada por biotita xistos, muscovita gnaisses, quartzitos, ortognaisses e gnaisses megalíticos. Também ocorrem corpos pegmatíticos nas imediações dos ortognaisses, associados principalmente aos biotita xistos.

Os muscovita gnaisses (Figura 9 A) ocorrem na região sul a centro-sul da área, havendo intercalação com os biotita xistos no limite entre as duas sequências, exibindo estruturas interdigitadas em vários níveis de escala de observação (Figura 9B e 9C). Nesses afloramentos os gnaisses apresentam menor conteúdo em muscovita. São compostos basicamente de quartzo, feldspato e muscovita com alguma presença de biotita e anfibólio, com foliação bem marcada pela muscovita. De modo geral, seu modo de ocorrência é em forma de grandes e numerosos blocos métricos da rocha, associados a obras de engenharia próximo às rodovias. Essas rochas produzem solo argiloso a argiloarenoso de cor marrom escura contendo muita muscovita (Figura 9).



FIGURA 9 – Unidade Canindé: A) Exibição da textura do muscovita gnaisse em amostra de mão (520324mE / 9596290mN); intercalação entre muscovita gnaisse e biotita xisto. Em (B) a intercalação ocorre em escala decamétrica, enquanto em (C) é em escala métrica (510560mE / 9592034mN); e solo marrom escuro (D) argiloso a argiloarenoso derivado dos muscovita-gnaisses. Notar muscovita como pequenos grãos de cor creme clara na foto (519882mE / 9592368mN).



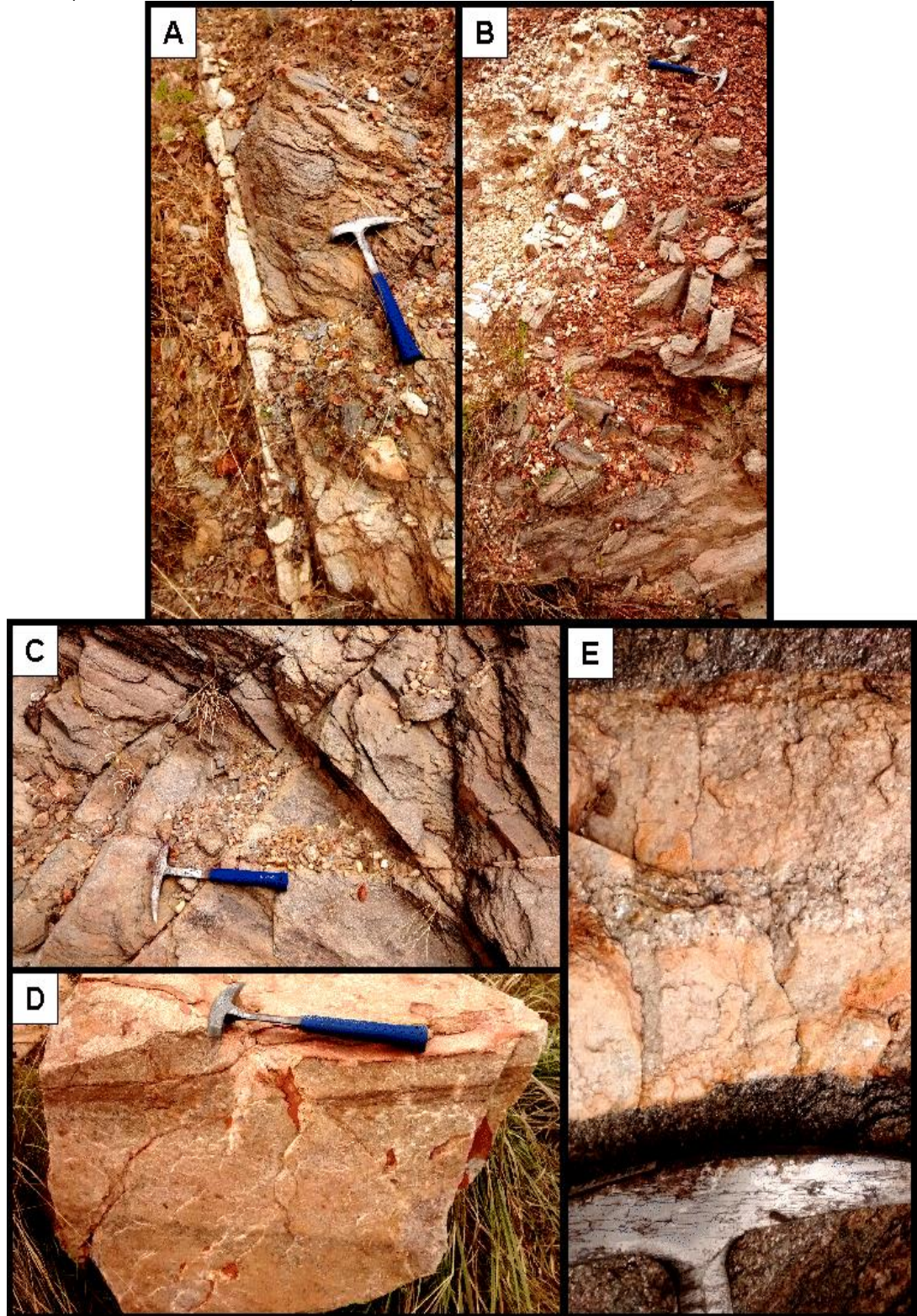
Fonte: Acervo do autor.

Os biotita xistos ocorrem bordejando os ortognaisses até a região centro da área. Possuem diversos corpos pegmatíticos com turmalina e aplíticos concordantes e discordantes com tamanhos variados em forma de dique ou lente, podendo alcançar mais de 2 m de espessura (Figura 10A, 10B e 10C). Os xistos são compostos basicamente por quartzo, algum feldspato e biotita, sendo que está sempre com conteúdo acima de 60% na rocha. Neste litotipo são melhores evidenciadas as feições rúpteis da área (Figura 10D).

Esses diques foram desenvolvidos segundo esforços tectônicos em caráter rúptil que promovem a abertura de uma fratura existente ou gerada pela própria deformação. Esse evento ocorre ao menos duas vezes, onde percolam fluidos ricos em alumínio e elementos halogênicos e outro de composição basicamente quartzo-feldspática, originando diques com muscovita/turmalina e somente com quartzo e feldspato, respectivamente (Figura 10).

É importante ressaltar que os diques não apresentam atitude estrutural que permita ser correlacionada às famílias de fraturas identificadas.

FIGURA 10 – Unidade Canindé: A) Dique pegmatítico discordante a foliação com cerca de 10 cm de espessura recortando a rocha biotita xisto (515343mE / 9597676mN); B) Corpo pegmatítico lenticular concordante a foliação presente no biotita xisto (515343mE / 9597676mN); C) Famílias de fraturas evidenciadas no biotita xisto; D) Bloco de pegmatito associado à lente supracitada; e detalhe de um dique pegmatítico. Notar que o centro do dique possui grande conteúdo em mica, indicando ao menos duas fases de abertura do fraturamento (515343mE / 9597676mN).



Fonte: Acervo do autor.

Os quartzitos ocorrem como um corpo no centro-sul da área de estudo. São impuros, tendo por vezes muscovita e/ou óxidos de ferro em sua composição. No serrote que ocorre próximo ao quartzito, classificado pelo serviço geológico como tal, é de fato sustentado por muscovita gnaisses e principalmente por biotita xistos (Figura 11).

FIGURA 11 – Unidade Canindé: afloramento e blocos métricos de quartzito em corte da rodovia CE-085.

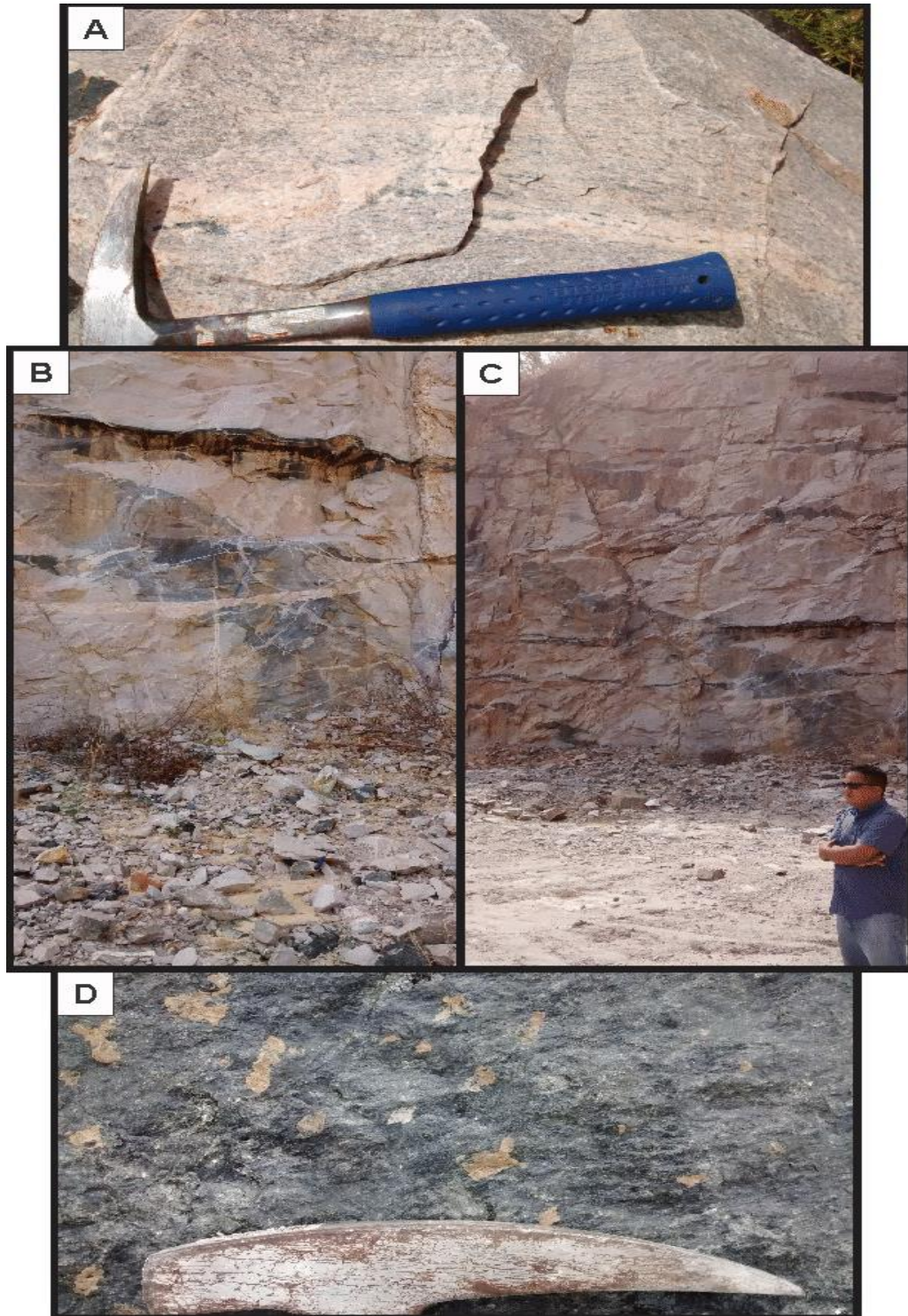


Fonte: Acervo do pesquisador

Os ortognaisses apresentam baixa deformação, por vezes parecendo não apresentar deformação alguma a olho nu ou com auxílio de lupa de mão (Figura 12A). São compostos por quartzo, plagioclásio, feldspato potássico e biotita, de textura média e raramente fina e possuem cor rósea a róseo-acinzentada. Ocorrem diversos diques máficos, identificados como dioritos, com direções e espessuras variadas, alcançando até 3m de espessura (Figura 12B e 12C). Ao receber deformação, os diques atuam gerando planos de deslizamento pela reorganização de seus minerais (Figura 12D). De ocorrência rara, também é observada a reação entre o ortognaisse e diorito, gerando o mineral epidoto nas bordas do diorito.

Com o intuito de caracterizar melhor este litotipo, adquirir dados estruturais e visando suprir a carência de afloramentos da área, foram investigadas pedreiras no sudeste da área de estudo. A empresa Britap permitiu acesso à sua frente de lavra, cerca de 2,5 km distante da área em questão (Figura 12).

FIGURA 12 – Unidade Canindé: A) Exibição da cor rósea característica do ortogneisse e de sua textura média, com baixo grau de deformação (520974mE / 9593108mN); B) e C) Frente de lavra da empresa Britap. Notar diques de diorito recortando o pacote rochoso (522944mE / 9590513mN); e D) visualização do plano de deslizamento do diorito, gerado ao concentrar a deformação dúctil recebida (522944mE / 9590513mN).

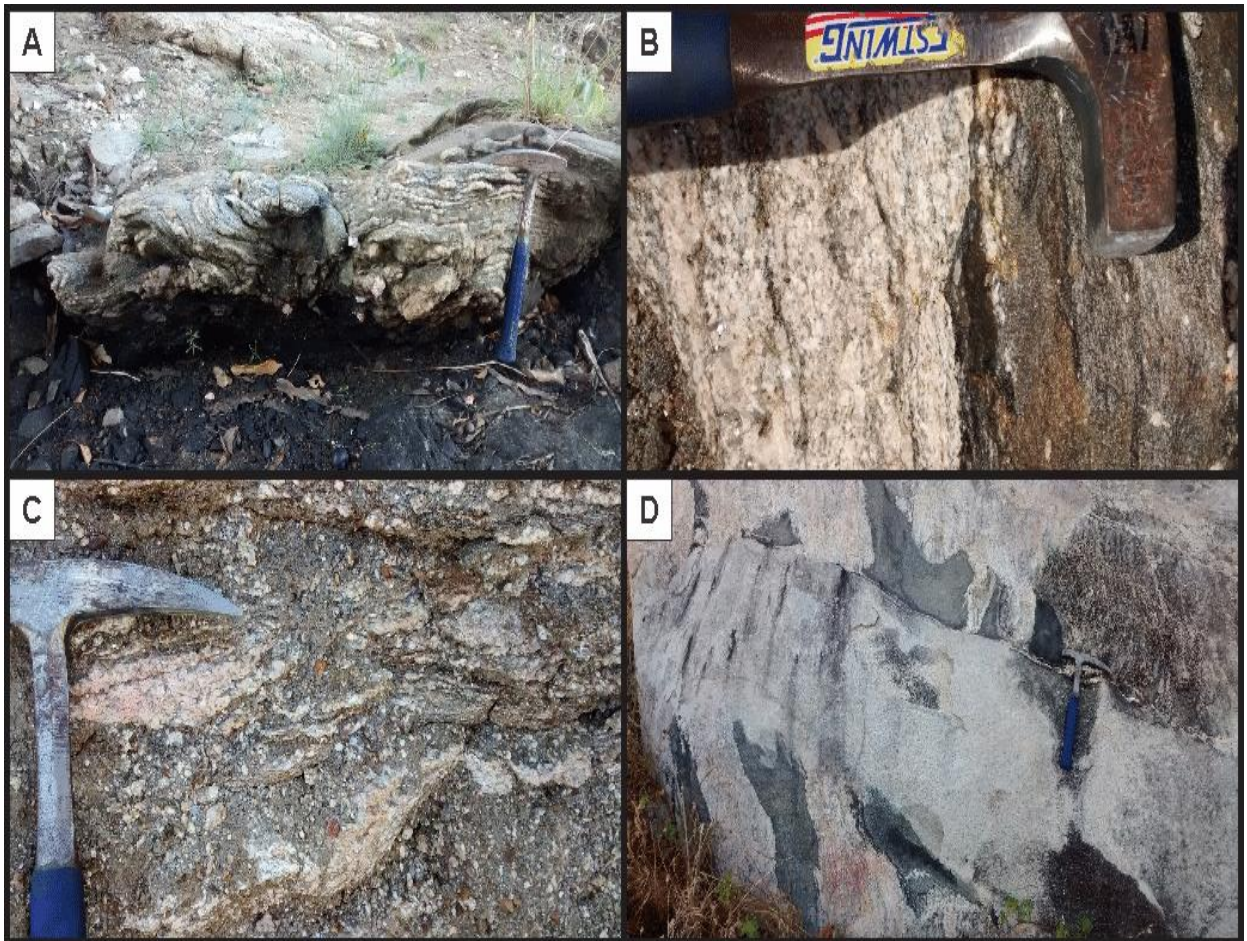


Fonte: Acervo do pesquisador

Os gnaisses migmatíticos ocorrem concentrados no extremo centro-sul da área. São observados progredindo, de sudoeste para nordeste, de

intercalações de muscovita gnaisses e biotita xistos, seguidos por gnaisses migmatíticos intercalados a biotita-granada xistos (Figura 13) evoluindo para migmatitos propriamente ditos (Figura 13). Também há presença de melanossoma em forma de bolsões, possivelmente derivando de boudinagem durante os processos de fusão parcial, e diques pegmatíticos e aplíticos recortando este litotipo (Figura 14).

FIGURA 13 – Unidade Canindé: A) Exposição da textura do migmatitos, encontrado em corte no rio Cauípe (515510mE / 9591433mN); B) Contato revelando intercalação entre gnaisse migmatítico e biotita-granada xisto (516216mE / 9591282mN); C) exibição da textura do biotita-granada xisto. Notar pontos avermelhados representando o mineral granada (515344mE / 9590820mN); D) Dique aplítico recortando gnaisse migmatítico. Não há borda de reação e o contato do dique é brusco (514605mE / 9591074mN).



Fonte: Acervo do autor.

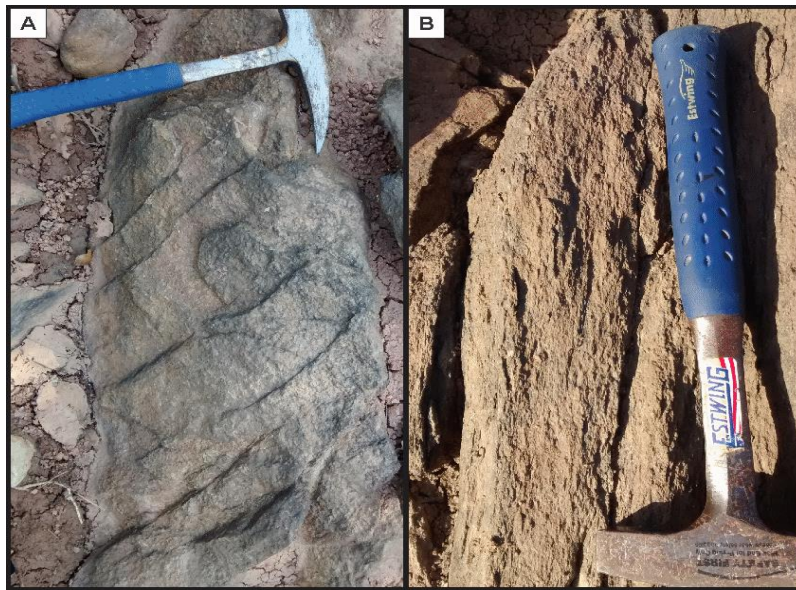
#### 6.4.1.2 Unidade Independência

A Unidade Independência ocorre em forma de gnaisses com pouco ou nenhum mineral micáceo, poderia estar se referindo a gnaisses pertencentes à Unidade Canindé. Entretanto, os gnaisses desta Unidade, na área de

estudo, possuem características (como o conteúdo em mica) que permitem os diferenciar dos gnaisses a oeste da área e então os classificar como pertencentes à Unidade Independência.

As rochas que caracterizam esta unidade são denominadas de gnaisse. Os afloramentos associados a estas rochas estão muito alterados, porém é possível diferenciá-los dos gnaisses da Unidade Canindé por possuírem pouca ou nenhuma mica (Figura 14).

FIGURA 14 – Unidade Independência: aspecto textural dos gnaisses (511033mE / 9599922mN).



Fonte: Acervo do autor.

#### 6.4.2 Geologia estrutural

Os paragnaisses do Grupo Ceará apresentam uma megaestrutura dobrada com flancos de direção N-NW e NE com zona de charneira na direção E-W. A foliação presente nos paragnaisses do Grupo Ceará apresenta feições similares à megaestrutura. Planos de foliação possuem direção NE e NW com mergulhos para NW e SE, variando de médio ângulo (30° a 45°) a alto ângulo (> 70°).

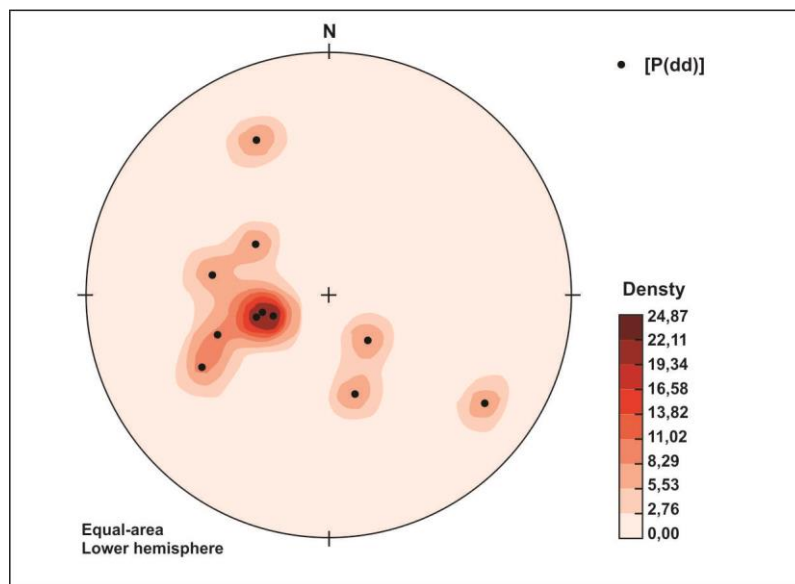
Os planos controlam a direção dos elementos estruturais formados durante a deformação rúptil (fraturas e falhas) subsequente à deformação plástica/dúctil que ocorreu no Ciclo Brasileiro (600 Ma). As direções destas estruturas são paralelas a inúmeras drenagens que ocorrem na área, e

também são observadas nas outras unidades litoestratigráficas, a exemplo da Formação Barreiras e Dunas e, ocasionalmente, podem ser encontradas em *beach rocks* em zonas de praia.

A fotointerpretação das imagens de satélite não revelou estruturas geológicas relevantes para o estudo. Isto se deve também porque a área possui relevo dissecado e relativamente plano, visto que relevos que se destacam costumam refletir feições estruturais locais. Contudo, foi possível obter informações estruturais relevantes considerando a problemática envolvendo afloramentos.

A foliação, de modo geral, apresenta direção NE-SW. No centro-norte da área é observado um dobramento que controla os serrotes no local. A figura abaixo contém a compilação dos dados de foliação (Figura 15).

FIGURA 15 – Diagrama de polo das atitudes de foliações encontradas na área de estudo. A alta concentração de polos indica as atitudes extraídas do dobramento no centro-norte da área, com direção de mergulho para NE.

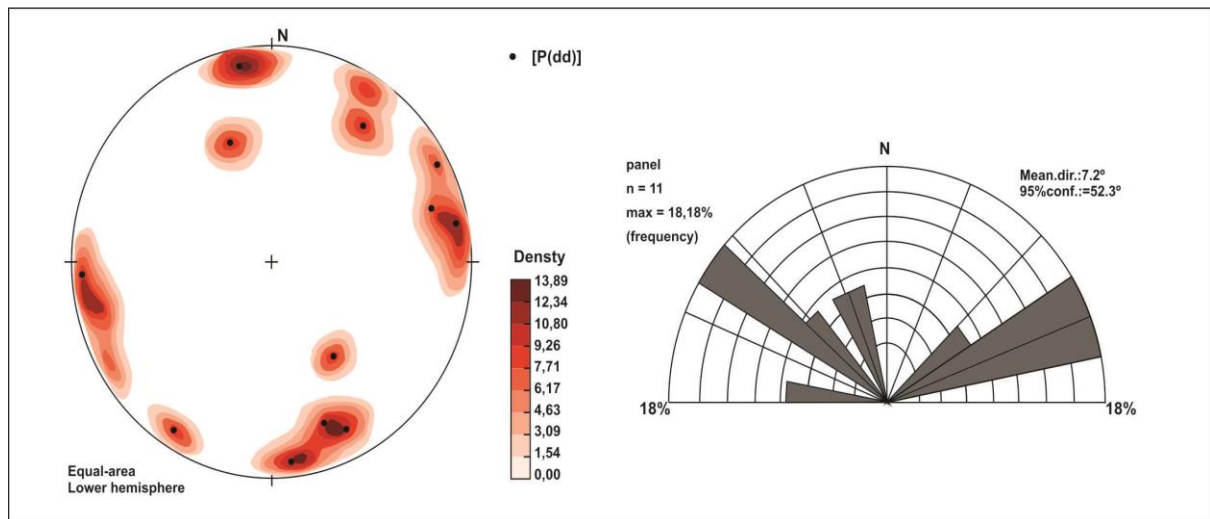


Fonte: Acervo do autor.

São observadas duas famílias de fraturas principais. A primeira família possui direção N305°, subvertical, fechada, com espaçamento entre 1 e 3 m (podendo alcançar até 20 m) e comprimento entre 2 e 15 m. A segunda possui direção média N75°, subvertical, fechada, com espaçamento entre 0,5 e 2 m (podendo ter máximo de 5 m) e comprimento menor do que 1 m. A figura abaixo resume as informações adquiridas para estruturas rúpteis (Figura 16).



FIGURA 16 – Diagrama de polo e roseta para fraturas encontradas na campanha de campo. É importante notar que os sistemas de fraturamento são de modo geral subverticalizados.

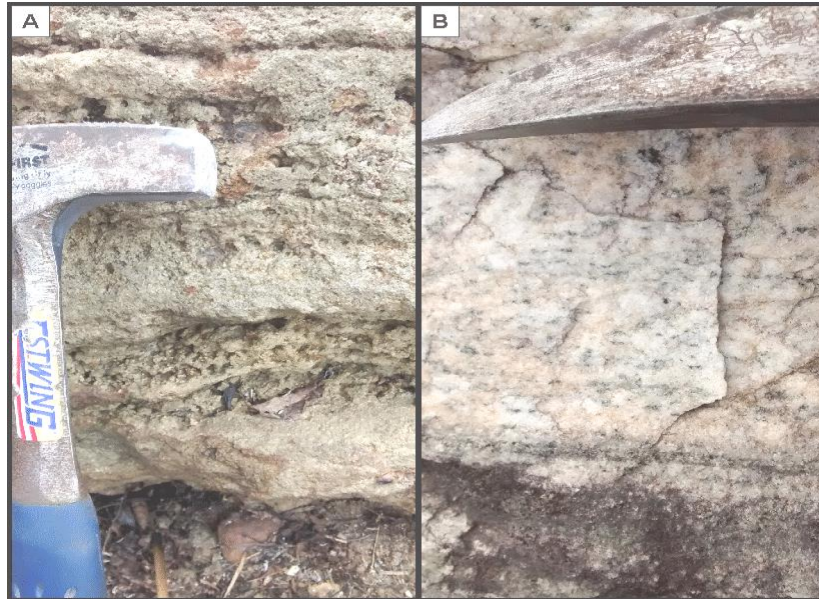


Fonte: Acervo do autor.

Os planos controlam a direção dos elementos estruturais formados durante a deformação rúptil (fraturas e falhas) subsequente à deformação plástica/dúctil que ocorreu no Ciclo Brasileiro (600 Ma). As direções destas estruturas são paralelas a inúmeras drenagens que ocorrem na área e também são observadas nas outras unidades litoestratigráficas, a exemplo da Formação Barreiras e Paleodunas e, ocasionalmente, podem ser encontradas em *beach rocks* em zonas de praia.

Não foram encontradas evidências que permitam indicar a presença de falhas importantes. Contudo, no extremo sudeste da área, foi encontrada uma intercalação de xistos e gnaisses, associados a migmatitos, afetados por fluidos hidrotermais, representados pela epidotização dos mesmos. A CPRM também descreve uma zona de cisalhamento indiscriminada nos arredores. Esses dados apontam para uma importante canalização de fluidos e possível zona de cisalhamento, entretanto somente essa informação não é satisfatória para caracterizar tal feição (Figura 17).

FIGURA 17 – A) Rocha epiditozada evidenciando metassomatismo causado por fluido hidrotermal (517971mE / 9590154mN); e B) pegmatito metassomatizado com ocorrência de epidoto (pontos esverdeados na rocha) (517971mE / 9590154mN).



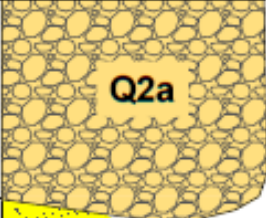

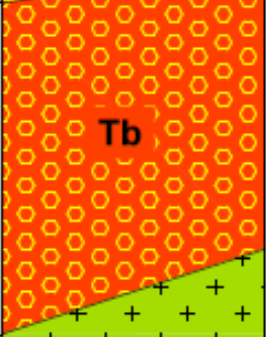
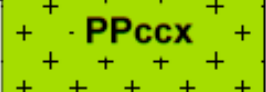
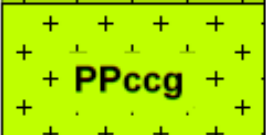
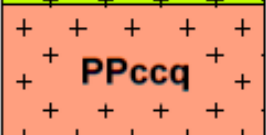
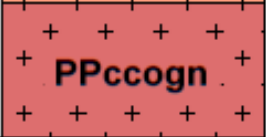

Fonte: Acervo do autor.

#### 6.4.3 Litoestratigrafia

Em estudos cronológicos do Grupo Ceará realizados por Arthaud *et al.* (2008), observa-se o mesmo com idade máxima de sedimentação toniana (750 Ma). Esta sequência foi posteriormente deformada durante o Ciclo Brasileiro (600 Ma) sob condições metamórficas que variam da fácies anfíbolito superior a anatexia com produção de fundido (migmatitos, granitos (figura 18 e pegmatitos), posteriormente ocorrendo um retrometamorfismo na fácies xisto verde.

Na área são observados diferentes tipos litológicos, desde sedimentos clásticos praias, aluvionares, dunas e clásticos Barreiras, até a ocorrência de rochas cristalinas, representadas por gnaisses, migmatitos e granitos, (Figura 18) conforme apresentado na coluna litoestratigráfica a seguir:

FIGURA 18 - Coluna litoestratigráfica.

	UNIDADE GEOLÓGICA	UNIDADE GEOLÓGICA	COLUNA ESTRATIGRÁFICA
Quaternário	Depósitos flúvio- aluvionares.	Areias e cascalhos, siltes e argilas, com matéria orgânica variável compreendendo sedimentos fluviais, lacustres e estuarinos.	 Q2a
	Dunas/Paleo dunas	Areias esbranquiçadas, de granulação fina a média, bem selecionadas predominantemente quartzosa, com níveis de minerais pesados.	 Qd
Tercio-quaternário	Fomação Barreiras	Sedimentos areno-argilosos, com níveis lateríticos e coloração avermelhada, creme ou amarelada. Níveis conglomeráticos na base do grupo (Fomação Barreira) gradando para o topo com níveis argilo-arenosos e arenosos.	 Tb
Paleoproterozóico	Unidade Canindé	Representada por biotita-xistos (PPccx), muscovita-gnaiss (PPccg), Quartzitos (PPccq), ortognaisses (PPccogn) e gnaisses-migmatíticos. A disposição entre entre Bt-xisto e ms-gnaiss é marcado por intercalações entre os mesmos. Ocorrem Corpos pegmatóides métricos associados aos bt-xistos, originados dos ortognaisses.	 PPccx  PPccg
	Unidade Independência	Gnaisses de composição quartzo-feldspática com pouco ou nenhum conteúdo em minerais micáceos.	 PPccq  PPccogn  PPcci

Fonte: Adaptado da CPRM (2003).

O mapa geológico apresenta em sua porção cristalina sul, rochas do Proterozóico, compostas pelo Grupo Ceará: Unidade Canindé (quartzitos, biotita-xistos, muscovita-gnaiss e ortognaisses) e Unidade Independência (гнаisses).

A porção norte é dominada por rochas sedimentares do Grupo Barreiras Tércio-Quaternárias e sedimentos de dunas do Quaternário, seguindo mais a norte.

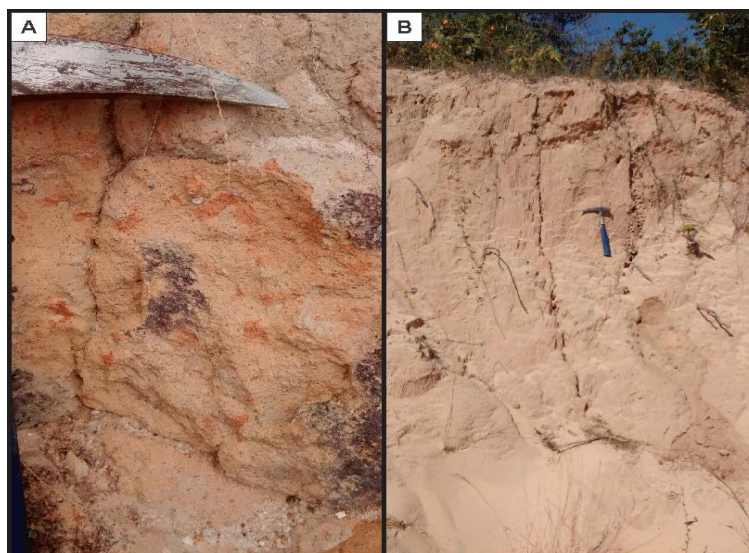
Compondo as litologias recentes do Quaternário, também temos sedimentos argilosos das lagoas e areno-argilosos das drenagens da região.

Estruturalmente foi mapeado uma dobra na Unidade Canindé, na litologia muscovita-xisto, além de lineamentos, ora SW-NE ora N-S.

#### 6.4.4 Formação Barreiras

Esta formação é observada em cortes da rodovia CE-085, onde foram observadas as fácies fina a média da mesma. A Formação Barreiras exibe cor creme, clara, avermelhada, por vezes com aspecto pintalgado, sendo este relacionado a nódulos oxidados do arenito. Os nódulos apresentam cor em tons laranja-avermelhados (Figura 19).

FIGURA 19 – Formação Barreiras: exibição das texturas encontradas nas rochas da Formação Barreiras. Em (A) é observada a fácies média com aspecto pintalgado produzido por nódulos laranja-avermelhados (521170mE / 9596460mN); e em (B) a fácies fina a média, de textura mais homogênea (514251mE / 9602186mN).



Fonte: Acervo do autor.

Esta unidade litoestratigráfica ocorre entre os gnaisses do embasamento (Grupo Ceará) situados na porção sul e os sedimentos arenosos da Formação Dunas situados na porção centro-norte da área.

Possui largura variável acompanhando a linha de costa e podendo chegar, predominantemente, até 20 km continente adentro em direção ortogonal à costa. Ocorre em contato discordante angular e erosivo sobreposta às rochas cristalinas pré-cambrianas do Grupo Ceará e sotoposta às Dunas. Existe um sistema de fraturas (neotectônica) na Formação Barreiras que controla também a orientação das drenagens das principais bacias costeiras, onde na direção entre 700az e 400az correm os principais rios da região. (Figura 20).

FIGURA 20 - Fraturas neotectônicas na Formação Barreiras, localizadas na margem esquerda da CE-348, em passivos ambientais que ocorrem numa área bastante escavada no Pecém- São Gonçalo do Amarante.



Fonte: Acervo do pesquisador

É constituída de sedimentos arenoargilosos, intercalada com níveis secundários de silte e observa-se uma espessa camada de laterita rica em limonita com estrutura nodular, fortemente litificada, situada na porção mais superior da sequência. Na base ocorrem conglomerados grosseiros com matriz ferruginosa. Os arenitos apresentam estratificações plano-paralelas e cruzadas, evidenciando o ambiente fluvial continental na sua deposição em regime climático semiárido com chuvas esporádicas de fluxo torrencial, fato observado em função da ocorrência dos conglomerados de diâmetros centimétricos, predominantemente até 5 cm.

#### 6.4.5 Dunas

Estes sedimentos recobrem discordantemente os sedimentos da Formação Barreiras e estão distribuídos de modo praticamente contínuo ao longo da faixa costeira, à retaguarda das dunas recentes, com larguras variáveis (média oscilando ente 2 a 4 km) e pequenas espessuras, no geral inferior a 20 m. São sedimentos eólicos litorâneos de granulometria fina, localmente de granulometria fina a média, apresentando extensas estratificações plano-paralelas métricas e estratificações cruzadas, raramente com níveis siltsosos.

Formam cordões paralelos à linha de costa, possuindo larguras variáveis, com média de 2 km e espessuras geralmente inferiores a 30 m, sobrepondo-se, na maioria das vezes, à Formação Barreiras. Sua continuidade pode ser interrompida, às vezes, pela presença de planícies fluviomarinhas ou, mais raramente, pela continuidade em superfície dos clásticos da Formação Barreiras. Quanto à morfologia, apresentam feições de barcanas (meia-lua) com suaves declives a barlavento, com declives bem mais acentuados das encostas protegidas da ação eólica.

São sedimentos eólicos litorâneos, possuindo localmente lentes de sedimentos fluviomarinhas, compostos por areias brancas a cremes, bem selecionadas, de granulometria fina e níveis grosseiros milimétricos com presença de minerais pesados.

A pressão de uso e ocupação sobre as zonas costeiras no mundo todo e os seus efeitos sobre o equilíbrio dos ecossistemas têm sido um assunto frequentemente abordado na literatura científica. As regiões costeiras são afetadas constantemente por fatores naturais morfodinâmicos – tais como direção e intensidade de ventos e correntes marinhas, altura de ondas e variações do nível de maré, entre outros – que modificam bruscamente as feições morfológicas locais (COSTA *et al.*, 2006).

A costa cearense encontra-se sob a influência de um regime climático equatorial semiárido, com altas taxas de insolação, temperatura média anual de 26,9°C com variações inferiores a 5°C e umidade relativa do ar variando de 83,9%, em março, a 74% em setembro. A pluviosidade concentra-se em

quatro (4) meses consecutivos, geralmente de fevereiro a maio, com média anual de 1440 mm.

FIGURA 21 - Paisagem de sedimentos pertencentes a Formação Dunas, ao longo da Rodovia CE-115, Pecém / São Gonçalo do Amarante.



Fonte: Acervo do pesquisador.

FIGURA 22 - Paisagem de sedimentos pertencentes a Formação Dunas, ao longo da CE/422, Pecém / São Gonçalo do Amarante.



Fonte: Acervo do pesquisador.

Os ventos são, predominantemente, em direções nordeste e sudeste e a região costeira caracteriza-se por um clima de ventos estável. As

velocidades e as direções dos mesmos são bastante constantes ao longo do ano, e as velocidades mais frequentes estão entre 6-9 m/s de ESE e normalmente caracterizam os meses de inverno austral, a partir de maio até dezembro (BENSI; MARINHO; MAIA, 2005).

O vento é responsável pela geração de vagas na região, as quais têm um papel importante no balanço litorâneo de sedimentos. Além disso, a geração de correntes provocadas por ele, nas áreas rasas e o transporte de sedimentos à elas associadas, podem ser importantes para o balanço anual de sedimentos (BENSI; MARINHO; MAIA, 2005).

#### 6.4.6 Aluviões

São representados por depósitos de sedimentos inconsolidados compostos basicamente de areia e argila associados principalmente ao rio Cauípe. Na região, este rio possui caráter meandrante e nas curvas dos meandros são observadas algumas ocorrências de cascalho.

São sedimentos inconsolidados recentes encontrados nas margens das drenagens da região. Compostos de areia, conglomerados, seixos e níveis argilosos associados à fase úmida do sistema de drenagem, possuindo pequenas espessuras, quando ocorrem em áreas cristalinas e praticamente não ultrapassam a 5m, aumentando tais espessuras na medida em que estão localizadas em áreas de litotipos sedimentares, a exemplo do Barreiras e Dunas. Nas áreas de foz para o oceano, possuem influência de sedimentação marinha com contribuição de bioclastos e água salina. Suas principais ocorrências podem ser observadas ao longo do rio Cauípe, onde o regime intermitente das águas permite o contato visual direto com as manchas aluvionares.

#### 6.5 HIDROGRAFIA

O sistema hidrográfico da região é constituído pelos rios Cauípe e Gereraú, que englobam o lagamar Cauípe e a lagoa Gereraú, riacho dos Matões, Coité e Guaribas, como também as lagoas do Pecém, Bolso, Tucum,



Acende, Candeias e Patos.

### *6.5.1 Bacia hidrográfica do rio Cauípe*

Está localizada na área central do município de Caucaia, destacando-se pelo barramento natural e parcial, feito pelo cordão de dunas a 3 km da praia e que gera o lagamar do Cauípe, área de proteção ambiental. A parte centro-leste da área estudada é drenada pelo rio Cauípe, tendo como principais afluentes os riachos dos Matões e Coité.

O rio Cauípe, drenagem principal desta bacia, nasce em um nível mais elevado do embasamento cristalino, nas proximidades do serrote Salgadinho, sul da região, e drena terrenos cristalinos da Formação Barreiras e das Dunas. Possui um padrão de drenagem do tipo dedrítico, com uma faixa aluvionar significativa na região, constituída por sedimentos arenoargilosos, de cor escura, com elevado teor de matéria orgânica.

O curso d'água deste rio é do tipo intermitente, podendo ficar seco nos últimos meses do ano. Para solucionar este problema foi necessária por parte do governo estadual a implantação de açudagem para garantir água para a população e, desta forma, em 1999 foi concluído o açude Cauípe com capacidade máxima de reservatório de  $11 \times 10^6 \text{ m}^3$  e vazão regularizada de  $0,154 \text{ m}^3/\text{s}$  (CEARÁ, 2002).

A Bacia do rio Cauípe é caracterizada pela presença de espelhos d'água, destacando-se as lagoas do Banana, do Tapacaú, do Damião e Tanupaba. Três riachos têm seus cursos d'água direcionados para a lagoa do Banana que, quando cheia, drena para o lagamar do Cauípe através do riacho Pirapora.

### *6.5.2 Micro bacia hidrográfica do rio Gereraú*

Esta microbacia representa uma pequena bacia litorânea, compreendida entre as bacias dos rios Cauípe e São Gonçalo. A partir de suas áreas de montante, no serrote Olho d'Água, até a foz, as drenagens desta microbacia hidrográfica drenam aproximadamente  $140 \text{ km}^2$ , onde se

destacam os corpos d'água: lagoas do Pecém, Eganambi, do Bolso, do Tucum, Acende Candeia, Patos, Manuel Fernandes e Andréia, além de diversas outras de menores dimensões.

O riacho das Guaribas é um pequeno curso d'água que tem como padrão de drenagem o modo perene e pouco mais de 1,5 km como dimensão de seu curso, à exceção da foz, quando se alarga. Os demais riachos na bacia assumem formas variadas, a partir do domínio maior das areias quartzosas, e assumem padrão paralelo ou subparalelo, como forma de drenagem.

Relacionado ao Sistema do Gereraú observa-se a existência de drenagens localizadas, não perenes, que interligam o Gereraú a pequenas lagoas no âmbito da bacia hidrográfica do São Gonçalo. Tais riachos possuem suas águas captadas e utilizadas para pequenas plantações de coqueiros, capim para forragem de gado e cana-de-açúcar. As lagoas são utilizadas predominantemente como áreas de lazer pelas comunidades vizinhas, salvo raras exceções.

