

ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA



| Relatório Final - Volume 2 |
Hidrogeologia dos Sistemas
Aquíferos da Região de Belém/PA
Tomo I: Resultados em Hidrogeologia

República Federativa do Brasil

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Presidente da República

Ministério do Meio Ambiente

Edson Duarte

Ministro

Agência Nacional de Águas

Diretoria Colegiada

Christianne Dias Ferreira - Diretora-Presidente

Ricardo Medeiros de Andrade

Ney Maranhão

Oscar de Moraes Cordeiro Netto

Marcelo Cruz

Superintendência de Implementação de Programas e Projetos - SIP

Tibério Magalhães Pinheiro (Superintendente)

Victor Sucupira (Superintendente Adjunto)

Coordenação de Águas Subterrâneas - COSUB

Fernando Roberto de Oliveira (Coordenador)

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Fabrcio Bueno da Fonseca Cardoso

Letícia Lemos de Moraes

Leonardo de Almeida (Gestor Substituto do Contrato)

Mrcia Tereza Pantoja Gaspar (Gestora do Contrato)

© 2018 Agência Nacional de Águas – ANA
Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Blocos B, L, M, N, O e T
CEP: 70610-200, Brasília - DF
PABX: 2109-5400 / 2109-5252
Endereço eletrônico: <http://www.ana.gov.br>

Capa: Vanessa Cardoso
Local da Foto: Feira de Artesanato do Paracuri – Belém/PA
Autor da fotografia: Cristiano Cantão

Equipe:

Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF

Márcia Tereza Pantoja Gaspar (ANA)	Leonardo de Almeida (ANA)	
Márcia Helena D’Oliveira Nascimento (SEMAS/PA)	Juvenal Andrade Neto (SEMAS/PA)	Luciene Mota de Leão Chaves (SEMAS/PA)
Homero Reis de Melo Junior (CPRM)	Manoel Imbiriba Junior (CPRM)	Valmor José Freddo Filho (CPRM)
Raimundo Nonato do Espírito Santo (UFPA/IG)	Ronaldo Lopes Mendes (UFPA/NUMA)	Giovanni Chaves Penner (UFPA/ITEC)
Wanderley Nascimento da Silva (COSANPA)	Alessandra Machado Noronha (AMAE)	Hélida Gonçalves Soares (SEMMA Belém)
Edivan de Jesus Souza (SEMMA Marituba)	Fernando Monteiro da Silva (SEMMA Marituba)	Rosângela Maria L. da Rocha (SEMMA Marituba)
Alexsandra Christine Borges de Queiroz (SEMMA Marituba)	Ricelly Luciana Luz Maia do Rosário (SEMMA Santa Izabel do Pará)	Carla Marques de Oliveira (SEMMA Santa Bárbara do Pará)

Elaboração e Execução – PROFILL Engenharia e Ambiente S.A.

Mauro Jungblut – Coordenação Geral
Cíntia Letícia Sallet – Gerente de Projetos

Membros da Equipe Técnica Executora:

Flávio de Paula e Silva e Tiago Vier Fischer – Coordenação Técnica		
Antônio Flavio Uberti Costa	Antônio Silvio Jornada Krebs	Ana Luiza Helfer
Carla Gasparini	Carlos Bortoli	Daniel Wiegand
Guilherme Joaquim	Igor Alves	Isabel Rekowsky
Marcia Regina Stradioto	Neomar Oliveira Fraga	Rodrigo Tusi Costa
Sidnei Agra		

Agradecimentos

Agradecemos a todos os colaboradores e usuários de recursos hídricos que direta ou indiretamente contribuíram com a elaboração deste trabalho.

Todos os direitos reservados.

É permitida a reprodução de dados e de informações, desde que citada a fonte.

A265e Agência Nacional de Águas (Brasil).
Estudos Hidrogeológicos para a Gestão das Águas Subterrâneas da
Região de Belém/PA: Relatório Final / Agência Nacional de Águas;
Elaboração e Execução: Profill Engenharia e Ambiente S.A – Brasília: ANA,
2018.

160 p. il.

Conteúdo: v.1. Diagnóstico do meio físico da região de Belém/PA – v. 2,
t 1. Hidrogeologia dos sistemas aquíferos da região de Belém/PA: Resultados
em hidrogeologia – v. 2, t. 2. Hidrogeologia dos sistemas aquíferos da região
de Belém/PA: Impactos da urbanização nas águas subterrâneas – v. 3. Plano
de gestão para as águas subterrâneas da região de Belém/PA.

1. Hidrogeologia. 2. Bacias Hidrográficas. 3. Belém, Região metropolitana
de (PA). I. Título

CDU 556.3

APRESENTAÇÃO

O Relatório Final dos “*Estudos Hidrogeológicos para Gestão das Águas Subterrâneas da Região de Belém/PA*” apresenta os resultados do projeto desenvolvido no âmbito do Contrato nº 039/2016/ANA, adjudicado pela Agência Nacional de Águas (ANA) à Empresa Profill Engenharia e Ambiente S.A., em agosto de 2016.

Os estudos realizados estão compilados neste Relatório Final, Resumo Executivo, complementados por relatórios técnicos temáticos sobre os dados gerados no projeto, definidos a partir do Termo de Referência elaborado pela ANA e órgão gestor do Estado do Pará. O estudo contempla a ampliação do conhecimento acerca dos aquíferos nos municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Izabel do Pará e Santa Bárbara do Pará, numa área de 2.536 km² (Figura 1).

O estudo foi desenvolvido seguindo nove etapas metodológicas:

Etapa I: Mobilização, Planejamento e Detalhamento das Ações Previstas: consolidação do Plano de Trabalho e coleta de dados disponíveis sobre a área de estudo, além de reunião de apresentação da equipe e definição de diretrizes e procedimentos.

Etapa II: Levantamento, Sistematização e Interpretação de Dados Existentes: busca por dados secundários, visando à avaliação e obtenção do conhecimento técnico existente na área de estudo, incluindo Geologia, Hidrogeologia, Hidroquímica, entre outros.

Etapa III: Avaliação do Meio Físico: realização dos levantamentos de campo programados com base nas fases antecedentes (etapas I e II).

Etapa IV: Levantamento Hidrogeológico: cadastramento de pontos d'água e fontes potenciais de poluição, detalhamento dos estudos climatológicos e avaliação hidrológica. Realização de ensaios de infiltração, testes de aquíferos e eleição da rede de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, com duas campanhas de coleta de amostras d'água para análise físico-química.

Etapa V: Avaliação Hidrogeológica: elaboração do mapa hidrogeológico e do modelo hidrogeológico conceitual para a área de estudo.

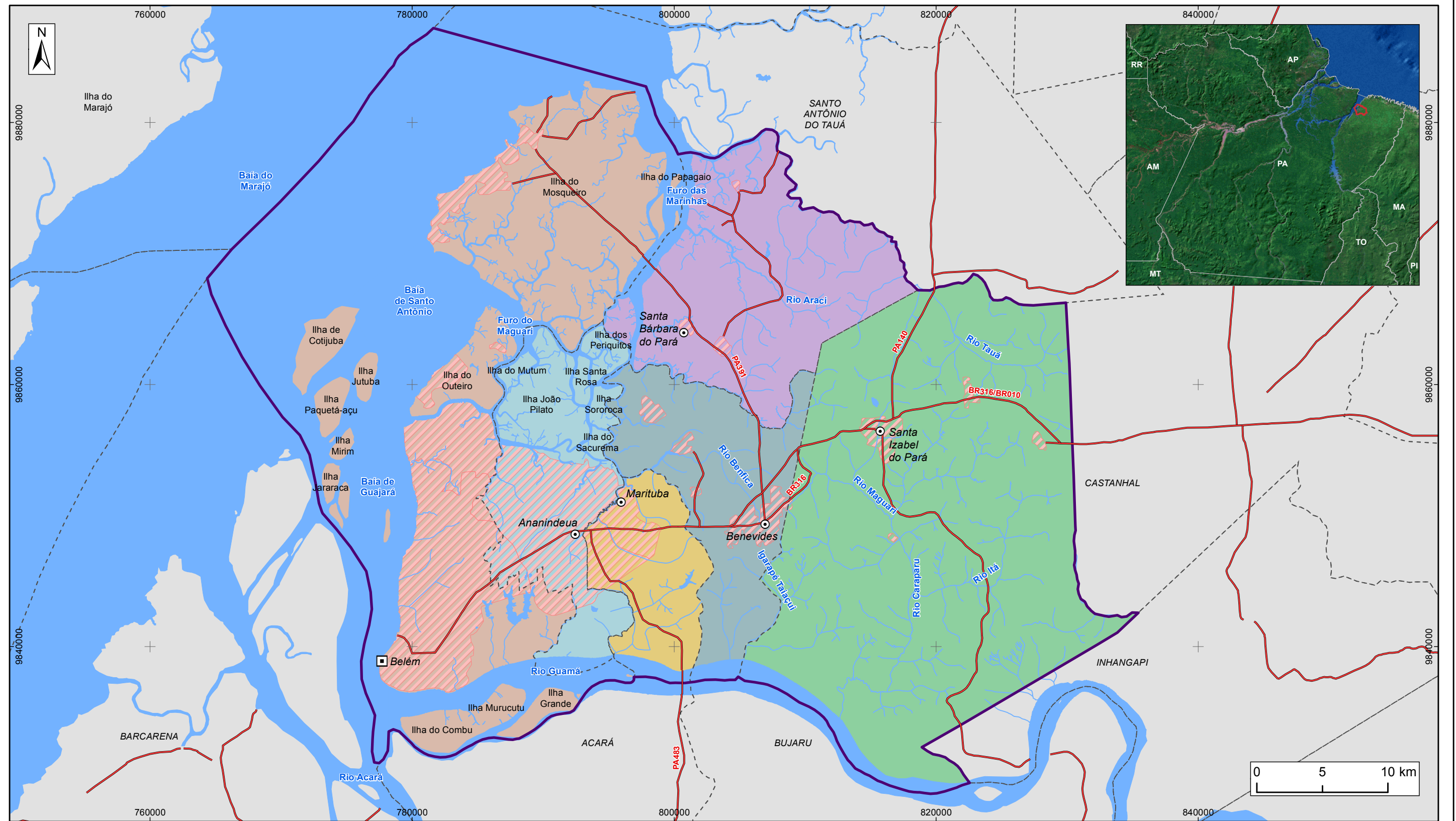
Etapa VI: Avaliação da Recarga, Reservas, Potencialidades, Disponibilidades e Exploração da Água Subterrânea: eleição e aplicação de metodologia para avaliação, a partir das características naturais e da urbanização, e cálculo do balanço hídrico.

Etapa VII: Avaliação das Atividades Antrópicas Impactantes nas Águas Subterrâneas: quantificação da exploração de água subterrânea e da recarga urbana pela infiltração de efluentes domésticos, vazamentos nas tubulações de abastecimento e fugas na rede de esgotos nos cenários atual e futuro e elaboração do balanço hidrogeológico.

Etapa VIII: Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos e Perigo de Contaminação: proposição das zonas com maiores potencialidades para contaminação dos aquíferos.

Etapa IX: Proposta de Estratégias de Gestão de Águas Subterrâneas: identificação dos pontos de maior sensibilidade hidrogeológica e proposição de estratégias para a elaboração de um modelo de gestão das águas subterrâneas na área de estudo.


O projeto teve a supervisão da Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização (CTAF), composta por representantes de órgãos públicos dedicados ao conhecimento, distribuição e autorização de uso das águas subterrâneas na área de estudo. O estudo está orientado pelo ANEXO I - Projeto Básico, junto à documentação da Concorrência Nº 05/ANA/2015.



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual **Município**
- ⊙ Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Rodovia
- ☁ Massa d'água
- ⊕ Área de Estudo
- ▨ Área urbana
- - - Limite municipal
- Ananindeua
- Belém
- Benevides
- Marituba
- Santa Bárbara do Pará
- Santa Izabel do Pará

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo

 ANA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS	ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA	Sistema de Coordenadas: UTM Datum Horizontal: SIRGAS 2000 Unidade: Metros Fiscalização: ANA Data: Junho/2018 Arquivo: Figura_1_Mapa_Localizacao_A3
	Fonte: Rodovia: SEMAS/PA. Limites políticos: IBGE Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA	Escala: 1:290.000

Neste **Relatório Final** apresenta-se a consolidação dos estudos, estruturado em 14 capítulos, apresentado em três volumes, sendo o segundo subdividido em dois tomos. O produto final inclui ainda o Resumo Executivo, Relatórios Técnicos Temáticos (Impactos da Urbanização, Hidrogeoquímica, Geofísica, Testes de Aquífero e Ensaio de Infiltração), e um banco de dados (SIGBEL), que consiste no sistema de informações geográficas dos estudos que reúne mapas, relatórios, planilhas e toda a base de dados dos estudos.

O **Relatório Final** está estruturado conforme descrito a seguir:

VOLUME 1 – DIAGNÓSTICO DO MEIO FÍSICO DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Área de Estudo

Capítulo 3 – Levantamento de Dados Primários e Secundários

Capítulo 4 – Banco de Dados

Capítulo 5 – Aspectos Socioeconômicos

Capítulo 6 – Caracterização do Meio Físico

VOLUME 2 – HIDROGEOLOGIA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

TOMO I: RESULTADOS EM HIDROGEOLOGIA

Capítulo 7 – Avaliação Hidrogeológica

Capítulo 8 – Caracterização Hidrogeoquímica das Águas Subterrâneas

TOMO II: IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Capítulo 9 – Impactos da Urbanização nas Águas Subterrâneas no Cenário Atual

Capítulo 10 – Impactos da Urbanização nas Águas Subterrâneas em um Cenário Tendencial

Capítulo 11 – Balanço Hidrogeológico

VOLUME 3 – PLANO DE GESTÃO PARA AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DE BELÉM/PA

Capítulo 12 – Estratégias de Gestão das Águas Subterrâneas

Capítulo 13 – Proposta de Plano de Gestão das Águas Subterrâneas

Capítulo 14 – Seminários de Gestão Participativa

Ao final de cada volume, estão listadas as referências bibliográficas citadas ao longo do texto ou utilizadas para consulta. Este caderno constitui o **Tomo I do Volume 2** do Relatório Final que inclui os **capítulos 7 e 8**.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo	4
Figura 2 – Arcabouço tectônico da porção norte do Brasil interpretado com base em dados gravimétricos, magnéticos e sísmicos (COSTA <i>et al.</i> , 2002).....	14
Figura 3 – Mapa geológico da região de Belém.	16
Figura 4 – Distribuição em superfície das unidades geológicas constituintes do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém.....	19
Figura 5 – Localização das seções e perfilagens geofísicas analisadas.....	22
Figura 6 – Interpretação litológica e litoestratigráfica de perfilagem calibrada (padrão API) AN-56 do poço SIAGAS nº 1500001101 (PROSANEAR-2-COQUEIRO). Descrição litológica de acordo com dados cadastrais contidos no relatório de perfuração.	25
Figura 7 – Contatos entre as formações Barreiras e Pirabas constatados em perfilagens geofísicas. Localização das perfilagens na Figura 5.....	27
Figura 8 – Seção A-A' elaborada com dados de perfilagens geofísicas. Localização da seção e perfis na Figura 5.	29
Figura 9 – Seção B-B' elaborada com dados de perfilagens geofísicas. Localização da seção e perfis na Figura 5.	30
Figura 10 – Distribuição dos pontos de SEVs e de perfilagens com dados de espessura dos aquíferos Barreiras e Pirabas na região de Belém.	33
Figura 11 – Correlação entre espessuras dos aquíferos Barreiras e Pirabas.	34
Figura 12 – Distribuição das espessuras do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém.	38
Figura 13 – Distribuição das espessuras do Sistema Aquífero Pirabas na região de Belém.....	39
Figura 14 – Ciclos sazonais de recarga e descarga do Aquífero Rio Claro (CARNIER NETO, 2006). 40	
Figura 15 – Oscilações de nível de água no Aquífero Rio Claro devido à maré terrestre, mostrando dois valores máximos e dois valores mínimos diários Claro (CARNIER NETO, 2006).	41
Figura 16 – Ciclos sazonais de recarga e descarga do Sistema Aquífero Barreiras (poço 1500005632 – RIMAS/CPRM) em Belém.	41
Figura 17 – Correlação entre altitude e cota do nível estático dos poços do cadastro SIAGAS.	42
Figura 18 – Correlação entre altitude e cota do nível estático dos poços com até 30 m de profundidade do cadastro SIAGAS.	43
Figura 19 – Distribuição da carga hidráulica e das equipotenciais dos aquíferos superficiais na região de Belém.....	44
Figura 20 – Correlação entre altitude e cota do nível estático de poços do SIAGAS que captam água do Sistema Aquífero Pirabas.....	45
Figura 21 – Correlação entre altitude e cota do nível estático de poços do SIAGAS com profundidades iguais ou maiores do que 200 m, que captam água do Sistema Aquífero Pirabas.	46
Figura 22 – Esquema mostrando a variação das cargas hidráulicas de aquíferos do tipo multicamadas encimados por aquífero livre.	48

Figura 23 – Distribuição normal acumulada dos dados de capacidade específica (m ³ /h/m) do Sistema Aquífero Pirabas na região de Belém.	51
Figura 24 – Distribuição das potencialidades do Sistema Aquífero Pirabas na região de Belém.	53
Figura 25 – Distribuição normal acumulada dos dados de capacidade específica (m ³ /h/m) do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém.	54
Figura 26 – Distribuição das potencialidades do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém.	56
Figura 27 – Áreas de recarga e de descarga dos aquíferos da região de Belém.	60
Figura 28 – Mapa de localização das bacias hidrográficas e estações fluviométricas localizadas na área de estudo.	63
Figura 29 – Mapa de localização das estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Guamá, fora da área de estudo.	64
Figura 30 – Diagrama esquemático mostrando processo simplificado de recarga a partir da precipitação pluviométrica.	66
Figura 31 – Localização das estações pluviométricas próximas à área de estudo.	68
Figura 32 – Distribuição das precipitações médias totais anuais no período entre 1983 e 2016 na região de Belém.	69
Figura 33 – Distribuição da recarga na região de Belém.	71
Figura 34 – Representação dos parâmetros utilizados no cálculo das reservas renováveis e permanentes de aquíferos porosos não confinados, considerando-se um sistema em equilíbrio.	74
Figura 35 – Representação dos parâmetros utilizados no cálculo das reservas permanentes de aquíferos porosos confinados.	75
Figura 36 – Índices de vulnerabilidade GOD (FOSTER <i>et al.</i> , 2006).	87
Figura 37 – Profundidade do nível de água do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém.	90
Figura 38 – Classes de nível de água (método GOD) do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém.	91
Figura 39 – Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Barreiras (método GOD) na região de Belém.	93
Figura 40 – Distribuição das classes de risco potencial de geração de contaminantes na região de Belém, com base no método <i>POSH</i>	99
Figura 41 – Distribuição dos empreendimentos de acordo com as classes de risco potencial de geração de contaminantes na região de Belém.	100
Figura 42 – Densidade de empreendimentos com potencial risco de contaminação na região de Belém.	102
Figura 43 – Classificação das áreas com base no risco potencial de geração de contaminantes na região de Belém.	103
Figura 44 – Distribuição das classes de potencial de contaminação na região de Belém.	104
Figura 45 – Distribuição das classes de potencial de contaminação nos municípios da região de Belém.	104
Figura 46 – Esquema conceitual para avaliação de perigo de contaminação (FOSTER <i>et al.</i> , 2006).	105

Figura 47 – Distribuição das áreas de perigo de contaminação por município da região de Belém..	106
Figura 48 – Distribuição das classes de perigo de contaminação na região de Belém.	107
Figura 49 – Representação do arcabouço hidrogeológico e dinâmica de circulação da água subterrânea nos sistemas aquíferos da região de Belém.	110
Figura 50 – Mapa hidrogeológico do Sistema Barreiras.	112
Figura 51 – Mapa hidrogeológico do Sistema Pirabas	113
Figura 52 – Localização dos pontos de amostragem de águas subterrâneas na região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens.	117
Figura 53 – Médias (CE, pH, T e Eh) das águas subterrâneas da região de Belém medidos em campo nas duas campanhas de amostragem.	119
Figura 54 – Diagramas de <i>Piper</i> para amostras da primeira e segunda campanhas.	122
Figura 55 – Distribuição dos diagramas de <i>Stiff</i> para amostras da primeira campanha.	123
Figura 56 – Distribuição dos diagramas de <i>Stiff</i> para amostras da segunda campanha.	124
Figura 57 – Distribuição dos tipos hidroquímicos para amostras da primeira campanha.	125
Figura 58 – Distribuição dos tipos hidroquímicos para amostras da segunda campanha.	126
Figura 59 – Dendrograma das amostras de águas subterrâneas da região de Belém (1ª campanha de amostragem).	128
Figura 60 – Distribuição dos grupos hidroquímicos identificados nas águas subterrâneas da região de Belém nas duas campanhas de coleta.	129
Figura 61 – Mapas de isovalores de CE das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.	132
Figura 62 – Mapas de isovalores de STD das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.	133
Figura 63 – Mapas de isovalores de pH das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.	134
Figura 64 – Mapas de isovalores de HCO ₃ das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.	135
Figura 65 – Mapas de isovalores de Sódio das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.	136
Figura 66 – Mapas de isovalores de Cálcio das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.	137
Figura 67 – Mapas de isovalores de Cloreto das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.	138
Figura 68 – Mapas de isovalores do íon Nitrato das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.	139
Figura 69 – Mapas de isovalores de Sulfato das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.	140
Figura 70 – Mapas de isovalores de Ferro das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.	142

Figura 71 – Mapas de isovalores de Manganês das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragem.....	143
Figura 72 – Mapa de localização dos pontos de coleta de água para análise de Conteúdo Bacteriológico na região de Belém.	145
Figura 73 – Relação de $\delta^{18}\text{O}$ e δD para as amostras de águas coletadas na região de Belém.	146
Figura 74 – Distribuição de $\delta^{18}\text{O}$ e δD nas águas subterrâneas da região de Belém.....	147
Figura 75 – Mapas de distribuição de ^{14}C (Idade e PMC- porcentagem de carbono moderno) dos pontos de coleta de água subterrânea na região de Belém.	150
Figura 76 – Mapa de localização e classificação das análises de $\delta^3\text{H}$ dos pontos de coleta de água subterrânea na região de Belém.	151

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Área de ocorrência dos sistemas aquíferos na região de Belém	18
Quadro 2 – Identificação, localização e profundidade das perfilagens geofísicas analisadas.	23
Quadro 3 – Espessura dos aquíferos com base em dados de perfilagem geofísica.	31
Quadro 4 – Espessuras dos aquíferos Barreiras e Pirabas.....	36
Quadro 5 – Área de drenagem e período de monitoramento das estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Guamá, fora da área de estudo.....	62
Quadro 6 – Vazões específicas das estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Guamá, fora da área de estudo.....	65
Quadro 7 – Precipitações médias anuais nos municípios próximos à área de estudo.	67
Quadro 8 – Precipitação média total, escoamento de base e coeficiente de infiltração estimados para a região de Belém	70
Quadro 9 – Recargas totais dos sistemas aquíferos terciários da região de Belém	72
Quadro 10 – Características hidráulicas do Sistema Aquífero Barreiras.....	77
Quadro 11 – Espessuras, em metros, de rochas permeáveis e impermeáveis dos aquíferos Barreiras e Pirabas avaliadas com base em perfilagens geofísicas de poços.....	78
Quadro 12 – Reservas hídricas drenáveis permanentes do Sistema Aquífero Barreiras	79
Quadro 13 – Reservas hídricas totais do Sistema Aquífero Barreiras	79
Quadro 14 – Características hidráulicas do Sistema Aquífero Pirabas	80
Quadro 15 – Reservas hídricas drenáveis permanentes do Sistema Aquífero Pirabas.....	80
Quadro 16 – Reservas hídricas drenáveis permanentes dos aquíferos terciários da região de Belém.....	81
Quadro 17 – Disponibilidades hídricas dos aquíferos terciários da região de Belém.....	84
Quadro 18 – Índices de vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos e seus respectivos fatores de ponderação.....	86
Quadro 19 – Definição das classes de vulnerabilidade GOD	89
Quadro 20 – Classificação dos problemas de qualidade da água subterrânea.	96
Quadro 21 – Classificação das fontes de contaminação pontuais segundo o sistema <i>POSH</i>	98
Quadro 22 – Fontes de contaminação pontuais e classificação <i>POSH</i> adaptada.	99
Quadro 23 – Valores adotados para classificação do risco potencial de contaminação.	101
Quadro 24 – Classificação do perigo de contaminação em função da vulnerabilidade natural dos aquíferos e do risco potencial de contaminação.	106

SUMÁRIO

7	AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA	13
7.1	SISTEMAS AQUÍFEROS	17
7.1.1	<i>Definição dos Sistemas Aquíferos</i>	17
7.1.2	<i>Área de Ocorrência</i>	18
7.1.3	<i>Arcabouço de subsuperfície da sucessão terciária-quadernária</i>	19
7.1.4	<i>Distribuição das espessuras dos aquíferos</i>	32
7.1.5	<i>Potenciometria</i>	40
7.1.6	<i>Natureza dos Sistemas Aquíferos</i>	47
7.2	POTENCIALIDADES	48
7.2.1	<i>Potencialidades do Sistema Aquífero Pirabas</i>	51
7.2.2	<i>Potencialidades do Sistema Aquífero Barreiras</i>	54
7.3	AVALIAÇÃO DA RECARGA	57
7.3.1	<i>Áreas de Recarga e Descarga</i>	58
7.3.2	<i>Avaliação da Recarga dos Aquíferos Livres</i>	61
7.3.3	<i>Avaliação da Recarga dos Aquíferos Confinados</i>	72
7.3.4	<i>Recarga Total</i>	72
7.4	AVALIAÇÃO DAS RESERVAS SUBTERRÂNEAS	73
7.4.1	<i>Avaliação das Reservas Subterrâneas do Sistema Aquífero Barreiras</i>	76
7.4.2	<i>Avaliação das Reservas Subterrâneas do Sistema Aquífero Pirabas</i>	79
7.4.3	<i>Reservas Subterrâneas Totais</i>	81
7.5	AVALIAÇÃO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS SUBTERRÂNEAS	82
7.5.1	<i>Disponibilidade da Reserva Renovável</i>	83
7.5.2	<i>Disponibilidade da Reserva Permanente</i>	84
7.5.3	<i>Disponibilidades Hídricas Totais</i>	84
7.6	VULNERABILIDADE E PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	85
7.6.1	<i>Vulnerabilidade Natural</i>	85
7.6.2	<i>Perigo de Contaminação</i>	95
7.7	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL	108
8	CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	114
8.1	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES	114
8.1.1	<i>Resultados dos Parâmetros Medidos em Campo</i>	118
8.1.2	<i>Representatividade dos Resultados Obtidos</i>	119
8.1.3	<i>Classificação das Águas Subterrâneas</i>	120

8.1.4	<i>Análise Estatística</i>	127
8.1.5	<i>Análise Estatística Multivariada</i>	127
8.2	MAPAS DE ZONEAMENTO HIDROGEOQUÍMICO	130
8.3	MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE FERRO E MANGANÊS	141
8.4	PARÂMETROS ESPECÍFICOS	144
8.4.1	<i>Metais Pesados</i>	144
8.4.2	<i>Índices de Fenóis</i>	144
8.4.3	<i>BTEX</i>	144
8.4.4	<i>Conteúdo Bacteriológico</i>	144
8.5	ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE OXIGÊNIO E HIDROGÊNIO (DEUTÉRIO)	146
8.6	ISÓTOPOS RADIOATIVOS DE HIDROGÊNIO (TRÍTIO) E CARBONO 14	148
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
	ANEXOS	160

7 AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

A área de estudo definida neste projeto encerra os municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Bárbara do Pará e Santa Izabel do Pará, e compreende área de 2.536,9 km² de acordo com dados do IBGE, incluindo as porções ocupadas por corpos de água superficiais pertencentes ao complexo flúvio-estuarino, furos, igarapés e paranás.

A avaliação hidrogeológica, contudo, foi embasada no conhecimento das unidades geológicas aflorantes, constituídas pelas formações Pirabas, Barreiras e Pós Barreiras, distribuídas em 1.853 km². A unidade geológica anterior a essa sucessão identificada neste estudo foi definida como “Pré Pirabas” e não foi considerada para fins de avaliação hidrogeológica.

A geologia da região de Belém e adjacências inclui depósitos cenozoicos das formações Pirabas (Neo-Oligoceno/Eomioceno), Barreiras (Meso a Neomioceno) e coberturas sedimentares inconsolidadas designadas Pós-Barreiras, acumuladas no Plio-Pleistoceno. Em sua maioria representam uma variedade de fácies carbonáticas a siliciclásticas originadas em ambiente variando entre marinho transicional a plataformal, depositadas no contexto estrutural da Plataforma Bragantina (Figura 2).

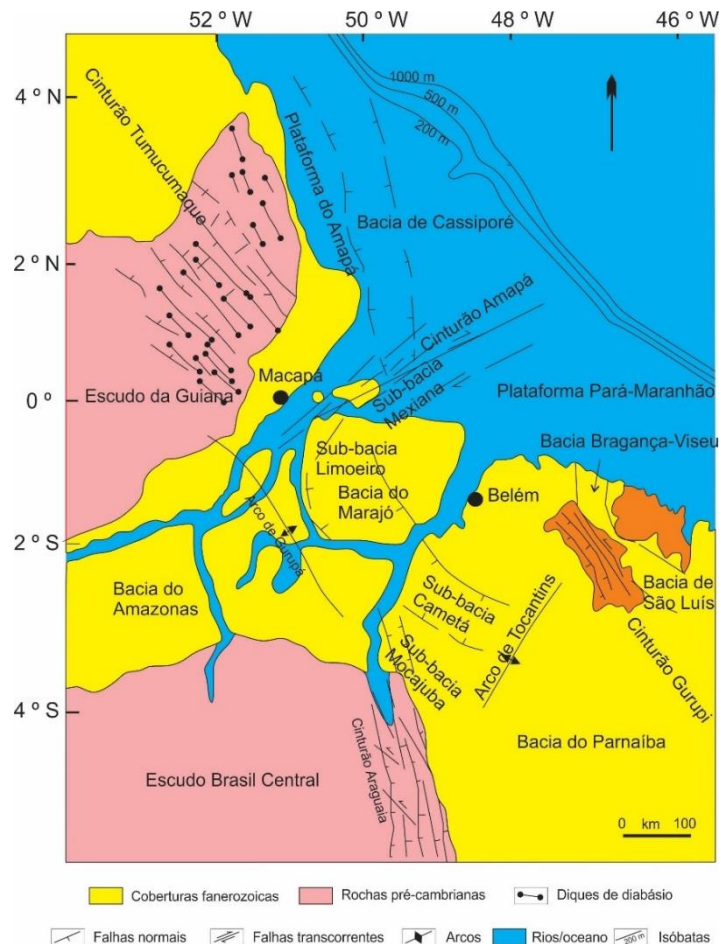


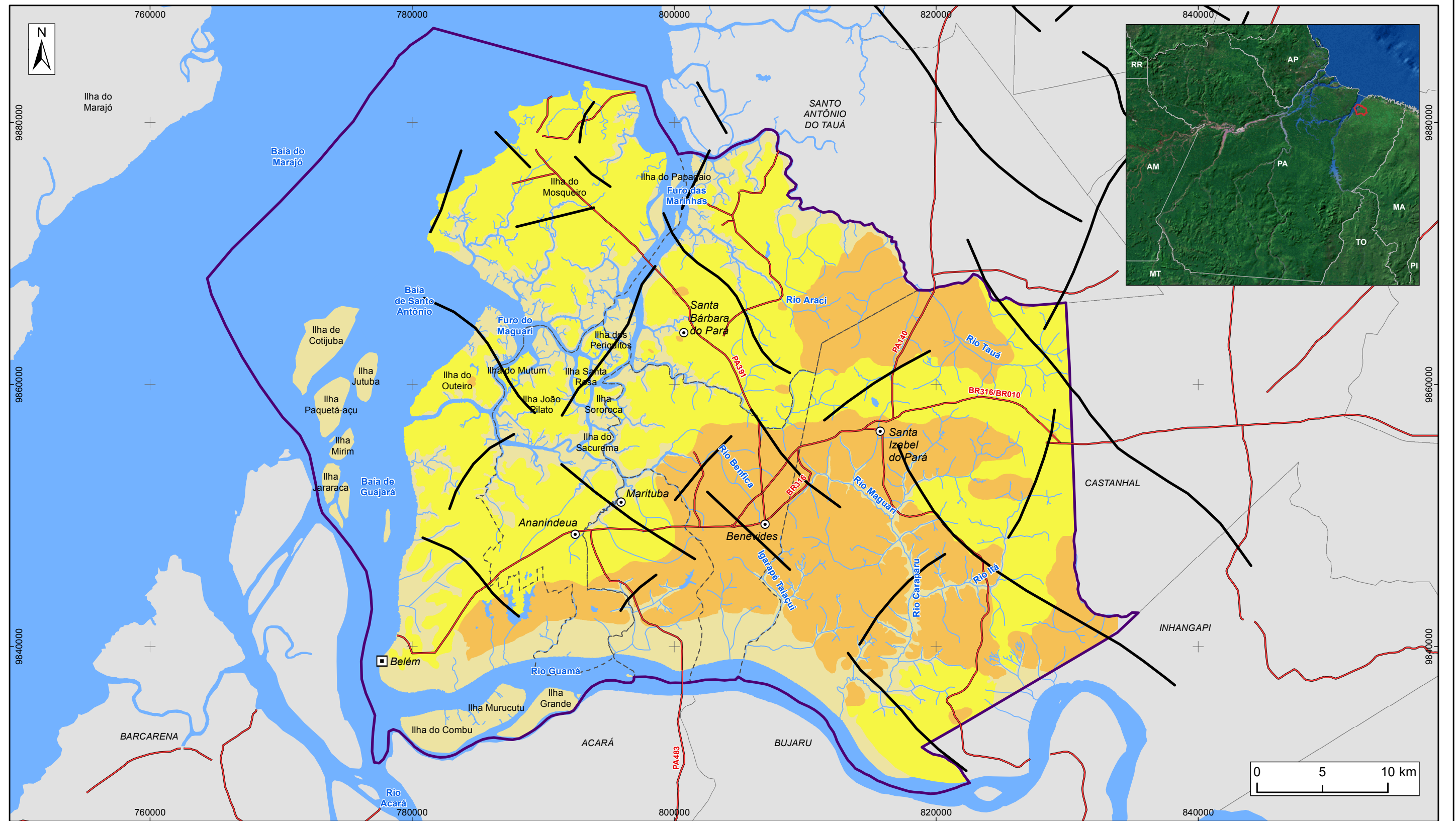
Figura 2 – Arcabouço tectônico da porção norte do Brasil interpretado com base em dados gravimétricos, magnéticos e sísmicos (COSTA *et al.*, 2002).

A Formação Pirabas compreende uma sucessão carbonática contendo intercalações secundárias de folhelhos negros a esverdeados e arenitos amarelados (PETRI, 1957; FERREIRA, 1966). Segundo Góes (1990), subdivisões litofaciológicas propostas para a Formação Pirabas não apresentam posicionamento estratigráfico único, nem são restritas geograficamente, considerações que apontam para processo de recorrência de fácies na sedimentação da unidade. Essa unidade ocorre somente em subsuperfície na área estudada, recoberta pela Formação Barreiras.

A Formação Barreiras compreende a unidade litoestratigráfica superposta à Formação Pirabas, caracterizada por depósitos siliciclásticos de cores variegadas (SÁ, 1969). Aflora nas porções sudoeste, sudeste e norte da área de estudo e mostra-se associada a crostas lateríticas ferruginosas (Figura 3). Apesar da ampla distribuição geográfica, o detalhamento dos depósitos da Formação Barreiras é, ainda, inadequado à formulação de modelos paleoambientais e, principalmente, à sua correlação em escala continental (ROSSETI, 2006).

Os sedimentos Pós-Barreiras (Figura 3) correspondem a depósitos de latossolos amarelados e arenosos, finos a médios, em geral maciços, sobrepostos à Formação Barreiras (ROSSETI *et al.*, 2013). Afloram nas porções nordeste, centro e noroeste da área e incluem depósitos pleistocênicos de paleocanais fluviais, eólicos e praias; e depósitos holocênicos representados por aluviões, colúvios e elúvios. Apesar de sua ampla distribuição, suas espessuras não ultrapassam 30 metros (TATUMI *et al.*, 2008).

A deposição da sucessão cretácea-terciária foi controlada por tectônica e variações climáticas. Falhas normais NW-SE, inclinadas para NE, e falhas transcorrentes NE-SW, que funcionaram como zonas de transferência associadas ao último episódio de manifestação extensional na margem equatorial brasileira (COSTA *et al.*, 1993), propiciaram o condicionamento estrutural. Variações eustáticas, provocadas por mudanças climáticas, geraram flutuações do nível relativo do mar e afetaram o padrão de sedimentação (ROSSETTI, 2001).



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual
- ⊙ Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Rodovia
- Estrutura geológica
- ☪ Massa d'água
- ⊕ Área de Estudo
- - - Limite municipal
- Unidades Geológicas**
- Qafm - Depósitos Argilosos Flúvio-marinhos
- N34pb - Sedimentos Pós-Barreiras, Depósitos Aluviais, Eólicos e Lateríticos
- N12b - Barreiras, Sedimentos Argilosos, Arenosos e Conglomeráticos

Figura 3 – Mapa geológico da região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovias: SEMAS/PA
 Limites políticos: IBGE
 Hidrografia/Geologia: CPRM

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_3_Mapa_Geologico_A3
Escala:	1:290.000

7.1 SISTEMAS AQUÍFEROS

Sistema aquífero pode ser definido como uma ou mais unidades ou formações geológicas que armazenam, transmitem e produzem quantidade significativa de água. Como as formações geológicas não são homogêneas e entremeiam porções mais e menos permeáveis, ou ainda impermeáveis, num conceito mais amplo os sistemas aquíferos podem incluir aquíferos e aquíferos em escala local.

Os sistemas aquíferos são agrupados em duas categorias principais de unidades hidroestratigráficas, distinguidas conforme a natureza litológica de seus terrenos e suas propriedades hidráulicas: aquíferos cristalinos, permeáveis por fraturamento, e aquíferos sedimentares, permeáveis predominantemente por porosidade granular.

Os sistemas aquíferos identificados na região de Belém e adjacências são formados por rochas sedimentares terciárias-quadernárias que jazem sobre substrato de idade, provavelmente, cretácea. Esses sistemas estão individualizados em aquíferos que compreendem coberturas recentes (aluvões, colúvios e elúvios), depósitos inconsolidados identificados como Pós-Barreiras e rochas sedimentares das formações Barreiras e Pirabas, e são reconhecidos pelos mesmos nomes atribuídos às unidades litoestratigráficas que os encerram.

7.1.1 Definição dos Sistemas Aquíferos

Os aquíferos da região de Belém foram reunidos em dois sistemas principais: Sistema Aquífero Barreiras e Sistema Aquífero Pirabas.

Os aquíferos presentes nas unidades Barreiras e Pós-Barreiras foram tratados como um sistema único, aqui designado apenas de Sistema Aquífero Barreiras. As razões que nortearam a aglutinação destes dois aquíferos, individualizados em estudos anteriores, foram: dificuldade de distinção da unidade Pós-Barreiras em campo, nos levantamentos geofísicos, em dados cadastrais de poço e em perfisagens geofísicas de poços; reduzida expressividade da unidade Pós-Barreiras em termos de potencial hídrico; vínculo genético com a Formação Barreiras; e existência de conexão hidráulica entre as duas unidades, como atestado por CPRM (2002).

O Sistema Aquífero Pirabas é subdividido, informalmente, em porção superior e porção inferior, como relatado em diversos estudos. À porção inferior são atribuídas as melhores características hidráulicas e hidroquímicas desse aquífero. Entretanto, a baixa

densidade, distribuição irregular e escassez de informações não permitem discorrer separadamente sobre cada uma dessas porções. Referências são feitas às porções superior e inferior ao longo do texto, mas o Sistema Aquífero Pirabas não foi desmembrado neste estudo.

7.1.2 Área de Ocorrência

O Sistema Aquífero Barreiras, composto por sedimentos das coberturas recentes e das unidades Pós-Barreiras e Barreiras, distribui-se pelos municípios de Ananindeua, Belém, Benevides, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Santa Izabel do Pará, onde ocupa área total de 1.893 km² (Quadro 1) dos 2.536 km² da área de estudo. As áreas submersas desse sistema não foram contabilizadas.

Quadro 1 – Área de ocorrência dos sistemas aquíferos na região de Belém

Sistema Aquífero	Unidade Geológica	Área no município (km ²)						Total
		Ananindeua	Belém	Benevides	Marituba	Santa Bárbara do Pará	Santa Izabel do Pará	
Barreiras	Coberturas recentes	60,45	197,57	30,19	27,04	53,26	79,42	447,93
	Pós-Barreiras	98,17	272,39	47,29	32,29	158,58	256,46	865,18
	Barreiras	10,95	23,6	102,46	36,71	47,49	359,12	580,33
	Total	169,57	493,56	179,94	96,04	259,33	695	1893,44
Pirabas	Pirabas	169,57	493,56	179,94	96,04	259,33	695	1893,44

Os aquíferos formados pelas coberturas sedimentares recentes ocupam área de cerca de 448 km², em porções do terreno associadas aos corpos de água superficiais e porções insulares. Predominam no Município de Belém, onde distribuem-se por 198 km², correspondendo a 44% da área total de ocorrência desse aquífero (Figura 4).

Os aquíferos constituídos pelos sedimentos Pós-Barreiras distribuem-se predominantemente pelos municípios de Belém e Santa Izabel do Pará, onde ocupam área, respectivamente, de 272 km² e 256 km², correspondendo a mais de 60% da área de ocorrência da unidade na área de estudo. Dentre as unidades geológicas aflorantes, esta é a que apresenta maior área de exposição, distribuindo-se por 865 km² (Figura 4).

Os aquíferos formados pelos sedimentos da Formação Barreiras afloram em 580 km² da região de Belém. Predominam amplamente no Município de Santa Izabel do Pará, onde distribuem-se por 359 km², correspondendo a 62% do total da área de afloramentos da Formação Barreiras (Figura 4).

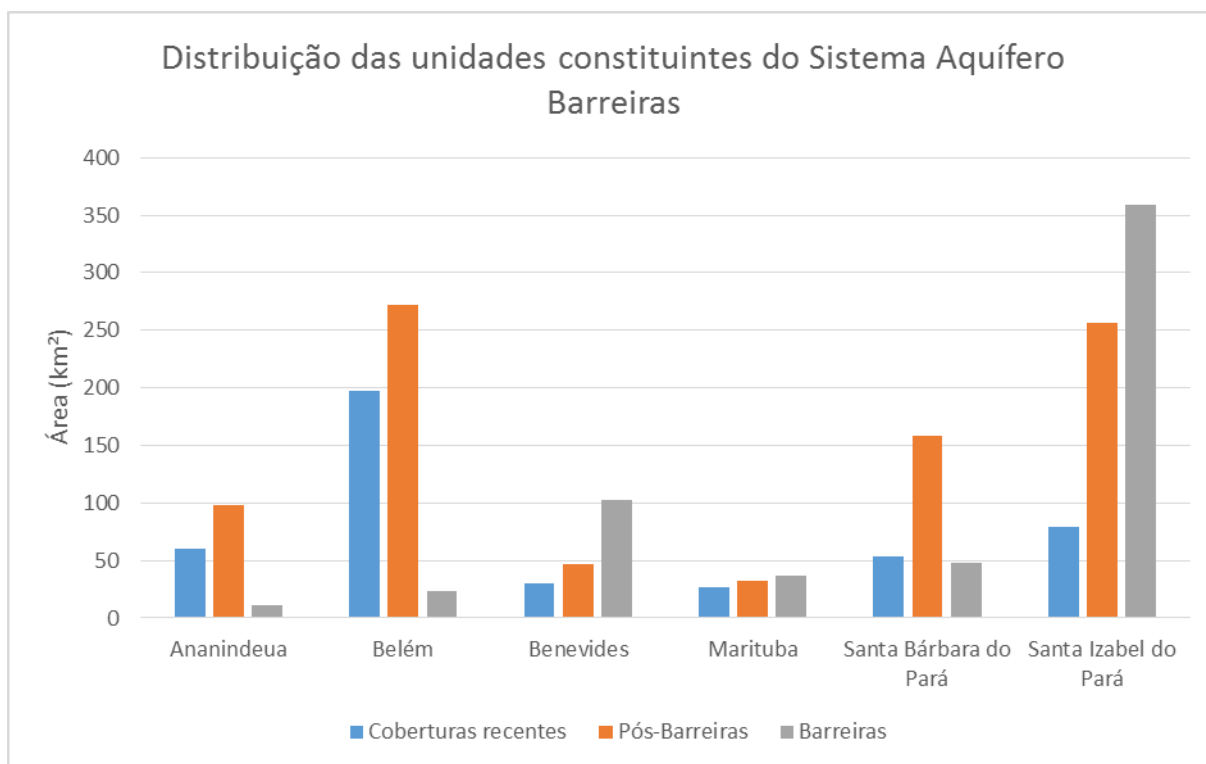


Figura 4 – Distribuição em superfície das unidades geológicas constituintes do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém.

O Sistema Aquífero Pirabas é formado pelos sedimentos da unidade litoestratigráfica homônima e ocorre somente em subsuperfície, encimado pelo Sistema Aquífero Barreiras. Esse sistema está presente nos 1.893 km² da área emersa (Quadro 1).

7.1.3 Arcabouço de subsuperfície da sucessão terciária-quadernária

O arranjo e distribuição dos reservatórios, conexões hidráulicas, espessuras, heterogeneidades e tipo de substrato (base do sistema) ou de cobertura (topo do sistema) são características que compõem o arcabouço dos aquíferos e determinam sua natureza.

A distribuição, extensão e relações de contato dos aquíferos, em superfície, foram esclarecidas a partir de consultas a mapas geológicos disponíveis. O comportamento dos reservatórios aquíferos em subsuperfície, por sua vez, foi investigado com base em dados de poços profundos do cadastro do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS/CPRM; em levantamentos geofísicos pelo método da eletrorresistividade; e em perfilagens geofísicas de poços perfurados na área.

Os dados cadastrais de poços profundos representam uma das fontes de informação mais importantes nos estudos de subsuperfície. Todavia, as descrições de amostras de calha de poços são imprecisas e subjetivas, dificultando a delimitação de topo e

base das camadas aquíferas. Do mesmo modo, interpretações baseadas em Sondagens Elétricas Verticais (SEVs) podem apresentar o mesmo tipo de dificuldade na definição desses contatos, em razão da baixa resolução vertical da ferramenta. Ao contrário, as ferramentas de perfilagem geofísica de poços apresentam resolução para distinguir aquíferos com espessuras de menos de um metro, o que as tornam essenciais nos estudos de subsuperfície. Além disso, as análises de sucessões fornecem indicações paleoambientais com base nos padrões granulométricos verticais, definidos pelas curvas dos perfis geofísicos (SELLEY, 1978).

Perfil geofísico pode ser definido como a representação gráfica entre a profundidade do poço e qualquer propriedade petrofísica registrada por equipamentos apropriados. Esses equipamentos usam sensores especiais que se deslocam dentro do poço, puxados por cabos elétricos, e registram continuamente as propriedades físicas do meio (PAULA E SILVA, 2003).

As curvas geofísicas normalmente disponíveis na prospecção de água subterrânea, calibradas no padrão API (*American Petroleum Institute*), são o Potencial Espontâneo (SP), Resistividade Normal (SN), Resistividade Induzida (IL), Raios Gama (RG API) e Sônico Compensado (BHC). Esses perfis geofísicos registram as propriedades elétricas, eletromagnéticas, radioativas e acústicas das rochas, as quais são utilizadas para cálculo da porosidade, permeabilidade, salinidade das águas intersticiais, conteúdo de argila, etc. (PAULA E SILVA, 2003).

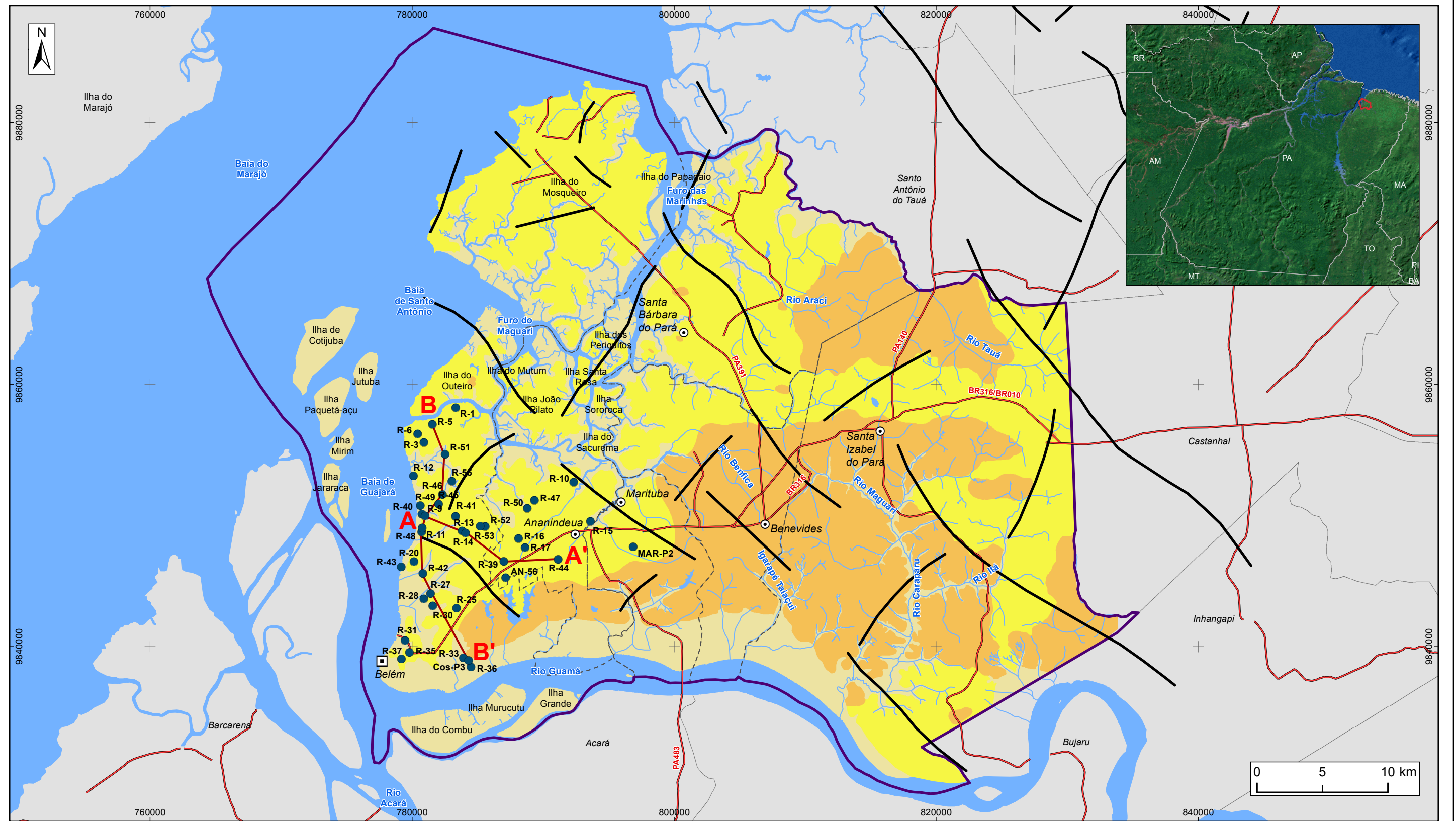
As curvas geofísicas normalmente disponíveis em ferramentas de perfilagem não calibradas no padrão API consistem de Potencial Espontâneo (SP), Raios Gama (em unidades cps), Resistência (RTC) e Resistividade (RTV 16" e 64"). São ferramentas de pequeno calibre, muito influenciadas pelo diâmetro do poço, tipo de fluido de perfuração, etc., prestando-se tão somente para análises qualitativas.

A curva de Raios Gama registra o conteúdo de elementos radioativos nas rochas. Folhelhos são, em geral, a litologia que mais concentra minerais radioativos, isto porque tendem a fixar o elemento potássio. Evaporitos potássicos e rochas cristalinas ricas em potássio tendem a apresentar elevada radioatividade. Arenitos limpos e calcários possuem baixa radioatividade. Já os arenitos argilosos e siltitos possuem radioatividades intermediárias (PAULA E SILVA, 2003).

A curva de Potencial Espontâneo (SP) registra a diferença de potencial elétrico natural entre um eletrodo móvel ao longo do poço e um eletrodo de potencial fixo, posicionado na superfície do terreno. Havendo diferença na concentração iônica entre a água da formação e o fluido de perfuração e sendo as rochas permeáveis, haverá migração de íons da solução mais concentrada para a menos concentrada, originando uma corrente elétrica. As deflexões do SP indicam camadas permeáveis, todavia, havendo igualdade de salinidade entre os referidos fluidos, não haverá deflexão do SP mesmo frente a camadas permeáveis (PAULA E SILVA, 2003).

As curvas de resistividade (RTV 16" e 64"; SN; IL; RTC) permitem identificar aquíferos portadores de água doce e rochas compactas (pouco porosas) pelas resistividades muito altas; aquíferos portadores de água salgada pelas resistividades próximas às das argilas; camadas argilosas pelas resistividades mais baixas. As curvas de resistividade induzida (IL) fornecem a resistividade das camadas com bastante precisão e podem ser utilizadas para análises quantitativas. As curvas de resistência, por sua vez, podem ser usadas apenas para análises qualitativas (PAULA E SILVA, 2003).

Neste estudo, foram levantadas 42 perfilagens geofísicas de poços para captação de água subterrânea na área de Belém e adjacências, sendo apenas uma (AN-56) calibrada no padrão API (Figura 5, Quadro 2 e Anexo I).



LEGENDA

- Capital Estadual
 - ⊙ Sede Municipal
 - Perfilagens geofísicas
 - Seções com perfis geofísicos
 - Estrutura geológica
 - ~ Hidrografia
 - Rodovia
 - Massa d'água
 - Área de Estudo
 - Limite municipal
- Unidades Geológicas**
- Qafm - Depósitos Argilosos Flúvio-marinhos
 - N34pb - Sedimentos Pós-Barreiras, Depósitos Aluviais, Eólicos e Lateríticos
 - N12b - Barreiras, Sedimentos Argilosos, Arenosos e Conglomeráticos

Figura 5 – Localização das seções e perfilagens geofísicas analisadas



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovias: SEMAS/PA
 Limites políticos: IBGE
 Hidrografia/Geologia: CPRM. Perfilagens e Seções: ANA/PROFILL

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_5_Localizacao_secoes_perfilagens_analisadas_A3
Escala:	1:290.000

Quadro 2 – Identificação, localização e profundidade das perfilagens geofísicas analisadas.

Número ID	Nome	Coordenadas UTM		Cota (m)	Prof. (m)
		X (m)	Y (m)		
1	R-1	783332	9858226	9,0	80,0
3	R-3	780898	9855580	17,4	285,0
5	R-5	781554	9856972	15,1	266,0
6	R-6	780421	9856226	16,4	268,0
9	R-9	780757	9850109	2,0	300,0
10	R-10	792337	9852535	13,4	155,0
11	R-11	780731	9848754	15,9	290,0
12	R-12	780109	9853014	9,3	110,0
13	R-13	783819	9848824	19,7	270,0
14	R-14	784096	9848681	17,2	294,0
15	R-15	793608	9849558	18,1	96,0
16	R-16	788131	9848248	21,7	60,0
17	R-17	788613	9847556	20,2	200,0
20	R-20	779181	9846081	5,6	105,0
25	R-25	783394	9842921	19,4	75,0
27	R-27	781416	9844053	4,2	265,0
28	R-28	780908	9843640	9,4	126,0
30	R-30	781578	9843112	9,4	88,0
31	R-31	779474	9840454	7,5	55,0
33	R-33	783925	9839142	7,2	40,0
35	R-35	779803	9839565	17,9	38,0
36	R-36	784500	9838460	3,0	260,0
37	R-37	779200	9839069	14,8	60,0
39	R-39	787007	9846502	29,2	285,0
40	R-40	780987	9849974	6,0	300,0
41	R-41	783322	9849940	16,6	275,0
42	R-42	780836	9845584	4,7	275,0
43	R-43	780157	9846489	15,0	160,0
44	R-44	791141	9846648	20,0	271,0
45	R-45	782019	9850892	13,3	285,0
46	R-46	782316	9851612	16,0	270,0
47	R-47	788782	9850553	23,8	280,0
48	R-48	780776	9849061	16,5	130,0
49	R-49	780622	9850749	20,0	98,0
50	R-50	789332	9851167	17,5	86,0
51	R-51	782527	9854686	13,4	265,0
52	R-52	785581	9849174	14,7	50,0
53	R-53	785204	9849185	16,6	43,0
55	R-55	783041	9852622	5,8	126,0
56	AN-56	787157	9845240	24,0	393,0
57	COS-P3	7843034	9838948	8,4	255,0
58	MAR-P2	796881	9847609	20,0	268,0

Dentre estas, 39 perfilagens foram obtidas do estudo de Mendes (2000) e disponibilizadas em arquivo DAT, enquanto as restantes foram digitalizadas. Posteriormente, foram abertas em gráficos utilizando o *software* Microsoft Excel® e desenhadas com o uso do *software* CorelDraw® para análises e correlações.

As perfilagens não calibradas no padrão API constaram de 3 curvas básicas: Potencial Espontâneo (SP), Raios Gama (em unidades cps) e Resistência (RTC). A perfilagem calibrada no padrão API (AN-56) foi realizada no poço cadastrado no SIAGAS sob número 1500001101 (PROSANEAR-2-COQUEIRO), em Ananindeua, e constou das curvas de Raios Gama (RG-API), Resistividade Normal Curta (SN) e Resistividade Induzida (IL).

A perfilagem calibrada no padrão API (Figura 6), identificada com a sigla AN-56, forneceu subsídios para análise litológica, interpretação litoestratigráfica e correlação com as demais perfilagens. Seu exame permitiu a identificação de 3 unidades litoestratigráficas no intervalo compreendido entre a superfície do terreno e a profundidade final de 393 m do poço.

O intervalo inferior, situado entre 264 m e 393 m, compreende uma sucessão composta por arenitos limpos, arenitos argilosos, siltitos, argilitos e folhelhos. Os arenitos possuem granulometria média a grossa, são branco avermelhados, em parte argilosos e com níveis silicificados, distribuídos em camadas de espessura variável, desde 5 m a 20 m. Intercalam-se a esses arenitos camadas de sedimentos pelíticos compostos por folhelhos e argilitos de cores verde acinzentada a amarela amarronzada, também com espessuras variando entre 5 m e 20 m. Esse intervalo pode corresponder à superfície de discordância que marca o limite Cretáceo/Terciário, conforme proposta de Costa *et al.* (2002), denominado neste estudo de “Pré Pirabas”.

O pacote intermediário que ocorre no intervalo entre 78 m e 264 m de profundidade é representado pela sedimentação terciária correspondente à Formação Pirabas. O contato com a unidade superior, representadas pela Formação Barreiras, tem sido marcado numa camada de argila arenosa cinza esverdeada em diversos estudos que se utilizaram de descrições litológicas extraídas de poços profundos. Como observado na Figura 6, camadas de argila cinza esverdeada são recorrentes ao longo de todo o perfil litoestratigráfico, não sendo exclusividade de nenhuma formação. A análise das perfilagens geofísicas mostra que o topo da Formação Pirabas é melhor definido pela primeira camada de arenito, abaixo da qual predominam sedimentos psamíticos.