### *6.5.3 Lagoas interdunares*

No geral as lagoas existentes na área da pesquisa são pequenas e desprovidas de estudos hidrológicos maiores. Em estudo de simulação hidrológica das lagoas Acende Candeia, das Bolsas, do Tucum e Eguanambi, associadas a lagoa do Gereraú, observou-se uma vazão regularizável com garantia de 99% da ordem de 10 l/s (CEARÁ / COGERH, 2001).

## 6.6 ÁGUAS SUPERFICIAIS

A área do projeto está inserida na Microbacia do rio Gereraú, entre as Bacias do rio Cauípe e do rio São Gonçalo, dentro do contexto das Bacias Hidrográficas Metropolitanas, e ao norte tem-se a presença da Bacia do riacho Guaribas. A maior parte das drenagens é constituída de canais estreitos e rasos, intermitentes, com destaque para o rio Cauípe, localizado ao leste, e as lagoas do Gereraú (280 ha), localizada ao sudoeste, do Bolso,

ao sul do *Site* CSP/Pecém e a do Pecém, nordeste da área.

Ainda na região podem ser observados os riachos Ipióca, dos Feios, dos Matões e Coité. No extremo 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.

Para a lagoa do Pecém, importante devido à proximidade com o Distrito do Pecém, os trabalhos desenvolvidos pelo Convênio Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Estado do Ceará / Instituto de Estudos, Pesquisas e Projetos (SEMACE/IEPRO, 2006) calcularam sua área superficial em 56.367 m<sup>2</sup>. A largura máxima é de 180 m, média de 142 m, e comprimento de 370 m, com profundidade média de 1,6 m, e máxima de 3,6 m. O volume aproximado da água da lagoa foi de 84.550 m<sup>3</sup>.

#### *6.6.1 Batimetria da lagoa do Pecém*

A lagoa do Pecém possui contribuição no abastecimento do distrito do Pecém em épocas em que o volume hídrico armazenado permitia, sendo explorada pela CAGECE (LOUSADA, 2011).

A Área de Proteção Ambiental da Lagoa do Pecém (APA do Pecém), que foi instituída pelo Decreto Estadual nº 24.957, de 05 de junho de 1998, localiza-se no município de São Gonçalo do Amarante, Estado do Ceará, com principais acessos pela via Estruturante, Costa do Sol Poente, CE-085.

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

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

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

QUADRO 3 – Dados do levantamento batimétrico.

Cota do Nível d'Água: 100,00 m
Pontos Coletados na Bacia Hidráulica: 1.128
Área Bacia Hidráulica: 4,67 há
Perímetro Bacia Hidráulica: 977,11 m
Profundidade Máxima: 5,28 m

Fonte: COGERH (2011).

O espelho d'água da lagoa do Pecém representa uma exposição do nível freático associado ao Sistema Aquífero Dunas. Desta forma, a batimetria fornece informações das dimensões do reservatório e volumes armazenados em superfície. O mapa 2 é a resultante da batimetria na lagoa do Pecém. Identificou-se que suas cotas batimétricas variam de 94 a 100 m. As áreas e volumes de armazenamento para cada nível batimétrico estão apresentados na Tabela 5 e no mapa 3 que reúne as informações de cota batimétrica, área e volume está apresentado na Figura 23. Obteve-se um valor de 280.205,80 m<sup>3</sup> de água armazenada atualmente na lagoa do Pecém.

TABELA 5 – Cotas batimétricas com respectivas áreas e volumes associados referentes à lagoa do Pecém.

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

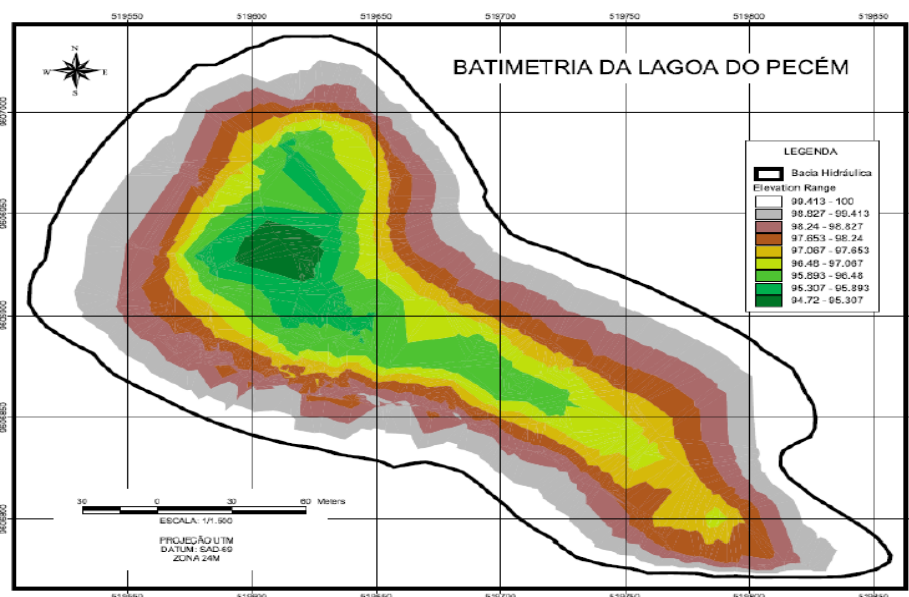
Fonte: COGERH (2011).

FIGURA 23 - Reúne as informações de cota batimétrica, área e volume da lagoa do Pecém.



Fonte: COGERH (2011).

MAPA 2 - Batimetria da lagoa do Pecém.



Fonte: COGERH (2011).

### 6.6.2 Disponibilidade hídrica superficial e usos das águas

A partir do desenvolvimento do Plano Estadual dos Recursos Hídricos (CEARÁ, 1992), o governo cearense através da Secretaria dos Recursos Hídricos vem implantando uma política de recursos hídricos que demonstra a seriedade no setor, gerando benefícios de ordem econômica e qualidade de vida. No atendimento à Região Metropolitana de Fortaleza vem implementando uma política de manejo integrado das águas e desenvolvendo a técnica de integração de bacias, a começar pela construção do açude Castanhão (2003) com capacidade máxima de reservatório de 6,7 bilhões de m<sup>3</sup>.

A Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), vinculada à Secretaria das Cidades é o principal órgão responsável pelas ações de saneamento básico em termos de abastecimento d'água no território das bacias metropolitanas, atendendo aos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante.

Na análise das disponibilidades hídricas na área é mister que se leve em consideração um conjunto de fatores que integram a necessidade, a hidro-climatologia e a viabilidade política, dentro dos quais estão

enquadrados os recursos hídricos oriundos do sistema Pacoti-Riachão-Gavião, que já atende parcialmente à Grande Fortaleza, reforçado pelo sistema do Rio Jaguaribe, através do Canal da Integração e as disponibilidades existentes na região representadas pelos açudes Sítios Novos e Cauípe, já construídos, e os açudes Anil e Ceará, ainda em projeto de construção.

Os recursos hídricos disponíveis para o Complexo Industrial Portuário do Pecém consistem atualmente no açude Sítios Novos, que possui capacidade de acumulação de 123,2 milhões de m<sup>3</sup> e, segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos, estes reservatórios regularizam uma vazão de 1,38m<sup>3</sup>/s, com 90% de garantia (Q90+considerando cotas de alerta) (CEARÁ, 1992; COGERH/SRH, 2011).

O açude Sítios Novos, localizado na Bacia do rio São Gonçalo, é interligado ao Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) através de um canal denominado “Canal Sítios Novos-Pecém”, construído em 2001 nos municípios de Caucaia e São Gonçalo do Amarante, com 23,5 km de extensão e capacidade de transporte de vazão de 2,0 m<sup>3</sup>/s. Sua finalidade, além da piscicultura, consiste no abastecimento de água para o consumo humano e industrial do CIPP, turismo e lazer, beneficiando uma população de aproximadamente 4.000 pessoas do distrito de Sítios Novos, Caucaia.

O sistema hídrico previsto para suprir a demanda d'água da região oeste, incluindo o Complexo Industrial e Portuário do Pecém foi projetado para ser implantado em três etapas: a primeira correspondia ao sistema básico Canal Sítios Novos - Pecém; a segunda, a implantação do canal principal de integração, que deveria iniciar no canal Sítios Novos-Pecém e ir até a derivação para a adutora de água bruta para abastecer parcialmente o sistema adutor das praias oeste, através de reservas subterrâneas; e a terceira etapa, que constará da implantação das obras de interligação entre os sistemas de suprimento d'água do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), da região litorânea alvo do Programa de Desenvolvimento do Turismo (PRODETUR), da Região Metropolitana de Fortaleza (açudes Pacoti/Riachão/Gavião) e das vazões a serem liberadas pelo açude Castanhão, através do eixo Sertão Central/Metropolitana, do Programa de

Gestão de Recursos Hídricos (PROGERIRH) (CEARÁ, SRH/VBA, 2001).

FIGURA 24 - Sistema adutor d'água do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP).  
Ferrovia e CE-155. (Trecho BR-222 ao Porto do Pecém).



Fonte: Acervo do pesquisador.



Além desses reservatórios já construídos, está planejada a construção dos açudes Anil e Ceará. O Anil localiza-se no rio homônimo, afluente do rio São Gonçalo, drenando uma bacia hidrográfica de 122,3 km<sup>2</sup> e terá capacidade de acumulação de 15 milhões de m<sup>3</sup>, que deverá também ser interligado ao canal Sítios Novos-Pecém. O açude Ceará, barrado no rio homônimo, encontra-se ainda em fase de estudos.

A Tabela 6 apresenta as principais características desses açudes que representam a potencial capacidade de acumulação da região.

TABELA 6 – Volumes máximos e vazões regularizadas dos reservatórios.

<b>Açudes</b>	<b>Volumes Máximos</b>	<b>Vazão com Garantia de 95% (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Vazão com Garantia de 99% (m<sup>3</sup>/s)</b>
Anil	15,00	0,195	0,185
Ceará	-	0,265	-
Cauípe	12,19	0,182	0,169
Sítios Novos	123,20	1,028	0,937
<b>Total</b>	<b>150,39</b>	<b>1,670</b>	<b>1,291</b>

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

Finalmente, aguarda-se a conclusão do Canal da Integração – Eixão das Águas, que se constitui de um complexo de estação de bombeamento, canais, sifões, adutoras e túneis, que realizam a transposição das águas do açude Castanhão (6,7 bilhões de m<sup>3</sup>) para reforçar o abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza, assim como do Complexo Portuário e Industrial do Pecém, fazendo a integração das bacias hidrográficas do Jaguaribe e Região Metropolitana.

A obra deverá derivar uma vazão máxima de 22 m<sup>3</sup>/s ao longo de aproximadamente 200 km e garantirá o abastecimento humano e industrial de água da RMF por, pelo menos, 30 anos, e irá beneficiar e potencializar o desenvolvimento de todos os municípios e comunidades ao longo de seu trajeto (COGERH/SRH, 2008).

### 6.6.3 Demandas hídricas e outorgas

As demandas hídricas associadas ao Complexo Industrial Portuário do Pecém e outorgas requeridas pelas indústrias implantadas, às outorgas

concedidas à CSP para as indústrias a serem implantadas e outorgas diversas vigentes demonstram que existe uma vazão regularizada de 1.380 L/s a partir dos açudes Sítios Novos e Cauípe e uma vazão outorgada de 1.074,89 L/s, resultando em uma oferta hídrica disponível atualmente de 305,1 L/s; EIA / RIMA, há previsão de um déficit hídrico de 3.916 L/s para atendimentos 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 (COGERH, 2001; CEARÁ, 2009).

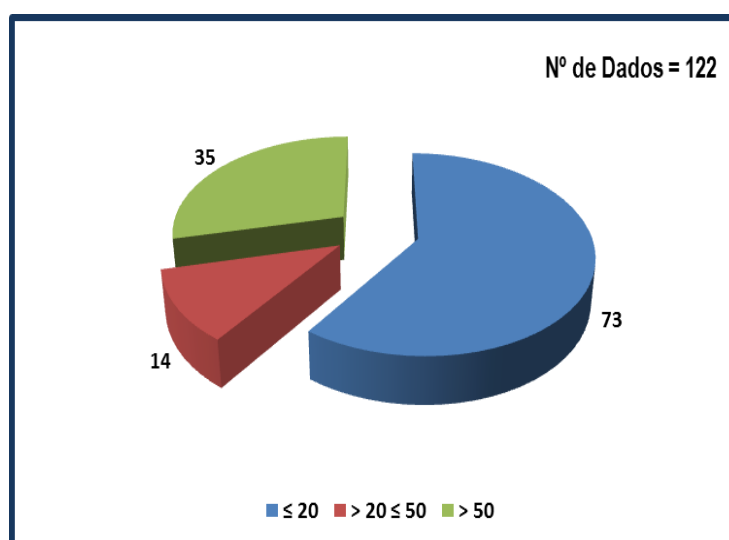
## 7 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

No desenvolvimento desta Tese, faz-se necessário conhecer as condições de ocorrência, acumulação e fluxo das águas subterrâneas, que dependem das características geológicas e, particularmente, dos aspectos litológicos dominantes.

O Apêndice V mostra a variação de profundidade do nível estático, seguido do Apêndice III com a variação de profundidade dos poços e o Apêndice IV com o zoneamento das vazões dos poços.

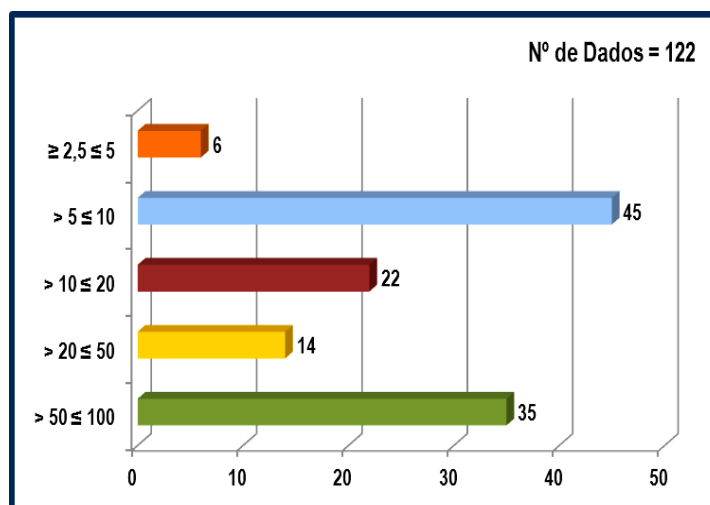
A quantidade de poços cadastrados (Apêndice I) inseridos da área da pesquisa é de 167, com profundidades que oscilam entre 2,5 e 100 m (Apêndice III) que, correlacionadas a classificação de profundidade de poços tubulares adotada desde 1994 pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH), reflete poços rasos (profundidade  $\leq 20$ m), medianamente profundos (profundidade entre 20 e 50m) e profundos (profundidade  $\geq 50$ m) (Gráficos 6 e 7).

GRÁFICO 6 – Profundidade (m) dos poços do conjunto dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

GRÁFICO 7 – Profundidade (m) dos poços do conjunto dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.



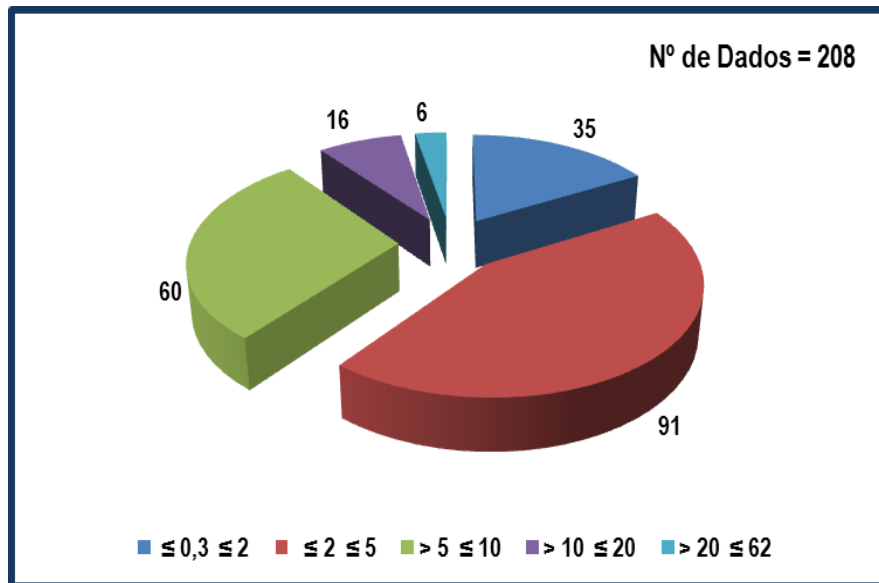
Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Os poços rasos estão predominantemente localizados no Aquífero Dunas, particularmente na faixa costeira à beira mar, fato comum observado em toda a orla da área da Tese, haja vista que todo empreendimento, condomínio ou residência representa um potencial, inúmeras vezes, efetivo proprietário de poço. Os poços medianamente profundos são encontrados no Aquífero Dunas, mas a perfuração alcança o topo da Formação Barreiras, que nem sempre se reflete um aquífero. Os poços profundos estão predominantemente localizados no ambiente do Barreiras e Cristalino, sendo que, quando no primeiro, o poço está localizado no Barreiras mas adentra os litotipos cristalinos. No Meio Cristalino existe uma predominância de poços profundos, onde o perfurador busca fraturas com água e, geralmente perfura acima de 50m.

O nível estático oscilou entre 0,3m, freático e praticamente aflorante (setor norte) a 62 m (pontualmente no setor leste-sul a sudoeste) (Gráficos 8 e Apêndice V). A condição de freático e sub-aflorante é encontrada predominantemente no Aquífero Dunas, particularmente em condições topográficas que refletem condições muito próximas a lagoas interdunares, exemplo da Lagoa do Pecém, a leste/sudeste de Pecém. Tal comportamento favorece a construção de poços tubulares rasos, a custos relativamente

baixos e onde praticamente não se trabalha com projeto técnico-construtivo, com material PVC utilizado na construção civil (hidráulica) e sem normas de construção de poços da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os poços mais profundos são, quase sempre, encontrados nas áreas industriais, onde a perfuração é realizada com máquinas rotativas e roto-pneumáticas, revestimentos e filtros de PVG Geomecânico e diâmetros de 6" (150mm).

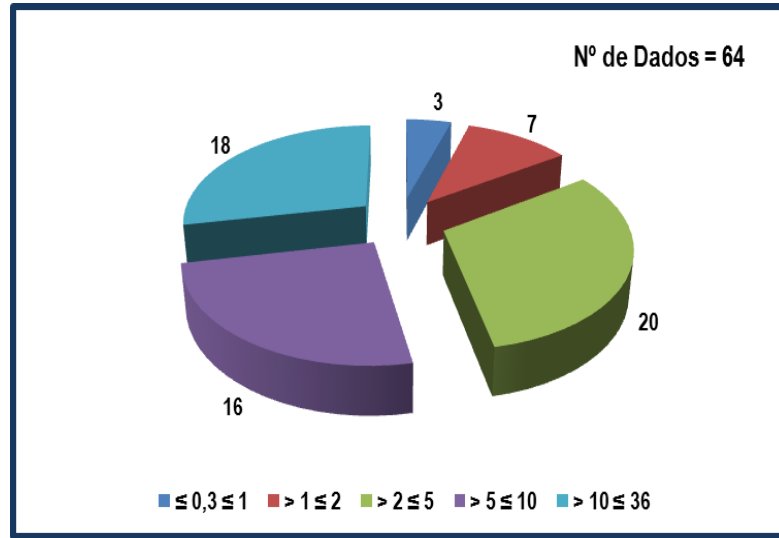
GRÁFICO 8 – Profundidade do nível estático (m) dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

A vazão variou de 0,3 m<sup>3</sup>/h (porção sul) a 36 m<sup>3</sup>/h (na porção noroeste e sudoeste da área) (Gráfico 9 e Apêndice IV). Observa-se que as vazões praticamente insignificantes, inferiores a 0,5 m<sup>3</sup>/h, são correlatas a poços que captam o Aquífero Barreiras, porém muito mais silto-argiloso, quase que um aquitard, e o Meio Cristalino, onde a porosidade e a permeabilidade são praticamente inexistentes e o Meio Aquífero é reflexo de parâmetros associados a fraturamento. As maiores vazões, que chegam a 36 m<sup>3</sup>/h, são correlacionadas ao Aquífero Dunas, homogêneo e isotrópico, com recarga predominantemente pluviométrica e captado por poços rasos a medianamente profundos. O Aquífero Barreiras possui vazões que oscilam entre 2 e 6 m<sup>3</sup>/h, reflexo de seus níveis mais arenosos, porém reduzidos em termos de espessura saturada.

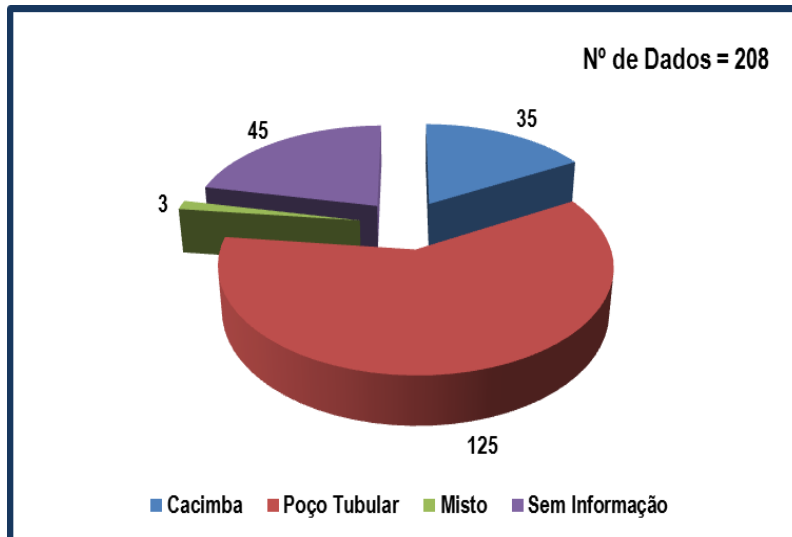
GRÁFICO 9 – Vazão (m<sup>3</sup>/h) dos poços dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Dos poços cadastrados, 31 foram utilizados para se coletar água para análises qualitativas laboratoriais, sendo analisados parâmetros físico-químicos e bacteriológicos.

GRÁFICO 10 –Tipo de poço do conjunto dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.

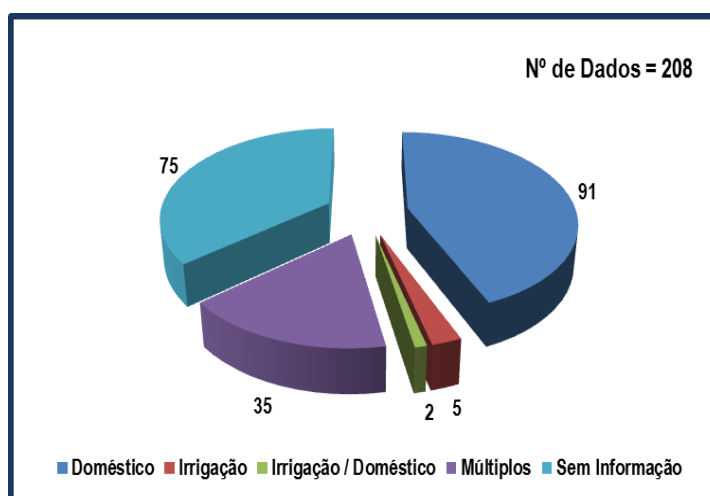


Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Dos 208 poços cadastrados na área, 125 (60%) são tubulares, 35 (17%) são cacimbas e 3 (1%) são poços mistos. Ressalta-se que 45 (22%) não possuem informação sobre o tipo de poço (Gráfico 10).

Com relação ao uso das águas, observou-se que 91 poços (44%) tem sua água destinada ao uso doméstico, ou seja, às atividades de lavagem de roupa, banho, consumo etc.; 35 (17%) são utilizadas para uso múltiplo, incluindo atividades domésticas, irrigação e consumo humano; 5 (2%) para uso na irrigação; 2 (1%) são utilizados na irrigação e atividades domésticas e 75 poços (36%) não possuem informação de uso para suas águas, embora fique configurada na área um predomínio de uso doméstico (Gráfico 11).

GRÁFICO 11 – Uso das águas subterrâneas dos poços dos sistemas aquíferos na área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

## 7.1 DOMÍNIOS SISTÊMICOS HIDROGEOLÓGICOS

Da análise dos dados e informações coletadas no decorrer da pesquisa, além do conhecimento hidrogeológico de campo, podem-se distinguir nas áreas de influência, compreendendo duas bacias hidrográficas (rio Cauípe e Microbacia da Lagoa do Gereraú), quatro domínios hidrogeológicos principais (Apêndice XIX): Meio Fissural (composto por granitóides diversos e litotipos metamórficos representados pelas Unidades Independência e Canindé), Barreiras (composto por níveis clásticos variados, com predomínio de lentes silto-argilo-arenosas), Dunas (sedimentos arenosos) e Aluviões (sedimentos clásticos variáveis). No Domínio Sedimentar identificam-se os sistemas hidrogeológicos formados pelos Aquíferos Dunas, Aluviões e Barreiras, com comportamento de aquíferos clásticos e livres.

O Aquífero Dunas possui recarga fundamentalmente pluviométrica e, secundariamente, dos espelhos hídricos superficiais, tais como a lagoa do Gereraú, e as lagoas do Tucum, Eguenhambi e Bolso, que são os principais acumuladores de água superficial.

O Aquífero Barreiras é composto por sedimentos areno-argilosos e argilo-arenosos, inconsolidados ou pouco consolidados. Sua espessura é variável e em função do paleo-relevo do substrato cristalino, comumente inferior a 40m. A porção superior é arenosa e, portanto, sua exploração é intensa com vazões geralmente inferiores a 3 m<sup>3</sup>/h.

A recarga deste sistema aquífero é através da infiltração da água pluvial e da água de corpos d'água superficiais e a descarga se dá pela evapotranspiração, pelo fluxo de base e pelo fluxo da água para os sistemas aquíferos subjacentes (Cavalcante, 1998).

#### *7.1.1 Manto de intemperismo*

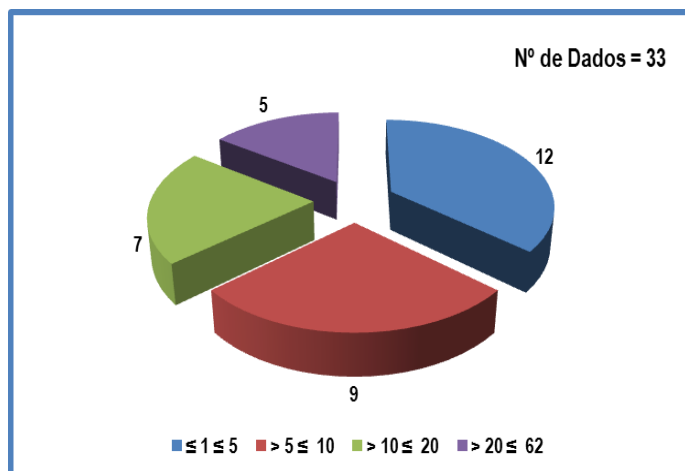
O domínio hidrogeológico denominado genericamente de Meio Fissural, ou Fraturado, é representado por granitos (porções centro-leste e sul) e Complexos Gnáissico-Migmatíticos representados pelos gnaisses, xistos e anfíbolitos, dentre outros litotipos, que ocorrem ao sul da CE-085.

O Cristalino armazena águas em meio fraturado, onde as fraturas são abertas e interconectadas, gerando um meio heterogêneo e anisotrópico. Essas condições atribuem um baixo potencial hidrogeológico para as rochas cristalinas sem, no entanto, diminuir sua importância como alternativa de abastecimento em casos de pequenas comunidades ou como reserva estratégica em períodos prolongados de estiagem (CAVALCANTE, 1998).

No cadastro de poços constam dados de medidas de nível estático (Gráfico 12) que mostram que este parâmetro possui ocorrência predominante a profundidades inferiores a 11m, média de 6m, e a depender da intensidade e abertura do sistema de fraturas indica uma situação vulnerável à poluição antrópica, onde a rede de fraturas pode funcionar como condutor hidráulico de poluição.



GRÁFICO 12 – Profundidade do nível estático no meio fissural da área de pesquisa.

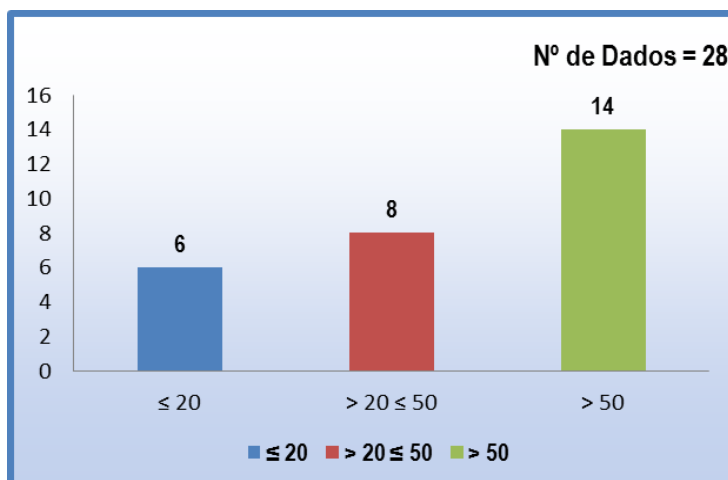


Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

A profundidade mínima dos poços é da ordem de 10m, porém as profundidades inferiores a 40m refletem condições de perfurações em zonas aluvionares, manchas sedimentares indiferenciadas ou Sistema Barreiras, muitas vezes reflexo até mesmo de poços escavados (cacimbas) cadastrados durante o trabalho de campo e em outros projetos (Gráficos 13 e 14).

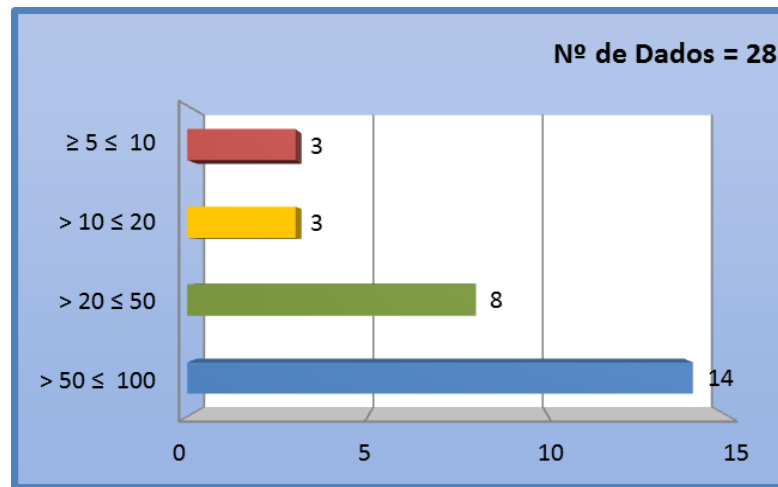
Apesar disto, os poços nesse meio alcançam profundidades de até 100m, com média de 40m e, portanto, inferior à média dos poços cadastrados em termos regionais (média de 60m), reflexo direto de obras cadastradas com profundidades inferiores a 30m.

GRÁFICO 13 – Profundidade dos poços construídos no Meio Fissural na área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

GRÁFICO 14 – Profundidade dos poços construídos no Meio Fissural na área de pesquisa.

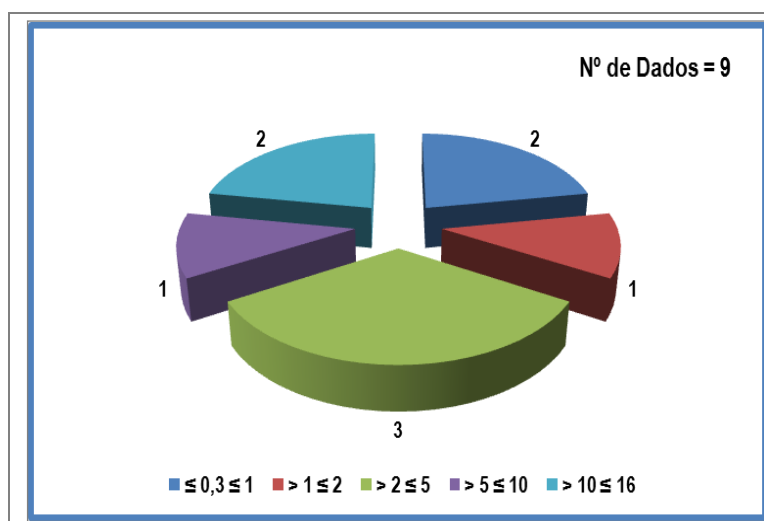


Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

As vazões dos poços neste meio são em geral pequenas. Dependendo, entretanto, de critérios de locação tecnicamente consistentes que levem em conta os aspectos influentes ligados aos esforços tectônicos (tipo e distribuição dos fraturamentos) e aos condicionamentos morfológico, hidroclimatológico e litológico, aumenta a probabilidade de obtenção de maiores vazões e de águas de melhor qualidade, capazes de atender às necessidades das comunidades.

Poucos são os poços que possuem dados de vazão nesse contexto. As vazões produzidas pelos poços são, comparativamente ao meio sedimentar poroso, pequenas e a água, em função da falta de circulação e dos efeitos do clima semiárido, na maioria das vezes, classificadas como salobra ou mesmo salinizada.

Dados de nove poços mostram que as vazões destes na área de abrangência do estudo são, no geral, inferiores a 6 m<sup>3</sup>/h, com predominância para valores inferiores a 3,0 m<sup>3</sup>/h, média de 1,0 m<sup>3</sup>/h. A vazão máxima oscila em torno de 10,0 m<sup>3</sup>/h e observa-se que alguns poços são secos (Gráfico 15).

GRÁFICO 15 – Vazão (m<sup>3</sup>/h) dos poços construídos no Meio Fissural na área de pesquisa.

Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

A recarga das águas para o meio fissural provém da contribuição pluviométrica direta, desde que existam condições de exposições do manto de intemperismo e ocorrência de fraturas abertas, drenagens e espelhos d'água (lagoas e açudes) associados aos fraturamentos, e das unidades aquíferas sobrepostas, a exemplo do Barreiras e Aluviões. Os exutórios são representados por drenagens efluentes e pela evapotranspiração.

A qualidade das águas pode ser refletida através dos Sólidos Totais Dissolvidos (STD). As águas subterrâneas do Cristalino na área do CIPP possuem concentração de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) alta, excedendo 1.000 mg/L, tornando-as, muitas vezes, inadequadas para o consumo humano ou industrial. Nos 28 dados de STD existentes no cadastro tem-se STD médio de 1.100 mg/L, um pouco acima do Valor Máximo Permitido (VMP) para potabilidade e consumo humano existente na Portaria N° 2.914/2011 do Ministério da Saúde.

Porém, sendo um valor médio em um ambiente anisotrópico e heterogêneo, observa-se que existe uma grande variação de águas com STD inferior a este padrão, portanto passíveis de serem utilizadas e que, muitas vezes, valores muito altos e pontuais distorcem a média superando a maioria dos valores observados.

O uso dessas águas é voltado particularmente, segundo os dados cadastrados, para o contexto doméstico (76,5%), certamente atendendo

localidades e/ou pequenas comunidades onde o abastecimento hídrico não é plenamente satisfatório. Neste meio, a porosidade intergranular e a permeabilidade são praticamente nulas e a ocorrência da água subterrânea está condicionada à presença de uma porosidade e permeabilidade secundárias representadas por fraturas, proporcionando ao sistema cristalino a configuração de um sistema anisotrópico e heterogêneo.

Em função das características químicas, onde geralmente se observa a predominância de águas cloretadas com elevada concentração de STD, as águas do meio cristalino não podem ser utilizadas indistintamente. No cadastro de poços do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) existem dados sobre o uso dessas águas, onde se observa a predominância de uso doméstico, seguido de usos para pecuária e agricultura (CEARÁ, 1999).

#### *7.1.2 Sistema hidrogeológico Barreiras*

Trata-se de depósitos terciários representados por arenitos argilosos, de cores variegadas, com matrizes avermelhadas, amareladas e cinza-esbranquiçadas. A matriz é, muitas vezes, caulínica, apresentando cimento argiloso e ferruginoso, com presença de níveis lateríticos e marcada variação faciológica. O domínio hidrogeológico constituído pelos sedimentos do Sistema Barreiras caracteriza-se por expressiva variação de níveis clásticos (Figura 25) com diferentes porosidades e permeabilidades, que se traduzem em potencialidades diferenciadas quanto à produtividade de água subterrânea. Porém, em observações de campo nas áreas utilizadas para extração de areia, observa-se, pelo menos superficialmente, a predominância de níveis areno-siltosos, o que melhora a configuração deste domínio como armazenador de água.

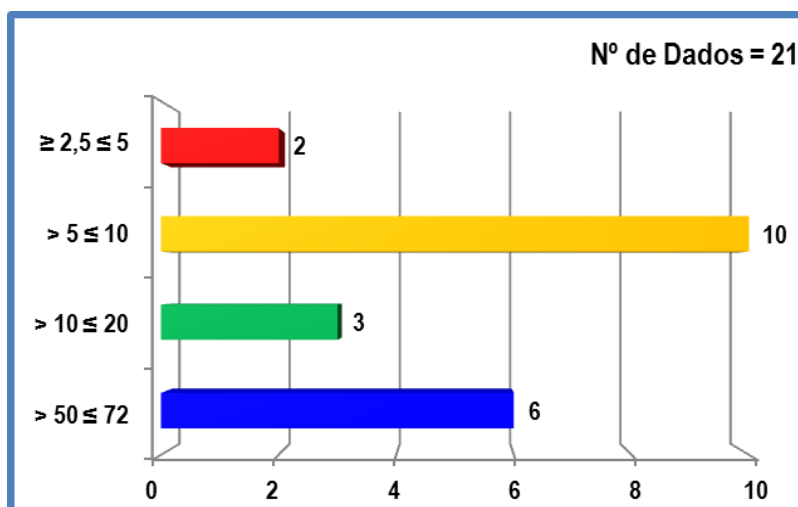
FIGURA 25 - Exposição dos sedimentos areno-argilosos Barreiras na Rodovia CE 155.



Fonte: Acevo do autor (out/2015).

No geral, o número de poços com dados técnicos é pequeno conforme observado nos gráficos específicos, porém para a área enfocada merecem ser citados. A profundidade do nível estático é inferior a 10,0m, com média de 5,0 m, refletindo nível d'água freático e um meio vulnerável aos impactos do uso e ocupação do solo por indústrias de diversos tipos no CIPP (Gráficos 16).

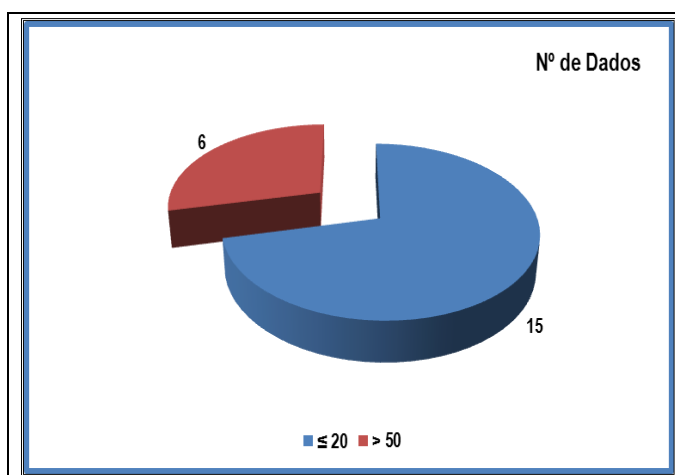
GRÁFICO 16 – Profundidade do nível estático (m) dos poços construídos no Aquífero Barreiras.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

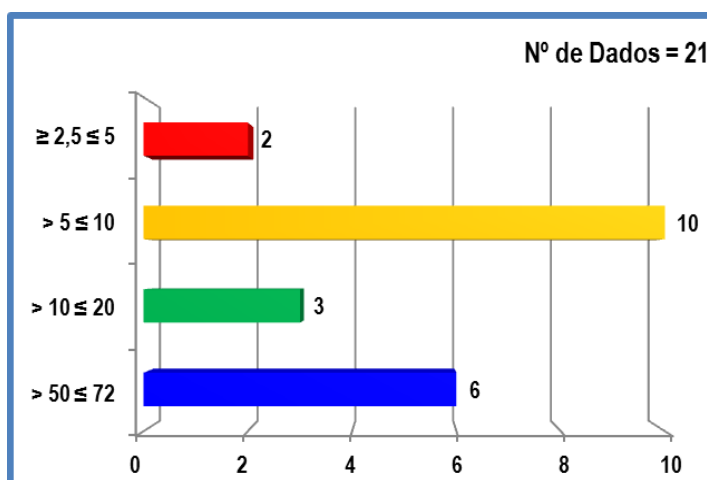
As profundidades dos poços que captam água do Barreiras (Gráficos 17 e 18) oscilam predominantemente entre 30 e 50m, com média de 40m. Observa-se que existem poços com profundidades inferiores a 30m e outros com profundidades acima de 50m sendo, no geral, representados por poços que, na maioria das vezes, atravessa o Barreiras e adentra no Cristalino. É recomendável ressaltar que a construção de poços tubulares acima de 20m fica, geralmente, restrita as indústrias e comunidades, onde a obra é executada pelo governo estadual / municipal, indústria ou em chácaras / fazendas com proprietários de maior poder aquisitivo.

GRÁFICO 17 – Profundidades dos poços construídos no Aquífero Barreiras na área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

GRÁFICO 18 – Profundidades dos poços construídos no Aquífero Barreiras na área de pesquisa.

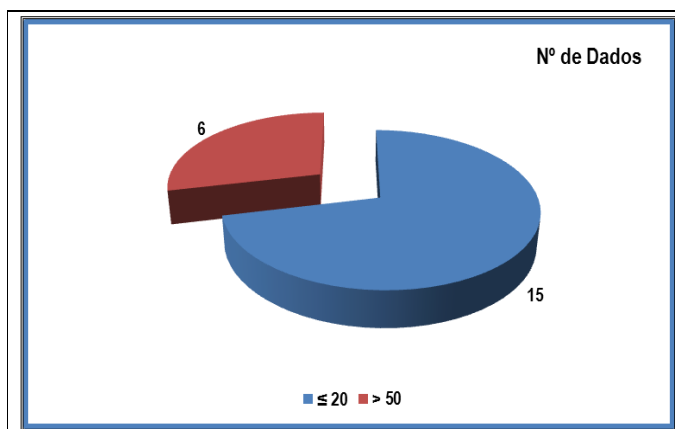


Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Dados de vazão dos poços mostram que estas são predominantemente inferiores a 3,0 m<sup>3</sup>/h (Gráfico 19). Ocasionalmente, a exemplo de poços existentes na área da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), as vazões aumentam em até 100%, reflexo de níveis mais arenosos e/ou melhores projetos técnicos de poços, com o posicionamento correto do filtro.

No cadastro de poços para a área de influência do estudo, percebe-se que poucos são aqueles que possuem dados de vazão e que esta mantém o comportamento observado para a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), com média de 2 m<sup>3</sup>/h. Poucas são as vazões que ultrapassam 3 m<sup>3</sup>/h, com máxima de 12 m<sup>3</sup>/h refletindo um pacote clástico mais arenoso sendo captado ou, em outra hipótese, a captação do Dunas sobreposta ao Barreiras. A observação desta hipótese em perfis de poços é difícil, haja vista que praticamente nenhum deles faz qualquer diferença descritiva dos sedimentos, relacionando-os as Dunas ou ao Barreiras.

GRÁFICO 19 – Vazão dos poços construídos no Aquífero Barreiras na área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Quando ele possui predominantemente níveis silto-argilosos, esta situação confere, localmente, características de um aquitarde, ou seja, uma formação geológica que possui baixas condutividade hidráulica e transmissibilidade, exemplificando valores para condutividade hidráulica de  $6,48 \times 10^{-3}$  m/h e transmissibilidade de  $9,72 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/h (BIANCHI; PADILHA; TEIXEIRA, 1984).

Considera-se, para o CIPP, espessura média saturada de 15m, em concordância com Cavalcante (1998), ressaltando-se que em observações de campo nas áreas utilizadas para extração de areia (cavas minerárias),

observa-se, pelo menos superficialmente, a predominância de níveis areno-siltosos, o que melhora a configuração deste domínio como armazenador de água.

As concentrações de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) são inferiores a 500 mg/L, portanto totalmente compatíveis com o padrão requerido para águas potáveis para consumo humano (1.000 mg/L) da Portaria nº. 2.914/2011 do Ministério da Saúde (MS), com média de 220 mg/L refletindo a pequena mineralização destas águas.

Observa-se que o uso das águas do Barreiras mantém o padrão observado para a área, sendo captadas predominantemente para consumo doméstico. A composição química com um baixo STD permite que a população utilize essas águas sem uso de dessalinizadores, o que, em termos econômicos, é extremamente benéfico para qualquer comunidade.

O Sistema Barreiras se caracteriza por sua média potencialidade de água, e qualidade da água variável. O maior comprometimento destas águas refere-se à diluição de óxido de ferro proveniente dos níveis lateríticos. Essa contaminação é popularmente denominada de “capa rosa”.

Em termos qualitativos, as águas do Aquífero Barreiras são naturalmente menos concentradas em sais do que as do Cristalino, haja vista que estão armazenadas em meio poroso, onde a circulação é mais expressiva e a infiltração mais eficaz, diminuindo a concentração, principalmente de cloretos. Em termos de uso, as águas do Barreiras são utilizadas na grande maioria (84,48%) para consumo doméstico e, secundariamente, para as outras finalidades, tais como indústrias, agricultura e pecuária.

O Barreiras representa, no geral, um aquífero semilivre, com características regionais de semiconfinamento em função dos níveis siltoargilosos, tendo como fatores de recarga a precipitação pluviométrica, as drenagens influentes que percolam o contexto, as lagoas interdunares e o Sistema Dunas, sobreposto, que funciona com dupla função (aquífero e unidade de transferência de água).



Como exutórios existem a rede de drenagem afluyente, lagoas, evapotranspiração e, ainda, o meio cristalino, sotoposto, desde que fraturado e com características que permitem a circulação e o armazenamento d'água.

### 7.1.3 *Aquífero Dunas*

As dunas formam um cordão contínuo de areias bordejando a linha costeira e, na área, adentra até 10 km no continente, fato observável próximo a lagoa do Gereraú. São sedimentos constituídos por areias claras, esbranquiçadas, de granulação fina, formadas por grãos de quartzo semi-arredondados e bem selecionados, repousando discordantemente sobre os sedimentos do Sistema Barreiras, em alguns locais, como na área da Estação Ecológica do Pecém, possuem níveis com desenvolvimento pedogenético e nos inúmeros perfis expostos em cortes de estrada observa-se que são compostas por areias pouco consolidadas (Gráfico 20; Figuras 26 e 27).

FIGURA 26 - Exposição das dunas recobertas por densa vegetação. Visualização ao longo da CE-155.



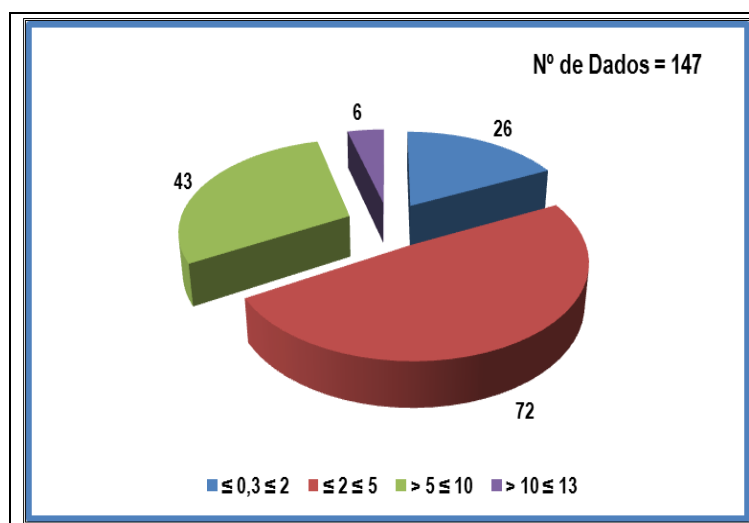
Fonte: Acervo do pesquisador.

FIGURA 27 - Rodovia CE-155 de acesso ao Porto do Pecém, interceptando cordão de dunas.



Fonte: Acervo do pesquisador.

GRÁFICO 20 – – Nível estático (m) do Aquífero Dunas na área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Das fases de campo e resultante, ainda, do acompanhamento da perfuração e construção de poços na região, denota-se uma composição arenosa homogênea, fina, friável, predominantemente esbranquiçada, com diâmetro efetivo de grãos de 0,15mm e espessuras do pacote arenoso entre 10 a 30m onde, ocasionalmente, observam-se lentes siltico-argilosas decorrentes da variação da energia de deposição responsável pela formação das Dunas.

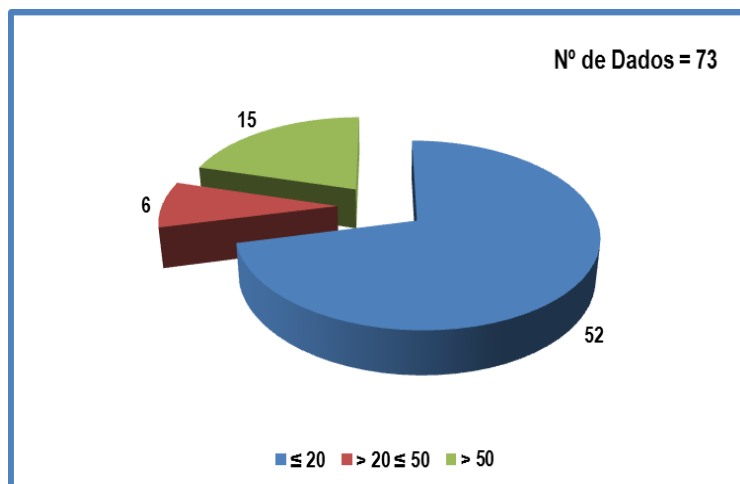
As Dunas ocorrem em contato direto com o Sistema Barreiras e, ocasionalmente, estão sobrepostas as pequenas áreas ocupadas pelas Aluviões. Em trabalhos anteriores, tem-se a designação de Dunas e Paleodunas mas, aqui, considera-se que este corpo representa um sistema aquífero único, sendo designado como Aquífero Dunas, uma vez que possui características estratigráficas e hidrodinâmicas similares (MORAIS, 2011).

É importante ressaltar que Cavalcante (1998), em sua tese objetivando caracterizar a gestão das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Fortaleza, ressaltou a dupla função hidrogeológica das Dunas (Principal e de transferência para os aquíferos Barreiras e Cristalino), além de funcionar como fonte de recarga para as lagoas do Pecém e de outras interdunares, e de cursos de drenagens existentes entre dunas.

O nível estático do Aquífero Dunas é freático, oscilando predominantemente abaixo de 10m, com intervalo predominante de 2 a 5m (Gráfico 20) ressaltando-se que, acima de 10m e alcançando até 13m, é mínimo e correlacionável a topografia e/ou influência do Aquífero Barreiras, sotoposto a este.

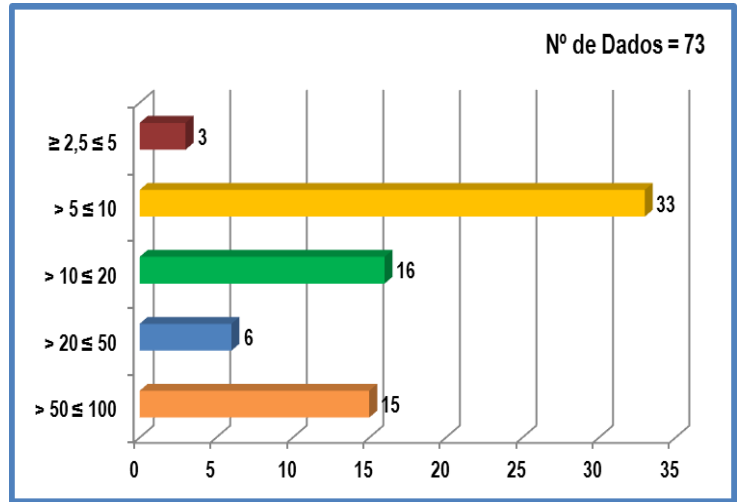
Suas águas são captadas por poços tubulares rasos, com profundidades inferiores a 20m e perfurados (Gráficos 21 e 22), predominantemente, em 10" e revestidos em 6" ou 4", e na maioria das vezes o revestimento é de PVC branco, tubo utilizado na hidráulica e sem recomendação técnica para poços.

GRÁFICO 21 – Profundidade (m) dos poços do Aquífero Dunas na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

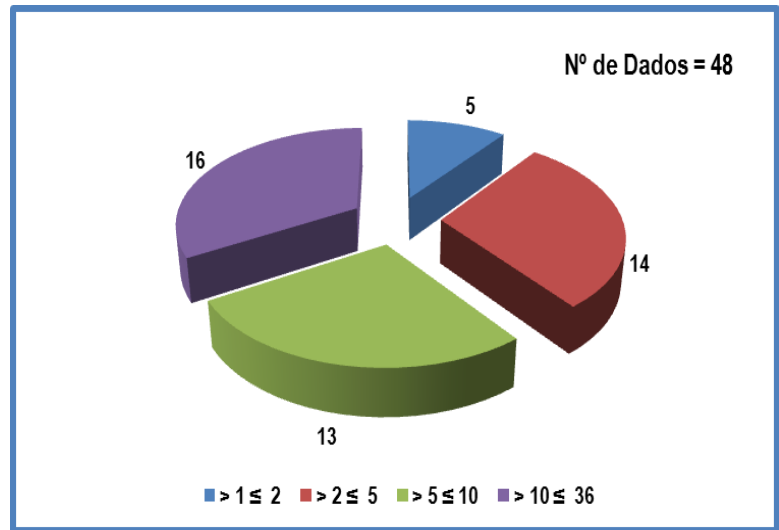
GRÁFICO 22 – Profundidade (m) dos poços do Sistema Dunas na área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

As vazões são predominantemente inferiores a 5 m<sup>3</sup>/h, média de 4,0m<sup>3</sup>/h, podendo alcançar, localmente, até 36 m<sup>3</sup>/h (Gráfico 23). Geralmente as maiores vazões estão associadas aos poços construídos pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) que explora as águas para abastecimento de Caucaia, Catuana, Siupé e pequenas comunidades, a exemplo de Pecém e Lagoa do Cauípe. São baterias de poços tubulares rasos a medianamente profundos, construídas com tubos PVC Geomecânicos de 6” (150mm) dentro de projetos técnicos recomendados pela sua equipe técnica, a exemplo da bateria de poços da Lagoa da Cobra e da Lagoa do Pecém.

GRÁFICO 23 – Vazão (m<sup>3</sup>/h) dos poços no Aquífero Dunas na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Indiscutivelmente, as Dunas constituem o melhor potencial hidrogeológico da área estudada. O Aquífero Dunas possui espessuras saturadas oscilando de 4,0 até 9,0m, nível estático normalmente subaflorante nas áreas de descarga, atingindo, em média, 6,0m.

Em função dos elevados coeficientes de condutividade hidráulica, transmissividade e porosidade efetiva, associados, ainda, a um nível estático extremamente raso, o sistema Dunas é altamente suscetível à poluição, representando uma unidade extremamente vulnerável aos impactos antrópicos negativos, resultantes do uso e da ocupação do meio físico (Figuras 28).

FIGURA 28 - Correia transportadora de minério de carvão, interligando o Porto do Pecém à Termoelétrica Energia Pecém.



Fonte: Acervo do pesquisador.

Campos e Menezes (1982), em pesquisa realizada pela CAGECE nas Dunas do Ceará, baseada em 22 testes de aquífero realizados em Pecém, através do Método de Jacob, estabeleceu os seguintes valores: Transmissibilidade (T) de  $3,8 \text{ m}^2/\text{h}$  e condutividade hidráulica (K) de  $5,04 \times 10^{-1} \text{ m/h}$  (Tabela 7). Observa-se que as vazões médias dos poços construídos em Pecém e São Gonçalo são, respectivamente, 2,4 e 8,7  $\text{m}^3/\text{h}$ . Ressalta-se as espessuras saturadas, oscilando de 7,7m (Pecém – Lagoa do Pecém) a 12m (São Gonçalo do Amarante), significantes para o Aquífero Dunas. Entende-se que as maiores vazões decorrem do projeto do poço e de sua locação, explorando melhor as condições hidrogeológicas a chegando

excepcionalmente à vazão máxima de 36 m<sup>3</sup>/h, também pertencentes a poços da CAGECE construídos a Noroeste da área.

TABELA 7 - Valores médios do Sistema Aquífero Dunas em Pecém e São Gonçalo do Amarante, Ceará.

Local	Município	Nº de Testes	Q (m <sup>3</sup> /h)	K (m/h) x 10 <sup>-1</sup>	T (m <sup>2</sup> /h)	h <sub>0</sub> (m)
Pecém	São Gonçalo do Amarante	22	2,4	5,04	3,88	7,7
São Gonçalo do Amarante	São Gonçalo do Amarante	09	8,7	3,6	4,32	12,0

Fonte: CAGECE (1982 *apud* CAMPOS; MENDES, 1982).

Legenda:

Q – Vazão do poço;

K – Condutividade hidráulica;

T – Transmissividade;

h<sub>0</sub> – Espessura saturada.

O comportamento de fluxo das águas subterrâneas nas Dunas é predominantemente direcionado para o mar, mas que sofrem alteração de percurso ao encontrarem o fluxo condicionado pela recarga de cordões de Dunas mais próximas à linha de praia em direção ao continente, formando-se, então, as lagoas freáticas.

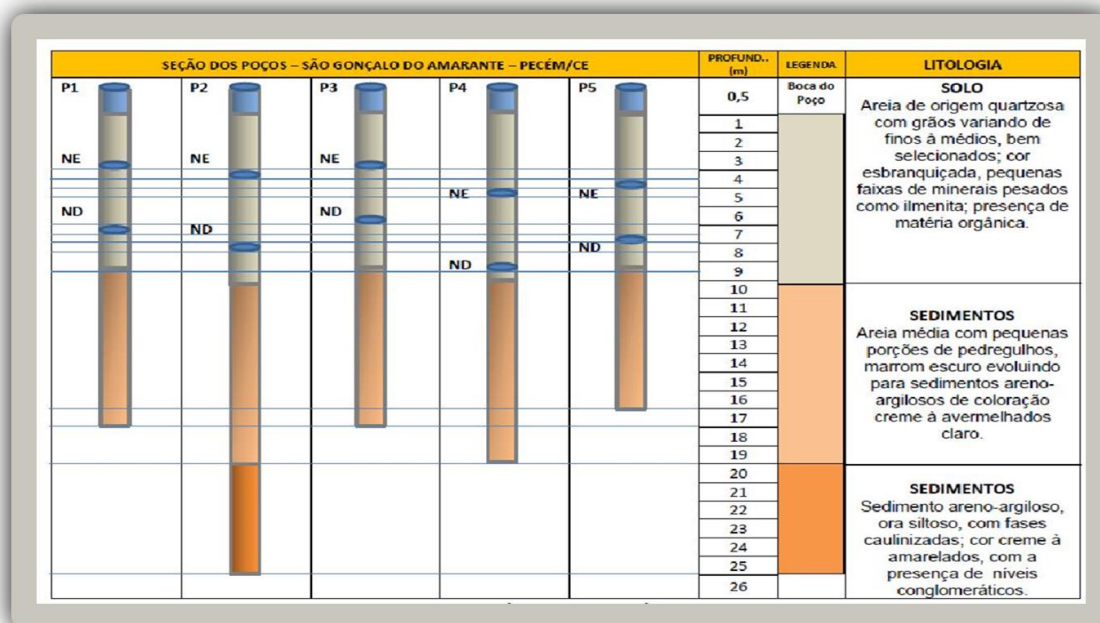
É importante ressaltar-se os poços que abastecem o Porto do Pecém pertencentes a CEARAPORTOS, localizados a leste do Porto de Pecém. Os poços foram construídos seguindo as seguintes características constantes na Tabela 8 e Figura 29. A área está situada no distrito de Pecém (São Gonçalo do Amarante) e se encontra inserida no Domínio Dunas.

TABELA 8 - Características gerais dos poços tubulares da CEARAPORTOS, Pecém/CE.

POÇOS	P1	P2	P3	P4	P5
Localização (UTM – WGS-84)	521054E 9607103N	521043E 9607132N	521082E 9607104N	521130E 9607200N	521167E 9607193N
Profundidade (m)	17	25	17	19	16
Diâmetro de perfuração (pol)	12	12	12	12	12
Diâmetro de revestimento (pol)	4	4	4	4	4
Nível estático (m)	3	3,5	3	4,5	4,0
Nível dinâmico ND (m)	6,5	7,5	6,0	8,5	7,0
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	2,2	2,1	2,0	1,9	2,3

Fonte: Albuquerque (2013).

FIGURA 29 – Seção hidrogeológica dos poços que abastecem a CEARAPORTOS.



Fonte: Albuquerque (2013).

Os dados de profundidade das águas subterrâneas no Aquífero Dunas entre Pecém e Paracuru em medidas realizadas em julho/2011 no Projeto “Avaliação Hidrogeológica Quali-Quantitativa do Campo de Dunas Pecém/Paracuru no Estado do Ceará” realizado para a COGERH/SRH mostram um comportamento raso, predominando profundidades inferiores a 15m e, particularmente, na área próxima ao Pecém, as águas estão a profundidades que oscilam entre 1 e 7m. Na área do projeto em questão, as águas subterrâneas encontram-se muito rasas, freáticas, predominantemente até 10 m de profundidade Tabela 9 – Avaliações dos testes de aquífero realizados em 03 poços na área pesquisada. Obtenção dos parâmetros K (m/h), T (m<sup>2</sup>/h) e porosidade efetiva (%) (LOUSADA, 2011).

TABELA 9 – Avaliações dos testes de aquífero realizados em 03 poços na área pesquisada. Obtenção dos parâmetros K (m/h), T (m<sup>2</sup>/h) e porosidade efetiva (%).

Localização do Poço	Método Cooper e Jacob			Longitude	Latitude
	K (m/h)	T (m <sup>2</sup> /h)	Porosidade Efetiva (Sy) (%)		
Pecém - Posto de gasolina	2,12	42,12	11.427.952	518821	9606692
Pecém - Siderúrgica - CSP	14,80	20,80	15.093.916	517657	9604343
Pecém - Paú	3,25	10,83	12.147.272	515353	9606955

Fonte: Lousada (2011) e COGERH (2011).

O comportamento de fluxo das águas subterrâneas nas Dunas é refletido pelas águas que fluem em direção ao mar, mas que sofrem alteração de percurso ao encontrarem o fluxo condicionado pela recarga de cordões de Dunas mais próximas à linha de praia em direção ao continente, formando-se, então, as lagoas freáticas (Apêndice VII).

A qualidade das águas desse aquífero é normalmente boa, com valores de STD inferiores a 500 mg/L. Contudo, sua potabilidade acha-se, constantemente, ameaçada pela contaminação de agentes infecciosos, devido à existência indevida de fossas negras e a todos os fatores ligados à desordenada urbanização, e principalmente, a implantação de indústrias no CIPP.

Entretanto, para o abastecimento suplementar, o Sistema Dunas assume especial interesse, particularmente pela qualidade das suas águas, na medida em que a demanda a ser atendida seja compatível com as possibilidades locais de exploração, ou mesmo como alternativa de suprimento ao sistema de abastecimento já existente da CAGECE que, frequentemente, tem explorado este sistema para atender comunidades litorâneas.

Na área observa-se que, resultante dos dados de poços, existe uma predominância de uso doméstico, seguindo de uso das águas para recreação. Isto é perfeitamente normal, haja vista a utilização mais intensa das águas deste sistema pela população litorânea a fim de complementar, ou sendo prioritário, o atendimento realizado pela companhia responsável pelo abastecimento hídrico (Figura 30).



FIGURA 30 - Poço escavado localizado em área de pequena irrigação de hortaliças no Pecém.



Fonte: Acervo do pesquisador.

A recarga é iminentemente pluviométrica, salvo exceções causadas por drenagens influentes. Como exutórios existem maiores perdas d'água do aquífero por consequência da intensa evapotranspiração, associada a um nível estático subaflorante, além da contribuição para a rede de drenagem, lagoas e para aquíferos subjacentes.

#### *7.1.4 Sistema aluvionar*

Os depósitos hidrogeológicos aluvionares são representados por sedimentos arenoargilosos recentes, que ocorrem margeando as calhas dos principais drenos (rios e riachos), e apresentam no geral, uma boa alternativa como manancial tendo uma importância relativa do ponto de vista hidrogeológico. Devido às altas permeabilidades, mesmo com pequenas espessuras, os depósitos arenosos chegam a produzir vazões bastante significativas.

Não foram cadastrados poços no Sistema Aluvionar e, portanto, ele não foi caracterizado em termos de parâmetros hidrogeológicos. Em observações de campo, denota-se que ele possui pequena área aflorante na área e espessuras extremamente reduzidas o que leva a, ocasionalmente, ter suas águas captadas por poços manuais (cacimbas) com profundidades inferiores

a 3m, diâmetro de 1,10m e um nível estático sub-aflorante, sendo utilizado para utilidade doméstica e irrigação de pequenas hortaliças. Possui um comportamento de aquífero livre, poroso, onde a recarga pluviométrica e os exutórios são representados pela evapotranspiração, rede de drenagem e poços manuais.

São representados por sedimentos de granulometria muito fina, frequentemente intercalados com níveis argilosos e orgânicos, derivados de uma ação erosiva sobre rochas e cristalinas sedimentares e migração de partículas das zonas de mangue.

## 7.2 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DOS SISTEMAS

Após a coleta dos dados, estes foram tabulados e consistidos em tabelas, gerando informações sobre os aspectos abordados de forma geoestatística dos 208 poços, dando ênfase as variáveis de profundidade, nível estático e vazão.

### 7.2.1 *Parâmetros estatísticos gerais*

A partir dos dados, os parâmetros de profundidade, nível estático e vazão foram apresentados dentro das variáveis de máximo, mínimo, média, mediana e desvio-padrão (Tabela 10).

Em relação a profundidade, observa-se que os poços variam de 2,5m a 100m, média de 26,8m, ocorrendo uma mediana de 12m, onde há maior quantidade de poços (rasos), com o maior número de poços localizado no Aquífero Dunas.

Para o nível estático obteve-se mínimo de 0,3m e máximo de 62m, média de 5,6m e mediana de 4,0m. A vazão oscila de 1,1m<sup>3</sup>/h à 20,5m<sup>3</sup>/h, com média de 8,3m<sup>3</sup>/h e mediana de 6,0m<sup>3</sup>/h. Assim, são vazões bastantes significativas em se tratando de poços rasos.

TABELA 10 - Estatística descritiva geral das variáveis para todos os poços da área de estudo.

Estatística Geral			
	Profundidade dos poços (m)	Nível estático (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
Máximo	100,0	62,00	20,50
Mínimo	2,50	0,30	1,10
Média	26,80	5,60	8,30
Mediana	12,00	4,00	6,00
Desvio padrão	25,90	6,40	6,20

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

### 7.2.2 Parâmetros estatísticos do Sistema Manto de Intemperismo

Os dados trabalhados encontram-se na Tabela 11. Os poços do Sistema Fissural possuem profundidade de 5m a 100m, média de 48,02m e mediana de 60m. A mediana reflete a prática adotada pelas empresas construtoras de poços desde a década de 60, levando para campo hastes com poder de perfuração até 60m. Esta prática, em nível de Ceará, tem mudado a medida em que locações geofísicas propõem maiores profundidades, chegando a 150m, embora nem sempre reflita em maiores vazões do poço. A profundidade mínima de 5m certamente se deve a poço manual, cadastrado no banco de dados dentro do Meio Fissural, e captando água do Aquífero Aluvionar ou do meio intemperizado.

Para o nível estático os valores de mínimo e máximo variaram de 1m à 62m, com média de 12,8m e mediana de 6,3m. Apesar dos valores distintos, haja vista que estão localizados no Sistema Fissural, os dados são compatíveis, pois os poços conservam um nível estático do ambiente de poços médios à rasos.

Para a vazão obteve-se uma variação de 2,5m<sup>3</sup>/h à 15,6m<sup>3</sup>/h com a média de 7,1m<sup>3</sup>/h e mediana de 4,8m<sup>3</sup>/h. A vazão média se apresentou elevada para este ambiente e, muito provavelmente, deve receber contribuições de níveis clásticos que recobrem o Cristalino, ou uma recarga efetiva de drenagens e/ou espelhos d'água interligados aos faturamento.

TABELA 11 - Estatística descritiva das variáveis para os poços do meio fissural da área de estudo.

<b>Estatística Fissural</b>			
	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Nível estático (m)</b>	<b>Vazão (m³/h)</b>
Máximo	100,00	62,00	15,60
Mínimo	5,00	1,00	2,50
Média	48,00	12,80	7,10
Mediana	60,00	6,30	4,80
Desvio padrão	25,80	15,70	5,20

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

### 7.2.3 Estatística do Aquífero Barreiras

Os dados encontram-se na Tabela 12. Os poços localizados no Aquífero Barreiras possuem profundidade variando de 2,5m à 72m. A média é de 23,0m e mediana de 9,0m, ressaltando poços rasos a profundos, embora com predominância de rasos.

O nível estático variou entre 0,95m à 15m, média de 5,0m e mediana de 4m, ressaltando águas freáticas. Para a vazão os valores variaram entre 1,4m³/h e 5,4m³/h, com média de 3,4m³/h e uma mediana de 2,8m³/h, refletindo a predominância de vazões inferiores a 4 m³/h, típica do Barreiras no Ceará.

TABELA 12 - Estatística descritiva das variáveis para os poços do Aquífero Barreiras da área de estudo.

<b>ESTATÍSTICA BARREIRAS</b>			
	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Nível estático (m)</b>	<b>Vazão (m³/h)</b>
Máximo	720	15,00	5,40
Mínimo	2,50	0,90	1,40
Média	23,00	5,00	3,40
Mediana	9,00	4,00	2,80
Desvio padrão	24,90	3,90	1,60

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

### 7.2.4 Estatística do Aquífero Dunas

O Aquífero Dunas (Tabela 13) apresentou dados que refletem profundidade de poços com mínimo de 4m e máximo de 80m, e mediana com

10m e média de 22,4m. Os poços apresentaram uma profundidade em sua maioria com 10m, ratificando seu ambiente Dunar, comportando-se com poços rasos.

O nível estático está entre 0,3m e 13,1m, média de 4,63m e mediana de 3,97m. Assim, enquadra-se como poços rasos e, ressalta-se, com vulnerabilidade bastante alta.

A vazão predominou entre 1,1m e 20,5m, média de 8,9m e mediana de 6,4m. Logo, as vazões são bastante significativas em se tratando de poços rasos.

TABELA 13 - Estatística descritiva das variáveis para os poços do Aquífero Dunas da área de estudo.

	ESTATÍSTICA DUNAS		
	Profundidade (m)	Nível estático (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)
Máximo	80,0	13,1	20,5
Mínimo	4,0	0,3	1,1
Média	22,4	4,6	8,9
Mediana	10,0	3,9	6,4
Desvio padrão	23,9	2,9	6,4

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

## 8 QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Do ponto de vista hidrogeológico, a qualidade da água subterrânea é tão importante quanto o aspecto quantitativo. A qualidade da água é definida por sua composição e pelo conhecimento dos efeitos que podem causar os seus constituintes (SANTOS, 2000).

Desde os primeiros contatos, as águas naturais e o ambiente geológico estão submetidos a processos geoquímicos que dependem basicamente da composição química das águas que abastecem os aquíferos e do ambiente geológico, de fatores físicos do subsolo e das águas (porosidade da rocha ou subsolo em contato com as águas, temperatura, pH, condutividade elétrica, velocidade da água em contato com o subsolo e a velocidade do fluxo das águas) e da influência humana sobre as águas e o meio ambiente geológico, geralmente na forma de poluição ambiental (FENZL, 1988).

### 8.1 CLASSIFICAÇÃO DE POTABILIDADE

A água potável é definida como aquela que pode ser consumida pelo homem sem ocasionar danos à saúde. No Brasil, o padrão de potabilidade para o consumo humano é recomendado pela Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde de 12/12/2011 (BRASIL, 2011).

#### 8.1.1 Análises físico-químicas

Os parâmetros físico-químicos foram obtidos a partir das análises laboratoriais das águas de poços cadastrados na área de pesquisa (Apêndice II).

##### 8.1.1.1 Cloreto

Aparece em oito (8) amostras acima do Valor Máximo Tolerável (250 mg/L) na Portaria Nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, atingindo 375 (Poço BM-21) a 3.216 mg/L (Poço BM-13); estas concentrações são responsáveis

pelo aumento gradativo de salinidade das águas e, conseqüentemente, pelo aumento dos STD (Apêndice VIII).

Das 22 amostras analisadas de águas subterrâneas, 23 (74%) encontram-se dentro do padrão aceitável, podendo ser usadas para consumo humano.

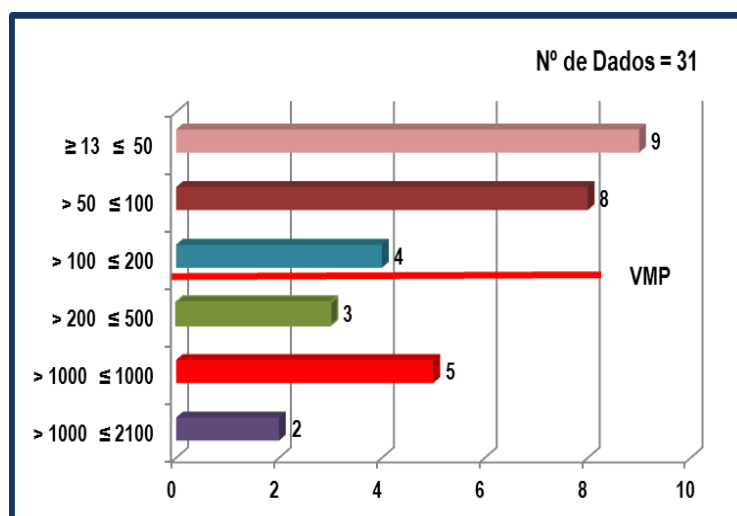
As origens do cloreto podem estar associadas à influência das águas marinhas sobre as continentais, já que a área se encontra localizada na zona litorânea, ou à captação das águas subterrâneas no meio cristalino, tendo em vista que os cloretos são provenientes da lixiviação de minerais ferromagnesianos de rochas ígneas ou, ainda, a uma fonte de poluição antrópica rica em cloretos e que possa estar cedendo-os para as águas subterrâneas (CAVALCANTE, 1998).

Para os altos valores encontrados no cristalino, deve-se considerar a baixa porosidade e permeabilidade do meio, o que implica em um maior tempo de residência da água e em concentração progressiva deste elemento (CAVALCANTE, 1990).

#### 8.1.1.2 Sódio

Os teores de sódio mostram que 10 (32%) das amostras de água subterrânea analisadas estão fora do limite permitido (200 mg/L) pela Portaria n.º 2.914/2011 do Ministério da Saúde, localizadas na porção sul e leste da área, variando de 234 a 2.100 mg/L. As maiores concentrações de sódio nas águas têm origem em altas concentrações de bicarbonato e com isso, a redução do cálcio e magnésio na solução do solo (Gráfico 24).

GRÁFICO 24 – Teor de sódio nas águas subterrâneas dos sistemas aquíferos.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

Nas águas subterrâneas, a concentração de sódio varia entre 0,1 e 100 mg/L, havendo enriquecimento gradativo deste elemento a partir das zonas de recarga (CUSTÓDIO, 1995).

#### 8.1.1.3 Potássio, Cálcio e Magnésio

Em relação aos íons Potássio, Cálcio e Magnésio, a Portaria n.º 2.914/2011 do Ministério da Saúde, não estabelece um valor máximo permissível para suas concentrações.

O Potássio variou pontualmente de 1,0 (2 amostra no centro-oeste e 1 na porção nordeste) a 60 mg/L (1 amostra no setor leste); o Cálcio variou de 0,08 (6 amostras no setor norte) a 220,8 mg/L (1 amostra na parte sudoeste da área), e o Magnésio de 0,01 (6 amostras no setor norte) a 361,8 mg/L (1 amostra na parte sudoeste da área) (Apêndice II).

O Potássio tem a tendência de estar sempre presente nos sedimentos argilosos em proporções maiores do que nas rochas cristalinas. O Cálcio é abundante na maioria das águas e rochas, enquanto o Magnésio é muito raro nas águas subterrâneas devido a sua escassez geoquímica.



#### 8.1.1.4 Dureza total

A dureza total de oito (8) amostras analisadas estão acima do limite permitido (500 mg/L) pela Portaria N<sup>o</sup> 2.914/2011 do Ministério da Saúde, atingindo 560 (Poço BM-21) a 1.723 mg/L (Poço BM-11) (Apêndice IX).

A dureza nas águas subterrâneas é uma propriedade que provoca incrustações nas tubulações, causando sérios problemas ao sistema de abastecimento, além de dificultar o cozimento dos alimentos.

Em geral, os sais em contato com as águas, podendo ser um Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), Dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ),  $\text{MgCO}_3$  (Magnesita) e  $\text{CaSO}_4$  (Sulfato de Cálcio) definem a dureza da água.

#### 8.1.1.5 Ferro total

As concentrações de ferro nas águas subterrâneas em 39% (distribuídos aleatoriamente na porção norte, sul, leste e oeste da área) estão acima do permissível pela Portaria n.<sup>o</sup> 2.914/2011 do Ministério da Saúde (0,3 mg/L) (Apêndice X). Na área, é comum a ocorrência da “capa rosa” nas águas subterrâneas, cuja origem pode estar vinculada ao Aquífero Barreiras que normalmente apresenta em seus níveis lateríticos elevadas concentrações de ferro.

Suas fontes são minerais ferro-magnesianos portadores de Fe, tais como a magnetita, biotita, pirita, piroxênios e anfibólios. Em virtude de afinidades geoquímicas, quase sempre é acompanhado do Manganês.

No organismo humano, o Ferro atua na formação da hemoglobina, a sua carência pode causar anemia e seu excesso pode aumentar a incidência de problemas cardíacos e diabéticos (SANTOS, 2008).

#### 8.1.1.6 N-Nitrato

Das 31 amostras analisadas (Apêndice II), 19% (6) delas estão acima do permissível pela Portaria n.<sup>o</sup> 2.914/2011 (10 mg/L N-Nitrato), do Ministério da Saúde atingindo em até 25% acima do limite máximo recomendado pela

Portaria avigente.

A distribuição espacial de nitrato na área mostra aumento na zona centro-norte refletindo o efeito das ações antrópicas, principalmente nas localidades do Pecém e Matões (Apêndice XI).

O nitrato é muito solúvel e dificilmente precipita. Em meios redutores, tem a tendência de ser estável, podendo passar a  $\text{NO}_2$  (nitrito) ou  $\text{NH}_4^+$  (amônia) e muito raramente para  $\text{NO}_3$  em meio oxidante. É muito móvel, podendo ser removido das camadas superiores do solo para a água. Ocorre em geral em pequenas concentrações, representando o estágio final da oxidação da matéria orgânica proveniente de resíduos da atividade humana (industriais, esgotos sanitários, fossas sépticas, depósitos de lixo, cemitérios, adubos nitrogenados, resíduos de animais etc.). Os resíduos de produtos protéicos provenientes de esgotos, fezes etc., são ricos em nitrogênio e se decompõem em nitratos na presença de oxigênio, de acordo com o ciclo do nitrogênio (BOWER, 1978 *apud* SANTOS, 2008).

O excesso de íons nitrato na água e no alimento pode levar a um aumento na incidência de câncer de estômago. Crianças com menos de três (03) meses de idade tem bactérias em seu aparelho digestivo que reduzem o nitrato a nitrito que se liga muito fortemente à moléculas de hemoglobina, impedindo-as de transportar oxigênio para as células do organismo. A deficiência de oxigênio leva à danos neurológicos permanentes, dificuldade de respiração e, em casos mais sérios, à morte por asfixia (metaglobenemia ou “síndrome do bebe azul”).

#### 8.1.1.7 pH

Os valores de pH mostram que todas as amostras apresentaram águas ácidas, ou seja, com pH inferior a 7, apresentando um valor médio de 5,9 (Apêndice XII), e de acordo com a Portaria n.º 2.914/2011 do Ministério da Saúde, a faixa de valores para o consumo humano é de 6,0 a 9,5. Em 16 amostras o pH é inferior a 6,0 (52%). Em geral, as águas de pH baixo tendem a ser corrosivas ou agressivas a determinados materiais (superfícies de cimento-amianto, por exemplo), enquanto que as águas de alto pH tendem a

formar incrustações, além disso, com pH ácido também podem causar doenças como gastrite, câncer gástrico e restrições nos usos gerais de indústrias.

Segundo Fenzl (1988), o pH varia se novas substâncias dissolvidas na água reagirem com os íons  $H^+$  e  $OH^-$ ; o pH aumenta se há reações com íons  $H^+$  e diminui se há reações com íons  $OH^-$ . Devido a concentração iônica das águas, o pH se encontra na faixa de 1 a 14 e classifica água ácida ( $pH < 7$ ); água neutra ( $pH = 7$ ), e água básica ( $pH > 7$ ).

Os baixos valores ( $< 6$ ) de pH encontrados nas águas desses poços provavelmente estão associados ao Aquífero Barreiras e, resultando assim, reações de equilíbrio entre a água e a rocha, e também pela introdução de águas recentes no aquífero (águas de chuva), com concentrações mais elevadas de  $CO_2$ , promovendo a diminuição do pH e aumentando, assim, a acidez das águas subterrâneas.

#### 8.1.1.8 Sólidos totais dissolvidos

Nas amostras analisadas, os Sólidos Totais Dissolvidos (STD) estão em 68% delas dentro do limite permitido (1.000 mg/L) pela Portaria n.º 2.914/2011 do Ministério da Saúde.

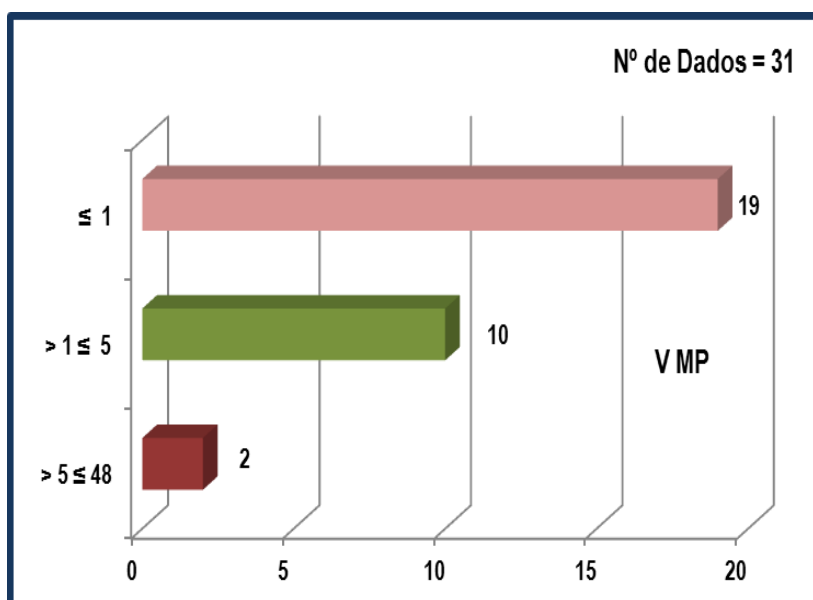
A distribuição espacial do STD na área pode ser visualizada no Apêndice XIII; o STD aumenta na parte sudoeste da área. Este comportamento é semelhante àquele observado para os cloretos, podendo ser produzido por diversos fatores, sendo os mais prováveis a dissolução e o processo de evaporação.

No primeiro caso, a concentração por dissolução nas águas subterrâneas tende a atingir um equilíbrio com as rochas que estão em contato e, quanto mais lenta a circulação maior é o tempo de contato, conseqüentemente, maior será o acréscimo na concentração total de sais na água do aquífero; o segundo processo é influenciado essencialmente pelas condições climáticas, podendo se verificar o aparecimento de maiores concentrações de sais nas regiões de climas quentes e secos (POHLING; SANTIAGO; TORQUATO, 1981).

### 8.1.1.9 Turbidez

Dos 31 dados analíticos (Gráfico 25), 2 (6%) amostras (1 amostra no setor noroeste e 1 amostra no setor leste da área) apresentaram valores de turbidez acima do padrão de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 2.914/2011, que é o Valor Máximo Tolerável de 5,0 UT. Isso se deve, provavelmente, ao baixo mecanismo de diluição nas amostras coletadas durante o período de estiagem, e/ou também à ausência de proteção sanitária dos poços, o que permite a entrada de impurezas, aumentando a turbidez das águas.

GRÁFICO 25 – Índice de turbidez nas águas subterrâneas dos sistemas aquíferos.



Fonte: Elaborado pelo pesquisador.

### 8.1.1.10 Fluoreto

Nas amostras analisadas, 100% (31 dados) delas (Apêndice II) estão dentro do limite permitido (1,5mg/L) pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde. Nas águas subterrâneas, os fluoretos são comumente encontrados em pequenas concentrações. Possui solubilidade limitada e pouco contribui para a alcalinidade da água, pois se hidrolisa rapidamente.

O flúor, em baixo teor, até 1,5 mg/L, é benéfico a saúde na prevenção de cáries dentárias de crianças em fase de crescimento. Acima deste teor já

é prejudicial, causando manchas nos dentes e deformação dos ossos. Doses excessivas causam a morte. É muito tóxico para os vegetais.

### 8.1.2 Análises bacteriológicas

Segundo a Portaria nº 2.914/2011 do MS, as águas potáveis devem ser isentas de coliformes totais ou fecais e não devem conter mais de 500 Unidade Formadora de Colônia (UFC)/ml de bactérias heterotróficas.