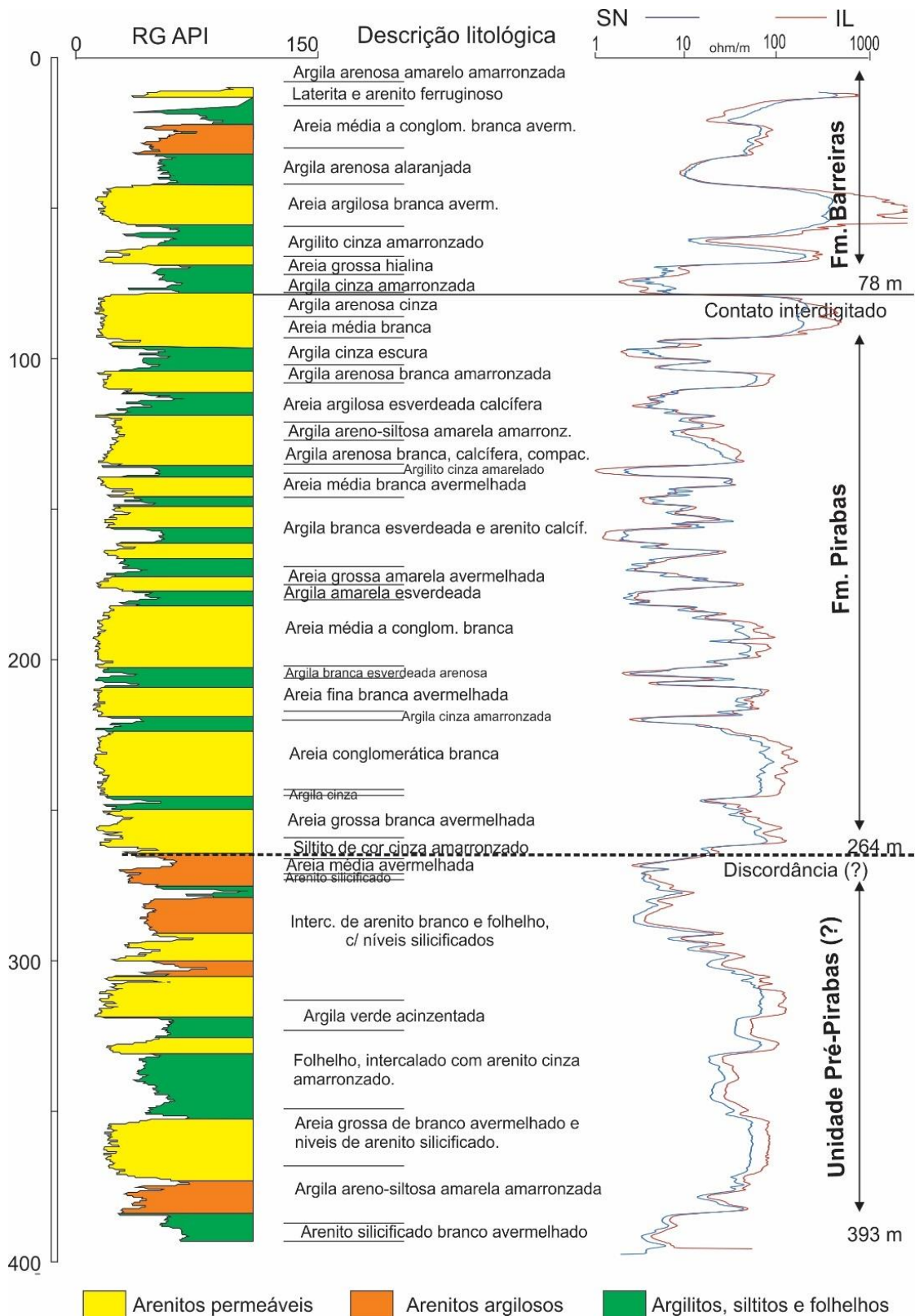


Figura 6 – Interpretação litológica e litoestratigráfica de perfuração calibrada (padrão API) AN-56 do poço SIAGAS n° 1500001101 (PROSANEAR-2-COQUEIRO). Descrição litológica de acordo com dados cadastrais contidos no relatório de perfuração.

A Formação Pirabas apresenta predominância de sedimentos arenosos na sua metade inferior e intensificação da frequência de camadas pelíticas na metade superior, característica que justificou a subdivisão informal da unidade em Pirabas Superior e Pirabas Inferior, respectivamente, para diferenciar as duas sucessões. A unidade Pirabas nesse poço apresentou espessura total de 186 m.

A perfilagem AN-56 revelou uma sucessão predominantemente arenosa na porção inferior da Formação Pirabas, composta por arenitos de granulometria média a conglomerática, cores brancas e branca avermelhadas, em pacotes com espessuras de 15 m a 20 m, intercalados por pacotes de argila branca esverdeada a cinza amarronzada, de espessuras variando de 5 m a 7 m. A espessura desta sucessão arenosa é de 82 m.

A porção superior da Formação Pirabas apresenta camadas de arenito de cores branca e amarela avermelhadas e branca esverdeadas, granulometria média a grossa, em pacotes de espessura de 5 m a 18 m, intercalados com camadas de argila arenosa cinza, amarela, marrom, branca e verde, em parte calcífera, com espessuras da ordem de 3 m a 7 m. As camadas pelíticas são mais frequentes e representam cerca de 30% da espessura da porção superior da Formação Pirabas, conforme descritas no poço nº 1500001101 (PROSANEAR-2-COQUEIRO).

O pacote superior da sucessão terciária da Plataforma Bragantina é representado pela Formação Barreiras, que compreende neste poço um conjunto sedimentar com espessura total de 78 m, composto por areias médias a conglomeráticas de cores laranja, branca avermelhada e hialinas, em parte argilosas, intercaladas por camadas de argila arenosa cinza amarronzada e alaranjada. Na perfilagem AN-56, é nítida a predominância da sedimentação pelítica na Formação Barreiras, todavia, a unidade apresenta extrema variação litológica em sua área de ocorrência, podendo mostrar predominância de sedimentos arenosos em outros pontos da bacia, como pode ser observado na Figura 7.

As perfilagens R3, R6 e R14 mostram predominância de sedimentos arenosos, enquanto as perfilagens R5, R44 e R15 mostram predominância de sedimentos pelíticos, na unidade Barreiras. Essa situação demonstra a dificuldade de definição do contato entre as formações Barreiras e Pirabas, tendo como base somente descrições de amostras de calha e dados de Sondagens Elétricas Verticais (SEVs).

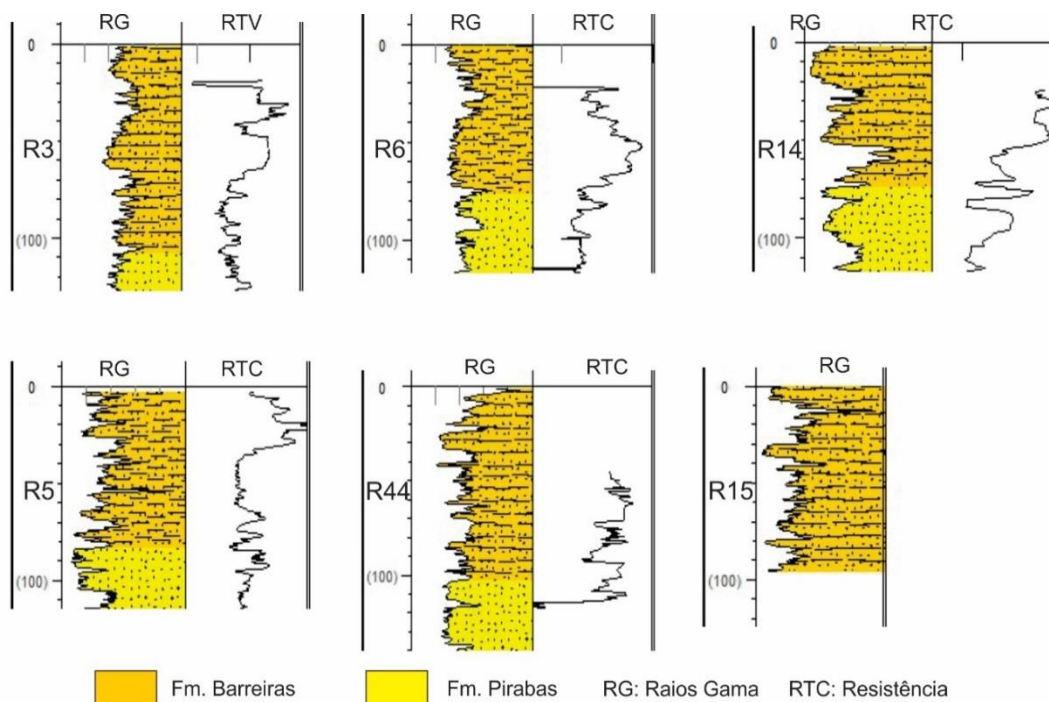


Figura 7 – Contatos entre as formações Barreiras e Pirabas constatados em perfisagens geofísicas. Localização das perfisagens na Figura 5.

As relações de contato entre as unidades terciárias ocorrentes na Plataforma Bragantina vêm sendo gradualmente esclarecidas. Dados palinológicos e faciológicos permitiram inferir influência marinha na deposição da Formação Barreiras (ROSSETTI *et al.*, 1989, 1990), sugerindo interdigitação desta unidade com a Formação Pirabas (ARAI *et al.*, 1988; GÓES *et al.*, 1990). A análise da arquitetura de fácies, em associação com o reconhecimento de superfícies estratigráficas-chaves, demonstrou que as formações Pirabas e Barreiras formam uma sucessão geneticamente relacionada, ligada ao desenvolvimento de uma mesma sequência deposicional (ROSSETTI, 2001, 2004, 2006; ROSSETTI & SANTOS Jr., 2004; ROSSETTI & GÓES, 2004). Por outro lado, o contato brusco observado na maioria das perfisagens analisadas neste estudo e a irregularidade marcante da superfície de contato entre as formações Pirabas e Barreiras sugerem uma discordância erosiva (disconformidade).

O contato superior da Formação Barreiras com os sedimentos Pós-Barreiras não é discernível nas perfisagens geofísicas. Arenitos ferruginosos e níveis de crostas lateríticas têm sido considerados como Pós-Barreiras (ROSSETTI, 2001; OLIVEIRA & SILVA, 2011).

Para visualizar o comportamento estratigráfico-estrutural das unidades litoestratigráficas da região de Belém e adjacências foram elaboradas duas seções com perfis geofísicos: seção A-A', orientada aproximadamente E-W (Figura 8); e seção B-B', orientada

aproximadamente N-S (Figura 9). Essas seções têm como *datum* a superfície do terreno (profundidade zero), uma vez que as diferenças de altitude dos poços perfilados são pequenas. Prestam-se, portanto, para reconhecimento de movimentações tectônicas de amplitude regional. Os contatos entre as formações foram definidos por correlação com a perfilagem AN-56 (Figura 6). As perfilagens reprocessadas e interpretadas encontram-se no Anexo I.

As duas seções mostram que o substrato da sucessão terciária nesta porção da bacia na Plataforma Bragantina, que talvez represente a discordância Cretáceo/Terciário na bacia, tem um comportamento relativamente nivelado, sem grandes irregularidades, com desníveis máximos de até 1^o entre pontos contíguos. Esse comportamento não corrobora a interpretação de uma intensa estruturação em blocos “altos e baixos” apontada em vários estudos realizados na área. Ao contrário, demonstra que os processos tectônicos na área da Plataforma Bragantina foram manifestadamente brandos, segundo os dados disponíveis.

A espessura da sucessão terciária apresenta certa regularidade, como mostrada nas duas seções, variando entre a mínima de 226 m e a máxima 275 m nos perfis geofísicos (Quadro 3). A característica dessa sucessão sedimentar é a recorrência de fácies arenosas e argilosas, com predomínio ora de uma, ora de outra, principalmente no intervalo compreendido pela Formação Barreiras e porção superior da Formação Pirabas. Via de regra, segundo foi observado, o espessamento de uma formação é “compensado” pelo adelgaçamento da outra.

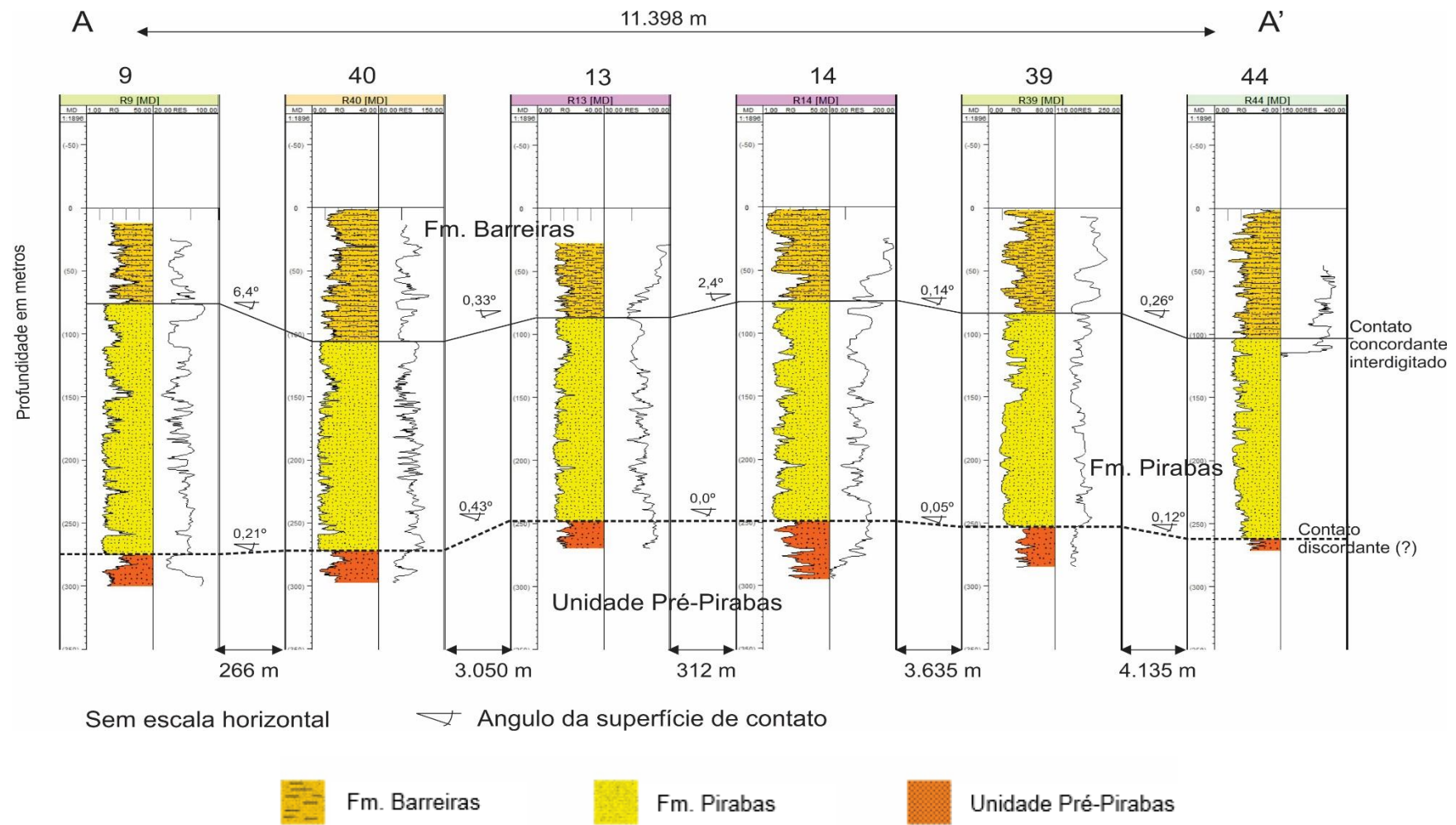


Figura 8 – Seção A-A' elaborada com dados de perfisagens geofísicas. Localização da seção e perfis na Figura 5.

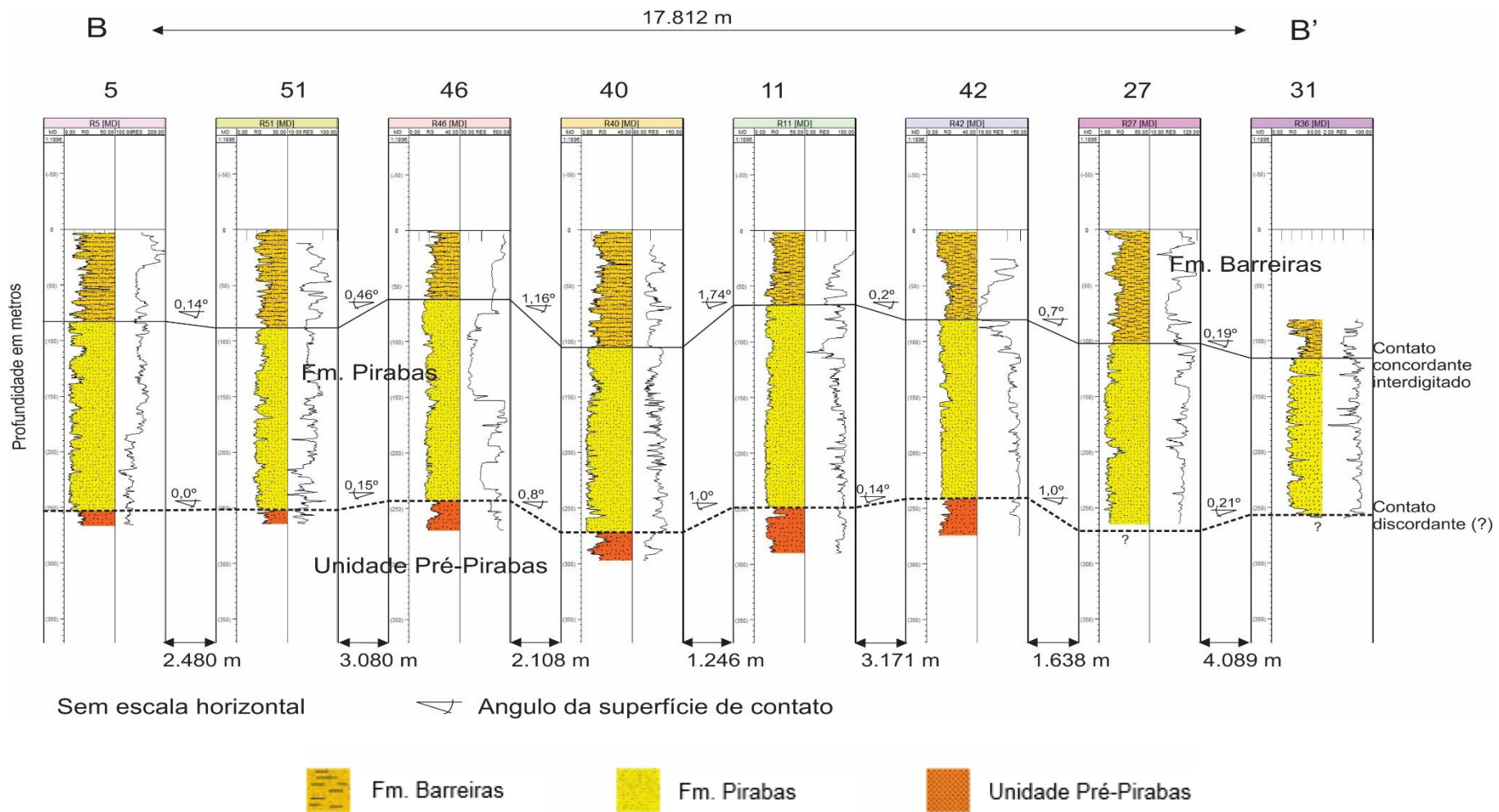


Figura 9 – Seção B-B' elaborada com dados de perfisagens geofísicas. Localização da seção e perfis na Figura 5.

Quadro 3 – Espessura dos aquíferos com base em dados de perfilagem geofísica.

ID	Nome	Coordenadas UTM		Prof. (m)	Cota (m)	Espessuras (m)		
		X (m)	Y (m)			Barreiras	Pirabas	Total
3	R-3	780898	9855580	285	17,37	107	151	258
5	R-5	781554	9856972	266	15,14	84	170	254
6	R-6	780421	9856226	268	16,38	76	182	258
9	R-9	780757	9850109	300	2,00	77	198	275
10	R-10	792337	9852535	155	13,44	72		
11	R-11	780731	9848754	290	15,91	67	181	248
12	R-12	780109	9853014	110	9,28	91		
13	R-13	783819	9848824	270	19,72	86	163	249
14	R-14	784096	9848681	294	17,18	73	175	248
17	R-17	788613	9847556	200	20,23	103		
20	R-20	779181	9846081	105	5,55	77		
25	R-25	783394	9842921	75	19,37	63		
27	R-27	781416	9844053	265	4,20	101		
28	R-28	780908	9843640	126	9,38	101		
30	R-30	781578	9843112	88	9,42	62		
36	R-36	784500	9838460	260	2,98	114	141	255
39	R-39	787007	9846502	285	29,16	83	170	253
40	R-40	780987	9849974	300	6,02	104	168	272
41	R-41	783322	9849940	275	16,56	86	162	248
42	R-42	780836	9845584	275	4,71	79	160	239
43	R-43	780157	9846489	160	15,02	82		
44	R-44	791141	9846648	271	20,03	101	162	263
45	R-45	782019	9850892	285	13,26	137	137	274
46	R-46	782316	9851612	270	16,02	59	182	241
47	R-47	788782	9850553	280	23,76	83	182	265
48	R-48	780776	9849061	130	16,46	70		
49	R-49	780622	9850749	98	20,05	63		
50	R-50	789332	9851167	86	17,50	77		
51	R-51	782527	9854686	265	13,37	90	161	251
55	R-55	783041	9852622	126	5,80	80		
56	AN-56	787157	9845240	393	24,00	78	183	261
57	COS-P3	784304	9838949	255	8,00	48	203	251
58	MAR-P2	796881	9847609	268	20,00	23	203	226

Vale lembrar, todavia, que os dados de perfilagens geofísicas disponíveis estão concentrados na porção oeste da área estudada e que as informações existentes são ainda insuficientes para uma análise regional.

7.1.4 Distribuição das espessuras dos aquíferos

As espessuras dos aquíferos da sucessão terciária-quadernária na Plataforma Bragantina ainda são pouco conhecidas, uma vez que a distribuição e densidade de informações de subsuperfície, prioritariamente constituída por poços, não é uniforme e concentra-se nas áreas mais urbanizadas da região de Belém e municípios adjacentes.

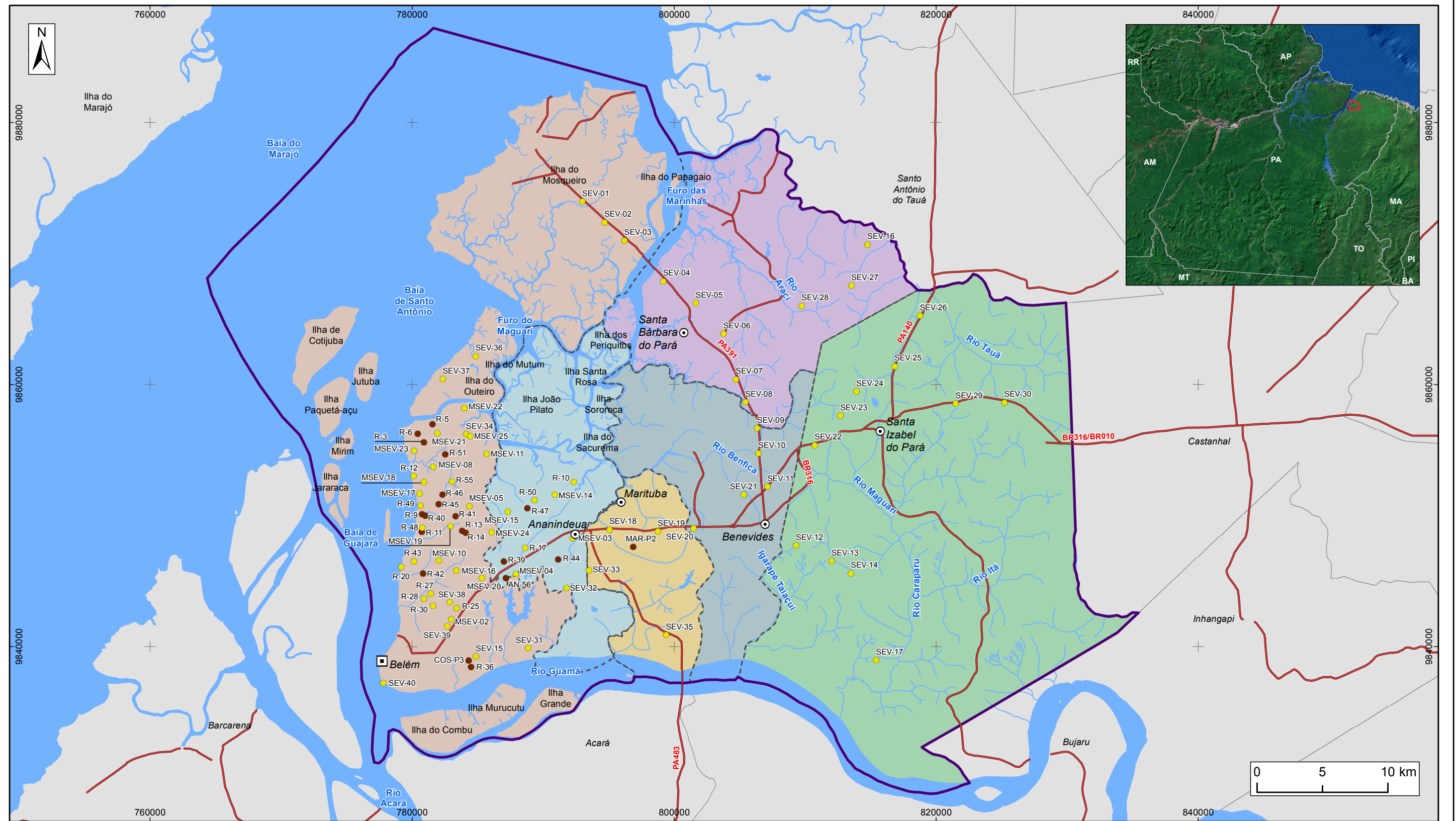
A despeito da distribuição não uniforme e baixa densidade, dados de levantamentos geofísicos de superfície, realizados pelo método da eletrorresistividade (SEV – Sondagens Elétricas Verticais), e de perfilagens de poços foram utilizados para a delimitação do topo e base dos aquíferos terciários.

Para avaliação das espessuras dos sistemas aquíferos Pirabas e Barreiras foram analisados:

- Dados de 59 SEVs que forneceram informações sobre o topo da Formação Pirabas; porém, em apenas 7 SEVs foi possível estimar a base dessa unidade;
- Dados de 42 perfilagens de poços, das quais 33 forneceram informações sobre o topo da Formação Pirabas e 20 sobre a base da unidade.

No geral, os dados geofísicos de SEVs e de perfilagens somaram 92 informações de subsuperfície sobre o topo da Formação Pirabas, mas apenas 27 delas forneceram informações sobre a base dessa unidade. A distribuição desses dados é mostrada na Figura 10.

Embora a distribuição e densidade das informações não sejam ideais, os 92 dados geofísicos puderam ser utilizados para avaliar a espessura do Sistema Aquífero Barreiras. Ressalta-se que, por conta das referidas limitações, a predição de valores divergentes do real em setores com ausência ou insuficiência de dados é uma possibilidade que deve ser considerada na estimativa.



LEGENDA

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ☐ Capital Estadual ⊙ Sede Municipal ● Dados de espessura Barreiras ● Dados de espessura Pirabas — Rodovia ~ Hidrografia ☁ Massa d'água ⊕ Área de Estudo | <p>Município</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ananindeua ■ Belém ■ Benevides ■ Marituba ■ Santa Bárbara do Pará ■ Santa Izabel do Pará |
|--|---|

Figura 10 – Distribuição dos pontos de SEVs e de perfilagens com dados de espessura dos aquíferos Barreiras e Pirabas na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovia: SEMAS/PA. Limites políticos: IBGE
 Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA
 Dados espessura: ANA/Perfil; Mendes

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_10_Sevs_perfilagens_com_dados_espessura_A3
Escala:	1:290.000

Com relação ao Aquífero Pirabas, além de insuficientes, as informações concentram-se em setores específicos, prejudicando uma estimativa mais consistente da distribuição das espessuras do aquífero para toda a área estudada.

A solução partiu da observação da relação entre as espessuras dos aquíferos Barreiras e Pirabas, obtidas nas 27 perfilagens geofísicas que registraram toda a espessura das rochas terciárias. Essa relação mostrou que o espessamento de uma unidade é compensado pelo adelgaçamento da outra (Figura 11).

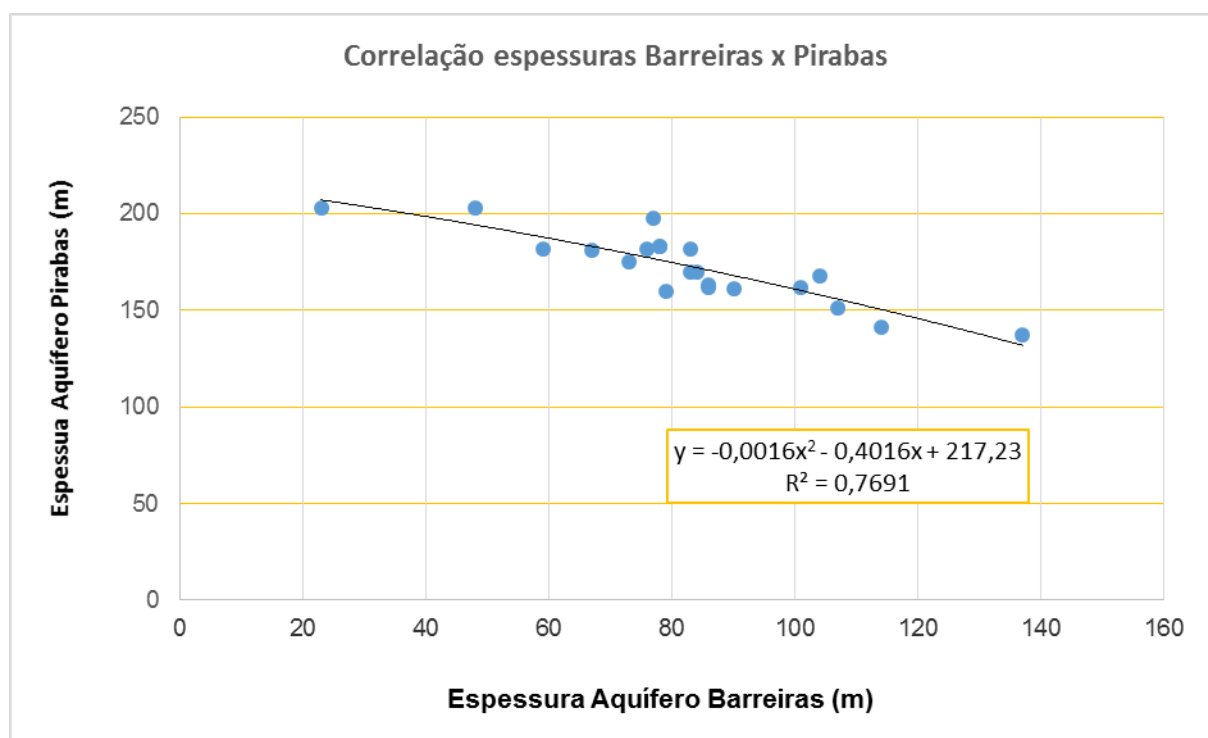


Figura 11 – Correlação entre espessuras dos aquíferos Barreiras e Pirabas.

Essa relação inversa foi definida por uma equação polinomial de segundo grau (Equação 1) com cerca de 80% de ajuste dos pontos, conforme escrita abaixo:

$$Y = -0,0016X^2 - 0,4016X + 217,23 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: X= espessura do Aquífero Barreiras (m) e Y= espessura do Aquífero Pirabas (m).

A equação foi aplicada aos 65 pontos com dados geofísicos de SEVs e perfilagens que continham somente informações de espessura do Aquífero Barreiras, o que permitiu estimar a espessura do Aquífero Pirabas em pontos nos quais esse aquífero não foi alcançado (Quadro 4).

A interpolação dos dados listados no Quadro 4 deu origem aos mapas de distribuição das espessuras dos aquíferos Barreiras e Pirabas, conforme mostrados, respectivamente, na Figura 12 e Figura 13.

A definição das espessuras dos aquíferos é uma atividade essencial no estudo, uma vez que esses dados são utilizados no cálculo das reservas hídricas subterrâneas e das potencialidades desses mananciais.

Quadro 4 – Espessuras dos aquíferos Barreiras e Pirabas

ID	Tipo	UTM E	UTM N	Espes. Barreiras	Espes. Pirabas	Esp. Total
SEV-01	SEV	792992	9873966	22	208	230
SEV-02	SEV	794682	9872379	65	184	249
SEV-03	SEV	796217	9870987	91	167	258
SEV-04	SEV	799151	9867892	100	161	261
SEV-05	SEV	801639	9866223	85	172	257
SEV-06	SEV	803757	9863866	75	178	253
SEV-07	SEV	804703	9860414	108	155	263
SEV-08	SEV	805430	9858658	82	174	256
SEV-09	SEV	806348	9856646	14	211	225
SEV-10	SEV	806441	9854745	94	165	259
SEV-11	SEV	807116	9852209	104	158	262
SEV-12	SEV	809310	9847722	73	179	252
SEV-13	SEV	812014	9846531	47	195	242
SEV-14	SEV	813480	9845587	22	208	230
SEV-15	SEV	784869	9839238	57	189	246
SEV-16	SEV	814753	9870686	58	189	247
SEV-17	SEV	815414	9838962	49	194	243
SEV-18	SEV	795075	9848921	54	191	245
SEV-19	SEV	798758	9848800	19	209	228
SEV-20	SEV	801473	9849036	25	206	231
SEV-21	SEV	805312	9851608	90	168	258
SEV-22	SEV	810718	9855387	67	183	250
SEV-23	SEV	812673	9857607	111	153	264
SEV-24	SEV	813908	9859460	100	161	261
SEV-25	SEV	816815	9861405	59	188	247
SEV-26	SEV	818746	9865263	90	168	258
SEV-27	SEV	813519	9867554	57	189	246
SEV-28	SEV	809728	9866016	14	211	225
SEV-29	SEV	821485	9858545	44	196	240
SEV-30	SEV	825200	9858627	39	199	238
SEV-31	SEV	788867	9839893	90	168	258
SEV-32	SEV	791763	9844462	126	141	267
SEV-33	SEV	793494	9845807	113	151	264
SEV-34	SEV	784128	9856198	33	202	235
SEV-35	SEV	799370	9840880	59	188	247
SEV-36	SEV	784848	9862165	58	189	247
SEV-37	SEV	782338	9860420	101	160	261
SEV-38	SEV	782876	9843376	65	184	249
SEV-39	SEV	782680	9841524	65	184	249
SEV-40	SEV	777787	9837221	43	197	240
MSEV-02	SEV	782994	9842091	76	177	253
MSEV-03	SEV	792254	9848274	85	172	257
MSEV-04	SEV	787922	9845538	57	189	246
MSEV-05	SEV	784360	9850706	37	200	237
MSEV-08	SEV	781604	9853707	35	201	236
MSEV-10	SEV	782054	9846574	40	199	239

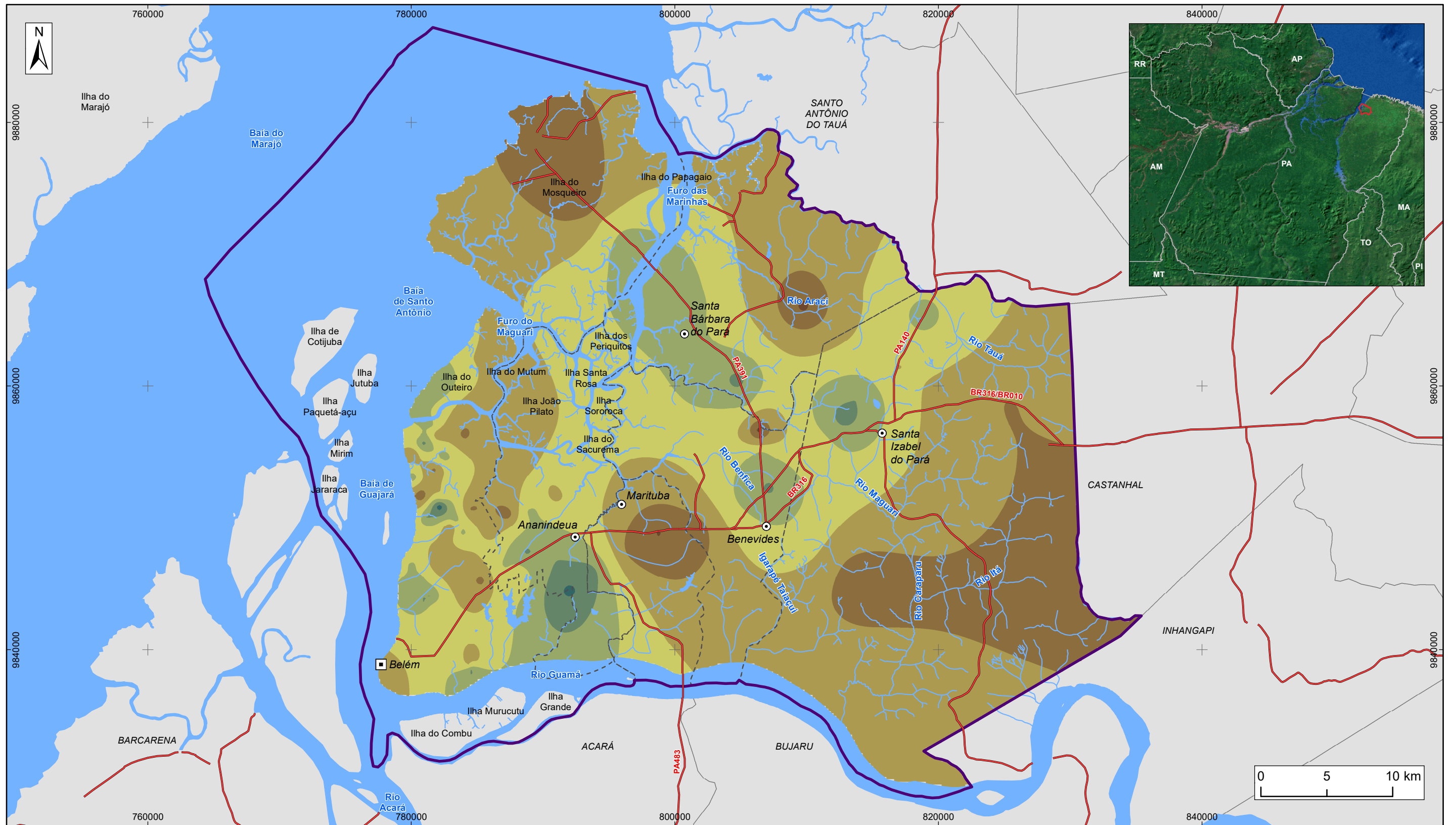
Valores nas células destacadas calculados pela equação $y = -0,0016x^2 - 0,4016x + 217,23$

Continua...

Quadro 4 – Espessuras dos aquíferos Barreiras e Pirabas (continuação)

ID	Tipo	UTM E	UTM N	Espes. Barreiras	Espes. Pirabas	Esp. Total
MSEV-11	SEV	785690	9854717	57	189	246
MSEV-14	SEV	790886	9851607	54	191	245
MSEV-15	SEV	787302	9850279	31	203	234
MSEV-16	SEV	783364	9845800	48	194	242
MSEV-17	SEV	780580	9851694	24	207	231
MSEV-18	SEV	780901	9852557	48	194	242
MSEV-19	SEV	782925	9849193	40	199	239
MSEV-20	SEV	785330	9845253	35	201	236
MSEV-21	SEV	781942	9856296	48	194	242
MSEV-22	SEV	784002	9858225	45	196	241
MSEV-23	SEV	780141	9854950	44	196	240
MSEV-24	SEV	786080	9848705	56	190	246
MSEV-25	SEV	784442	9856036	49	194	243
R-3	Perfilagem	780898	9855580	107	151	258
R-5	Perfilagem	781554	9856972	84	170	254
R-6	Perfilagem	780421	9856226	76	182	258
R-9	Perfilagem	780757	9850109	77	198	275
R-10	Perfilagem	792337	9852535	72	180	252
R-11	Perfilagem	780731	9848754	67	181	248
R-12	Perfilagem	780109	9853014	91	167	258
R-13	Perfilagem	783819	9848824	86	163	249
R-14	Perfilagem	784096	9848681	73	175	248
R-17	Perfilagem	788613	9847556	103	159	262
R-20	Perfilagem	779181	9846081	77	177	254
R-25	Perfilagem	783394	9842921	63	186	249
R-27	Perfilagem	781416	9844053	101	160	261
R-28	Perfilagem	780908	9843640	101	160	261
R-30	Perfilagem	781578	9843112	62	186	248
R-36	Perfilagem	784500	9838460	114	141	255
R-39	Perfilagem	787007	9846502	83	170	253
R-40	Perfilagem	780987	9849974	104	168	272
R-41	Perfilagem	783322	9849940	86	162	248
R-42	Perfilagem	780836	9845584	79	160	239
R-43	Perfilagem	780157	9846489	82	174	256
R-44	Perfilagem	791141	9846648	101	162	263
R-45	Perfilagem	782019	9850892	137	137	274
R-46	Perfilagem	782316	9851612	59	182	241
R-47	Perfilagem	788782	9850553	83	182	265
R-48	Perfilagem	780776	9849061	70	181	251
R-49	Perfilagem	780622	9850749	63	186	249
R-50	Perfilagem	789332	9851167	77	177	254
R-51	Perfilagem	782527	9854686	90	161	251
R-55	Perfilagem	783041	9852622	80	175	255
AN-56	Perfilagem	787157	9845240	78	183	261
COS-P3	Perfilagem	784304	9838949	48	203	251
MAR-P2	Perfilagem	796881	9847609	23	203	226

Valores nas células destacadas calculados pela equação $y = -0,0016x^2 - 0,4016x + 217,23$



LEGENDA

- | | | |
|-------|------------------|--|
| □ | Capital Estadual | Isópacas Aquífero Barreiras (m) |
| ⊙ | Sede Municipal | 14,1 - 20 |
| ~ | Hidrografia | 20,1 - 40 |
| — | Rodovia | 40,1 - 60 |
| ☁ | Massa d'água | 60,1 - 80 |
| ⊕ | Área de Estudo | 80,1 - 100 |
| - - - | Limite municipal | 100,1 - 120 |
| | | 120,1 - 140 |

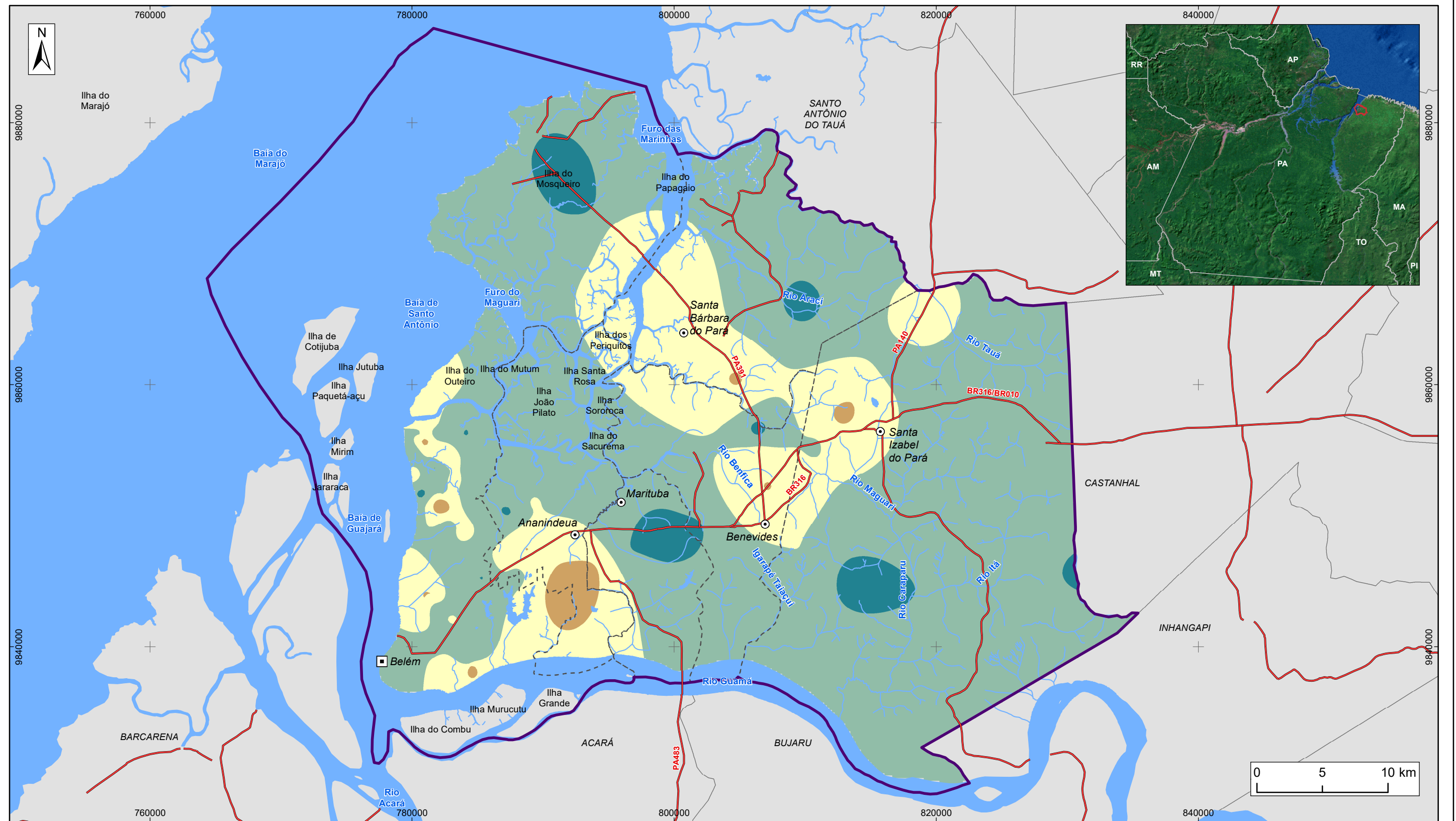
Figura 12 – Distribuição das espessuras do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isópacas: ANA/Profill

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_12_Isopacas_Barreiras_A3
Escala:	1:290.000



LEGENDA

- Capital Estadual
 - ⊙ Sede Municipal
 - ~ Hidrografia
 - Rodovia
 - ☁ Massa d'água
 - ⊕ Área de Estudo
 - - - Limite municipal
- Isópacas do Aquífero Pirabas(m)**
- 139,5 - 140
 - 140,1 - 160
 - 160,1 - 180
 - 180,1 - 200
 - 200,1 - 220

Figura 13 – Distribuição das espessuras do Sistema Aquífero Pirabas na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isópacas: ANA/Profill

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_13_Isopacas_Pirabas_A3
Escala:	1:290.000

7.1.5 Potenciometria

Fetter (2001) define o termo potenciometria para a representação gráfica bidimensional da distribuição no terreno das cargas hidráulicas de aquíferos confinados e superfície freática para a distribuição das cargas hidráulicas de aquíferos não confinados. A carga hidráulica representa a altura da água num ponto qualquer do terreno em relação a um determinado *datum*. Normalmente, o *datum* de referência é nível do mar. No Brasil é comum se utilizar o termo potenciometria de maneira geral, tanto para aquíferos livres como para confinados, e assim foi adotado neste estudo.

Os registros de nível de água em poços são influenciados por vários fatores. Todd (1959) cita variações no armazenamento do aquífero em função da retirada de água; efeito da interferência do bombeamento entre poços; evapotranspiração em aquíferos rasos; variações na recarga dependentes das precipitações pluviométricas, sazonalidade, variações de pressão atmosférica, etc.

Carnier Neto (2006) registrou ciclos sazonais de recarga por chuvas e descarga por fluxo natural (Figura 16) e variações devido ao efeito de maré terrestre em dois ciclos diários (Figura 15) – com variações de amplitude maiores durante os períodos de lua cheia e lua nova, e menores nas fases lunares de crescente e minguante – ao longo de quase cinco anos de monitoramento contínuo do Aquífero Rio Claro (Cenozoico, Bacia do Paraná). Na região de Belém, ciclos sazonais de recarga e descarga foram registrados no poço 1500005632 (RIMAS/CPRM) que monitora o Sistema Aquífero Barreiras (Figura 16).

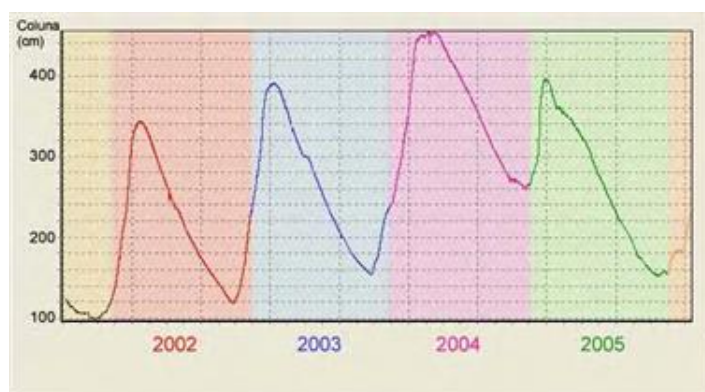


Figura 14 – Ciclos sazonais de recarga e descarga do Aquífero Rio Claro (CARNIER NETO, 2006).

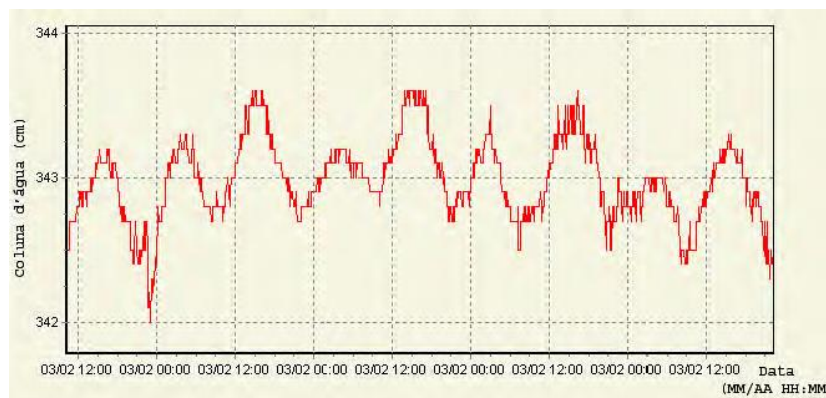


Figura 15 – Oscilações de nível de água no Aquífero Rio Claro devido à maré terrestre, mostrando dois valores máximos e dois valores mínimos diários Claro (CARNIER NETO, 2006).

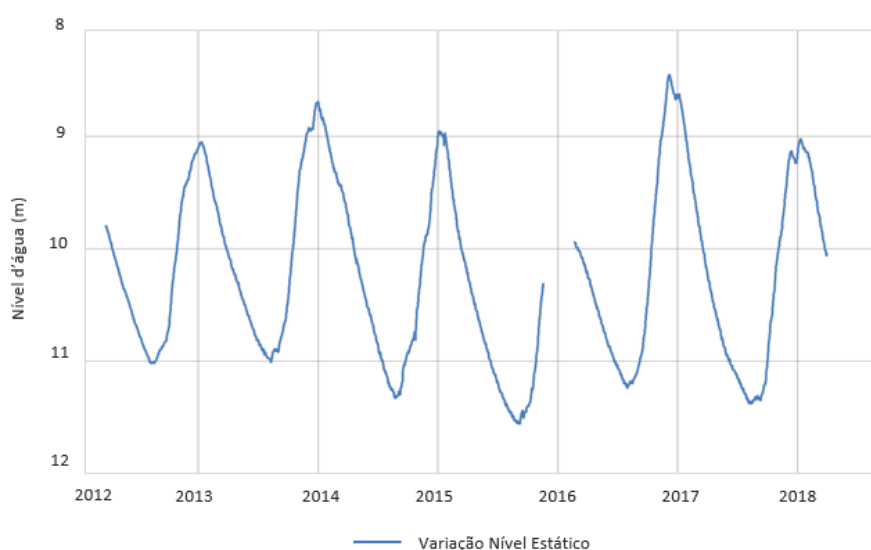


Figura 16 – Ciclos sazonais de recarga e descarga do Sistema Aquífero Barreiras (poço 1500005632 – RIMAS/CPRM) em Belém.

Custodio e Llamas (1996) enfatizam que, devido às variações temporais de nível dos aquíferos, a superfície potenciométrica sempre deve referir-se a um certo instante de tempo. Em outras palavras, os valores tomados para definição dessa superfície devem ser feitos dentro de um intervalo de tempo suficientemente pequeno, de modo a não incorporar variações importantes.

Além desses fatores, há ainda erros de precisão nas medições manuais realizadas nos poços. Depreende-se, portanto, que o traçado da superfície potenciométrica pode conter todas essas incorreções, dependendo da amplitude temporal e exatidão dos dados utilizados.

Aquíferos livres em zonas úmidas, ou seja, em áreas com pluviosidade elevada como a região de Belém, possuem a superfície do lençol em altitudes superiores às cotas de descarga da rede hidrográfica. Neste caso, os rios são denominados de efluentes porque descarregam as águas subterrâneas na forma de escoamento de base.

Muitos estudos mostram que, em regiões úmidas, a superfície livre dos aquíferos superficiais normalmente apresenta a mesma conformação da superfície topográfica (FETTER, 2001). Segundo o referido autor, a recarga em áreas topográficas elevadas tem maior potencial de energia do que em áreas topográficas mais baixas. Assim, a configuração do fluxo subterrâneo raso deve mostrar tendência de escoamento no sentido das drenagens e das porções mais elevadas para as menos elevadas do terreno.

Para determinação da potenciometria da área de estudo foram analisados dados de 1.709 poços do cadastro do SIAGAS contendo registros de nível estático de água de grande amplitude temporal, obtidos em poços de diversas profundidades, desde rasos a profundos, perfurados nos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas. Os dados foram plotados em um gráfico de correlação da altitude do terreno (topografia) *versus* cota do nível estático (carga hidráulica) e mostraram tendência geral positiva e grande dispersão (Figura 17).

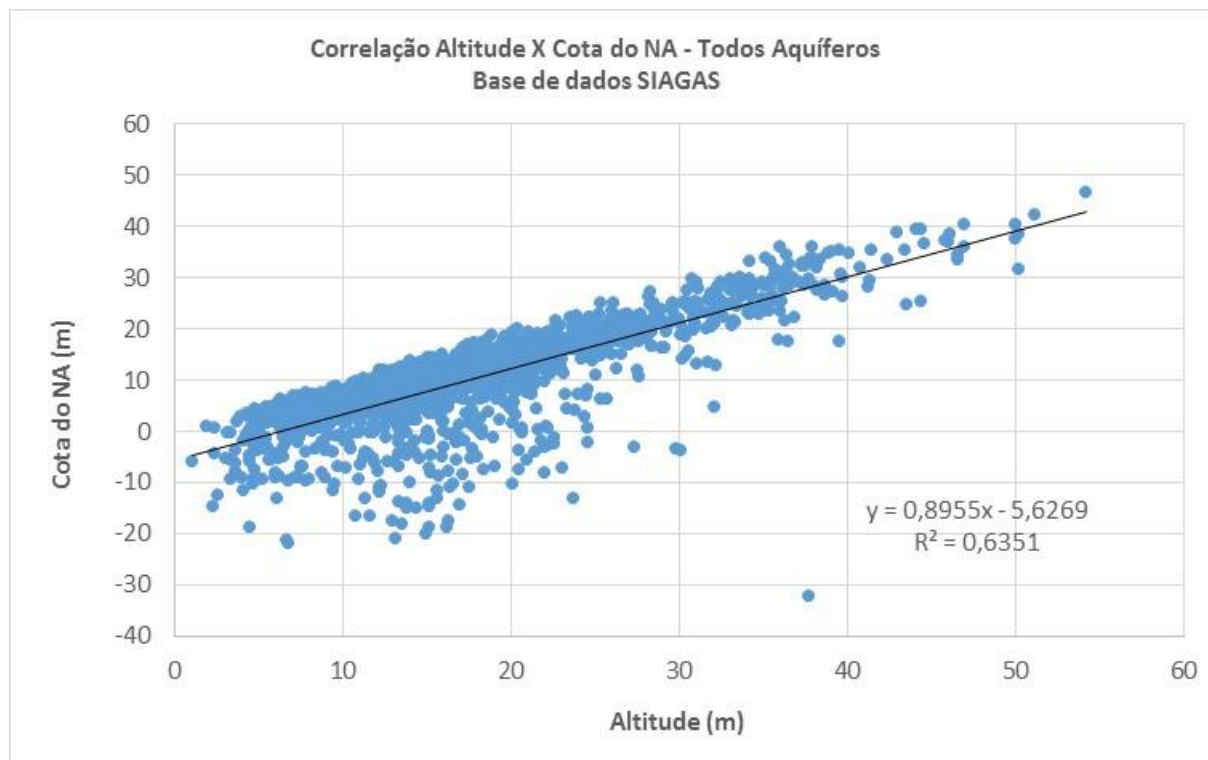


Figura 17 – Correlação entre altitude e cota do nível estático dos poços do cadastro SIAGAS.

Ao restringir os dados do cadastro SIAGAS a poços com limite de profundidade máxima de 30 m (1.026 poços), o gráfico de correlação da altitude do terreno *versus* cota do nível estático mostra clara tendência positiva e dispersão bem menor (Figura 18). Esse comportamento confirma a existência de uma superfície freática controlada pela altitude do terreno, típica de aquíferos livres. A correlação linear entre altitude *versus* carga hidráulica alcançou quase 88% de ajuste e gerou a seguinte equação:

$$Y = 0,8951 X - 3,407 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde, X= altitude do terreno (m) e Y= carga hidráulica (m).

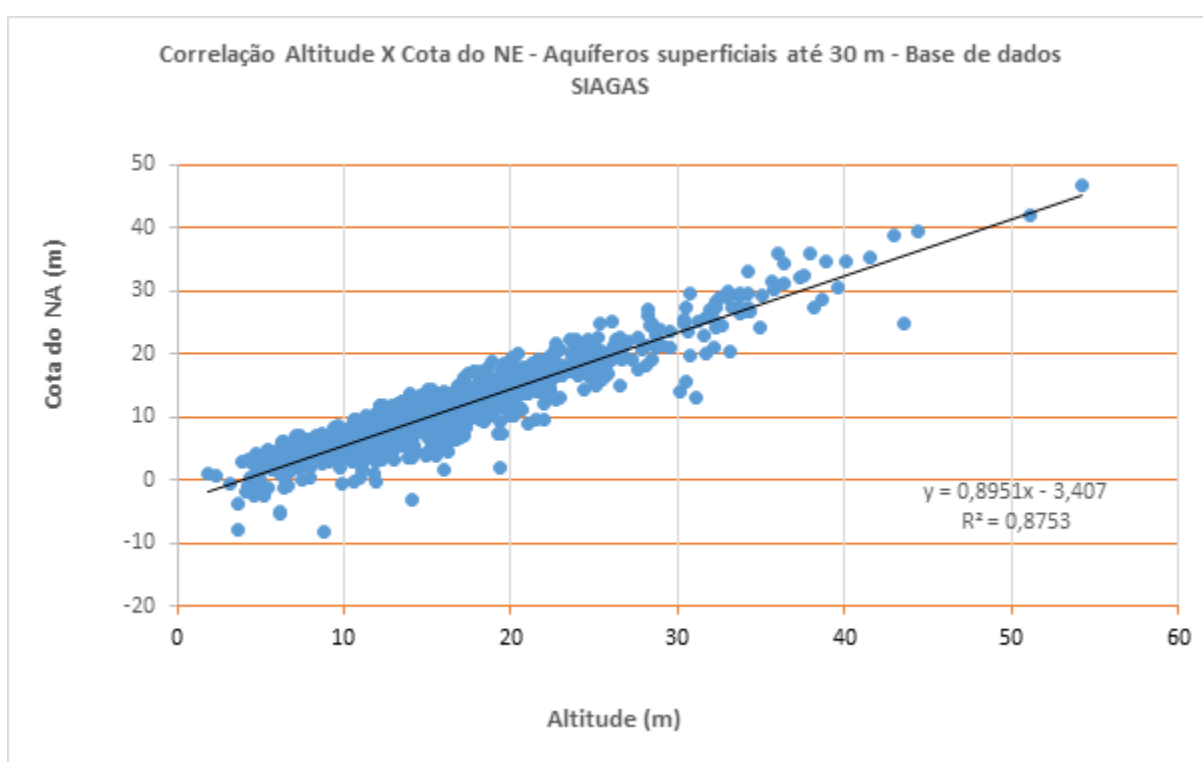
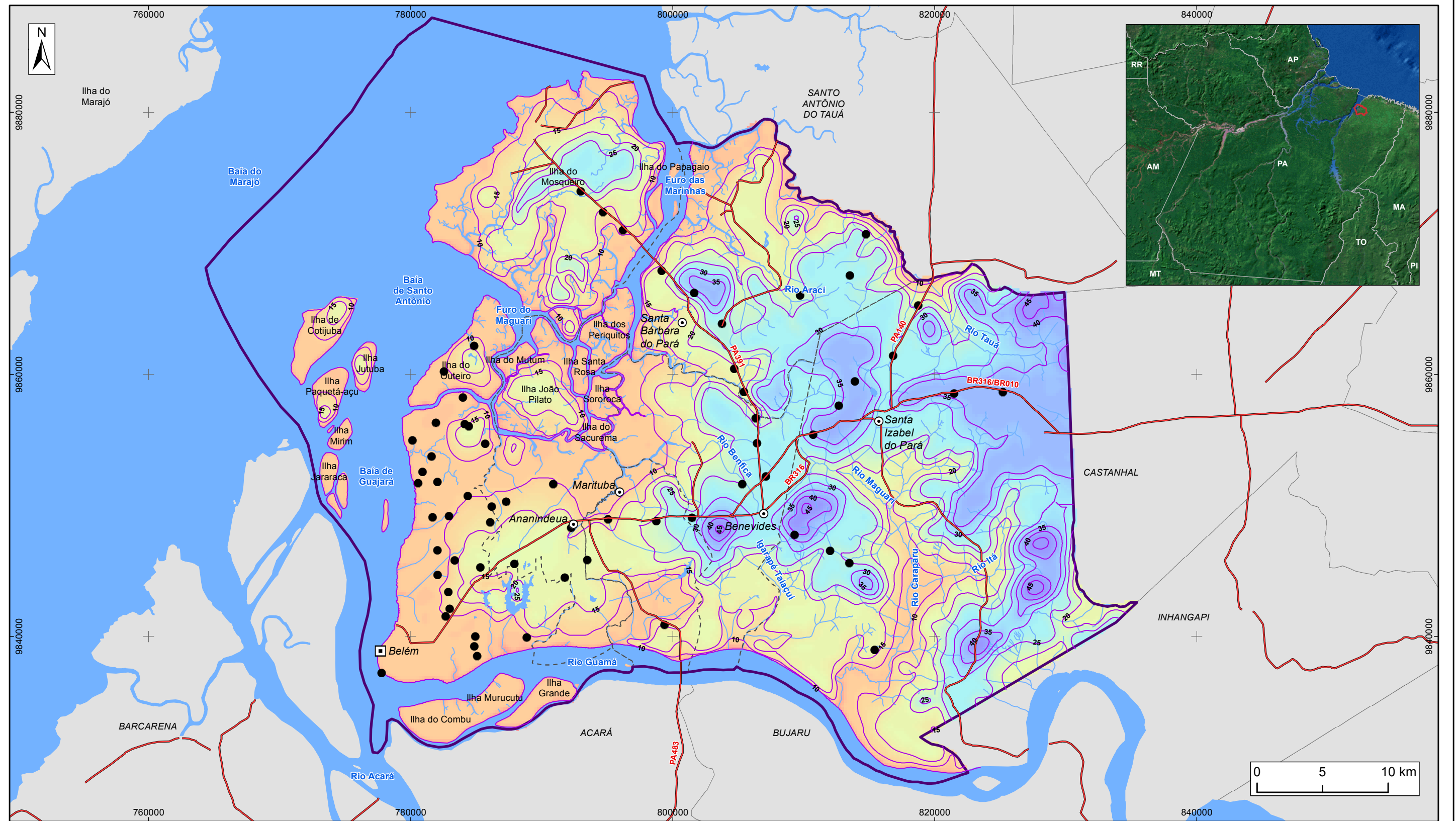


Figura 18 – Correlação entre altitude e cota do nível estático dos poços com até 30 m de profundidade do cadastro SIAGAS.

A superfície potenciométrica dos aquíferos superficiais livres foi configurada por meio da aplicação da Equação 2 aos dados altimétricos do Modelo Digital de Terreno (MDT) da área estudada, dando origem ao *raster* representativo da distribuição da carga hidráulica no terreno. As equipotenciais foram geradas a partir desse *raster* com emprego da ferramenta *Contour* do módulo *3D Analyst do ArcGis*, em intervalos de 5 m, e filtradas para ressaltar as isolinhas principais (Figura 19).



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual
 - ⊙ Sede Municipal
 - SEVs
 - ~ Hidrografia
 - Rodovia
 - Equipotenciais Barreiras
 - ☁ Massa d'água
 - ⊕ Área de Estudo
 - - - Limite municipal
- | Carga Hidráulica (m) | |
|----------------------|------|
| | 47,7 |
| | 43,0 |
| | 38,2 |
| | 33,4 |
| | 28,6 |
| | 23,8 |
| | 19,1 |
| | 14,3 |
| | 9,5 |
| | 4,8 |
| | 0 |

Figura 19 – Distribuição da carga hidráulica e das equipotenciais dos aquíferos superficiais na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovias: SEMAS/PA
 Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM
 SEVs: Mendes (2000) e ANA/Profil; Carga hidráulica e equipotenciais: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_19_Carga_hidraulica_equipotencial_A3
Escala:	1:290.000

As equipotenciais dos aquíferos superficiais configuradas neste estudo cumprem as condições essenciais do fluxo subterrâneo em aquíferos livres. Ou seja, apresentam forte interação com corpos de água superficiais, como rios e lagos, atestando o escoamento subterrâneo no sentido das áreas de descarga representadas pelas drenagens, e das porções mais elevadas para as menos elevadas do terreno. O mapa da Figura 19 também mostra a dispersão do fluxo geral das águas subterrâneas dos aquíferos superficiais a partir da porção oriental, para as áreas de altitudes baixas que ladeiam o Rio Guamá e a Baía do Guajará.

Para determinação da potenciometria do Sistema Aquífero Pirabas foram selecionados 245 poços do cadastro do SIAGAS contendo dados de nível estático de água de grande amplitude temporal, obtidos de poços profundos. Os dados foram plotados em um gráfico de altitude do terreno (topografia) *versus* cota do nível estático (carga hidráulica), e não evidenciaram nenhuma correlação entre os dois parâmetros (Figura 20).

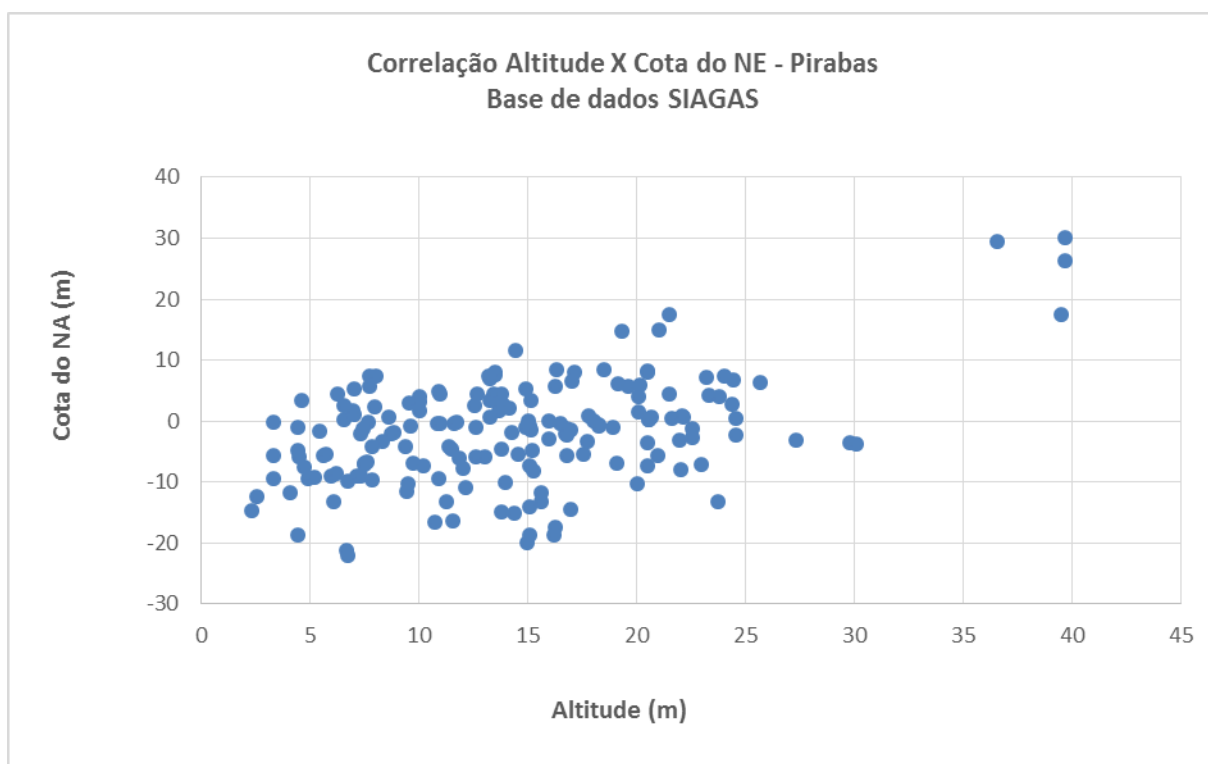


Figura 20 – Correlação entre altitude e cota do nível estático de poços do SIAGAS que captam água do Sistema Aquífero Pirabas.

Selecionando-se dentre os 245 poços aqueles com mais de 200 m de profundidade e plotando-se no gráfico de altitude do terreno *versus* cota do nível estático, a ausência de correlação entre esses parâmetros fica ainda mais evidente (Figura 21).

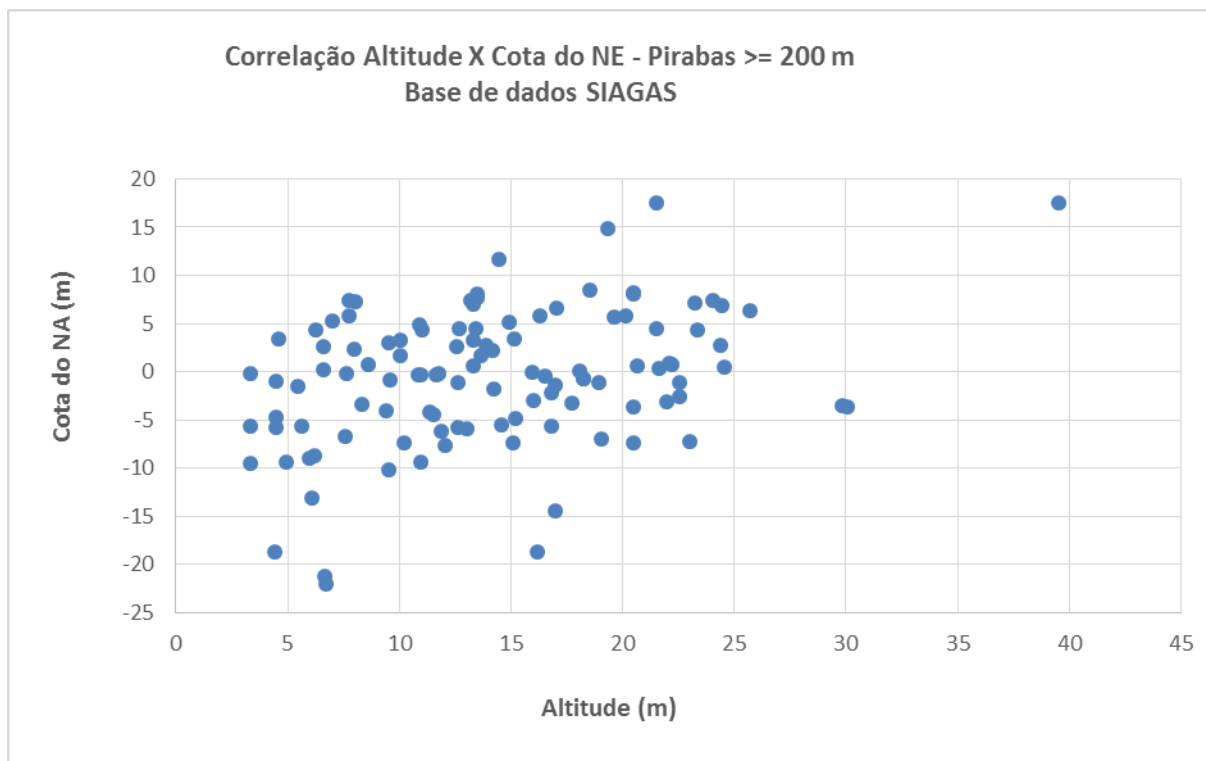


Figura 21 – Correlação entre altitude e cota do nível estático de poços do SIAGAS com profundidades iguais ou maiores do que 200 m, que captam água do Sistema Aquífero Pirabas.

Essa ausência de controle topográfico e de interferência com corpos de água superficiais (rios, lagos, etc.) na conformação da superfície potenciométrica é uma característica dos aquíferos confinados e semiconfinados. Como não há conexão hidráulica direta entre a água subterrânea e os corpos de água superficiais, as equipotenciais de aquíferos confinados e semiconfinados não são controladas por essas feições.

A superfície potenciométrica de aquíferos confinados e semiconfinados é uma superfície representativa do nível de água acima do topo do aquífero, produzida pela expansão da água subterrânea e compressibilidade do terreno. Essas características definem o coeficiente de armazenamento específico (S), representado pela equação abaixo:

$$S = \rho g(\alpha + \phi\beta) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: S = coeficiente de armazenamento específico (1/m); ρ = densidade da água (kg/m^3); g = aceleração da gravidade (m/s^2); α = compressibilidade do terreno (m^2/N); ϕ = porosidade (%) e β = compressibilidade da água (m^2/N).

7.1.6 Natureza dos Sistemas Aquíferos

A natureza dos sistemas aquíferos é determinada pelas características hidráulicas de suas camadas limitantes de topo e base; pela pressão da água nos poros das rochas; e pelo arranjo interno e frequência de camadas permeáveis e impermeáveis.

O arcabouço de subsuperfície dos reservatórios subterrâneos da região de Belém, materializados nos sistemas Barreiras, Pirabas Superior e Pirabas Inferior, compreendem camadas aquíferas com espessuras variáveis, confinados por camadas impermeáveis ou semiconfinados por aquíferos, classificados como multicamadas, por sua vez cobertos por aquífero livre raso.

O Sistema Barreiras é constituído por camadas aquíferas menos espessas que se intercalam a camadas impermeáveis a semipermeáveis. A frequência dos reservatórios arenosos é variável; em determinados locais, as camadas aquíferas predominam sobre os aquíferos/aquíclides, em outros ocorre o inverso. Nas porções superiores do sistema ocorrem aquíferos livres que descarregam suas águas para a rede hidrográfica da área, como demonstrado pela potenciometria.

O Sistema Pirabas, por sua vez, compreende camadas aquíferas espessas encerradas por camadas impermeáveis a semipermeáveis. Dados de poços e de perfilagens indicam sucessão com recorrência frequente de camadas arenosas e argilosas. As camadas aquíferas predominam sobre os aquíferos/aquíclides, sendo que as mais espessas e com menor frequência de intercalações argilosas situam-se na porção inferior do sistema; por esta razão, são os reservatórios mais explorados pelo sistema público de abastecimento e grandes indústrias.

Os sistemas multicamadas caracterizam-se pelas cargas hidráulicas diferenciais existentes em cada uma das várias camadas aquíferas componentes do sistema, de tal sorte que o nível de água registrado num poço representa a interação entre os níveis de água dos aquíferos atravessados e cobertos por filtros (Figura 22).

Como observa-se na Figura 22, os poços 2, 3 e 4 captam água, respectivamente, do aquífero semiconfinado intermediário, livre superior e semiconfinado inferior, cujos níveis estáticos são diferentes entre si. O poço 1 apresenta cobertura por filtros em todos os aquíferos, resultando num nível estático que representa a interação das cargas hidráulicas registradas nos demais poços.

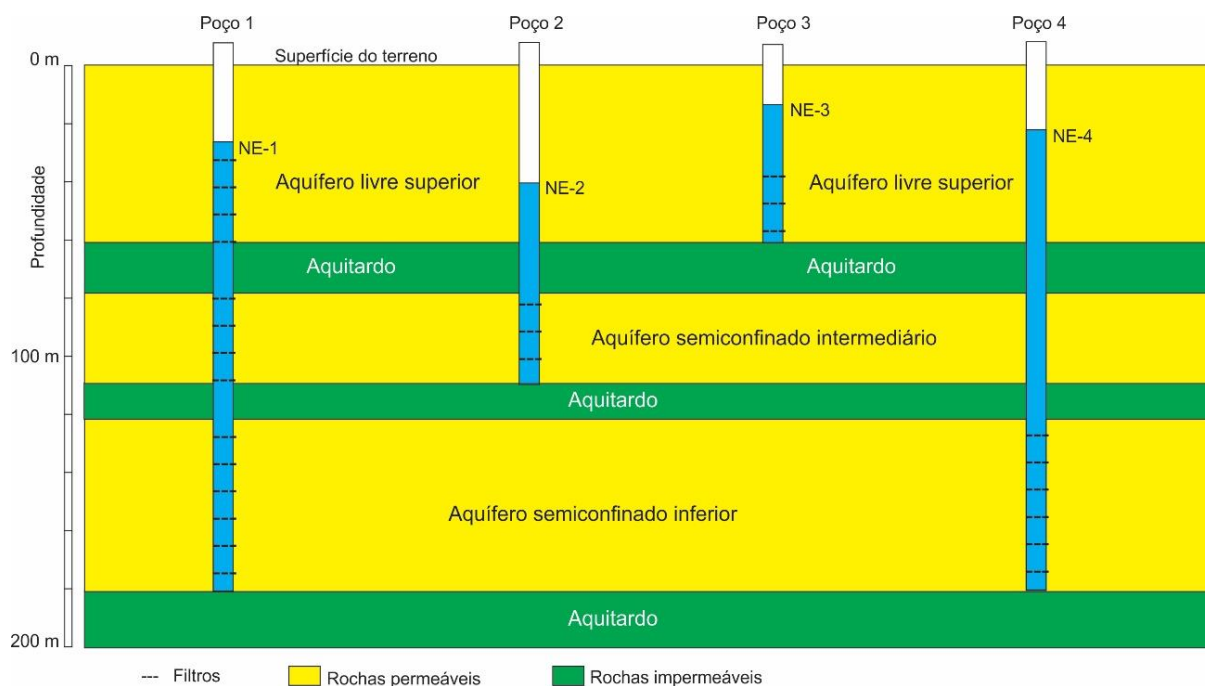


Figura 22 – Esquema mostrando a variação das cargas hidráulicas de aquíferos do tipo multicamadas encimados por aquífero livre.

Segundo Fetter (2001), se as cargas hidráulicas são reflexo dessas interações e não de um único aquífero, não são indicadas para elaboração de mapas potenciométricos. Por esta razão, o mapa potenciométrico apresentado neste estudo refere-se à somente à porção livre do Sistema Aquífero Barreiras.

7.2 POTENCIALIDADES

O termo potencialidade é bastante controverso e aparece com significados distintos, normalmente atrelados às definições de reservas hídricas subterrâneas, fato que exige sua conceituação em qualquer estudo hidrogeológico.

Alguns autores consideram potencialidade como a vazão extraída anualmente do aquífero, podendo incluir uma parcela das reservas permanentes passíveis de exploração (COSTA & COSTA, 1997). Nesse sentido, o conceito empregado confunde-se com o termo disponibilidade, que representa a quantidade de água disponível para uso armazenada nos aquíferos (MACE *et al.*, 2001).

CPRM (1997) define potencialidade como o volume total acumulado na zona de saturação e sujeito à extração, equivalendo na prática às reservas totais do aquífero.

DAEE (2005) define potencialidade como a vazão explorável ou recomendada de extração dos aquíferos, ou seja, a vazão que pode ser extraída de forma sustentável por longos períodos e com rebaixamentos moderados da espessura saturada. Este conceito corresponde ao “*safe yield*”, que define a quantidade máxima de água que poderia ser explorada, sem causar prejuízos ao aquífero.

Devlin & Sophocleous (2004) utilizam o termo “bombeamento sustentável” para referir-se à potencialidade. Segundo esses autores, bombeamento sustentável significa a vazão que pode ser extraída, indefinidamente, sem depletar o aquífero e, para sua estimativa, não há necessidade de se considerar a recarga.

Neste estudo, a potencialidade é definida como na concepção apresentada por DAEE (2005) e exprime a vazão que pode ser extraída por um poço com base somente nas características hidrodinâmicas do aquífero, como transmissividade, coeficiente de armazenamento (para sistemas confinados) e porosidade efetiva (para sistemas não confinados).

A vazão passível de extração de um aquífero confinado, em regime transitório, é dada pela equação de Theis (1935), modificada por Cooper-Jacob (1946), expressa pela Equação 4:

$$Q = \frac{s \cdot 4\pi \cdot T}{\ln\left(2,25 \cdot T \cdot \frac{t}{r^2 \cdot S}\right)} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: Q= vazão de extração (m³/h); s = rebaixamento admitido para o poço (m); T= transmissividade (m²/d); S = coeficiente de armazenamento (adimensional); r = distância do poço bombeado a um ponto qualquer; e t = tempo de bombeamento (d).

A adaptação da equação simplificada de Cooper-Jacob (1946) para estimar a vazão extraída no poço bombeado considera “r” como o raio do poço.

Isolando “Q” e “s” da Equação 4, e reunindo todos os outros termos em “q”, teremos:

$$q = \frac{4\pi \cdot T}{\ln\left(2,25 \cdot T \cdot \frac{t}{r^2 \cdot S}\right)} \quad (\text{Equação 5})$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 4, a expressão toma a seguinte forma:

$$Q = q \cdot s \quad (\text{Equação 6})$$

Expressando a Equação 6 em termos de “ q ”, obtém-se:

$$q = \frac{Q}{s} \quad (\text{Equação 7})$$

O termo “ q ” representa a capacidade específica do poço ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$), definida como o quociente da vazão de produção (m^3/h) pelo rebaixamento (m).

Deve-se observar que “ q ” obtido na equação de Cooper-Jacob (1946) é maior do que o valor de “ q ” obtido no próprio poço, nos testes de bombeamento. A razão para tal deve-se ao incremento de perdas de carga adicionais que, por sua vez, ocasionam um rebaixamento adicional maior do que o teórico estimado pela equação de Cooper-Jacob (1946). As principais causas que implicam no rebaixamento adicional verificado no poço são:

- O fluxo subterrâneo radial deixa de seguir a lei de Darcy nas proximidades do poço, por conta da maior velocidade de entrada de água;
- Perdas de carga na passagem pelos filtros do poço;
- Perdas axiais ocasionadas pelo movimento ascendente da água, desde a zona filtrante até a bomba;
- Perdas de carga derivadas do dano de formação, que representa o efeito da diminuição da permeabilidade do aquífero na área do entorno do poço, originada pela obstrução dos poros pelos sólidos da lama de perfuração.

Segundo Rorabaugh (1953), o rebaixamento num poço pode ser expresso pela Equação 8:

$$s = \alpha Q + \beta Q^n \quad (\text{Equação 8})$$

Onde: s = rebaixamento observado no poço (m); Q = vazão extraída pelo poço (m^3/h); α = coeficiente de perdas de circulação na formação; e β = coeficiente de perdas no poço. O valor de “ n ” pode variar de 1 a 3,5 (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1996).

Se não ocorressem perdas exponenciais durante o bombeamento do poço, a equação de Rorabaugh (1953) se reduziria a:

$$s = \alpha Q \quad (\text{Equação 9})$$

Onde “ $1/\alpha$ ” representaria o termo “ q ” da equação Cooper-Jacob (1946).

A capacidade específica “ q ” é um dado de fácil obtenção, calculado com base nos testes de bombeamento realizados logo após a perfuração do poço, sendo por isso mesmo eleita para utilização na avaliação da potencialidade dos aquíferos da região de

Belém. Ressalta-se, contudo, que sua utilização exige certa dose de cautela, uma vez que tem o inconveniente de ser fortemente influenciada pelas características construtivas do poço, refletindo também, em sua grandeza, as perdas de carga devidas ao dano de formação (PAULA E SILVA, 2003).

7.2.1 Potencialidades do Sistema Aquífero Pirabas

Neste estudo foram analisados dados de capacidade específica de poços do cadastro do SIAGAS/CPRM para avaliação das potencialidades dos aquíferos.

Para avaliação do Sistema Aquífero Pirabas, foram selecionados 87 poços com profundidades superiores a 180 m e vazões superiores a 100 m³/h (Anexo II). Os dados de capacidade específica plotados num gráfico de distribuição normal acumulada mostraram desvios nos valores na faixa inferior até 20% e até 15% na faixa superior (Figura 23).

Traçando-se uma linha de tendência com 99% de ajuste pelos pontos alinhados do gráfico (Figura 23), a equação de regressão derivada determinou o valor de 13,48 m³/h/m para a mediana da capacidade específica dos poços perfurados no Aquífero Pirabas.

Tomando o mapa de isópacas do Aquífero Pirabas (Figura 13) e aplicando-se a ferramenta “*Surface Volume*”, do programa *ArcGis*, obteve-se a espessura média do aquífero de 186 m.

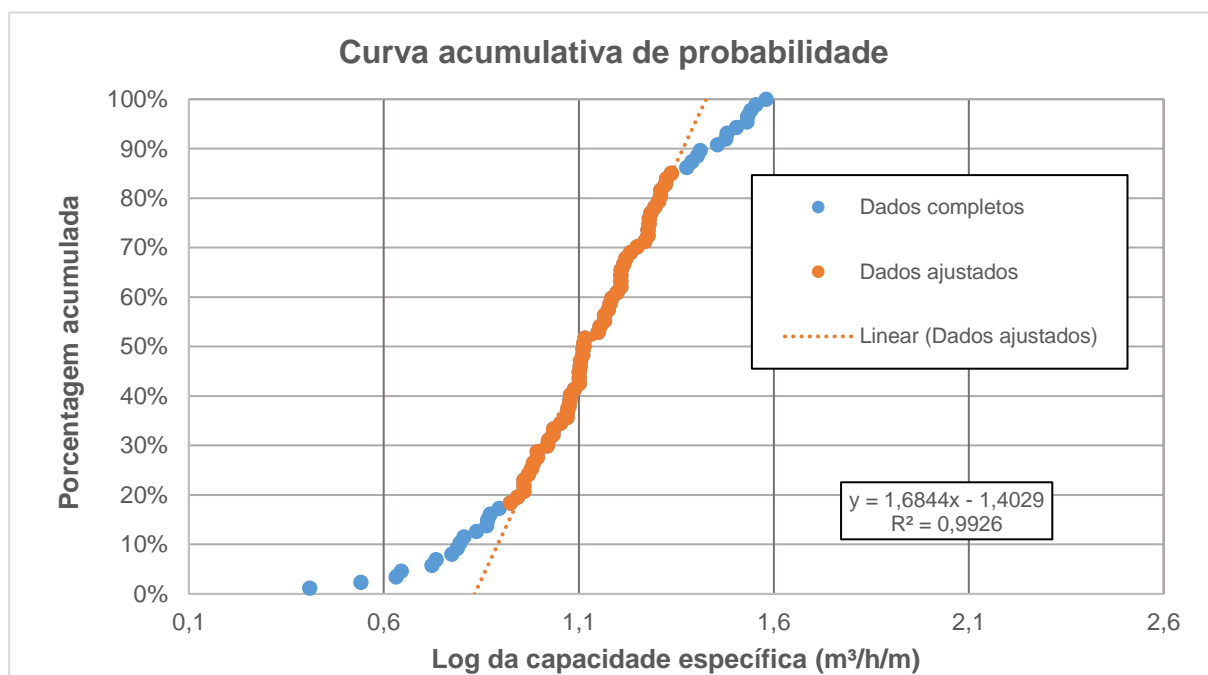


Figura 23 – Distribuição normal acumulada dos dados de capacidade específica (m³/h/m) do Sistema Aquífero Pirabas na região de Belém.

Com base na mediana da capacidade específica e na espessura média, o método adotado para estimar a distribuição das potencialidades do Sistema Aquífero Pirabas considerou:

- O quociente da mediana da capacidade específica pela espessura média do aquífero, definido pelo termo “ q_b ”, expresso abaixo:

$$q_b = \frac{q}{b} = \frac{13,48}{186} = 0,072 \quad (\text{Equação 10})$$

Onde: q_b = capacidade específica unitária ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}/\text{m}$); q = mediana da capacidade específica ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$); e b = espessura média saturada do aquífero (m). O valor definido em “ q_b ” é fixo para o todo o aquífero.

- A vazão explotável foi determinada pela expressão:

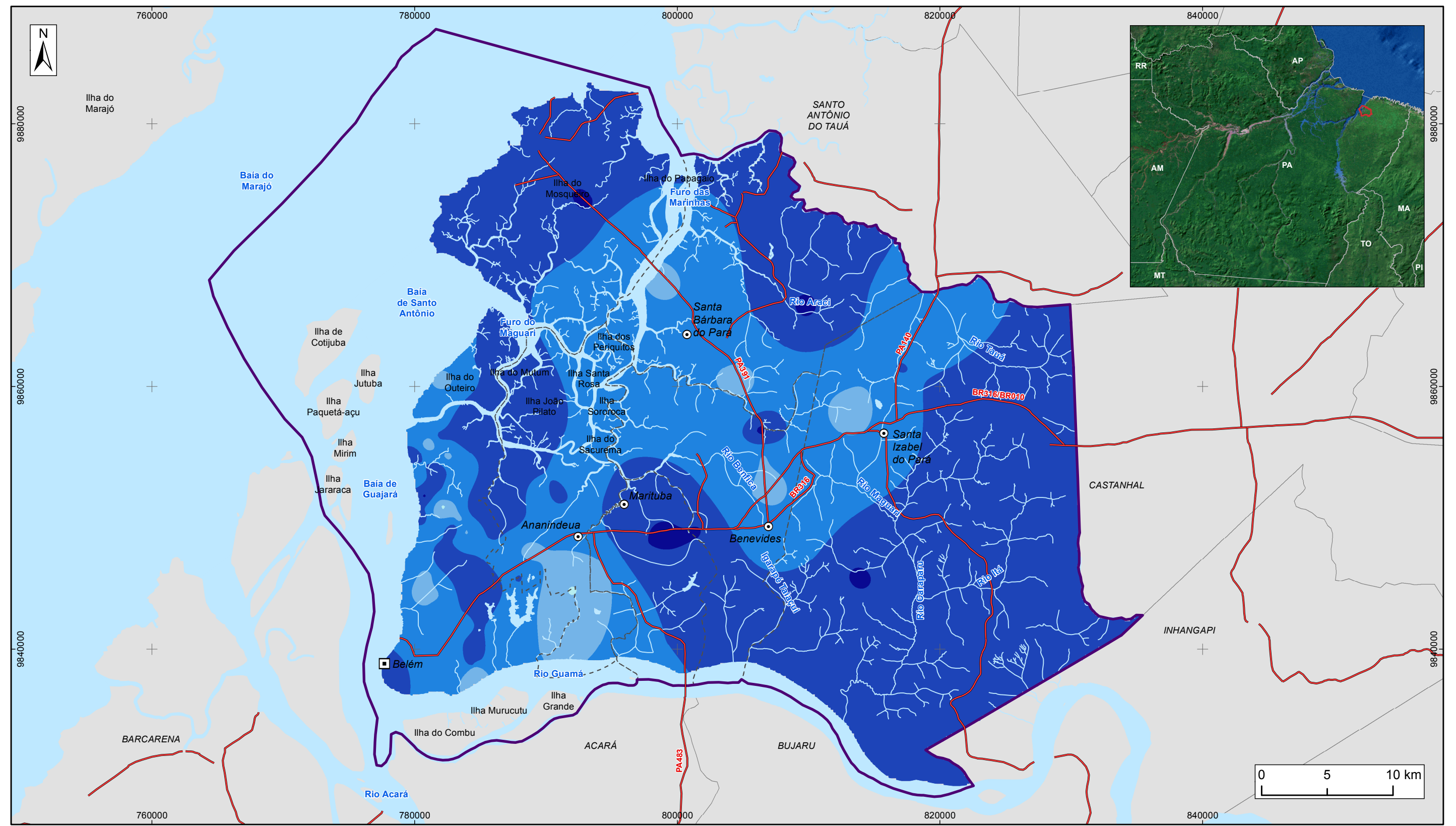
$$Q = q_b \cdot b \cdot s \quad (\text{Equação 11})$$

Onde: Q = vazão explotável (m^3/h); b = espessura do aquífero num determinado ponto (m); s = rebaixamento virtual admitido em função da espessura saturada (m).

O rebaixamento virtual admitido foi estimado em 10% da espessura saturada do aquífero. Foi designado virtual pois não implica em diminuição da espessura saturada, mas somente na diminuição da carga hidráulica, uma vez que o aquífero é confinado a semiconfinado.

O mapa de potencialidade do Sistema Aquífero Pirabas, elaborado segundo o método acima descrito, é mostrado na Figura 24. Sua consecução compreendeu as seguintes etapas:


- Aplicação do percentual de 10% sobre as espessuras do Aquífero Pirabas, representadas no *raster* da Figura 13, para cálculo dos rebaixamentos;
- Multiplicação do *raster* de rebaixamentos pelo *raster* de espessura do aquífero;
- Multiplicação do *raster* resultante pelo valor de “ q_b ” (0,072), dando origem ao *raster* de potencialidades.



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual
 - ⊙ Sede Municipal
 - ~ Hidrografia
 - Rodovia
 - ☁ Massa d'água
 - ⊕ Área de Estudo
 - - - Limite municipal
- Potencialidades Aquífero Pirabas (m³/h)**
- 140,1 - 150
 - 150,1 - 200
 - 200,1 - 250
 - 250,1 - 300
 - 300,1 - 350

Figura 24 – Distribuição das potencialidades do Sistema Aquífero Pirabas na região de Belém



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Sistema de Coordenadas: UTM
 Datum Horizontal: SIRGAS 2000
 Unidade: Metros
 Fiscalização: ANA
 Data: Junho/2018
 Arquivo: Figura_24_Potencialidades_Pirabas_A3
 Escala: 1:290.000

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM.
 Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Potencialidade aquíferos: ANA/Profil

7.2.2 Potencialidades do Sistema Aquífero Barreiras

Para avaliação das potencialidades do Sistema Aquífero Barreiras, foram selecionados 272 poços do cadastro SIAGAS/CPRM com base nos seguintes critérios: profundidades maiores do que 40 m e menores do que 180 m; vazões menores do que 100 m³/h; existência de dados de níveis estático e dinâmico (Anexo III).

Os dados de capacidade específica plotados num gráfico de distribuição normal acumulada mostraram desvios nos valores na faixa inferior até 12% e até 10% na faixa superior (Figura 25).

O traçado da linha de tendência com 99% de ajuste pelos pontos alinhados do gráfico (Figura 25) deu origem à equação logarítmica de regressão, que determinou o valor de 2,68 m³/h/m para a mediana da capacidade específica dos poços perfurados no Aquífero Barreiras.

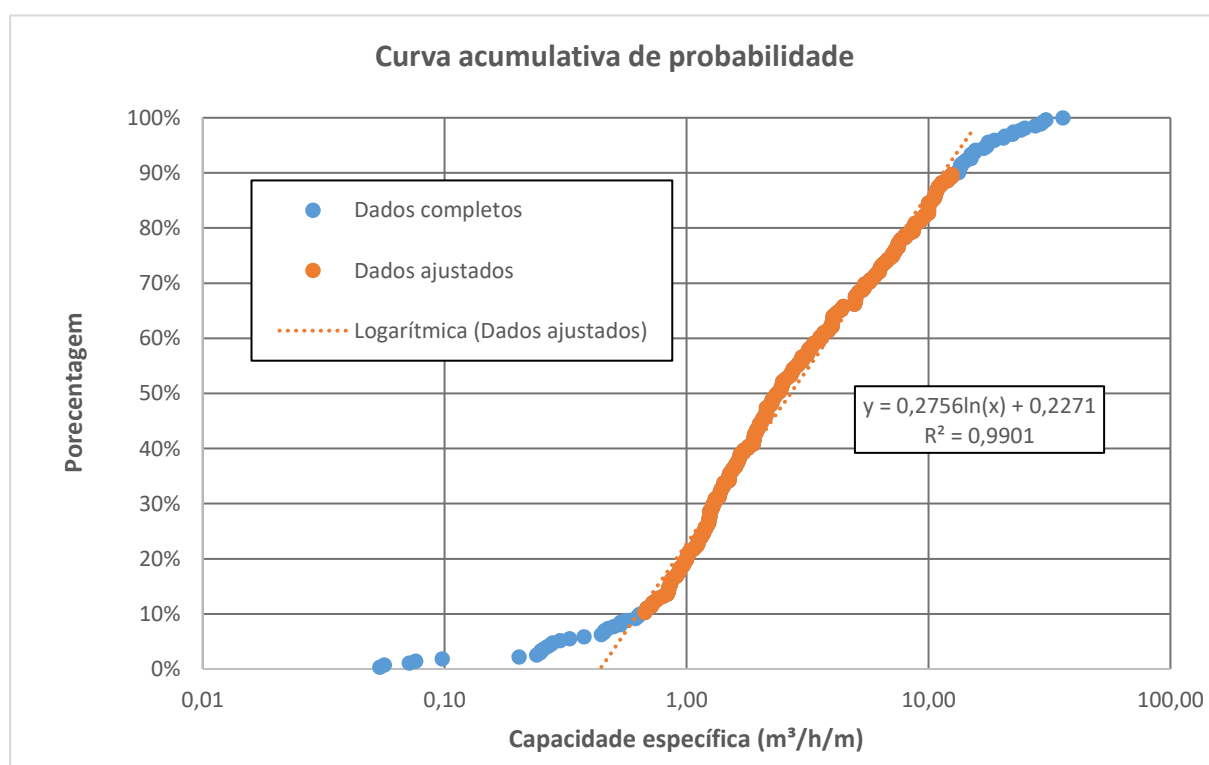


Figura 25 – Distribuição normal acumulada dos dados de capacidade específica (m³/h/m) do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém.

Aplicando-se a ferramenta “*Superfície Volume*” do programa *ArcGis* sobre as isópacas do Aquífero Barreiras (Figura 12) obteve-se a espessura média do aquífero de 59 m.

Com base na mediana da capacidade específica e na espessura média, o método empregado para estimar a distribuição das potencialidades do Sistema Aquífero Barreiras considerou:

- O quociente da mediana da capacidade específica pela espessura média do aquífero, definido pelo termo “ q_b ”, de modo que:

$$q_b = \frac{q}{b} = \frac{2,68}{59} = 0,045 \quad (\text{Equação 12})$$

Onde: q_b = capacidade específica unitária ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}/\text{m}$); q = mediana da capacidade específica ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$); e b = espessura média saturada do aquífero (m). Este valor é fixo para esse aquífero.

- A vazão explotável foi determinada pela expressão:

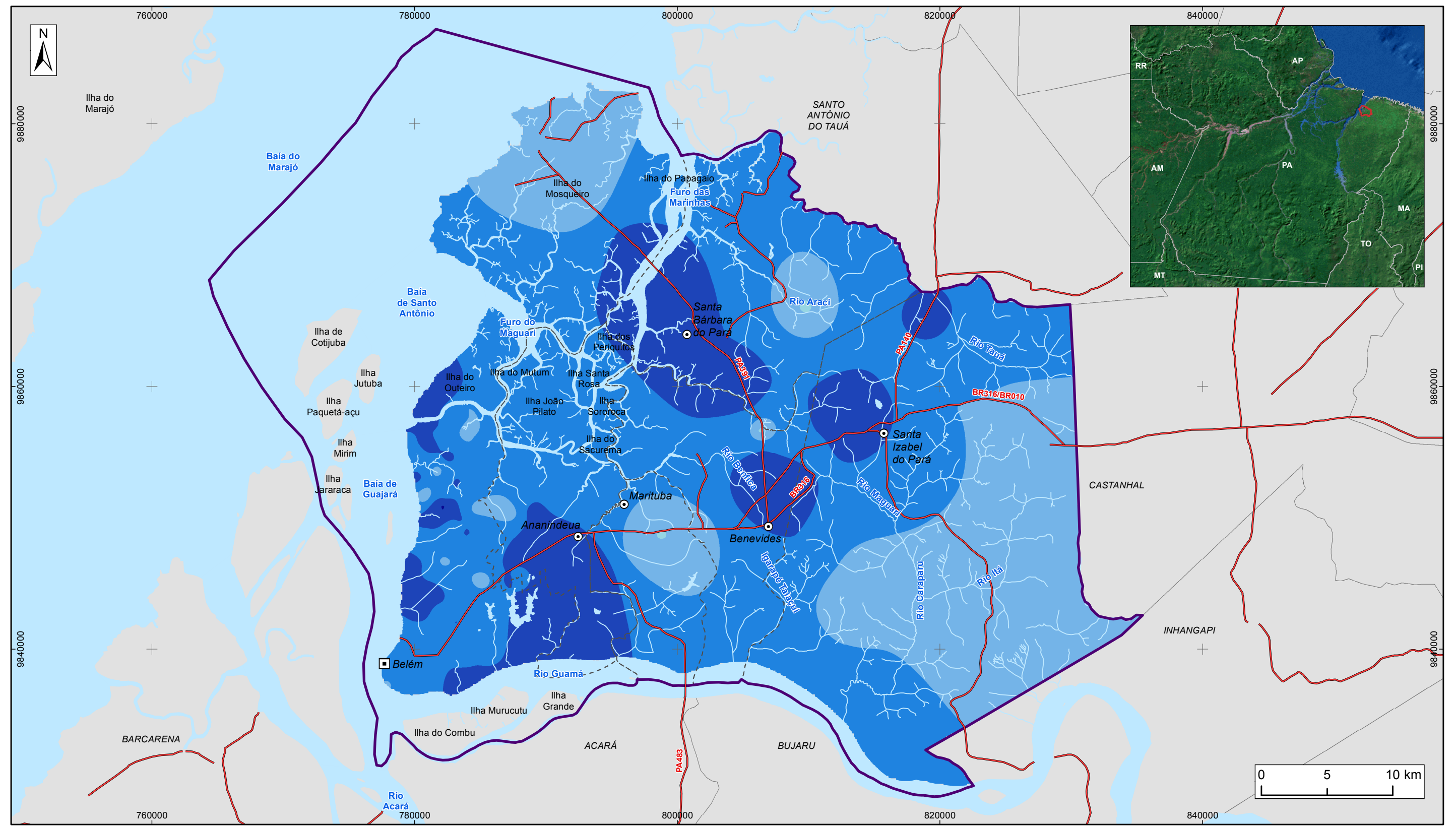
$$Q = q_b \cdot b \cdot s \quad (\text{Equação 13})$$

Onde: Q = vazão explotável (m^3/h); b = espessura do aquífero num determinado ponto (m); s = rebaixamento virtual admitido em função da espessura saturada (m).

O rebaixamento virtual admitido foi estimado em 10% da espessura saturada do aquífero. Foi designado virtual, pois não implica em diminuição da espessura saturada, mas somente na diminuição da carga hidráulica, uma vez que o aquífero é, predominantemente semiconfinado e apenas a porção rasa superior é livre.

O mapa de potencialidades do Sistema Aquífero Barreiras, elaborado segundo os critérios acima descritos, é mostrado na Figura 26. Sua consecução compreendeu as seguintes etapas:

- Aplicação do percentual de 10% sobre as espessuras do aquífero apresentadas no *raster* de espessura da Figura 12, para cálculo dos rebaixamentos;
- Multiplicação do *raster* de rebaixamentos pelo *raster* de espessura do aquífero;
- Multiplicação do *raster* resultante pelo valor de “ q_b ” (0,045), dando origem ao *raster* de potencialidades.



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual
- ⊙ Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Rodovia
- ☁ Massa d'água
- ⊕ Área de Estudo
- - - Limite municipal

Potencialidades Aquífero Barreiras (m³/h)

13,4 - 20
20,1 - 40
40,1 - 60
60,1 - 80
80,1 - 100

Figura 26 – Distribuição das potencialidades do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Potencialidade aquíferos: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_26_Potencialidades_Barreiras_A3
Escala:	1:290.000

7.3 AVALIAÇÃO DA RECARGA

Recarga é definida como a água que se move da superfície do terreno ou da zona insaturada para a zona saturada, sendo de vital importância para entendimento do ciclo hidrológico, bem como para aplicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos (NIMMO *et al.*, 2005).

A recarga garante o reabastecimento do aquífero e, conseqüentemente, a manutenção do suprimento de água dos rios e preservação dos ecossistemas, e assume condição fundamental em áreas onde a água subterrânea é intensamente explorada em decorrência das atividades humanas.

Segundo Simmers (1990), a recarga pode ser distinguida em:

- Recarga direta ou recarga difusa: é a quantidade de água que alcança o reservatório subterrâneo por meio da percolação vertical através da zona não saturada e compreende uma parcela da precipitação atmosférica.
- Recarga indireta ou recarga localizada: é a quantidade de água proveniente de corpos aquosos superficiais, como lagos, rios e áreas alagadas, que se infiltra e atinge a zona saturada.

Alguns autores admitem, ainda, a recarga induzida constituída por águas provenientes de vazamentos das redes de água e esgoto (HIRATA & FERREIRA, 2001). Do ponto de vista ambiental, vazamentos em redes de condução de esgotos sanitários devem ser tratados como fontes potenciais de contaminação do solo e da água subterrânea. Vazamentos em redes de esgoto são a principal fonte de contaminação da água subterrânea por nitrato, cloreto, sódio e sulfato.

As condições de recarga dependem de vários fatores, como quantidade e intensidade das chuvas, evaporação, permeabilidade e topografia dos terrenos, cobertura vegetal, uso do solo, etc. Dentre estes fatores, sem dúvida, o clima é o que tem maior influência no tempo e no espaço na distribuição da recarga.

Estimativas de taxa de recarga são importantes para avaliar a sustentabilidade do suprimento de água na gestão de recursos hídricos subterrâneos. No Brasil, os órgãos gestores costumam definir um percentual sobre os valores de recarga para estabelecer as vazões de exploração sustentáveis (ANA, 2015).

Vários são os métodos de avaliação da recarga descritos na literatura técnica. Dentre eles, destacam-se:

- Balanço hídrico;
- Análise de hidrogramas;
- Modelos de circulação na zona saturada;
- Traçadores químicos;
- Variação do nível de água;
- Equação de Darcy.

Os métodos de estimativa de recarga, acima mencionados, não serão aqui discutidos. As descrições, vantagens e limitações dos métodos podem ser encontradas na vasta literatura técnica disponível.

7.3.1 Áreas de Recarga e Descarga

O movimento da água subterrânea num sistema hidrogeológico define porções onde a água penetra no aquífero e porções onde a água é descarregada do aquífero. As áreas onde o fluxo de água, controlado pelas forças gravitacionais, penetra no aquífero são definidas como áreas de recarga. As áreas onde o fluxo subterrâneo deixa o aquífero e alcança a superfície do terreno são definidas como áreas de descarga. O sistema recarga/descarga de um aquífero é extremamente dinâmico e está sempre em busca do equilíbrio natural entre saídas e entradas de água.

As áreas de recarga representam, geralmente, porções mais elevadas do terreno, nas quais ocorrem os processos de infiltração direta por águas de precipitações atmosféricas ou de degelo. As condições de recarga exigem terrenos com capacidade razoável de infiltração, de modo a permitir que o fluxo descendente alcance a zona saturada, e chuvas bem distribuídas no tempo e espaço.

As áreas de descarga são representadas pelas áreas de topografia baixa adjacentes às planícies dos cursos de água superficiais, formadores das bacias hidrográficas. Após se infiltrarem e circularem pelo aquífero, as águas subterrâneas são descarregadas na forma de escoamento de base dos rios. As águas subterrâneas descarregadas na superfície pelos aquíferos sustentam o escoamento dos cursos de água superficiais durante os períodos de estiagem.

O Município de Belém e municípios adjacentes estão localizados numa região seccionada por grande quantidade de cursos de água superficiais, dentre os quais destacam-se o Tocantins, Aurá, Guamá, Murubira e Pratiçara. A densidade é da ordem de 5,9 cursos de água superficiais por 10 km². A área também apresenta grande número de lagos e lagoas formadas por águas de chuvas e afloramento de águas subterrâneas, em depressões do terreno.

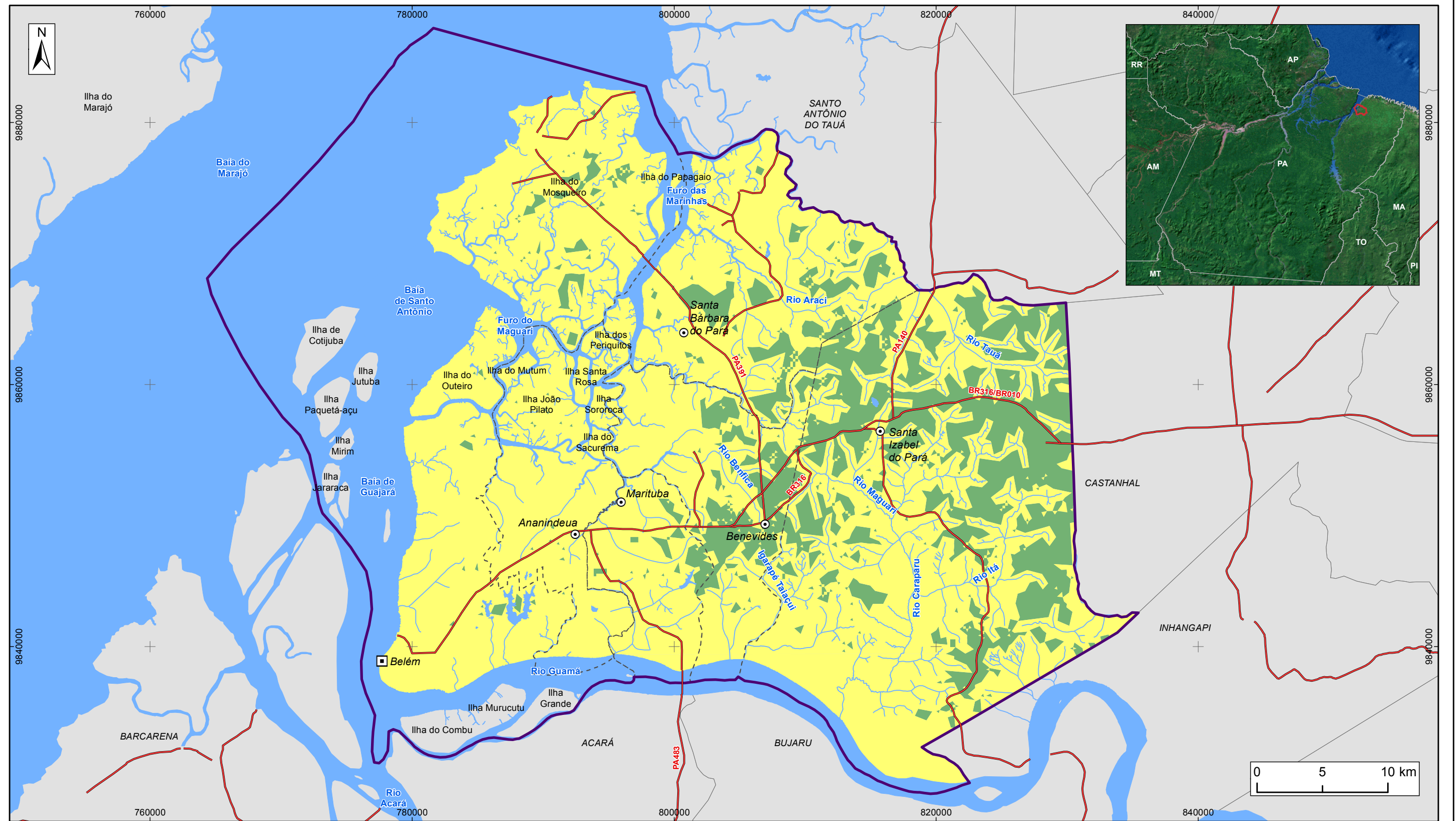
A grande quantidade de feições hídricas superficiais, a topografia relativamente plana, as altitudes dos terrenos próximas do nível de base dos rios e a pequena profundidade do nível de água subterrânea indicam que a maior parte da região estudada desempenha função de área de descarga dos aquíferos livres, aqui reunidos no Sistema Aquífero Barreiras.

Essa região de descarga pode ser comparada às *wetlands* descritas em várias partes do globo, definidas como áreas permanentemente ou sazonalmente saturada de água.

Em termos práticos, propõe-se aqui distinguir áreas de recarga de áreas de descarga com base na profundidade do nível de água do terreno. Para tanto, o critério utilizado foi considerar profundidade máxima do nível de água de 5 m para delimitar as áreas de descarga e profundidades maiores do que 5 m para delimitar as áreas de recarga, tendo como base o mapa de profundidades do nível de água apresentado no item 7.6.1.

A distribuição das áreas de recarga e de descarga, segundo o critério de profundidade do nível de água adotado, é mostrada no mapa da Figura 27. As áreas de descarga são predominantes e ocupam 83% do total (1.571 km²), enquanto as áreas de recarga cobrem apenas 17% do total (322 km²) da região delimitada no mapa. As áreas submersas, assim como pequenas porções insulares distribuídas nos 2.536 km² da área de estudo, não foram consideradas neste cálculo.

Na delimitação dessas superfícies no terreno deve-se ter em mente que os processos que envolvem a recarga e a descarga não são exclusivos em cada área, ao contrário, ocorrem simultaneamente em maior ou menor grau, de modo que é mais coerente referir-se a áreas predominantes de recarga ou áreas predominantes de descarga.



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual
- ⊙ Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Rodovia
- ☪ Massa d'água
- ⊕ Área de Estudo
- - - Limite municipal
- Áreas recarga / descarga**
- Tipo**
- Descarga
- Recarga

Figura 27 – Áreas de recarga e de descarga dos aquíferos da região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovias: SEMAS/PA. Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM
Áreas de Recarga/Descarga: ANA/Perfil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_27_Areas_recarga_descarga_aquíferos
Escala:	1:290.000

7.3.2 Avaliação da Recarga dos Aquíferos Livres

Neste estudo, a estimativa da recarga dos aquíferos livres situados nas porções superiores do Sistema Aquífero Barreiras, foi feita com base em estudos hidrológicos existentes, partindo da premissa de que o escoamento de base dos rios são exsudação das águas subterrâneas dos aquíferos livres.

O escoamento de base é responsável pela perenidade dos corpos de água superficiais, exceto aqueles regularizados por contribuições de água de reservatórios superficiais. Dessa forma, as vazões mínimas (Q_{90} , Q_{95} , $Q_{7,10}$) encontradas nos cursos d'água superficiais são geralmente representativas desse escoamento.

No âmbito da gestão de recursos hídricos, as vazões mínimas também são utilizadas como referência para outorgas de recursos hídricos superficiais. No Estado do Pará, a vazão de referência para análise de disponibilidade hídrica superficial dos pedidos de outorga é a Q_{95} (Resolução CERH nº 10 – SEMA, 2010).

Vazões mínimas são, normalmente, obtidas a partir da análise e processamento dos registros das descargas diárias observadas numa estação fluviométrica. Com base nos registros de campo, são construídas curvas de frequência das vazões mínimas anuais. Outras vezes, a vazão mínima é obtida das curvas de permanência dessas mesmas vazões diárias, caso da Q_{95} . As vazões mínimas também podem ser avaliadas com base nas curvas de recessão dos escoamentos de base que conformam os hidrogramas (BARBOSA JÚNIOR, 2006).

As vazões mínimas são formadas, majoritariamente, por contribuição de água subterrânea e, dependendo da taxa de exploração, o escoamento de base pode ser fortemente reduzido, podendo significar, no limite, que um dado rio venha a secar em períodos críticos de estiagem (ANA, 2013).

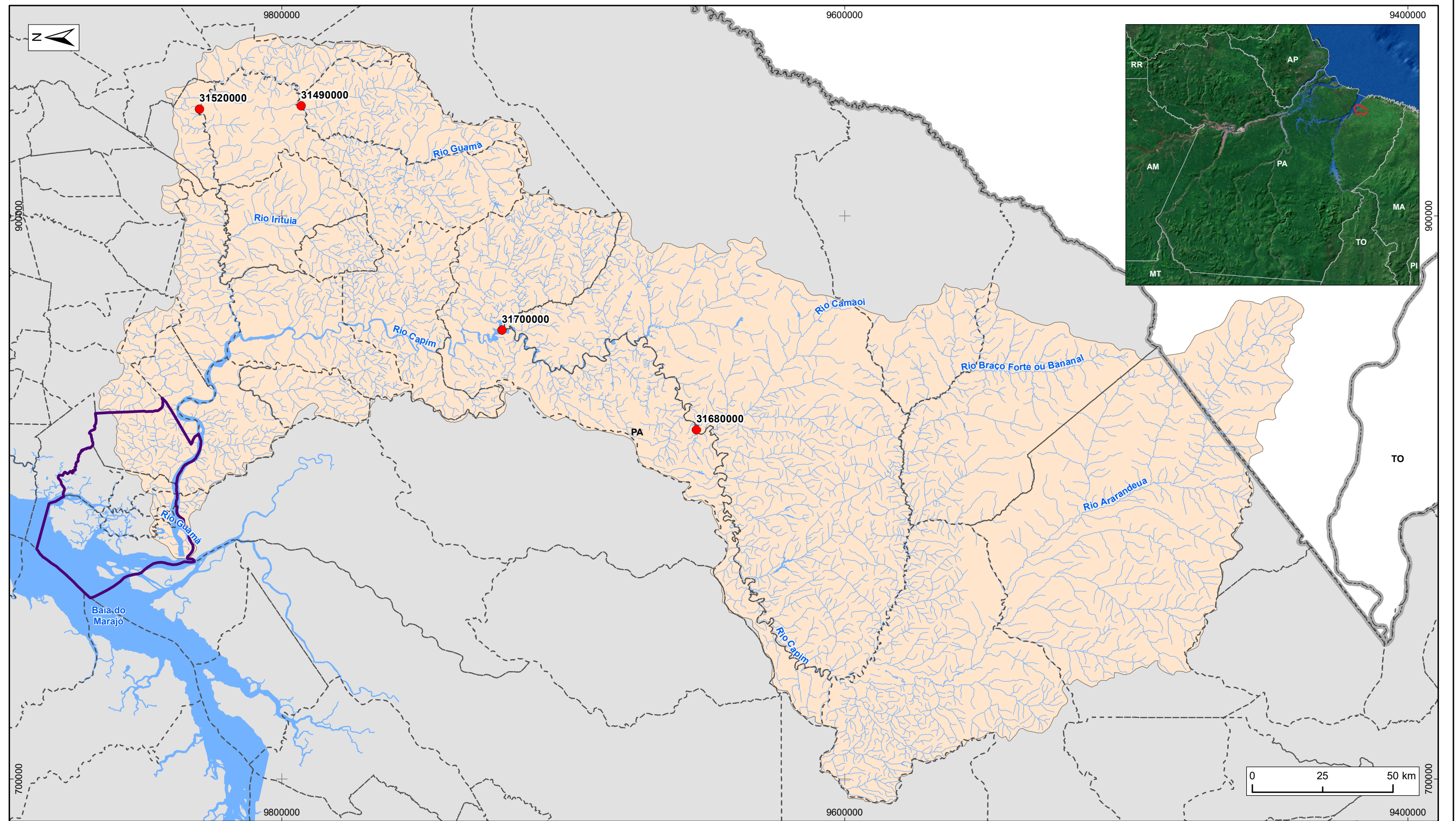
Para a estimativa da Q_{95} , inicialmente, buscou-se informações acerca do monitoramento fluviométrico das bacias hidrográficas localizadas na área de estudo, contudo verificou-se a insuficiência e dados. A única estação fluviométrica inserida na área de estudo que possui dados de vazão é a Porto de Minas (31850000), localizada no rio Carapuru, em Santa Izabel do Pará. Entretanto, os dados de monitoramento dessa estação abrangem somente o período de um ano (1966 a 1967) e, portanto, não são representativos da variabilidade temporal da vazão desse rio.