As 9 amostras analisadas (Tabela 14) apresentaram a presença de coliformes totais, variando de < 2,0 (BM-01) a > 200 UFC/100 ml (BM-08). Três amostras possuem coliformes fecais (Coliformes Termotolerantes) em concentrações variando de < 2,0 (BM-01), 6,0 (BM-07) e > 16 UFC/100 ml (BM-04). Ressaltando que todas as amostras tem ausência de bactérias heterotróficas, ou seja, concentração inferior a 500 UFC/mL.

Os coliformes fecais, subgrupo dos coliformes totais representados principalmente pela espécie *Escherichia coli*, são um indicativo de contaminação por esgotos, pois essas bactérias estão restritas ao trato intestinal de animais de sangue quente, a exemplo dos humanos. A determinação da concentração dos coliformes constitui um importante indicador da existência de micro-organismos patogênicos nas águas subterrâneas. Já as bactérias heterotróficas indicam a ocorrência de poluição microbiológica. Entretanto, este grupo não possui ação patogênica.

TABELA 14 – Análise microbiológica das águas subterrâneas.

Amostra	Coliformes Totais	Coliformes Fecais	Bactérias Heterotróficas
	UFC/100 ml		
BM - 01	< 2,0	< 2,0	-
BM - 02	12,0	-	16
BM - 03	16,0	-	2
BM - 04	138,0	16,0	4
BM - 05	200,0	Ausência	16,0
BM - 06	18,0	Ausência	22,0
BM - 07	52,0	6,0	> 200
BM - 08	> 200	Ausência	22,0
BM - 09	18,0	Ausência	6,0

Fonte Elaborada pelo pesquisador.

## 8.2 ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

A partir dos dados de poços, apresentaram de forma geral os principais parâmetros de análise de água: cloreto, dureza, ferro, nitrato e pH.

Para cloreto os números de mínima e máxima obteve-se valores de mínima 11,48 a máxima 3216,4 média de 471,88 e a predominância de 80,76 de mediana. Os níveis de dureza variaram de 0,2 e 1723,3 médias de 392,17 e mediana de 99,1. O parâmetro ferro ficaram com valores entre 0,2 e 2,67, tendo média de 0,38 e mediana de 0,175. Para o nitrato os valores variaram entre 0,28 e 26,35 com média de 6,92 e a predominância de 2,65 de mediana. Por fim, o pH obteve-se entre a mínima de 4,3 e a máxima de 6,89 com média de 5,89 e a mediana de 5,94.

TABELA 15 - Estatística descritiva dos parâmetros de análise de água dos poços.

ESTATÍSTICA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS					
Parâmetros	Cloreto mg/ L-Cl	Dureza Total CaCO <sub>3</sub> /mg/L	Ferro Total mg Fe <sup>2+</sup> /L	Nitratos mg N/L	Ph
Padrão da Resolução Ministério da Saúde Nº n <sup>o</sup> 2.914/2011	10	250	0,3	500	6-9,5
Máximo	3216,40	1723,30	2,67	26,35	6,89
Mínimo	11,48	0,20	0,02	0,28	4,30
Média	471,88	392,17	0,38	6,92	5,89
Mediana	80,76	99,10	0,175	2,65	5,94
Desvio Padrão	800,70	544,84	0,51	8,75	0,66

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

## 9 PRINCIPAIS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

### 9.1 CONSIDERAÇÃO GERAIS E CONCEITOS

A complexidade hidrogeológicas, dificulta que métodos de cartografias de vulnerabilidade classifiquem os aquíferos de forma absoluta, ou seja, que cada unidade tenha significado sem a comparação com outras unidades. A grande maioria dos métodos existentes classifica os aquíferos de forma relativa (HIRATA, 2001).

Cientificamente é mais lógico e coerente avaliar a vulnerabilidade para cada contaminante ou cada classe de contaminante (nutriente, microorganismos patogênicos, hidrocarbonetos clorados ou não, metais pesados etc.) individualmente ou cada grupo de atividade (saneamento *in situ*, cultivos agrícolas, disposição de efluentes industriais etc.) separadamente (SELLER; CANTER, 1980; LE GRAND, 1983; CARTER *et al.*, 1987).

Alguns métodos incluem índices de vulnerabilidade formados por parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras formas de parametrização das características dos aquíferos, de um modo bem definido. A adoção de índices de vulnerabilidade tem a vantagem, em princípio, de eliminar ou minimizar a subjetividade inerente aos processos de avaliação (LOBO-FERREIRA; CABRAL, 1991).

Os componentes que determinam a vulnerabilidade dos aquíferos são resultantes de uma combinação de vários fatores. Entretanto, na prática pode-se simplificar e utilizar apenas os parâmetros tipo de ocorrência da água subterrânea, características e litologia das camadas geológicas acima do aquífero e profundidade do nível d'água. Nessa avaliação inicial, a determinação da vulnerabilidade natural de aquíferos deve ser tomada com precaução, devido ao fato de que existem diversos tipos de contaminantes, cada um com suas características definidas (BRAGA, 2008).

Depreende-se da literatura que o conceito de vulnerabilidade é distinto do de risco de poluição. O primeiro é função de fatores hidrogeológicos, tais como, características litológicas do aquífero, do solo, profundidade do nível da água, portanto, intrínseco à área que está sendo avaliada. O segundo depende não só do primeiro como também da presença de quantidade significativa de contaminante. Um aquífero pode apresentar alta vulnerabilidade, porém sem risco à poluição, isto se não houver carga de contaminante expressivo presente, e, por outro lado, apresentar alto risco de poluição apesar de baixa vulnerabilidade (HIRATA, 2001).

Entretanto, vários conceitos de vulnerabilidade estão disponíveis na literatura, como serão apresentados a seguir:

O conceito de vulnerabilidade à poluição de aquíferos fosse definida de acordo com as conclusões da Conferência Internacional – *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants* - realizada em 1987 como a “sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero” (DUIJVENBOODEN; WEAGENIINGH, 1987 *apud* LEITÃO; OLIVEIRA; MOINANTE, 2003, p.23).

Por outro lado, a *National Resource Council* (NRC, 1993) definiu alguns postulados sobre vulnerabilidade de aquífero: a) todo aquífero (água subterrânea) apresenta algum grau de vulnerabilidade; b) incertezas são inerentes a toda avaliação de vulnerabilidade; e c) em sistemas mais complexos de avaliação de vulnerabilidade, existe um risco de que o óbvio possa estar obscurecido e o sutil possa tornar-se indistinguível.

Nobre (2006) o conceito de vulnerabilidade intrínseca ou natural está atrelado a três importantes atributos que determinam a capacidade de proteção natural do aquífero: i) atenuação natural (processo natural de degradação de contaminantes presentes no solo e nas águas subterrâneas); ii) recarga (inputs de água para o subsolo); e o iii) transporte dos contaminantes no meio hidrogeológico.

O mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação normalmente é o primeiro passo na avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea e na proteção de sua qualidade. Mapas de vulnerabilidade



vêm sendo amplamente utilizados, com o objetivo de proteger tantas áreas onde a atividade antrópica ainda é pouco expressiva e o potencial para exploração das águas subterrâneas é elevado, como em áreas densamente povoadas e com intensas atividades de risco.

Foster *et al.* (2002), propôs duas questões fundamentais, acerca da vulnerabilidade do aquífero à contaminação: a) estabelecer um índice de vulnerabilidade único e integrado, ou se é melhor trabalhar com a vulnerabilidade específica a determinados contaminantes e condições de poluição; b) fornece um indicador absoluto da vulnerabilidade à contaminação como um todo, ou restringir-se aos índices de vulnerabilidade relativos, bem menos eficazes.

## 9.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS PARA AVALIAR A VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

Encontra-se na bibliografia sobre o assunto, diversos métodos de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (FOSTER *et al.*, 2006).

Esses métodos podem ser classificados em três grupos principais, de acordo com a abordagem adotada por Vrba e Zaporozec (1994):

a) Ambientes hidrogeológicos: baseiam a avaliação da vulnerabilidade, em termos qualitativos, nas características gerais do ambiente, usando mapas temáticos (ALBINET; MARGAT, 1970).

b) Modelos análogos: utilizam expressões matemáticas para os parâmetros essenciais, tais como tempo de trânsito médio na zona vadosa como indicadores do índice de vulnerabilidade (MONKHOUSE, 1983).

c) Sistemas paramétricos: usam parâmetros selecionados como indicadores de vulnerabilidade e aplicam seu espectro de valores e interações para produzir alguma forma de índice de vulnerabilidade relativo ou absoluto. Incluem como exemplo desse método o DRASTIC de Aller *et al.* (1987). Além da metodologia GO (FOSTER; HIRATA, 1988).

Alguns desses sistemas incluem índices de vulnerabilidade formados por parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras formas de parametrização das características dos aquíferos, de um modo bem definido. Observa-se, portanto, que existem numerosas metodologias para qualificar a vulnerabilidade e permitir seu mapeamento em diferentes escalas, em sua grande maioria, desenvolvidas para aquíferos livres. Foi seguida esta previsão na presente Tese, porém nos Aquíferos Dunas e Barreiras foi pesquisado o Sistema Fissural, com maiores profundidades das águas internas.

Maia (2011) afirma que os métodos tradicionais para avaliar a vulnerabilidade foram desenvolvidos, de maneira geral, para um tipo particular de aquífero, quase sempre definindo os valores das variáveis por meio de tabelas e aplicando fatores de ponderação definidos com bastante subjetividade a cada uma delas, o que compromete seus resultados.

Os fatores que influenciam o comportamento hidrogeológico dos aquíferos variam: 1) Nos aquíferos fissurais, dependem da intensidade do fraturamento; 2) nos Cársticos, do grau de carstificação; e 3) nos Granulares, de ambientes deposicionais e processos diagenéticos. Esses fatores não são avaliados nas tabelas/ábacos e provocam distorções nos índices dos principais métodos (MAIA, 2011).

QUADRO 4 - Principais métodos de estudo da vulnerabilidade de aquíferos.

Nº	Método	Avaliação	Variáveis	Referência
1	$\Delta h.T'$	Vulnerabilidade em Aquíferos semiconfinados	Potencial hidráulico e Transmissividade vertical	Auge (2004), Argentina
2	IS	Vulnerabilidade Geral	Profundidade da água, recarga, litologia, vtopografia e ocupação do solo	Francés <i>et al.</i> (2001) & Paralta <i>et al.</i> (2001)
3	EPPNA	Vulnerabilidade Geral	Características litológicas e hidrogeológicas	Plano Nac.(Port.) da Água (1998)
4	EKv	Vulnerabilidade Geral	Espessura da zona subsaturada e permeabilidade da zona subsaturada	Auge (1995)
5	Saneamento em Situ	Vulnerabilidade a Saneamento em situ	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, prof. e qualidade da água	Foster & Hirata(1993)
6	Sem nome	Vulnerabilidade Geral	Característica litológica, permeabilidade e profundidade da água	Adams & Foster (1992)
7	SINTACS	SINTACS Vulnerabilidade Geral	Prof. da água, tipo de solo, infiltração, aquífero, subsaturada, condutividade, topog	Civita <i>et al.</i> (1990)
8	GOD	Vulnerabilidade Geral	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, prof. água	Foster & Hirata (1988)
9	Philips <i>et al.</i> (1977)	Vulnerabilidade Geral	Geologia (litologia e estrutura	Taltasse (1972)
10	Site Ranking System	Disposição de produtos Químicos	Solo, caract. hidrául, sorção e tamponam químico, hidrodinâmica, ar, população	Hargerty <i>et. al.</i> (1973)
11	Surface Impoundment Assessment	Disposição de águas servidas	Zona não saturada, importância do rec., qualidade da água, periculosidade do material	Le Grand (1964)

Fonte: Adaptado de Hirata (2001).

Os métodos que utilizam índices, se destacam entre as principais técnicas de avaliação, que tem como base a análise de alguns parâmetros do aquífero, classificando-os de acordo com índices, e distribuídos

especialmente. Os parâmetros individualmente classificados são sobrepostos para compor o mapa geral de vulnerabilidade (TAVARES *et al.*, 2009).

Dentre esses métodos se destacam: DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987); GOD (FOSTER, 1987); SINTACS (CIVITA, 1994) e EPIK (DOERFLINGER; ZWAHLEN, 1997).

Os parâmetros individualmente classificados são sobrepostos para compor o mapa geral de vulnerabilidade (TAVARES *et al.*, 2009).

Dentre esses métodos se destacam: GOD (FOSTER, 1987); DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987) SINTACS (CIVITA, 1994).

### 9.3 CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS MÉTODOS

Neste capítulo elenca-se as características dos principais métodos, quais sejam, Método DRASTIC, Método SINTACS, Método GOD, Método Maia, Método Superfície Freática (E), Permeabilidade (K) - índice EKV, e por fim o Método Índice da Vulnerabilidade do Aquífero (AVI) para nível de comparação no grau de vulnerabilidade de aquíferos.

#### 9.3.1 Método DRASTIC

O DRASTIC é um modelo empírico desenvolvido por Aller *et al.* (1987) para a, Agência de Proteção Ambiental / *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos.

Este método é usado tanto para a qualificação como para mapeamento e atribuição com base em taxas que variam de 1 (baixa vulnerabilidade) a 10 (mais alta vulnerabilidade), de acordo com as características e comportamento das variáveis consideradas na sigla DRASTIC (MELO JUNIOR, 2008):

D: profundidade da superfície freática;

R: recarga do aquífero;

A: tipo de aquífero;

S: tipo de solo;

T: topografia ou declividade do terreno;

I: Influência na zona não saturada;

C: condutividade hidráulica do aquífero.

Posteriormente esses índices são multiplicados por um peso (entre 1 e 5) (Tabela 16). O índice final é obtido somando-se os produtos de cada parâmetro pelo peso respectivo. O índice final varia entre 26 (mínima) e 226 (máxima) (Tabela 17).

TABELA 16 - Pesos inferidos para os fatores DRASTIC.

FATOR DRASTIC	FOTAR DRASTIC
Profundidade da Água	5
Recarga	4
Meio Aquífero	3
Solo	2
Topografia	1
Impacto da zona verde	5
Condutividade Hidráulica	3

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

TABELA 17 - Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC.

ÍNDICE DRASTIC	VULNERABILIDADE
180 - 226	Muito Alta
126 - 180	Alta
71 - 126	Intermediária
26 - 71	Baixa

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

Melo Junior, (2008), considera que um produto cartográfico representado em um mapa, é um produto subjetivo, baseado em dados objetivos, produzido com base na sensibilidade de seus autores em relação aos parâmetros enfocados. Logo se nota que, apesar de amplamente divulgado e utilizado mundialmente, o método DRASTIC algumas vezes apresenta incompreensão e má interpretação de seus índices finais, em decorrência da ausência de uma escala que defina a vulnerabilidade intrínseca de uma região.

A principal crítica ao DRASTIC se dá, com relação à subjetividade dos parâmetros Recarga (R) e Condutividade Hidráulica (C) ambos relacionados com o processo de recarga do aquífero (AUGE, 2004).

### 9.3.2 Método SINTACS

O método SINTACS, desenvolvido por Civita *et. al.* (1990), baseou-se no método DRASTIC e utiliza os mesmos parâmetros. Ele foi adequado as características hidrogeológicas da Itália, e ao requerimento de um mapeamento de maior detalhe. Os parâmetros desse método são os seguintes:

- S: Profundidade do topo do Aquíferos
- I: Infiltração (recarga de aquíferos)
- N: Impacto da zona vadosa. (Influência da zona não Saturada)
- T: Tipo de solo
- A: Litologia do aquífero.
- k: Condutividade hidráulica.

O método SINTACS atribui a cada parâmetro um índice de 1 a 10. O resultado final é um cálculo do índice de vulnerabilidade (Tabela 18), que resulta do somatório dos sete parâmetros, cada um multiplicado por um peso respectivo (Tabela 19).

TABELA 18: Classes de vulnerabilidade do índice SINTACS.

INDICE DRASTIC	VULNERABILIDADE
> 210	Muito Alta
186 - 2100	Alta
140 - 186	Moderadamente Alta
105 - 140	Média
80 - 105	Baixa
< 80	Muito Baixo

Fonte: Civita e De Maio (2000).

TABELA 19: Pesos em função de parâmetros e vulnerabilidade.

Parâmetro	Normal	Rigorous	Infiltração	Carste	Fissurado	Nitratos
<b>S</b>	5	5	4	2	3	5
<b>I</b>	4	5	4	5	3	5
<b>N</b>	5	4	4	1	3	4
<b>T</b>	3	5	2	3	4	5
<b>A</b>	3	3	5	5	4	2
<b>C</b>	3	2	5	5	5	2
<b>S</b>	3	2	2	5	4	3

Fonte: Civita e De Maio (2000).

Assim como no método DRASTIC, a necessidade de muitos parâmetros, dificulta a aplicação do método SINTACS. Para medição de todas as variáveis, é necessário um aporte financeiro considerável.

### 9.3.3 Método GOD

O método GOD consiste num método simples e sistemático, e foi desenvolvido em 1987 por Foster. Foi utilizado de forma ampla na América Latina e no Caribe durante a década de 90. Devido a sua pragmática simples, é o primeiro método usado para estimar o risco de contaminação de um aquífero, que é utilizado para estabelecer as prioridades de ação, à luz dos resultados.

Para determinar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, são considerados dois fatores básicos: a) o nível de inacessibilidade hidráulica da zona saturada do aquífero; b) a capacidade de atenuação dos estratos de cobertura da porção saturada do aquífero (FOSTER *et al.*, 2002).

O índice GOD baseia-se nos seguintes fatores:

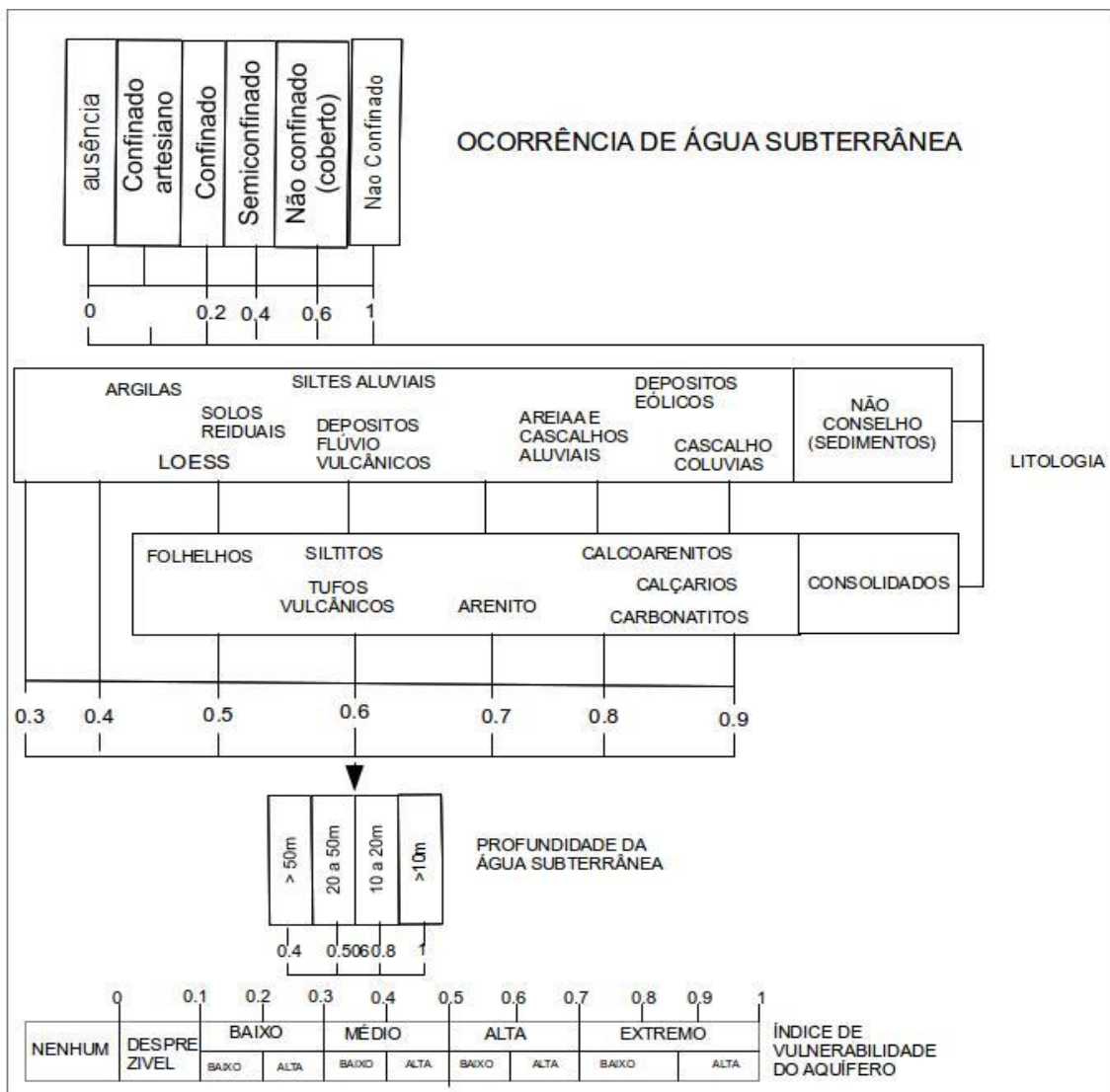
G: tipo de aquífero, com valores estabelecidos entre 0,0 – 1,0;

O: classe de aquífero em termos de grau de confinamento e litologia na escala entre 0,3 – 0,9;

D: profundidade do nível da água subterrânea com valores entre 0,4 – 1,0.

O índice final integral de vulnerabilidade do aquífero é o produto dos três índices desses parâmetros (Figura 31).

FIGURA 31 - Sistema para avaliação do índice de vulnerabilidade de aquífero através do método GOD.



Fonte: Foster e Hirata (1988).

Foster e Hirata (1988), propuseram então que as classes de vulnerabilidade, fossem subdivididas em 5 categorias, assim como mostra o Quadro 3, a seguir.



QUADRO 5 - Classes de vulnerabilidade do índice GOD.

<b>Classes da Vulnerabilidade</b>	<b>Definição Plástica</b>	<b>Índice da Vulnerabilidade</b>
<b>Extrema</b>	Vulnerabilidades e muito poluentes com rápido impactos em muito cenário descontaminação	0,7 - 1,0
<b>Alta</b>	Vulnerabilidades e muito poluentes, exceto aqueles muito poucos móvel e pouco persistente	0,5 - 0,7
<b>Moderada</b>	Vulnerabilidade e alguns poluentes, mais somente quando continuamente lançado	0,3 - 0,5
<b>Baixa</b>	Somente os vulnerável a contaminantes conservativo em longo prazo, quando o contaminantes e amplamente	0,1 - 0,3
<b>Desprezível</b>	Camada confinada com fluxo vertical descendente não significativo	0 - 0,1

Fonte: Foster e Hirata (1998).

#### 9.3.4 Método Maia

Maia (2011), buscou evitar o uso de fatores de ponderação, procurou tratar os valores das variáveis e colocá-los em uma escala equivalente adequada, sem que esses percam a relação com os valores medidos e permitir que esses índices possam ser aplicados na equação sem o uso de fatores de compensação de impactos.

A partir da decomposição e análise dos métodos mais utilizados, foram selecionadas somente as variáveis passíveis de serem medidas para utilizar na dedução da equação do novo método que descrever a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos (MAIA, 2011).

Maia (2011) avaliou as variáveis com a finalidade de selecionar as mais indicadas para compor as equações do método para o cálculo da vulnerabilidade dos aquíferos em escala regional. Para tanto, elas foram

descritas, de maneira mais ou menos uniforme, com o objetivo de facilitar o entendimento do papel que cada uma delas exerce sobre os fatores de proteção naturais e seu reatamento na vulnerabilidade dos aquíferos, são elas:

- a. Profundidade da Água (PA).
- b. Espessura do Solo (ES).
- c. Declividade do Terreno (DT).
- d. A Capacidade Específica (CE).
- e. Recarga Potencial (RE).
- f. Densidade de Fraturas (DF).
- g. Transmissividade do Aquífero (TA).

O modelo utilizado para descrever a vulnerabilidade do aquífero está ancorado em uma formulação matemática elementar, no qual cada termo da equação apresenta uma relação direta ou inversa com a vulnerabilidade. O somatório desses parâmetros resulta em índices que foram, subdivididos em quatro classes de vulnerabilidade, como mostra a Tabela 20.

TABELA 20 - Índices de vulnerabilidade do método Maia.

ÍNDICE	VULNERABILIDADE
> 25,5	Extrema
18,0 - 25,5	Alta
10,5 - 18,0	Média
< 10,5	Baixa

Fonte: Maia (2011).

Maia (2011) observou que todas as variáveis aplicadas no novo método, são medidas diretamente nos aquíferos e apresentam uma relação matemática com a vulnerabilidade. São características intrínsecas dos aquíferos que se relacionam de forma direta ou inversa com a vulnerabilidade.

### 9.3.5 Método superfície freática (E) permeabilidade (K) - índice EKv

A cartografia da vulnerabilidade à poluição segundo critérios litológicos foi realizada segundo o método apresentado no documento “Informação Cartográfica dos Planos de Bacia. Sistematização das Figuras e Cartas a Imprimir em Papel” de autoria da Equipe de Projeto do Plano Nacional da Água de Portugal, versão de outubro de 1998.

Esta abordagem apresenta algumas vantagens em relação aos métodos empíricos, uma vez que permite incorporar o conhecimento de inúmeras variáveis hidrogeológicas e do comportamento das principais formações para gerar classes de vulnerabilidade correspondentes a um determinado nível de risco.

Este método foi desenvolvido por Auge (1995) que considera a vulnerabilidade, “um conceito qualitativo que geralmente se refere ao grau de proteção natural de um aquífero diante da contaminação. Por isso também é conhecida como proteção ou defesa natural.” Trata-se de uma classificação para os aquíferos livres baseada na profundidade de superfície freática (E) e na permeabilidade vertical da zona saturada (Kv). Índice = E.Kv.

Aos dois parâmetros se atribuem índices que vão de 1 (menos vulnerável) a 5 (mais vulnerável) (Tabelas 21 e 22).

TABELA 21 - Índices de vulnerabilidade da profundidade da superfície freática no E.Kv.

Espessura da Zona Saturada (E)					
Metro	>30	>10 a 30	>5 a 10	>2 a 5	<2
Metro	1	2	3	4	5

Fonte: Auge (1995).

TABELA 22 - Índices de vulnerabilidade da zona saturada.

Permeabilidade da Zona Saturada (Kv)					
Metro / Dia	<1.10 <sup>-3</sup>	>1.10 <sup>-3</sup> a 0,01	>0,01 a 1	>1 a 50	>50 a 500
Índice	1	2	3	4	5
Vulnerabilidade	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta

Fonte: Auge (1995).

### 9.3.6 Método Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI)

O método Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI) foi proposto pelo *National Hydrology Research Institute* (NHRI), do Canadá. Este método foi proposto por Van Stempvoort *et al.* (1993) com base unicamente em dois parâmetros: a espessura de cada camada sedimentar acima da zona saturada (Zona não saturada do solo) e a condutividade hidráulica estimada de cada uma destas camadas ( $K_i$ ). O índice AVI representa a resistência de um aquífero ao fluxo vertical, em unidades [T] e significa o tempo aproximado da passagem de um poluente através das diferentes camadas.

A partir desses parâmetros calcula-se a Resistência Hidráulica:

$$C = \sum (d_i / K_i)$$

A relação entre a vulnerabilidade e C é apresentada abaixo (Quadro 4), único método disponível desenvolvido especialmente para aquíferos Cársticos. Este é empregado sem considerações de escala.

QUADRO 6 - Síntese com equações e variáveis dos principais métodos.

<i>E<sub>Kv</sub></i>	Índice = E.K <sub>v</sub> , sendo (E) profundidade de superfície freática e (K <sub>v</sub> ) a permeabilidade vertical da zona saturada.
<i>GOD</i>	Índice = G.O.D, sendo (G) o grau de confinamento (O) a litologia e o grau de consolidação da cobertura e (D) a profundidade da superfície freática.
<i>DRASTIC</i>	Índice = D.D <sub>w</sub> + R.R <sub>w</sub> + A.A <sub>w</sub> + S.S <sub>w</sub> + T.T <sub>w</sub> + I.I <sub>w</sub> + C.C <sub>w</sub> , sendo (D) a profundidade da superfície freática (R) a taxa de recarga (A) tipo do aquífero, tipo de solo (T) topografia ou declividade do terreno (I) Impacto da zona não saturada e (C) condutividade hidráulica. D <sub>w</sub> =5 e, R <sub>w</sub> =4, A <sub>w</sub> =3, S <sub>w</sub> =2, T <sub>w</sub> =1, I <sub>w</sub> =5 e C <sub>w</sub> =3, os respectivos fatores de ponderação.
<i>SINTACS</i>	Índice = S.S <sub>w</sub> + I.I <sub>w</sub> + N.N <sub>w</sub> + T.T <sub>w</sub> + A.A <sub>w</sub> + C.C <sub>w</sub> + S.S <sub>w</sub> , sendo (S) a profundidade da água (I) infiltração (N), seção saturada (T), tipo de solo (A), características do aquífero (C), condutividade hidráulica e (T) declividade topográfica. S <sub>w</sub> =22, I <sub>w</sub> = 8, N <sub>w</sub> =12, T <sub>w</sub> =9,8, w=17,7, C <sub>w</sub> =18,6, S <sub>w</sub> =11,9, os respectivos fatores de ponderação.
<i>MAIA</i>	$V = [(1/PA) + (1/ES) + (1/DT)] + CE + RE + TA$ <p>PA – Profundidade de Água;  ES - Espessura do Solo;  DT – Declividade do Terreno;  CE – Capacidade Específica;  RE – Recarga Potencial;  TA – Transmissibilidade do Aquífero.</p>
<i>AVI</i>	Resistência Hidráulica $C = \sum (d_i / K_i)$

Fonte: Maia (2011).

## 10 PROPOSTA DO MÉTODO DE VULNERABILIDADE (GATNEK) EM AMBIENTES HIDROGEOLÓGICOS

### 10.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo estão discutidas as variáveis propostas para a determinação dos parâmetros relacionados ao cálculo do índice de vulnerabilidade, bem como o resultado para a equação do cálculo da mesma a partir das relações existentes aplicadas à área do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), resultando no método de vulnerabilidade GATNEK.

Este método tem a vantagem da adaptabilidade para uma escala de detalhe, diferente de outros métodos generalistas, que em escalas de projeto executivo podem resultar em uma única classe de vulnerabilidade. Com esta metodologia, qualquer área pode ser mapeada, pois a vulnerabilidade é um conceito relativo.

Nesta metodologia a vulnerabilidade é relativa à área da pesquisa, ou seja, classifica o ambiente de acordo com as características próprias. Por exemplo, pode indicar quais áreas de um mesmo sistema aquífero são mais, ou menos, vulneráveis, partindo da análise comparativa das variáveis propostas.

As variáveis selecionadas para a aplicação do método proposto são:

- G: Granulometria;
- A: Ambiente Hidrogeológico;
- T: Transmissibilidade;
- NE: Nível Estático; e
- K: Condutividade Hidráulica.

A análise das variáveis propiciou o entendimento do papel que cada uma exerce sobre os fatores naturais de proteção e suas relações com a vulnerabilidade, adequada para compor a equação do método utilizado. Utilizado sendo o nome – GATNEK um acrônimo das variáveis.

## 10.2 VARIÁVEIS ADOTADAS NO MÉTODO GATNEK

Neste item estão analisadas as variáveis escolhidas a partir das relações entre elas para a determinação da vulnerabilidade. Os critérios para a escolha das variáveis basearam-se nos parâmetros observáveis e/ou medidos em campo, haja vista que a vulnerabilidade representa a situação física real do ambiente hidrogeológico.

A primeira variável é a Granulometria (G), positiva, pois é óbvio que quanto maior o tamanho dos grãos, mais facilmente qualquer fluido pode escoar pelo mesmo, a depender da homogeneidade, isotropia e cimentação.

A segunda variável, o Ambiente Hidrogeológico (A), é positiva, e quanto maior for o seu valor, maior será a vulnerabilidade, pois ele representa o tipo de sedimentação e/ou o litotipo que está submetido, ou não, à percolação do fluido.

A terceira variável, a Transmissibilidade (T), é positiva e está diretamente relacionada às variáveis diversas, acrescentando a espessura saturada, que também aumenta os riscos, haja vista que um aquífero mais espesso possui mais vulnerabilidade, pois os poluentes poderão se dispersar por uma área muito maior do ambiente hidrogeológico, dificultando ou mesmo impossibilitando uma remediação. Espessura menor do aquífero facilita a remediação, logo a vulnerabilidade para este aquífero é reduzida, assim como, os riscos para a sociedade.

A quarta variável é negativa, trata-se do Nível Estático (NE) e quanto maior for seu valor, obviamente menor será a vulnerabilidade, convenha-se que a vulnerabilidade é inversamente proporcional à profundidade das águas subterrâneas, com o aquífero desenvolvendo a função filtro e/ou sendo freático e aumentando o risco de poluição para o meio hídrico subterrâneo.

A quinta variável é a Condutividade Hidráulica (K) que também é positiva, pois quanto maior for, maior será a facilidade dos poluentes serem diluídos no ambiente hidrogeológico.

### 10.3 EQUAÇÃO DO MÉTODO GATNEK

O método GATNEK avalia a vulnerabilidade relativa de cada ponto da área, permitindo calcular a mesma com boa precisão, aumentando quanto mais pontos forem adicionados. Isto permite um grau de refinamento que possibilita a avaliação da vulnerabilidade relativa, na escala de um projeto executivo, como é o caso da implantação de uma indústria. Também permite indicar os pontos mais ou menos vulneráveis em cada ambiente.

Considerando que os valores das variáveis são transformados em índices, numa equação e os resultados podem estar na mesma escala, eles podem ser comparados entre si, imprimindo um caráter abrangente ao método GATNEK.

Considerando que as frações equivalentes representam a mesma parte do todo, os valores das variáveis foram colocados em uma escala equivalente, de forma a evitar o uso de ponderações subjetivas para realçar efeitos de algumas delas na equação. As escalas são proporcionais e todas equivalentes são de mesma amplitude. Os valores das variáveis relacionadas a vulnerabilidade foram transformados em índices, considerando-se o menor valor de cada variável, colocado como um, e o maior, sendo dez, sendo que os valores intermediários foram obtidos por meio de interpolação.

A equação do GATNEK foi deduzida a partir dos conceitos sobre o tema e das relações entre as variáveis e a vulnerabilidade. Considerando as variáveis propostas para o método e as relações entre cada uma delas com a vulnerabilidade, temos que a Vulnerabilidade (V) possui uma relação inversa com Nível Estático (NE) e direta com a granulometria (G), Ambiente Hidrogeológico (A), Transmissibilidade (T) e Condutividade Hidráulica (K). Quanto a vulnerabilidade esta encontrando-se representada pela Equação 1.

$$V = G + A + T - NE + K$$

A Equação descreve a vulnerabilidade a partir do somatório dos efeitos de proteção das parcelas representadas pelas variáveis diretamente relacionadas a acessibilidade de poluentes ao ambiente hidrogeológico, além



da facilidade de dispersão e atenuação de contaminantes, adicionado aos efeitos na vulnerabilidade produzidos pelas parcelas representadas pelas variáveis a serem representadas conforme a Figura 32.

A memória de cálculo é o documento que descreve em detalhes os cálculos efetuados até chegar ao resultado final apresentado nesta Tese. A memória de cálculo é de suma importância para detectar problemas ou erros de cálculo, bem como para melhor entendimento quando forem necessárias alterações ou gestão do método.

Detalhamento dos cálculos usados no método:

No cálculo do índice de vulnerabilidade, a profundidade do nível estático responde por 40% das incertezas nos riscos de contaminação previstos (LOAGUE, 1994; SOUTTER; MUSY, 1998).

Já o trabalho de Connell e Daele (2003) demonstrou que a forma não-transiente (fluxo estacionário) das equações é adequada para o cálculo das máximas concentrações que atingem o lençol freático e podem, conseqüentemente, ser adotadas no mapeamento da vulnerabilidade.

Baseado nestes estudos, este método para cálculo de vulnerabilidade foi obtido através de um método de indexação, utilizando-se cinco parâmetros do meio hidrogeológico, considerando os mesmos com igual nível de importância.

Para compor a equação deste método, as variáveis foram avaliadas considerando-se a possibilidade de obtenção dos dados (essencialmente medidos); os efeitos de proteção (acessibilidade e/ou atenuação); a relação com a vulnerabilidade (direta ou inversa); a natureza da variável (propriedade intrínseca).

São eles: Granulometria (G), Ambiente Hidrogeológico (A), Transmissibilidade (T), Nível Estático (NE) e Condutividade Hidráulica (K).

Destas variáveis, apenas o Ambiente Hidrogeológico (A) é qualitativa, sendo as demais quantitativas, logo, trata-se de um Método quali-quantitativo.

Como as variáveis escolhidas possuem diferentes amplitudes (mm, adimensional, m<sup>2</sup>/h, m, e m/h), os valores das variáveis foram colocados em uma escala equivalente, considerando-se o menor valor igual a 1 e o maior igual a 10. Com isto todas as escalas se tornaram proporcionais de base 10.

Este conceito de utilizar números proporcionais na base 10 segue o seguinte procedimento:

Pega-se um conjunto de números, por exemplo: (13, 16, 21, 37, 45, 73 e 76); Neste caso o 13 vai valer 1 e o 76 será igual a 10;

Portanto, determina-se o valor dos outros números (16, 21, 37, 45 e 73), a partir de um fator multiplicador e um de soma ou subtração. Neste caso específico a fórmula será:

$$y = 0,149x - 0,8571$$

Por exemplo para os números 16, 37 e 73:

$$y = 0,149(16) - 0,8571 = 2,272 - 0,8571 = 1,415$$

$$y = 0,149(37) - 0,8571 = 5,254 - 0,8571 = 4,397$$

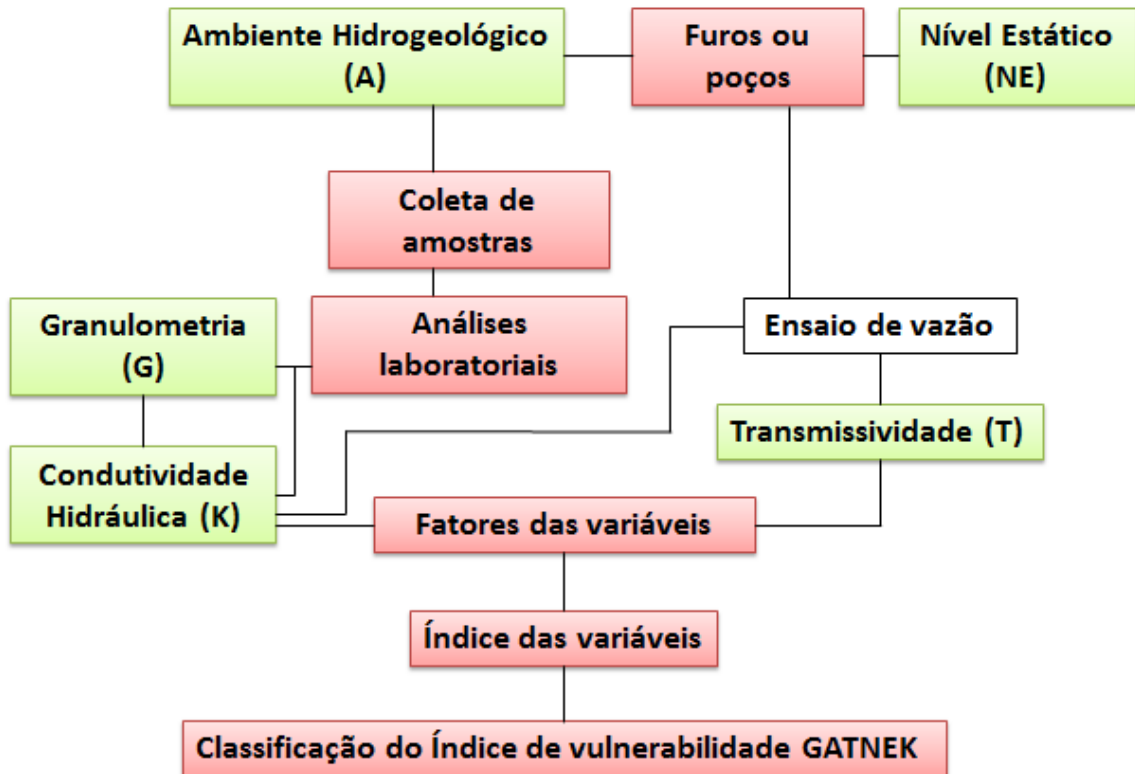
$$y = 0,149(73) - 0,8571 = 10,366 - 0,8571 = 9,509$$

Logo o índice de vulnerabilidade é definido por:

Equação Geral: Vulnerabilidade = (valor proporcional de base 10 da Granulometria + o valor tabelado do tipo de Aquífero + valor proporcional de base 10 da Transmissividade + valor proporcional de base 10 da condutividade hidráulica K – valor proporcional de base 10 do Nível Estático)

O tipo de aquífero A vem da tabela apresentada na Tese, por seu um índice qualitativo e o nível estático é negativo por ser inversamente proporcional à vulnerabilidade. Ou seja, quanto maior o nível estático NE, menos vulnerável é o aquífero.

FIGURA 32 - Fluxograma do processo de obtenção das variáveis e Índice de Vulnerabilidade GATNEK.



Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

#### 10.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO GATNEK NO CIPP/RMF/CE

O método GATNEK é aplicado e adaptável para uma escala de detalhe e, portanto, com esta metodologia é possível se classificar a vulnerabilidade para qualquer área, pois construiu um sistema de avaliação da vulnerabilidade relativa, permitindo o cálculo numa escala de um projeto executivo, como é o caso da implantação de uma planta industrial.

##### 10.4.1 Granulometria (G)

A granulometria influencia no ambiente hidrogeológico, isto é, na maior ou menor vulnerabilidade. Quanto maior a granulometria dos sedimentos, maior será a vulnerabilidade, pois maior será a permeabilidade e, portanto, menor capacidade de atenuação dos poluentes.

Três classes granulométricas foram definidas na área: a primeira representada pelas areias quartzosas (Aquífero Dunas); a segunda pelas classes silto-areno-argilosas da Formação Barreiras; e a terceira classe, representada pelas areias argilosas do manto de intemperismo sendo seus valores médios obtidos da Tabela 23.

TABELA 23 - Valores representativos das classes granulométricas em sedimentos ou litotipos.

DENOMINAÇÃO	INTERVALO GRANULOMÉTRICO (mm)
Matacões	> 256
Calhaus	Entre 256 e 64
Seixos	Entre 64 e 4
Grânulos	Entre 4 e 2
Areias	Entre 2 e 1/16
Siltes	Entre 1/16 e 1/256
Argilas	<1/256

Fonte: Wentworth (1922 *apud* SUGUIO, 1980).

Assim, o fator de proteção está relacionado com a permeabilidade e a porosidade características dos aquíferos e quanto maior a granulometria, maior será a facilidade de penetração dos contaminantes, e maior será a vulnerabilidade do ambiente.