No rio Apeu, em Castanhal, limite leste da área de estudo, existem duas estações fluviométricas (31800000 e 31810000) que não possuem curva-chave, impossibilitando o cálculo da vazão. As bacias hidrográficas e as estações fluviométricas localizadas na área de estudo podem ser visualizadas na Figura 28.

Em razão da inexistência de estações fluviométricas com dados de séries históricas de vazão suficientemente longas, na área de estudo, foram analisadas as estações fluviométricas Vila Capoeira (31490000), Bom Jardim (31520000), Fazenda Maringá (31680000) e Badajós (31700000), situadas na bacia do rio Guamá, respectivamente nos municípios de Capitão Poço, Ourém, Tomé-Açu e São Domingos do Capim, fora da área de estudo (Quadro 5 e Figura 29). Essas estações compreendem áreas de contribuição variando de 3.440 km² a 32.200 km², muito maiores do que as áreas de contribuição das bacias locais que variam de pouco mais de 8 km² (Igarapé Uriboquinha) e 426 km² (rio Carapuru), o que confere às vazões registradas um caráter regional.

Quadro 5 – Área de drenagem e período de monitoramento das estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Guamá, fora da área de estudo.

Código	Nome	Município	Período		Responsável	Operador	Rio	Área de drenagem (km ²)
			Início	Fim				
31490000	Vila Capoeira	Capitão Poço	jan/77	mai/17	ANA	CPRM	Rio Guamá	3.440
31520000	Bom Jardim	Ourém	jan/65	mai/17	ANA	CPRM	Rio Guamá	5.220
31680000	Fazenda Maringá	Tomé-Açu	out/82	jul/17	ANA	CPRM	Rio Capim	25.900
31700000	Badajós	São Domingos do Capim	mai/71	jul/17	ANA	CPRM	Rio Capim	32.200



LEGENDA

- Estação fluviométrica
- Hidrografia
- Massa d'água
- Área de Estudo
- Bacia do rio Guamá
- Limite municipal
- Limite estadual

Figura 29 – Mapa de localização das estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Guamá, fora da área de estudo



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovias: SEMAS/PA. Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM
Áreas de Recarga/Descarga: ANA/Profill

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_29_Est_Fluvio_Guama
Escala:	1:1.350.000

Para cálculo das vazões no local das estações fluviométricas listadas no Quadro 5, utilizou-se o período de dados compreendido entre 1982 e 2007 (dados consistidos), de forma a manter um período homogêneo de dados entre todas estações. As vazões Q_{95} específicas calculadas com emprego do *software* Hidro 1.2, da ANA, variaram entre 4,69 L/s/km² e 6,68 L/s/km² (Quadro 6).

Quadro 6 – Vazões específicas das estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Guamá, fora da área de estudo

Nome	Área (km ²)	Qmlp (m ³ /s)	Q95 (m ³ /s)	Qmlp (L/s/km ²)	Q95 (L/s/km ²)
VILA CAPOEIRA	3.440	86,53	17,90	25,15	5,20
BOM JARDIM	5.220	135,08	24,50	25,88	4,69
FAZENDA MARINGÁ	25.900	464,47	156,00	17,93	6,02
BADAJÓS	32.200	570,03	215,00	17,70	6,68

O resultado demonstrou que as vazões específicas Q_{95} listadas no Quadro 6 não variam significativamente quando comparadas com a vazão específica Q_{95} consolidada no Plano Estratégico de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia – PERH-TA (2009), calculada em 5,59 L/s/km². Assim, considerou-se essa vazão unitária como representativa da área de estudo e adequada aos objetivos do projeto.

Admitindo-se que a vazão mínima Q_{95} represente a parcela da água de precipitação atmosférica que se infiltra no solo, alcança a zona de saturação e é descarregada na forma de escoamento de base para os rios, em ciclos anuais contínuos, pode-se expressar a recarga como sendo igual à vazão Q_{95} . Essa igualdade considera o sistema aquífero mais raso em equilíbrio com as entradas (recarga) e saídas (descarga) naturais de água, em situação de inexistência de exploração por meio de poços ou ainda em um comportamento de reequilíbrio com as explorações instaladas.

Para sistemas em desenvolvimento equilibrado, onde as recargas natural e induzida se igualam à descarga modificada mais a exploração de poços, as vazões mínimas mensuradas nos cursos superficiais de água devem ser menores do que a recarga total, uma vez que já têm descontadas as retiradas por bombeamento. Nesse cenário, a vazão Q_{95} representa um valor mínimo que, ao ser tomado como referência de recarga, favorece a sustentabilidade dos recursos hídricos, uma vez que as disponibilidades para uso representam uma parcela dessa vazão, que varia de 0% a 100%, definido pela ANA como coeficiente de sustentabilidade.

A Agência Nacional de Águas (ANA, 2013) define Recarga Potencial Direta – RPD como a parcela da precipitação pluviométrica média anual que se infiltra no solo e efetivamente alcança os aquíferos livres, constituindo assim a reserva renovável ou reguladora. Essa recarga inclui em seu cômputo o fluxo de base (Q_b), a vazão de extração das águas subterrâneas por poços tubulares (Q_p) e a recarga profunda (R_p), além da parcela correspondente à circulação lateral (C_L) (Figura 30), conforme discriminada na Equação 14:

$$RPD = Q_b + Q_p + R_p + C_L \quad (\text{Equação 14})$$

Onde RPD, Q_b , Q_p , R_p e C_L em m^3/s .

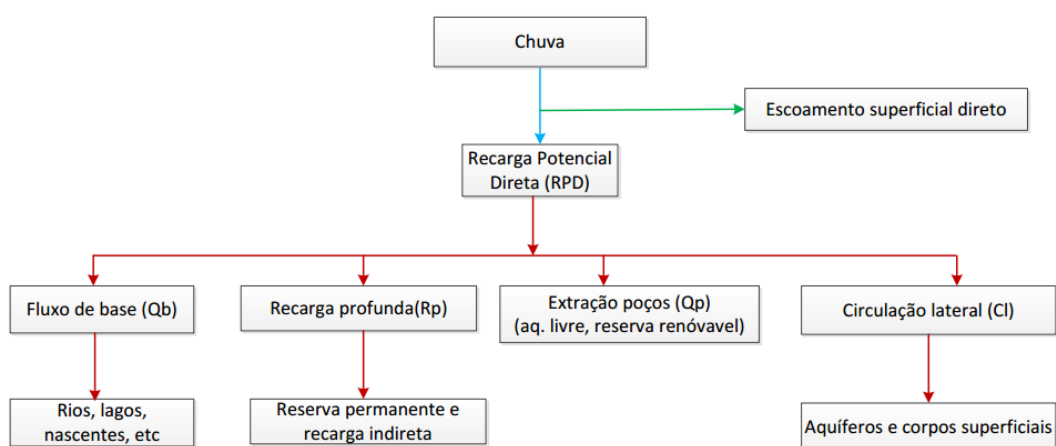


Figura 30 – Diagrama esquemático mostrando processo simplificado de recarga a partir da precipitação pluviométrica.

Em vista da recarga profunda e da circulação lateral serem de difícil determinação, em ANA (2013) recomenda-se a utilização da Equação 15 para determinação da RPD:

$$RPD = A \cdot C_i \cdot P \quad (\text{Equação 15})$$

Onde: A = área; C_i = coeficiente de infiltração (%); e P = precipitação média total anual obtida de séries históricas da bacia hidrográfica (m^3/s).

O coeficiente de infiltração (C_i) é dado pela expressão abaixo:

$$C_i = \frac{Q_b}{P} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde: Q_b = escoamento de base (m^3/s).

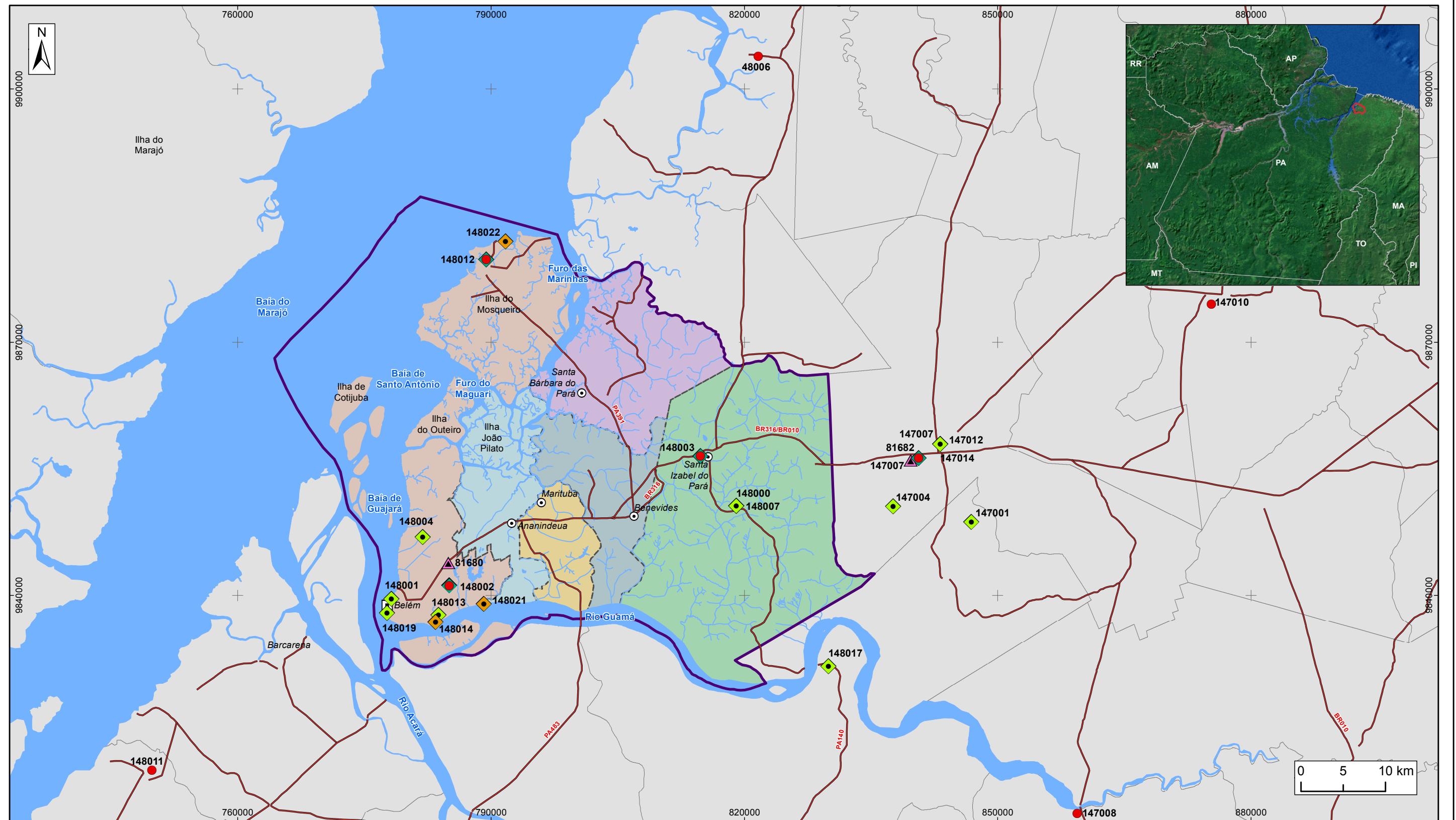
Para a avaliação da precipitação média anual, foram levantados dados de três estações pluviométricas localizadas na área de estudo e cinco de estações localizadas fora da área de estudo (Figura 31). Para cada estação foram selecionados os dados de chuva do período compreendido entre 1983 e 2016 (33 anos consecutivos) e os resultados são mostradas no Quadro 7.

Quadro 7 – Precipitações médias anuais nos municípios próximos à área de estudo.

Código	Município	Precip. Média Total (mm)	Precip. Média - período seco (mm)	Precip. Média - período chuvoso (mm)
48006	VIGIA	2739,06	687,84	2051,22
147007	CASTANHAL	2533,66	696,06	1837,60
147008	SÃO DOMINGOS DO CAPIM	2232,54	572,41	1660,14
147010	IGARAPÉ-AÇU	2439,99	656,95	1783,04
148002	BELÉM	3140,47	857,43	2283,04
148003	SANTA ISABEL DO PARÁ	2884,31	850,31	2034,00
148011	BARCARENA	2142,58	555,18	1587,39
148012	BELÉM	3026,84	955,21	2071,63

Os dados de precipitações registrados nas estações pluviométricas foram interpolados pelo método da *krigagem* no *software ArcGis* para mostrar a distribuição dos totais médios anuais de chuva na área estudada. O mapa resultante (Figura 32) aponta concentração das chuvas na porção sudoeste, com totais médios acima de 3.000 mm, e diminuição gradativa no sentido leste da área, onde alcança pouco mais de 2.500 mm.

A aplicação da ferramenta *Surface Volume* do programa *ArcGis* nos dados do *raster* correspondentes aos registros pluviométricos apresentados no mapa da Figura 32 permitiu obter a precipitação média total anual de 2.944 mm na área de exposição dos aquíferos (1.893 km²) no período de 1983 a 2016. Essa precipitação corresponde ao volume anual de chuvas de 5,57E⁹ m³ ou à vazão de 176,72 m³/s.



LEGENDA

- | | | |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> □ Capital Estadual ⊙ Sede Municipal — Rodovia ~ Hidrografia ☁ Massa d'água ⊕ Área de Estudo | <ul style="list-style-type: none"> Município ANANINDEUA BELÉM BENEVIDES MARITUBA SANTA BÁRBARA DO PARÁ SANTA IZABEL DO PARÁ | <ul style="list-style-type: none"> Estação Pluviométrica Hidroweb ◆ Possui mais de 30 anos de dados ◆ Possui menos de 30 anos de dados ◆ Não possui dados ▲ Estação Automática ● Estações utilizadas no mapa de isoietas (mais de 30 anos de dados) |
|--|--|--|

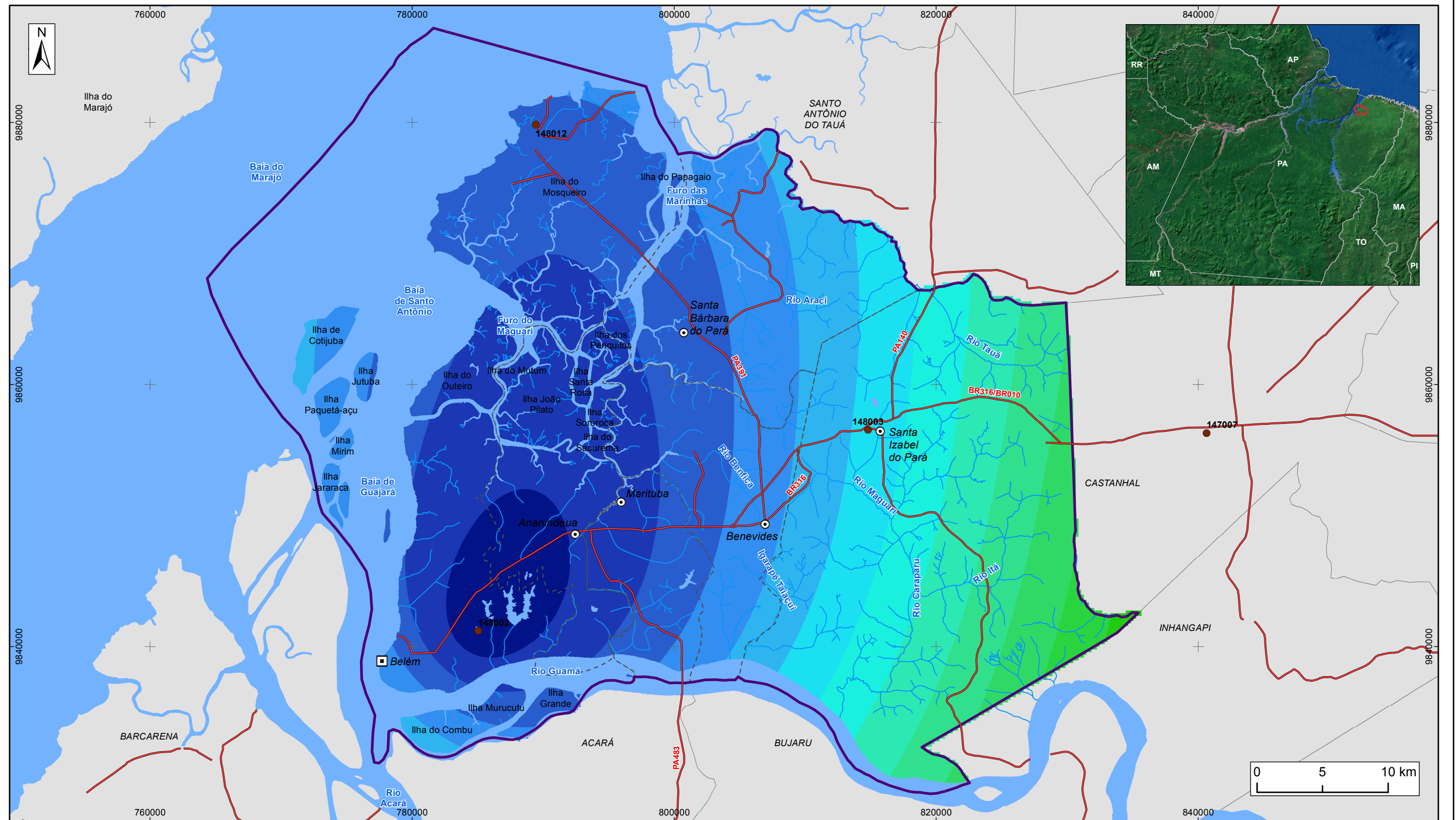
Figura 31 – Localização das estações pluviométricas próximas à área de estudo



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovia: SEMAS/PA, Limites políticos: IBGE
Hidrografia: CPRM
Estações Pluviométricas: Hidroweb-ANA, INMET

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_31_Estacoes_Pluiometricas_A3
Escala:	1:450.000



LEGENDA

<ul style="list-style-type: none"> ☐ Capital Estadual ⊙ Sede Municipal ● Estação pluviométrica ~ Hidrografia — Rodovia ☁ Massa d'água ⊕ Área de Estudo - - - Limite municipal 	<p>Precipitação média total anual (mm)</p> <ul style="list-style-type: none"> 2.571,7 - 2.600 2.600,1 - 2.650 2.650,1 - 2.700 2.700,1 - 2.750 2.750,1 - 2.800 2.800,1 - 2.850 	<ul style="list-style-type: none"> 2.850,1 - 2.900 2.900,1 - 2.950 2.950,1 - 3.000 3.000,1 - 3.050 3.050,1 - 3.100 3.100,1 - 3.150
---	--	--

Figura 32 – Distribuição das precipitações médias totais anuais no período entre 1983 e 2016 na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Precipitação média anual: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_32_Precipitacao_media_A3
Escala:	1:290.000

Tomando-se o valor de Q_{95} (5,59 L/s/km²) e calculando-se a vazão correspondente para a área de exposição dos aquíferos (1.893 km²) tem-se o valor de 10,58 m³/s, admitido para o escoamento de base das bacias. Substituindo-se os valores do escoamento de base e da precipitação média anual (176,72 m³/s) na Equação 17, o coeficiente de infiltração (C_i) resulta em:

$$C_i = \frac{Q_b}{P} = \frac{10,58}{176,72} = 0,06 \text{ ou } 6\% \quad (\text{Equação 17})$$

O Quadro 8 apresenta um resumo com dados de precipitação anual média total, escoamento de base estimado pela vazão Q_{95} e coeficiente de infiltração avaliados para a região de Belém e municípios adjacentes.

Quadro 8 – Precipitação média total, escoamento de base e coeficiente de infiltração estimados para a região de Belém

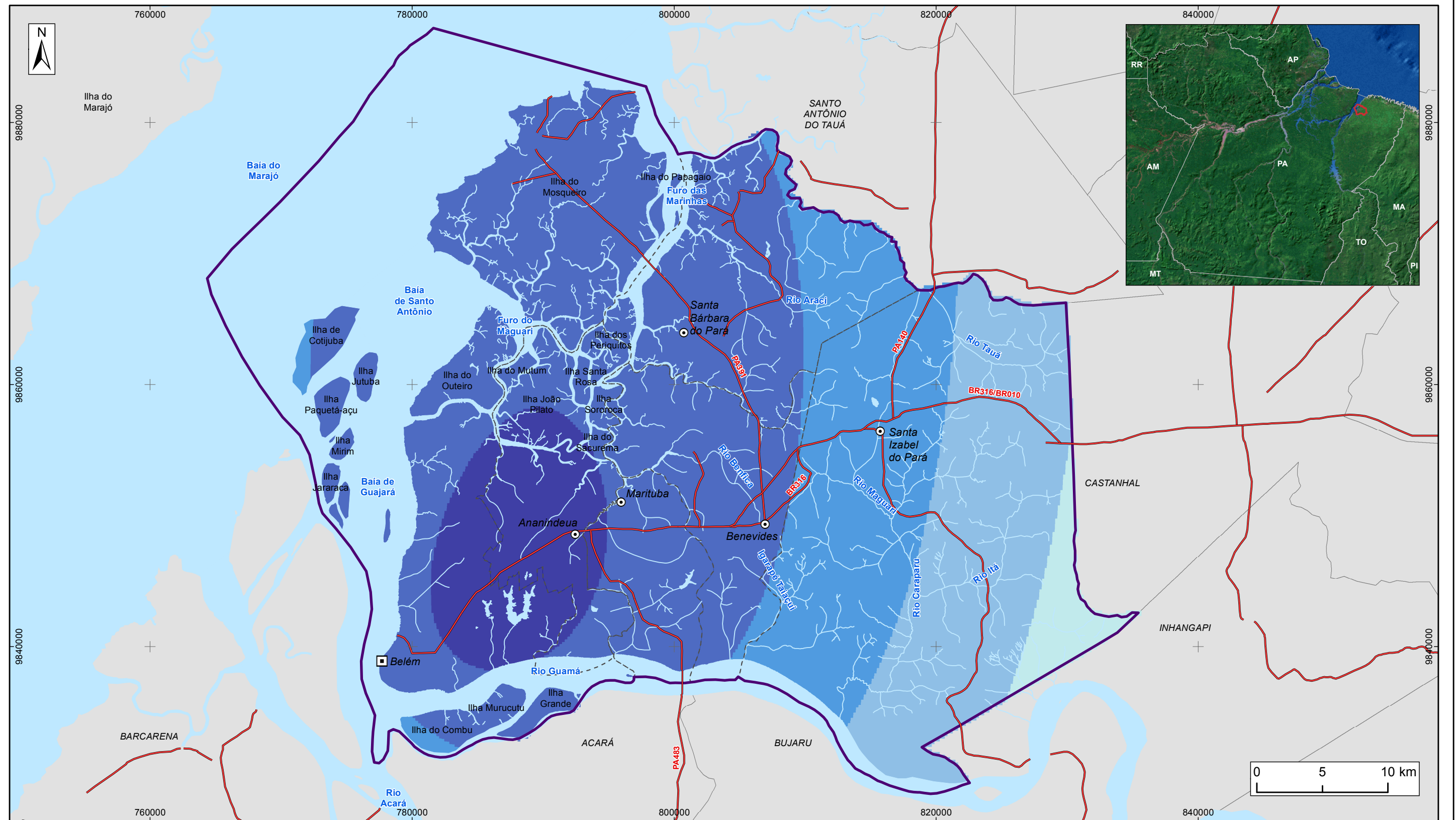
Área (km ²)	Precip. média Total (mm)	Precip. média Total (m ³ /s)	Eb= Q_{95} (m ³ /s)	C_i (%)
1893	2944	176,72	10,58	6,0%

Substituindo-se o valor de C_i na Equação 17, a RPD pode ser estimada em função da distribuição da precipitação atmosférica na área de estudo, como se segue:

$$RPD = 0,06 \cdot \frac{P}{16,66} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde: RPD em m³/s; e P em mm.

Aplicando-se a Equação 18 aos valores do *raster* da Figura 32, pode-se visualizar a distribuição da recarga (m³/s) em função da precipitação (mm) na área de estudo (Figura 33).



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual
 - ⊙ Sede Municipal
 - ~ Hidrografia
 - Rodovia
 - ☁ Massa d'água
 - ⊕ Área de Estudo
 - - - Limite municipal
- | | |
|-------------------------------|-------------|
| Recarga Natural (m³/s) | 9,6 - 10 |
| | 10,1 - 10,5 |
| | 10,6 - 11 |
| | 11,1 - 11,5 |
| | 11,6 - 12 |

Figura 33 – Distribuição da recarga na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Recarga: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_33_Distribuicao_recarga_natural_A3
Escala:	1:290.000

7.3.3 Avaliação da Recarga dos Aquíferos Confinados

Os aquíferos confinados podem não estar perfeitamente isolados dos aquíferos livres superficiais em razão das camadas confinantes não serem totalmente impermeáveis nem extensas. A percolação de água através das camadas confinantes (aquitardos) alcança os reservatórios mais profundos e é responsável pela recarga dos aquíferos classificados como confinados drenantes.

A infiltração ou drenança pelas camadas semi-impermeáveis é um processo que depende da diferença de carga hidráulica entre os aquíferos livres superficiais e os confinados drenantes, e da espessura e condutividade hidráulica dos aquitardos.

Segundo ANA (2013), a recarga dos aquíferos confinados drenantes, também distinguida como recarga profunda, comumente situa-se entre 1% e 10% da recarga efetiva. Na região de Belém e adjacências não existem estudos sobre recarga profunda dos aquíferos confinados integrantes dos sistemas Barreiras e Pirabas.

No caso do Sistema Aquífero Pirabas vale ressaltar ainda que essa unidade geológica não aflora na área de estudo, mas a um pouco mais de 100 km de distância, na região nordeste do Pará.

Para efeitos práticos, a recarga profunda foi estimada em 5% da RPD (recarga potencial direta) neste estudo, cujo valor foi definido em 10,58 m³/s (vide item 7.3.2), de modo que:

$$R_{pr} = 0,05 \cdot RPD = 10,58 \cdot 0,05 = 0,53 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Equação 19})$$

Onde R_{pr}= recarga profunda estimada em 0,53 m³/s.

7.3.4 Recarga Total

A recarga total representa a soma das recargas dos aquíferos livres e confinados drenantes e foi estimada em 11,11 m³/s (Quadro 9).

Quadro 9 – Recargas totais dos sistemas aquíferos terciários da região de Belém

Recargas totais dos sistemas aquíferos	
Aquíferos	Recarga (m ³ /s)
Livres	10,58
Confinados drenantes	0,53
Total	11,11

7.4 AVALIAÇÃO DAS RESERVAS SUBTERRÂNEAS

Em sentido amplo, Custódio & Llamas (1996) definiram reserva hídrica subterrânea como a totalidade da água móvel existente em um sistema aquífero. Em outras palavras, compreende a quantidade de água presente somente nas camadas permeáveis do sistema.

A quantidade de água contida nos aquíferos pode ser distinguida em armazenamento drenável e armazenamento compressível (MACE *et al.*, 2001). Os referidos autores conceituaram o armazenamento drenável como a quantidade de água que pode ser drenada do aquífero em função da porosidade efetiva da rocha; e armazenamento compressível como a quantidade de água armazenada devido aos efeitos elásticos resultantes da compressão do próprio arcabouço físico e da água contida nos poros, em função do coeficiente de armazenamento do aquífero.

Normalmente, as reservas subterrâneas são distinguidas em:

- Reservas reguladoras, renováveis ou ativas;
- Reservas permanentes ou seculares;
- Reservas totais ou naturais;
- Reservas exploráveis.

As reservas renováveis representam a quantidade de água armazenada no aquífero e renovada anualmente a cada ciclo hidrológico, correspondendo à recarga sazonal (Figura 34). Essas reservas são determinantes para a manutenção do escoamento de base dos rios e podem variar de um ano para o outro, dependendo das condições de precipitação atmosférica (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1996). Nesse sentido, as reservas renováveis correspondem à RPD (recarga potencial direta), conforme definição de ANA (2013), e podem ser estimadas nos estudos hidrológicos pelas vazões de base ou mínimas, como $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90} , dependendo da disponibilidade de dados. As reservas renováveis fazem parte do armazenamento drenável dos aquíferos livres.

As reservas permanentes correspondem ao volume de água acumulado no aquífero, não variável em decorrência da flutuação sazonal da superfície potenciométrica (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1996). Num aquífero não confinado compreende o volume de água contido no armazenamento drenável permanente, abaixo no nível de oscilação sazonal.

Já as reservas permanentes de um aquífero confinado abrangem os volumes de água contidos no armazenamento compressível e no armazenamento drenável (Figura

35). Em razão das distintas ordens de grandeza entre o coeficiente de armazenamento e a porosidade efetiva, o armazenamento compressível é muito menor do que o armazenamento drenável.

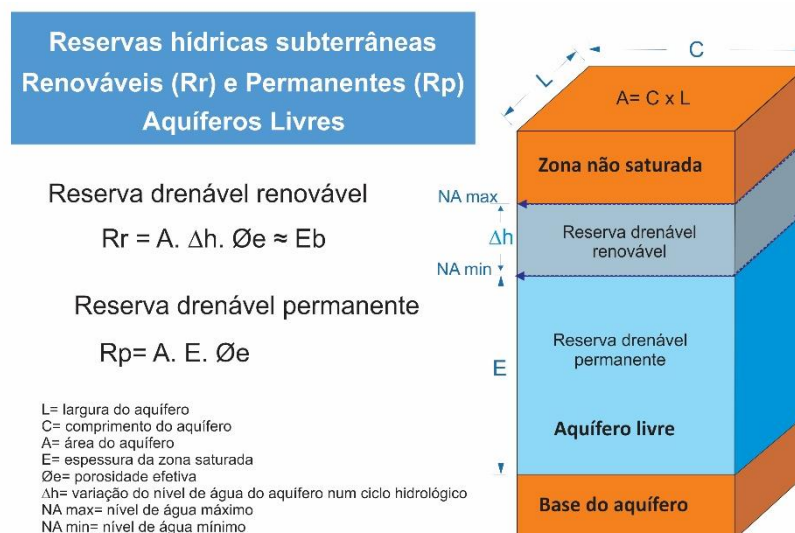


Figura 34 – Representação dos parâmetros utilizados no cálculo das reservas renováveis e permanentes de aquíferos porosos não confinados, considerando-se um sistema em equilíbrio.

As reservas permanentes compreendem a totalidade da água do armazenamento drenável e compressível dos aquíferos confinados, sendo expressas pelas equações abaixo:

$$R_{p1} = A \cdot E \cdot \varnothing_e \quad (\text{Equação 20})$$

Onde: R_{p1} = reserva drenável permanente (m^3/s); A= área do aquífero (m^2); E= espessura do aquífero (m); e \varnothing_e = porosidade efetiva (%). Essa equação define o volume de água contido no armazenamento drenável do aquífero confinado.

$$R_{p2} = A \cdot E' \cdot S \quad (\text{Equação 21})$$

Onde: R_{p2} = reserva compressível permanente; A= área do aquífero (m^2); E' = comprimento do topo do aquífero ao nível estático (m); S= coeficiente de armazenamento. Essa equação define o volume de água contido no armazenamento compressível do aquífero confinado.

**Reservas hídricas subterrâneas
Permanentes (Rp)
Aquíferos Confinados**

Reserva compressível

$$R_p = A \cdot E' \cdot S$$

Reserva drenável

$$R_p = A \cdot E \cdot \emptyset_e$$

L= largura do aquífero
C= comprimento do aquífero
A= área do aquífero
E= espessura da zona saturada
 \emptyset_e = porosidade efetiva
E'= comprimento do topo do aquífero à superfície potenciométrica
S= coeficiente de armazenamento
S.P.= superfície potenciométrica

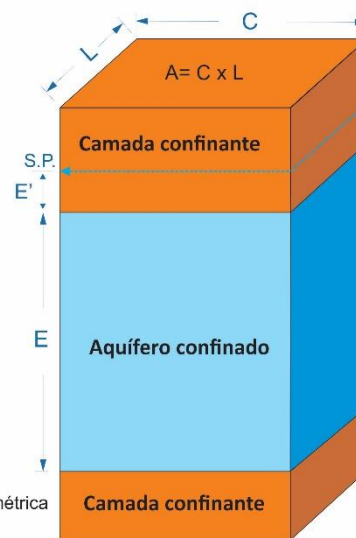


Figura 35 – Representação dos parâmetros utilizados no cálculo das reservas permanentes de aquíferos porosos confinados.

Na Equação 21, o parâmetro E' compreende o intervalo situado entre o topo da superfície potenciométrica e o topo do aquífero confinado (Figura 35). Os estudos mostraram que os sistemas Barreiras e Pirabas compreendem aquíferos com espessuras variáveis, separados por camadas impermeáveis e/ou semipermeáveis, ambos classificados como multicamadas. Nas porções superiores do Sistema Barreiras ocorrem intervalos aquíferos livres rasos, que permitem a drenança de água de fontes superficiais (rios, lagos e precipitações atmosféricas) para os sistemas semiconfinados a confinados, abaixo, a depender da diferença de carga hidráulica no meio.

Como explanado no item 7.1.6, os intervalos aquíferos dos sistemas multicamadas apresentam cargas hidráulicas distintas, de tal forma que o nível de água registrado num poço representa a interação entre os níveis de água de todos os intervalos aquíferos atravessados e cobertos por filtros. Nesse caso, as cargas hidráulicas são reflexo dessas interações e não de um único aquífero, razão pela qual as superfícies potenciométricas dos aquíferos confinados dos sistemas Barreiras e Pirabas não puderam ser delineadas. Consequentemente, as reservas hídricas compressíveis dos aquíferos confinados não foram calculadas devido à impossibilidade de se determinar o parâmetro E' .

As reservas hídricas subterrâneas totais compreendem a soma das reservas renováveis e permanentes dos aquíferos.

As reservas explotáveis representam uma parcela das reservas totais dos aquíferos e, em tese, constituem a quantidade máxima de água que poderia ser extraída dos aquíferos, sem riscos de prejuízos ao manancial (CPRM, 1997). Do ponto de vista prático, corresponde à disponibilidade hídrica, a qual será tratada no capítulo seguinte.

7.4.1 Avaliação das Reservas Subterrâneas do Sistema Aquífero Barreiras

O Sistema Aquífero Barreiras é composto por coberturas recentes (aluviões, colúvios e elúvios), depósitos inconsolidados identificados como Pós-Barreiras e rochas sedimentares da Formação Barreiras, expostos em toda a área de estudo. Esse sistema reúne aquíferos livres em sua porção superior rasa e aquíferos confinados a confinados drenantes em sua porção média/inferior, depreendendo-se, portanto, que incorpora reservas hídricas renováveis e permanentes.

As reservas renováveis, segundo definição, correspondem à recarga sazonal dos aquíferos livres, equivalendo ao escoamento de base anual dos rios. Neste estudo, a recarga sazonal corresponde ao conceito de Recarga Potencial Direta – RPD (ANA, 2013), e foi estimada em 10,58 m³/s com base em dados hidrológicos extraídos do Plano Estratégico de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia – PERH-TA (2009), conforme metodologia apresentada no item 7.3.2.

O cálculo das reservas drenáveis permanentes do Sistema Barreiras baseou-se na Equação 22, transcrita abaixo:

$$Rp1 = A.E.\phi e \quad \text{(Equação 22)}$$

Conhecendo-se a área de ocorrência do aquífero e a espessura, a equação toma a seguinte forma:

$$Rp1 = V.\phi e \quad \text{(Equação 23)}$$

Onde: V= volume de rocha saturada (m³).

O cálculo do volume de rocha saturada foi feito por meio da aplicação da ferramenta *Surface Volume*, do *software* ArcGis sobre o *raster* de espessuras do Aquífero Barreiras (Figura 12), resultando num volume de 1,12.E¹¹ m³, distribuído por área superficial de 1.893 km².

São escassos os dados de porosidade efetiva do Aquífero Barreiras na área de estudo, conforme mostrados no Quadro 10, onde se observa predominância de valores da ordem de 20% a 22%. Esses valores são compatíveis com sedimentos compostos por areias grossas e cascalhos (FETTER, 2001). Neste estudo, foi adotado o valor de 20% para estimativa das reservas drenáveis.

Quadro 10 – Características hidráulicas do Sistema Aquífero Barreiras

Características hidráulicas Aquífero Barreiras					
Autor	Condutividade hidráulica K (cm/s)			Porosidade (%)	S (%)
	Mínima	Máxima	Média		
Bahia (2003, 2006)	3,16E-04	4,01E-03	1,63E-04	28	
Façanha (1996) Tancredi & Tagliarini (1999a, 1999b, 1999c)	1,38E-02	1,95E-01		20 a 22	
CPRM (2002)				20	1,67E-04
Oliveira (2002)			9,26E-04	22	
Tancredi & Correia (2016)			9,72E-04	21	

Substituindo-se os valores de porosidade efetiva (20%) e volume rochoso ($1,12.E^{11} \text{ m}^3$) na Equação 23, tem-se:

$$Rp1 = V. \phi e = 1,12.E^{11}. 0,2 = 2,24.E^{10} \text{ m}^3 \quad (\text{Equação 24})$$

Obtém-se o volume de $2,24.E^{10} \text{ m}^3$. Nesse cálculo, o volume corresponde à quantidade total de água que poderia estar armazenada no aquífero, caso seu arcabouço fosse constituído somente por sedimentos permeáveis, o que não é o caso do Sistema Barreiras. Ao contrário, esse aquífero é constituído por intercalações frequentes de sedimentos permeáveis e impermeáveis.

O Quadro 11 distingue as espessuras de rochas permeáveis e impermeáveis do Aquífero Barreiras com base nas curvas de raios gama de 32 perfilagens geofísicas, realizadas na área de estudo. A mediana da relação entre espessuras de rochas permeáveis e espessura total foi 0,45, ou seja, do volume total de rochas do arcabouço, apenas 45% apresenta condições de armazenamento e transmissão água, representando as camadas aquíferas ou os intervalos aquíferos.

Quadro 11 – Espessuras, em metros, de rochas permeáveis e impermeáveis dos aquíferos Barreiras e Pirabas avaliadas com base em perfilagens geofísicas de poços.

Perfilagem	Aquífero Barreiras		Aquífero Pirabas	
	Rochas permeáveis	Rochas impermeáveis	Rochas permeáveis	Rochas impermeáveis
R3	48	59	133	18
R5	29	55	123	47
R6	42	34	143	39
R9	37	40	148	50
R10	14	58		
R11	12	55	140	41
R12	65	26	0	0
R13	39	47	129	34
R14	40	34	121	54
R17	76	63		
R20	35	42		
R25	21	42		
R28	59	42		
R30	15	47		
R36	0	0	115	26
R39	44	39	147	23
R40	52	52	140	28
R41	57	29	136	26
R42	30	49	126	34
R43	32	50		
R44	37	64	131	31
R45	48	89	125	12
R46	19	40	150	32
R47	26	57	126	56
R48	26	44		
R49	18	45		
R50	49	28		
R51	48	42	123	38
R55	40	40	0	0
Cosanpa P3	24	24	164	39
Marituba	0	0	162	41
NA-56	35	43	147	36

Assim, ao volume total de água estimado pela Equação 24 foi aplicado o fator de correção de 0,45 para determinar as reservas drenáveis permanentes, efetivamente acumuladas nos intervalos aquíferos e passíveis de extração. O Quadro 12 apresenta um resumo dos parâmetros utilizados no cálculo dessas reservas e o resultado final.

Quadro 12 – Reservas hídricas drenáveis permanentes do Sistema Aquífero Barreiras

Reservas permanentes do Aquífero Barreiras				
Área (km ²)	Volume (m ³)	Øe (%)	Relação rochas permeáveis/total	Reserva drenável permanente (m ³)
1893	1,12E+11	20	0,45	1,01E+10

As reservas hídricas subterrâneas totais do Aquífero Barreiras compreendem a soma das reservas renováveis (RPD) e permanentes, totalizando 1,04.E¹⁰ m³, conforme mostradas no Quadro 13. Ressalva-se que as reservas compressíveis não foram calculadas em razão da impossibilidade de se estabelecer a superfície potenciométrica dos aquíferos confinados e semiconfinados desse sistema. Sendo assim, é fato que a reserva total do Sistema Aquífero Barreiras é maior do que aquela estimada neste estudo.

Quadro 13 – Reservas hídricas totais do Sistema Aquífero Barreiras

Reservas hídricas do Aquífero Barreiras			
Área k(m ²)	Reserva drenável permanente (m ³)	Reserva renovável (m ³ /ano)	Reservas totais (m ³)
1893	1,01E+10	3,34E+08	1,04E+10

7.4.2 Avaliação das Reservas Subterrâneas do Sistema Aquífero Pirabas

O Sistema Aquífero Pirabas é composto por rochas sedimentares da Formação Pirabas e encontra-se totalmente coberto pelo Sistema Barreiras, dando origem a aquíferos confinados e semiconfinados, em toda sua extensão. Esse sistema abrange reservas hídricas permanentes dos armazenamentos drenável e compressível. Conforme explicado no início deste capítulo, as reservas do armazenamento compressível não foram calculadas em razão da carência do parâmetro E' , que representa o intervalo situado entre o topo da superfície potenciométrica do Sistema Pirabas e o topo do aquífero.

O cálculo das reservas drenáveis permanentes do Sistema Pirabas foi feito com auxílio da Equação 25, transcrita abaixo:

$$Rp1 = V \cdot \varnothing e \quad (\text{Equação 25})$$

Onde: V= volume de rocha saturada (m³).

O cálculo do volume de rocha saturada foi feito por meio da aplicação da ferramenta *Surface Volume*, do *software* ArcGis, sobre o *raster* de espessuras do Aquífero Pirabas (Figura 13), resultando num volume de 3,53.E¹¹ m³, distribuído em subsuperfície por 1.893 km².

Há apenas um único dado de porosidade efetiva do Aquífero Pirabas na área de estudo, conforme mostrado no Quadro 14, de 20%. Esse valor é compatível com sedimentos compostos por areias grossas e cascalhos (FETTER, 2001).

Quadro 14 – Características hidráulicas do Sistema Aquífero Pirabas

Características hidráulicas Aquífero Pirabas					
Autor	Condutividade hidráulica K (cm/s)			Porosidade (%)	S (%)
	Mínima	Máxima	Média		
CPRM (2002)	2,69E-02	9,64E-02		20	1,00E-04
Oliveira et al. (2014)			5,87E-02		1,13E-04

Substituindo-se os valores de porosidade efetiva (20%) e volume rochoso ($3,53.E^{11} \text{ m}^3$) na Equação 25, tem-se:

$$R_p1 = V \cdot \phi_e = 3,53.E^{11} \cdot 0,2 = 7,06.E^{10} \text{ m}^3 \quad (\text{Equação 26})$$

O volume obtido, a exemplo do explanado anteriormente, considera a quantidade total de água que poderia estar armazenada no aquífero, desde que seu arcabouço fosse constituído somente por sedimentos permeáveis. Como este aquífero também possui intercalações de sedimentos impermeáveis, há necessidade de descontar o volume ocupado por esses sedimentos para estimativa de uma reserva drenável mais realista.

Analisando-se os dados de espessuras do Aquífero Pirabas, mostrados no Quadro 11, baseados nas curvas de raios gama de 32 perfilagens geofísicas, realizadas na área de estudo, a mediana da relação entre espessuras de rochas permeáveis e espessura total é 0,80, ou seja, do volume total de rochas do arcabouço da formação Pirabas, 80% dele apresenta condições de armazenamento e transmissão água, representando os intervalos aquíferos desse sistema.

Assim, ao volume total de água estimado pela Equação 26 deve ser aplicado o fator de correção 0,80 para obter um valor de reserva drenável permanente efetivamente passível de extração. As reservas hídricas subterrâneas permanentes do Aquífero Pirabas totalizam $5,65.E^{10} \text{ m}^3$, conforme mostradas no Quadro 15.

Quadro 15 – Reservas hídricas drenáveis permanentes do Sistema Aquífero Pirabas

Reservas permanentes do Aquífero Pirabas				
Área (km ²)	Volume (m ³)	ϕ_e (%)	Relação rochas permeáveis/total	Reserva drenável permanente (m ³)
1893	3,53E+11	20	0,80	5,65E+10

Ressalva-se que as reservas compressíveis não foram calculadas em razão da impossibilidade de se estabelecer a superfície potenciométrica dos aquíferos confinados e semiconfinados desse sistema. Assim, as reservas do Sistema Aquífero Pirabas aqui estimadas são menores do que aquelas efetivamente existentes.

7.4.3 Reservas Subterrâneas Totais

As reservas hídricas subterrâneas totais dos aquíferos terciários da região de Belém alcançam $6,69.E^{10}$ m³ (Quadro 16), desconsideradas, pelos motivos já discutidos anteriormente, as reservas permanentes compressíveis.

Quadro 16 – Reservas hídricas drenáveis permanentes dos aquíferos terciários da região de Belém

Reservas hídricas totais dos aquíferos terciários				
Aquíferos	Área k(m ²)	Reserva drenável permanente (m ³)	Reserva renovável (m ³ /ano)	Reservas totais (m ³)
Barreiras	1893	1,01E+10	3,34E+08	1,04E+10
Pirabas	1893	5,65E+10	0	5,65E+10
Total	1893	6,66E+10	3,34E+08	6,69E+10

O Sistema Aquífero Pirabas armazena 84% de toda reserva hídrica subterrânea da área estudada, enquanto o Sistema Aquífero Barreiras armazena os 16% restantes. A reserva renovável do Sistema Aquífero Barreiras representa apenas 3,2% de sua reserva permanente.

7.5 AVALIAÇÃO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS SUBTERRÂNEAS

O termo disponibilidade hídrica remete à quantidade de água subterrânea que pode ser extraída do aquífero sem riscos de prejuízo ao manancial e corresponde às reservas explotáveis, constituídas por parcela das reservas renováveis e permanentes (CPRM, 1997).

A quantidade de água que pode ser extraída vincula-se à sustentabilidade do recurso subterrâneo, entendida como o desenvolvimento e utilização adequados, de modo que a exploração possa ser mantida por tempo indefinido sem causar consequências ambientais, sociais ou econômicas inaceitáveis (ALLEY *et al.*, 1999). Os referidos autores entendem que “consequências inaceitáveis” é um termo bastante subjetivo e envolve grande número de critérios para sua definição, todavia, a sustentabilidade hídrica subterrânea deve levar em conta o contexto completo do sistema hidrológico, no qual a água subterrânea é parte.

O *Texas Water Development Board* (TWDB) considera como disponibilidades hídricas subterrâneas o volume produzido pela recarga efetiva, mais a quantidade de água que pode ser extraída anualmente do armazenamento permanente durante um período de tempo programado, de modo a não causar danos ambientais irreversíveis, incluindo deterioração da qualidade da água (MACE *et al.*, 2001).

A recarga efetiva é a quantidade de água que recarrega o aquífero e está disponível para bombeamento, sendo geralmente menor do que a recarga total (MACE *et al.*, 2001).

A disponibilidade contempla várias alternativas em função dos distintos níveis de segurança do aquífero e do sistema hídrico superficial (CPRM, 1997). Estudos hidrogeológicos realizados no Brasil pela ANA (2004, 2005) consideraram a disponibilidade hídrica subterrânea como correspondente a 20% das reservas renováveis. Estudos realizados na década 90 na região metropolitana de São Paulo (SABESP-CEPAS, 1994) adotaram, em nível de planejamento, um percentual variando entre 25% e 50% das reservas renováveis. Nenhum desses estudos mencionados contemplou a parcela das reservas permanentes nas disponibilidades.

Considerando um cenário de 50 anos de exploração contínua, Rocha (2005) e Costa (1999) propuseram incorporar percentual de 10% das reservas permanentes nas

disponibilidades hídricas. Segundo os autores, este percentual corresponderia à retirada de 0,2% ao ano do volume permanente armazenado no aquífero.

Mais recentemente, ANA (2013) denominou Reserva Potencial Explotável (RPE) como a parcela da Recarga Potencial Direta (RPD) de aquíferos livres que pode ser utilizada, de modo sustentável, sem interferir nas vazões superficiais mínimas referenciais para outorga, como a Q_{90} , $Q_{7,10}$ e a Q_{95} . Vale ressaltar que a RPE se aplica apenas para aquíferos livres conectados com os corpos hídricos superficiais e é recomendável nos casos onde a água subterrânea tem parcela significativa no escoamento total. Essa definição de reserva explotável difere do conceito de disponibilidade hídrica apresentado por CPRM (1997), por não considerar a parcela das reservas permanentes dos aquíferos.

Neste estudo, as reservas explotáveis constituídas por parcela das reservas renováveis e permanentes são consideradas disponibilidades hídricas subterrâneas, como definido em CPRM (1997).

7.5.1 Disponibilidade da Reserva Renovável

Para avaliação das disponibilidades referentes às reservas renováveis seguiu-se proposição de ANA (2013), que define essas disponibilidades como Reserva Potencial Explotável (RPE).

A RPE é calculada mediante a aplicação de um fator sobre a Recarga Potencial Direta (RPD), definido como Coeficiente de Sustentabilidade (C_s). O coeficiente de sustentabilidade compreende uma porcentagem que varia de 0 a 100%, cujo valor a ser adotado é avaliado em função da contribuição do aquífero para os rios, a grosso modo, a relação Q_{90}/Q_{50} e deve ser decidido pelo órgão gestor, tendo em vista a conservação e uso racional dos recursos hídricos de interesse local e a interdependência entre as águas subterrâneas e superficiais.

Atualmente não há definição por parte do órgão gestor (SEMAS) de um C_s para os aquíferos da região de Belém e municípios adjacentes, de modo que para efeito de estimativa será adotado o valor de 0,5 neste estudo, considerando que a relação Q_{90}/Q_{50} das estações fluviométricas avaliadas nas adjacências da área de estudo tem um valor médio de 0,44. Assim, a RPE é expressa pela Equação 27:

$$RPE = RPD \cdot C_s \quad (\text{Equação 27})$$

Substituindo-se os valores de Cs (0,5) e RPD ($1,67.E^8$ m³/ano) na Equação 27, temos:

$$RPE = RPD.Cs = 3,34.E^8 * 0,5 = 1,67.E^8 \text{ m}^3/s \quad (\text{Equação 28})$$

Assim, a RPE é igual a $1,67.E^8$ m³/s e representa as disponibilidades do Sistema Aquífero Barreiras em condições não confinadas ou livre.

7.5.2 Disponibilidade da Reserva Permanente

Para avaliação das disponibilidades referentes às reservas permanentes considerou-se a proposição de Rocha (2005) e Costa (1999), na qual 10% das reservas permanentes seriam exploradas em 50 anos. Esse percentual corresponde à retirada de 0,2% ao ano do volume armazenado no aquífero, de acordo com a expressão:

$$Drp = 0,002 . Rp \quad (\text{Equação 29})$$

Para o Aquífero Barreiras, as reservas permanentes foram estimadas em $1,01.E^{10}$ m³ (Quadro 13). Substituindo esse valor na Equação 29, as disponibilidades resultam em $2,02.E^7$ m³/ano:

$$Drp = 0,002 . 1,01.E^{10} = 2,02.E^7 \text{ m}^3/\text{ano} \quad (\text{Equação 30})$$

Para o Aquífero Pirabas, as reservas permanentes foram estimadas em $5,65.E^{10}$ m³ (Quadro 15). Substituindo esse valor na Equação 29, as disponibilidades resultam em $1,13.E^8$ m³/ano:

$$Drp = 0,002 . 5,65.E^{10} = 1,13.E^8 \text{ m}^3/\text{ano} \quad (\text{Equação 31})$$

7.5.3 Disponibilidades Hídricas Totais

As disponibilidades hídricas totais referentes às reservas permanentes dos aquíferos da região de Belém somam $1,33.E^8$ m³/ano. Os resultados são sumariados no Quadro 17.

Quadro 17 – Disponibilidades hídricas dos aquíferos terciários da região de Belém

Disponibilidades hídricas totais dos aquíferos terciários								
Aquíferos	Reserva drenável permanente		Reserva renovável		Disponibilidades das reservas renováveis		Disponibilidades das reservas permanentes	
	m ³	km ³	m ³ /ano	km ³ /ano	m ³ /ano	km ³ /ano	m ³ /ano	km ³ /ano
Barreiras	1,01E+10	10,10	3,34E+08	0,33	1,67E+08	0,17	2,02E+07	0,02
Pirabas	5,65E+10	56,51	0	0,00	0	0,00	1,13E+08	0,11
Total	6,66E+10	66,61	3,34E+08	0,33	1,67E+08	0,17	1,33E+08	0,13

7.6 VULNERABILIDADE E PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

7.6.1 Vulnerabilidade Natural

O reconhecimento de que as águas subterrâneas constituem reserva estratégica e vital para abastecimento das populações suscitou preocupação com a proteção dos aquíferos (FOSTER, 1987). Nas últimas décadas, a Agência Nacional de Águas (ANA) tem desenvolvido estudos nesse sentido, como por exemplo, o “*Estudo de Vulnerabilidade Natural à Contaminação e Estratégias de Proteção do Sistema Aquífero Guarani nas Áreas de Afloramento*” e “*Estudos Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e Proposição de Modelo de Gestão Integrada e Compartilhada*”, os quais foram aqui utilizados como referência.

A vulnerabilidade de um aquífero significa sua maior ou menor susceptibilidade de ser afetado por uma carga poluidora (IG, 1997). Segundo Foster & Hirata (1993), a vulnerabilidade do aquífero é função da inacessibilidade hidráulica da penetração de contaminantes e da capacidade de atenuação dos estratos acima da zona saturada do aquífero, como resultado de sua retenção física e reações químicas com o contaminante. Para os autores, a vulnerabilidade deveria ser avaliada para cada contaminante específico ou para cada classe de contaminante, todavia, este procedimento é impraticável.

Os mecanismos de recarga da água subterrânea e a capacidade natural de atenuação do contaminante no solo e no subsolo variam amplamente segundo as condições geológicas próximas à superfície. A aplicação do conceito de vulnerabilidade à contaminação estabelece o tipo e nível de controle de emissão de poluentes no solo, de acordo com sua capacidade de atenuação (FOSTER *et al.*, 2006).

No mapeamento da vulnerabilidade, dificilmente estão disponíveis dados técnicos adequados para avaliação da vulnerabilidade à infinidade de contaminantes existentes. Tendo em vista objetivos práticos, os mapas de vulnerabilidade podem ser mais genéricos, desde que suas limitações sejam bem definidas (FOSTER *et al.*, 2006).

Vários métodos são utilizados para avaliação da vulnerabilidade natural de um aquífero, como o GOD (FOSTER, 1987), DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987), EPPNA (EPPNA, 1998), AVI (STEMPVOORT *et al.*, 1992), SINTACS (CIVITA, 1994), IS (FRANCÉS *et al.*, 2001), SIS (LE GRAND, 1964) e SEM (KULFS *et al.*, 1980) (Quadro 18).

Todos esses métodos têm como premissa que o contaminante tenha a mesma mobilidade relativa da água em meio poroso (FOSTER, 1987). Os métodos DRASTIC e GOD são os mais comumente utilizados no mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos.

Em razão da maior simplicidade e exigência de poucos dados técnicos, o método GOD é o mais indicado para avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos superficiais (Barreiras, Pós-Barreiras e coberturas recentes), aqui reunidos no Sistema Aquífero Barreiras.

O método GOD se baseia em metodologia empírica proposta inicialmente por Foster & Hirata (1993) e com modificações posteriores (FOSTER *et al.*, 2006), que leva em consideração parâmetros como ocorrência de água subterrânea (*Groundwater occurrence*), classificação do aquífero (*Overall aquifer class*) e profundidade do topo do aquífero (*Depth to groundwater table*).

Quadro 18 – Índices de vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos e seus respectivos fatores de ponderação

Índice	Método de avaliação	Fatores	Referência
Surface Impoundment Assessment	Paramétrico. Sistema de disposição de águas servidas.	Zona não saturada; Importância do recurso; qualidade das águas subterrâneas; periculosidade do material.	(LE GRAND, 1964)
Site Ranking Methodology	Paramétrico. Disposição de resíduos sólidos e novas indústrias	Uso da água e qualidade; nível e tipos de contaminação; profundidade do nível d'água; permeabilidade do solo; características dos resíduos (toxicidade e persistência).	(KULFS <i>et al.</i> , 1980)
DRASTIC	Paramétrico. Vulnerabilidade Geral	(D) Profundidade do nível d'água; (R) Recarga do aquífero; (A) Material do aquífero; (S) Tipo de solo; (T) Topografia; (I) Influência da zona não saturada; (C) Condutividade hidráulica.	(ALLER <i>et al.</i> , 1987)
GOD	Paramétrico. Vulnerabilidade Geral	(G) Ocorrência de água subterrânea; (O) Classificação geral do aquífero; (D) Profundidade do nível d'água.	(FOSTER, 1987)
AVI (Aquifer Vulnerability Index)	Paramétrico. Vulnerabilidade Geral	Espessura (di) de cada nível sedimentar acima da superfície freática. Condutividade hidráulica (Ki).	(STEMPVOORT <i>et al.</i> , 1992)
SINTAC	Paramétrico. Vulnerabilidade Geral	Igual ao DRASTIC, mas com pesos diferentes.	(CIVITA, 1994)
EPPNA (Equipe de Projeto do Plano Nacional da Água)	Paramétrico. Vulnerabilidade Geral	De acordo com as características de cada formação litológica/hidrogeológica.	(EPPNA, 1998)
IS (índice de Susceptibilidade)	Paramétrico. Vulnerabilidade Geral	Igual ao DRASTIC, mas com pesos diferentes e considerando a ocupação do solo.	(FRANCÉS <i>et al.</i> , 2001)

Os três parâmetros GOD são avaliados subjetivamente com base nos índices estabelecidos na Figura 36. Inicialmente, avalia-se a condição de ocorrência da água

subterrânea numa escala de 0 a 1. Em seguida, avalia-se o tipo litológico do substrato acima da zona saturada do aquífero, com discriminação do grau de consolidação, características granulométricas e tipo de permeabilidade (por fissura ou poros), numa escala de 0,4 a 1. Logo após, avalia-se a profundidade de ocorrência do nível de água ou do topo do aquífero confinado numa escala de 0,6 a 1,0. O produto dos três parâmetros avaliados é o índice de vulnerabilidade, expresso em termos relativos numa escala de 0 a 1, que permite uma classificação em cinco classes: insignificante, baixa, média, alta e extrema (Figura 36).

Foster & Hirata (1993) advertem que a presença de camadas estratificadas com propriedades hidráulicas muito diferentes, como o caso de camadas menos permeáveis cobrindo aquíferos livres e dando origem a aquíferos suspensos ou cobertos não-confinados, ou ainda situações de semiconfinamento, podem dificultar a aplicação do método GOD.

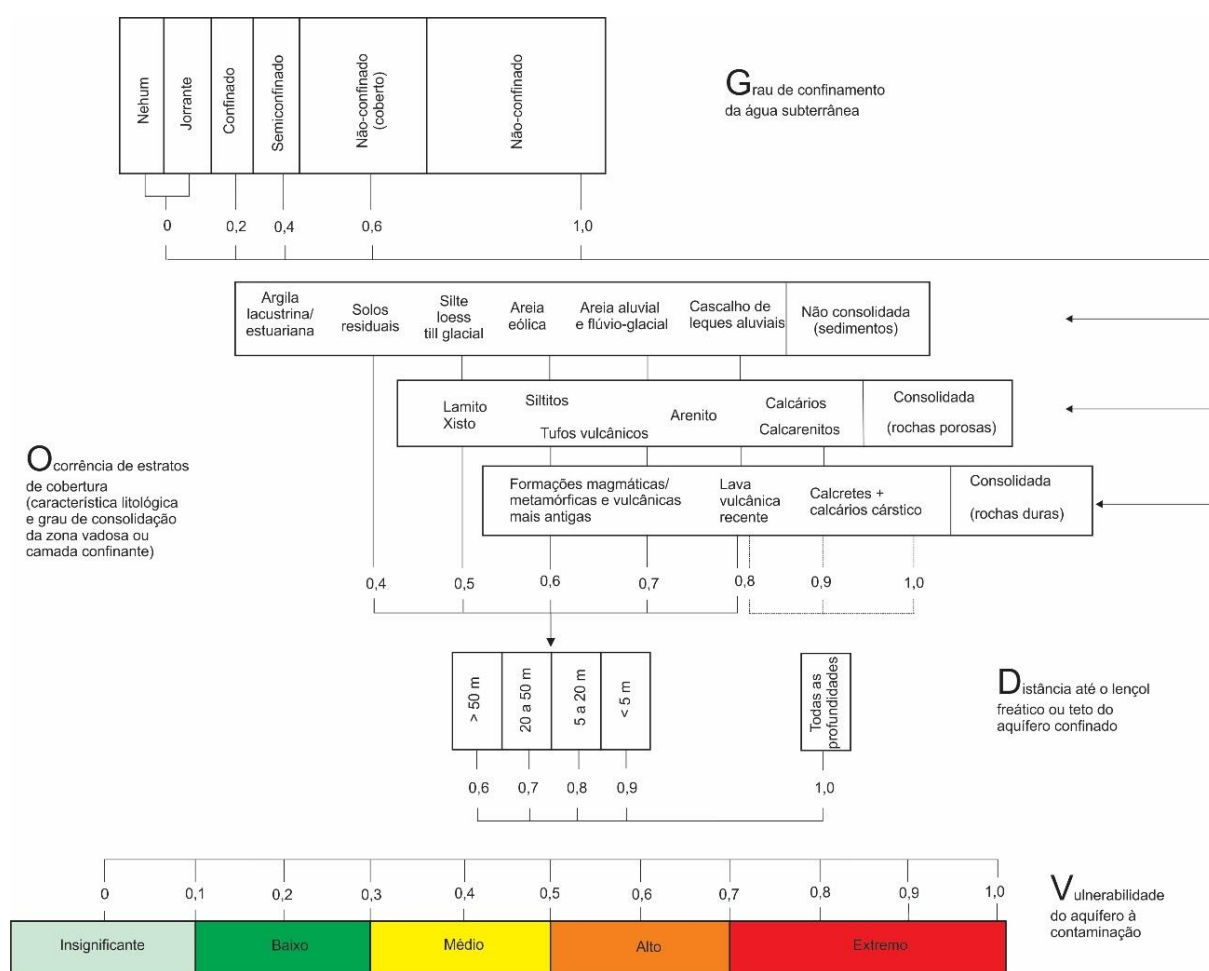


Figura 36 – Índices de vulnerabilidade GOD (FOSTER *et al.*, 2006).

O parâmetro “modo de ocorrência da água subterrânea ou condição do aquífero” considera a existência de aquíferos livres nas porções formadas pelas unidades

geológicas Pós-Barreiras e Barreiras. Para essa condição, foi definido o índice de 0,9 para ambas as unidades litoestratigráficas aflorantes na área de estudo.

O segundo parâmetro avaliado pelo método GOD foi o substrato litológico. A Formação Barreiras e a unidade Pós-Barreiras compreendem arenitos de granulometria média, mal selecionados, interdigitados com argilitos, arenitos argilosos e conglomerados, pouco consolidados. Em razão da similaridade litológica, para esta condição foi definido o índice de 0,8 para ambas as unidades aflorantes na área de estudo.

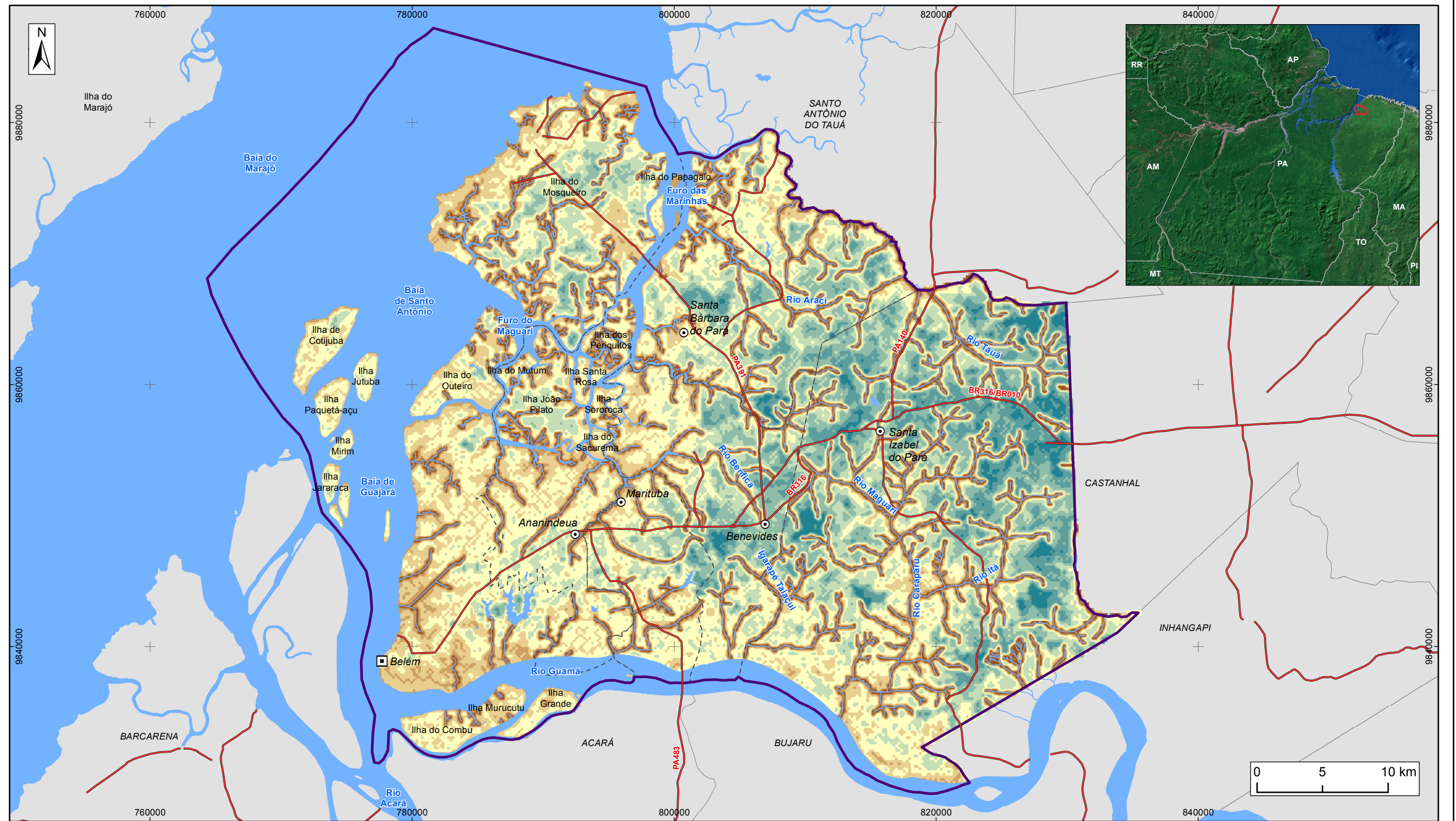
O terceiro parâmetro, “profundidade de ocorrência do nível de água do aquífero livre”, compreende quatro classes baseadas na profundidade do nível de água do aquífero. Para obtenção dessas profundidades foram utilizados o MDT (modelo digital de terreno), que representa a superfície topográfica, e o mapa da distribuição das cargas hidráulicas (potenciometria) do Sistema Aquífero Barreiras (Figura 19).

Por meio do método de subtração de grids entre o *raster* do MDT e o *raster* do mapa potenciométrico, obteve-se um mapa preliminar de profundidade do nível de água (NA) do aquífero. O *raster* do MDT foi elaborado a partir do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), regridado com auxílio da ferramenta *Topo to Raster* para interpolação ajustada pela drenagem. Considerando que as profundidades do NA não podem ser menores do que zero, valores negativos foram convertidos para zero. Em seguida, os rios e lagos existentes nas áreas aflorantes do SAG foram convertidos também em *raster* com valores zero, uma vez que representam pontos de afloramento das águas subterrâneas. Realizando uma operação de mosaico, juntou-se o *raster* de profundidade do NA com o *raster* dos rios e lagos. Em seguida, o *raster* resultante foi transformado em pontos cotados e feito nova *gridagem* com o aplicativo *topo to raster* do programa ArcGis, para obtenção de mapa mais hidrologicamente ajustado, representativo do mapa de profundidade do NA (Figura 37). Em seguida, o mapa de profundidade do NA foi reclassificado de acordo com as classes estabelecidas pelo método GOD (Figura 38).

O índice de vulnerabilidade final estabelecido pelo método GOD é determinado pelo produto dos três parâmetros avaliados anteriormente, expresso em termos relativos numa escala de 0 a 1, e agrupados em cinco classes principais de vulnerabilidade variando entre insignificante, baixa, média, alta e extrema (Quadro 19).

Quadro 19 – Definição das classes de vulnerabilidade GOD

Classe de vulnerabilidade	Definição
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação
Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação
Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação)



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual
- ⊙ Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Rodovia
- ☁ Massa d'água
- ⊕ Área de Estudo
- - - Limite municipal

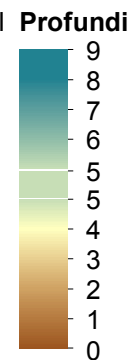


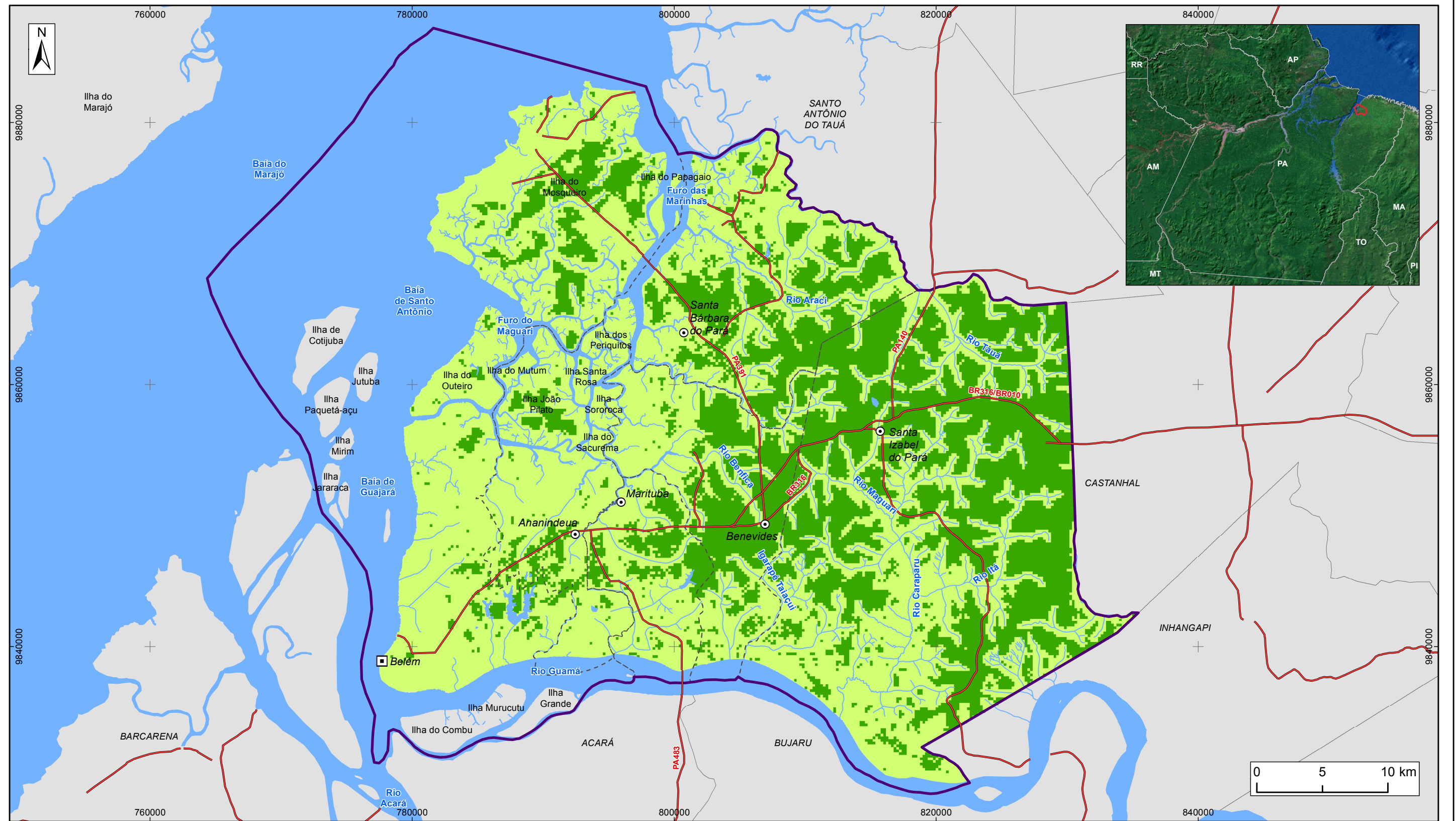
Figura 37 – Profundidade do nível de água do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovias: SEMAS/PA
 Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM
 Profundidade do nível da água: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_37_Prof_nivel_agua_aquif_superficiais
Escala:	1:290.000



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual 🗺️ Área de Estudo
- ⊙ Sede Municipal - - - Limite municipal
- ~ Hidrografia 🟡 Classe de nível de água (Método GOD)
- Rodovia 🟢 Menor do que 5 m
- 🌊 Massa d'água 🟠 5 m a 20 m

Figura 38 – Classes de nível de água (método GOD) do Sistema Aquífero Barreiras na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovias: SEMAS/PA
 Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM
 Classe de nível de água: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_38_Classes_nivel_agua_metodo_GOD
Escala:	1:290.000

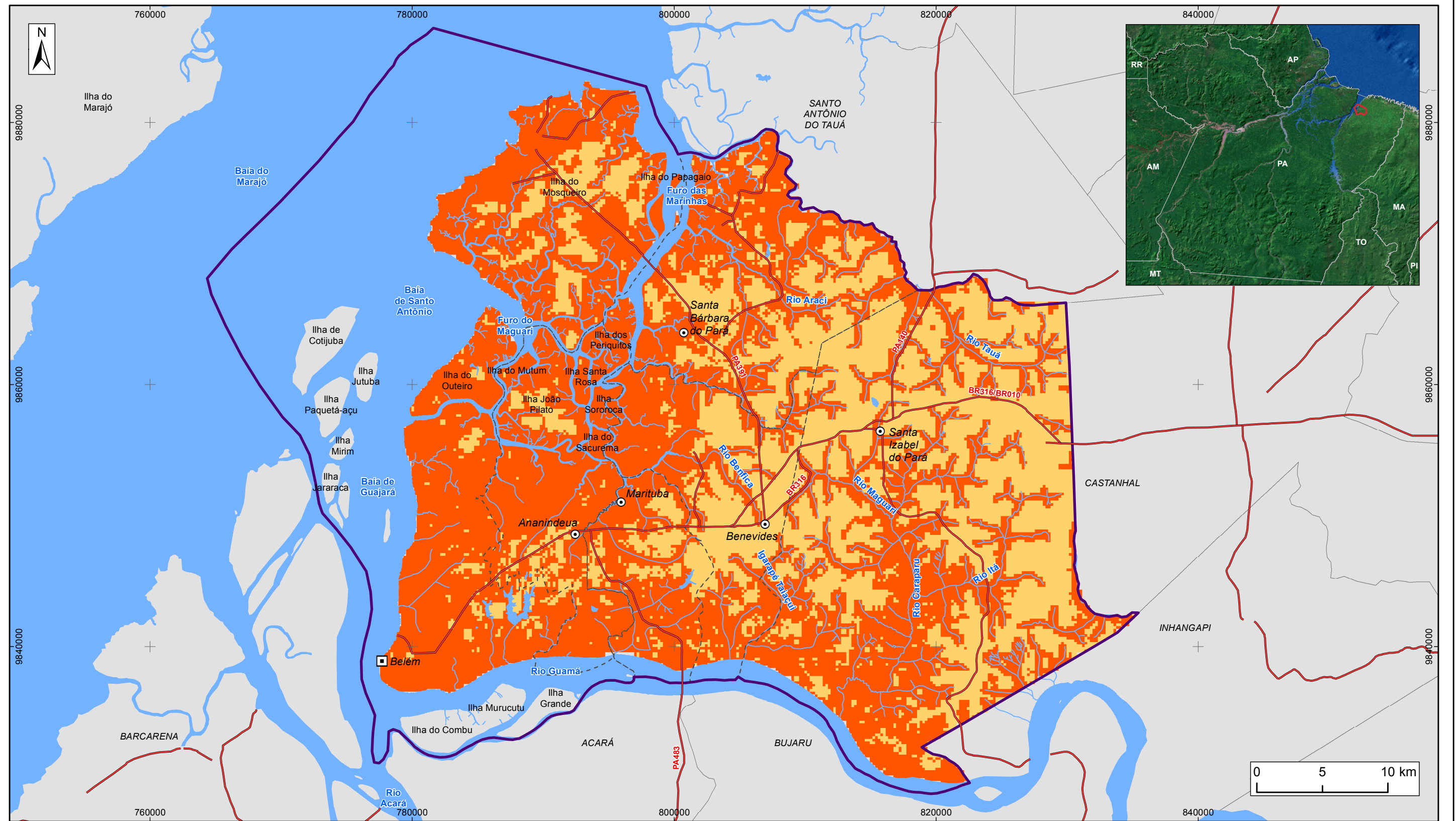
Os índices do parâmetro profundidade do NA variam no espaço, enquanto os dois outros parâmetros têm índices que são fixos. Para elaboração do mapa de vulnerabilidade, o procedimento adotado foi:

- Multiplicação dos índices dos parâmetros não variáveis no espaço: 0,9 (G) x 0,8 (O) = 0,72;
- Classificação dos valores de NA segundo o método GOD (Figura 38); no presente estudo foram constatadas apenas duas classes de profundidade: menor do que 5 m (índice 0,9) e de 5 m a 20 m (índice 0,8);
- Multiplicação dos índices de profundidade classificados pelo método GOD pelo índice 0,72, obtido acima, e determinação dos índices de vulnerabilidade dos aquíferos superficiais na área de estudo.

Os índices de vulnerabilidade obtidos variaram entre 0,576 e 0,648, ambos inseridos na classe de vulnerabilidade alta, cujos índices delimitadores compreendem o intervalo 0,5 – 0,7. De modo a obter uma representação gráfica de melhor visualização, considerou-se um desmembramento da classe de vulnerabilidade alta em duas subclasses: Alta-Alta, com índices variando de 0,6 a 0,7; e Alta-Baixa, com índices variando de 0,5 a 0,7.

O resultado apresentado no mapa de vulnerabilidade (Figura 39) mostra a predominância da classe de vulnerabilidade Alta-Alta, distribuída em 68% da área, ao passo que a classe Alta-Baixa distribui-se nos 32% restantes.

Ressalva-se que o método GOD, assim como outros métodos que visam estabelecer classes de vulnerabilidade com vistas à proteção e preservação de recursos hídricos subterrâneos, incorpora índices e pesos bastante subjetivos, os quais influenciam substancialmente nos resultados.



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual - - - Limite municipal
- ⊙ Sede Municipal **Vulnerabilidade dos aquíferos superficiais**
- ~ Hidrografia **Conforme método GOD**
- Rodovia Alto - Baixo
- ☪ Massa d'água Alto - Alto
- ⊕ Área de Estudo

Figura 39 – Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Barreiras (método GOD) na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovias: SEMAS/PA
 Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM
 Classe de vulnerabilidade (GOD): ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_39_Vulnerab_aquif_superficiais
Escala:	1:290.000

Algumas considerações sobre o método GOD feitas no “Projeto Estudo de Vulnerabilidade Natural à Contaminação e Estratégias de Proteção do Sistema Aquífero Guarani nas Áreas de Afloramento” podem ser estendidas para o projeto atual, conforme transcritas a seguir.

“Normalmente, os índices litológicos do método GOD sugeridos nas publicações especializadas baseiam-se nas características gerais apresentadas pelas unidades litoestratigráficas formais. Os índices litológicos do método GOD são fundamentados exclusivamente numa classificação genética genérica, ao invés de uma classificação estabelecida com base na condutividade hidráulica do meio, que é a propriedade física essencial que controla do fluxo subterrâneo. O grau de cimentação, o grau compactação e alterações pós-deposicionais modificam as características hidrodinâmicas, de sorte que sedimentos geneticamente equivalentes podem apresentar diferentes condutividades hidráulicas”.

“Por outro lado, sedimentos geneticamente diferentes também podem apresentar condutividades semelhantes. Este fato demonstra o peso da avaliação subjetiva na determinação dos índices de vulnerabilidade associados às características litológicas, os quais podem ser manejados para consecução de objetivos específicos”.

“Outro aspecto que deve ser discutido refere-se às variações litológicas existentes em subsuperfície, as quais somente podem ser identificadas com base em conhecimento geológico adequado. Uma avaliação mais geral pode constatar sedimentos de elevada condutividade expostos à superfície, ao passo que a poucos metros de profundidade podem ocorrer sedimentos de baixa condutividade hidráulica ou mesmo impermeáveis. Neste caso, uma avaliação com base somente nos sedimentos aflorantes não representa a realidade”.

“O método GOD também estabelece, de antemão, que quanto maior a distância da superfície do terreno até o lençol subterrâneo, maior a proteção do aquífero, fato que sob a ótica do tempo de trânsito de percolação descendente de um contaminante, em meio não saturado, está correto. Assim, são estabelecidas áreas de maior ou de menor vulnerabilidade, influenciadas respectivamente pelos níveis de água profundos ou rasos. Nas áreas de níveis mais profundos de águas subterrâneas admite-se menor vulnerabilidade dos aquíferos, o que pode incentivar a ocupação por empreendimentos potencialmente mais poluentes e o relaxamento na fiscalização dos impactos ambientais por parte dos órgãos gestores.

A lenta percolação de contaminantes nestas áreas pode ocasionar, em longo prazo, uma contaminação generalizada do aquífero e de difícil remediação, ao contrário daquelas áreas onde o nível de água subterrânea encontra-se próximo da superfície e da zona de descarga. Os mapas de vulnerabilidade, segundo os conceitos utilizados em Foster *et al.* (1993), tem o objetivo de distinguir áreas naturais segundo o critério do tempo de residência de um contaminante na zona não saturada, que por sua vez determinará a demora com que o contaminante atingirá o aquífero, nada mais além disto. Ou seja, uma contaminação persistente vai alcançar o aquífero num determinado momento, independentemente se a área está classificada como de baixa ou alta vulnerabilidade. Portanto, a instalação de empreendimentos com potencial poluidor, em qualquer região, deve atender normas e procedimentos definidos pelos órgãos ambientais gestores”.

7.6.2 Perigo de Contaminação

Segundo Foster *et al.* (2006), avaliação do perigo de contaminação dos aquíferos tem como objetivo definir ações preventivas e corretivas para proteção da qualidade da água subterrânea. Várias são as causas possíveis de deterioração da qualidade da água subterrânea de um aquífero, conforme relacionadas no Quadro 20.

Perigo de contaminação pode ser definido como a probabilidade de que a água subterrânea venha a apresentar concentrações de contaminantes superiores aos valores estabelecidos pela OMS (Organização Mundial da Saúde) para a qualidade da água potável (FOSTER *et al.*, 2006). É determinado pela interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante que é, será ou pode ser aplicada no meio em decorrência de atividades urbanas, industriais, agrícolas, de mineração e outras de natureza antrópica (FOSTER *et al.*, 2006). A contaminação dos aquíferos ocorre nos locais em que carga contaminante disposta no terreno excede a capacidade de atenuação natural dos solos.

Quadro 20 – Classificação dos problemas de qualidade da água subterrânea.

Tipo de problema	Causa	Contaminantes principais
Contaminação do aquífero	Proteção inadequada de aquíferos vulneráveis contra emissões e lixiviados provenientes de atividades urbanas/industriais e intensificação do cultivo agrícola	Microorganismos patógenos, nitrato ou amônio, cloreto, sulfato, boro, arsênico, metais pesados, carbono orgânico dissolvido, hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, certos pesticidas
Contaminação no próprio poço ou captação	Poço ou captação cuja construção/projeto inadequado permite o ingresso direto de água superficial ou água subterrânea rasa poluída	Principalmente microorganismos patógenos
Intrusão Salina	Água subterrânea salina (e às vezes poluída) que, por excesso de extração, é induzida a fluir para o aquífero de água doce	Principalmente cloreto de sódio, mas pode incluir também contaminantes persistentes produzidos antropicamente
Contaminação Natural	Relacionada com a evolução química da água subterrânea e a dissolução de minerais (pode ser agravada pela poluição ocasionada pela atividade humana e/ou extração excessiva)	Principalmente fluoreto e ferro solúvel, às vezes sulfato de magnésio, arsênico, manganês, selênio, cromo e outras espécies inorgânicas

A maior preocupação com a contaminação da água subterrânea se concentra principalmente nos aquíferos livres, especialmente nas áreas em que a zona vadosa é pouco espessa e o nível de água é raso, como é o caso da região de Belém. Foster *et al.* (2006) alertam, todavia, que em pontos em que o aquífero é semiconfinado e os aquitardos são relativamente pouco espessos, também há riscos significativos de poluição.

Segundo IG (1977), a maior dificuldade na avaliação do perigo de contaminação é a estimativa da carga poluidora, em razão da diversidade e quantidade de potenciais contaminantes gerados pelas inúmeras atividades antrópicas. Para cada atividade potencial de geração de contaminantes deveria ser observado: classe do contaminante com relação à sua tendência de degradação e retardamento; intensidade do evento poluente e concentração relativa de cada contaminante; método de disposição do contaminante no solo; e duração da aplicação da carga contaminante.

Na prática, os dados requeridos para caracterização da carga poluidora não são de fácil obtenção. Por esta razão, as atividades de geração de carga poluente são reunidas em grupos de afinidade, classificados em termos qualitativos quanto ao risco potencial de causarem contaminação do subsolo e das águas subterrâneas (IG, 1977).

O cadastramento das fontes potenciais de contaminação do subsolo dos municípios da região de Belém foi baseado na pesquisa de dados secundários disponíveis e levantamentos de campo. Foram identificadas fontes de contaminação pontuais e difusas.

Fontes de contaminação pontuais de águas subterrâneas geralmente produzem plumas claramente definidas e mais concentradas, o que facilita sua identificação e, em alguns casos, seu controle. Todavia, quando as atividades poluentes pontuais são múltiplas, acabam representando, no final, uma fonte basicamente difusa no que diz respeito à identificação e ao controle (FOSTER *et al.*, 2006). As fontes potenciais pontuais de contaminação estão associadas a empreendimentos industriais e comerciais, geralmente instalados nas áreas urbanas dos municípios e às estações de tratamento de efluentes dos sistemas de esgotamento sanitário.

Fontes de contaminação difusas de águas subterrâneas estão associadas às diferentes formas de uso e ocupação da terra, que determinam quais os principais tipos de contaminante possuem potencial de alcançar os aquíferos (FOSTER *et al.*, 2006). Destacam-se as atividades agrícolas como potencialmente responsáveis pelos casos mais graves de contaminação difusa de água subterrânea, por meio da utilização de fertilizantes e agrotóxicos e as práticas de saneamento *in situ* (fossas sépticas). As fontes de contaminação difusas não geram plumas de contaminação claramente definidas, mas normalmente afetam uma área muito maior do aquífero.

As fontes potenciais pontuais de geração de carga poluente cadastradas neste projeto são oriundas de 2.146 empreendimentos, assim discriminados:

- 8 Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) obtidas no “Atlas de Despoluição” (ANA, 2017);
- 368 postos de combustível obtidos do cadastro da ANP;
- 236 unidades de saúde (hospitais, laboratórios, clínicas, etc.);
- 1.377 indústrias listadas no do Guia Industrial do Pará;
- 73 geradores de resíduos sólidos inertes obtidos do cadastro de Grandes Geradores de Resíduos Sólidos disponibilizado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMMA) de Belém;
- 78 empreendimentos diversos (cemitérios, lava-jatos, oficinas, etc.) obtidos de levantamento de campo executado neste estudo;

- 6 empreendimentos receptores de resíduos sólidos (lixões, aterros, centros de triagem, etc.), obtidos do cadastro da SEMMA.

Em relação às fontes potenciais difusas de contaminação, o desconhecimento da localização e das áreas de abrangência dos empreendimentos potencialmente geradores de carga poluente inviabilizou sua análise.

As fontes potenciais pontuais de contaminação foram classificadas quanto ao grau de risco em função do impacto da atividade econômica pelo método *POSH (Pollutant Origin and its Surcharge Hydraulically)*, conforme ranqueamento apresentado no Quadro 21.

Quadro 21 – Classificação das fontes de contaminação pontuais segundo o sistema *POSH*.

Potencial de gerar carga contaminante no subsolo	FONTES DE CONTAMINAÇÃO				
	Disposição de resíduos sólidos	Áreas industriais	Lagoas de águas residuais	Outras (urbanas)	Mineração e exploração de petróleo
Elevado	Resíduo industrial tipo 3, resíduo de origem desconhecida	Indústria tipo 3 ou qualquer atividade que manuseie >100 kg/de produtos químicos perigosos	Todos os resíduos industriais tipo 3, qualquer efluente (exceto esgoto residencial se a área >5 hectares		Operações em campo de petróleo, mineração de metais
Moderado	Chuva >500 mm/a com resíduos residenciais/agroindustriais/industriais tipo 1, ou todos os demais casos	Indústria tipo 2	Esgoto residencial se a área >5 hectares, demais casos não relacionados acima ou abaixo	Postos de gasolina, vias de transporte com tráfego regular de produtos químicos perigosos	Algumas atividades de mineração/extração de materiais inertes
Reduzido	Chuva <500 mm/a com resíduos residenciais/agroindustriais/industriais tipo 1	Indústria tipo 1	Águas residuais residenciais, mistas, urbanas, agroindustriais e de mineração de não metálicos	Cemitérios	

Indústrias Tipo 1: madeireiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos

Indústrias Tipo 2: fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão

Indústrias Tipo 3: oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal

A classificação das fontes de contaminação pelo método *POSH* estabelece três níveis qualitativos de potencial de geração de carga contaminante no subsolo: reduzido, moderado e elevado. Nessa classificação, são distinguidos empreendimentos de disposição de resíduos sólidos, indústrias, lagoas de águas residuais, mineração e outros empreendimentos urbanos.

Para empreendimentos não enquadrados no Quadro 21, as fontes potenciais pontuais de contaminação cadastradas na área de estudo foram classificadas segundo adaptação do método *POSH*, mostrado no Quadro 22.

Quadro 22 – Fontes de contaminação pontuais e classificação *POSH* adaptada.

Atividade	Classificação <i>POSH</i>	Critérios de classificação
Carcinicultura	Moderada	Dimensão dos tanques, ocorrência frequente e localização (normalmente próximas à cursos d'água)
Criação de animais	Reduzida	Mesma classificação de matadouros
Matadouro	Reduzida	Mesma classificação de cemitérios devido à possibilidade de deposição de restos animais
Oficina mecânica	Moderada	Compatibilidade com a atividade e tipo de contaminação dos postos de combustíveis
Unidades de Saúde 1	Reduzida	Coberturas de rede de esgoto <75% e densidade populacional >50 pessoas/ha.
	Moderada	Intermediário entre elevado e reduzido
	Elevada	Cobertura de rede de esgotos >25% e densidade populacional <100 pessoas/ha.
Mesma classificação das fontes de contaminação difusas de saneamento <i>in situ</i> .		

A classificação dos 2.146 empreendimentos potencialmente geradores de carga contaminante, com base no método *POSH*, mostrou predomínio da classe de potencial “reduzido”, com 989 empreendimentos (46%), seguida da classe “moderada” com 830 empreendimentos (39%) e da classe “elevada”, com 327 empreendimentos (15%), conforme mostrado na Figura 40. A distribuição desses empreendimentos na região de Belém, de acordo com a classe de risco potencial, é mostrada na Figura 41.

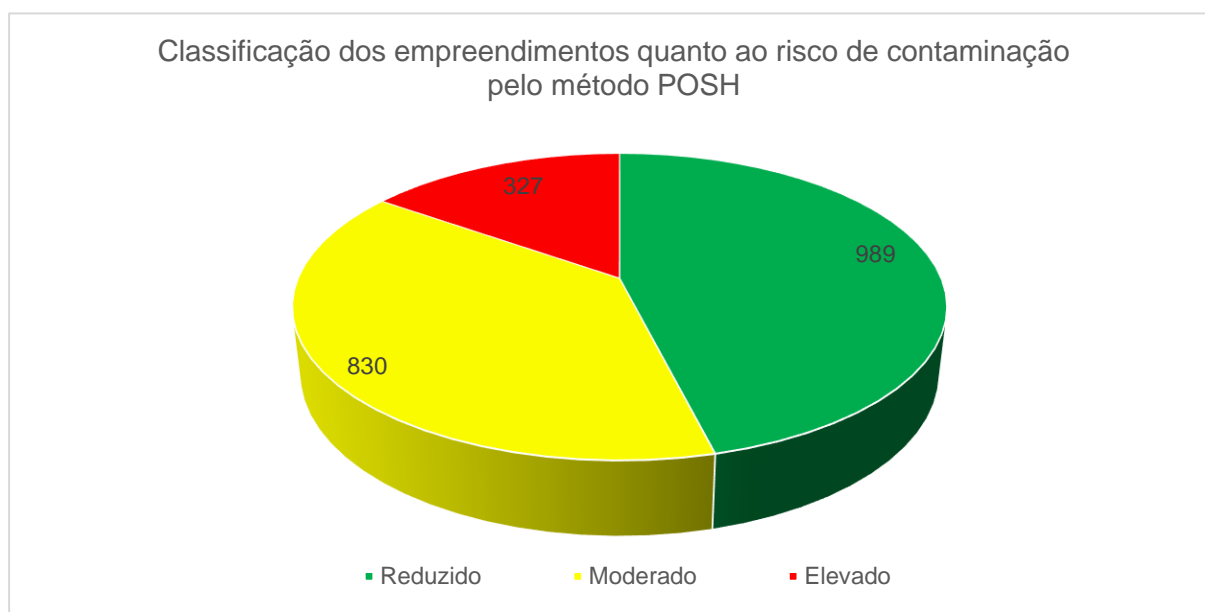
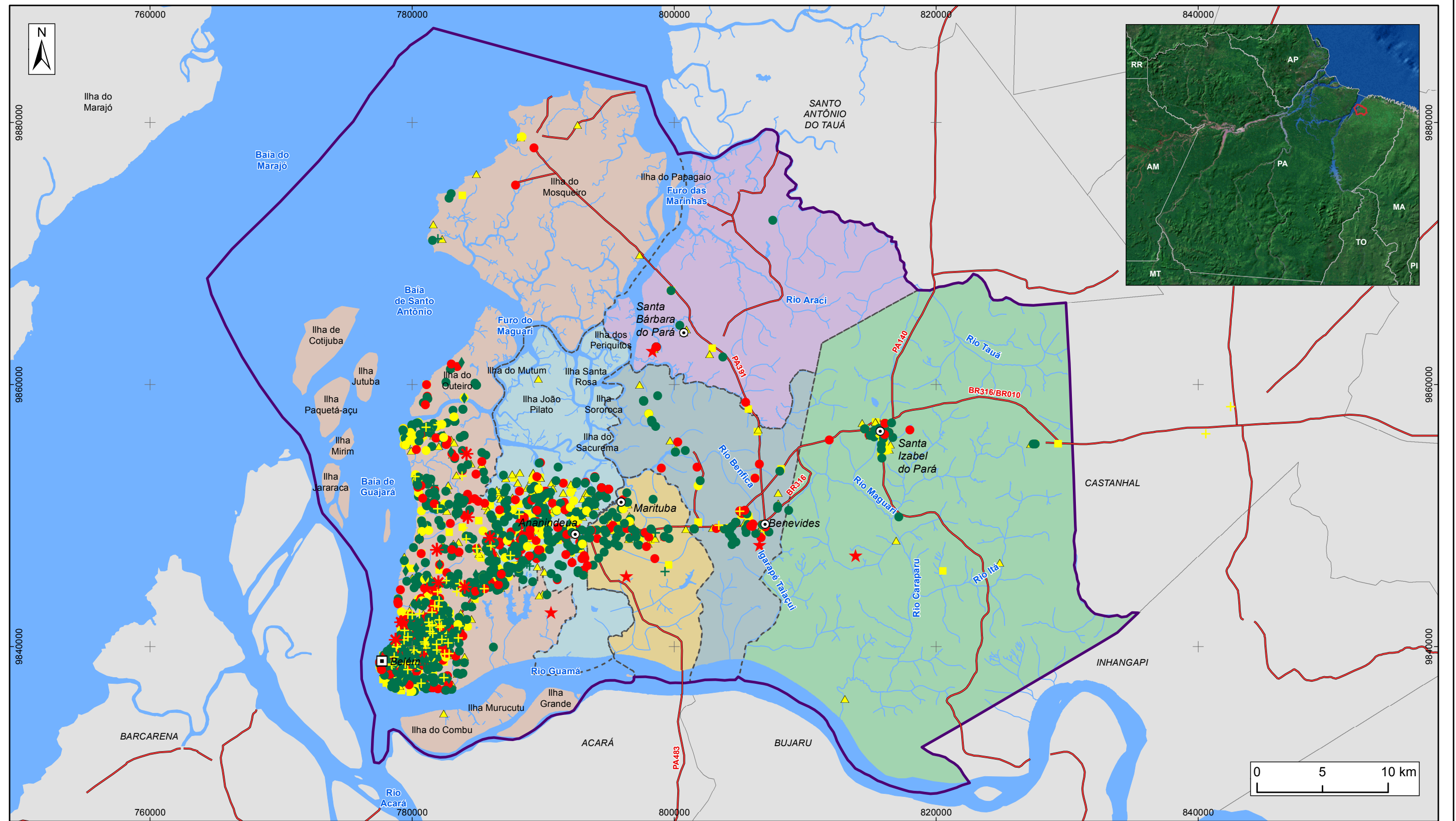


Figura 40 – Distribuição das classes de risco potencial de geração de contaminantes na região de Belém, com base no método *POSH*.



LEGENDA

- | | | | |
|--|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ☐ Capital Estadual ⊙ Sede Municipal <p>Classe de risco potencial de geração de contaminantes</p> <p>Local de disposição de resíduos sólidos</p> <ul style="list-style-type: none"> ★ Elevado <p>Estação de Tratamento de Esgoto</p> <ul style="list-style-type: none"> ★ Elevado <p>Unidade de saúde</p> <ul style="list-style-type: none"> ▲ Moderado | <p>Fontes diversas</p> <ul style="list-style-type: none"> + Moderado + Reduzido <p>Indústria (Guia industrial)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Elevado ● Moderado ● Reduzido | <p>Resíduos sólidos inertes</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Reduzido <p>Posto de combustível</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Moderado <p>Indústria</p> <ul style="list-style-type: none"> — Hidrografia — Rodovia — Massa d'água — Área de Estudo | <p>Município</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ananindeua ■ Belém ■ Benevides ■ Marituba ■ Santa Bárbara do Pará ■ Santa Izabel do Pará |
|--|--|--|---|

Figura 41 – Distribuição dos empreendimentos de acordo com as classes de risco potencial de geração de contaminantes na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovia: SEMAS/PA. Limites políticos: IBGE
Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA
Classe de risco potencial de geração de contaminantes: ANA/PROFILL

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_41_Empreend_cl_risco_geracao_cont
Escala:	1:290.000

7.6.2.1 Método de Avaliação do Perigo de Contaminação

O método para avaliação e representação, em mapa, do potencial de geração de contaminantes com base na classificação proposta por *POSH* considerou dois pontos principais: a densidade de empreendimentos e a classe do contaminante.

A densidade define a quantidade de empreendimentos por km² e permite distinguir áreas com maior ou menor concentração relativa. Evidentemente, áreas com maior concentração de empreendimentos são consideradas de maior risco potencial para contaminação do que áreas com empreendimentos dispersos.

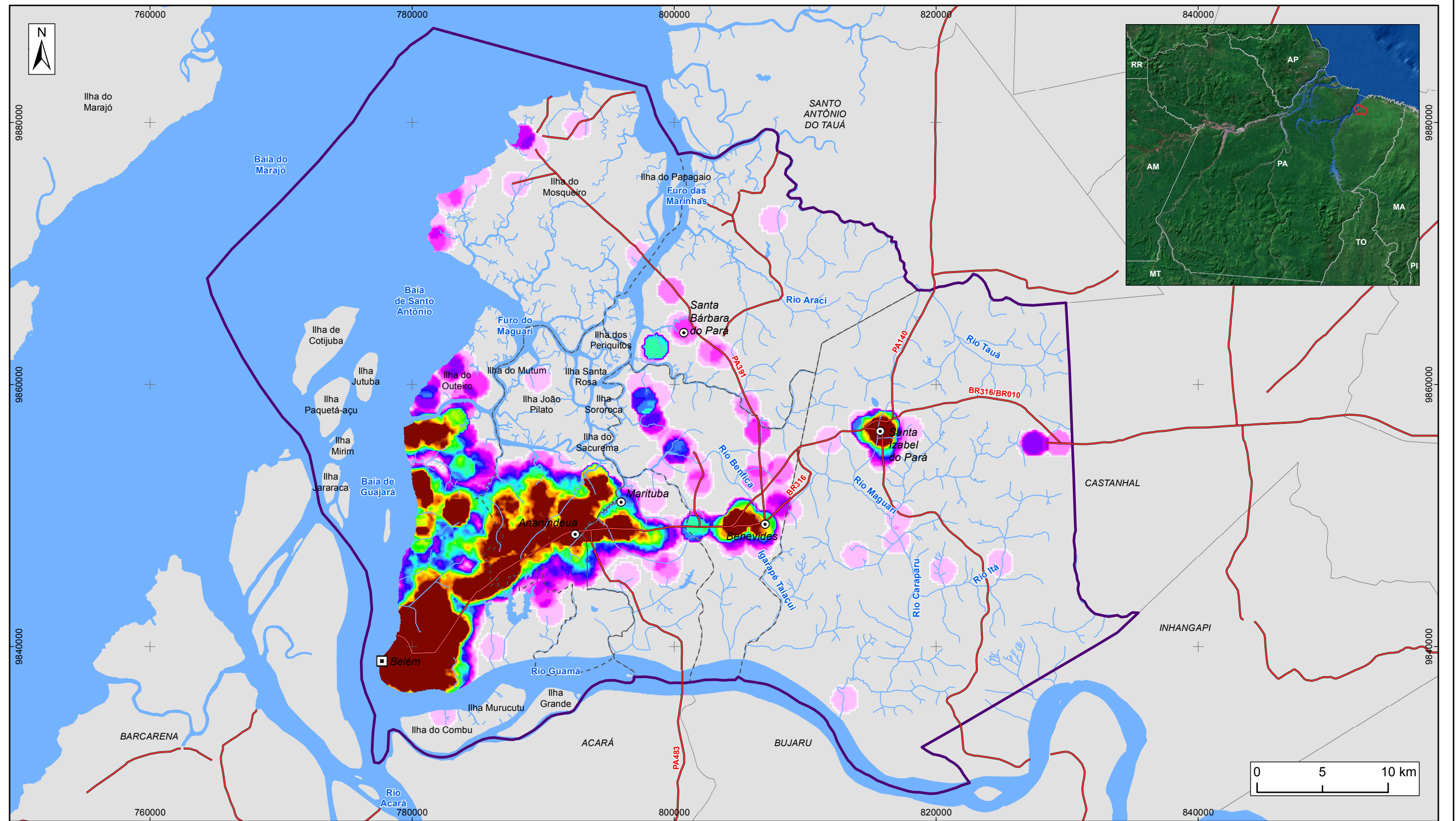
A classe do contaminante determina o risco potencial relativo do empreendimento poluir o solo e as águas subterrâneas. Assim, fica evidente que áreas com concentração de empreendimentos de elevado risco potencial de geração de contaminantes são mais preocupantes do que áreas com concentração de empreendimentos de menor risco potencial. A área total com potencial de contaminação na região de Belém foi estimada em 428 km², que corresponde a 23% de toda a área estudada.

Para elaboração do mapa de distribuição das áreas de risco relativo de contaminação da região de Belém, foi adotado o seguinte procedimento:

- Elaboração de mapa de densidade de empreendimentos potencialmente poluentes (Figura 42), no formato *raster*, com auxílio da ferramenta *Point Density* do módulo *Spatial Analyst* do programa ArcGis10.1. Essa ferramenta calcula a magnitude, por área, dos empreendimentos situados nas vizinhanças num determinado raio;
- Os critérios utilizados para elaboração do mapa de densidade foram: “*population field*” igual à classe de risco potencial, com variação de 1 (risco reduzido), 2 (risco moderado) e 3 (risco elevado); e raio de 1 km.
- Os valores adotados para classificação do risco potencial de contaminação estão apresentados no Quadro 23. O mapa da Figura 43 mostra a distribuição das áreas de riscos potenciais de contaminação.

Quadro 23 – Valores adotados para classificação do risco potencial de contaminação.

Reduzido	Moderado	Elevado
Valor de 0,5 a 5	Valor de 5 a 15	Valor maior do que 15



LEGENDA

- Capital Estadual
 Limite municipal
- Sede Municipal
 Densidade de empreendimentos
- Hidrografia
 45,2
- Rodovia
 0
- Massa d'água
- Área de Estudo

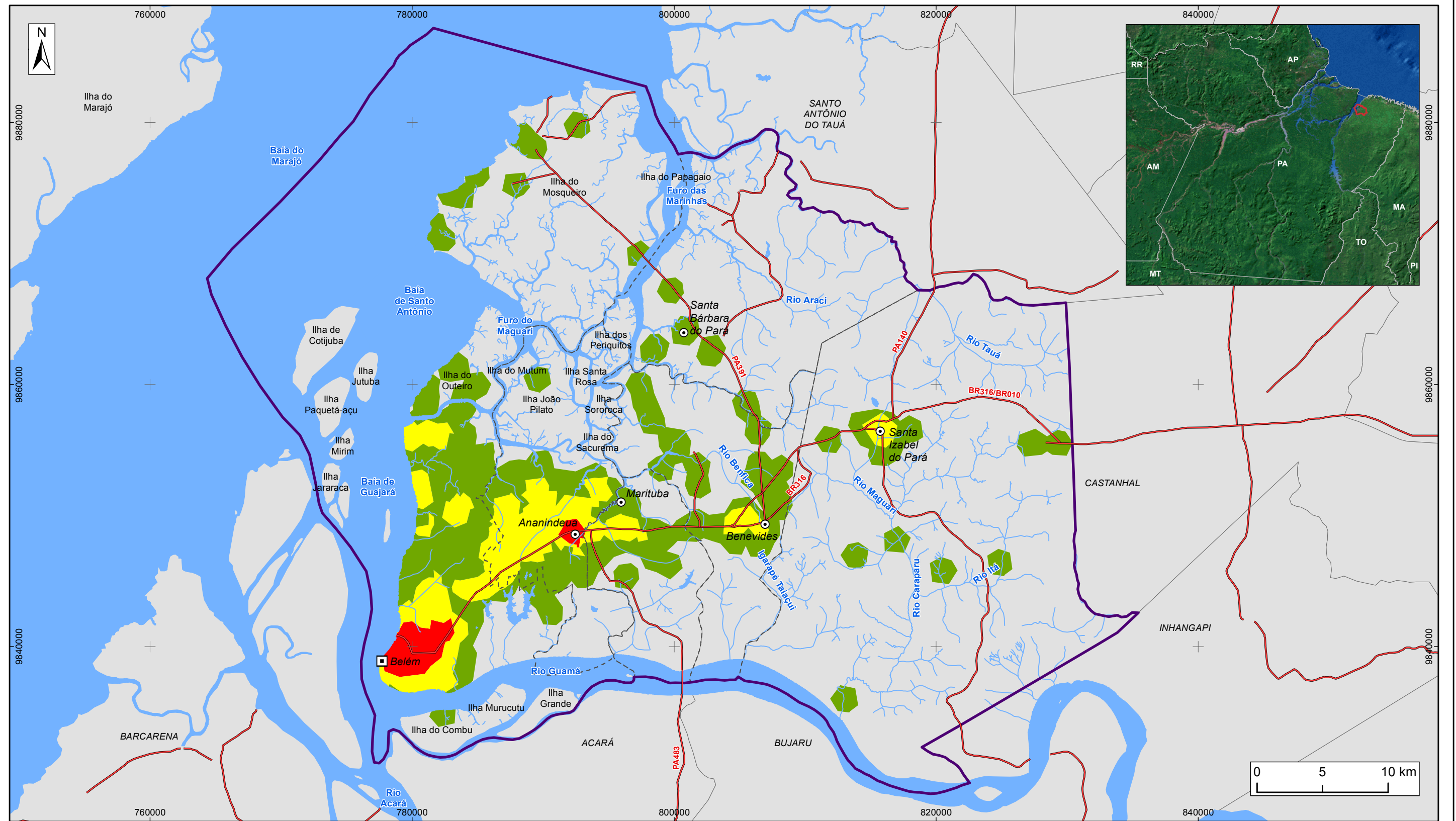
Figura 42 – Densidade de empreendimentos com potencial risco de contaminação na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Densidade de empreendimentos: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_42_Densidade_emprend_pot_risco_contaminacao
Escala:	1:290.000



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual - - - Limite municipal
- ⊙ Sede Municipal **Classe de risco potencial de contaminação**
- ~ Hidrografia ■ Reduzido
- Rodovia ■ Moderado
- ☁ Massa d'água ■ Elevado
- ⊕ Área de Estudo

Figura 43 – Classificação das áreas com base no risco potencial de geração de contaminantes na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM.
 Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Classificação potencial de contaminação: ANA/Profill

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	
Figura_43_Classif_areas_risco_potencial_geracao_contaminantes	
Escala:	1:290.000

A classe de potencial reduzido representa mais de 70% (303 km²) da área potencial de contaminação estimada (428 km²); a classe de potencial moderado representa 25% (106 km²) e a classe de potencial elevado cobre apenas 4% (19 km²) dessa área (Figura 44). Somente o Município de Belém concentra 45% das áreas potenciais de contaminação (Figura 45).

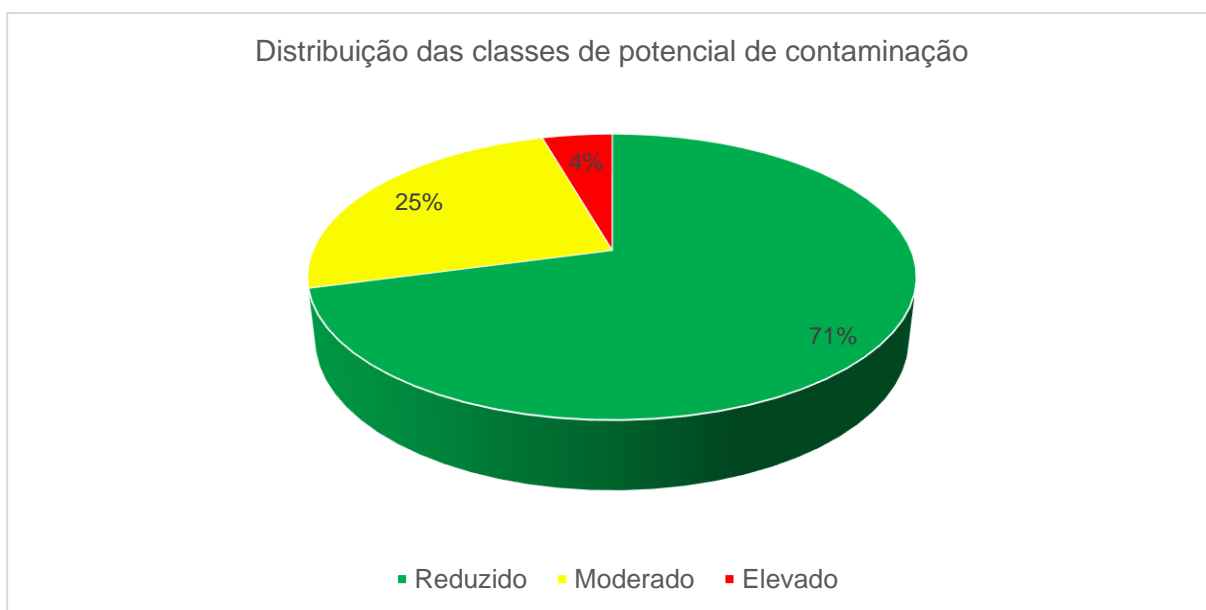


Figura 44 – Distribuição das classes de potencial de contaminação na região de Belém.

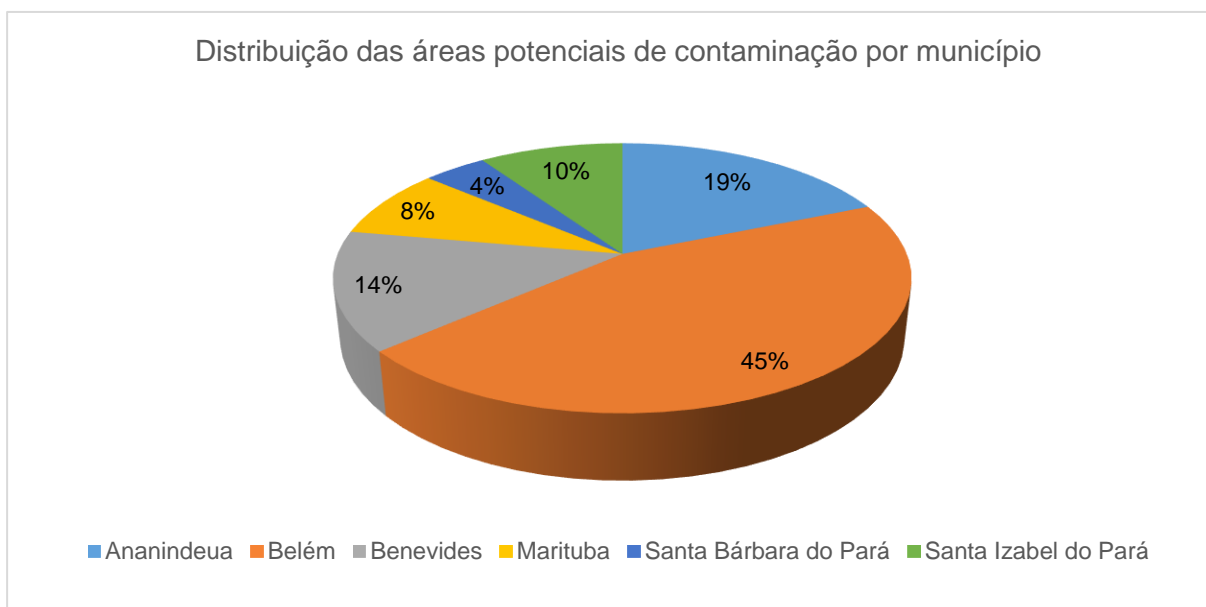


Figura 45 – Distribuição das classes de potencial de contaminação nos municípios da região de Belém.

7.6.2.2 Mapa do Perigo de Contaminação

Como referido anteriormente, o perigo de contaminação da água subterrânea pode ser definido como a probabilidade de um aquífero sofrer impactos negativos decorrentes das atividades antrópicas, de tal sorte que a água subterrânea se torne imprópria para consumo (FOSTER *et al.*, 2006).

O perigo de contaminação representa a interação entre a carga potencial contaminante aplicada no subsolo e a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, que depende das características naturais das camadas geológicas. Em termos práticos, a avaliação do perigo de contaminação envolve a sobreposição dos mapas de vulnerabilidade do aquífero (Figura 39) e de riscos potencial de geração de contaminantes (Figura 43).

De acordo com esquema proposto por Foster *et al.* (2006), são 5 as classes de perigo de contaminação: muito baixo, baixo, moderado, alto e extremo (Figura 46). O cruzamento das classes de risco de contaminação com as classes de vulnerabilidade produz a combinação apresentada na Quadro 24, que define os critérios para discriminação das classes de perigo de contaminação na área de estudo.

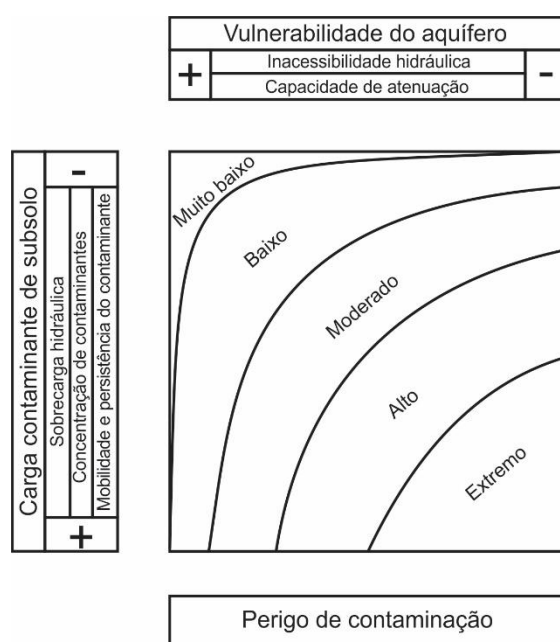


Figura 46 – Esquema conceitual para avaliação de perigo de contaminação (FOSTER *et al.*, 2006).

Quadro 24 – Classificação do perigo de contaminação em função da vulnerabilidade natural dos aquíferos e do risco potencial de contaminação.

Índice de vulnerabilidade natural	Potencial de contaminação		
	Elevado	Moderado	Reduzido
Extremo	Extremo	Alto	Moderado
Alto	Alto	Alto	Moderado
Médio	Alto	Moderado	Baixo
Baixo	Moderado	Baixo	Muito baixo

Foram determinadas apenas duas classes de perigo de contaminação (Figura 47 e Figura 48) em função da vulnerabilidade dos aquíferos e do risco de contaminação estimado pelo método *POSH*: moderada e alta.

A classe “moderada” predomina em mais de 70% (303 km²) da área potencial de contaminação estimada, enquanto a classe “alta” distribui-se nos 30% (125 km²) do restante da área. Os municípios de Belém e Ananindeua respondem por mais de 60% das áreas potenciais de contaminação compreendendo, respectivamente, 80 km² e 182 km².