Na área de pesquisa as maiores vulnerabilidades estão associadas aos meios constituídos pelas areias do Sistema Dunas, representando os sedimentos de maior granulometria.

Os dados representados na Zoneamento de Granulometria (Apêndice XVII) indica que 33% da área estão situados em terrenos com predominância de material arenoso (Formação Dunas), enquanto que 13% estão localizados em áreas de terrenos argiloarenosos da Formação Barreiras e 54% estão em terrenos cristalinos.

#### 10.4.2 Ambiente hidrogeológico (A)

Este parâmetro está particularmente relacionado com as condições hidrogeológicas do meio é considerado como Ambiente Hidrogeológico (A) o

litotipo ou sedimento, sendo aquífero aquele com boas porosidade e condutividade hidráulica.

Para a elaboração do Apêndice XIX de Ambiente Hidrogeológico foram considerados três ambientes hidrogeológicos (Dunas, Barreiras e Manto de Intemperismo), cujos valores para o GATNEK constam na Tabela 24 a seguir.

TABELA 24 – Valores representativos do ambiente hidrogeológico.

DESCRIÇÃO	VALOR
A- Argilas, margas e siltes	2
B - Ígneas/metamórficas	3
C - Ígneas/Metamórficas alteradas	4
D - Intercalações de arenitos, siltes, argilas e calcários	6
E - Arenitos Maciços	6
F - Calcários Maciços	6
G - Areias, cascalhos e conglomerados	8
H – Vulcânicas	9
I - Calcários Carstificados	10

Fonte: Allert *et al.* (1987).

Os Aquíferos Dunas, Barreiras e Manto de Intemperismo são as tipologias aquíferas que ocorrem na área da Tese e influencia na maior ou menor vulnerabilidade.

Os valores desta variável são relativos como mostra a Tabela 19 e necessita-se de conhecimento de campo para aferição destes valores, haja vista que um valor pode representar um conjunto de sedimentos ou litotipos, definidos pelo comportamento espacial dos mesmos.

#### 10.4.3 Transmissibilidade (T)

A transmissibilidade corresponde a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do Aquífero e, portanto, pode-se conceituá-la como a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do Aquífero com largura unitária submetido a um gradiente hidráulico unitário, ou seja, o T (Transmissibilidade) é igual a K (Condutividade Hidráulica) x B (espessura do aquífero).

É um parâmetro hidrogeológico que corresponde à capacidade de um meio para transmitir água, tratando-se de uma variável influenciada pelas características hidrogeológicas locais, sendo obtida por meio de testes de Aquíferos.

Trata-se da quantidade de água que escoar através da secção vertical de Aquíferos quando se diminui a carga hidráulica de uma unidade. A relação com a vulnerabilidade é direta e com o fator de proteção inversa. Quanto maior for a Transmissibilidade, menor será o fator de proteção e maior será a vulnerabilidade.

O Aquífero Dunas com 33% (66,50 Km<sup>2</sup>) representa a maior vulnerabilidade, pois trata-se do Aquífero de maior transmissibilidade, variando de 3,53 m<sup>2</sup>/h até 4,72 m<sup>2</sup>/h (Tabela 25 e Apêndice XIV).

TABELA 25 – Valores representativos das classes de transmissibilidade na área do CIPP.

DENOMINAÇÃO DO AQUÍFERO	INTERVALOS (m <sup>2</sup> /h)
Dunas	3,53-4,72
Barreiras	0,002-0,097
Manto do Intemperismo	0,0001-0,0534

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

A área referente ao Aquífero Barreiras representa 13% (26,20 km<sup>2</sup>) da área estudada, possuindo transmissibilidade de 0,002 a 0,097 m<sup>2</sup>/h.

O manto de intemperismo, localizado na porção centro-sul do CIPP, representa 54% (108,84 km<sup>2</sup>), e possui a transmissibilidade de 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/h a 5,34 x 10<sup>-2</sup> (m<sup>2</sup>/h).

#### 10.4.4 Nível Estático (NE)

O nível estático (NE) é um atributo relevante no estudo da avaliação da vulnerabilidade da área, pois indica a distância a ser percorrida pelos poluentes entre a zona não saturada e o ambiente hidrogeológico.

É uma variável que possui uma relação direta com o fator de proteção e inversa com a vulnerabilidade.

O Mapa de Zoneamento da Profundidade de Nível Estático (Apêndice V) poderá ser utilizado na previsão de profundidade do nível d'água apoiando a elaboração de mapa de vulnerabilidade.

Verificou-se que na área, a classe de profundidade do Nível Estático (NE) entre 2,0 a 5,0m prevalece sobre as demais (43,75%) e representa a mais vulnerável, os níveis estáticos da classe de profundidade entre 5,0 - 1,0 m ocorrem em 28,8% da área. A área que com a menor vulnerabilidade à poluição é de 22,10% e engloba classes de níveis estáticos maior que 10,0 m da área (Tabela 26).

TABELA 26 – Valores representativos das classes de nível estático na área do CIPP.

DENOMINAÇÃO DO AQUÍFERO	INTERVALOS (m) de NE
Dunas	1,69-13,10
Barreiras	2,30-15,00
Manto de Intemperismo	2,50-62,00

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

#### 10.4.5 Condutividade hidráulica (K)

A condutividade hidráulica é entendida como sendo numericamente igual a vazão que atravessa uma área, submetida a um gradiente hidráulico unitário, portanto, se refere à facilidade do Aquífero exercer a função de condutor hidráulico.

A variável condutividade hidráulica (K) determina a facilidade do litotipo de permitir com maior ou menor resistência o fluxo hidro subterrâneo. Os valores da condutividade hidráulica de vários termos litológicos constam na Tabela 27.

Considerando que os efeitos produzidos estão vinculados as características intrínsecas das rochas, sua atenuação é permanente. A distribuição espacial é variável, tanto na vertical como na horizontal, em decorrência da anisotropia dominante nos meios aquíferos, fenômeno este que não ocorre no Aquífero Dunas, pois trata-se de um aquífero homogêneo e isotrópico.

TABELA 27 - Valores representativos de condutividade hidráulica.

MATERIAL	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	
	m/dia	cm/s
<b>Sedimento não consolidado</b>		
Argila	$9 \times 10^{-7} \rightarrow 4 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-9} \rightarrow 5 \times 10^{-7}$
Silte	$9 \times 10^{-3} \rightarrow 2 \times 10^0$	$1 \times 10^{-7} \rightarrow 2 \times 10^{-3}$
Areia fina	$2 \times 10^{-2} \rightarrow 2 \times 10^1$	$2 \times 10^{-5} \rightarrow 2 \times 10^{-2}$
Areia média	$8 \times 10^{-2} \rightarrow 5 \times 10^1$	$9 \times 10^{-5} \rightarrow 5 \times 10^{-2}$
Areia grossa	$8 \times 10^{-2} \rightarrow 5 \times 10^{-2}$	$9 \times 10^{-5} \rightarrow 6 \times 10^{-1}$
Cascalho	$3 \times 10^1 \rightarrow 3 \times 10^3$	$3 \times 10^{-2} \rightarrow 3 \times 10^0$
<b>Rocha sedimentar</b>		
Calcário cárstificado	$9 \times 10^{-2} \rightarrow 2 \times 10^3$	$1 \times 10^{-4} \rightarrow 2 \times 10^0$
Calcário e dolomita	$9 \times 10^{-5} \rightarrow 5 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-7} \rightarrow 6 \times 10^{-4}$
Arenito	$3 \times 10^{-5} \rightarrow 5 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-8} \rightarrow 6 \times 10^{-4}$
Siltito	$9 \times 10^{-7} \rightarrow 1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-9} \rightarrow 1 \times 10^{-6}$
Conglomerado	$9 \times 10^{-9} \rightarrow 2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-11} \rightarrow 2 \times 10^{-7}$
<b>Rocha cristalina</b>		
Basalto vesicular	$3 \times 10^{-2} \rightarrow 2 \times 10^3$	$4 \times 10^{-5} \rightarrow 2 \times 10^0$
Basalto	$2 \times 10^{-6} \rightarrow 4 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-9} \rightarrow 4 \times 10^{-5}$
Rocha ígnea ou metamórfica fraturada	$7 \times 10^{-4} \rightarrow 3 \times 10^1$	$8 \times 10^{-7} \rightarrow 3 \times 10^{-2}$
Rocha ígnea ou metamórfica não fraturada	$3 \times 10^{-9} \rightarrow 2 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-12} \rightarrow 2 \times 10^{-8}$

Fonte: Wiedemeier *et al.* (1999 *apud* PUERARI, 2005).

A condutividade hidráulica do Sistema Dunas varia de 0,113 a 0,209 cm/s, evidenciando um sistema deposicional bastante homogêneo.

A condutividade hidráulica do Sistema Barreiras é de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  cm/s, evidenciando um sistema deposicional anisotrópico e heterogêneo.

A condutividade hidráulica do Manto de Intemperismo varia de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  cm/s. No Apêndice XVIII, encontra-se o zoneamento da condutividade hidráulica no CIPP.

#### 10.4.6 Discussão e resultados

Os conceitos de vulnerabilidade e risco de contaminação em águas subterrâneas possuem grandes destaques na presente Tese.

Para tanto, em síntese, recapitula-se o conceito apresentado por Foster e Hirata (1988 *apud* FEITOSA *et al.*, 2008) em que a vulnerabilidade é a



susceptividade intrínseca do meio aquífero em ser adversamente afetado por uma carga contaminante antrópica. Os citados autores consideram o perigo de contaminação em águas subterrâneas como sendo a inter-relação entre vulnerabilidade do aquífero e uma carga contaminante potencial associada a uma atividade existente.

Para tanto, se apresentam índices em diferentes ambientes hidrogeológicos, no caso: Dunas, Barreiras e Cristalino conforme constam nas Tabelas 28, 29 e 30.

TABELA 28 – Índice de vulnerabilidade do ambiente hidrogeológico dunas com aplicação do método GATNEK em área do CIPP/RMF/Ceará, Brasil.

Poço N°	Aquifero	Coordenadas		Nível Estático (m)	Granulometria (mm)	Transmissibilidade (m <sup>2</sup> /h)	Permeabilidade (mm/s)	Nível Estático (Índice)	Granulometria (Índice)	Transmissibilidade (Índice)	Condutividade Hidráulica (Índice)	Ambiente Hidrogeológico (Fator)	Vulnerabilidade	Índice de Vulnerabilidade
		X	Y											FINAL
BM41	Dunas	516207	0607623	7,55	0,07	4,52	0,209	1,9	2,0	9,80	9,93	8,00	27,8502	8,7
BM43	Dunas	515895	0606312	2,05	0,50	3,80	0,176	1,1	8,5	8,40	8,49	8,00	32,2998	9,8
BM49	Dunas	519566	0606688	1,69	0,05	4,50	0,179	1,0	1,7	9,77	8,61	8,00	27,0580	8,5
BM56	Dunas	517927	0606279	13,10	0,07	4,10	0,163	2,7	2,0	8,99	7,92	8,00	24,2085	7,8
BM105	Dunas	519825	0603061	7,50	0,60	3,77	0,123	1,9	10,0	8,34	6,22	8,00	30,6727	9,4
BM107	Dunas	518750	0607106	10,20	0,06	4,62	0,183	2,3	1,9	10,00	8,81	8,00	26,3875	8,4
BM147	Dunas	522133	0602364	6,00	0,55	3,67	0,113	1,7	9,2	8,15	5,80	8,00	29,5203	9,1
BM149	Dunas	516109	0602518	3,90	0,50	3,54	0,140	1,4	8,5	7,89	6,97	8,00	29,9952	9,3
BM160	Dunas	519239	0602975	4,40	0,55	3,48	0,121	1,4	9,2	7,78	6,12	8,00	29,7122	9,2
BM165	Dunas	519170	0604455	6,20	0,45	3,77	0,131	1,7	7,7	8,34	6,56	8,00	28,9387	9,0
BM178	Dunas	516052	0608519	5,80	0,05	4,41	0,204	1,6	1,7	9,59	9,71	8,00	27,3749	8,6
BM181	Dunas	515301	0603813	2,20	0,60	3,63	0,144	1,1	10,0	8,07	7,12	8,00	32,0807	9,8
BM187	Dunas	514155	0607690	2,00	0,06	4,16	0,193	1,1	1,9	9,10	9,21	8,00	27,1032	8,5
BM197	Dunas	512751	0605650	2,50	0,55	3,77	0,175	1,2	9,2	8,34	8,43	8,00	32,8676	10,0
BM208	Dunas	515732	0606344	3,00	0,50	3,80	0,176	1,2	8,5	8,40	8,49	8,00	32,1592	9,8

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

TABELA 29 – Índice de vulnerabilidade do ambiente hidrogeológico Barreiras com aplicação do método GATNEK em área no CIPP/RMF/Ceará, Brasil.

Poço N°	Aquifero	Coordenadas		Nível Estático (m)	Granulometria (mm)	Transmissibilidade (m <sup>2</sup> /h)	Permeabilidade (mm/s)	Nível Estático (Índice)	Granulometria (Índice)	Transmissibilidade (Índice)	Condutividade Hidráulica (Índice)	Ambiente Hidrogeológico (Fator)	Vulnerabilidade	Índice de Vulnerabilidade
		X	Y											FINAL
BM99	BARREIRAS	516705	9601249	2,30	0,60	0,097	0,00180	1,124	9,999	1,188	1,004	6,000	17,0673	6,0
BM103	BARREIRAS	519996	9600657	9,43	0,06	0,025	0,00035	2,180	1,872	1,048	0,942	6,000	7,6820	3,7
BM114	BARREIRAS	515443	9600955	10,50	0,06	0,002	0,00006	2,338	1,872	1,003	0,930	6,000	7,4672	3,6
BM123	BARREIRAS	520064	9599183	1,45	0,15	0,116	0,00230	0,999	3,227	1,225	1,026	6,000	10,4788	4,4
BM124	BARREIRAS	520054	9599249	3,28	0,15	0,164	0,00253	1,269	3,227	1,318	1,036	6,000	10,3114	4,3
BM126	BARREIRAS	520299	9601326	8,90	0,06	0,010	0,00015	2,101	1,872	1,019	0,934	6,000	7,7236	3,7
BM138	BARREIRAS	516043	9600137	15,00	0,30	0,095	0,00202	3,004	5,484	1,183	1,014	6,000	10,6769	4,4
BM141	BARREIRAS	521519	9597300	2,00	0,06	0,018	0,00036	1,080	1,872	1,034	0,942	6,000	8,7681	4,0
BM143	BARREIRAS	520820	9597760	1,50	0,60	0,005	0,00008	1,006	9,999	1,008	0,931	6,000	16,9319	6,0
BM206	BARREIRAS	520538	9601235	5,00	0,60	0,008	0,00013	1,524	9,999	1,015	0,933	6,000	16,4222	5,9

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

TABELA 30 – Índice de vulnerabilidade do ambiente hidrogeológico do Mento do Intemperismo com aplicação do mérito GATNEK em área do CIPP/RMF/Ceará, Brasil.

Poço N°	Aquífero	Coordenadas		Nível Estático (m)	Granulometria (mm)	Transmissibilidade (m <sup>2</sup> /h)	Permeabilidade (mm/s)	Nível Estático (Índice)	Granulometria (Índice)	Transmissibilidade (Índice)	Condutividade Hidráulica (Índice)	Ambiente Hidrogeológico	Vulnerabilidade	Índice de Vulnerabilidade
		X	Y											FINAL
BM 136	CRISTALINO	518478	9595644	7,00	0,002	0,0534	0,000159	1,8	<b>1,0</b>	<b>1,10</b>	<b>0,93</b>	<b>4,00</b>	5,2160	<b>3,1</b>
BM 140	CRISTALINO	513471	9599712	2,50	0,002	0,0022	0,000249	1,2	<b>1,0</b>	<b>1,00</b>	<b>0,94</b>	<b>4,00</b>	5,7862	<b>3,2</b>
BM11	CRISTALINO	516956	9598207	11,30	0,002	0,0056	0,000032	2,5	<b>1,0</b>	<b>1,01</b>	<b>0,93</b>	<b>4,00</b>	4,4810	<b>2,9</b>
BM 130	CRISTALINO	515348	9593345	35,00	0,002	0,0190	0,000211	6,0	<b>1,0</b>	<b>1,04</b>	<b>0,94</b>	<b>4,00</b>	1,0072	<b>2,0</b>
BM 52	CRISTALINO	510411	9592982	7,20	0,002	0,0125	0,000101	1,8	<b>1,0</b>	<b>1,02</b>	<b>0,93</b>	<b>4,00</b>	5,1042	<b>3,0</b>
BM 131	CRISTALINO	512461	9596656	30,00	0,002	0,0024	0,000023	5,2	<b>1,0</b>	<b>1,00</b>	<b>0,93</b>	<b>4,00</b>	1,7068	<b>2,2</b>
BM 133	CRISTALINO	519682	9593899	62,00	0,002	0,0001	0,000002	<b>10,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,00</b>	<b>0,93</b>	<b>4,00</b>	-3,0347	<b>1,0</b>
BM 9	CRISTALINO	517500	9590300	8,00	0,002	0,0008	0,000005	2,0	<b>1,0</b>	<b>1,00</b>	<b>0,93</b>	<b>4,00</b>	4,9589	<b>3,0</b>

Fonte: Elaborada pelo pesquisador.

A classificação de vulnerabilidade segundo o Método GATNEK é assim escalonada:

- 1) Extremamente Alta: significa que o ambiente hidrogeológico é receptível a todos os tipos de poluentes, sem exceção;
- 2) Alta: significa que o ambiente hidrogeológico é susceptível a maior abrangência de tipologia de poluentes, incluindo bactérias e vírus.
- 3) Moderada: o ambiente hidrogeológico é susceptível a produtos solventes medianamente móveis e persistentes, envolvendo metais pesados, carvão, hidrocarbonetos sintéticos;
- 4) Baixa: somente poluentes com muita mobilidade e persistência atuam no ambiente hidrogeológico, tais como, os sais, nitratos e alguns solventes halogenados;
- 5) Inexistente: em casos que ocorre a inexistência de água, o meio físico se caracteriza também com a inexistência de vulnerabilidade. Pode-se exemplificar, citando-se, por exemplo, um corpo granítico sem fraturamento.

Como se observa no Apêndice XIV de Vulnerabilidade dos Sistemas Hidrogeológicos da área de estudo, constatou-se 03 (três) níveis de vulnerabilidade, quais sejam: alta, moderada e baixa.

Constatou-se uma alta vulnerabilidade para terrenos pertencentes ao Aquífero Dunas, onde os resultados dos Índices de Vulnerabilidade ficaram no intervalo de 7,8 a 10, e foram analisados parâmetros relativos a 15 (quinze) poços distribuídos na área pertencente ao Aquífero Dunas (Tabela 28) Índice de Vulnerabilidade do Ambiente Hidrogeológico Dunas.

Assim, conforme o cálculo do Índice de Vulnerabilidade identificou-se do total de 201,54 Km<sup>2</sup>, que 33% (66,50 Km<sup>2</sup>) caracterizados como de vulnerabilidade alta, onde ocorre o Aquífero Dunas constituído por areias claras, homogêneas e isotrópicas.

No caso do Aquífero Barreiras, com seus níveis anisotrópicos e heterogêneos, os resultados do Índice de Vulnerabilidade ficaram no intervalo de 3,6 (próximo da mais Alta Vulnerabilidade) e 6,0, que já se aproxima da

vulnerabilidade mais baixa de 4,5, caracterizando -0 como o de Moderada Vulnerabilidade.

Foram analisados 10 (dez) poços construídos na área onde afloram Aquífero Barreiras (Tabela 29) Índice de Vulnerabilidade do Ambiente Hidrogeológico do Barreiras. A paisagem do Barreiras foi incluída como índice de Moderada Vulnerabilidade, englobando 13% (26,20km<sup>2</sup>).

Por fim, no caso Aquífero Manto de Intemperismo, pode-se observar que todos os pontos tiveram índice de 1,0 a 3,2, com valor médio de 2,8, caracterizando como ambiente de mais Baixa Vulnerabilidade da área do CIPP. Nesse ambiente, foram selecionados 08 (oito) Poços Tubulares, cujos parâmetros podem ser analisados na (Tabela 30) Índice de Vulnerabilidade do Ambiente Hidrogeológico, cujos resultados ocorrem em 54% (108,84 Km<sup>2</sup>) da área Tesa. Este ambiente hidrogeológico se apresentou com Menor Índice de Vulnerabilidade.

## 10.5 RISCO DE POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O conceito de risco de poluição das águas subterrâneas nesta Tese é definido como a probabilidade das águas subterrâneas se poluírem com concentrações acima dos valores permitidos pela Portaria nº 2.914/2011 – Ministério da Saúde, para a qualidade da água de consumo humano.

Sabendo-se que o transporte de poluentes nas águas subterrâneas é bastante complexo, deve-se tratar cada poluente no Ambiente Hidrogeológico como sendo único e executar investigações, individualizadas por Ambiente Hidrogeológico para avaliar o risco de poluição.

Acontecem casos em que a metodologia de investigação é relativamente simples, requerendo minimamente um bom conhecimento do Ambiente Hidrogeológico e uma determinação de fonte de poluição. Entretanto, na maioria dos problemas de poluição, se faz necessário o conhecimento também da vulnerabilidade.

Mapa de Potencial de Risco das Águas Subterrâneas (Apêndice XV) foi delimitado em 3 (três) níveis, sendo:

- Risco Alto: Áreas onde estão inseridas a Termoelétrica Energia Pecém e Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP) (Setor II), e se inclui a Lagoa de Gereraú, que trata-se de um grande espelho d'água ao Sul da Termoelétrica Energia do Pecém;
- Risco Moderado: Área que engloba a porção norte do Mapa e onde se encontra a área portuária e as áreas circunvizinhas das Estações Ecológicas do Pecém I e II e Área de Proteção Ambiental (APA) do Pecém;
- Risco Baixo: Englobam áreas das Estações Ecológicas do Pecém I e II, Área de Proteção Ambiental (APA) do Pecém, que estão localizadas próximas a Zona Portuária do Porto do Pecém, na porção centro-norte da área.

Também está incluída nas Áreas de Risco Baixo, a porção sul da área estudada, que engloba os Setores III e IV; as áreas industriais, duas áreas institucionais e de serviços e ZPE II, localizadas todas na porção Sul do CIPP.

Faz-se necessário descrever o Mapa de Uso e Ocupação do Solo (Anexo III). Importante destacar que citado mapa subsidiou com dados primários a construção do Mapa de Potencial de Risco das Águas Subterrâneas; portanto, elencando a partir da porção Norte do CIPP, constata-se a localização do Porto do Pecém e o conjunto de área portuária, englobando a empresa Ceará Portos, o corredor ocupado, partindo do Porto do Pecém, pelas 2 (duas) correias transportadoras de minérios. Uma dessas correias transportadoras de minérios possui a finalidade de transportar o carvão que abastece a Termoelétrica Energia Pecém, num percurso de 9,8 Km; e a outra correia transportadora de minério de ferro, abastece a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), num percurso de 7,5 Km.

Próximo a área portuária, constata-se a localização de uma área urbana que engloba o distrito do Pecém e complementando a área, cita-se também, as estações Ecológicas do Pecém I e II e Área de Proteção do Pecém (APA).

Na porção Noroeste do CIPP, encontra-se o Setor I, ocupado principalmente pela Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), a Termoelétrica Energia do Pecém e a ZPE – I. O Setor II, localizado na parte centro-leste do CIPP, é ocupado pelas futuras instalações da Refinaria Premium II.

O Setor III é reservado para receber indústrias automotivas e localiza-se a Sudeste do CIPP.

O Setor IV se encontra ao Sul do CIPP e está reservado para ocupar as instalações do ZPE-II, Área Institucional e Serviços.



## 11 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 11.1 CONCLUSÕES

O trabalho de Tese foi realizado na área do Complexo Industrial Portuário do Pecém (CIPP), com 201,5 km<sup>2</sup> e localizado a 50 Km a oeste de Fortaleza, inserido nos municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia, Ceará. Foi pesquisada a vulnerabilidade dos ambientes hidrogeológicos onde as águas subterrâneas se encontram armazenadas em quatro sistemas hidrogeológicos: três sedimentares (Dunas, Barreiras e Aluviões) e o Manto de Intemperismo e, apesar das aluviões fazerem parte do conjunto de sedimentos da área, suas exposições diminutas, localizadas e a falta de dados não permitiram o mapeamento de sua vulnerabilidade.

Em análise do Balanço Hídrico constata-se que a precipitação é de 1.048 mm/ano e apresenta um déficit de 519 mm/ano.

A recarga subterrânea traduzida pela infiltração eficaz ocorre prioritariamente nos meses de fevereiro e abril, sendo seu valor de 211,1 mm/ano.

O Sistema de Dunas aflora em 66,5 km<sup>2</sup> bordejando a orla costeira. No entanto, adentra nas proximidades da Lagoa de Gereraú, 9,5Km ao continente, representa um aquífero, livre, homogêneo e captado por poços predominantemente rasos, com profundidades oscilando abaixo de 20m, nível estático freático com média de 4,0...m, espessuras de sedimentos oscilando até 40m, espessura saturada entre 3m e 9m (média de 6m), vazão média de 4,0 m<sup>3</sup>/h, valores de transmissibilidade (T) de 3,48 a 4,62 m<sup>2</sup>/h. a recarga deste aquífero é, fundamentalmente, pluviométrica e, secundariamente, por drenagens oriundas das lagoas e drenagens influentes.

O Aquífero Dunas é alvo de intensa exploração de suas águas subterrâneas, seja por captação em poços tubulares ou manuais ou, ainda, através de captações diretas instaladas nas várias lagoas que expõem o nível freático à superfície.

Neste ambiente, existe uma variação topográfica acentuada que se reflete no nível potenciométrico que oscila de 30m (ápices das Dunas) a 2m, áreas de depressões representadas pelas calhas das drenagens. Tal comportamento reflete um fluxo descendente em direção às drenagens, a exemplo dos fluxos em direção as Lagoa do Gereraú e do Anhembi e, principalmente, em direção ao mar, exutórios naturais, além de poços que funcionam como exutórios artificiais.

Há uma conexão hidráulica os Aquíferos Dunas e Barreiras traduzida por uma drenança vertical descendente, em função do gradiente hídrico vertical entre esses aquíferos, o que leva a um comportamento do Dunas como aquífero de transferência.

O Sistema Hidrogeológico Barreiras ocorre sotoposto as Dunas e aflora, sobreposto as rochas cristalinas, em 26,20 km<sup>2</sup> (13,28%) na porção central da área. Possui espessura de até 40m e espessura saturada média de 15m, nível estático inferiores a 10,0...m, vazão média de 2m<sup>3</sup>/h, a transmissibilidade oscila entre 0,002 a 0,164 m<sup>2</sup>/h. A recarga é pluviométrica, embora tenham contribuição do Aquífero Dunas e de drenagens e lagoas da área. Seus exutórios são representados pelas drenagens afluentes e lagoas, além de exutórios artificiais representados pelos poços tubulares.

O Sistema Hidrogeológico Manto de Intemperismo representa de 30 a 50km<sup>2</sup> e é composto pelo material alterado sobreposto as rochas cristalinas que ocorrem ao centro-sul da área, possuindo características argilo-silto-arenosas, rasas, com nível estático freático, espessuras de 5 a 12m, e sendo captadas principalmente por poços manuais de pequenas profundidades, com a água sendo direcionada para usos diversos, desde o abastecimento humano até a aplicação para pequenas horticulturas. A recarga é pluviométrica e seus exutórios são as drenagens e lagoas intermitentes.

Em relação a qualidade da água as amostras analisadas sob o aspecto bacteriológico apresentaram a presença de coliformes totais, variando de <2,0 (BM-01 a > 200 UFC/100 ml (BM-08). Três amostras possuem coliformes fecais (coliformes Termotolerantes) em concentrações variando de <2,0 (BM-01).

A > 16 UFC/100 ml (BM-04). Ressaltando que todas amostras são ausentes de bactérias heterotróficas, ou seja, concentrações inferiores a 500 UFC/ml.

A qualidade físico-química das águas do Aquífero Dunas é boa porém, localmente, existem concentrações acima dos padrões máximos de potabilidade para águas de consumo humano (Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde do Brasil) para nitratos, cloretos, ferro e pH, geralmente ácido.

Dentre as principais fontes potenciais de poluição das águas subterrâneas no CIPP, citam-se a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), a Termoelétrica Energia Pecém, Polo Metal Mecânico e Cimenteiras (Votorantim, Apodi e Mizu). Todas estas empresas trabalham minerais (calcário, carvão, ferro e outras matérias-primas poluidares, comprometendo potencialmente, o meio ambiente e a qualidade de vida da população.

Embora as análises qualitativas realizadas na área não possuam os elementos potencialmente contaminantes liberados por essas atividades, existem notificações da população sobre a incidência maior de doenças respiratórias desde que tais indústrias foram implantadas. Deve ser ressaltado que além dessas indústrias, estão implantados diversos núcleos populacionais para atender o mercado de trabalho requerido, a exemplo da CSP que no decorrer da sua implantação empregava cerca de 13.000 funcionários. Assim, a expansão urbana irá gerar resíduos domésticos, também poluidores quando não tratados corretamente, haja vista que os resíduos sólidos serão dispostos sobre sedimentos inconsolidados e/ou rochas sedimentares friáveis.

Inúmeros métodos de vulnerabilidade circulam pela literatura técnica, a exemplo do DRASTIC, GOD, GODS e AVI, entre outros. Procurando um método de aplicação direta para a área da Tese, correlacionando-o com os aspectos físicos para resultar em classes de vulnerabilidade, foi proposto o método GATNEK, acrônimo das variáveis Granulometria (G), Ambiente hidrogeológico (A), Transmissividade (T), Nível estático (NE) e Condutividade hidráulica (K).

As variáveis do GATNEK são expostas através de valores comparativos dentro da mesma variável e, posteriormente, transformados em índices de vulnerabilidade que, integrados, resultam nas seguintes classes: Extrema Vulnerabilidade, Alta Vulnerabilidade, Moderada Vulnerabilidade, Baixa Vulnerabilidade e Vulnerabilidade Inexistente e, por conseguinte, no mapa de Vulnerabilidade. Este, posteriormente, correlacionado ao mapa de Uso e Ocupação do Solo, possibilitou a elaboração do mapa de Risco à Poluição das Águas Subterrâneas do CIPP.

O mapa da Vulnerabilidade dos Sistemas Hidrogeológicos mostra que 33% (66,5 km<sup>2</sup>) da área são classificadas como de Alta Vulnerabilidade com índices de vulnerabilidade situados no intervalo de 7,8 a 10. Esta classe está localizada na porção norte do CIPP onde ocorre o Sistema Dunas, composta por areias, nível estático freático, sub-aflorante, com uma topografia intermediária (declividades de 12 a 18%) e condutividade hidráulica bastante alta (0,144mm/s a 0,209mm/a).

A área ocupada pelo Ambiente Hidrogeológico Barreiras ocorre em 13% (26,2km<sup>2</sup>), com seus níveis anisotrópicos e heterogêneos tanto vertical quanto lateralmente, possui índices de vulnerabilidade situados entre 3,6 a 6,0, o que o caracteriza como pertencente a classe de Moderada Vulnerabilidade.

O ambiente hidrogeológico Manto de Intemperismo ocorre em 54% da área (108,8 km<sup>2</sup>) e possui índices de vulnerabilidade localizados no intervalo de 1,0 a 3,2, caracterizando-o como pertencente a classe de Baixa Vulnerabilidade.

Observando o mapa de Vulnerabilidade, é seguro se afirmar que a maior parte das áreas destinadas às indústrias (com exceção próxima ao local do Pólo Metal Mecânico), encontram-se em áreas predominantemente inseridas dentro da classe de Moderada Vulnerabilidade. Independente do contaminante considerado, a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP) e Termoelétrica Energias Pecém, situam-se em áreas da classe Alta Vulnerabilidade, necessitando de um monitoramento mais intensivo para se evitar que ocorra a contaminação do aquífero naqueles setores.

As áreas destinadas à Estação Ecológica do Pecém I e II e a área da Área de Proteção Ambiental (APA) do Pecém estão localizadas em terrenos que apresentam Alta Vulnerabilidade, confirmando a escolha sensata destas áreas, haja vista que nas mesmas não deverá ocorrer atividade poluidora.

## 11.2 RECOMENDAÇÕES

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

Determinar a vulnerabilidade de áreas à contaminação por processos industriais auxiliará no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, mas utilizar a classificação de vulnerabilidade com o intuito de verificar a vulnerabilidade da área antes da ocupação para, desta forma, se elaborar planos de prevenção e de recuperação da área para o caso de ocorrer a poluição.

É necessário que os sistemas aquíferos sejam utilizados dentro de uma concepção mais abrangente que além de ser utilizados com unidades produtora de água subterrânea, entenda-se que os Sistemas Dunas e Barreiras têm funções também de estocagem, filtro e hidroambiental, com destaque para o Aquífero Dunas.

Existe a necessidade da realização do cadastro industrial mais detalhado (caracterização e quantificação do tipo de poluente), aprimorando as tomadas de decisão e um seguimento majorado com planejamento de uso e ocupação do solo, além de otimização das ações de monitoramento, proteção e previsão de uso das águas subterrâneas.

A validação da vulnerabilidade à poluição terá que ser inserida no elenco de tomadas de decisão do Conselho Gestor do CIÍP, que deverá ser o responsável pelo planejamento de uso e ocupação do solo, com a outorga de águas e licenciamentos ambientais da Secretaria do Meio Ambiente / Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMA/SEMACE) e da Secretaria dos Recursos Hídricos / Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (SRH/COGERH).

Finalmente, sugere-se que os órgãos de outorga das águas (COGERH) e licenciamento ambiental (SEMACE), deverão analisar o mapa de Vulnerabilidade levando-se em consideração a localização da fonte de poluição, passivos ambientais e captações (subterrâneas e superficiais).

Portanto, se constatado a contaminação do aquífero o órgão fiscalizador (SEMACE ou COGERH) deve tomar as devidas medidas para identificar a Indústria responsável pela contaminação e exigir estudos para implementar a remediação, bem como projeto de caracterização da poluição, direção do fluxo hídrico subterrâneo, velocidade da plumas de contaminação, dentre outros.

O processo de instalação, operação e funcionalidade de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas trata da forma de se obter dados dentro um padrão pré-estabelecido no qual podem ser obtidas as condições do aquífero considerado e, através do monitoramento é que se obtém dados para identificar a evolução de possíveis contaminações dos aquíferos.

## REFERÊNCIAS

ABREU, Lucas Henrique Pedrozo; OLIVEIRA, Carlos Eduardo Santos de; BRANCO, Raimundo Mariano Gomes Castelo; MOTA, Roberto Freitas. Cartografia digital aplicada à vulnerabilidade dos sistemas aquíferos da zona urbana de Fortaleza/CE. In: **Rede Cooperativa Petromar de Meio Ambiente**, Natal, 2006. 92p. 1-20p.

ADAMS, Brian; FOSTER, Stephen. Land-surface zoning for groundwater protection. **Journal Institution of Water and Environmental Management**, v.6, n.4, p.312-319, ago. 1992.

AGÊNCIA BRASIL. **Brasil será o sexto produtor de petróleo em 2035, aponta Graça Foster**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2014-06/brasil-sera-o-sexto-produtor-de-petroleo-em-2035-disse-graca-foster>> Acesso em: 02 mar. 2016.

AGÜERO-VALVERDE, Jonathan; MESALLE, Rosendo Pujol. **Análisis de vulnerabilidad a la contaminacion de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica**. 2002. Disponível em: <[http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa\\_rica/analisis\\_vulnerabilidad/vulnerabilidad.html](http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa_rica/analisis_vulnerabilidad/vulnerabilidad.html)>. Acesso em: 09 out. 2015.

ALBINET, M.; MARGAT, Jean. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. **Bull BRGM**, v.3, n.4, p.58-70, 1970.

ALBUQUERQUE, C.A.S. **Estudo geológico simplificado do perfil litológico dos poços de uma área entre os municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia/CE**. Relatório Técnico, São Gonçalo do Amarante/CE, 2013.

ALLER, Linda; BENNET, Truman; LEHR, Jay H.; PETTY, Rebecce J.; HACKETT, Glen. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. **Journal of the Geological Society of India**, v.29 n.1, jan.1987.

ARTHAUD, Michel Henri; CABY, R.; FUCK, Reinhardt Adolf; DANTAS, Elton Luiz; PARENTE, Clovis Vaz. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. In: PANKHURST, Robert John; TROUW, Rudolph Allard Johannes; BRITO NEVES, Benjamim Bley de; WIT, M.J. de (eds.). **West gondwana**: pre-cenozoic correlations across the South Atlantic Region. London: Geological Society Special Publications, 2008. v.294, p.49-67.

AUGE, Miguel Pedro. **Primer curso de posgrado de hidrogeología ambiental**. Buenos Aires: UBA, 1995.

AUGE, Miguel Pedro. Vulnerabilidade de aquíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**. Curitiba, v.4, p.97-103, 2004.

\_\_\_\_\_. **Vulnerabilidade de aquíferos**: conceptos y métodos. 2003. 35f. Monografía. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, La Plata, 2003.

BENSI, Manuel; MARINHO, Reynaldo Amorim; MAIA, Luis Parente. Clima de ondas e sua implicação com a erosão costeira ao longo do Estado do Ceará. In: **XIV Congresso Brasileiro de Engenharia de Pesca**, 2005, Fortaleza, *Anais...*, out. 2005. p.802-815.

BIANCHI, L.; PADILHA M.W.M.; TEIXEIRA, J.E.M. Recursos de água subterrânea na Região Metropolitana de Fortaleza: fatores condicionantes. In: **CEARÁ. Plano de Aproveitamento dos Recursos Hídricos na RMF. Fase I** SEPLAN/AUMEF, Fortaleza, 1984. V.1. 139p.

BRAGA, Antônio Celso de Oliveira. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v.26, n.1, p.61-68, jan./mar. 2008.

BRAGA, Macelma de Oliveira. **Vulnerabilidade dos sistemas hidrogeológicos da APA de Ponta Grossa, Icapuí, CE**. 2006. 115p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

BRASIL. **Decreto n.º 24.643**, de 10 de julho de 1934. Código de Águas. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/d24643.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643.htm)> Acesso em: 02 mar. 2016.

\_\_\_\_\_. **Portaria n.º 2.914**, 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. Disponível em: <[http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.htm](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.htm)> Acesso em: 02 fev. 2016.

CAMARGO, A. Paes de. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1971. 28p. (Boletim Técnico, 116).

CAMPOS, Luiz Alberto Siqueira; MENEZES, Maria Amélia Souza. Pesquisa e aproveitamento de água subterrânea para abastecimento urbano nas dunas costeiras do Ceará. In: **II Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. ABAS. **Anais**. Salvador/BA, p.29-42, 1982.



CARBONELL, Armando J. **Ground water vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty.** Washington: National Research Council, 1993. 193p.

CARTER, A.D.; PALMER, R.C.; MONKHOUSE, R.A. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agricultural practice particularly with respect to nitrate. In: VAN DUIJVENBOODEN, W.; VAN WAEGENINGH, H.G. (Eds.). **Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutant**, Pennsylvania: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. 1143p. p.333-342.

CASTANY, G. **Prospección y explotación de las aguas subterráneas.** Barcelona: Omega, 1975. 738p.

CASTRO, Antônio Sérgio Farias; MORO, Marcelo Freire; MENEZES, Marcelo Oliveira Teles de. O complexo vegetacional da zona litorânea no Ceará: Pecém, São Gonçalo do Amarante. **Acta Botanica Brasilica**, Feira de Santana, v.26, n.1, p.108-124, jan./mar. 2012.

CAVALCANTE, Itabaraci Nazareno. **Estudo hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo: área piloto de Atibaia.** 1990. 123f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

\_\_\_\_\_. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada de recursos hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará.** 1998. 156p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1998.

CAVALCANTE, Maria Valfrida Ávila. **Caracterização do aquífero costeiro do Pecém-CE com base em dados geofísicos (FEM) e hidrogeológicos.** 2006. 68p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Plano estratégico dos recursos hídricos do Ceará.** Secretaria de Planejamento e Coordenação, Fortaleza: INESP, 1992.

\_\_\_\_\_. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH. **Contrato n.º 018 / COGERH/CE.** Avaliação hidrogeológico quali-quantitativa do campo de dunas do Pecém/Paracuru no Estado do Ceará: atividades desenvolvidas. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/governo-do-estado-do-ceara-secretaria-dos-recursos-hidricos-srh-companhia-de-gestao-dos-recursos-hidricos-cogerh-contrato-n-o-018-2011-cogerh-.html>> Acesso em: 16 ago. 2016.

CEARÁ. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH. **Plano de gerenciamento de águas das bacias metropolitanas**. Relatório de Fase I - Diagnóstico e Estudos Básicos. Tomo I. Fortaleza, 2001. 314p.

\_\_\_\_\_. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos / Secretaria dos Recursos Hídricos. **Avaliação hidrogeológica quali-quantitativa do campo de Dunas Pecém/Paracuru, no Estado do Ceará**. Relatório Final. Fortaleza, 2008. 84p.

\_\_\_\_\_. Secretaria de Infraestrutura - SEINFRA. **Relatório de Impacto Ambiental do Complexo Industrial do Pecém**. Instituto Centro de Ensino Tecnológico. Fortaleza. Biblioteca da Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará, v.01, Tomo B1, Fortaleza, 2009.

\_\_\_\_\_. Secretaria de Infraestrutura – SEINFRA. **Termo de referência para contratação de serviço de elaboração de projetos básicos e executivos de engenharia para implantação de infra-estrutura do Complexo Industrial e Portuário do Pecém – CIPP**, (anexo A). 2008. Disponível em: <<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:pO4mMlymojwJ:licita.seplag.ce.gov.br/pub/102115/...>> Acesso em: 09 out. 2015.

\_\_\_\_\_. Secretaria de Infraestrutura. **Plano de Desenvolvimento do Complexo Industrial e Portuário do Pecém na República Federativa do Brasil**. Fortaleza: JICA/SEPLAN/CEARAPORTOS/CIPP-GTP e SEINFRA, 2006.

\_\_\_\_\_. Secretaria de Recursos Hídricos - SRH/VBA. **Serviços de campo para avaliação do potencial de águas subterrâneas e de lagoas das bacias hidrográficas da Região Metropolitana de Fortaleza**. Relatório Final. Fortaleza, 2001. 81p.

\_\_\_\_\_. Secretaria de Recursos Hídricos – SRH. **Projeto de monitoramento: gestão de águas subterrâneas de micro-áreas estratégicas da Região Metropolitana de Fortaleza**. Relatório de Atividade III – Caracterização de áreas estratégicas, Fortaleza, CD ROM. 2002. 33p.

\_\_\_\_\_. Sistema de Informações para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza. Projeto SINFOR. **Diagnóstico geoambiental e os principais problemas de ocupação do meio físico da Região Metropolitana de Fortaleza**. SER/REFO/CPRM, Fortaleza/CE, 1999. 105p.