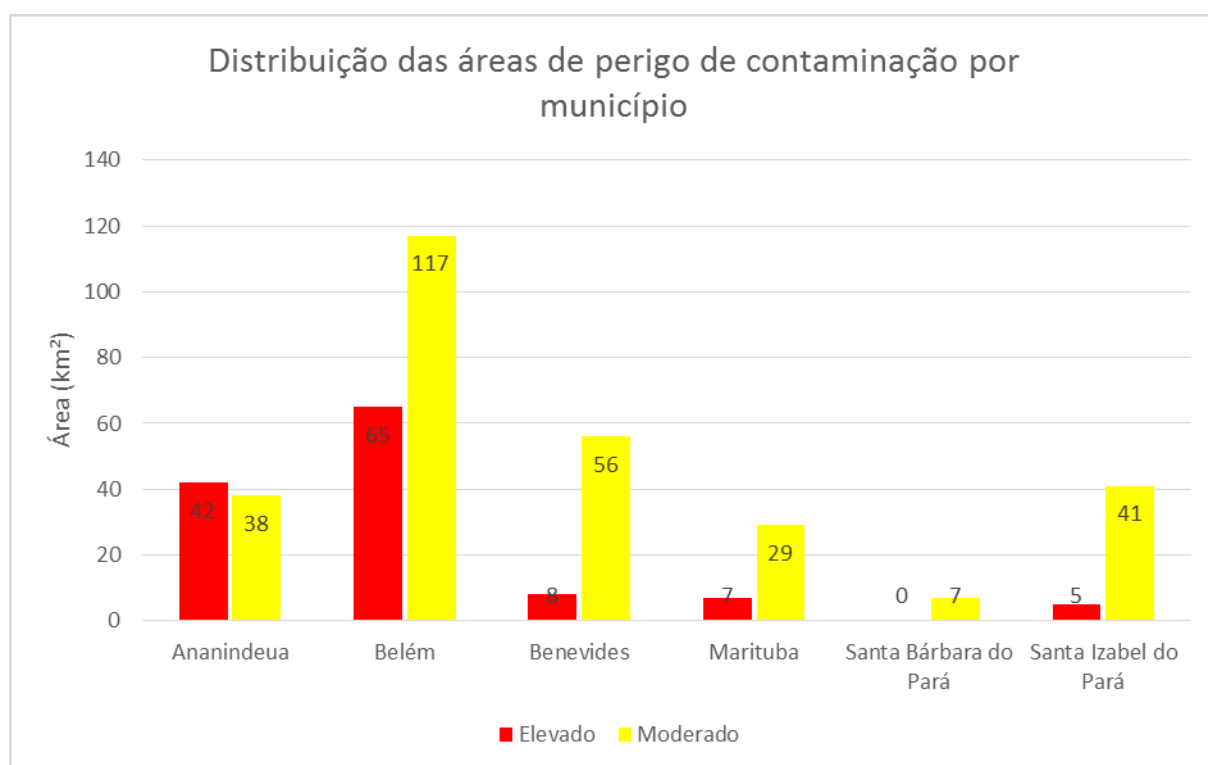
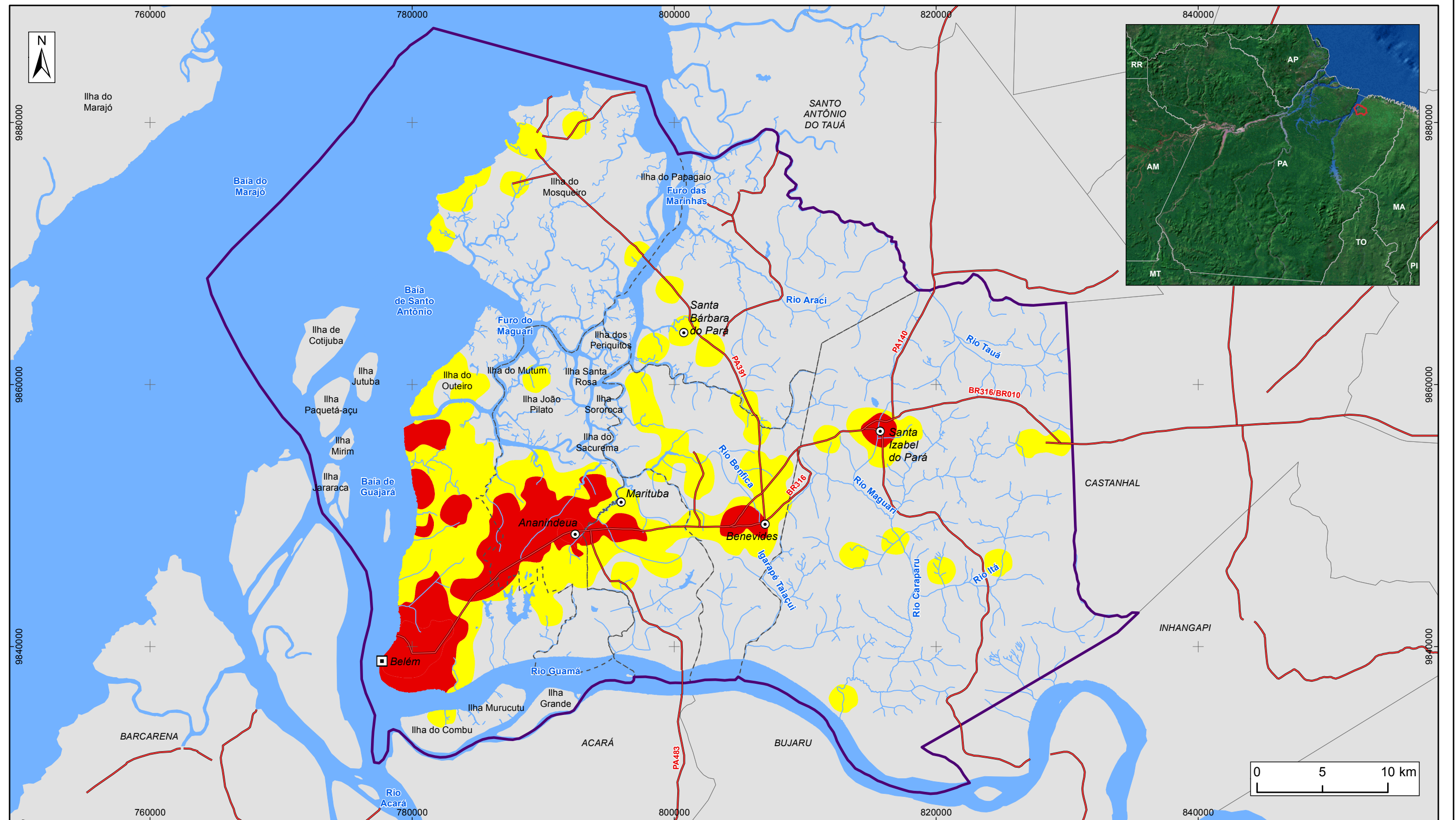


Figura 47 – Distribuição das áreas de perigo de contaminação por município da região de Belém.



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual - - - Limite municipal
- ⊙ Sede Municipal **Perigo contaminação**
- ~ Hidrografia **Classificação**
- Rodovia Moderado
- ☪ Massa d'água Elevado
- ⊕ Área de Estudo

Figura 48 – Distribuição das classes de perigo de contaminação na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Classes de perigo de contaminação: ANA/Profill

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_48_Distrib_classes_perigo_contaminacao
Escala:	1:290.000

7.7 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

O termo modelo refere-se a qualquer representação simplificada de uma situação real. O modelo conceitual constitui uma etapa fundamental para o desenvolvimento de modelos numéricos de fluxo subterrâneo, cujos objetivos são dar suporte ao planejamento da exploração e uso racional dos recursos hídricos subterrâneos, e realizar previsões sobre o comportamento dos aquíferos ao longo do tempo, entre outros, de modo a conservar a qualidade natural das águas subterrâneas e a capacidade de fornecimento de água dos aquíferos.

O desenvolvimento do modelo conceitual de fluxo subterrâneo abrange as seguintes atividades: definição da escala do modelo; identificação dos sistemas aquíferos; determinação da natureza dos aquíferos (livres, semiconfinados ou confinados); determinação da geometria dos aquíferos (área de ocorrência, espessura, limites); determinação da potenciométrica dos aquíferos; avaliação da conectividade entre aquíferos e feições superficiais (lagos, rios, etc.); definição de áreas de recarga e de descarga; determinação dos parâmetros hidráulicos dos aquíferos (condutividade hidráulica, transmissividade, coeficiente de armazenamento e porosidade efetiva); definição das condições de contorno (fluxo ou não fluxo); determinação das saídas de água (vazões retiradas).

Conforme já comentado anteriormente, os sistemas aquíferos principais da região de Belém estão reunidos nos Sistemas Aquíferos Barreiras e Pirabas. O Sistema Aquífero Barreiras reúne rochas da Formação Barreiras e da unidade Pós-Barreiras, e coberturas sedimentares recentes. O Sistema Aquífero Pirabas reúne rochas que integram a formação homônima. Esses sistemas integram o conjunto de aquíferos terciários da Plataforma Bragantina, cujo substrato da área de estudo é constituído por rochas sedimentares aqui designadas Pré-Pirabas. Perfis geofísicos apontam a existência de rochas reservatório na unidade Pré-Pirabas, todavia, de características hidrodinâmicas ainda desconhecidas.

O sistema aquífero terciário caracteriza-se por sucessão sedimentar composta por intercalações frequentes de arenitos de granulometria desde fina a conglomerática, e siltitos e argilitos, distribuídos em camadas de espessuras individuais variáveis.

A espessura total do sistema terciário apresenta certa regularidade, como constatado nos perfis geofísicos, variando entre a mínima de 226 m e a máxima 275 m. Os

reservatórios terciários compreendem um sistema multicamadas típico, recoberto por um aquífero raso livre.

O Sistema Aquífero Barreiras, cujas rochas constituintes afloram em toda a extensão da área de estudo, compreende reservatórios livres em sua porção superior e semiconfinados a confinados em sua porção inferior, enquanto o Sistema Aquífero Pirabas, de ocorrência apenas em subsuperfície, é composto de reservatórios semiconfinados a confinados apenas. A ausência de conexão hidráulica direta entre os sistemas aquíferos Pirabas e Barreiras foi constatada em testes realizados por CPRM (2002), utilizando poços de observação.

As chuvas abundantes durante o ano todo atingem média histórica de 2.642 mm/ano, distribuídas nos períodos chuvoso (1.914 mm), de dezembro a maio, e de estiagem, de junho a novembro (729 mm). A evapotranspiração potencial atinge o máximo no mês de maio (158 mm) e o mínimo no mês de fevereiro (118 mm), registrando um balanço hídrico negativo no período de estiagem.

Ao atingir o solo, a maior parte da água das precipitações atmosféricas evapora; uma pequena parcela se transforma em escoamento superficial das bacias hidrográficas da região e uma parcela menor infiltra-se terreno, indo constituir a recarga dos sistemas aquíferos. Os solos da área de estudo apresentam boa capacidade de infiltração devido à sua condutividade hidráulica vertical predominante, da ordem de 0,2 m/d. A recarga dos sistemas aquíferos é aproximadamente equivalente às vazões mínimas registradas nas saídas das bacias hidrográficas.

As vazões mínimas disponíveis na área de estudo para estimativa da recarga dos aquíferos estão materializadas no coeficiente de vazão média unitária com 95% de permanência no tempo (Q_{95}), que corresponde a 5,59 L/s/km² (ANA, 2009). Multiplicando-se o coeficiente unitário Q_{95} pela área de abrangência dos aquíferos terciários (1.893 km²), a recarga é estimada em 10,58 m³/s ou 176 mm/ano. Este valor corresponde a 6% do total médio plurianual precipitado na área.

A maior parte dessa recarga ocorre nos aquíferos rasos livres, integrantes do Sistema Aquífero Barreiras, e o volume corresponde à reserva renovável anual. Uma pequena parcela dessa recarga infiltra-se através das camadas semiconfinantes (aquítardos) da base dos aquíferos livres e atinge os reservatórios mais profundos, constituídos por rochas da Formação Pirabas. O fluxo descendente é governado pela diferença de carga hidráulica.

Em alguns casos, as camadas semiconfinantes podem não ser lateralmente extensas e permitir o contato hidráulico com os reservatórios livres superiores, facilitando o processo de recarga profunda. Não existem estudos sobre valores de recarga profunda na área estudada. A Figura 49 representa o arcabouço hidrogeológico e a dinâmica de circulação da água subterrânea nos sistemas aquíferos da região de Belém e municípios adjacentes.

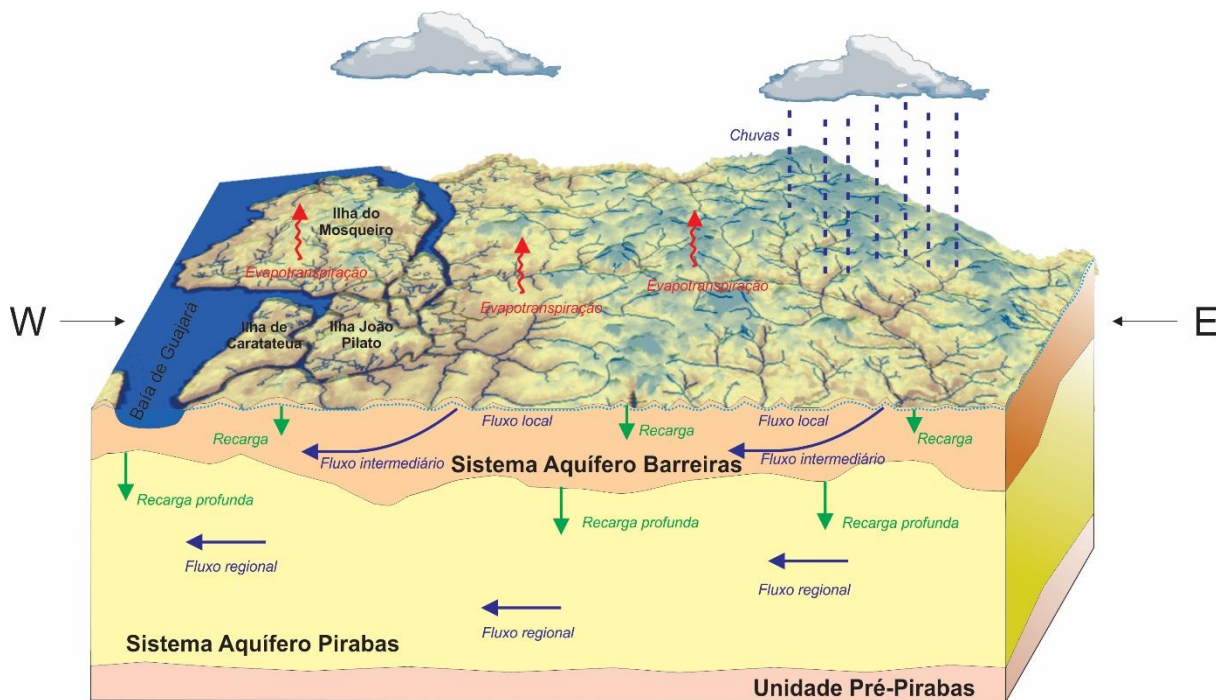


Figura 49 – Representação do arcabouço hidrogeológico e dinâmica de circulação da água subterrânea nos sistemas aquíferos da região de Belém.

As descargas naturais do aquífero raso livre ocorrem através da extensa rede hidrográfica instalada na área. As inúmeras feições hídricas superficiais, topografia plana, baixas altitudes e nível de água raso do solo indicam que a maior parte da área se comporta, predominantemente, como zona de descarga das águas subterrâneas.

As equipotenciais dos aquíferos rasos livres mostram que o fluxo subterrâneo natural ocorre no sentido das áreas de descarga, representadas pelas drenagens e porções mais deprimidas do terreno. O fluxo geral ocorre a partir da porção oriental, para as áreas de altitudes baixas que ladeiam o Rio Guamá e a Baía de Guajará.

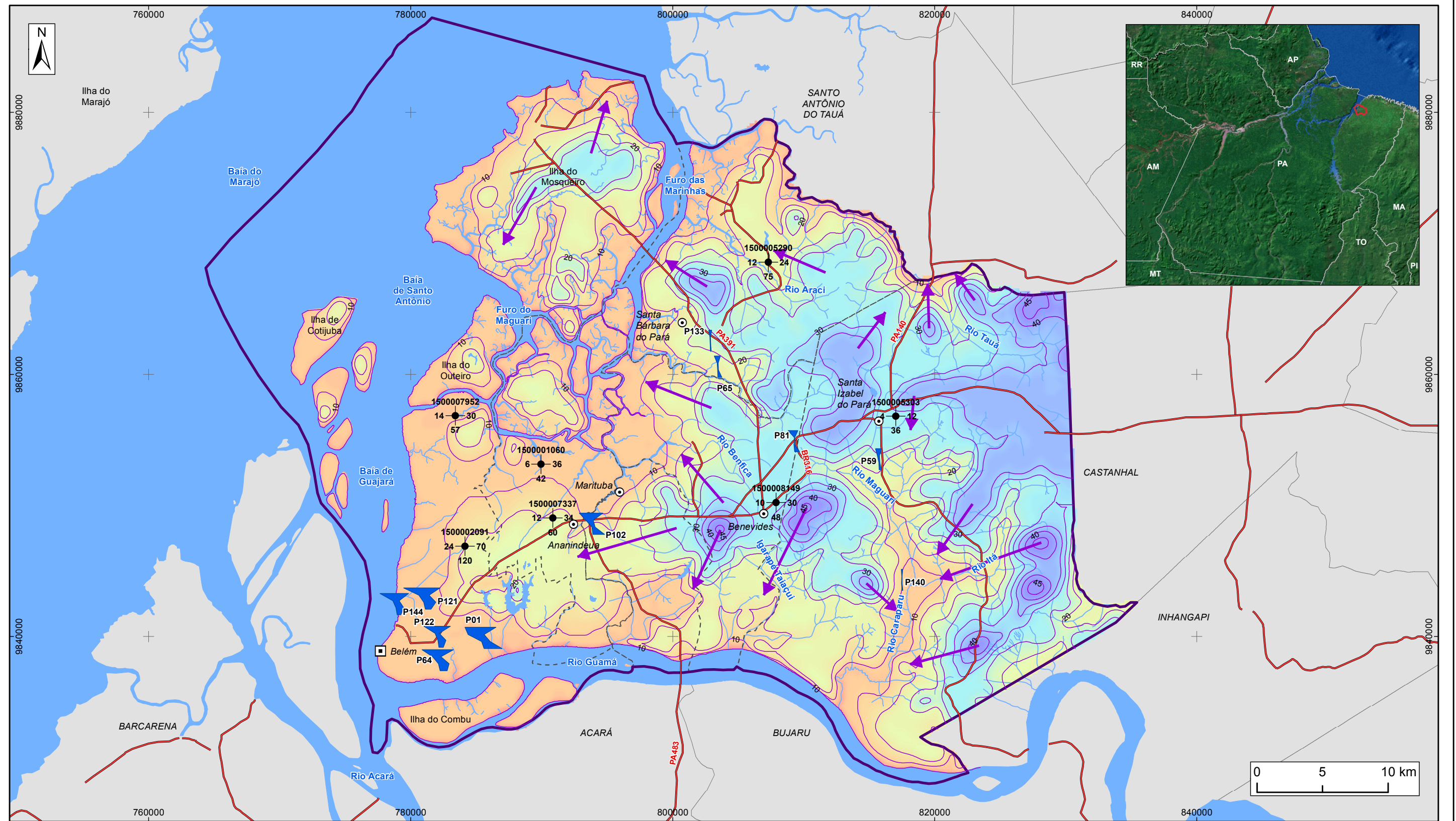
Admite-se que o escoamento subterrâneo dos aquíferos confinados e semiconfinados, reunidos nos sistemas Barreiras e Pirabas, ocorra no sentido de NE para SW, seguindo a mesma tendência do mergulho regional das unidades litoestratigráficas componentes desses sistemas. Na área de estudo, dados de níveis estáticos de poços não caracterizam condições de surgência nos sistemas confinados a semiconfinados.

As rochas componentes dos sistemas aquíferos terciários da região de Belém e municípios adjacentes apresentam, no geral, elevadas condutividades hidráulicas que favorecem a obtenção de excelentes vazões específicas nos poços produtores, as quais podem ser superiores a 20 m³/h/h. Os resultados de testes de interferência realizados na área de estudo apontaram transmissividades variando de 641 m²/d a 1.890 m²/d, condutividades hidráulicas de 6,41 m/d a 11,12 m/d e coeficiente de armazenamento de 8,98E⁻⁴ a 3,90E⁻³ para o Sistema Aquífero Pirabas; e transmissividades de 2,64 m²/d a 252 m²/d, condutividades hidráulicas de 0,09 m/d a 3,88 m/d e coeficiente de armazenamento de 1,90E⁻⁶ a 4,28E⁻⁶ para o Sistema Aquífero Barreiras.

A área estudada pode ser comparada às *wetlands* descritas em várias partes do globo, definidas como áreas permanentemente ou sazonalmente saturadas de água. Por se situarem em regiões topograficamente mais baixas em relação às porções circunvizinhas, essas áreas concentram tanto fluxos superficiais como fluxos subterrâneos que interagem entre si, num processo extremamente dinâmico, em que as águas ora infiltram no terreno, ora ascendem à superfície, dependendo do volume de água precipitado. Essa dinâmica torna-se ainda mais complexa nas áreas antropizadas, onde há uma impermeabilização do terreno, associada à presença de um grande número de poços produtores. Nessas áreas, as oscilações de nível provocadas pela extração da água subterrânea promovem alterações na direção do fluxo, induzem a recarga através de corpos superficiais de água, como rios e lagos, e induzem fluxos ascendentes de camadas aquíferas mais profundas.

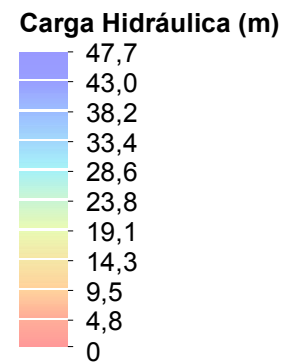
A representação cartográfica das características hidrogeológicas da área dá-se através do mapa hidrogeológico, o qual traz uma síntese das informações sobre as águas subterrâneas obtidas para os dois sistemas aquíferos principais presentes na região de Belém: o Sistema Aquífero Barreiras e o Sistema Aquífero Pirabas.

O mapa hidrogeológico do Sistema Aquífero Barreiras (Figura 50) compreende a integração dos mapas de potencialidade e de potencimetry complementado com a representação gráfica do modelo conceitual de fluxo dos aquífero. O mapa hidrogeológico do Sistema Aquífero Pirabas (Figura 51), por sua vez, é representado somente pelo mapa de potencialidade, uma vez que não foi possível estabelecer a potencimetry deste aquífero, pelas razões explicitadas ao longo do estudo. Ambos os mapas apresentam informações sobre a hidroquímica das águas por meio da representação de diagramas *Stiff* e informações de alguns poços representativos.



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual
- ⊙ Sede Municipal
- ~ Hidrografia
- Rodovia
- ☪ Massa d'água
- ⊕ Área de Estudo
- - - Limite municipal



- ID poço NE - VZ Profundidade
- Poços representativos o sistema barreiras
- Equipotenciais Barreiras (m)
- ➔ Direção de fluxo
- Diagramas de Stiff representativos do sistema Aquífero Barreiras

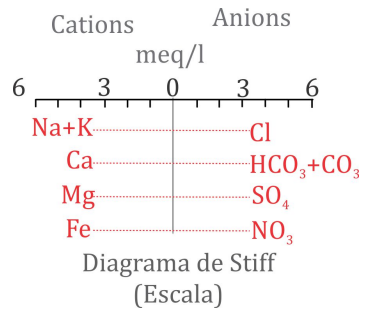


Figura 50 – Mapa hidrogeológico do Sistema Barreiras



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovias: SEMAS/PA. Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM
Carga hidráulica, equipotenciais e Diagramas Stiff: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_50_Hidrogeologico_Barreiras_A3
Escala:	1:290.000

8 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

No escopo deste projeto a caracterização hidrogeoquímica¹ das águas subterrâneas dos aquíferos Pós-Barreiras, Barreiras e Pirabas (Superior e Inferior) teve como objetivo caracterizar e avaliar a qualidade das águas que circulam nestes aquíferos e identificar problemas de qualidade, tanto de origem antrópica quanto natural, que podem afetar os padrões de potabilidade. Cabe destacar que, embora no modelo hidrogeológico os aquíferos Pós Barreiras e Barreiras tenham sido definidos como Sistema Barreiras e os aquíferos Pirabas Superior e Inferior definidos como Sistema Pirabas, na hidrogeoquímica optou-se pela caracterização individualizadas destas unidades aquíferas, em razão das diferenças hidroquímicas apresentadas.

Para tanto efetuou-se duas campanhas de amostragens de águas subterrâneas em 150 poços tubulares pré-selecionados na área de estudo. A primeira campanha foi realizada nos meses de junho a agosto de 2017 (menos chuvoso/verão) e a segunda nos meses de novembro de 2017 a março de 2018 (mais chuvoso/"inverno"), com 152 pontos. Os parâmetros analisados foram: temperatura, condutividade elétrica, pH, Eh, HCO₃⁻, CO₃⁻², STD, cor, turbidez, dureza, Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄⁻³, SO₄⁻², Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺, Fe e Mn. Exceto a temperatura, medida em °C, a condutividade, em µS/cm, a cor, em CU e a turbidez, em NTU, todos os demais parâmetros foram medidos em mg/L.

Parâmetros específicos foram analisados apenas na segunda campanha, tais como: índice de fenóis, BTEX, metais pesados, conteúdo bacteriológico, isótopos estáveis de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e hidrogênio (δD), carbono-14 (¹⁴C) e trítio (³H).

8.1 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES

Os poços tubulares selecionados na área de estudo para as amostragens de águas subterrâneas nas duas campanhas estão plotados no mapa da Figura 52. Durante a primeira campanha, realizada nos meses de junho a agosto de 2017, menos chuvoso na região, foram coletadas 150 amostras, sendo 18 amostras no Aquífero Pós-Barreiras, 99 no Aquífero Barreiras, 10 no Aquífero Pirabas superior e 23 no Aquífero Pirabas Inferior (Figura

¹ Maiores detalhes da caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas da região de Belém estão disponíveis em meio digital no Portal de Metadados da ANA, no Relatório Técnico do tema.

53). Cabe salientar que o poço P01, identificado como Aquífero Pirabas superior na primeira campanha, foi corrigido para Aquífero Barreiras na segunda.

A segunda campanha ocorreu de novembro de 2017 a março de 2018, mais chuvoso na região, período em que foram coletadas 152 amostras, das quais, 15 amostras no Aquífero Pós-Barreiras, 97 no Aquífero Barreiras, 11 no Aquífero Pirabas Superior, 27 no Aquífero Pirabas Inferior e duas amostras em poços em que não foram identificados os aquíferos explorados (Figura 52).

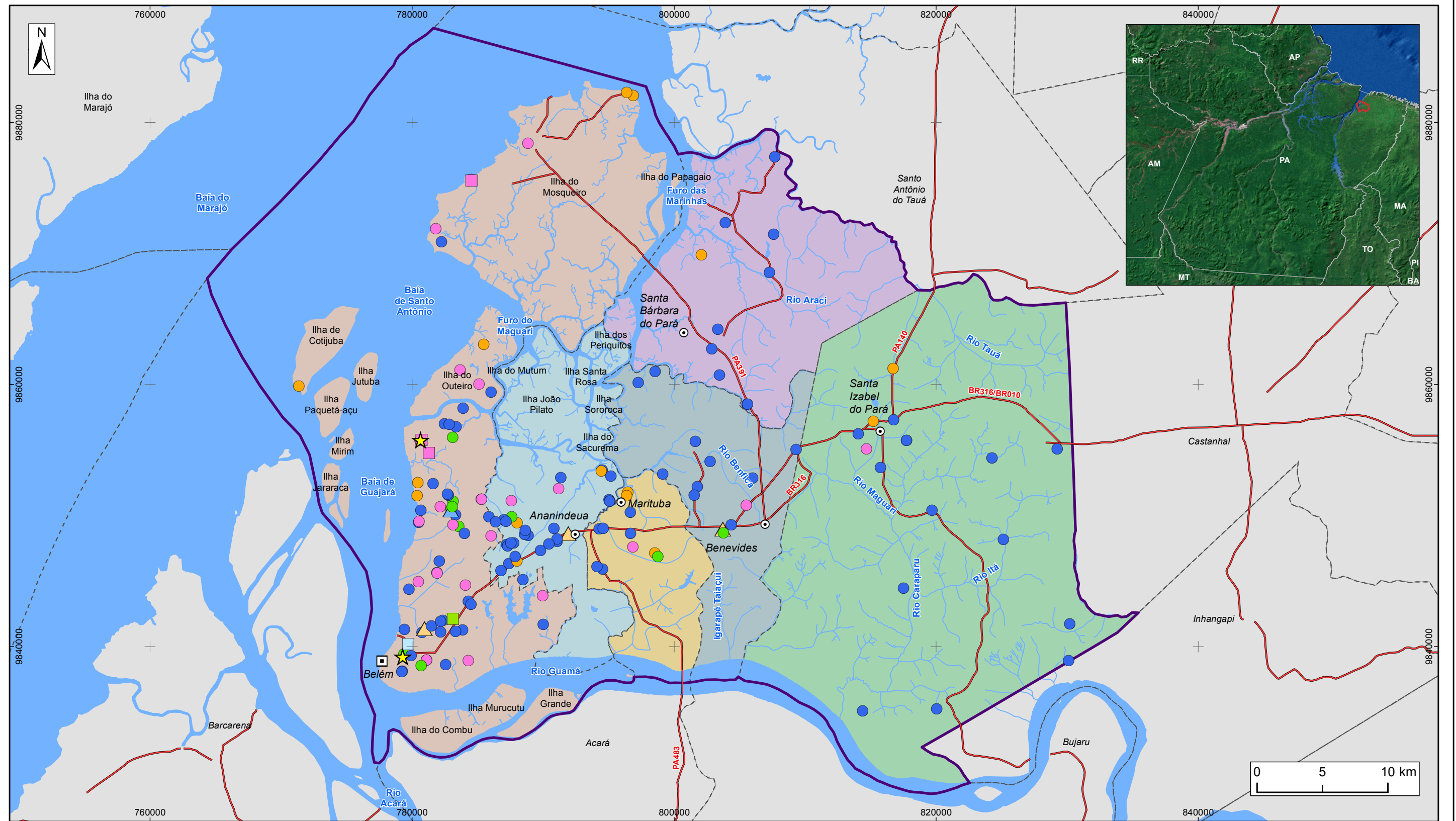
Alguns poços - P24 (Pós-Barreiras), P43 (Pós-Barreiras), P49 (Pós-Barreiras), e P130 (Barreiras) - não foram amostrados na segunda campanha, pois o acesso não foi permitido e/ou o poço estava desativado. O P100 também foi descartado para amostragens na segunda campanha, devido à incorporação de um processo de tratamento ao poço. O poço P69 estava desativado, tendo sido amostrado um outro poço próximo, mantendo-se a identificação, porém com novas coordenadas e a profundidade de coleta passou de 38 para 222 metros, e o aquífero amostrado foi o Pirabas Inferior (em vez do Aquífero Barreiras). Na segunda campanha também foram selecionados sete poços novos – RED21, NAZ39 e RIMAS 1, 4, 5, 6 e 7 (5º Setor-Pentágono), Mosqueiro 3 (Murubira), Icoaraci_Souza Franco; Icoaraci_Paracuri II e Icoaraci_FUNASA, respectivamente).

Na segunda campanha de amostragem, além das amostras coletadas para análises físico-químicas, também foram coletadas 43 amostras para análises de índice de fenóis e BTEX, 31 amostras para análises de metais pesados, 50 amostras para análises bacteriológicas, 33 amostras para análises de isótopos estáveis de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e hidrogênio (δD); 32 amostras para análises de carbono-14 (^{14}C); e 33 amostras para determinação de trítio (^3H). Todas as amostragens seguiram os padrões determinados para coletas e foram encaminhadas para as análises especificadas acima.

As análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica, do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP, Câmpus de Rio Claro (SP). Tais análises foram desenvolvidas com base em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (22ª edição, 2012).

Para a classificação dos tipos hidroquímicos foram utilizados os diagramas de *Stiff* e de *Piper*. Para a visualização da distribuição espacial dos principais cátions, ânions, metais (Fe e Mn), pH, STD e condutividade elétrica foram gerados mapas de isovalores, com o auxílio do *software ArcGis*. A especiação e a modelagem hidroquímica foram obtidas com

o uso do *software PHREEQC* (PARKHURST & APELLO, 1999). Para avaliação de possível correlação/similaridade entre as águas subterrâneas da cidade de Belém e municípios adjacentes (aquíferos pós Barreiras, Barreiras, Pirabas Superior e Inferior), ou similaridades entre amostras de uma mesma área, foi aplicada a análise multivariada pelo método de agrupamento (*cluster analysis*), com o auxílio do aplicativo XLSTAT.



LEGENDA

- | | | |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> □ Capital Estadual ⊙ Sede Municipal — Rodovia ~ Hidrografia ☪ Massa d'água ⊕ Área de Estudo - - - Limite municipal | <p>Amostragens</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Pós-Barreiras, 1 e 2 ▲ Pós-Barreiras, 1 ● Barreiras, 1 e 2 ▲ Barreiras, 1 | <ul style="list-style-type: none"> □ Barreiras, 2 ● Pirabas Superior, 1 e 2 ■ Pirabas Superior, 2 ● Pirabas Inferior, 1 e 2 ■ Pirabas Inferior, 2 ★ Aquífero não informado (NI), 2 |
|--|--|--|

Figura 52 – Localização dos pontos de amostragem de águas subterrâneas na região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Pontos de monitoramento: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_52_Pontos_Amostrados_A3
Escala:	1:290.000

8.1.1 Resultados dos Parâmetros Medidos em Campo

Em campo, durante a primeira e segunda campanhas de amostragens foram obtidos valores de condutividade elétrica, pH, temperatura e Eh das amostras de água subterrâneas selecionadas neste estudo.

Cabe destacar que, os valores de ORP medidos em campo foram corrigidos e expressos em Eh (mV), ressaltando que esses valores têm conotação qualitativa, devido à dificuldade na obtenção do valor exato de Eh em virtude da presença de diversos pares de oxidação-redução em águas naturais, do contato com o oxigênio atmosférico durante as medições, da lentidão das reações junto ao eletrodo, entre outras.

Observou-se, também, que não houve diferenças expressivas nos valores obtidos nas duas campanhas (Figura 53).

• **Condutividade Elétrica:** Na primeira campanha de amostragens, os valores de CE variaram de 20,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Pós-Barreiras) a 1017 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Barreiras), e na segunda campanha variaram de 17,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Barreiras) a 974 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Barreiras). As médias encontradas foram: primeira campanha – 113,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Pós-Barreiras), 130,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Barreiras), 134,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Pirabas Superior) e 327,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Pirabas Inferior) e, segunda campanha – 119,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Pós-Barreiras), 131,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Barreiras), 108,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Pirabas Superior) e 279,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Pirabas Inferior).

• **pH:** Na primeira campanha de amostragens, os valores de pH medidos em campo variaram de 4 (Aquífero Barreiras) a 7,8 (Aquífero Pirabas Inferior), e na segunda campanha variaram de 4 (aquíferos Barreiras e Pirabas Superior) a 7,7 (Pirabas Inferior). As médias encontradas foram: primeira campanha – 4,9 (Aquífero Pós-Barreiras), 5,2 (Aquífero Barreiras), 5,8 (Aquífero Pirabas Superior) e 7,1 (Aquífero Pirabas Inferior) e, segunda campanha – 5,2 (Aquífero Pós-Barreiras), 5,1 (Aquífero Barreiras), 6,0 (Aquífero Pirabas Superior) e 7,1 (Aquífero Pirabas Inferior).

• **Temperatura:** Na primeira campanha de amostragens as temperaturas medidas em campo variaram de 27,4°C (Aquífero Barreiras) a 39,0°C (Aquífero Barreiras), e na segunda campanha variaram de 22,7°C (Aquífero Barreiras) a 33,0°C (Pirabas Inferior). As médias encontradas foram: primeira campanha – 29,5°C (Aquífero Pós-Barreiras), 29,6°C (Aquífero Barreiras), 29,5°C (Aquífero Pirabas Superior) e 30,9°C (Aquífero Pirabas Inferior) e, segunda campanha – 29,0°C (Aquífero Pós-Barreiras), 28,9°C (Aquífero Barreiras), 29,2°C (Aquífero Pirabas Superior) e 29,9°C (Aquífero Pirabas Inferior).

• **Eh:** Os valores de Eh, na primeira campanha, variaram de 95,2 mV (Aquífero Pirabas Inferior) a 541,0 mV (Aquífero Barreiras) e na segunda campanha variaram de 61,5 mV (Aquífero Barreiras) a 617,4 mV (Pirabas Inferior). As médias encontradas foram: primeira campanha – 334,4 mV (Aquífero Pós-Barreiras), 311,1 mV (Aquífero Barreiras), 289,8 mV (Aquífero Pirabas Superior) e 220,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Aquífero Pirabas Inferior) e, segunda campanha – 334,3 mV (Aquífero Pós-Barreiras), 320,1 mV (Aquífero Barreiras), 304,9 mV (Aquífero Pirabas Superior) e 225,1 mV (Aquífero Pirabas Inferior).

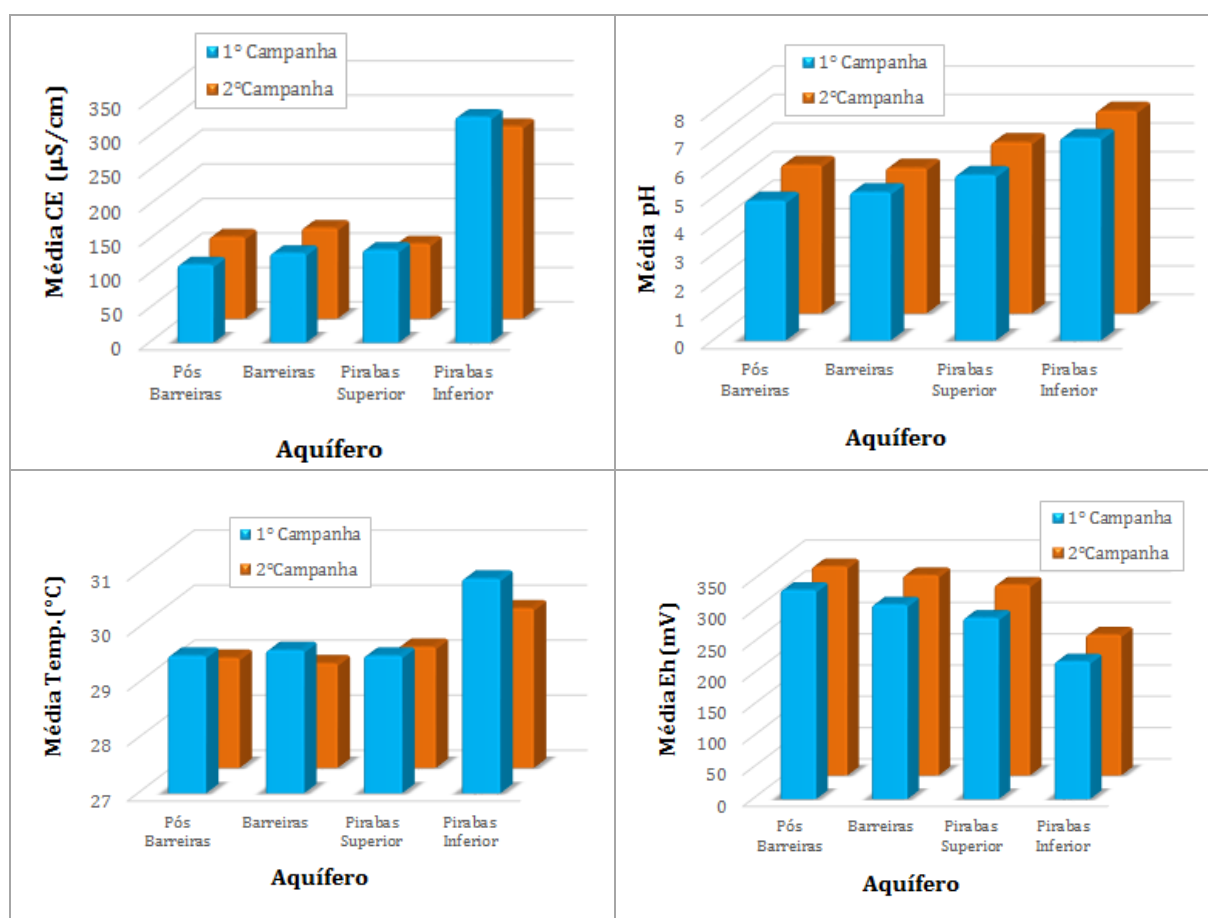


Figura 53 – Médias (CE, pH, T e Eh) das águas subterrâneas da região de Belém medidos em campo nas duas campanhas de amostragem.

8.1.2 Representatividade dos Resultados Obtidos

As análises químicas contemplaram a quantificação dos íons maiores presentes em solução na água subterrânea. Considerando que as soluções são eletricamente neutras, uma forma de avaliar a representatividade dos resultados obtidos é a verificação do balanço de cargas negativas e positivas. Para o balanço de carga foram utilizados os resultados analíticos convertidos em meq/L, conforme CUSTÓDIO E LLAMAS (1996).

A maioria das amostras, coletadas na primeira ou segunda campanha, apresentou balanço de carga com até 20% de erro, sendo que, aproximadamente, 93% das amostras ficaram com erros abaixo de 10%. Os erros maiores que 20% podem ser resultado da baixa concentração iônica, que aumenta o erro analítico devido a restrições dos limites de detecção dos equipamentos, sendo esta a hipótese mais provável; pode ainda indicar precipitação de substâncias antes da análise, ou a não inclusão de algumas substâncias presentes dentre os parâmetros quantificados.

8.1.3 Classificação das Águas Subterrâneas

A classificação hidroquímica foi feita com auxílio dos diagramas de *Piper* e *Stiff*, admitindo-se valor zero para íons que ficaram com teor abaixo do limite de detecção do método de análise empregado. Segundo o diagrama de *Piper* (Figura 54), a classificação das águas pode ser assim resumida:

- As águas amostradas no Aquífero Pós-Barreiras, na primeira campanha, são classificadas, em sua maioria, como cloretadas sódicas (78%), e o restante como sulfatadas cálcicas (22%). Na segunda campanha, são classificadas, predominantemente, como cloretadas sódicas (80%) e o restante como sulfatadas cálcicas (20%).

- As amostras de água do Aquífero Barreiras, coletadas na primeira campanha, são classificadas, a maioria, como cloretadas sódicas (68,7%), seguidas pelas sulfatadas cálcicas (17,2%) e as bicarbonatadas cálcicas (14,1%). Na segunda campanha, as cloretadas sódicas predominam (72%), seguidas pelas sulfatadas cálcicas (19%) e as bicarbonatadas cálcicas (9%).

- No Aquífero Pirabas superior, primeira campanha de amostragem, 70% das amostras são classificadas como bicarbonatadas cálcicas e 30% como cloretadas sódicas. Na segunda campanha, 56% das amostras são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, 27% são como cloretadas sódicas, uma amostra é classificada como sulfatada cálcica (P41 – Poço particular/Hotel – Belém) e outra como bicarbonatada sódica (Rimas1 – Poço RIMAS – COSANPA/5º Setor/Pentágono).

- As amostras do Aquífero Pirabas Inferior, na primeira campanha, são predominantemente bicarbonatadas cálcicas (96%); apenas uma amostra é classificada como cloretada sódica. Nas amostragens realizadas na segunda campanha, as águas são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, com exceção das amostras Rimas4 e Rimas5, que são classificadas como cloretada sódica e sulfatada cálcica, respectivamente.

Os diagramas de *Stiff* (Figura 55 e Figura 56) evidenciam as diferenças de concentrações iônicas das amostras. No Aquífero Pós Barreiras, as amostras são, em sua maioria, menos salinas, enquanto que as amostras do Aquífero Pirabas Inferior apresentam maiores salinidades. Observa-se também que as amostras do Aquífero Barreiras na porção sudoeste são mais salinas que as situadas nas porções leste e central, enquanto as amostras do Aquífero Pirabas Inferior não apresentam diferenças expressivas em relação às concentrações iônicas e seguem o mesmo padrão de classificação (bicarbonatadas cálcicas).

Observa-se na Figura 57 e Figura 58 que as águas classificadas como cloretadas sódicas possuem uma distribuição homogênea por toda a área de estudo e ocorrem em maior quantidade. As águas sulfatadas cálcicas aparecem por toda área, porém em menor quantidade, enquanto que as bicarbonatadas cálcicas estão em sua maioria na porção sudoeste, onde estão localizados principalmente os poços que exploram águas do Aquífero Pirabas Inferior. Apenas uma amostra foi classificada como bicarbonatada sódica (Rimas 1 – Poço RIMAS – COSANPA/5º Setor/Pentágono).

Cabe ressaltar que as amostras P01 (Poço RIMAS - Belém - Aquífero Barreiras), P19 (Poço particular/Supermercado – Ananindeua – Aquífero Barreiras), P64 (Poço particular/Condomínio - Belém – Aquífero Barreiras), P88 (Poço particular – Marituba – Aquífero Barreiras), P102 (Poço particular/Condomínio – Ananindeua – Aquífero Barreiras), P106 (Poço particular – Ananindeua – Aquífero Barreiras) e P119 (Poço particular/ Clube – Belém – Aquífero Barreiras) e P150 (Poço particular – Marituba – Aquífero Pós Barreiras) e P70 (Poço particular – Bairro Marco /Belém – Aquífero Pós Barreiras) apresentam valores de nitrato acima do limite permitido pela Portaria nº 2914/2011, do Ministério da Saúde. Esses valores de nitrato devem-se provavelmente à contaminação antrópica. No geral, a classificação hidroquímica das amostras pelo diagrama de *Piper* permaneceu a mesma nas duas campanhas de amostragem.

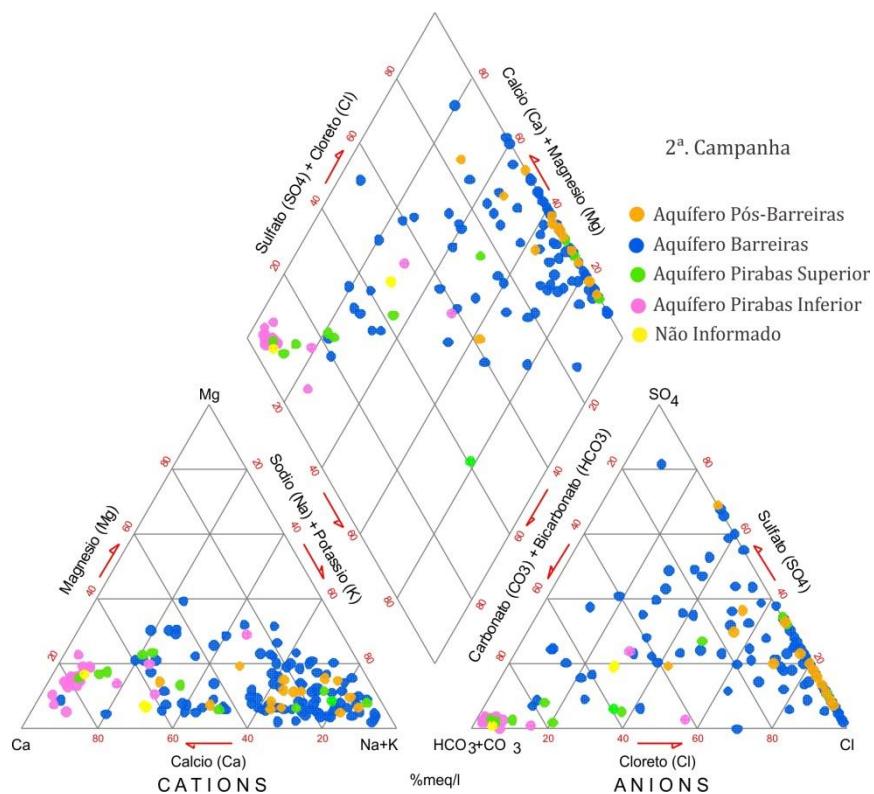
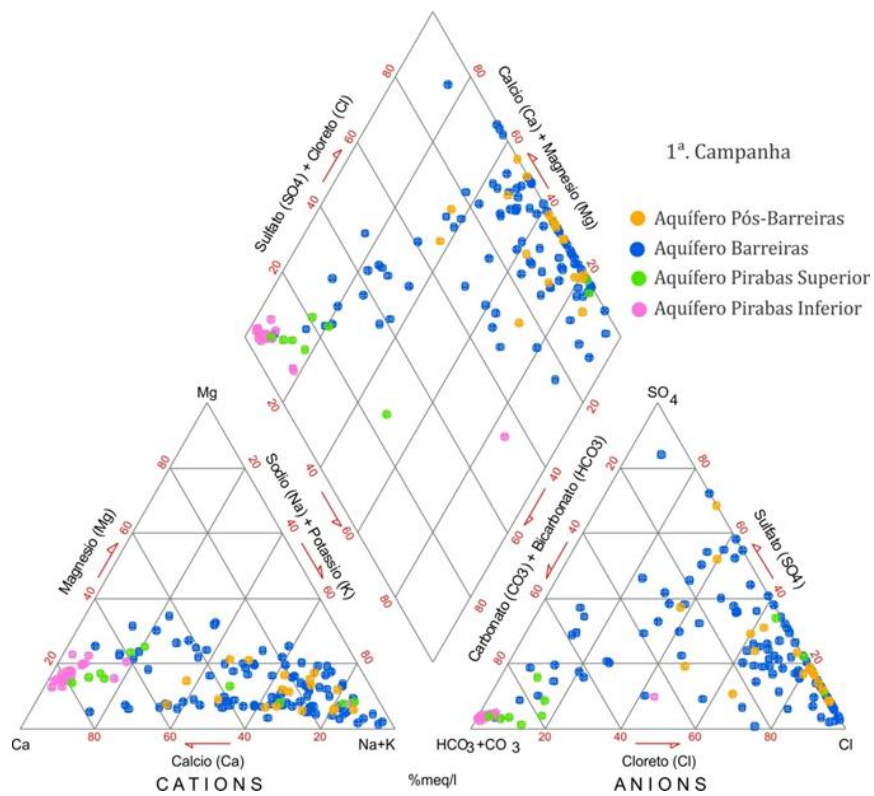
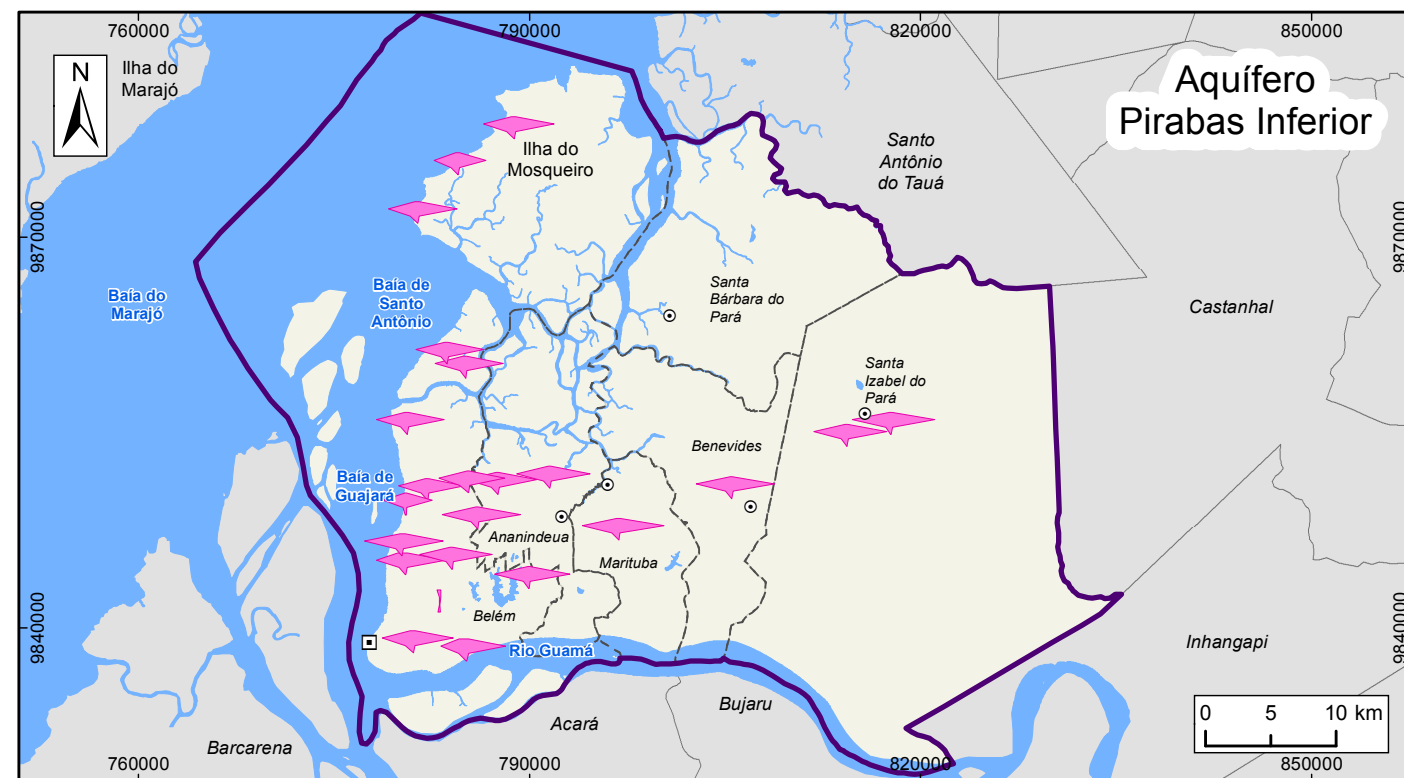
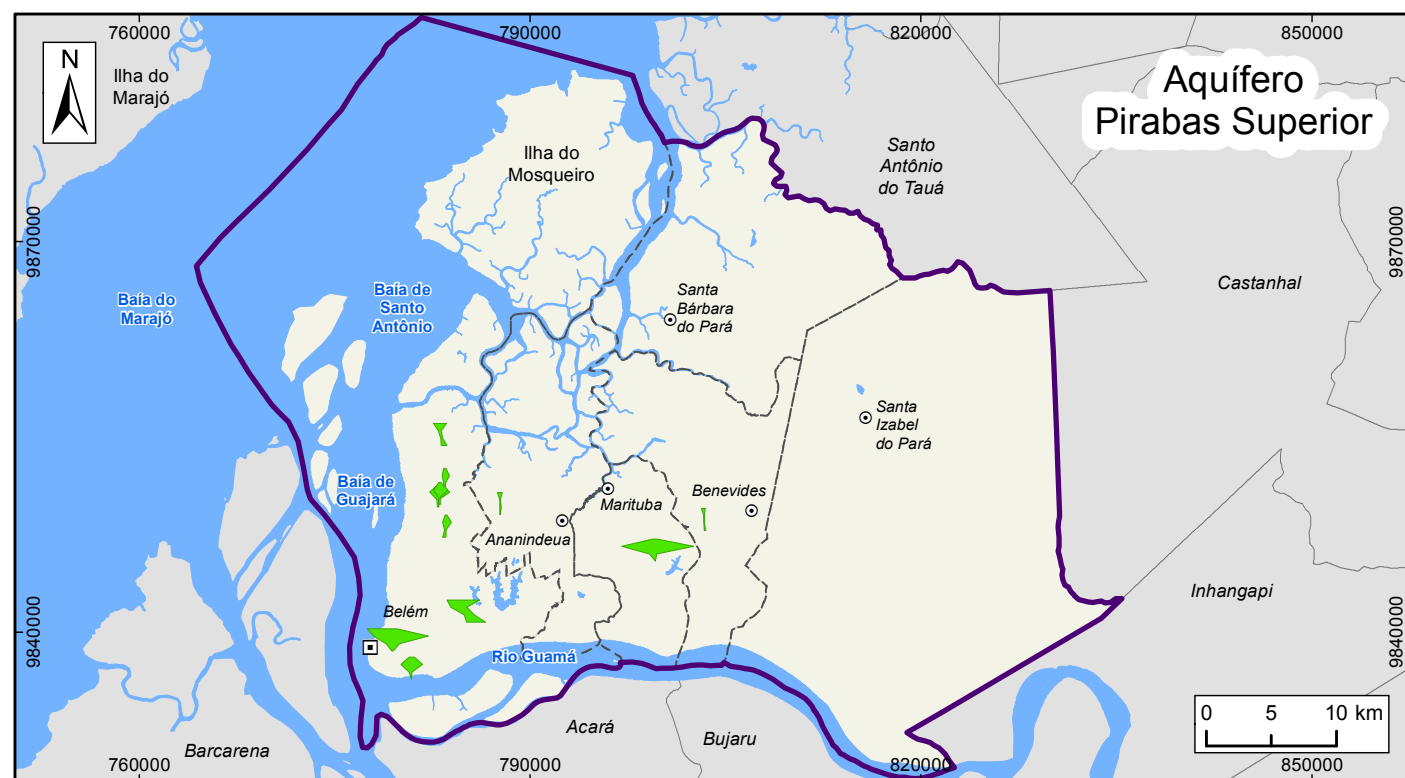
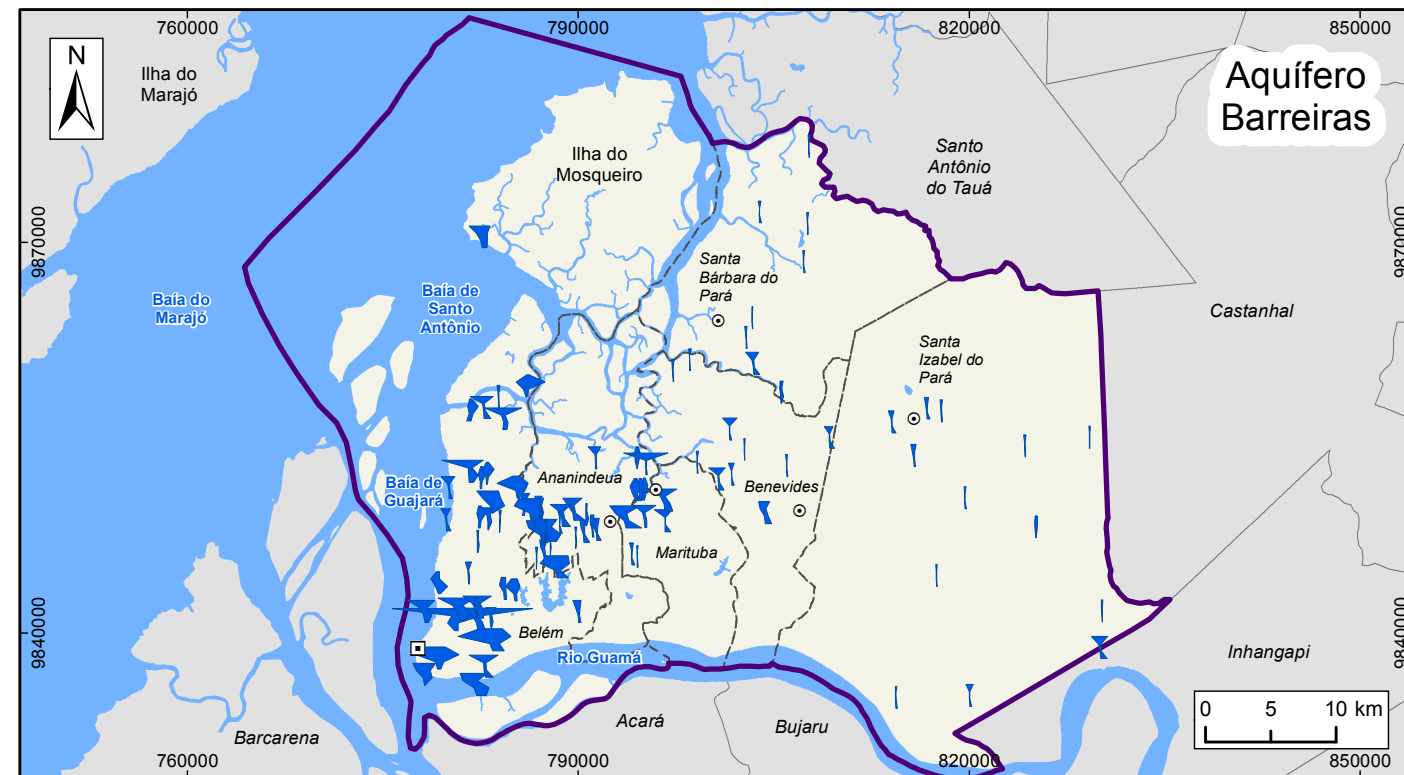
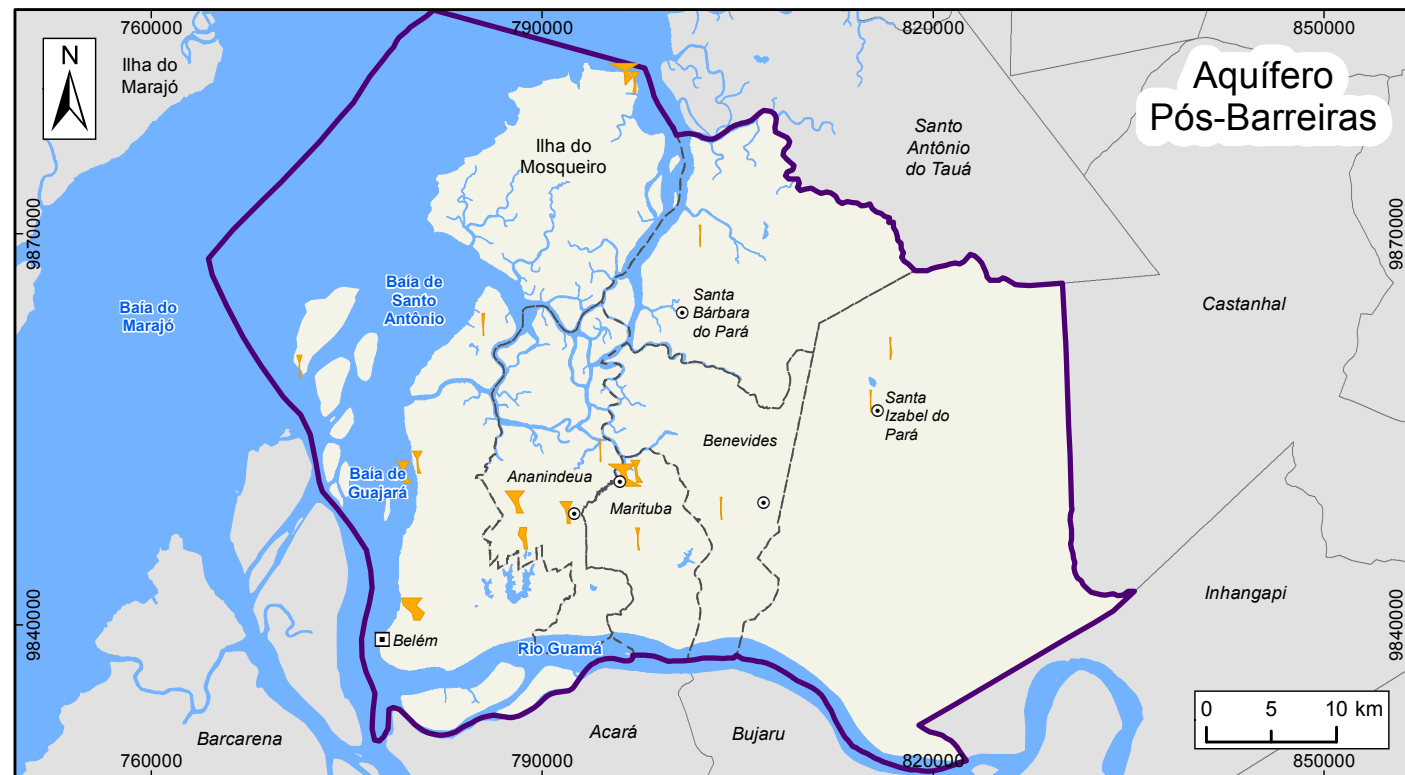


Figura 54 – Diagramas de Piper para amostras da primeira e segunda campanhas.