\_\_\_\_\_. Superintendência Estadual do Meio Ambiente – SEMACE. **Relatório de Impacto Ambiental – RIMA**. Refinaria Premium II e Dutovia. 2012. Disponível em: <[http://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/2012/06/Publica%C3%A7%C3%A3o\\_RIMA.pdf](http://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/2012/06/Publica%C3%A7%C3%A3o_RIMA.pdf)> Acesso em: 02 mar. 2016.

CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Estado do Ceará – SEMACE. **Zoneamento ecológico econômico do Ceará (Zona Costeira)**. Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Fortaleza, 2006. 150 p.

CIVITA, Máximo. **Le Carte della vulnerabilità degli acquiferi all inquinamento**: teoria e pratica. Bologna: Pitágora, 1994.

CIVITA, Máximo; DE MAIO, Marina. **Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema paramétrico**: SINTACS R5: a new parametric system for the assessment and automatic mapping of groundwater vulnerability to contamination. Bologna: Pitagora, 2000. 226p.

CIVITA, Massimo; FORTI, Paolo; MARINI, P.; MICHELI, L.; PICCINI, Leonardo; PRANZINI, G. **Carta de la vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane. Gruppo Nazionale per la Difesa Delle Catastrofi Idrogeologiche**. Firenze, Monografia GNDCI - CNR, n. 399, 1990. 56 p.

COMITÊ DE FOMENTO INDUSTRIAL DE CAMAÇARI – COFIC. **Ata da reunião do Conselho Comunitário Consultivo**. Camaçari, 2003.

COMPANHIA SIDERÚRGICA DO PECÉM – CSP. **Relatório de Impacto Ambiental – RIMA**. São Gonçalo do Amarante/CE. 2009. Disponível em: <<http://www.semace.ce.gov.br/2012/10/companhia-siderurgica-do-pecem-2/>> Acesso em: 02 mar. 2016.

CONNELL, L.D.; DAELE, Gerd van den. A quantitative approach to aquifer vulnerability mapping. **Journal of Hydrology**, v.276, n.1-4, p.71-88, maio 2003.

CONSELHO DE ALTOS ESTUDOS E ASSUNTOS ESTRATÉGICOS – CAECE (Org.). **Agenda estratégica para o Complexo Industrial e Portuário do Pecém – CIPP**: Pacto do Pecém. Fortaleza: Assembleia Legislativa do Estado do Ceará, 2014. 132p.

COSTA, Fabiane Hilário dos Santos; PETTA, Reinaldo Antônio; LIMA, Raquel Sousa Franco; MEDEIROS, Cleyber Nascimento. Determinação da vulnerabilidade ambiental na bacia potiguar, região de Macau (RN), utilizando Sistemas de Informações Geográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.58, n.2, p.119-127, ago. 2006.

CUNHA, Luciano Soares da. **Determinação da vulnerabilidade intrínseca à poluição e transporte de contaminação**: uma ferramenta para a gestão dos recursos do Porto do Pecém, CE. 2009. 209p. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CUSTÓDIO, Emilio. Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación. In: II Seminario Hispano-Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea, **Anais...** San Miguel de Tucumán, 1995. p.99-122.

DOERFLIGER, Nathalie; ZWAHLEN, François. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: GÜNAY, Gültekin; JONSHON, A.I. (Eds). **International symposium and field seminar on karst waters and environmental**. Turkey, 1997. p.117-123.

EQUIPA DE PROJECTO DO PLANO NACIONAL DA ÁGUA – EPPNA.  
**Informação cartográfica dos planos de bacia**: sistematização das figuras e cartas a imprimir em papel., Lisboa, out.1998. 29 p.

FEITOSA, Fernando Antônio Carneiro; MANOEL FILHO, João; FEITOSA, Edilson de Castro; DEMETRIO, José Geilson Alves. (Ed.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM/ LABHIDRO, 2008. 812p.

FENZL, Norbert. Processos Geoquímicos que determinam a composição química das águas naturais. In: FENZL, Norbert; RAMOS, José Francisco. (Org.). **Introdução à hidrogeoquímica**. Belém: Universidade Federal do Pará, 1988. Cap. 02. p. 33-46.

FOSTER, Stephen. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: VAN DUIJVANBOODEN, W.; VAN WAEGENINGH, H.G. (eds.). **Vulnerability of soil and groundwater to pollution**. n.º 38 Noordwijk: Proceedings and Information of the International Conference held in the Netherlands, TNO Committee on Hydrological Research Delft. The Netherlands, 1987. P.69-86.

FOSTER, Stephen; HIRATA, Ricardo César Aoki. **Groundwater pollution risk evaluation**: the methodology using available data. Lima: WHO / PAHO / HPE / CEPIS, 1987. 87p.

\_\_\_\_\_. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas**: um método baseado em dados existentes. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. (Boletim N° 10).

\_\_\_\_\_. **Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterrâneas**: método de reconocimiento basado en datos existentes. Lima: CEPIS-OPS, 1988. 84p.

\_\_\_\_\_. **Groundwater pollution risk assessment**: a methodology using available data. Lima: CEPIS/PAHO/WHO. 1998. 87p.

FOSTER, Stephen; HIRATA, Ricardo César Aoki; GOMES, Daniel; D'ELIA, Mônica; PARIS, Marta. **Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies.** Groundwater Management Advisory Team (GW-MATE). Washington: The World Bank, 2002. 101p.

\_\_\_\_\_. **Proteção da qualidade da água subterrânea:** um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências municipais. São Paulo: SERVIMAR, 2002. 114p.

\_\_\_\_\_. **Proteção da qualidade da água subterrânea:** um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências municipais. São Paulo: Servemar, 2006.

FRANCÉS, Alain Pascal; PARALTA, Eduardo; FERNANDES, J.; RIBEIRO, Luís Fernando. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution: the susceptibility index. In: **3 rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk**, IAH/Unesco, 9 p., Lisbon, 2001.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - FUNCEME, 2013. **Série histórica do Posto São Gonçalo do Amarante.** Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/areas/tempo/download-de-series-historicas>>. Acesso em: 09 out. 2015.

HARGERTY, Joseph D.; PAVONI, Joseph L.; HEER, John E. **Solid water management.** New York, 1973.

HIRATA, Ricardo César Aoki. Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquífero. In: **I Seminário-Taller. Protección de Acuíferos Frente a la Contaminación:** metodologia. Toluca, México, 2001.

LE GRAND, Harry E. **A standardized system for evaluating waste disposal sites.** Ohio, USA: NWT, Worthington, 1983. 49p.

\_\_\_\_\_. System for evaluating contamination potential of some waste disposal sites. **Journal American Water Work Association**, v.56, n.8, p.959-974, ago. 1964.

LEITÃO, Tereza E.; OLIVEIRA, Manuel M.; MOINANTE, Maria João. Poluição de águas subterrâneas: principais problemas, processos de prevenção e de reabilitação. In: SILUSBA – **Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa.** Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Cabo Verde, 2003.

LEITE, Carlos Eduardo Sobreira; MÖBUS, Gilberto. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da região de rochas sedimentares da bacia do Rio Mundaú/Ceará. In: X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, **Anais...** São Paulo: Revista Águas Subterrâneas (Suplemento). 1998. 8p.

LIMA, Olivar Antônio Lima de. **Avaliação da hidrologia subterrânea e da contaminação de aquíferos na Região Metropolitana de Salvador.** Salvador: Proposta de projeto de pesquisa no âmbito do CNPq, CT-Hidro, 2001. [mimeo].

LOAGUE, Keith. Regional scale ground-water vulnerability estimates: impact of reducing data uncertainties for assessments in Hawaii. **Ground Water**, v.32, n.4, p.605-616, jul. 1994.

LOBO-FERREIRA, João Paulo C.; CABRAL, M. *Proposal for an operational definition of vulnerability for the European Community's Atlas of groundwater resources, in meeting of the European Institute for Water.* Groundwater Work Group Brussels, Feb. 1991.

LOUSADA, Enéas Oliveira. **Avaliação hidrogeológica quali-quantitativa dos campos de dunas de Pecém/Paracuru, no estado do Ceará.** Relatório Final. Secretaria dos Recursos Hídricos/Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, Fortaleza. 2011. 85p.

MAIA, Paulo Henrique Prates. **Um novo método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos.** 2011. 132f. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

MAJOR, Islván; SALES JR., Luís Gonzaga; CASTRO, Rodrigo. **Aves da caatinga.** Fortaleza: Fundação Demócrito Rocha, 2004. 249p.

MARINHO, José Márcio Lins; VASCONCELOS, Sônia Maria Silva. Estudos geoeletricos e hidrogeológicos da zona costeira da bacia do Rio Cauípe, Caucaia, Ceará, Brasil. In: **Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas.** *Anais...* Fortaleza, 2000. 19p.

MELO JÚNIOR, Homero Reis. Método Drastic: uma proposta de escala para normatização dos índices finais de vulnerabilidade. In: **XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas,** São Paulo, 2008.

MONKHOUSE, R. A. **Vulnerability of aquifers and groundwater quality in the United Kingdom.** Nottingham, Reino Unido: Institute of Geological Sciences Report, 1983.

MORAIS, João Bosco Andrade de. **Fundamentos hidrogeológicos do aquífero Dunas para a gestão dos recursos hídricos da Região Metropolitana de Fortaleza/Ceará**. 2011. 96p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MOURA, Pamella. **Vulnerabilidade de aquíferos**: uso dos métodos DRASTIC e GOD na porção norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará. 2014. 128f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC. **Groundwater vulnerability assessment**: contamination potential under conditions of uncertainty. Washington, D.C: National Academy Press, 1993.

NOBRE, Rosane Cunha Maia. **Avaliação de risco para o uso e proteção de aquíferos**: estudo de caso: Região Metropolitana de Maceió/AL. 2006. 296f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

NOGUEIRA, Mary Lucia; AUGUSTO, Vagney Aparecido. **Reconhecimento de áreas mais susceptíveis a contaminação por hidrocarbonetos através da caracterização geológica e hidrogeológica zona portuária do Pecém/CE**. 2004. 91p. Relatório (Graduação em Geologia). Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

NOGUEIRA, Mary Lucia; AUGUSTO, Vagney Aparecido; CASTELO BRANCO, Raimundo Mariano Gomes; CASTRO, David Lopes de. Caracterização geoambiental e hidrogeológica da zona portuária do Pecém/CE. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v.18, n.2, p.203-213, 2005.

PARALTA, Eduardo A.; OLIVEIRA, Manuel M., BATISTA, Sofia B.; FRANCÉS, Alain Pascal; RIBEIRO, Luís Fernando; CEREJEIRA, Maria J. Aplicação de SIG na avaliação da vulnerabilidade aquífera e cartografia da contaminação agrícola por pesticidas e nitratos na região do Ribatejo. In: **Seminário “A Hidroinformática em Portugal”**, LNEC, 16 p., Lisboa, 2001.

PEARCE, David W.; WARFORD, Jeremy J. **World without end**: economics, environment, and sustainable development. Oxford University Press, Oxford, 1993. 440p.

PEREIRA, Antônio Roberto; VILLA NOVA, Nilson Augusto; SEDIYAMA, Gilberto C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz - FEALQ, 1997. 183p.

POHLING, R.; SANTIAGO, Maria Marlúcia Freitas; TORQUATO, Joaquim Raul Ferreira. Estudo da qualidade da água de Fortaleza. In: POHLING, R (Org). **Estudos hidrogeológicos do nordeste**. Série: monografias. Fortaleza: BNB, 1981. v.3, p.7-72.

POLZ, James Alexandre. Recuperação de áreas impactadas pela mineração de carvão a céu aberto em Santa Catarina: gestão de rejeitos e revegetação. In: SOARES, Paulo S. Moreira; SANTOS, Maria Dionísia Costa dos/ POSSA, Mário Valente. **Carvão brasileiro: tecnologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 300p. p.75-92;

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

REBOUÇAS, Anon C. Groundwater use and protection in Petrochemical Complex Region, Camaçari, Bahia, Brazil. **Water Science et Technology**, v.24, n.12, p.141-150, dez. 1991.

RUSSO, Alexandre de Silvio. **Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informações geográficas e geoestatística – UGRHI / PCJ**. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANTOS, Almany Costa. Noções de Hidroquímica. In: FEITOSA, Edilton Carneiro; MANOEL FILHO, João. (Org.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM e LABHID, 2008. cap. 5, p 325-357.

\_\_\_\_\_. Noções de hidroquímica. In: FEITOSA, Edilton Carneiro; MANOEL FILHO, João. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 2.ed. Fortaleza: CPRM - REFO. 2000. cap. 5, p. 81-108. 391p.

SELLER, L.; CANTER, L. **Summary of selected groundwater quality impact assessment methods**. NCGWR Report. 80-3, Norman Oklahoma, 1980. 142 p.

SOUSA, Rafael Rolim de. **Estudo comparativo entre métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero, aplicado na porção oriental da bacia sedimentar do Parnaíba no município de Tianguá-Ceará**. 2016. 137f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Pós-Graduação em Hidrogeologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 2016.



SOUTTER, Marc; MUSY, André. Coupling 1D Monte-Carlo simulations and geostatistics to assess groundwater vulnerability to pesticide contamination on a regional scale. **Journal of Contaminant Hydrology**, v.32, n.1-2, p.25-39, jul. 1998.

SUGUIO, Kenitiro. **Rochas sedimentares**: propriedades, gênese e importância econômica. São Paulo: Edgard Blücher / EDUSP, 1980. 500p.

TALTASSE, P. **Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP)**. São Paulo: USP / Instituto de Geociências, 1972.

TAVARES, Paulo Roberto Lacerda; SILVEIRA, José das Graças Procópio da; CASTRO, Marco Aurélio Holanda de; ALMEIDA JÚNIOR, Francisco Jocélio Bezerra de. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.62, n.2, p.227-236, abr./jun. 2009.

VALE, Vagner Santiago do. **Padrões e processos ecológicos do componente arbóreo em uma área de Floresta Estacional Semidecidual (Araguari, MG)**. 2008. 102p. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

VAN STEMPOORT, Dale; EWERT, Lee; WASSENAAR, Leonard. Aquifer Vulnerability Index (AVI): a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. **Canadian Water Resources Journal**, v.18, n.1, p.25-37, jan. 1993.

VASCONCELOS, Sônia Maria Silva. Estimativa da recarga subterrânea a partir do balanço hídrico: exemplo de Fortaleza (CE). **Revista de Geologia**, Fortaleza, v.7, p.27-34, 1996.

VIANA, Nirlando de Oliveira. **Vulnerabilidade e risco à poluição do sistema aquífero médio**: entre o Crato e Missão Velha, Bacia do Araripe, Ceará. 2007. 132f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur. **Hidrologia aplicada**. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1975. 96p.

VRBA, Jaroslav; ZAPOROZEC, Alexander. **Guidebook on mapping groundwater vulnerability**. Hannover: Heinz Heise, 1994. 156p.

## LISTA DE APÊNDICES E ANEXOS

### - Apêndices

Apêndice I – Cadastro de Poços

Apêndice II – Análises Laboratoriais com Classificação do Tipo de Água

Apêndice III – Mapa de Zoneamento de Profundidade de Poços

Apêndice IV – Mapa de Zoneamento de Vazão

Apêndice V – Mapa de Zoneamento de Nível Estático

Apêndice VI – Mapa de Sistemas Hidrogeológicos e Distribuição de Poços

Apêndice VII – Mapa de Fluxo de Águas Subterrâneas

Apêndice VIII – Mapa de Zoneamento de Cloretos

Apêndice IX – Mapa de Zoneamento de Dureza Total

Apêndice X – Mapa de Zoneamento de Ferro Total

Apêndice XI – Mapa de Zoneamento de Nitrato

Apêndice XII – Mapa de Zoneamento de pH

Apêndice XIII – Mapa de Zoneamento de STD

Apêndice XIV – Mapa de Vulnerabilidade dos Sistemas Hidrogeológicos

Apêndice XV – Mapa de Risco das Águas Subterrâneas

Apêndice XVI – Mapa de Zoneamento de Transmissibilidade

Apêndice XVII – Mapa de Zoneamento de Granulometria

Apêndice XVIII – Mapa de Zoneamento de Condutividade Hidráulica

Apêndice XIX – Mapa de Ambientes Hidrogeológicos

Apêndice XX – Mapa Geológico

### - Anexos

Anexo I – Mapa Planialtimétrico

Anexo II – Mapa de Solos

Anexo III – Mapa de Uso e Ocupação de Solo

Anexo IV – Mapa Pluviométrico

### APÊNDICE I - Cadastro de Poços.

## APÊNDICE I - CADASTRO DE POÇOS

PONTO	LATITUDE	LONGITUDE	PROF. (m)	NE (m)	ENDEREÇO ou MORADOR	MUNICÍPIO	TIPO	VAZÃO(m³/h)	USO	DATA
BM1	519996	9600657	9,3	8,63	CE-421	Caucaia	Cacimba	-	Doméstico	FEVEREIRO 2013
BM2	520026	9600894	12	10,2	CE-421	Caucaia	Cacimba	-	Doméstico	FEVEREIRO 2013
BM3	520150	9602732	6	6,11	Rua Paulo Ferreira da Rocha, 483	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	FEVEREIRO 2013
BM4	516645	9607182	10	4,31	Rua Demésio Prata - Colonia Pecém	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	FEVEREIRO 2013
BM5	511457	9602712	9	3,36	Acende Candeia - Chácara Vovo Barroso	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Irrigação/Doméstico	-
BM6	519032	9591030	60	4,8	Fazenda Fazendinha	Caucaia	-	1,06	-	-
BM7	520300	9602800	60	7	Matões	Caucaia	-	2,2	-	-
BM8	520067	9597501	50	9,1	Mixira	Caucaia	-	8,00	-	-
BM9	517500	9590300	50	8	Posto Fiscal BR 222 KM 22	Caucaia	-	4,80	-	-
BM10	519050	9591100	40	18	Primavera	Caucaia	-	4,50	-	-
BM11	517463	9598627	60	11,3	Tapuio	Caucaia	-	2,50	-	-
BM12	521192	9596249	67	6	Pitombeira II	Caucaia	-	0,5	-	-
BM13	510797	9600304	60	6	Acende Candeia	São Gonçalo do Amarante	-	0,9	-	-
BM14	519528	9605737	50	3,5	Pecem	Caucaia	-	2,3	-	-
BM15	520300	9602800	60	7	Matões	Caucaia	-	36	-	-
BM16	511105	9599045	37	5,5	Fazenda Pau Branco	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	0,3	Doméstico	-
BM17	509736	9592692	41	16	Catuana	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	-
BM18	509778	9592843	42	7,2	Associação dos moradores de Catuana	Caucaia	Poço tubular	13,65	Doméstico	-
BM19	519528	9605737	50	3,5	Pecem	Caucaia	Poço tubular	2,3	Doméstico	-
BM20	512456	9607231		1,12	-	São Gonçalo do Amarante	-	5,00	-	JULHO 2011
BM21	511650	9603867		2,77	-	São Gonçalo do Amarante	-	5,40	-	JULHO 2011
BM22	512288	9605392		1,18	-	São Gonçalo do Amarante	-	4,80	-	JULHO 2011
BM23	513035	9605776		2,15	-	São Gonçalo do Amarante	-	4,80	-	JULHO 2011
BM24	512504	9606057		1,15	-	São Gonçalo do Amarante	-	4,70	-	JULHO 2011
BM25	513125	9606359		3,93	-	São Gonçalo do Amarante	-	4,70	-	JULHO 2011
BM26	513330	9606903		0,91	-	São Gonçalo do Amarante	-	5,40	-	JULHO 2011
BM27	514521	9607116		0,89	-	São Gonçalo do Amarante	-	3,40	-	JULHO 2011

APÊNDICE I - CADASTRO DE POÇOS TESE.xlsx - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir O que você deseja fazer... Entrar Compartilhar

Calibri 11 A A Quebrar Texto Automaticamente Geral

N I S Mesclar e Centralizar

Formatar Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula

Inserir Excluir Formatar

Classificar e Filtrar Localizar e Selecionar Edição

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
28	BM26	513330	9606903		0,91	-	São Gonçalo do Amarante	-	5,40	-	JULHO 2011
29	BM27	514521	9607116		0,89	-	São Gonçalo do Amarante	-	3,40	-	JULHO 2011
30	BM28	514483	9607589		2,99	-	São Gonçalo do Amarante	-	4,00	-	JULHO 2011
31	BM29	513975	9607704		0,9	-	São Gonçalo do Amarante	-	4,80	-	JULHO 2011
32	BM30	513232	9607703		1,21	-	São Gonçalo do Amarante	-	5,40	-	JULHO 2011
33	BM31	520164	9603004		2,07	-	Caucaia	-	20,50	-	JULHO 2011
34	BM32	520804	9602948		4,17	-	Caucaia	-	20,50	-	JULHO 2011
35	BM33	519134	9602324		1,08	-	Caucaia	-	20,20	-	JULHO 2011
36	BM34	519273	9603912		1,68	-	Caucaia	-	20,40	-	JULHO 2011
37	BM35	519550	9603325		2,64	-	Caucaia	-	20,50	-	JULHO 2011
38	BM36	518831	9604282		6,17	-	Caucaia	-	20,20	-	JULHO 2011
39	BM37	519106	9604790		1,25	-	Caucaia	-	19,50	-	JULHO 2011
40	BM38	518729	9607586		3,94	-	São Gonçalo do Amarante	-	19,50	-	JULHO 2011
41	BM39	518528	9607962		0,43	-	São Gonçalo do Amarante	-	13,10	-	JULHO 2011
42	BM40	516704	9607163		2,4	-	São Gonçalo do Amarante	-	8,20	-	JULHO 2011
43	BM41	516207	9607623		7,55	-	São Gonçalo do Amarante	-	6,40	-	JULHO 2011
44	BM42	516217	9606709		5,21	-	São Gonçalo do Amarante	-	6,90	-	JULHO 2011
45	BM43	515895	9606312		2,05	-	São Gonçalo do Amarante	-	6,40	-	JULHO 2011
46	BM44	516399	9608540		1,51	-	São Gonçalo do Amarante	-	8,10	-	JULHO 2011
47	BM45	515179	9607193		0,74	-	São Gonçalo do Amarante	-	3,00	-	JULHO 2011
48	BM46	517262	9608200		0,87	-	São Gonçalo do Amarante	-	10,00	-	JULHO 2011
49	BM47	517394	9607206		0,28	-	São Gonçalo do Amarante	-	10,70	-	JULHO 2011
50	BM48	517952	9606317		6,6	-	São Gonçalo do Amarante	-	5,20	-	JULHO 2011
51	BM49	519568	9606688		1,69	-	São Gonçalo do Amarante	-	16,50	-	JULHO 2011
52	BM50	519337	9605643		0,66	-	Caucaia	-	18,00	-	JULHO 2011
53	BM51	511080	9600034	60	4,00	Anil	São Gonçalo do Amarante	-	-	-	-
54	BM52	509778	9592813	42	7,20	Catuana - Associação de Moradores (Atrás da Igreja	Caucaia	-	-	-	-
55	BM53	515669	9595625	60,00	37,00	Sentido 222 (CTTC) Pecem - CE 422 KM 46	Caucaia	-	-	-	-
56	BM54	520358	9600406	58,00	46,00	Matões / Mãe Rainha - Rua C n°1101 Parque Pecem	Caucaia	-	-	-	-
57	BM55	519128	9607847		2,0	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	8,80	Doméstico	NOVEMBRO 2014
58	BM56	517927	9606279		13,1	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014

Plan1 Plan2 Plan3

Pronto 70%

17:31 13/08/2016

APÊNDICE I - CADASTRO DE POÇOS TESE.xlsx - Excel

Arquivo | Página Inicial | Inserir | Layout da Página | Fórmulas | Dados | Revisão | Exibir | O que você deseja fazer... | Entrar | Compartilhar

Colar | Arial 12 | Quebrar Texto Automaticamente | Geral | Formatação Condicional | Formatar como Tabela | Estilos de Célula | Inserir | Excluir | Formatar | Classificar e Filtrar | Localizar e Selecionar

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
58	BM56	517927	9606279		13,1	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
59	BM57	517608	9606841		4,7	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
60	BM58	516146	9606586	6	0,7	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
61	BM59	515209	9606516	6	3,3	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
62	BM60	514358	9606940	6	2,4	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
63	BM61	513551	9607161		3,5	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
64	BM62	513384	9607184		3,4	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
65	BM63	513233	9607188		1,7	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
66	BM64	513009	9607125		2,5	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
67	BM65	512783	9607165		2,9	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
68	BM66	512738	9607194		2,9	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
69	BM67	512424	9607196		3,9	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
70	BM68	512503	9606994		3,6	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
71	BM69	512304	9606620	12	4,6	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
72	BM70	512451	9606766		5,2	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
73	BM71	512605	9606815	6	4,3	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
74	BM72	512842	9606869		3,0	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
75	BM73	513067	9606756	6	3,5	Parada (sul)	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
76	BM74	512881	9606603		7,3	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
77	BM75	512832	9606464		5,9	Parada	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
78	BM76	512406	9606197	8	5,3	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
79	BM77	512562	9605655		3,4	Parada(prox. Jardim botânico)	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Irrigação	NOVEMBRO 2014
80	BM78	512264	9605267	9	4,0	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
81	BM79	518577	9604250		7,9	-	Caucaia	Cacimba	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
82	BM80	518955	9604838	15	6,2	-	Caucaia	Poço tubular	-	Irrigação	NOVEMBRO 2014
83	BM81	519791	9602554	6	1,5	-	Caucaia	Cacimba	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
84	BM82	519705	9602681		5,7	-	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
85	BM83	519650	9602883	10	2,0	-	Caucaia	Cacimba	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
86	BM84	519536	9602576		2,5	-	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
87	BM85	516410	9602738	80	10,9	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	-	NOVEMBRO 2014
88	BM86	516380	9602618	80	8,5	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	2,81	-	NOVEMBRO 2014

Plan1 | Plan2 | Plan3

Pronto | 70%

17:35 13/08/2016

APÊNDICE I - CADASTRO DE POÇOS TESE.xlsx - Excel

Arquivo | Página Inicial | Inserir | Layout da Página | Fórmulas | Dados | Revisão | Exibir | O que você deseja fazer... | Entrar | Compartilhar

Colar | Arial | 12 | A A | Quebrar Texto Automaticamente | Geral | Formatação Condicional | Estilos de Tabela | Estilos de Célula | Inserir | Excluir | Formatar | Classificar e Filtrar | Localizar e Selecionar | Edição

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
88	BM86	516380	9602618	80	8,5	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	2,81	-	NOVEMBRO 2014
89	BM87	513582	9603386	72	10,0	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	2,81	-	NOVEMBRO 2014
90	BM88	513582	9603386	60	8,0	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	7,20	-	NOVEMBRO 2014
91	BM89	514026	9603501	60	10,0	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	7,20	-	NOVEMBRO 2014
92	BM90	514170	9603573	72	10,0	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	6,00	-	NOVEMBRO 2014
93	BM91	514157	9603501	60	9,5	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	1,60	-	NOVEMBRO 2014
94	BM92	514170	9603573	60	8,0	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	6,00	-	NOVEMBRO 2014
95	BM93	514026	9603501	60	6,0	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	1,10	-	NOVEMBRO 2014
96	BM94	514019	9603462	64	6,0	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	1,50	-	NOVEMBRO 2014
97	BM95	513261	9603041	55	4,0	Pecem	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	2,80	-	NOVEMBRO 2014
98	BM96	511538	9603221	-	4,5	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	1,40	-	NOVEMBRO 2014
99	BM97	511457	9602712	9	2,7	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Irrigação	NOVEMBRO 2014
100	BM98	515000	9601013	-	2,3	-	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Irrigação	NOVEMBRO 2014
101	BM99	516705	9601249	6	2,3	-	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
102	BM100	516484	9600391	7	5,6	-	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
103	BM101	520062	9601074	60	7,7	-	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
104	BM102	520026	9600894	13	10,8	-	Caucaia	Cacimba	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
105	BM103	519996	9600657	-	9,4	-	Caucaia	Cacimba	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
106	BM104	520101	9507505	18	11	-	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	NOVEMBRO 2014
107	BM105	519825	9603061	10	7,5	Sra. Maria Iraci	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	MARÇO 2015
108	BM106	519176	9604395	11,2	9,3	Sra. Raimundo Saraiva	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	MARÇO 2015
109	BM107	518750	9607106	-	10,2	SINTEPAV(Sindicato)	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	MARÇO 2015
110	BM108	519169	9607872	-	3	rest. Delicias do Porto	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Não usa	MARÇO 2015
111	BM109	516957	9607461	-	9,15	Vila do Porto	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	MARÇO 2015
112	BM110	517292	9607627	8	2,15	Vila do Porto	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	MARÇO 2015
113	BM111	516938	9607207	25	4,3	Vila do Porto	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	MARÇO 2015
114	BM112	516905	9607877	-	4,7	Flávia	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	MARÇO 2015
115	BM113	516609	9608346	-	1,5	Adriana	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Doméstico	MARÇO 2015
116	BM114	515443	9600955	-	10,5	Maria Laureci	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Doméstico	MARÇO 2015
117	BM115	516095	9597120	60	2,7	Hydrostec	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	MARÇO 2015
118	BM116	509680	9592732	-	5,6	-	Caucaia	Poço tubular	-	Abastecimento à comunidade	MARÇO 2015

Plan1 | Plan2 | Plan3

Pronto | 70%

17:36 | 13/08/2016

APÊNDICE I - CADASTRO DE POÇOS TESE.xlsx - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir O que você deseja fazer... Entrar Compartilhar

Colar Arial 12 Quebrar Texto Automaticamente Geral

Fonte Alinhamento Número Estilo Células Edição

A59 BM57

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
118	BM116	509680	9592732	-	5,6	-	Caucaia	Poço tubular	-	Abastecimento à comunidade	MARÇO 2015
119	BM117	509591	9592750	-	4,9	-	Caucaia	Poço tubular	-	-	MARÇO 2015
120	BM118	510035	9594078	60	12,1	Josimar	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	MARÇO 2015
121	BM119	511059	9599252	12	2,5	Maria Zulia	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Doméstico	MARÇO 2015
122	BM120	514271	9606798	9	5	Rest. D. Mira	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	MARÇO 2015
123	BM121	514845	9607018	-	6	Esc. Gertrude Prata Lima	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Doméstico	MARÇO 2015
124	BM122	520606	9592542	-	1,1	Esc. M. Gomes Brasileria	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Doméstico	MARÇO 2015
125	BM123	520064	9599183	5	1,45	Lca. Matões - Ana Maria	Caucaia	Cacimba	-	Doméstico	JULHO 2015
126	BM124	520054	9599249	6	3,28	Lca. Matões - Ant. Mendes	Caucaia	Cacimba	-	Doméstico	JULHO 2015
127	BM125	520604	9599029	2,5	0,95	Lca. Matões - Ant. Cicero	Caucaia	Cacimba	-	Doméstico	JULHO 2015
128	BM126	520299	9601326	11	8,9	Lca. Matões - Teresa	Caucaia	Poço tubular	-	-	JULHO 2015
129	BM127	520249	9602276	8,5	6,8	-	Caucaia	Cacimba	-	Irrigação/Doméstico	JULHO 2015
130	BM128	519855	9603052	9	6,9	Lca. Matões Ana Maria	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	JULHO 2015
131	BM129	519539	9604282	36	9	Baixa das Carnaubas- Inácio	Caucaia	Poço tubular	-	Não usa	JULHO 2015
132	BM130	512726	9591383	60	35	Loc. Flores - Joseli	Caucaia	Poço tubular	-	Abastecimento à comunidade	JULHO 2015
133	BM131	510458	9597017	-	30	Anil - CE 156- Sr. Antônio	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	JULHO 2015
134	BM132	511256	9602239	6	1	Maria Alba	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Doméstico	JULHO 2015
135	BM133	519682	9593899	72	62	Loc. São Bento. Poço da Pref. De Caucaia	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	JULHO 2015
136	BM134	521007	9594152	60	20	Pedra Branca. Poço da Prefeitura de Caucaia	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	JULHO 2015
137	BM135	520866	9595725	68	40	Posto Landim Combustível	Caucaia	Poço tubular	-	Doméstico	JULHO 2015
138	BM136	516657	9594872	100	7	Fazenda Olho D'agua. Ao lado à APODI	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Não usa	JULHO 2015
139	BM137	514998	9600940	15	1	Local Bolso. Restaurante Canto do Cará	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Doméstico	JULHO 2015
140	BM138	516043	9600137	42	15	Localidade Bolso. RP Premoldados	São Gonçalo do Amarante	Poço tubular	-	Doméstico	JULHO 2015
141	BM139	514663	9599692	10	3	Lagoa Seca.	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Doméstico	JULHO 2015
142	BM140	514404	9599616	5	2,5	Lagoa Seca.	São Gonçalo do Amarante	Cacimba	-	Doméstico	JULHO 2015
143	BM141	521519	9597300	6	2	Pitombeiras	caucaia	Cacimba	-	limpeza	AGOSTO 2015
144	BM142	521470	9597218	-	1	Planalto Cauipe	caucaia	Cacimba	-	para construção	AGOSTO 2015
145	BM143	520820	9597780	60	1,5	Planalto Cauipe	caucaia	poço	-	Para tudo, - beber	AGOSTO 2015
146	BM144	520366	9597723	70	8	Planalto Cauipe	caucaia	poço	-	Para tudo, - beber	AGOSTO 2015
147	BM145	520705	9602593	9	3,5	Lagoa Amarela	caucaia	poço	-	-	AGOSTO 2015
148	BM146	520984	9602622	12	5	Lagoa Amarela	caucaia	poço	-	-	AGOSTO 2015

Plan1 Plan2 Plan3

Pronto 70%

17:37 13/08/2016

APÊNDICE I - CADASTRO DE POÇOS

APÊNDICE I - CADASTRO DE POÇOS TESE.xlsx - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir O que você deseja fazer... Entrar Compartilhar

Colar Arial 12 Quebrar Texto Automaticamente Geral

Área de Tran... Fonte Alinhamento Número Formatação Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula Inserir Excluir Formatar Células Classificar e Filtrar Localizar e Selecionar Edição

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
145	BM143	520820	9597760	60	1,5	Planalto Cauipe	caucaia	poço	-	Para tudo, - beber	AGOSTO 2015
146	BM144	520366	9597723	70	8	Planalto Cauipe	caucaia	poço	-	Para tudo, - beber	AGOSTO 2015
147	BM145	520705	9602593	9	3,5	Lagoa Amarela	caucaia	poço	-		AGOSTO 2015
148	BM146	520984	9602622	12	5	Lagoa Amarela	caucaia	poço	-		AGOSTO 2015
149	BM147	522133	9602364	11	6	Lagoa Amarela	caucaia	poço	-	Doméstico, beber e agricultura	AGOSTO 2015
150	BM148	516358	9596290	6,5	4,6	Votorantim cimentos AS	Caucaia	Cacimba	15,60	-	NOVEMBRO 2012
151	BM149	516109	9602518	70	3,9	Tortuga Companhia Zootécnica e Agrária	São Gonçalo do Amarante	poço	2,00	-	OUTUBRO 2010
152	BM150	515844	9603024	59	3,1	Companhia Siderurgica do Pecém	São Gonçalo do Amarante	poço	3,60	-	JULHO 2010
153	BM151	520359	9602774	7	2,54	Leda Maria bezerra de Sousa - ME - Matões	Caucaia	poço	12,00	-	JANEIRO 2013
154	BM152	520364	9602762	7	2,62	Leda Maria bezerra de Sousa - ME - Matões	Caucaia	poço	12,00	-	JANEIRO 2013
155	BM153	520337	9602910	9,15	3,36	Leda Maria bezerra de Sousa - ME - Matões	Caucaia	poço	12,00	-	JANEIRO 2013
156	BM154	516380	9602618	80	9,4	Tortuga Companhia Zootécnica e Agrária	Caucaia	poço	-	-	NOVEMBRO 2010
157	BM155	516410	9602738	80	10,9	Tortuga Companhia Zootécnica e Agrária	Caucaia	poço	1,50	-	MAIO 2010
158	BM156	516332	9602501	61	3,24	Tortuga Companhia Zootécnica e Agrária	São Gonçalo do Amarante	poço	5,00	-	DEZEMBRO 2008
159	BM157	511071	9609917		3,00	SIUPE	São Gonçalo do Amarante	poço		21	-
160	BM158	511139	9609906		3,00	SIUPE	São Gonçalo do Amarante	poço		20	-
161	BM159	511097	9609926		10,00	SIUPE	São Gonçalo do Amarante	poço		23	-
162	BM160	511156	9609894		16,00	SIUPE	São Gonçalo do Amarante	poço		34	-
163	BM161	511129	9609845		18,00	SIUPE	São Gonçalo do Amarante	poço		33	-
164	BM162	511099	9609902		18,00	SIUPE	São Gonçalo do Amarante	poço		32	-
165	BM163	521054	9607103	17	3	Pecém	São Gonçalo do Amarante	poço	2,2	-	-
166	BM164	521043	9607132	25	3,5	Pecém	São Gonçalo do Amarante	poço	2,1	-	-
167	BM165	521082	9607104	17	3	Pecém	São Gonçalo do Amarante	poço	2	-	-
168	BM166	521130	9607200	19	4,5	Pecém	São Gonçalo do Amarante	poço	1,9	-	-
169	BM167	521167	9607193	16	4	Pecém	São Gonçalo do Amarante	poço	2,3	-	-
170											
171											
172											
173											
174											
175											
176											

Plan1 Plan2 Plan3

Pronto 70%

17:47 13/08/2016



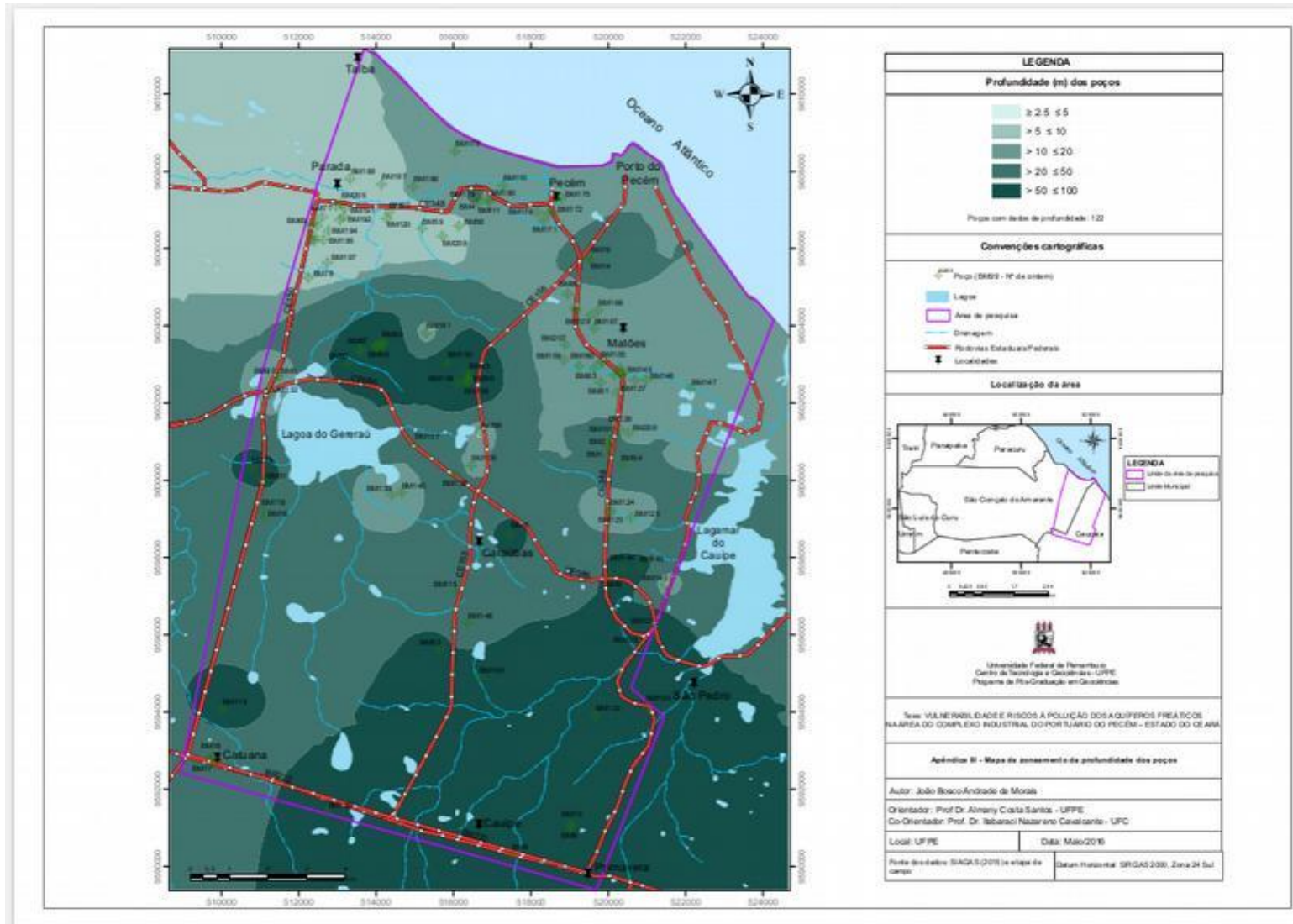
## APÊNDICE II - Análises Laboratoriais com Classificação do Tipo de Água.