LEGENDA

- Capital Estadual
- Sede Municipal
- ☒ Massa d'água
- ☒ Área de Estudo
- - - Limite municipal
- Aquífero**
- Pós-Barreiras
- Barreiras
- Pirabas Superior
- Pirabas Inferior

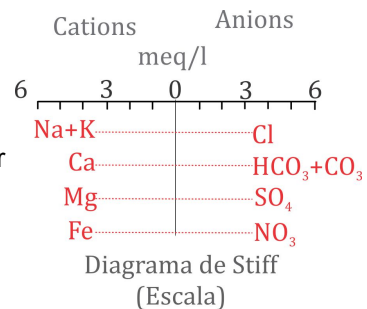


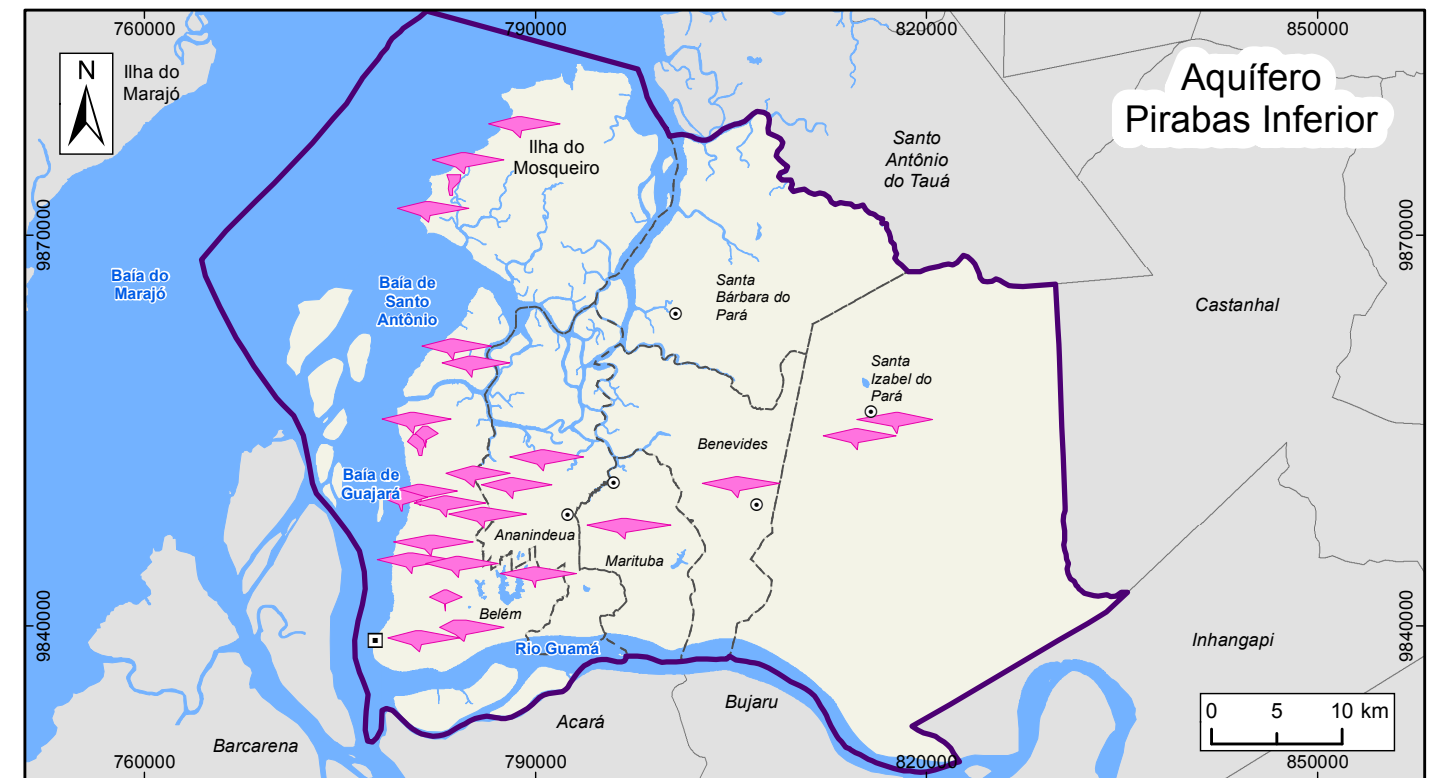
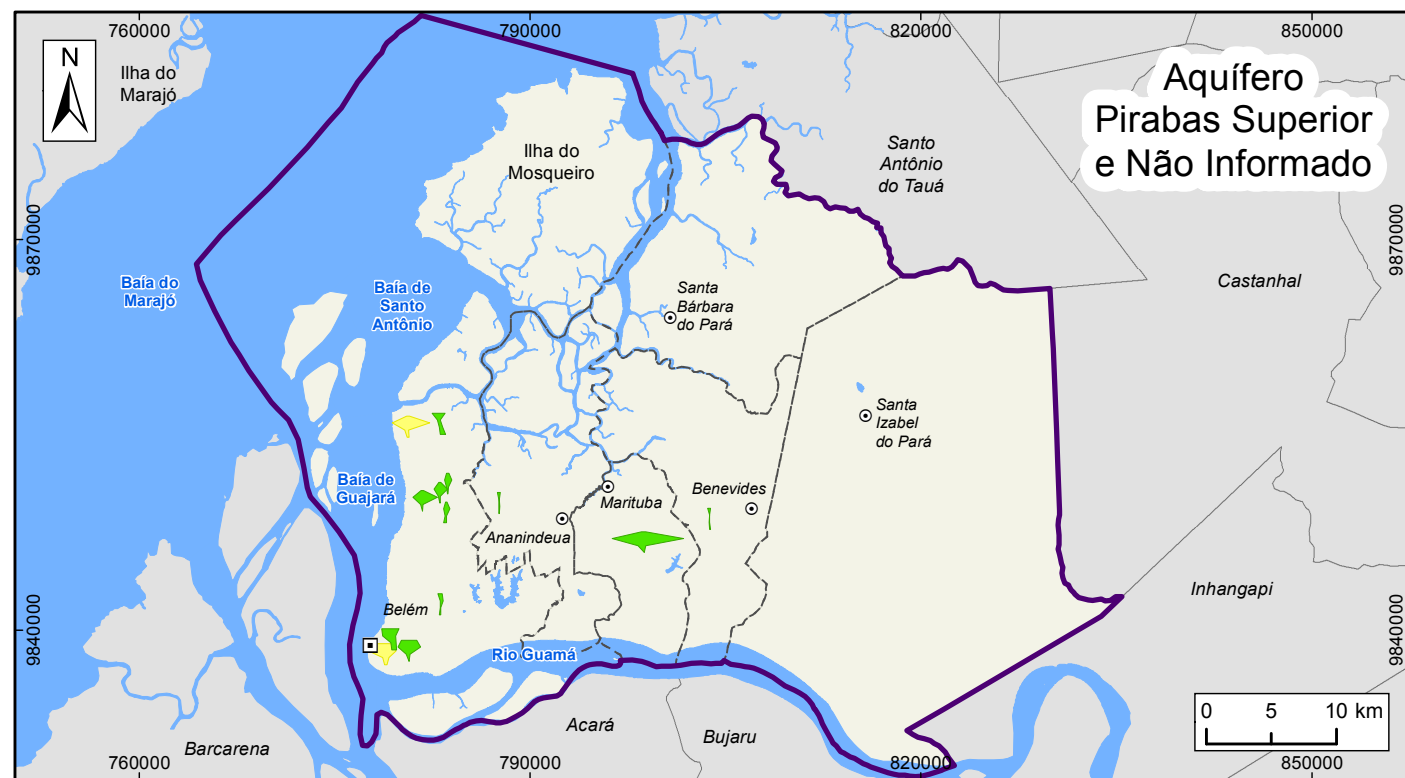
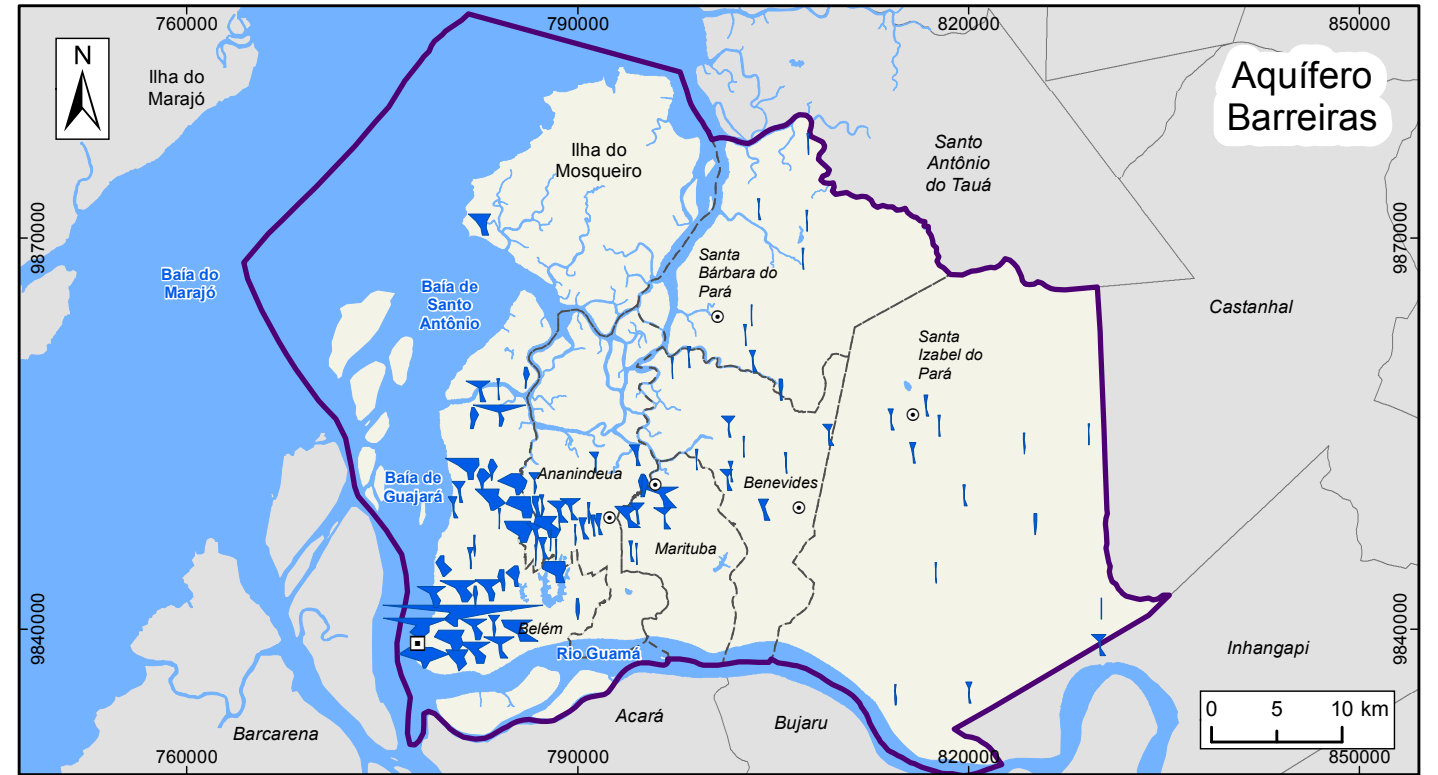
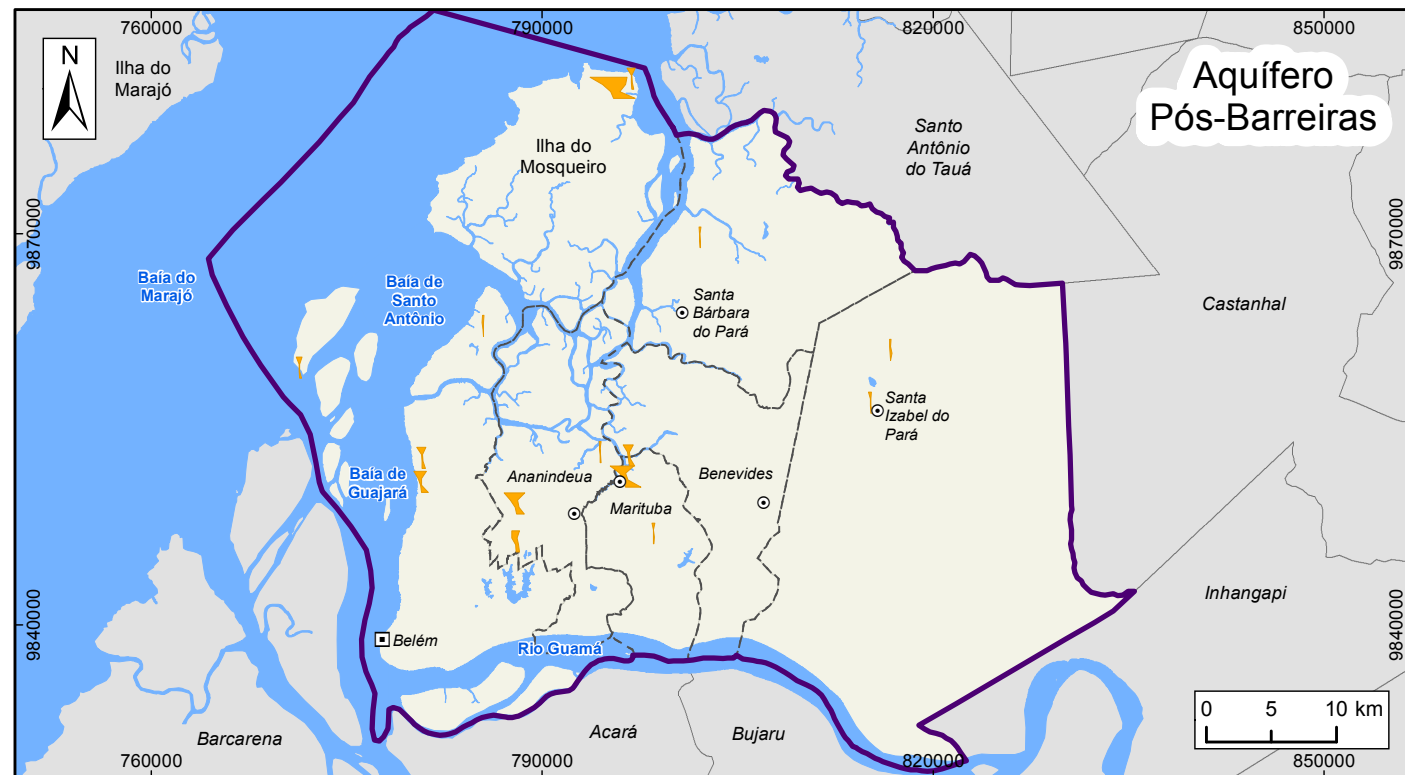
Figura 55 – Distribuição dos diagramas de Stiff para amostras da primeira campanha



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovia: SEMAS/PA. Limites políticos: IBGE
Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA
Diagramas de Stiff: ANA/PROFILL

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_55_Diagramas_de_Stiff_campanha1_A3
Escala:	1:580.000



LEGENDA

- Capital Estadual
 - Sede Municipal
 - Massa d'água
 - Área de Estudo
 - Limite municipal
- Aquífero**
- Órã Pós-Barreiras
 - Barreiras
 - Pirabas Superior
 - Não Informado
 - Pirabas Inferior

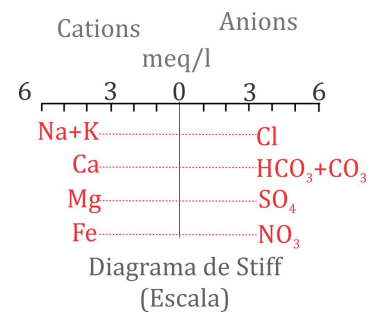


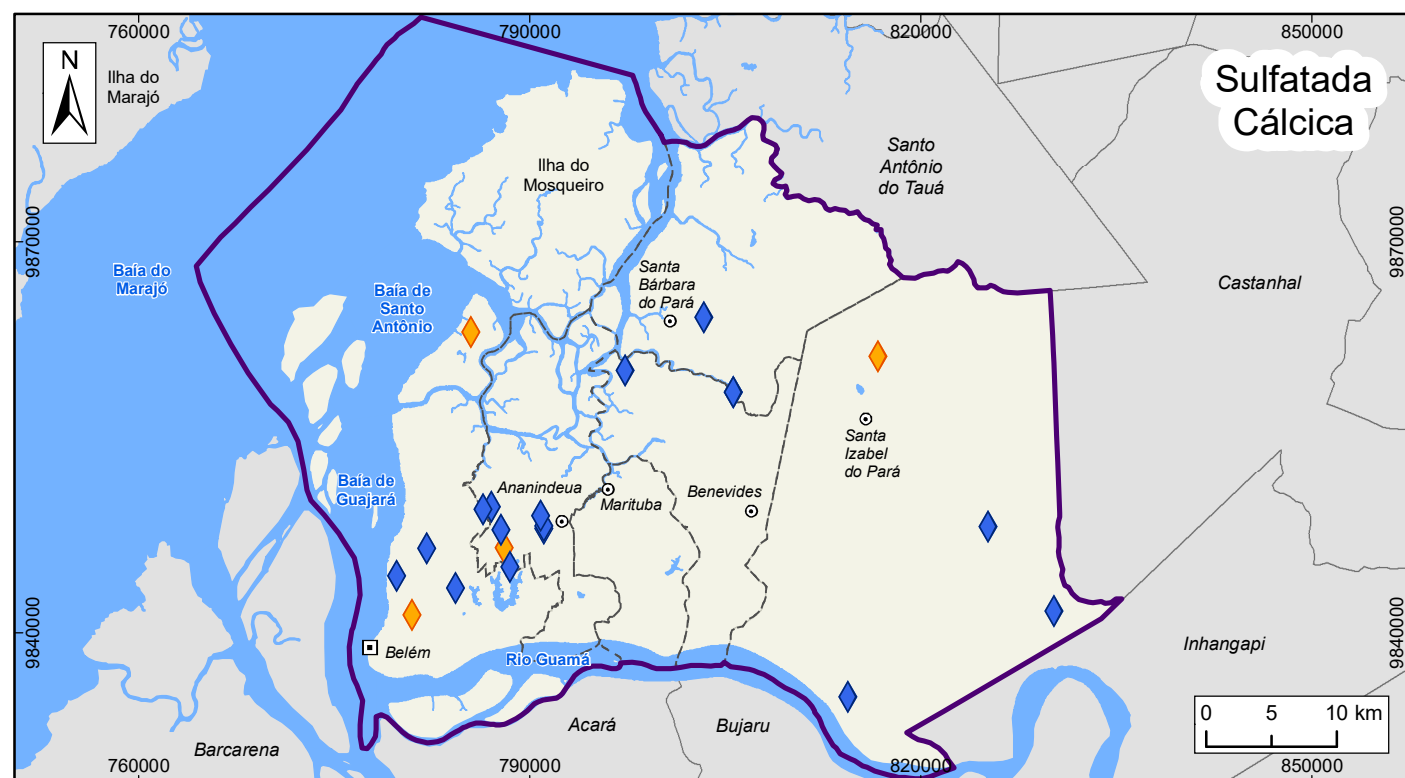
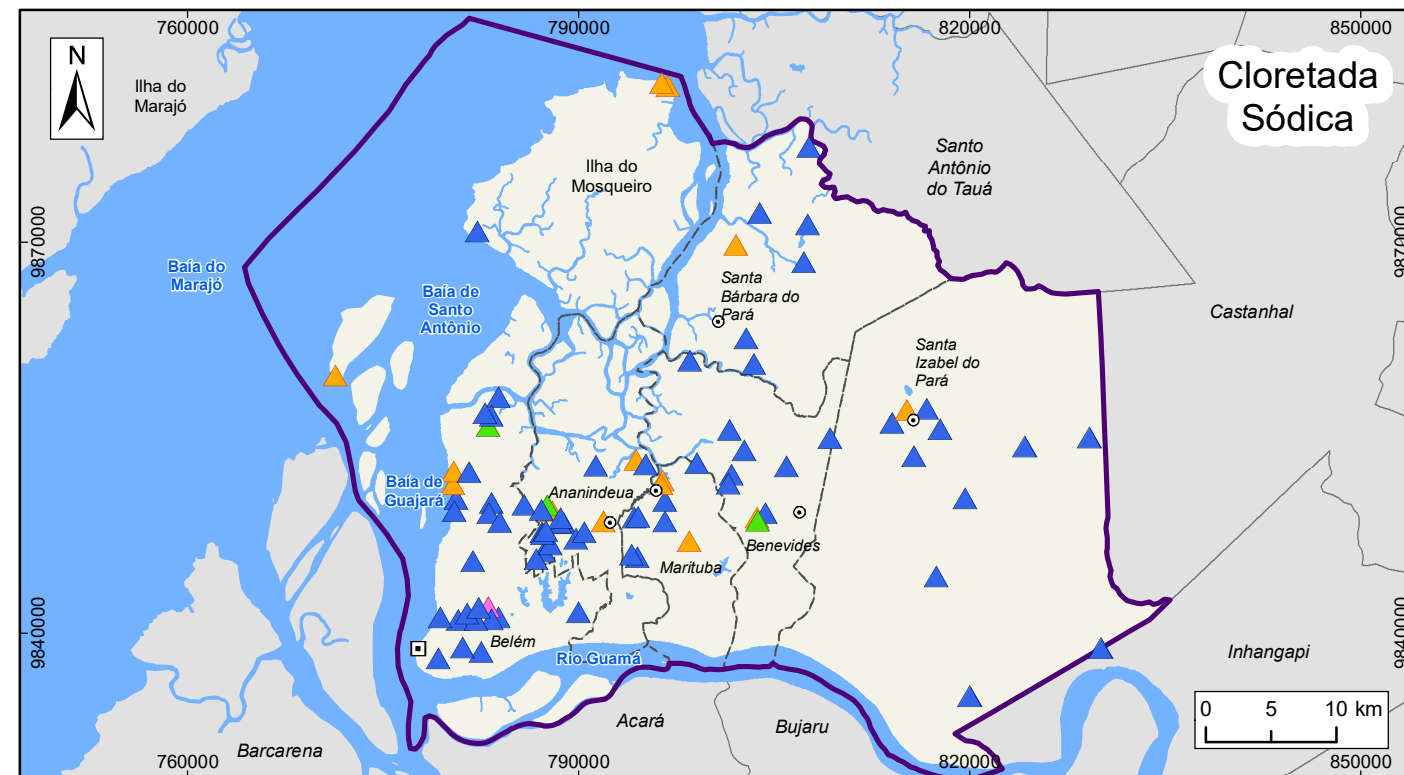
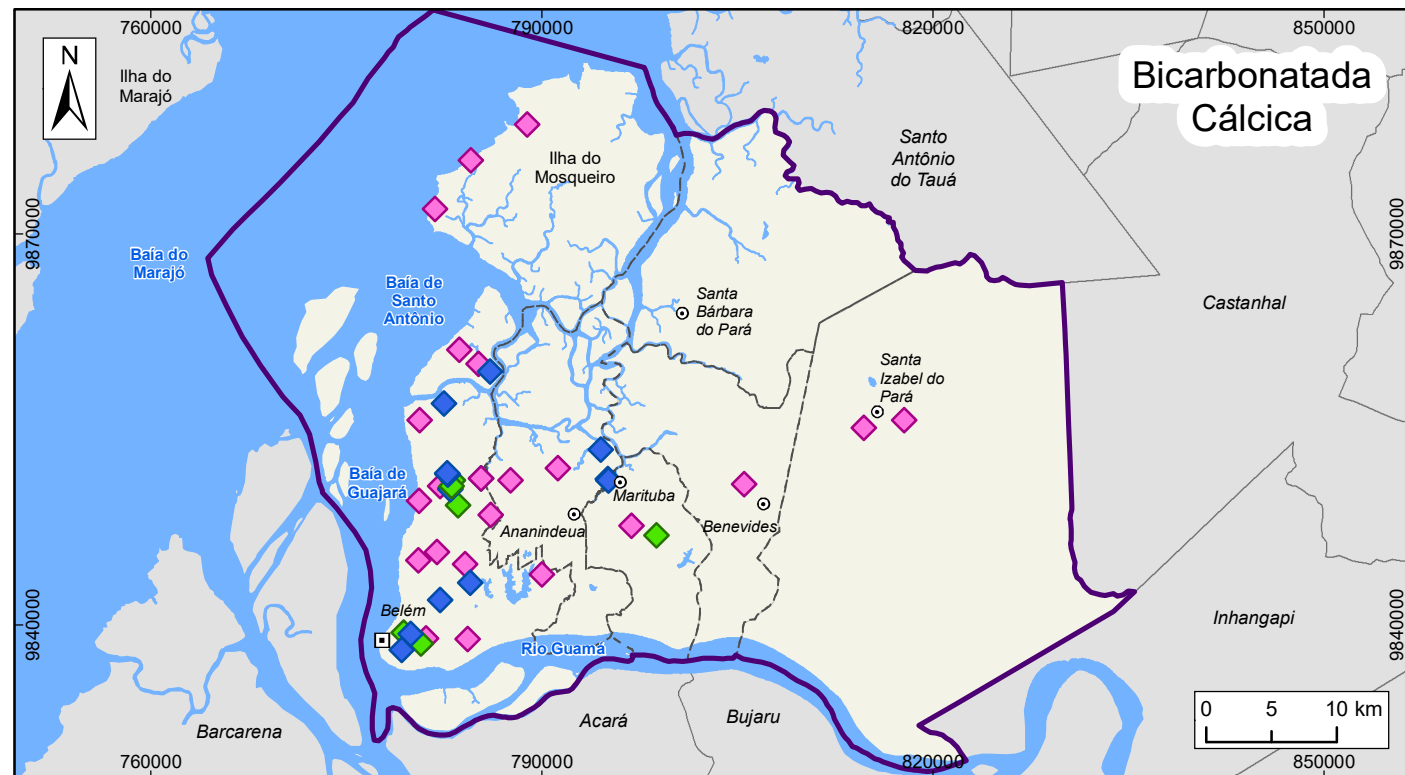
Figura 56 – Distribuição dos diagramas de Stiff para amostras da segunda campanha



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovia: SEMAS/PA. Limites políticos: IBGE
Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA
Diagramas de Stiff: ANA/PROFILL

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_56_Diagramas_de_Stiff_campanha2_A3
Escala:	1:580.000



LEGENDA

- Capital Estadual
 - Sede Municipal
 - ☪ Massa d'água
 - ⊕ Área de Estudo
 - - - Limite municipal
- Tipos Hidroquímicos (Piper)**
- ◇ Bicarbonatada Cálcica
 - △ Cloretada Sódica
 - ◊ Sulfatada Cálcica
- Aquífero**
- Pós-Barreiras
 - Barreiras
 - Pirabas Superior
 - Pirabas Inferior

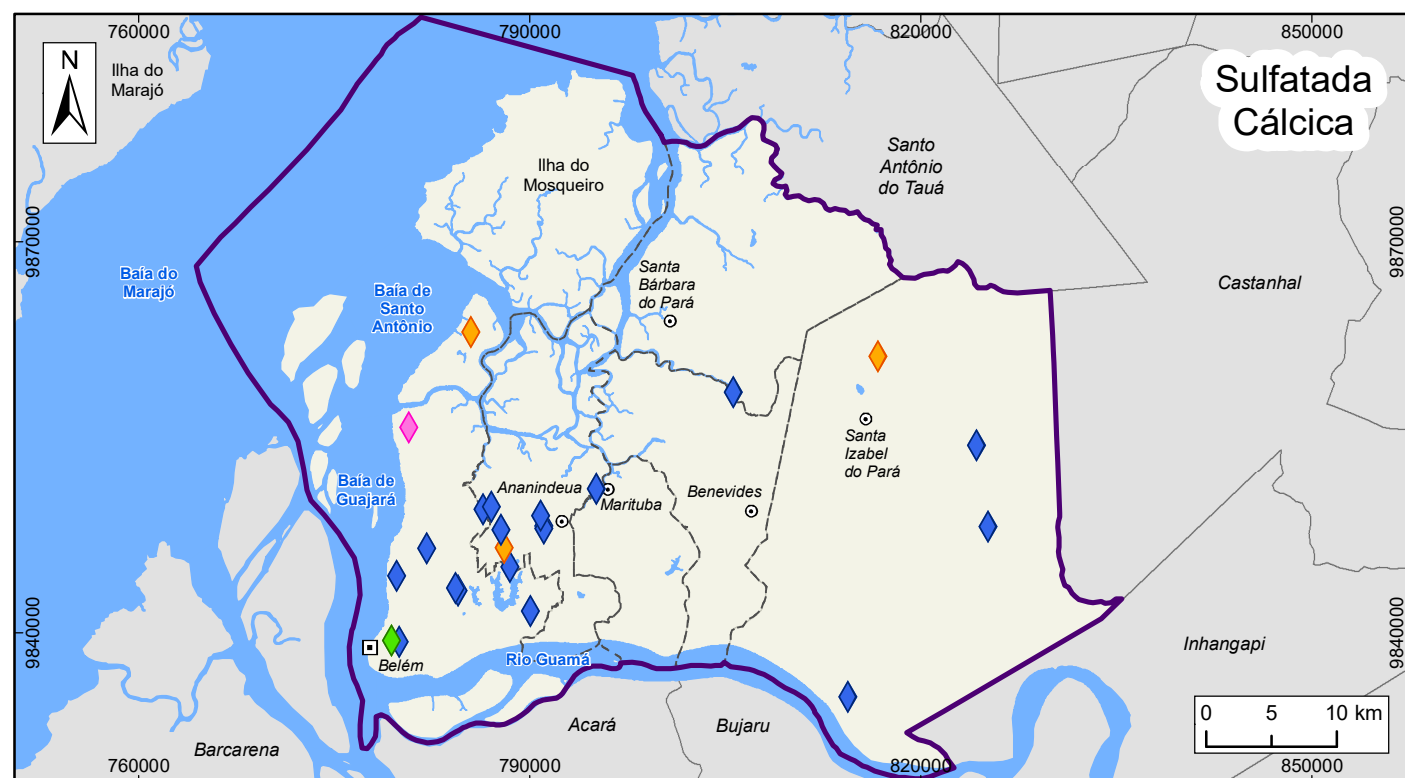
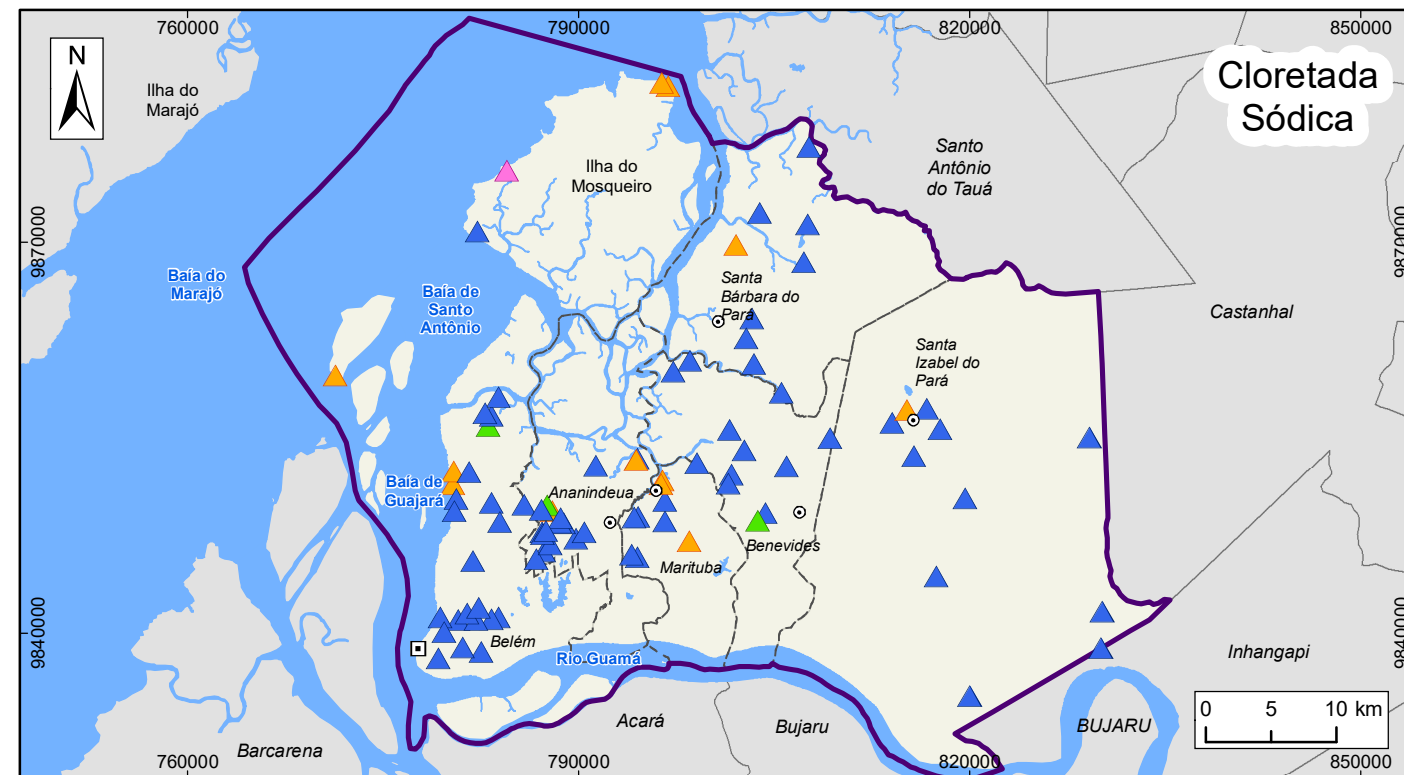
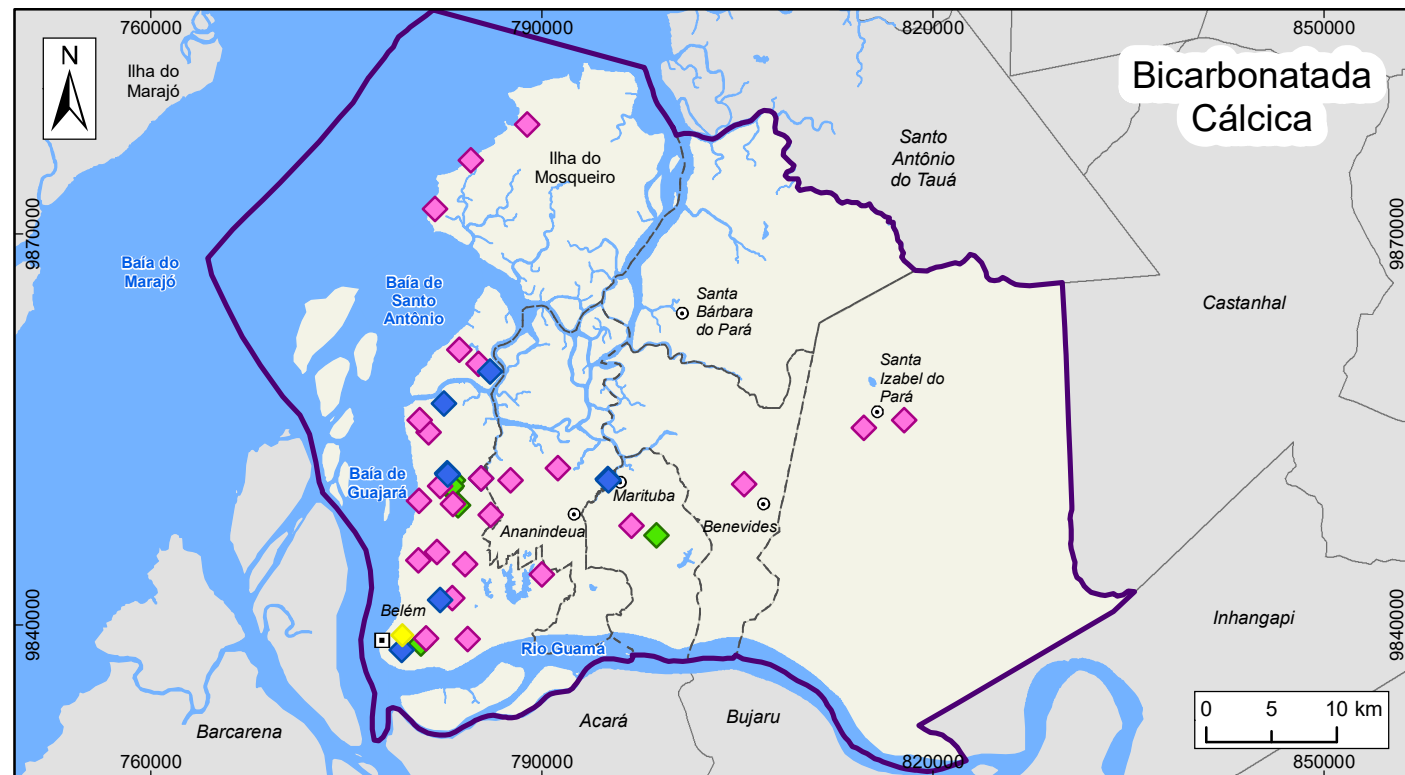
Figura 57 – Distribuição dos tipos hidroquímicos para amostras da primeira campanha



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovia: SEMAS/PA. Limites políticos: IBGE
 Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA
 Tipos hidroquímicos por aquífero: ANA/PROFILL

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_57_Tipo_hidroquimico_campanha1_A3
Escala:	1:580.000



LEGENDA

- ▣ Capital Estadual
 - ⊙ Sede Municipal
 - ☁ Massa d'água
 - ⊕ Área de Estudo
 - - - Limite municipal
 - Tipos Hidroquímicos (Piper)**
 - ◇ Bicarbonatada Cálctica
 - ▲ Cloretada Sódica
 - ◆ Sulfatada Cálctica
- Aquífero**
 - Pós-Barreiras
 - Barreiras
 - Pirabas Superior
 - Pirabas Inferior
 - Não Informado

Figura 58 – Distribuição dos tipos hidroquímicos para amostras da segunda campanha



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Rodovia: SEMAS/PA. Limites políticos: IBGE
 Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA
 Tipos hidroquímicos por aquífero: ANA/PROFILL

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_58_Tipo_hidroquimico_campanha2_A3
Escala:	1:580.000

8.1.4 Análise Estatística

Neste item é apresentada uma análise comparativa entre resultados médios dos diferentes parâmetros físico-químicos, referentes às amostragens realizadas nos aquíferos Pós Barreiras, Barreiras, Pirabas Superior e Pirabas Inferior. Análises comparativas entre campanhas são apresentadas no item seguinte.

Como os dados analisados da área de estudo, em maioria, não seguem uma distribuição normal utilizou-se o método não-paramétrico Mann-Whitney para análises comparativas dos parâmetros físico-químicos entre os aquíferos e a 1ª e 2ª campanhas. A comparação foi realizada entre médias das populações (aquíferos e campanhas) com variáveis independentes, tamanhos amostrais diferentes e considerando igualdade ou desigualdade de variâncias, a depender dos resultados de um teste estatístico prévio.

Os resultados dos testes realizados podem ser assim resumidos:

- Os resultados indicam que os valores médios dos parâmetros físico-químicos, provenientes da comparação entre os diferentes aquíferos da área de estudo, para um nível de significância de 5%, são estatisticamente iguais para os aquíferos Pós Barreiras, Barreiras e Pirabas Superior. A congruência estatística entre as amostras desses aquíferos deve-se provavelmente à proximidade estratigráfica e à ausência de camada impermeável entre estas unidades ou de uma camada impermeável extensa, como também pode ser explicada pelo fato de alguns poços extraírem águas de mais de uma unidade.
- O Aquífero Pirabas Inferior, comparado aos demais aquíferos estudados, é estatisticamente diferente, fato já previsto pelas análises anteriores. Alguns parâmetros mostraram-se estatisticamente congruentes entre essas unidades, porém, em sua maioria, são parâmetros com baixa concentração nas amostras.
- As comparações foram estatisticamente iguais quando se confrontam os valores médios das 1ª e 2ª campanhas, sejam estas provenientes dos aquíferos Pós Barreiras, Barreiras, Pirabas Superior ou Pirabas Inferior. As diferenças encontradas em alguns íons, como nitrito e nitrato, podem ser atribuídas à contaminação antrópica, o que explicaria as diferenças entre as duas campanhas.

8.1.5 Análise Estatística Multivariada

Conforme dados apresentados e analisados anteriormente, não foram constatadas diferenças significativas nas amostras coletadas nas duas campanhas, porém foram verificadas diferenças entre as amostras de cada aquífero estudado. Com isso, optou-

se por uma análise estatística utilizando todas as amostras coletadas, de modo a permitir uma melhor interpretação dos resultados hidroquímicos. Para avaliação de possível correlação/similaridade entre as águas coletadas dos diferentes aquíferos, e entre as duas campanhas de amostragem, foi aplicada a análise multivariada de agrupamentos aos dados físico-químicos obtidos. A partir do dendrograma (Figura 59) foram identificados quatro grupos distintos de água, denominados A, B, C e D.

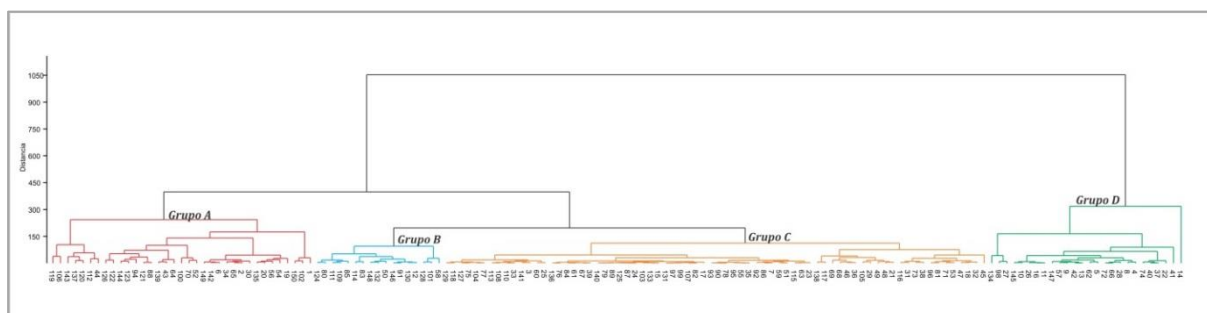
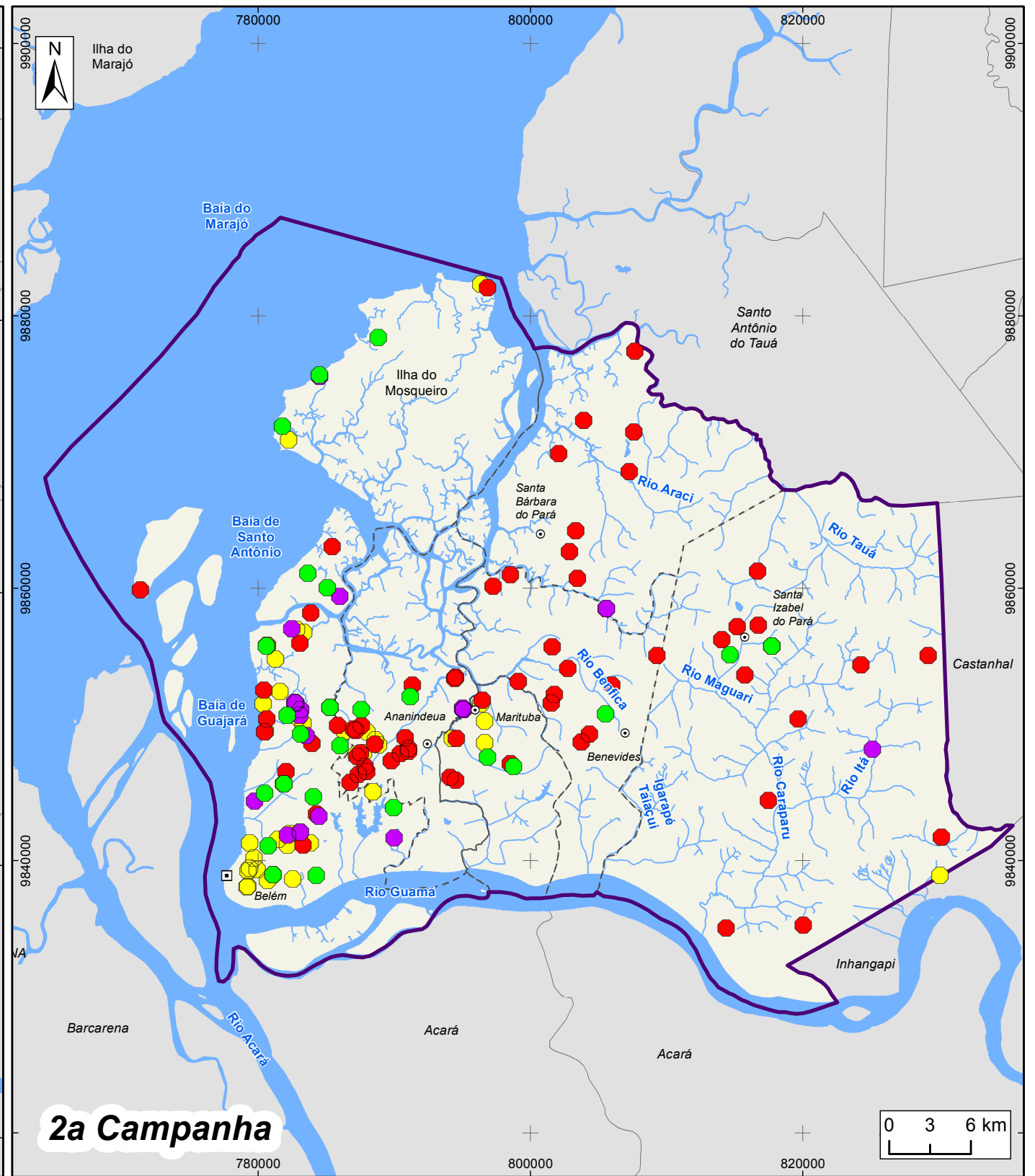
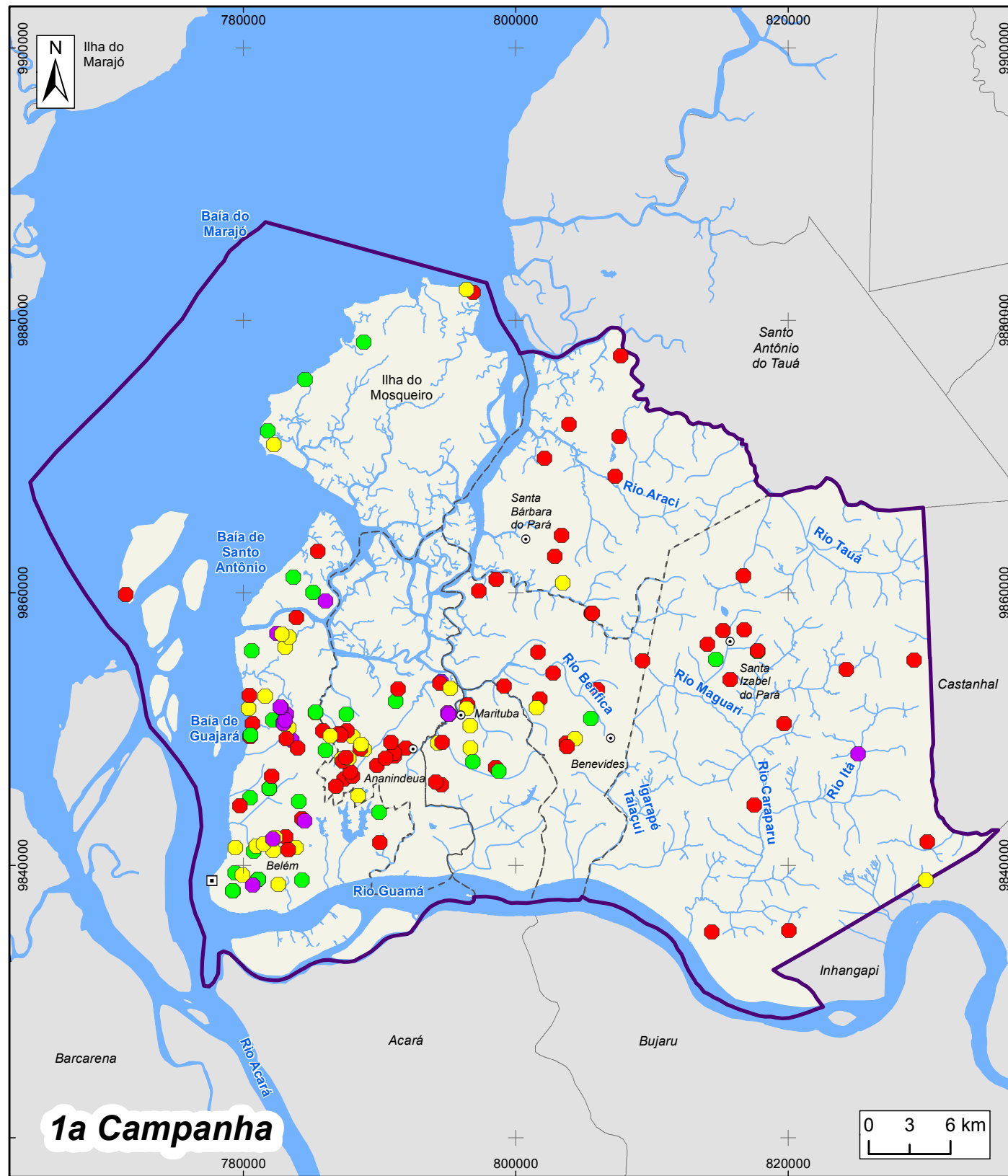


Figura 59 – Dendrograma das amostras de águas subterrâneas da região de Belém (1ª campanha de amostragem).

- **Grupo A** – Com amostras distribuídas predominantemente no sudoeste da área de estudo (Figura 60), em sua maioria do Aquífero Barreiras (~80%), com condutividade elétrica mais elevada que a maioria das amostras deste aquífero (acima de 130 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Os ânions predominantes são o nitrato, cloreto e sulfato. O cátion com maior concentração é o sódio. Neste grupo estão as amostras com maiores concentrações de nitrato, relacionado à contaminação antrópica.
- **Grupo B** – É o grupo com menor quantidade de amostras, sendo amostras dos aquíferos Barreiras e Pirabas superior. Suas águas têm condutividades elétricas com média de 77 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Predominam os ânions HCO_3 e SO_4 , e o cátion Ca; destaca-se também o ferro com altas concentrações. Distribuem-se, preferencialmente, na porção sudoeste da área de estudo (Figura 60).
- **Grupo C** – É o grupo com maior quantidade de amostras. Predominam amostras do Aquífero Barreiras e a maioria das amostras coletadas no Aquífero Pós Barreiras. Essas águas são pouco salinizadas, com condutividades elétricas predominantemente menores que 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Predominam, ainda que em baixas concentrações, os ânions Cl, e NO_3 , e o cátion Na e sílica. Distribuem-se por toda área de amostragem (Figura 60) e podem ser consideradas representativas dos aquíferos Pós Barreiras e Barreiras na área de estudo.
- **Grupo D** – São as amostras distribuídas principalmente no sudoeste da área de estudo (Figura 60) e predominantemente do Aquífero Pirabas Inferior (~90%), com condutividade elétrica mais elevada (acima de 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$). O ânion HCO_3 predomina com valores acima de 114 mg/L e o cátion com maiores concentrações é cálcio. Este grupo pode ser considerado representativo do Aquífero Pirabas Inferior na área de estudo.



LEGENDA

- | | | |
|-------|------------------|---------------------------|
| ▣ | Capital Estadual | Grupo Hidroquímico |
| ○ | Sede Municipal | ● A |
| ~ | Hidrografia | ● B |
| ☪ | Massa d'água | ● C |
| ⊕ | Área de Estudo | ● D |
| - - - | Limite municipal | |

Figura 60 – Distribuição dos grupos hidroquímicos identificados nas águas subterrâneas da região de Belém nas duas campanhas de coleta



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Grupo Hidroquímico: ANA/Profill

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_60_Grupos_Hidroquímicos_A3
Escala:	1:400.000

8.2 MAPAS DE ZONEAMENTO HIDROGEOQUÍMICO

Os resultados dos principais parâmetros físico-químicos obtidos neste estudo foram analisados quanto à sua distribuição espacial por meio de mapas de isovalores gerados pelo programa *ArcGis*. Foi utilizada a maioria das amostras coletadas na área de estudo. Mesmo no caso dos aquíferos Pós Barreiras e Pirabas Superior, cujos números de amostras não seriam indicados para interpolação dos valores, foram gerados os mapas para possíveis comparações entre os aquíferos e as campanhas de amostragens. Para os aquíferos Pós Barreiras, Pirabas Superior e Pirabas Inferior, áreas menores foram delimitadas para evitar exageros na interpolação dos valores. Algumas amostras foram excluídas da interpolação uma vez que foram coletadas em apenas uma das campanhas de amostragem.

Os mapas de isovalores foram elaborados com as mesmas escalas de cores para possíveis comparações. As principais concentrações iônicas estão expressas em mg/L, e a condutividade elétrica em $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os parâmetros analisados foram: condutividade elétrica, STD, pH, alcalinidade (HCO_3), sódio, cálcio, cloreto, nitrato, sulfato, ferro e manganês.

Nos aquíferos Pós Barreiras e Barreiras os maiores valores de condutividade elétrica estão distribuídos na porção oeste da área, enquanto no Aquífero Pirabas Superior os maiores valores estão na porção sudoeste. Nota-se também que o Aquífero Pirabas Inferior apresenta os maiores valores para este parâmetro. Resultado anômalo (979 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 1218 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nas duas campanhas) foi observado no ponto P14 (Posto de combustível – Bairro Pedreira/Belém – Aquífero Barreiras) na porção sudoeste da área (Figura 61). Os valores de sólidos totais dissolvidos seguem o mesmo padrão da distribuição dos valores de condutividade elétrica (Figura 62).

Os isovalores de pH mostram nítidas diferenças entre os aquíferos: o Aquífero Pirabas Inferior possui pH acima de 7, mais alcalino que os demais aquíferos, com exceção da amostra P03 (Poço RIMAS – COSANPA/5° Setor/FEMAC); os aquíferos Pós Barreiras, Barreiras e Pirabas Superior mostram tendência de aumento do pH na direção das bordas sudoeste e oeste (Figura 63).

A distribuição dos valores de alcalinidade (HCO_3) mantém correlação positiva com a distribuição dos valores pH (Figura 64). Nos aquíferos Pós Barreiras e Barreiras, os menores valores estão distribuídos na porção leste da área, no Aquífero Pirabas Superior mostra uma tendência de aumento de valores de alcalinidade em direção à borda sul da área. Observa-se que as amostras com maiores alcalinidades estão no Aquífero Pirabas Inferior.

Os isovalores de sódio (Figura 65) verifica-se que em todos os aquíferos há uma tendência de aumento dos valores na porção oeste e sudoeste da área de estudo. O Aquífero Barreiras mostra um predomínio de amostras com maiores concentrações deste íon na porção sudoeste, com exceção da amostra P14 (Posto de combustível – Bairro Pedreira/Belém – Aquífero Barreiras); a maioria das amostras apresenta também concentrações elevadas de nitrato, relacionadas à contaminação antrópica.

Os isovalores de cálcio mostram que os maiores valores ocorrem no Aquífero Pirabas Inferior (Figura 66); observa-se também que distribuição de cálcio segue a mesma tendência da distribuição da alcalinidade. Pontos anômalos aparecem no Aquífero Pirabas Superior (P147 – COSANPA – Centro/Marituba) sendo possível que este poço explore água do Aquífero Pirabas Inferior.