APÊNDICE II - Resultados de Laboratorio															
REFERENCIA DA PORTARIA 2914, DE 12/12/2011 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE															
COORDENADAS (LONG./LAT.)	CÓDIGO LABORATÓRIO	NATUREZA	Localidade/Morador	Cor UH <sup>†</sup>	Sabor**	Odor**	Alc. Em Bicarbonato mg CaCO <sub>3</sub> /L	Alc. Carbonatos mg CaCO <sub>3</sub> /L	Alc. Hidroxidos mg CaCO <sub>3</sub> /L	Alcalinidade Total mg CaCO <sub>3</sub> /L	Cálcio mg Ca <sup>2+</sup> /L	Cloreto mg Cl/L	Condutividade Elétrica m/cm	CO <sub>2</sub> Livre mg CO <sub>2</sub> /L	
520606	9592542	15070848	POÇO	Col. Mª Gomes Brasileiro	<1,0	Não Objetável	Não Objetável	86,23	0,00	0,00	86,23	26,13	70,49	0,51	78,00
519682	9593899	15070849	POÇO	Com. São Bento	<1,0	Salobre	Não Objetável	542,89	0,00	0,00	542,89	170,82	2123,76	6,19	>100
521007	9594152	15070850	POÇO	Com. Pedra Branca	<1,0	Salobre	Não Objetável	149,43	0,00	0,00	149,43	87,53	1584,01	4,46	>100
520866	9595725	15070851	POÇO	Posto Landim Combustivel	<1,0	Salobre	Não Objetável	335,76	0,00	0,00	335,76	111,74	3216,36	9,41	>100
514998	9600940	15070852	POÇO	Bolso	<1,0	Não Objetável	Não Objetável	70,74	0,00	0,00	70,74	23,08	166,15	0,84	>100
516043	9600137	15070853	POÇO	Bolso	<1,0	Não Objetável	Não Objetável	23,44	0,00	0,00	23,44	0,08	18,63	0,14	>100
514663	9599692	15070854	POÇO	Lagoa Seca	95,00	Não Objetável	Não Objetável	59,32	0,00	0,00	59,32	12,34	35,34	0,28	>100
516657	9594872	15070855	POÇO	Faz. Olho D'água	35,00	Salobre	Não Objetável	317,82	0,00	0,00	317,82	112,46	1187,25	3,75	>100
509729	9592523	15070833	POÇO	Lavanderia Catuana	<1,0	Não Objetável	Não Objetável	402,83	0,00	0,00	402,83	55,39	198,98	1,71	>100
510035	9594078	15070834	POÇO	Loc. Flores	10,00	Salobre	Não Objetável	756,52	0,00	0,00	756,52	220,84	980,82	4,18	>100
512726	9591383	15070832	POÇO	Assentamento Angico	<1,0	Salobre	Não Objetável	526,16	0,00	0,00	526,16	132,98	1913,30	6,02	>100
510262	9595786	15070835	POÇO	CE - 156. Loc. São Gerônimo	<1,0	Salobre	Não Objetável	283,97	0,00	0,00	283,97	74,39	374,60	1,73	>100
510458	9597017	15070836	POÇO	CE - 156. Anil	<1,0	Salobre	Não Objetável	210,99	0,00	0,00	210,99	51,86	148,03	0,87	56,00
512340	9597998	15070837	LAGOA	Lagoa dos Talos	83,00	Não Objetável	Não Objetável	54,02	0,00	0,00	54,02	8,90	90,02	0,42	18,00
511256	9602239	15070838	POÇO	Ce - 085	81,00	Salobre	Não Objetável	272,76	0,00	0,00	272,76	167,33	207,44	1,41	>100
516095	9597120	15070831	POÇO	Hydrostec	54,00	Salobre	Não Objetável	249,32	0,00	0,00	249,32	138,59	1549,77	4,74	>100
521519	9597300	15080901	POÇO	Pitombeiras	59,00	Não Objetável	Não Objetável	77,67	0,00	0,00	77,67	23,24	100,70	0,73	>100
521470	9597218	15080902	POÇO	Planalto Cauípe	674,00	Não Objetável	Objetável	43,01	0,00	0,00	43,01	13,46	24,07	0,25	>100
520820	9597760	15080903	POÇO	Planalto Cauípe	<1,0	Não Objetável	Não Objetável	81,54	0,00	0,00	81,54	17,71	112,58	0,58	>100
520366	9597723	15080904	POÇO	Planalto Cauípe	<1,0	Não Objetável	Não Objetável	62,58	0,00	0,00	62,58	21,16	80,76	0,56	>100
520705	9602593	15080905	POÇO	Lagoa Amarela	21,00	Não Objetável	Não Objetável	17,33	0,00	0,00	17,33	0,08	11,48	0,07	>100
522133	9602364	15080906	POÇO	Lagoa Amarela	<1,0	Não Objetável	Não Objetável	17,73	0,00	0,00	17,73	10,98	51,86	0,28	>100,0
REFERENCIA DA PORTARIA 2914, DE 12/12/2011 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE															
				-	-	-	-	-	-	-	-	250,00	-	-	

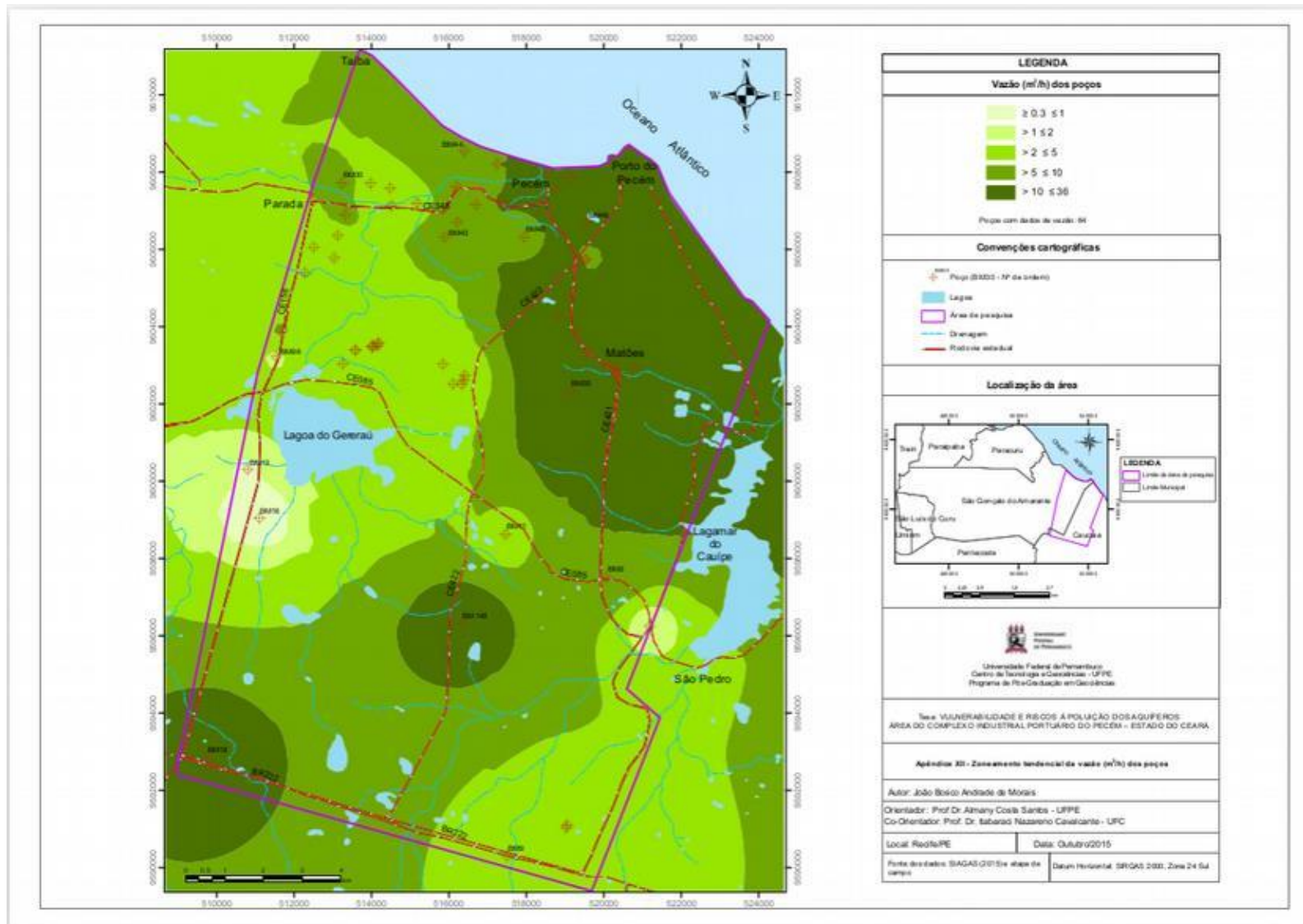
APÊNDICE II - Resultados de Laboratorio																	
REFERENCIA DA PORTARIA 2914, DE 12/12/2011 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE						-	-	500,00	0,30	1,50	-	10,00	1,00	-	6,0 a 9,5	-	0,2 a 0,5
NÚMERO DA ANÁLISE	COORDENADAS (LONG./LAT.)		CÓDIGO LABORATÓRIO	NATUREZA	Localidade/Morador	Dureza de Cálcio mg	Dureza de Magnésio CaCO <sub>3</sub> /L	Dureza Total CaCO <sub>3</sub> /L	Ferro Total mg Fe <sup>2+</sup> /L	Fluoretos mg F /L	Magnésio mg Mg <sup>2+</sup> /L	Nitratosmg N/L	Nitritos NO <sub>2</sub> /L	Oxigênio Dissolvido mgO <sub>2</sub> /L	PH	Potássio mg/K/L	Residual de Cloro mg Cl <sub>2</sub> /L
BM - 1	520606	9592542	15070848	POÇO	Col. Mª Gomes Brasileiro	64,94	71,72	136,66	0,03	<0,01	17,44	1,28	<0,01	4,34	6,36	14,00	Ausência
BM - 2	519682	9593899	15070849	POÇO	Com. São Bento	424,49	1302,77	1723,27	0,10	0,19	361,83	0,28	<0,01	4,16	6,52	35,00	Ausência
BM - 3	521007	9594152	15070850	POÇO	Com. Pedra Branca	217,52	761,49	979,02	0,02	0,39	185,19	5,20	0,01	4,47	6,31	25,00	Ausência
BM - 4	520866	9595725	15070851	POÇO	Posto Landim Combustível	277,68	1203,83	1481,52	0,08	0,46	292,77	0,71	<0,01	4,31	6,58	60,00	Ausência
BM - 5	514998	9600940	15070852	POÇO	Bolso	57,37	41,73	99,10	0,10	0,16	10,15	23,40	<0,01	4,04	5,94	8,00	Ausência
BM - 6	516043	9600137	15070853	POÇO	Bolso	0,19	0,01	0,20	0,13	<0,01	<0,01	4,77	<0,01	3,98	5,31	1,00	Ausência
BM - 7	514663	9599692	15070854	POÇO	Lagoa Seca	30,67	30,86	61,54	0,49	0,03	7,50	0,45	<0,01	3,84	6,03	1,00	Ausência
BM - 8	516657	9594872	15070855	POÇO	Faz. Olho D'água	279,48	1149,09	1428,57	1,06	0,26	279,46	1,45	<0,01	4,18	6,42	20,00	Ausência
BM - 9	509729	9592523	15070833	POÇO	Lavanderia Catuana	137,65	244,37	382,02	0,19	0,25	59,43	15,61	<0,01	4,44	6,85	14,00	Ausência
BM - 10	510035	9594078	15070834	POÇO	Loc. Flores	548,79	730,92	1279,72	0,05	0,52	177,76	7,01	0,44	3,89	6,26	30,00	Ausência
BM - 11	512726	9591383	15070832	POÇO	Assentamento Angico	330,47	1015,18	1345,65	0,09	0,32	246,89	1,83	<0,01	4,66	6,53	30,00	Ausência
BM - 12	510262	9595786	15070835	POÇO	CE - 156. Loc. São Gerônimo	184,86	374,98	559,84	<0,01	0,19	91,19	1,25	<0,01	4,08	6,56	10,00	Ausência
BM - 13	510458	9597017	15070836	POÇO	CE-156. Anil	128,88	201,59	330,47	0,02	0,11	49,02	2,65	<0,01	3,96	6,89	15,00	Ausência
BM - 14	512340	9597998	15070837	LAGOA	Lagoa dos Talos	22,11	14,65	36,76	0,53	0,13	3,56	0,85	<0,01	4,31	6,78	6,00	Ausência
BM - 15	511256	9602239	15070838	POÇO	Ce - 085	153,98	172,49	326,47	0,12	0,22	41,95	23,97	<0,01	3,88	6,38	50,00	Ausência
BM - 16	516095	9597120	15070831	POÇO	Hydrostec	3.44,41	771,46	1115,88	0,66	0,47	187,62	1,05	<0,01	4,46	6,20	30,00	Ausência
BM - 17	521519	9597300	15080901	POÇO	Pitombeiras	57,77	24,35	82,12	0,82	0,53	5,92	<0,01	<0,01	4,36	5,67	19,00	Ausência
BM - 18	521470	9597218	15080902	POÇO	Planalto Cauípe	33,46	11,48	44,95	0,80	0,11	2,79	1,62	<0,01	4,48	5,63	9,00	Ausência
BM - 19	520820	9597760	15080903	POÇO	Planalto Cauípe	44,02	38,29	82,32	0,40	0,70	9,31	2,08	<0,01	4,21	5,79	16,00	Ausência
BM - 20	520366	9597723	15080904	POÇO	Planalto Cauípe	52,59	55,10	107,69	0,16	0,06	13,40	5,46	<0,01	4,09	5,67	4,00	Ausência
BM - 21	520705	9602593	15080905	POÇO	Lagoa Amarela	0,19	0,01	0,20	0,46	0,17	<0,01	<0,01	<0,01	4,11	5,39	<1,0	Ausência
BM - 22	522133	9602364	15080906	POÇO	Lagoa Amarela	27,29	1,48	28,77	0,06	<0,01	0,36	2,71	<0,01	4,00	5,06	12,00	Ausência
REFERENCIA DA PORTARIA 2914, DE 12/12/2011 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE						-	-	500,00	0,30	1,50	-	10,00	1,00	-	6,0 a 9,5	-	0,2 a 0,5

APÊNDICE II - Resultados de Laboratorio										
REFERENCIA DA PORTARIA 2914, DE 12/12/2011 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE					200,00	1000,00	0,05	5,00		
NÚMERO DA ANÁLISE	COORDENADAS (LONG./LAT.)		CÓDIGO LABORATÓRIO	NATU REZA	Localidade/Morador	Sódio mg Na <sup>+</sup> /L	Sólidos Dissolvidos mg/L	Salinidad e %	Turbidez UNT***	POTABILIDADE
BM - 1	520606	9592542	15070848	POÇO	Col. M <sup>o</sup> Gomes Brasileiro	66,00	367,26	0,02	0,16	Potável
BM - 2	519682	9593899	15070849	POÇO	Com. São Bento	940,00	4695,39	0,26	0,24	Não Potável
BM - 3	521007	9594152	15070850	POÇO	Com. Pedra Branca	780,00	6383,10	0,19	0,88	Não Potável
BM - 4	520866	9595725	15070851	POÇO	Posto Landim Combustível	2100,00	7137,90	0,37	1,04	Não Potável
BM - 5	514998	9600940	15070852	POÇO	Bolso	155,00	640,21	0,03	0,36	Não Potável
BM - 6	516043	9600137	15070853	POÇO	Bolso	33,00	128,89	0,01	0,09	Potável, exceto pelo pH
BM - 7	514663	9599692	15070854	POÇO	Lagoa Seca	49,00	213,17	0,01	2,80	Potável, exceto pela cor e Teor de ferro
BM - 8	516657	9594872	15070855	POÇO	Faz. Olho D'água	575,00	2844,54	0,14	3,37	Não Potável
BM - 9	509729	9592523	15070833	POÇO	Lavanderia Catuana	320,00	1237,11	0,05	0,86	Não Potável
BM - 10	510035	9594078	15070834	POÇO	Loc. Flores	720,00	3170,71	0,10	0,10	Não Potável
BM - 11	512726	9591383	15070832	POÇO	Assentamento Angico	1440,00	4566,43	0,23	0,10	Não Potável
BM - 12	510262	9595786	15070835	POÇO	CE - 156. Loc. São Gerônimo	234,00	1312,28	0,07	0,31	Não Potável
BM - 13	510458	9597017	15070836	POÇO	CE - 156. Anil	120,00	660,69	0,04	0,12	Potável
BM - 14	512340	9597998	15070837	LAGOA	Lagoa dos Talos	104,00	307,13	0,03	0,54	Potável, exceto pela cor e Teor de ferro
BM - 15	511256	9602239	15070838	POÇO	Ce - 085	295,00	1069,55	0,08	1,48	Não Potável
BM - 16	516095	9597120	15070831	POÇO	Hydrostec	775,00	3595,50	0,19	3,08	Não Potável
BM - 17	521519	9597300	15080901	POÇO	Pitombeiras	138,00	525,48	0,02	3,27	Potável, exceto pela cor, teor de ferro e pH
BM - 18	521470	9597218	15080902	POÇO	Planalto Cauípe	39,00	192,39	0,01	24,70	Não Potável
BM - 19	520820	9597760	15080903	POÇO	Planalto Cauípe	90,00	413,80	0,02	0,64	Potável, exceto pelo pH e Teor de ferro
BM - 20	520366	9597723	15080904	POÇO	Planalto Cauípe	86,00	400,91	0,02	1,26	Potável, exceto pelo pH
BM - 21	520705	9602593	15080905	POÇO	Lagoa Amarela	13,00	69,18	<0,01	0,51	Potável, exceto pelo pH e Teor de ferro
BM - 22	522133	9602364	15080906	POÇO	Lagoa Amarela	37,00	211,63	0,02	0,12	Potável, exceto pelo pH
REFERENCIA DA PORTARIA 2914, DE 12/12/2011 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE					200,00	1000,00	0,05	5,00		
* UH - Unidade da Escala de Hazen (Platina Cobalto) VMP:15,0 UH										
** Não Objetável ou Objetável										
*** UNT - Unidade Nefelométrica de Turbidez										

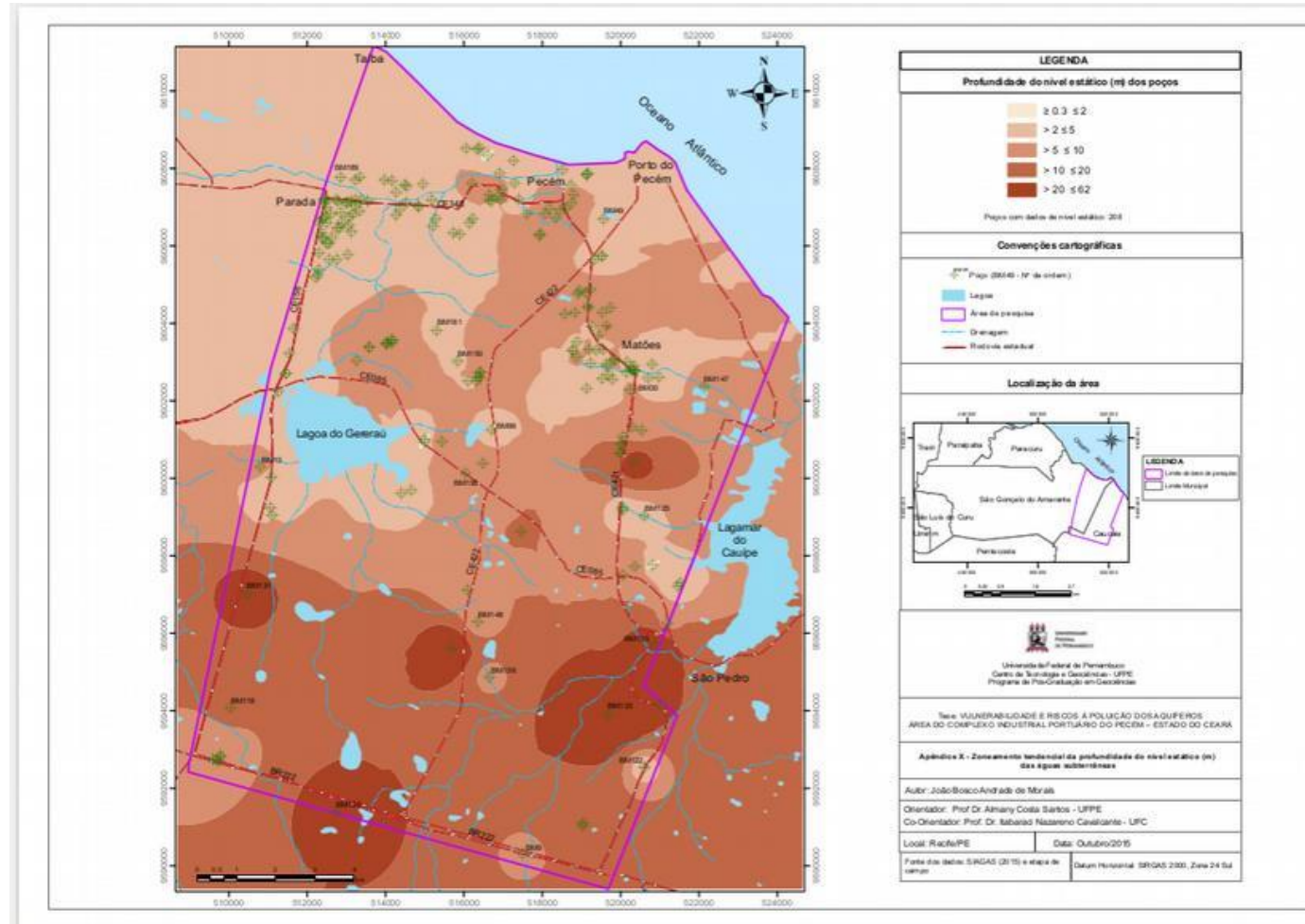
### APÊNDICE III - Mapa de Zoneamento de Profundidade de Poços.



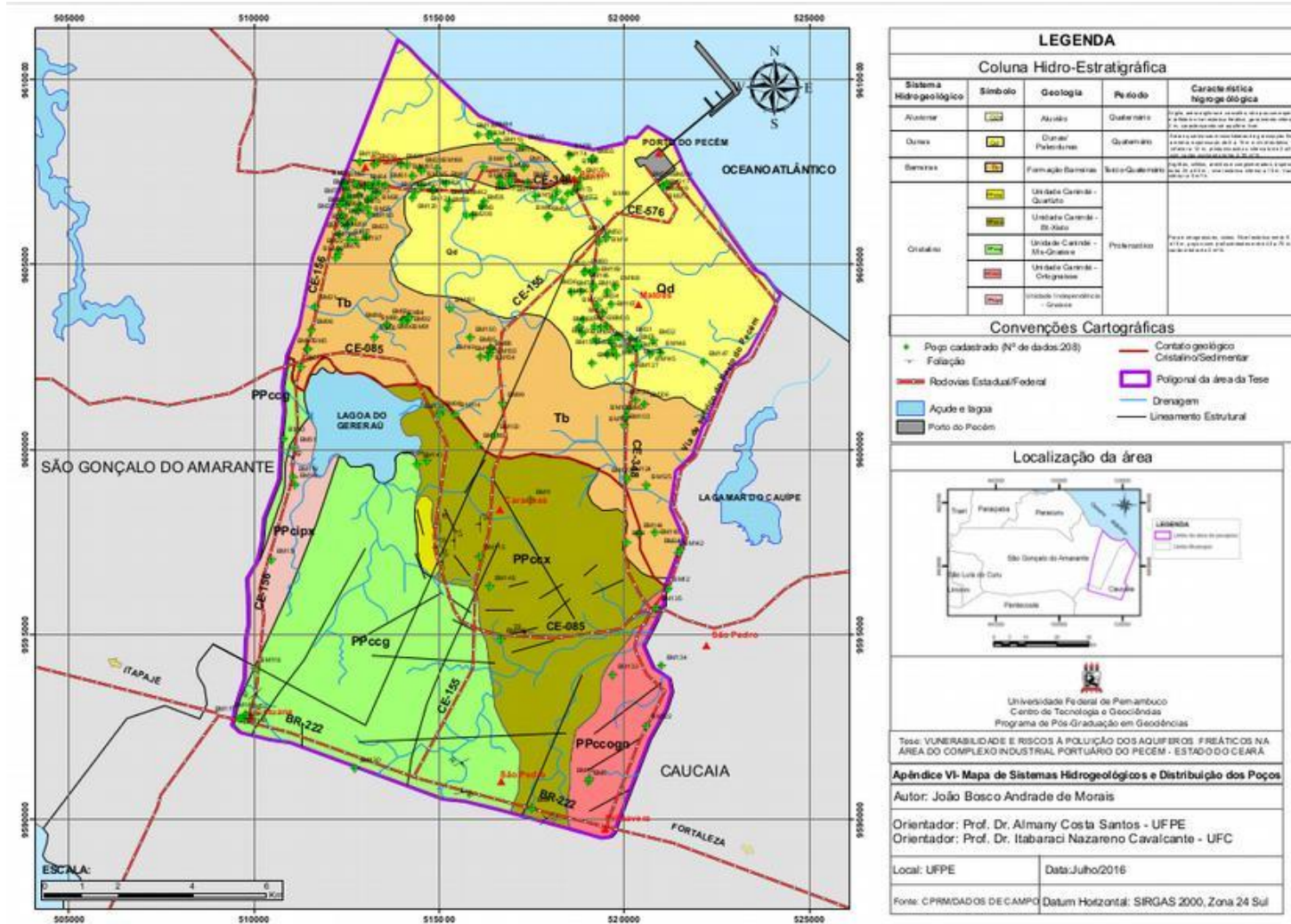
## APÊNDICE IV - Mapa de Zoneamento de Vazão.



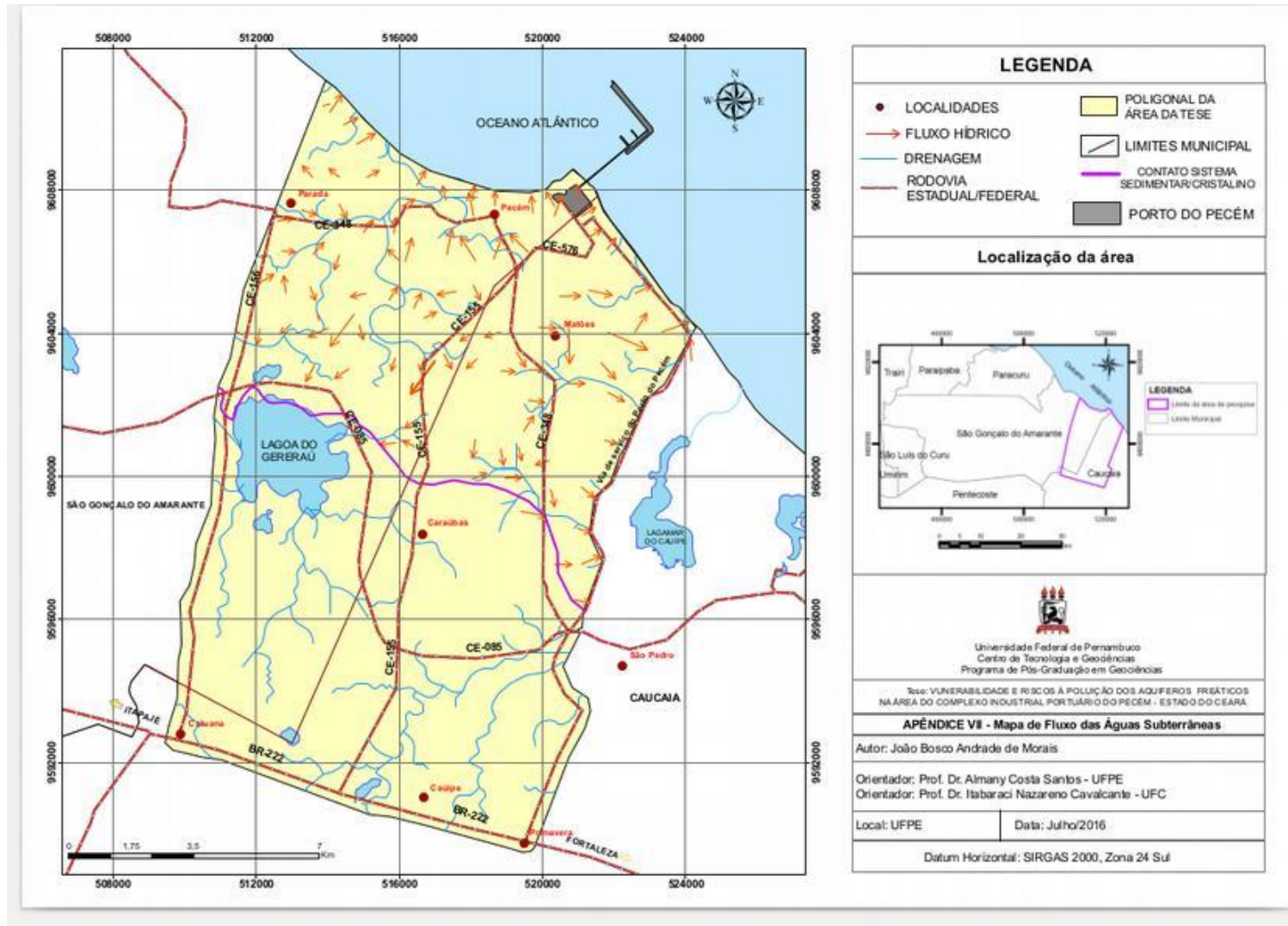
## APÊNDICE V - Mapa de Zoneamento de Nível Estático.



APÊNDICE VI - Mapa de Sistemas Hidrogeológicos e Distribuição de Poços.

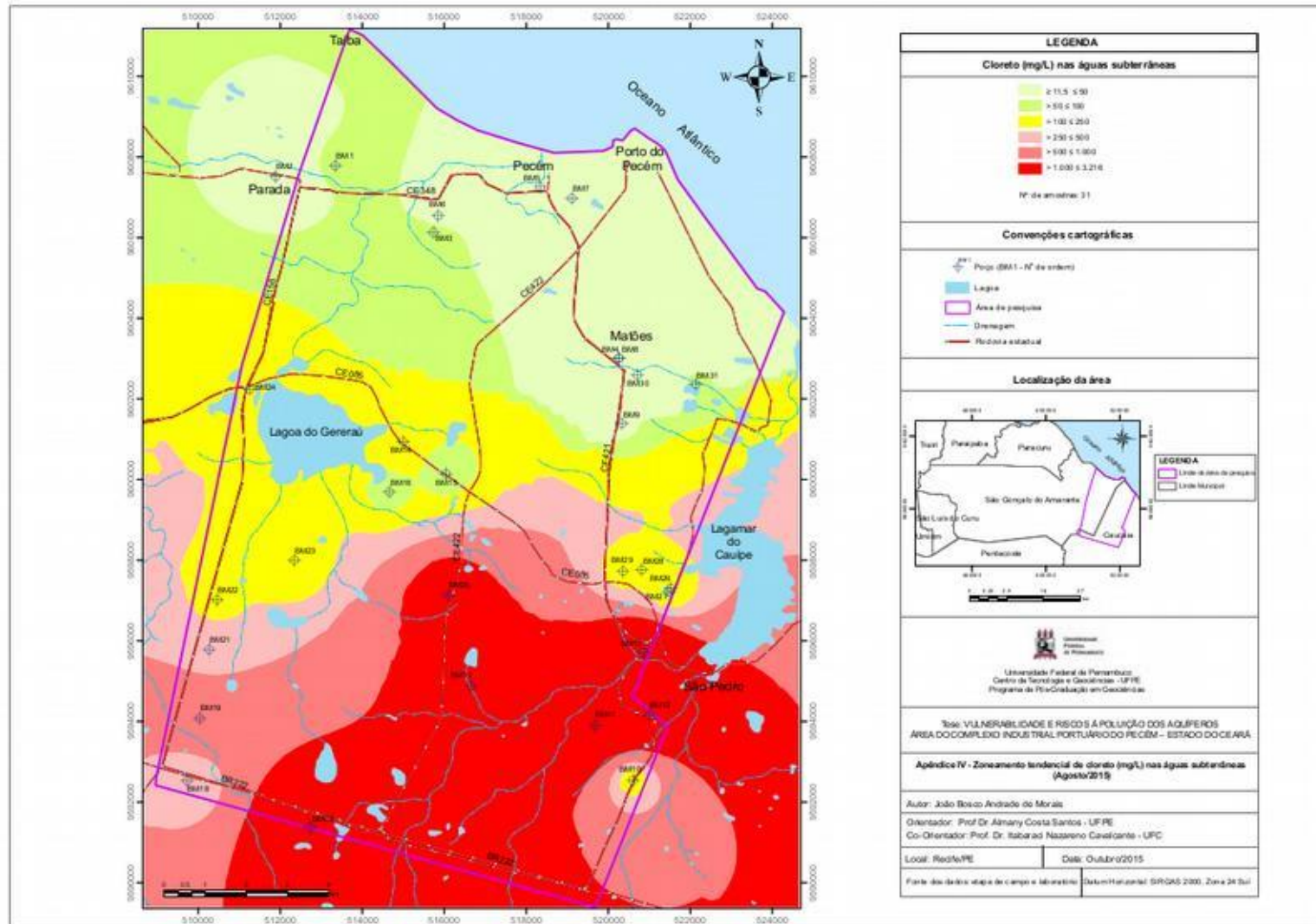


## APÊNDICE VII - Mapa de Fluxo de Águas Subterrâneas.

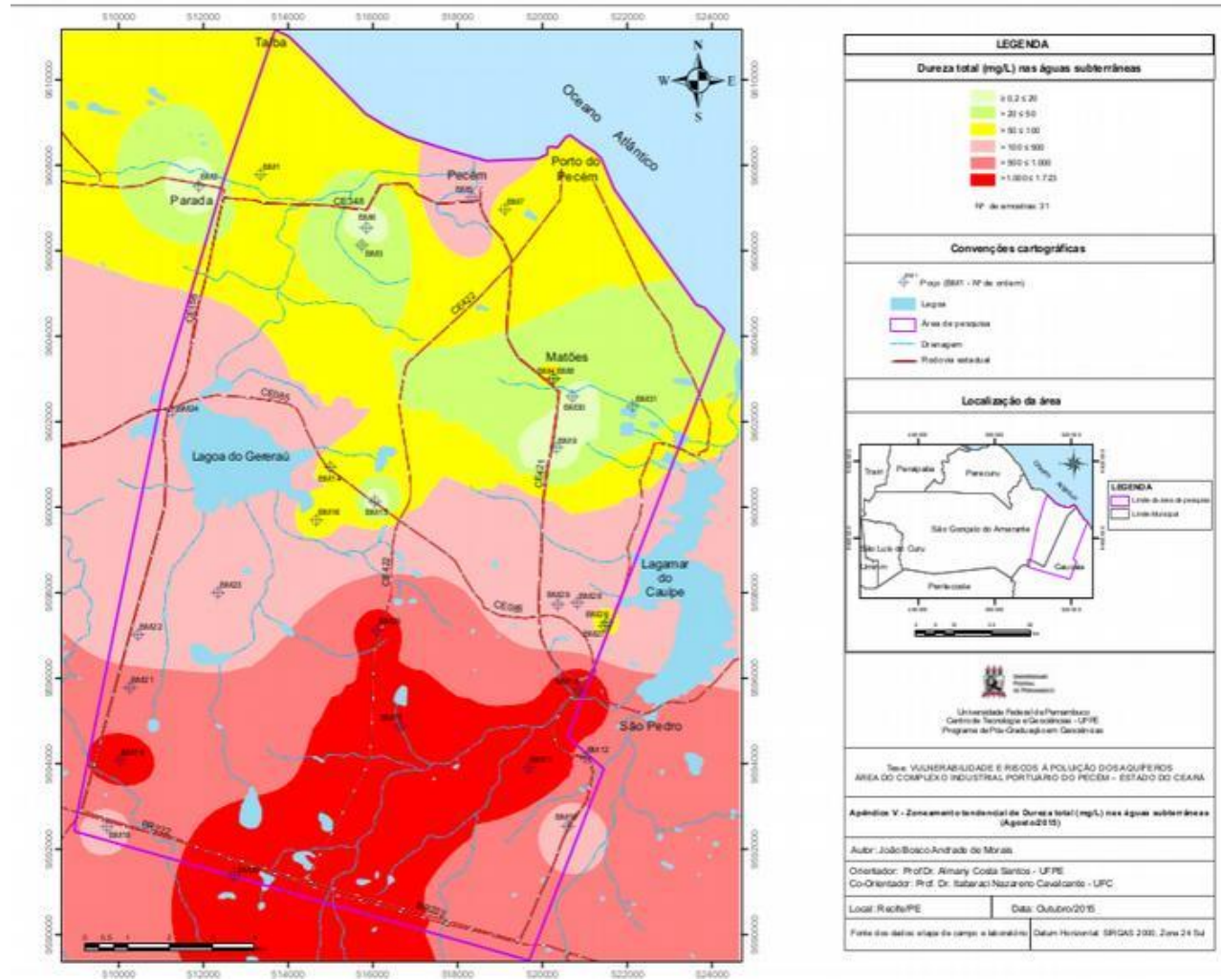




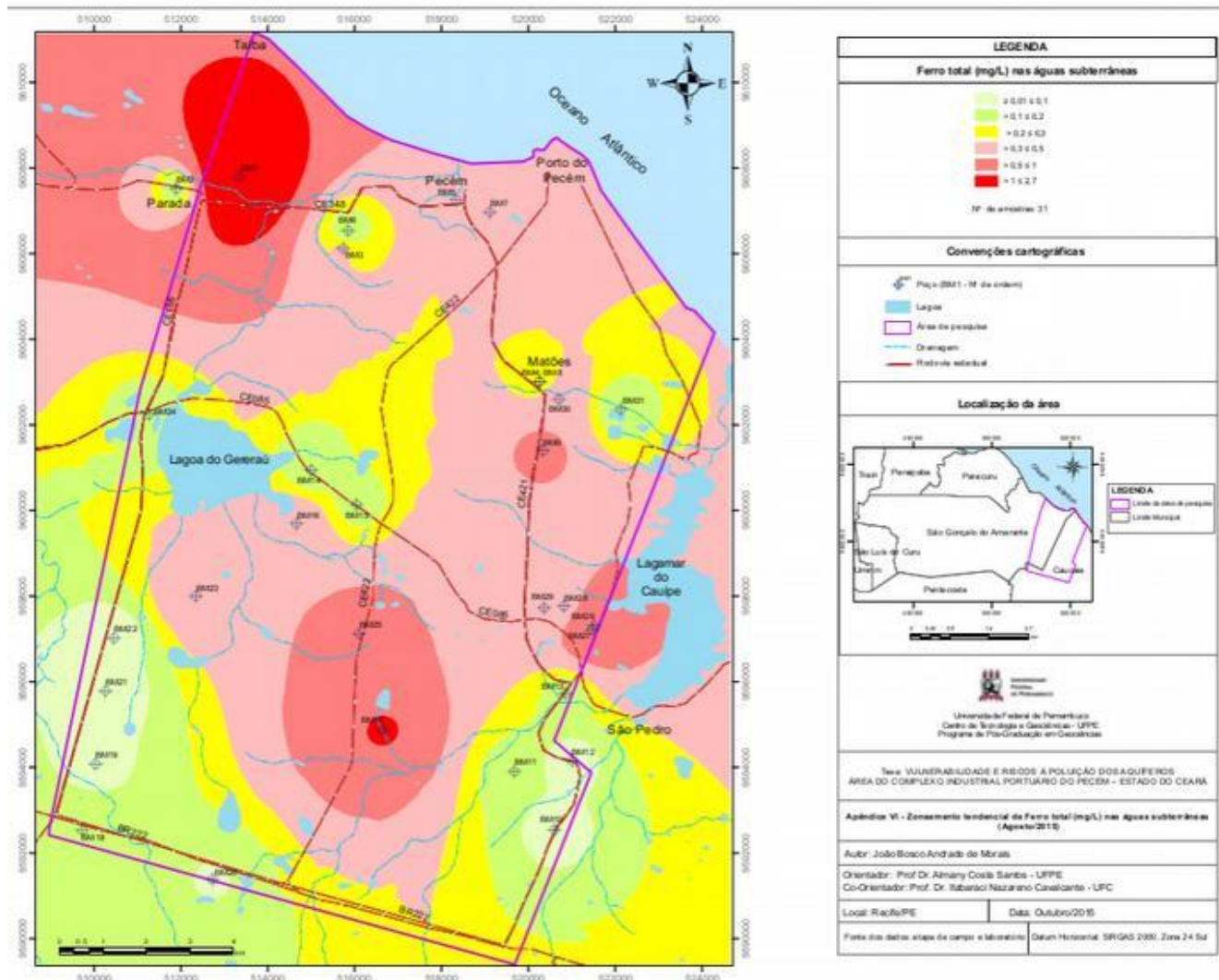
## APÊNDICE VIII - Mapa de Zoneamento de Cloretos.



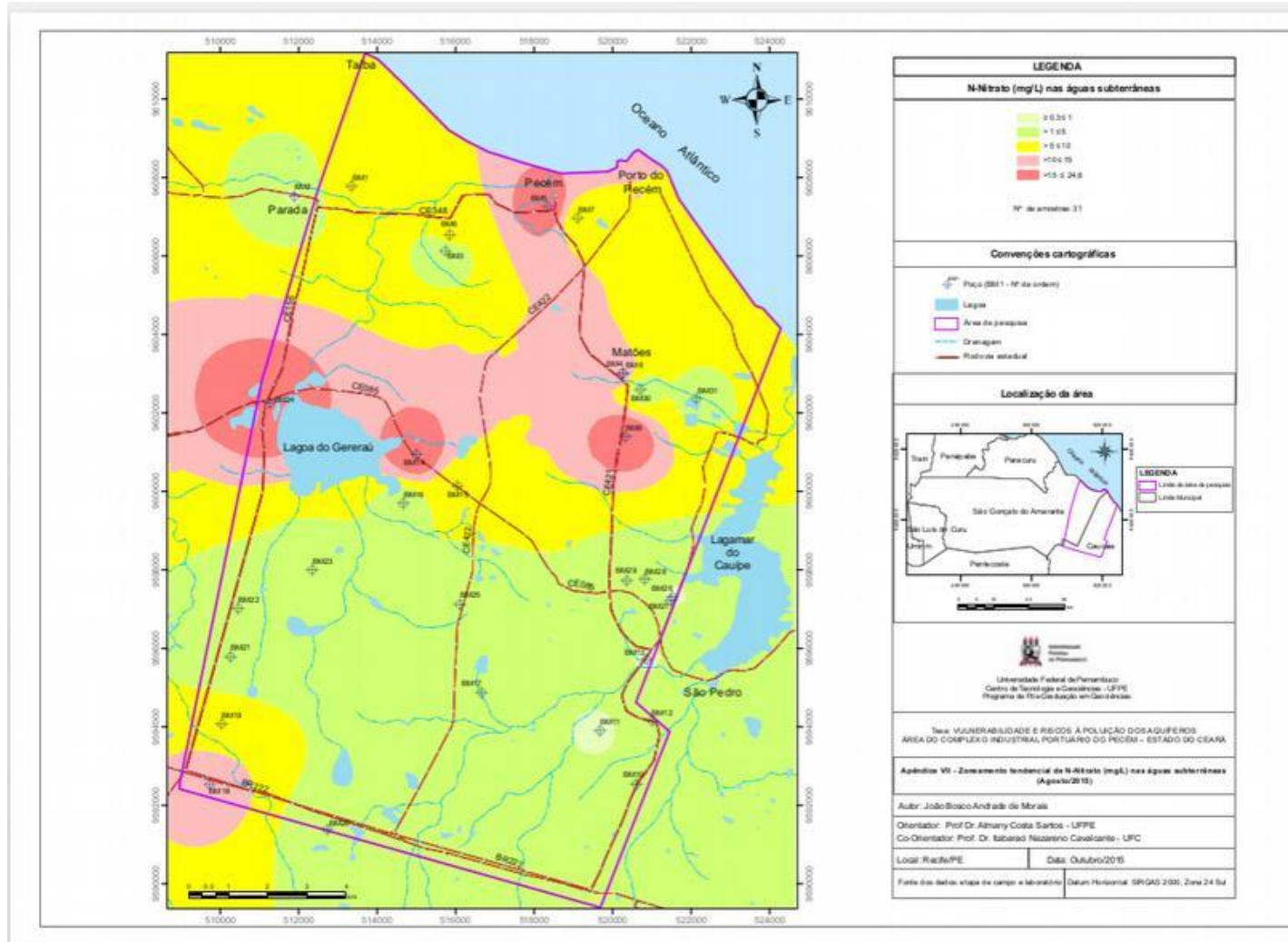
## APÊNDICE IX – Mapa de Zoneamento de Dureza Total.



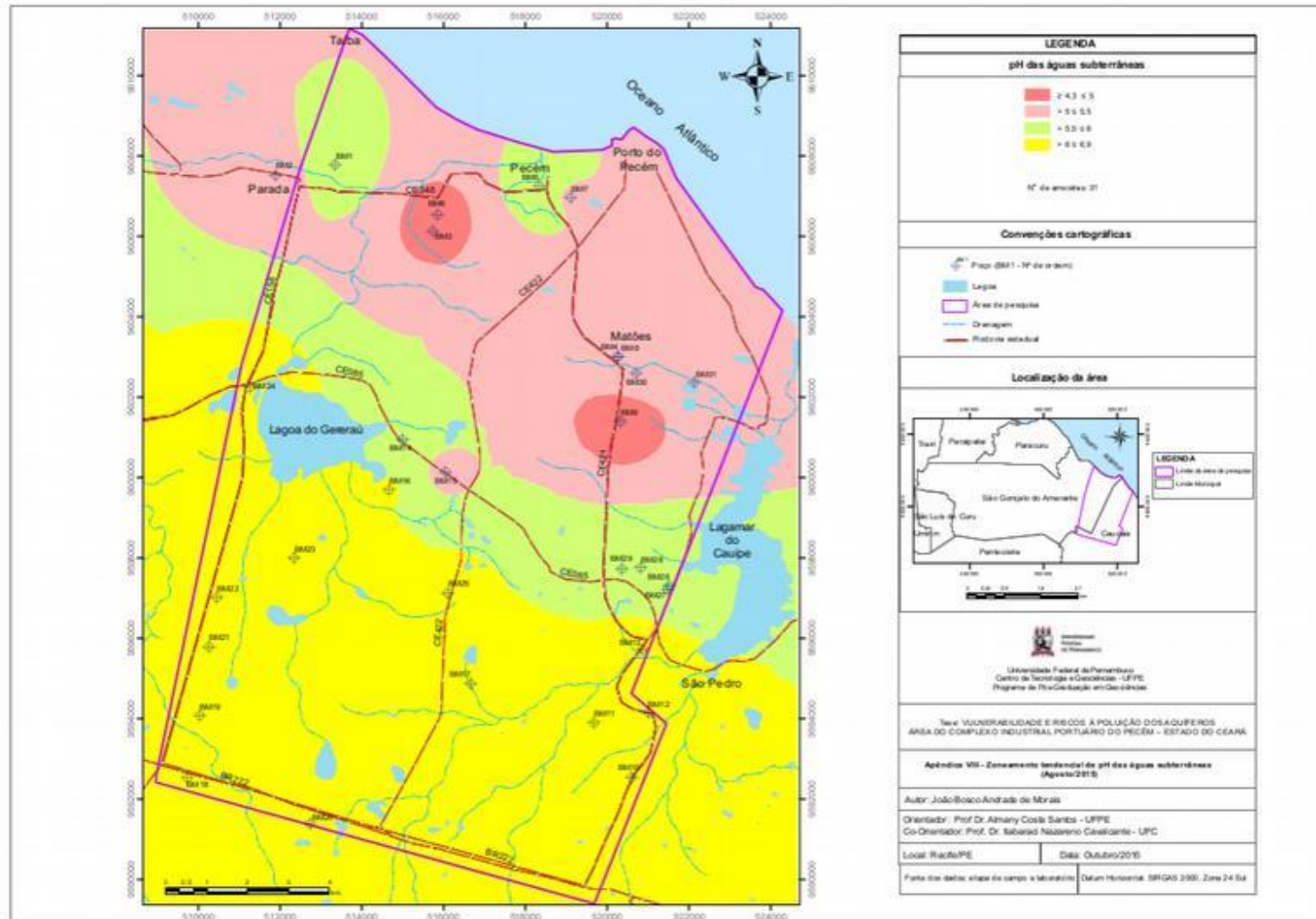
## APÊNDICE X – Mapa de Zoneamento de Ferro Total.



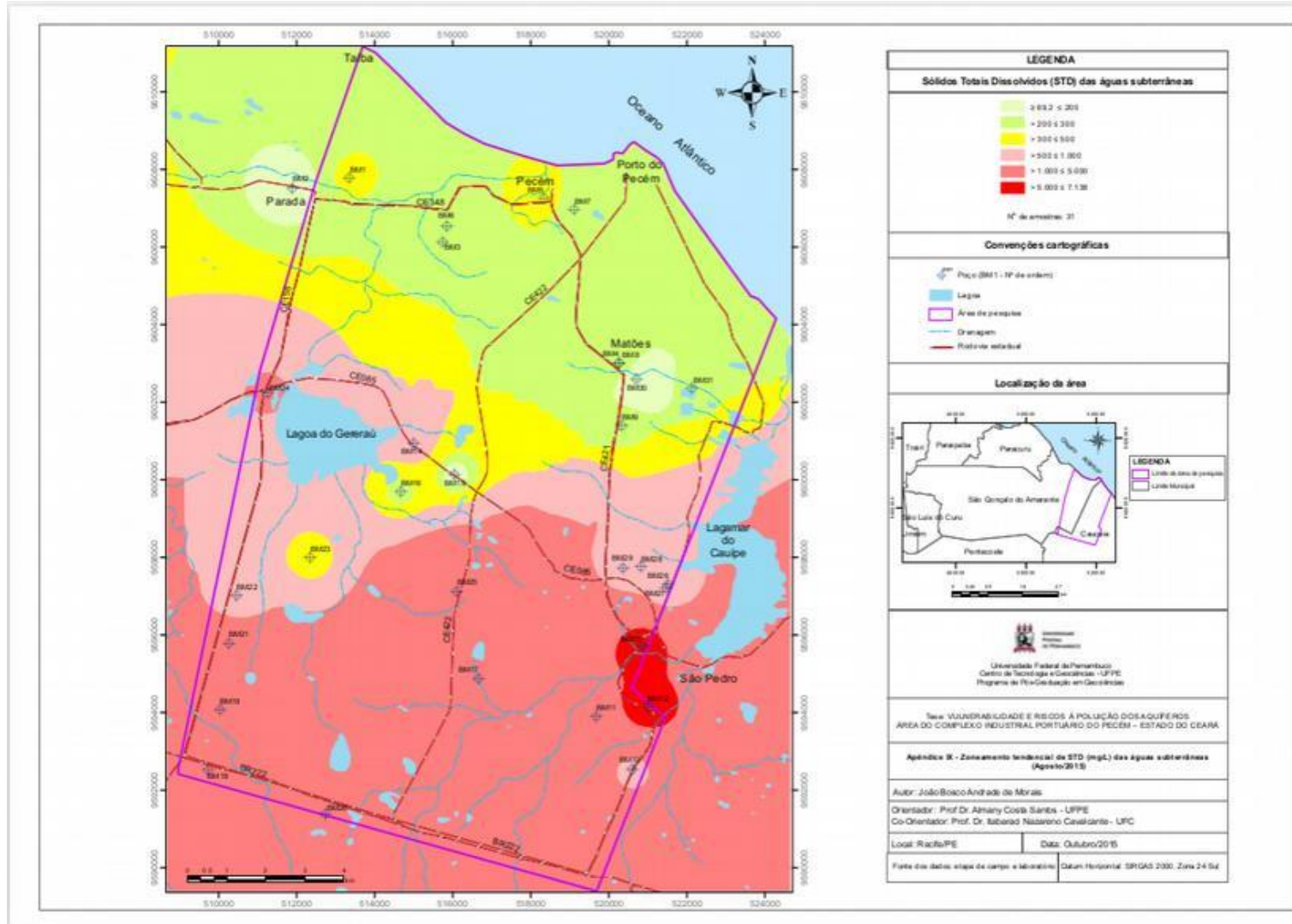
## APÊNDICE XI – Mapa de Zoneamento de Nitrato.



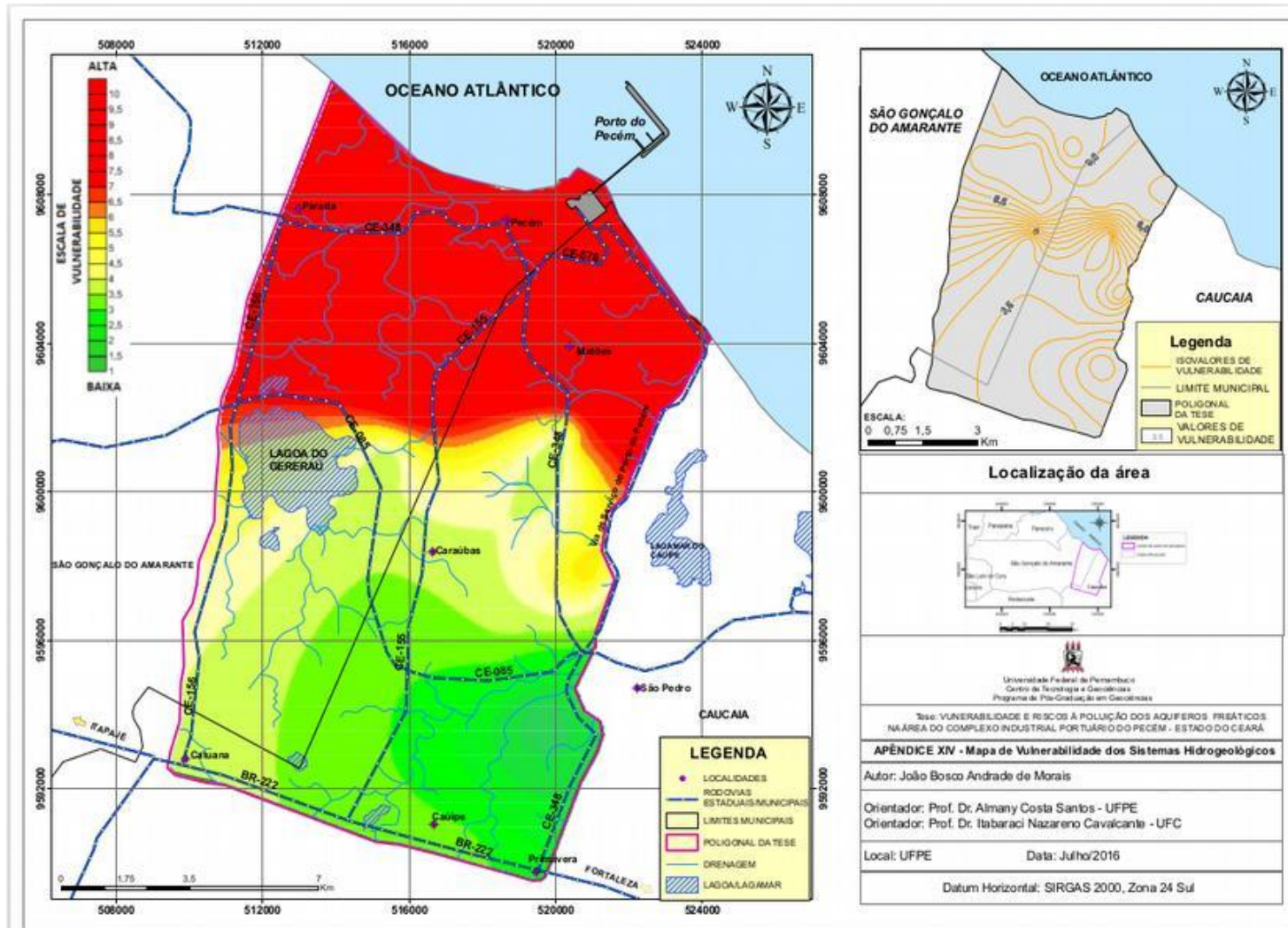
## APÊNDICE XII – Mapa de Zoneamento de Ph.



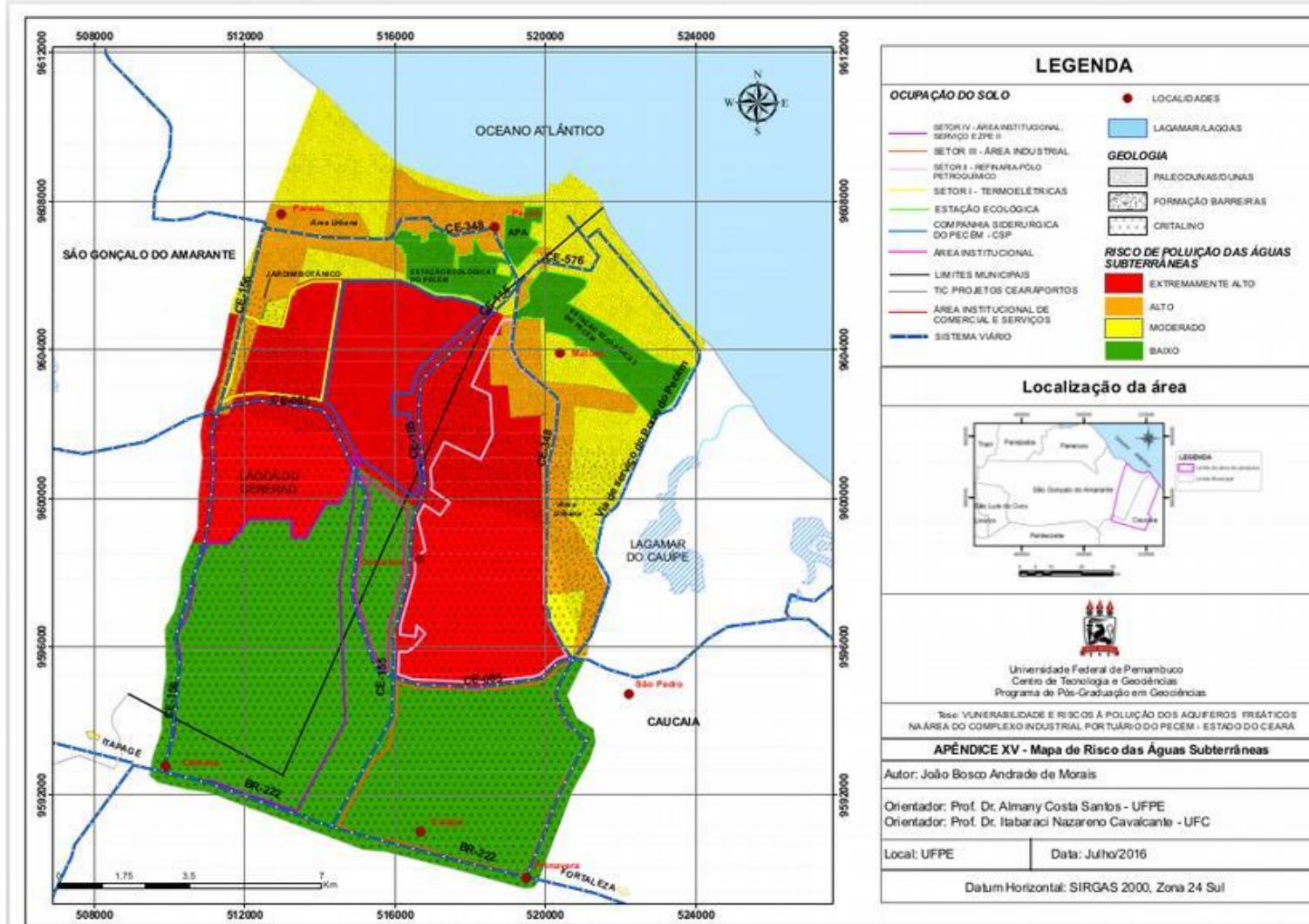
## APÊNDICE XIII – Mapa de Zoneamento de STD.



## APÊNDICE XIV – Mapa de Vulnerabilidade dos Sistemas Hidrogeológicos.

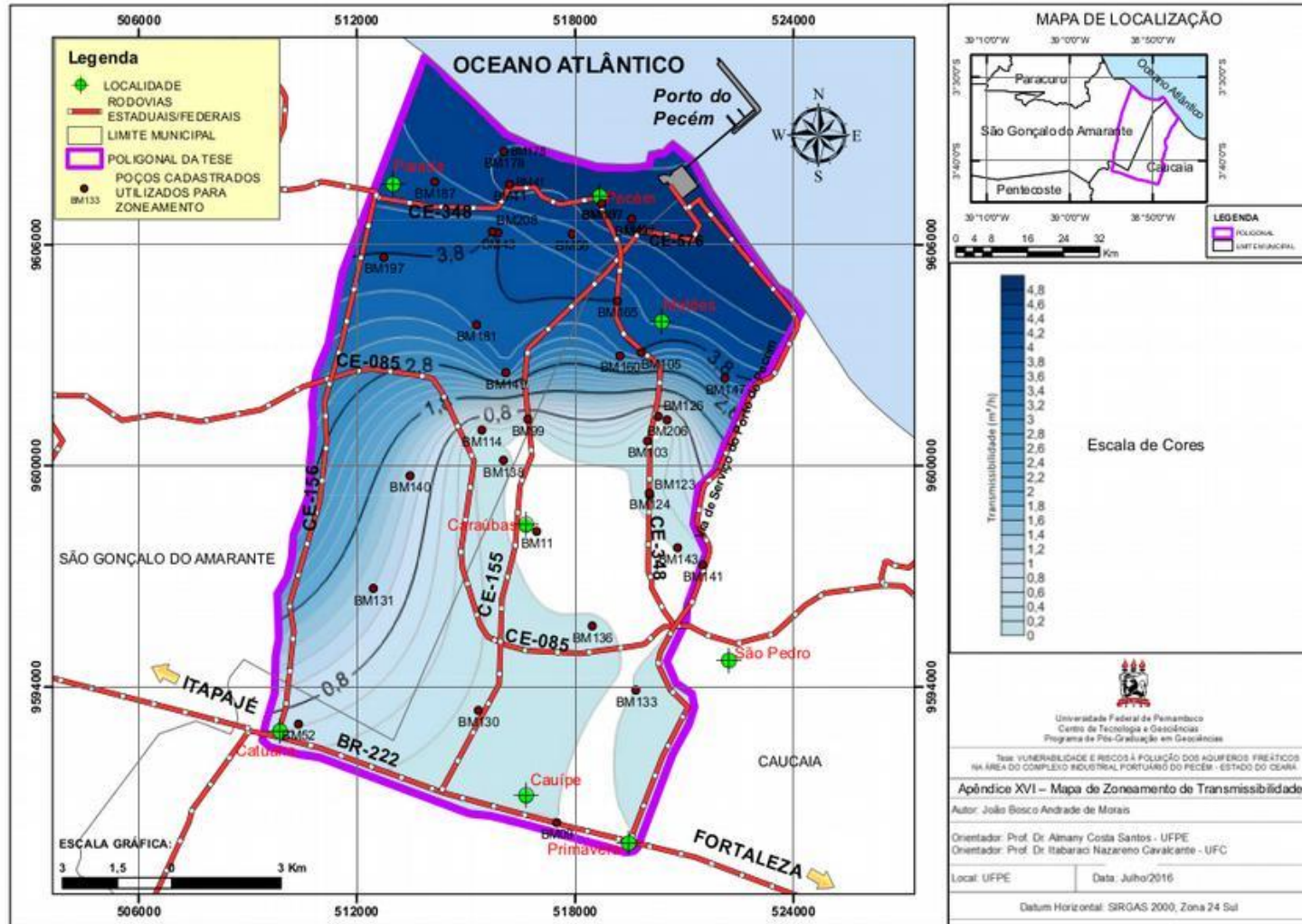


## APÊNDICE XV – Mapa de Risco das Águas Subterrâneas.

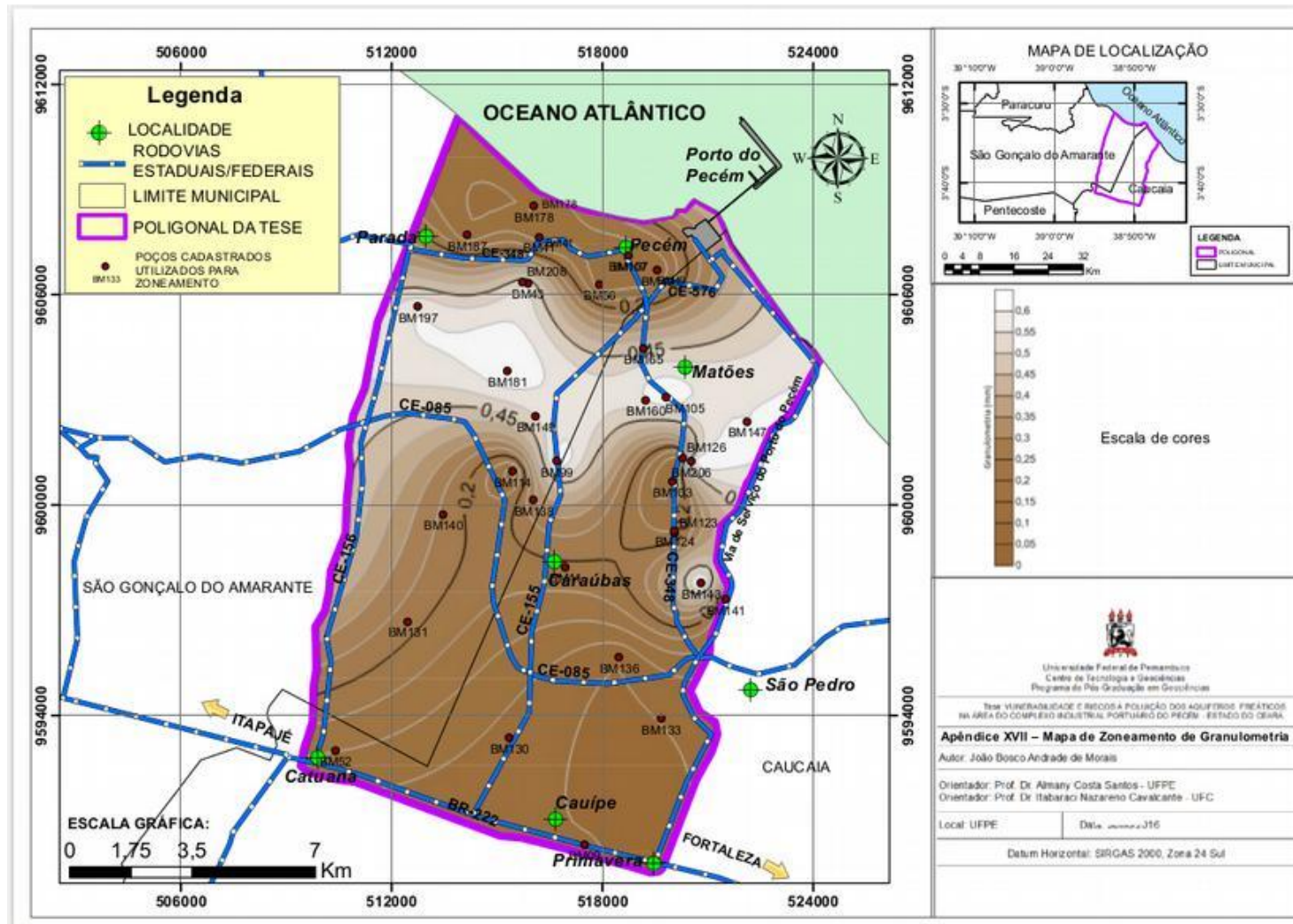




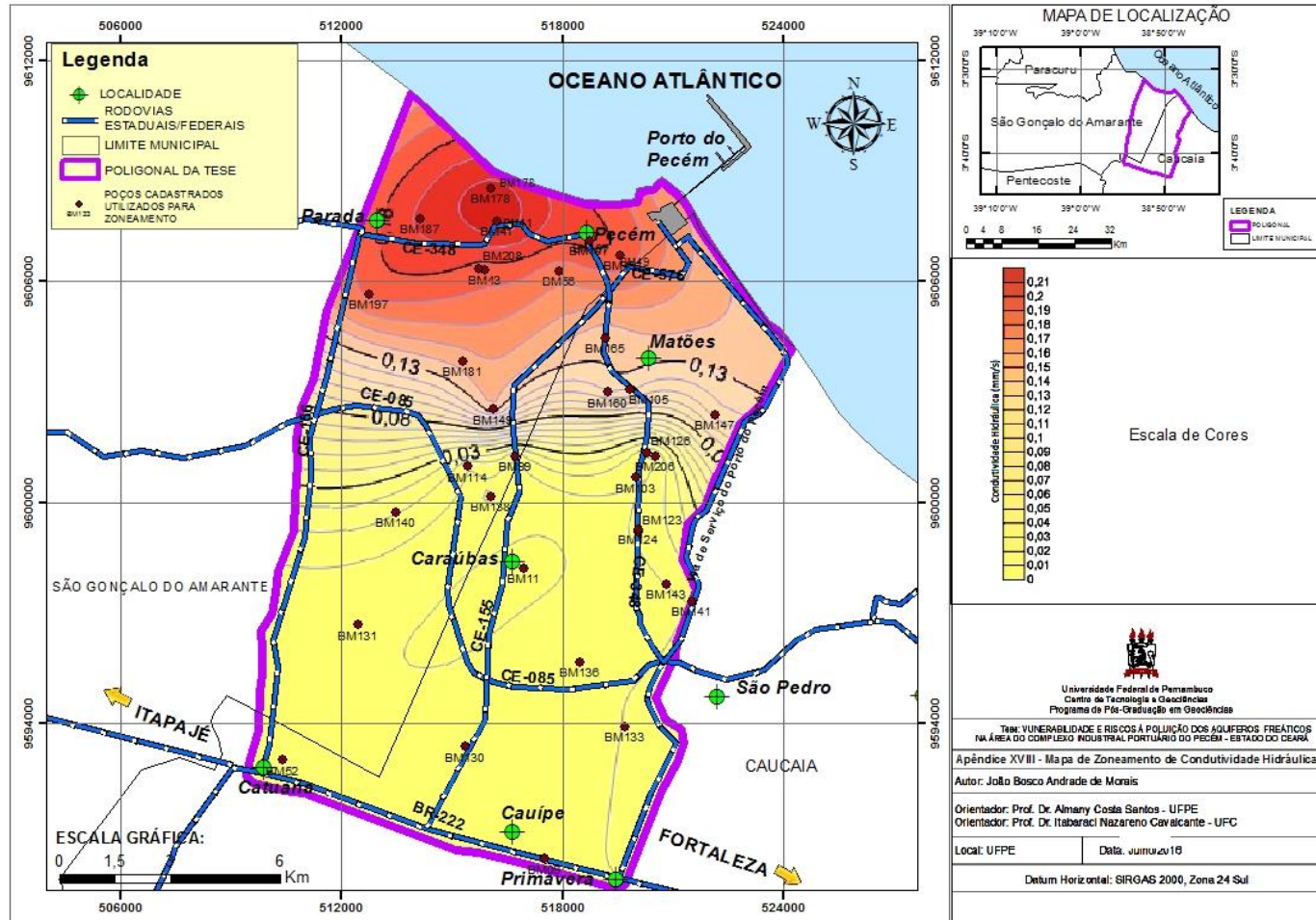
### APÊNDICE XVI – Mapa de Zoneamento de Transmissibilidade.



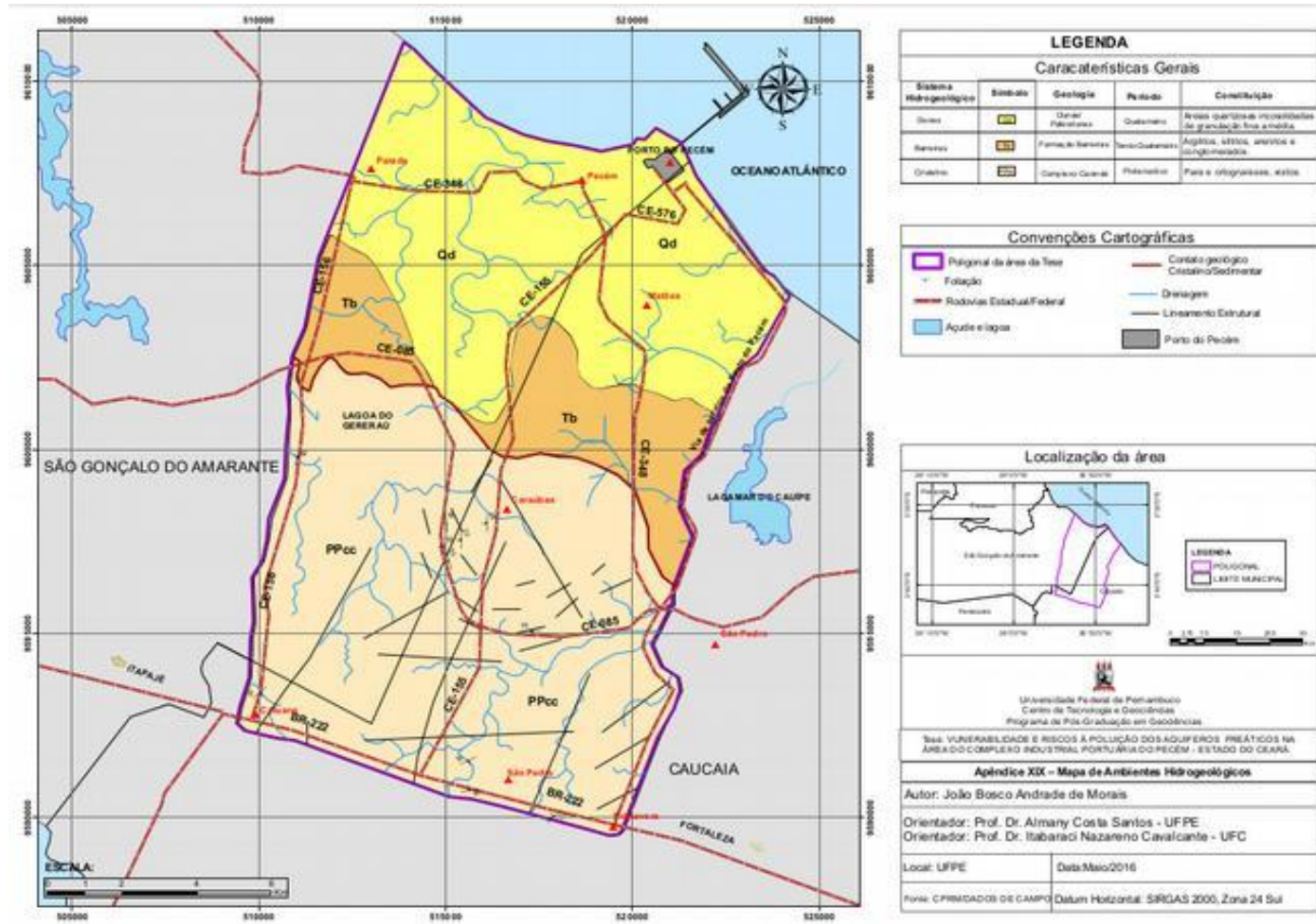
## APÊNDICE XVII – Mapa de Zoneamento de Granulometria.



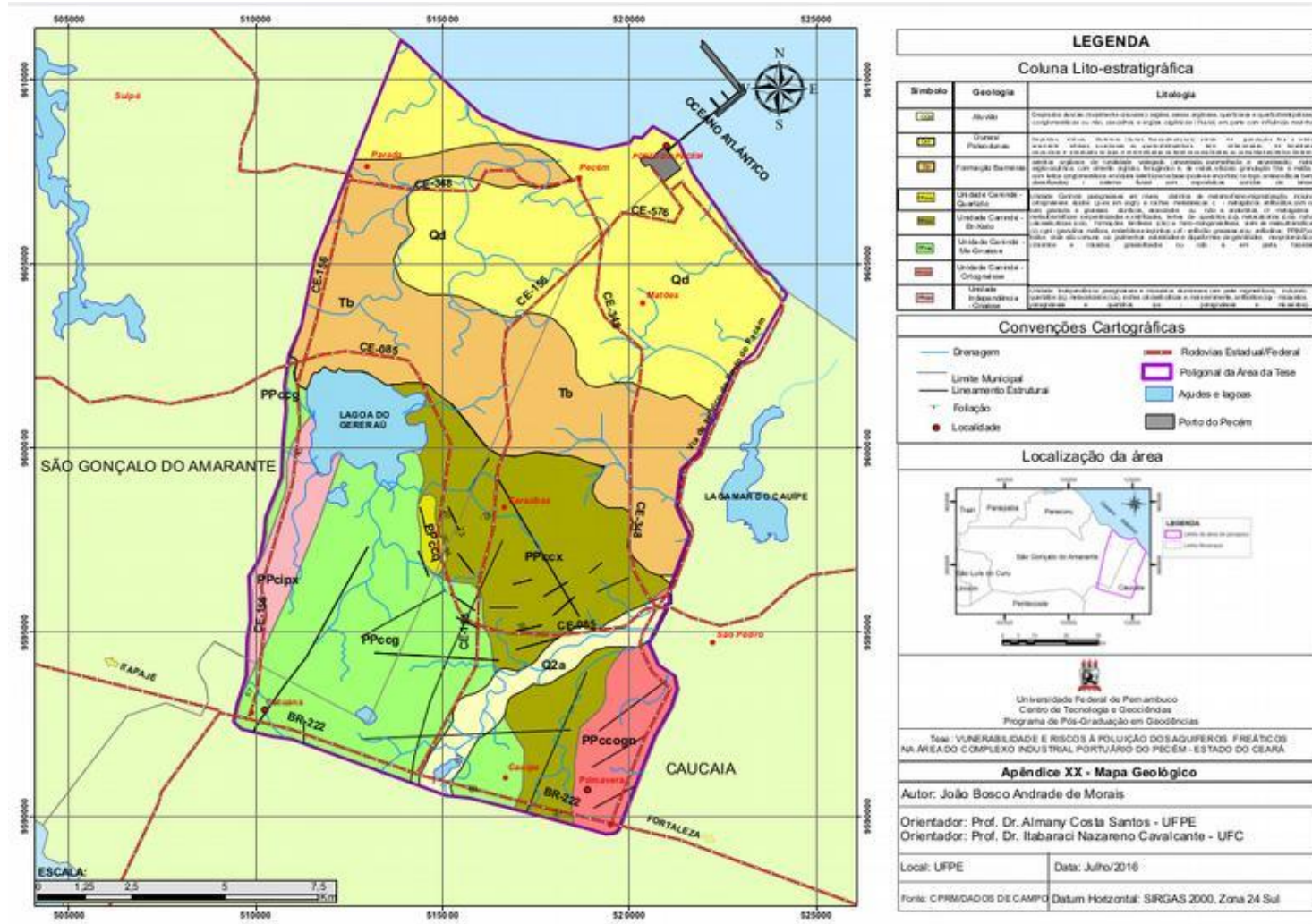
APÊNDICE XVIII – Mapa de Zoneamento de Condutividade Hidráulica.



## APÊNDICE XIX – Mapa de Ambientes Hidrogeológicos.





## APÊNDICE XX – Mapa Geológico.

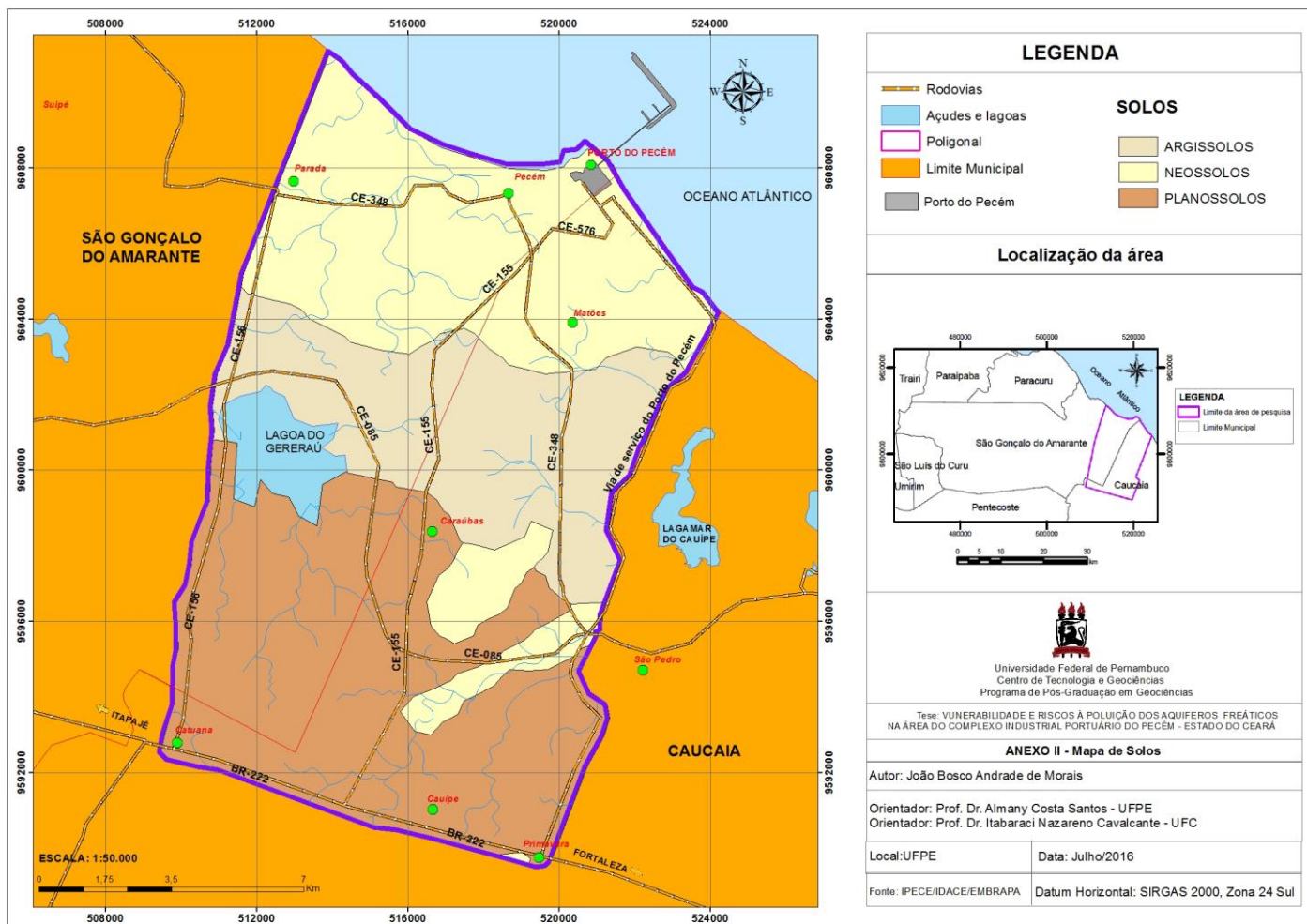


### ANEXO I – Mapa Planialtimétrico.

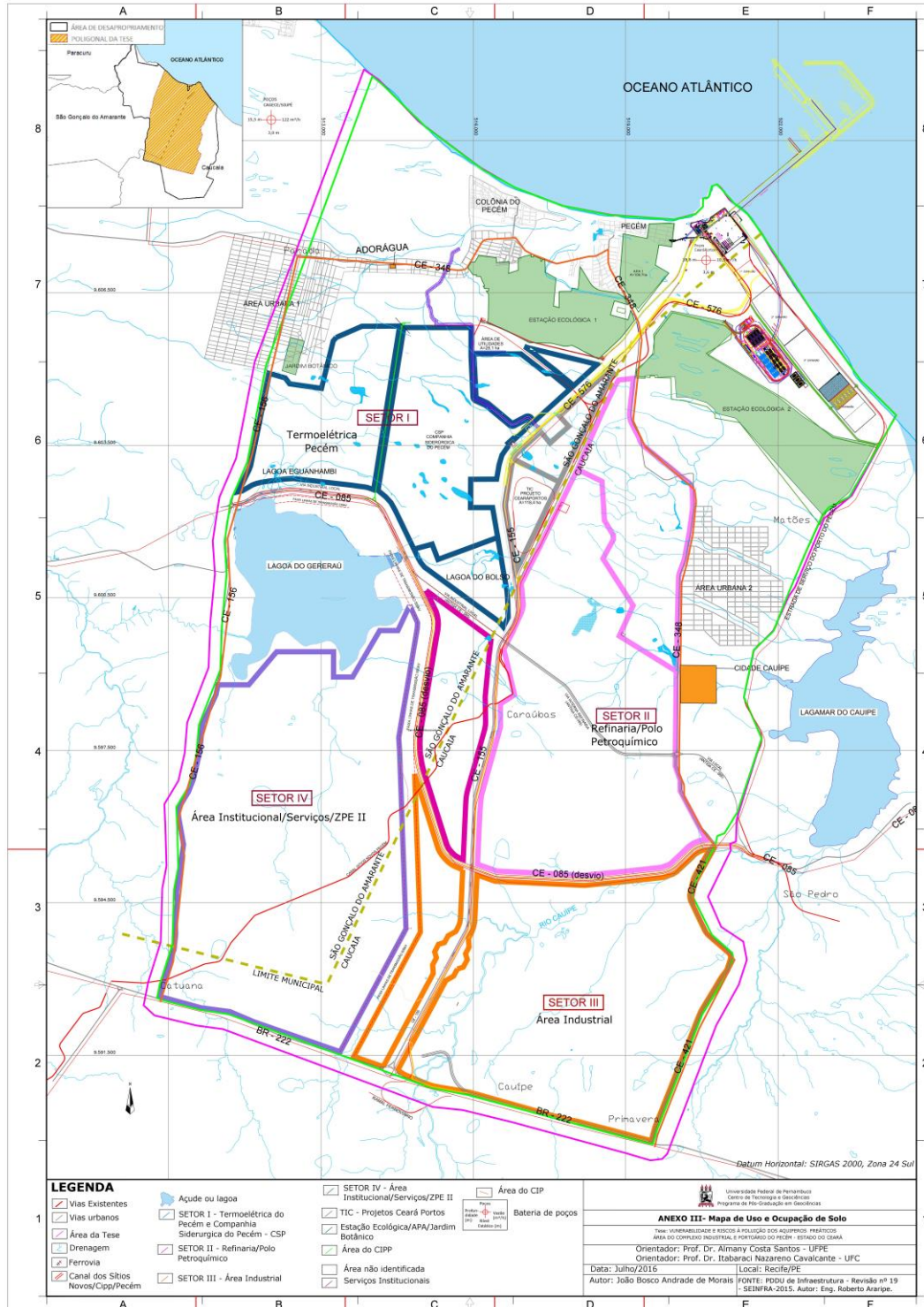


<p><b>LEGENDA</b></p> <p>LEGENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ LOCALIDADE</li> <li>— DRENAGEM</li> <li>— CURVAS DE NÍVEIS</li> <li>— AÇUDE E LAGOA</li> <li>30 COTAS ALTIMÉTRICAS (m)</li> <li>POLIGONAL DA ÁREA DA TESE</li> <li>— LIMITE MUNICIPAL</li> <li>Porto de Pecém</li> </ul>	 <p>Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências Programa de Pós-Graduação em Geociências</p>	<p><b>ANEXO I - Mapa Planialtimétrico</b></p> <p>Autor: João Bosco Andrade de Moraes</p>
<p><b>Localização da área</b></p> 	<p>Tese: VUNERABILIDADE E RISCOS À POLUIÇÃO DOS AQUIFEROS FREÁTICOS NA ÁREA DO COMPLEXO INDUSTRIAL PORTUÁRIO DO PECÉM - ESTADO DO CEARÁ</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Almany Costa Santos - UFPE Orientador: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante - UFC</p>	<p>Local: UFPE</p> <p>Data: Julho/2016</p> <p>Fonte: IPECE</p> <p>Datum Horizontal: SIRGAS 2000, Zona 24 Sul</p>

## ANEXO II – Mapa de Solos.



### ANEXO III – Mapa de Uso e Ocupação de Solo.





## ANEXO IV – Mapa Pluviométrico.