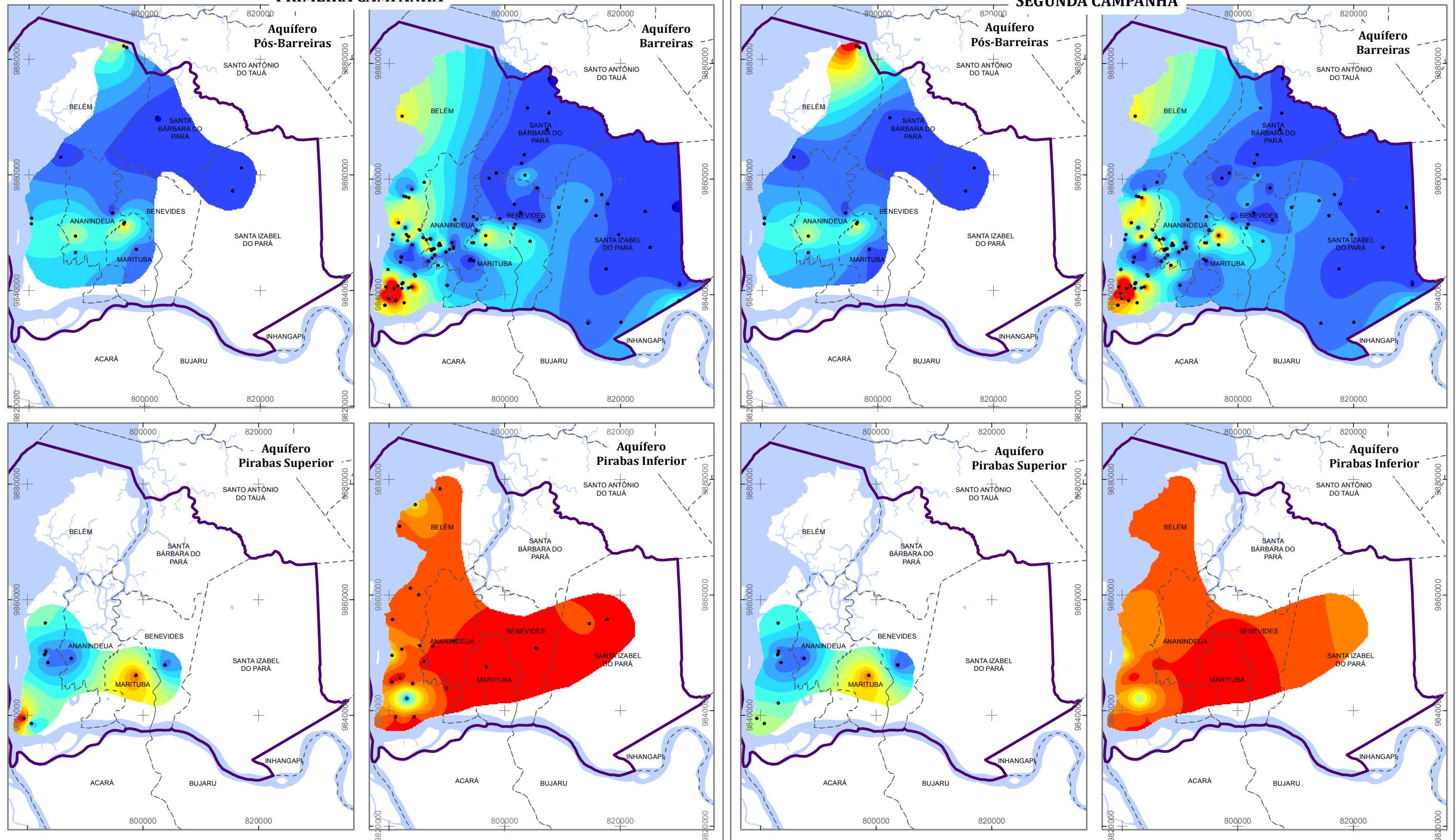
Os menores valores de cloreto são observados nas porções leste e sul, principalmente no Aquífero Pirabas Inferior (Figura 67). Na amostra P14 (Posto de combustível – Bairro Pedreira/Belém – Aquífero Barreiras) foi anotado o maior valor, ultrapassando o valor máximo permitido pela Portaria 2914/11 do Ministério da Saúde (250 mg/L de Cl). A maioria das amostras que apresenta concentrações mais elevadas de cloreto está provavelmente relacionada à contaminação antrópica, sendo que também apresentam elevadas concentrações de nitrato. No geral, a tendência de distribuição do cloreto segue padrão semelhante nas duas campanhas de coleta.

Os menores valores do íon nitrato são do Aquífero Pirabas Inferior, geralmente menores que 1 mg/L, com exceção da amostra P03 (Poço RIMAS – COSANPA/5° Setor/FEMAC – Aquífero Pirabas Inferior). Nos aquíferos Pós Barreiras e Barreiras, teores relativamente maiores ocorrem na porção sudoeste, com tendência mantida nas duas campanhas de amostragem (Figura 68), com exceção do Aquífero Pós Barreiras, que na segunda campanha mostrou um aumento em direção ao limite noroeste devido ao aumento da concentração de NO_3 na amostra P70 (Poço particular – Bairro Marco /Belém – Aquífero Pós Barreiras).

As concentrações maiores de sulfato aparecem na porção sudoeste e oeste, principalmente dos aquíferos Pós Barreiras e Barreiras, enquanto que os menores valores são do Aquífero Barreiras e geralmente localizados na porção leste (Figura 69). Algumas amostras com concentrações mais elevadas deste íon apresentam também maiores concentrações de sódio, nitrato e cloreto, possivelmente ligados à contaminação antrópica.

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

- Pontos Amostrados
- ▭ Área de Estudo
- - - Limite municipal
- Massa d'água
- Condutividade Elétrica (microS/cm)**
- < 25
- 25.1 - 50
- 50.1 - 75
- 75.1 - 100
- 100.1 - 125
- 125.1 - 150
- 150.1 - 175
- 175.1 - 200
- 200.1 - 225
- 225.1 - 250
- 250.1 - 275
- 275.1 - 300
- 300.1 - 325
- 325.1 - 350
- > 350

Figura 61 – Mapas de isovalores de condutividade elétrica das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



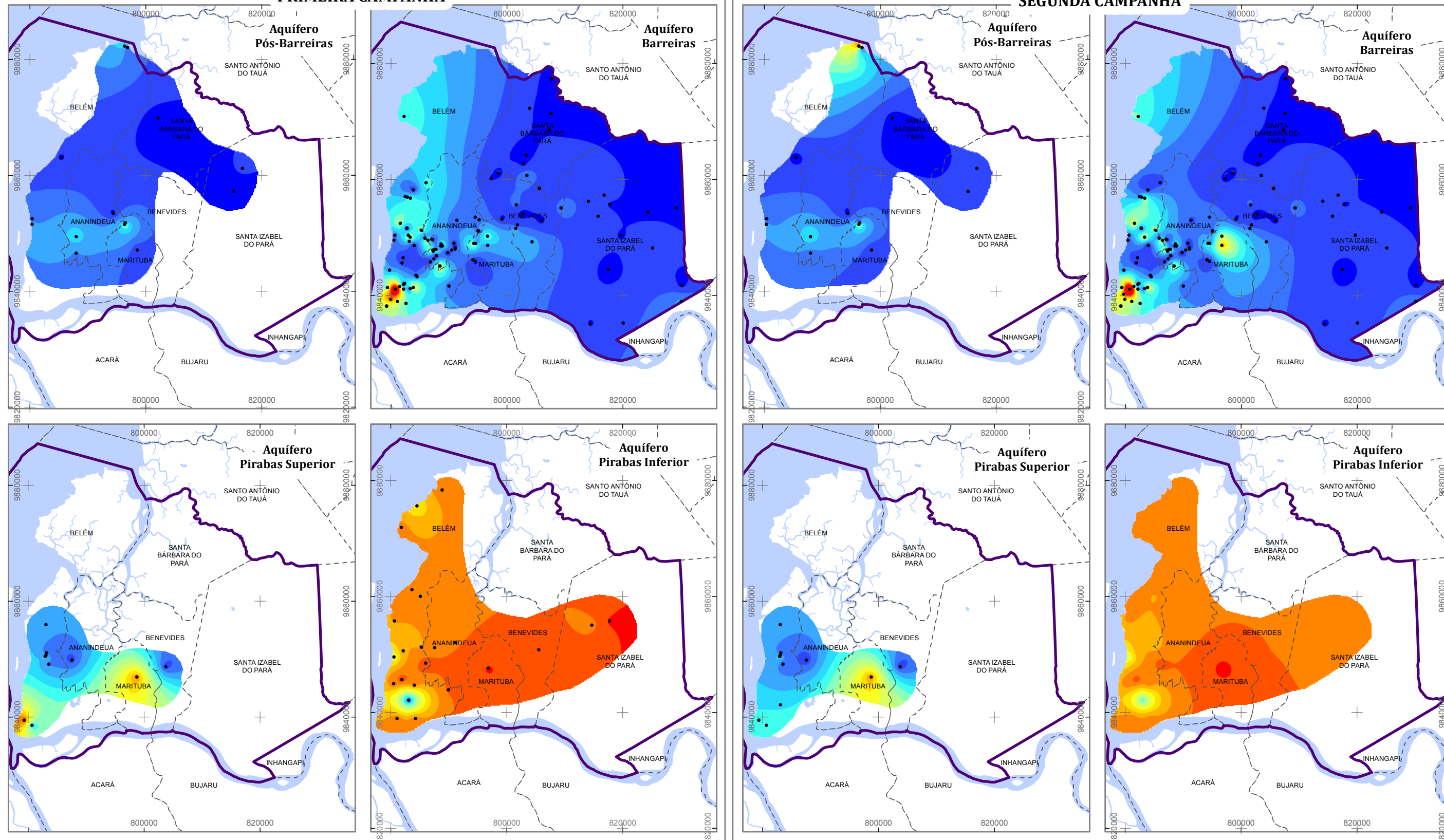
ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de CE: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_61_Condutividade_Eletrica_A3
Escala:	1:670.000

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

- Pontos Amostrados
- ▭ Área de Estudo
- ▭ Limite municipal
- ▭ Massa d'água
- Sólidos Totais Dissolvidos**
- STD (mg/L)**
- < 25
- 25.1 - 50
- 50.1 - 75
- 75.1 - 100
- 100.1 - 125
- 125.1 - 150
- 150.1 - 175
- 175.1 - 200
- 200.1 - 225
- 225.1 - 250
- 250.1 - 275
- 275.1 - 300
- 300.1 - 325
- 325.1 - 350
- > 350

Figura 62 – Mapas de isovalores de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



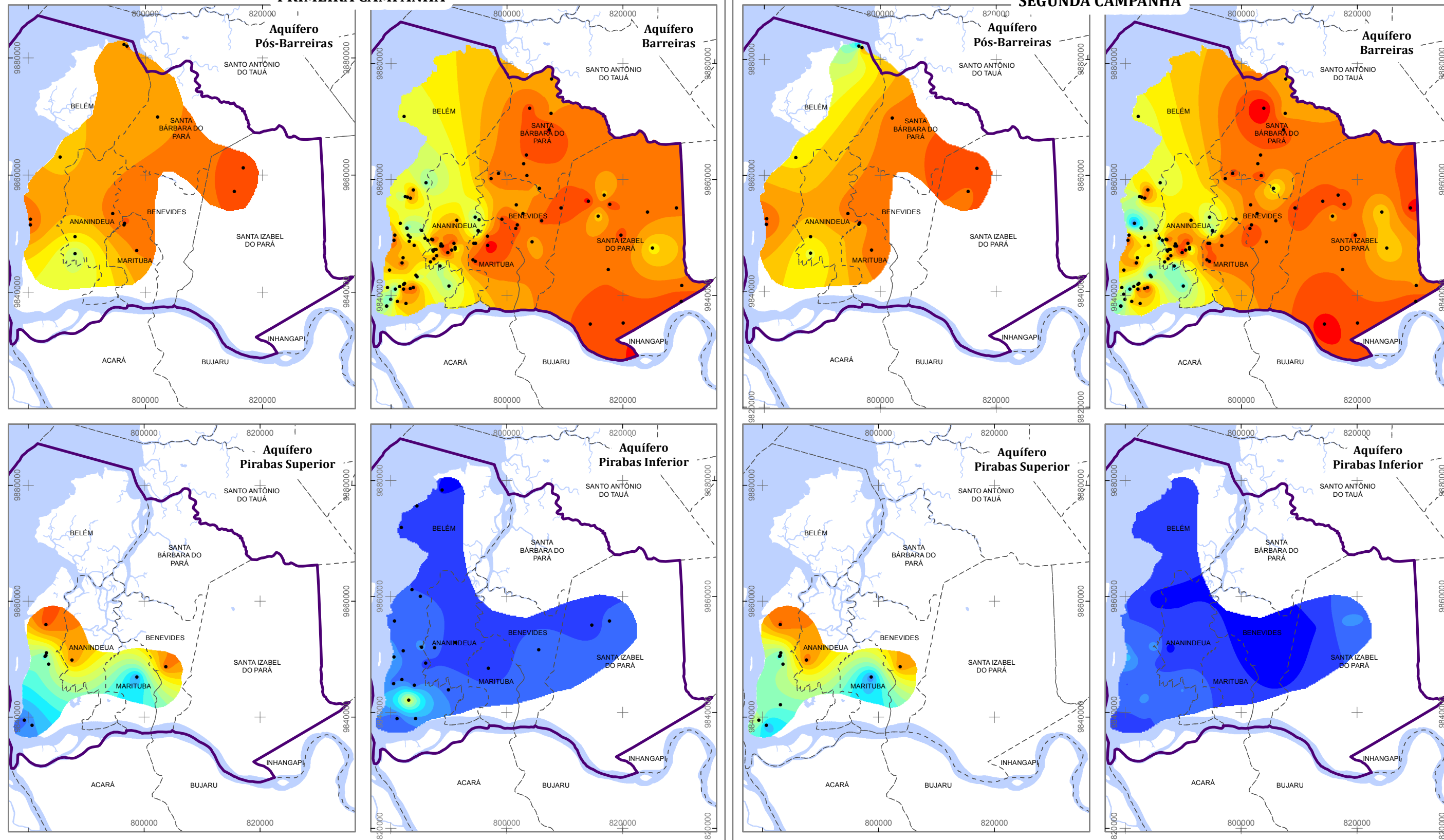
ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de STD: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_62_STD_A3
Escala:	1:670.000

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

- Pontos Amostrados
- ▭ Área de Estudo
- ▭ Limite municipal
- ▭ Massa d'água
- pH**
- ▭ < 4.25
- ▭ 4.25 - 4.5
- ▭ 4.51 - 4.75
- ▭ 4.76 - 5
- ▭ 5.01 - 5.25
- ▭ 5.26 - 5.5
- ▭ 5.51 - 5.75
- ▭ 5.76 - 6
- ▭ 6.01 - 6.25
- ▭ 6.26 - 6.5
- ▭ 6.51 - 6.75
- ▭ 6.76 - 7
- ▭ 7.01 - 7.25
- ▭ 7.26 - 7.5
- ▭ 7.51 - 7.75
- ▭ 7.76 - 8
- ▭ > 8

Figura 63 – Mapas de isovalores de pH das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



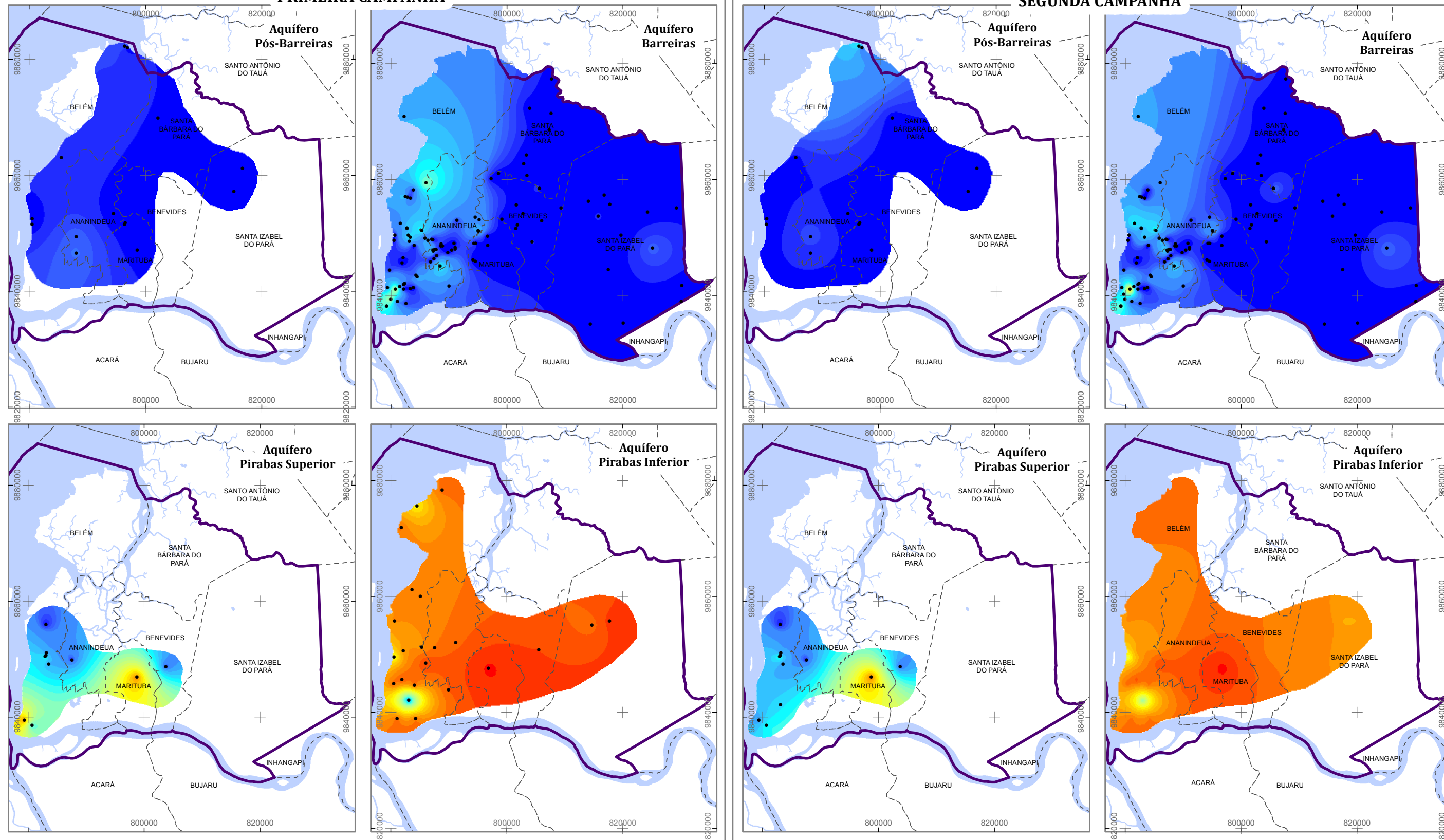
ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de pH: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_63_pH_A3
Escala:	1:670.000

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

• Pontos Amostrados	2.1 - 4	40.1 - 50	110.1 - 120	180.1 - 190
▭ Área de Estudo	4.1 - 6	50.1 - 60	120.1 - 130	190.1 - 200
▭ Limite municipal	6.1 - 8	60.1 - 70	130.1 - 140	200.1 - 210
▭ Massa d'água	8.1 - 10	70.1 - 80	140.1 - 150	210.1 - 220
Alcalinidade (HCO₃)	10.1 - 20	80.1 - 90	150.1 - 160	220.1 - 230
(mg/L)	20.1 - 30	90.1 - 100	160.1 - 170	230.1 - 240
▭ < 2	30.1 - 40	100.1 - 110	170.1 - 180	< 240

Figura 64 – Mapas de isovalores de alcalinidade (HCO₃) das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



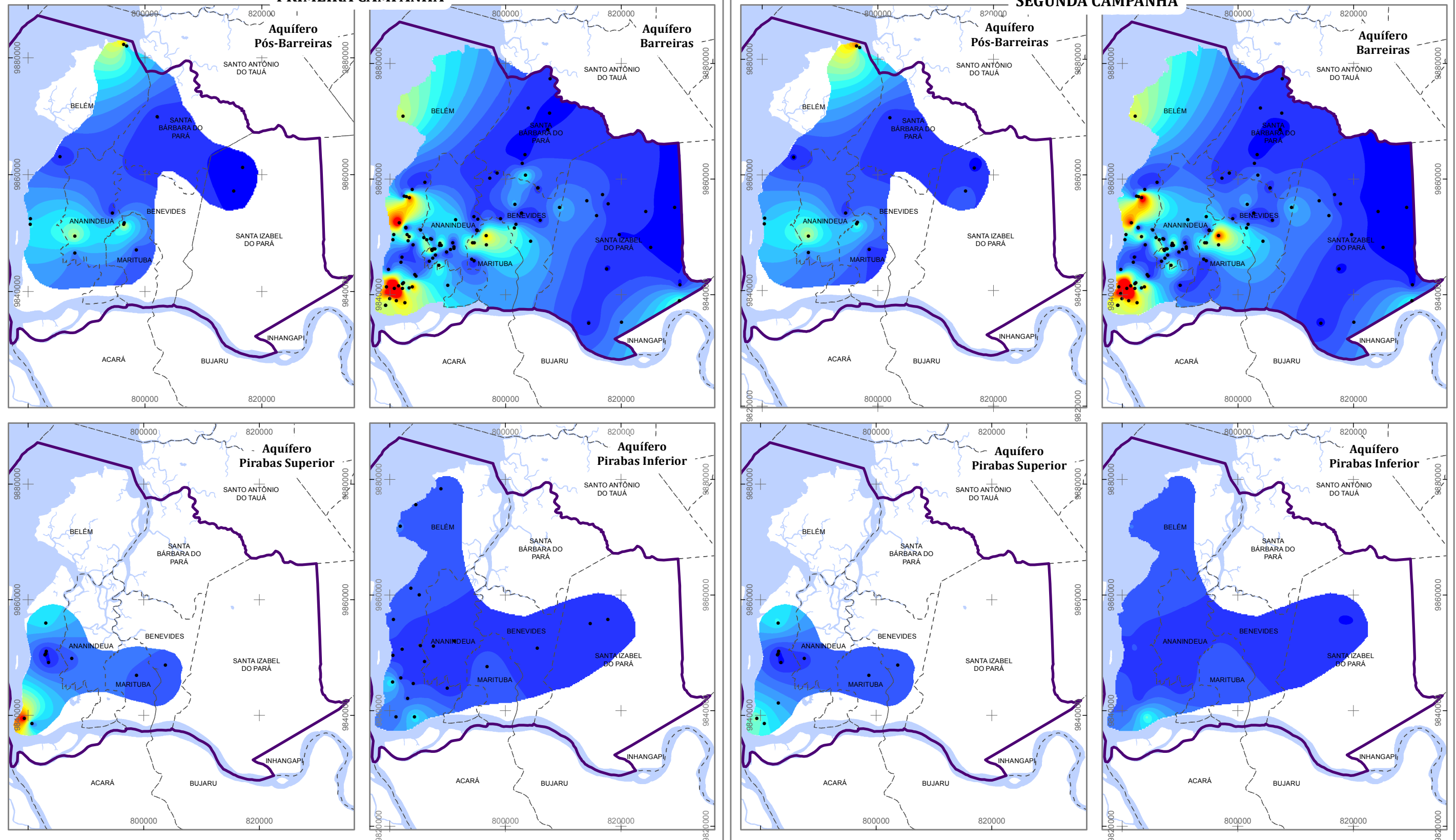
ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de Alcalinidade (HCO₃): ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_64_Alcalinidade_A3
Escala:	1:670.000

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

• Pontos Amostrados	2.1 - 4	16.1 - 18	30.1 - 32
▭ Área de Estudo	4.1 - 6	18.1 - 20	32.1 - 34
▭ Limite municipal	6.1 - 8	20.1 - 22	34.1 - 36
▭ Massa d'água	8.1 - 10	22.1 - 24	36.1 - 38
Sódio (Na)	10.1 - 12	24.1 - 26	38.1 - 40
(mg/L)	12.1 - 14	26.1 - 28	>40
▭ < 2	14.1 - 16	28.1 - 30	

Figura 65 – Mapas de isovalores de Sódio (Na) das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



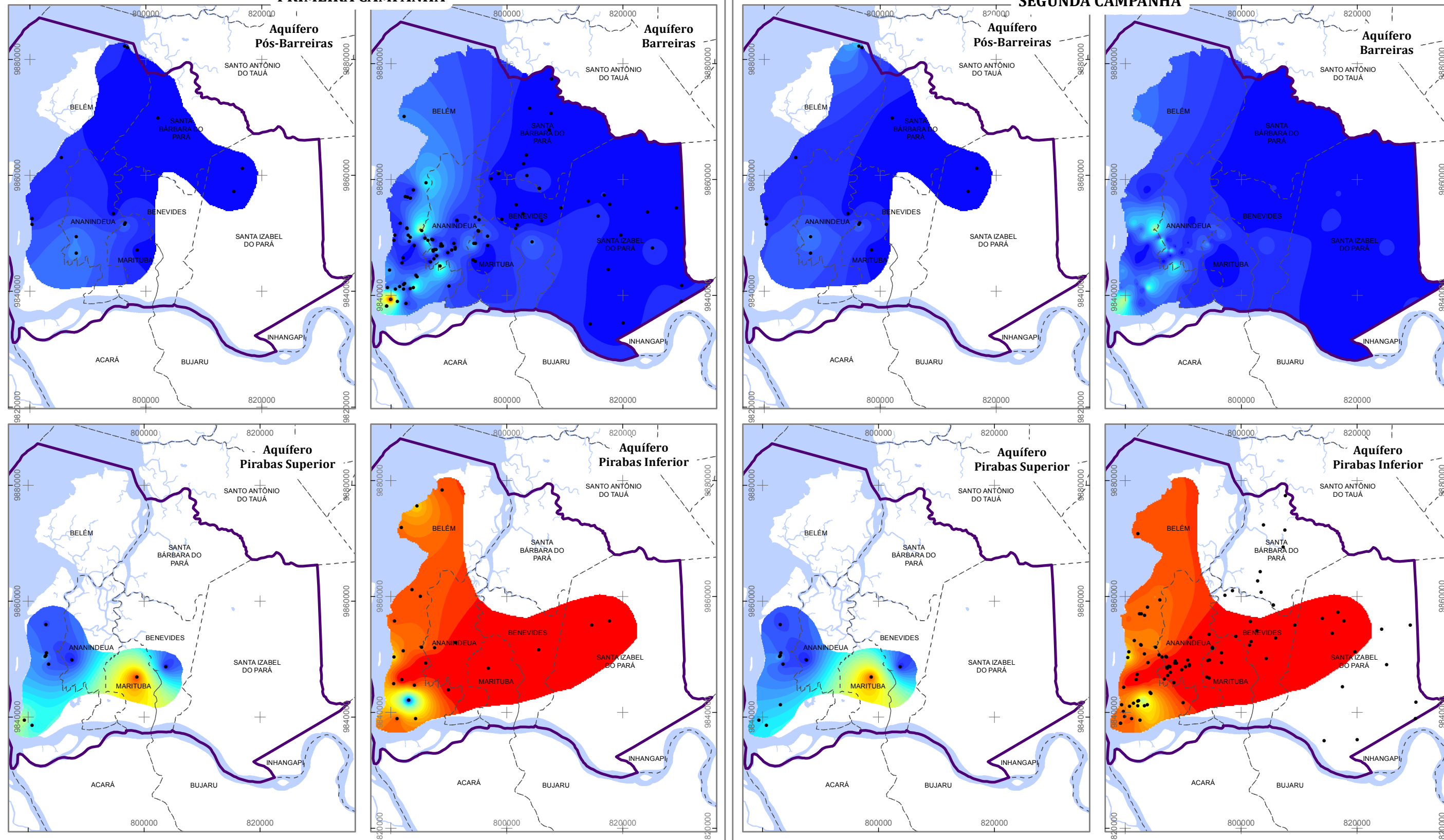
ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de Sódio (Na): ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_65_Sodio_A3
Escala:	1:662.921

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

• Pontos Amostrados	2.01 - 4	16.01 - 18	30.01 - 32	44.01 - 46
▭ Área de Estudo	4.01 - 6	18.01 - 20	32.01 - 34	46.01 - 48
▭ Limite municipal	6.01 - 8	20.01 - 22	34.01 - 36	48.01 - 50
▭ Massa d'água	8.01 - 10	22.01 - 24	36.01 - 38	50.01 - 52
Cálcio (Ca)	10.01 - 12	24.01 - 26	38.01 - 40	52.01 - 54
(mg/L)	12.01 - 14	26.01 - 28	40.01 - 42	54.01 - 56
▭ < 2	14.01 - 16	28.01 - 30	42.01 - 44	56.01 - 58
				▭ > 58

Figura 66 – Mapas de isovalores de cálcio (Ca) das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



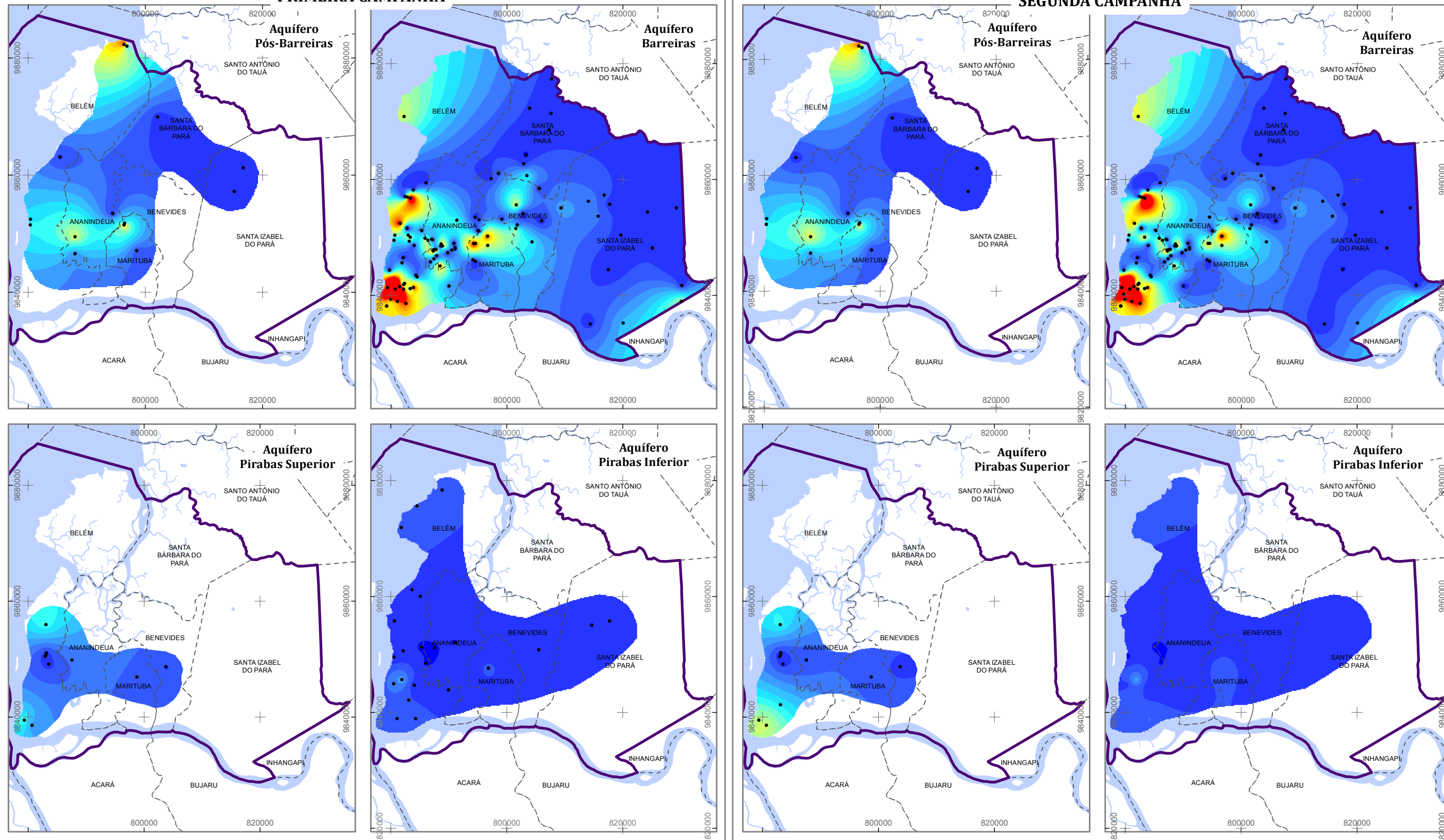
ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de Cálcio (Ca): ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_66_Calcio_A3
Escala:	1:670.000

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

• Pontos Amostrados	2.1 - 4	16.1 - 18	30.1 - 32
▭ Área de Estudo	4.1 - 6	18.1 - 20	32.1 - 34
▭ Limite municipal	6.1 - 8	20.1 - 22	34.1 - 36
▭ Massa d'água	8.1 - 10	22.1 - 24	36.1 - 38
Cloreto (Cl)	10.1 - 12	24.1 - 26	38.1 - 40
(mg/L)	12.1 - 14	26.1 - 28	> 40
▭ < 2	14.1 - 16	28.1 - 30	

Figura 67 – Mapas de isovalores de cloreto (Cl) das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



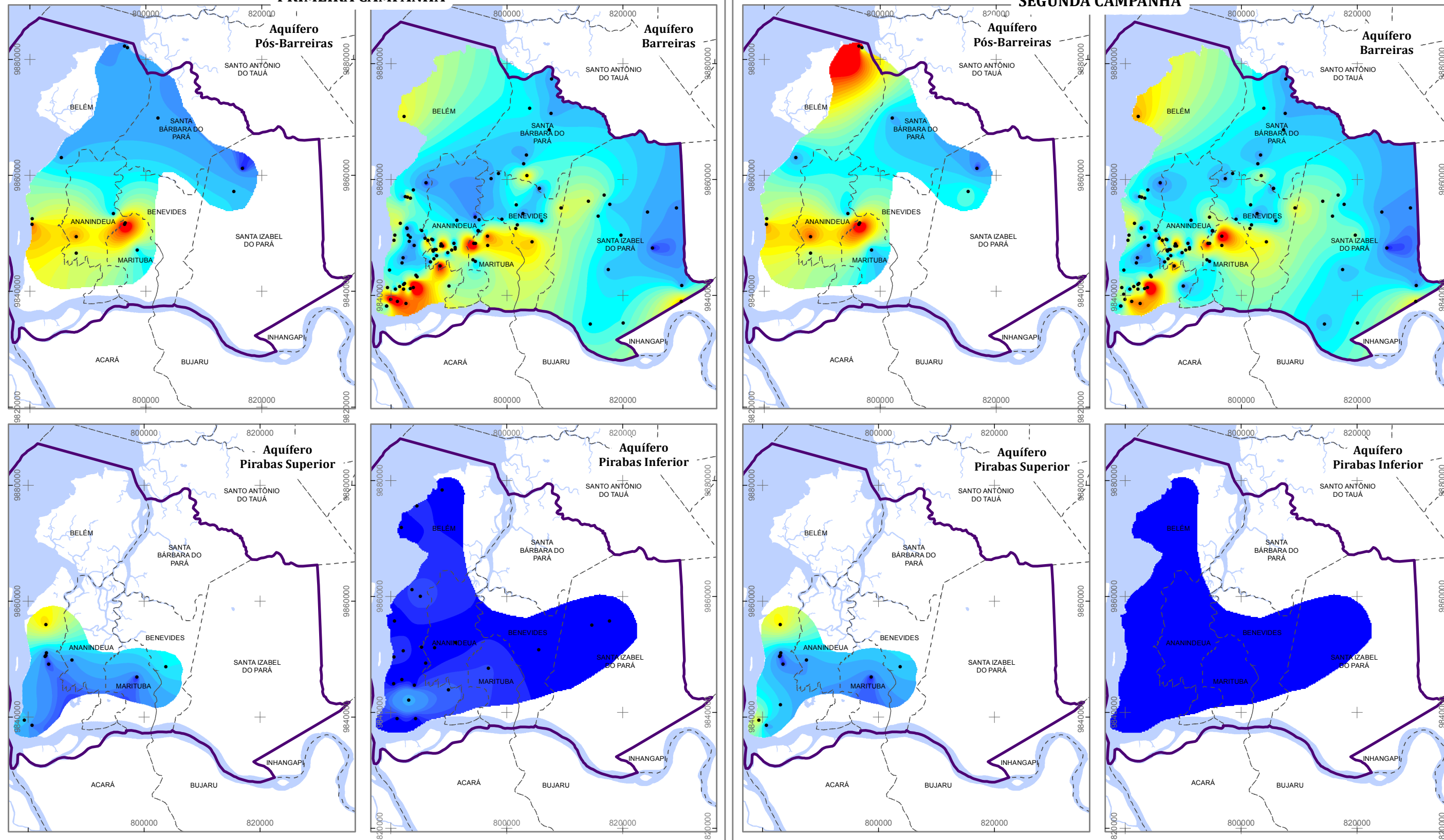
ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de Cloreto (Cl): ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_67_Cloreto_A3
Escala:	1:670.000

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

• Pontos Amostrados	0.3 - 0.4	6.1 - 8	20.1 - 22	34.1 - 36
▭ Área de Estudo	0.5 - 0.6	8.1 - 10	22.1 - 24	36.1 - 38
▭ Limite municipal	0.7 - 0.8	10.1 - 12	24.1 - 26	38.1 - 40
▭ Massa d'água	0.9 - 1	12.1 - 14	26.1 - 28	40.1 - 42
Nitrato (NO3)	1.1 - 2	14.1 - 16	28.1 - 30	42.1 - 44
(mg/L)	2.1 - 4	16.1 - 18	30.1 - 32	> 44
▭ < 0.2	4.1 - 6	18.1 - 20	32.1 - 34	

Figura 68 – Mapas de isovalores de nitrato (NO3) das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



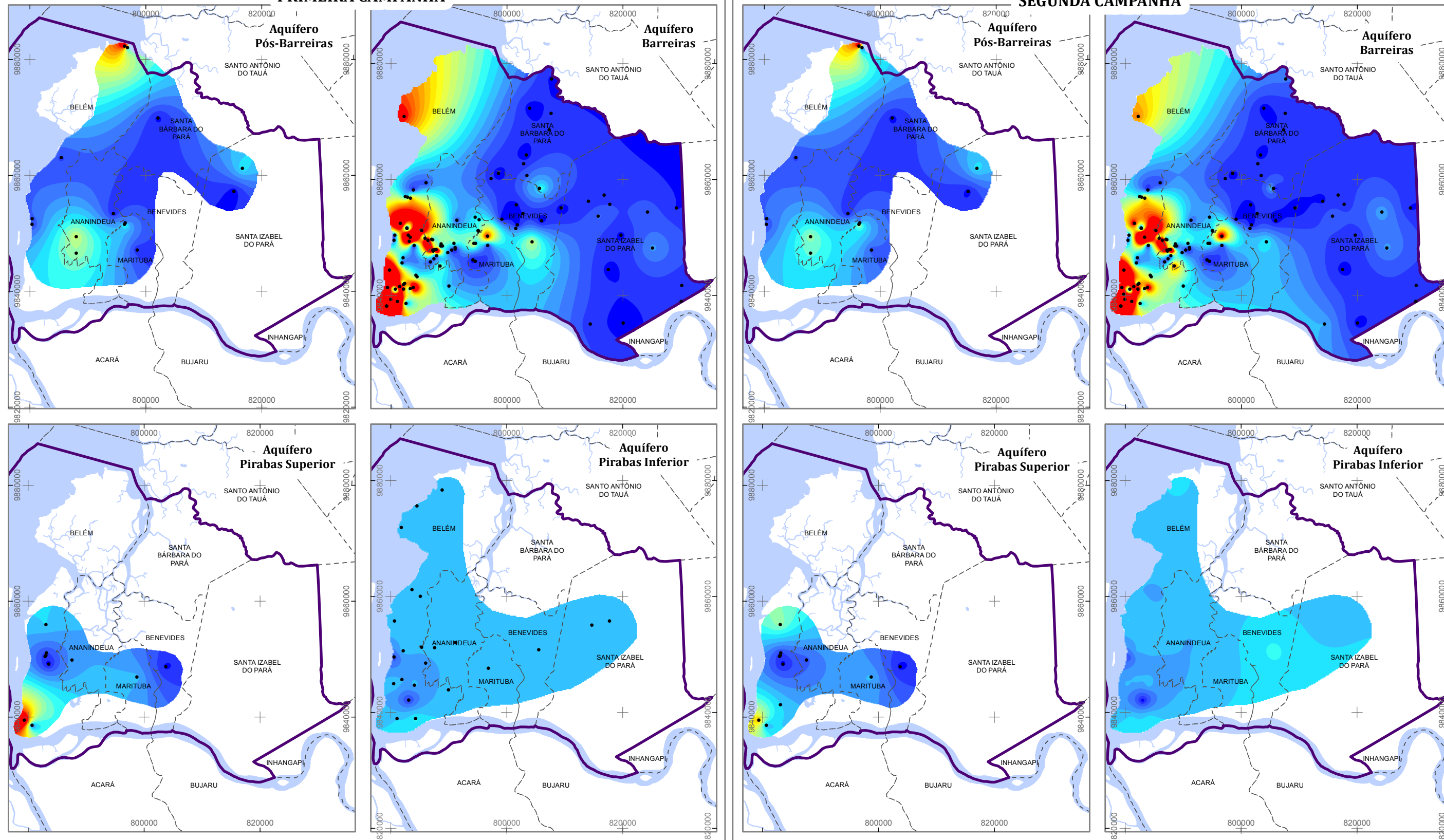
ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de Nitrato (NO3): ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_68_Nitrato_A3
Escala:	1:670.000

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

• Pontos Amostrados	1.01 - 2	8.01 - 9	15.01 - 16
▭ Área de Estudo	2.01 - 3	9.01 - 10	16.01 - 17
▭ Limite municipal	3.01 - 4	10.01 - 11	17.01 - 18
▭ Massa d'água	4.01 - 5	11.01 - 12	18.01 - 19
Sulfato (SO₄)	5.01 - 6	12.01 - 13	19.01 - 20
(mg/L)	6.01 - 7	13.01 - 14	> 20
▭ < 1	7.01 - 8	14.01 - 15	

Figura 69 – Mapas de isovalores de sulfato (SO₄) das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de Sulfato (SO₄): ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_69_Sulfato_A3
Escala:	1:670.000

8.3 MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DE FERRO E MANGANÊS

Os mapas de distribuição de ferro (Figura 70) mostram que no Aquífero Pós Barreiras há mudança na tendência de distribuição deste metal/íon nas duas campanhas de amostragem, devido principalmente à diminuição da concentração deste íon na amostra P68 (Poço particular – Baía do Sol /Belém – Aquífero Pós Barreiras) na segunda campanha (4,56 mg/L para 0,05 mg/L).

No Aquífero Barreiras os maiores valores estão na borda oeste da área e permanece a mesma tendência de distribuição nas duas campanhas. O Aquífero Pirabas Superior mostra uma maior concentração de ferro na borda oeste da área, sendo no poço P12 (Compar – Parque Verde /Belém – Aquífero Pirabas Superior) anotado a maior concentração deste íon. No aquífero Pirabas Inferior segue a mesma tendência nas duas campanhas de amostragem, com exceção da amostra P03 (Poço RIMAS – COSANPA/5º Setor/FEMAC – Aquífero Pirabas Inferior), que tem sua concentração de ferro diminuída na segunda campanha (3,54 mg/L para 0,85 mg/L).

No Aquífero Pós Barreiras os valores predominam abaixo de 0,01 mg/L, e seguem a mesma distribuição nas duas campanhas. No Aquífero Barreiras, os menores valores estão geralmente localizados na porção leste e central da área, seguindo a mesma tendência de distribuição nas duas campanhas, com exceção das amostras P73 (Indústria – Águas Lindas/Ananindeua – Aquífero Barreiras) e P85 (Transporte de madeiras – Distrito Industrial/Ananindeua – Aquífero Barreiras) que tiveram suas concentrações alteradas entre as duas campanhas.

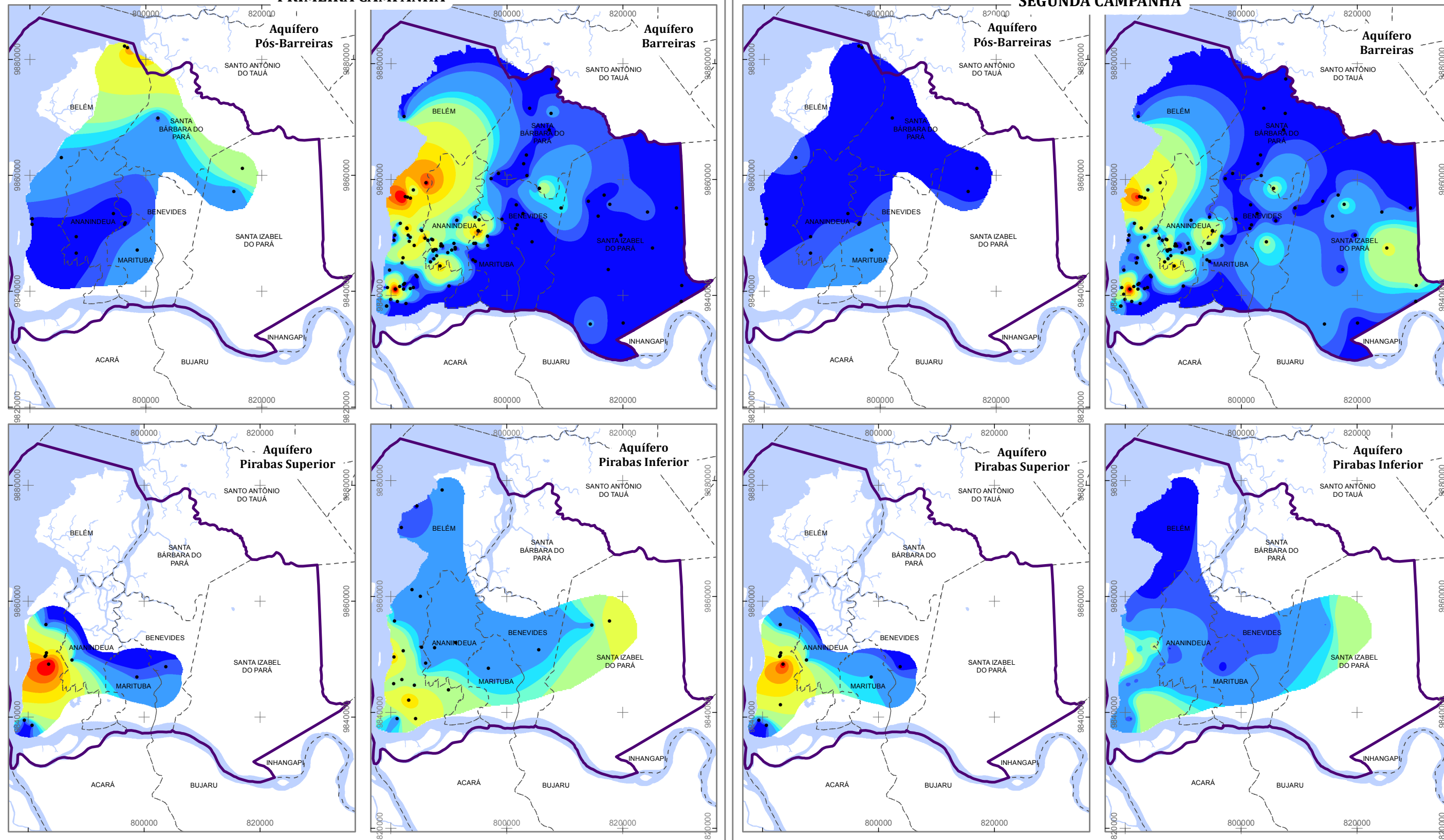
Algumas amostras do Aquífero Pirabas Superior mostram mudanças nos valores de manganês, porém a tendência de distribuição segue a mesma nas duas campanhas, sendo que os maiores valores estão situados na porção sudoeste da área. No Aquífero Pirabas Inferior estão as amostras com os maiores valores deste metal (Figura 71).

Segundo Picanço *et al.* (2002), as unidades do Grupo Barreiras e Pós Barreiras, são as mais propícias para elevar a concentração de ferro nas águas, pois possuem condições adequadas (meio redutor e/ou ácido) e alguns minerais que podem liberar ferro em solução.

As concentrações elevadas de ferro no Aquífero Pirabas podem, possivelmente, ser explicadas pela presença de minerais como a nontronita (esmectica rica em ferro), a pirita (sulfeto de ferro) (PICANÇO *et al.* 2002); a marcassita, a magnetita (BARROS *et al.* 2005) e a ankerita (BARROS *et al.* 2003), porém estudos mais detalhados da mineralogia desta Formação, seriam necessários para identificar as possíveis fontes deste íon.

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

- Pontos Amostrados
 - ▭ Área de Estudo
 - - - Limite municipal
 - Massa d'água
- Ferro (Fe - mg/L)**
- Limite Port. 2914/11 - 0,3 mg/L**
- | | |
|--------------|--------------|
| ■ < 0.05 | ■ 0.31 - 0.4 |
| ■ 0.06 - 0.1 | ■ 0.41 - 0.5 |
| ■ 0.11 - 0.3 | ■ 0.51 - 1 |
| | ■ 1.01 - 2 |
| | ■ 2.01 - 3 |
| | ■ 3.01 - 4 |
| | ■ 4.01 - 5 |
| | ■ > 5 |

Figura 70 – Mapas de isovalores de ferro (Fe) das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



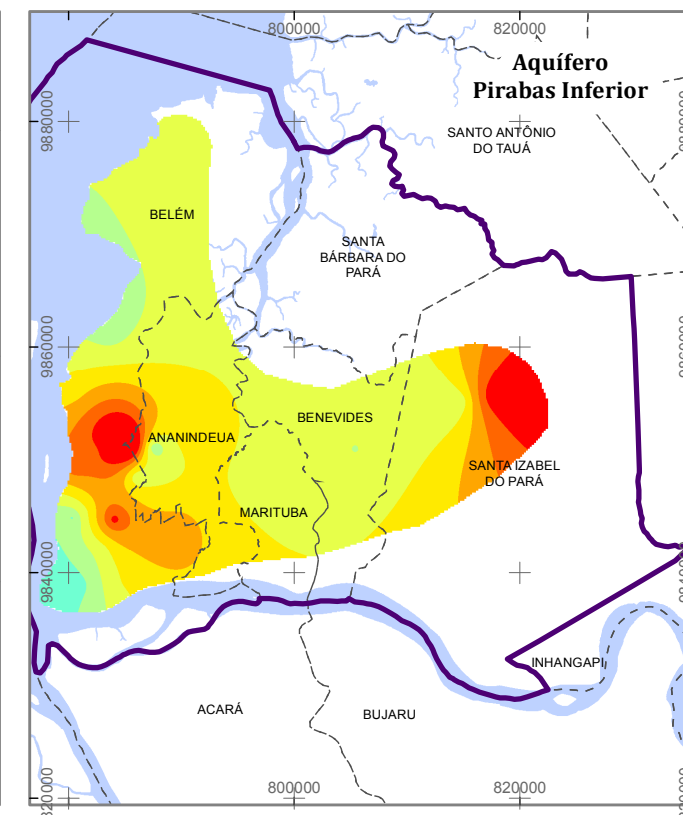
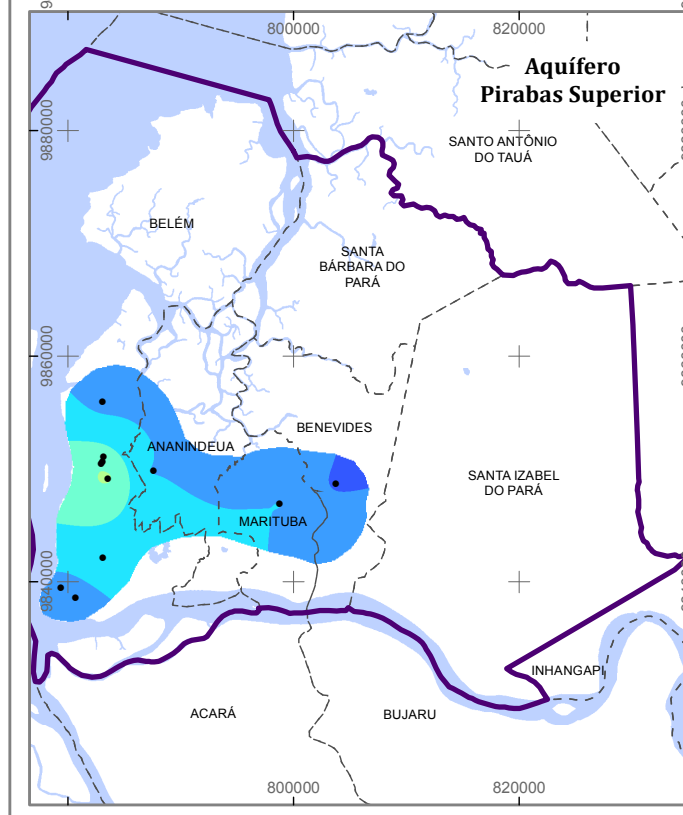
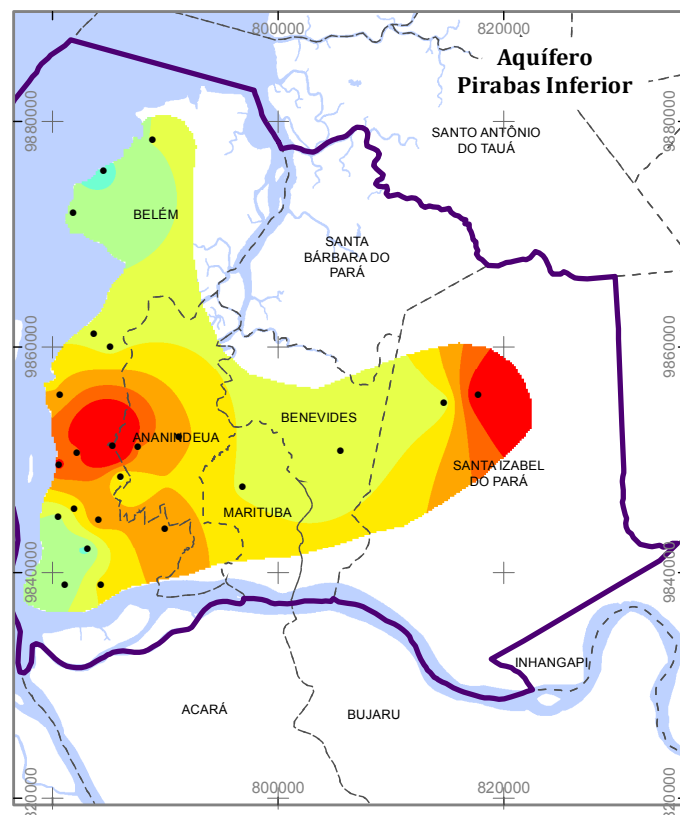
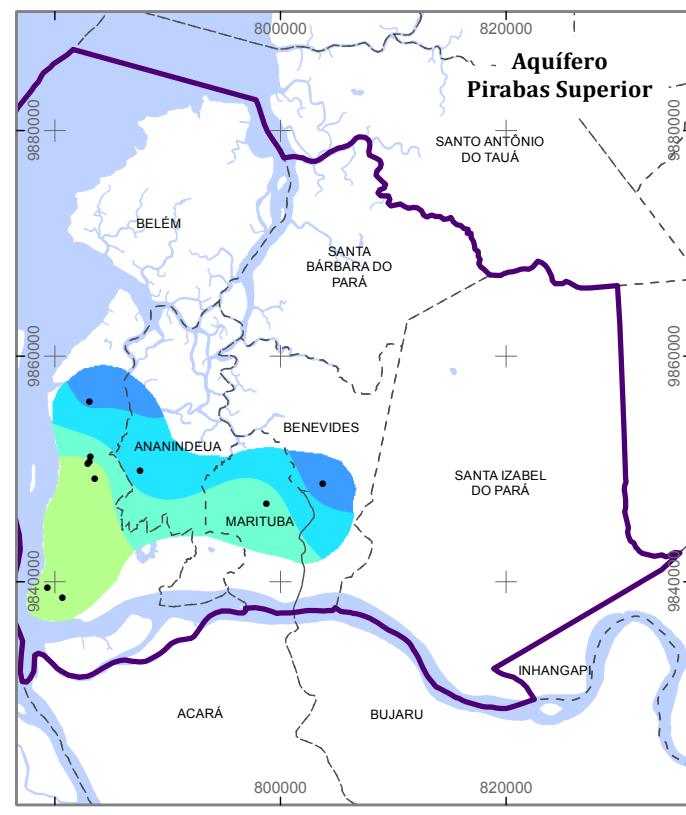
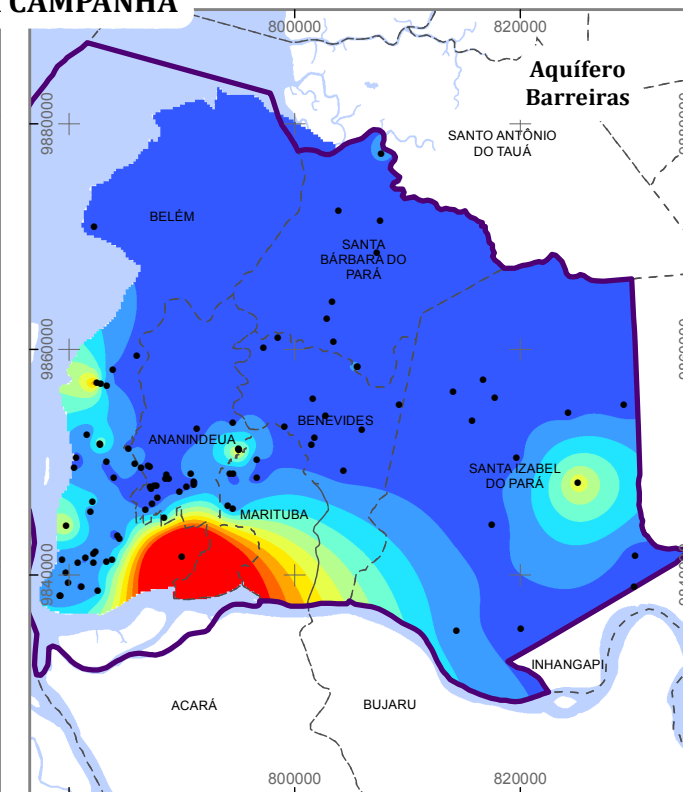
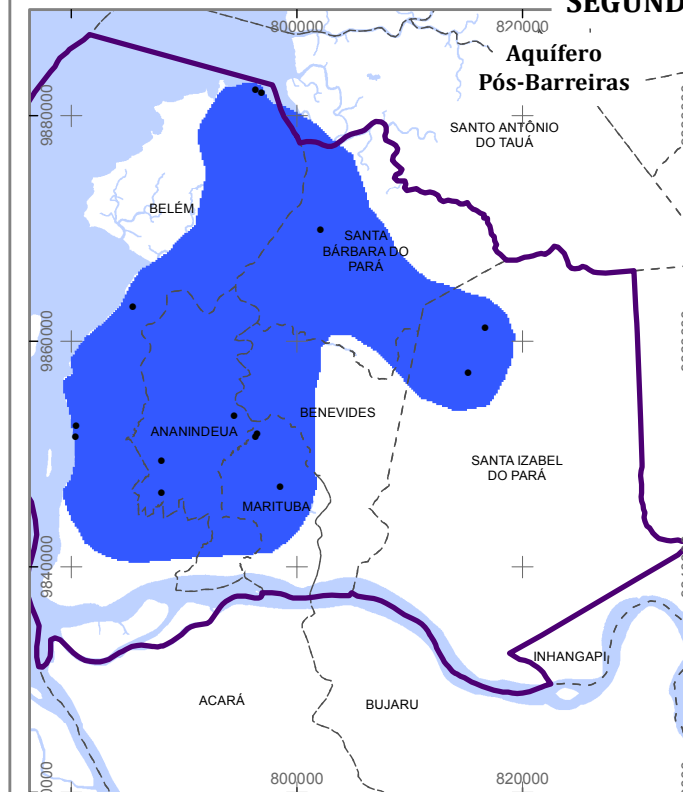
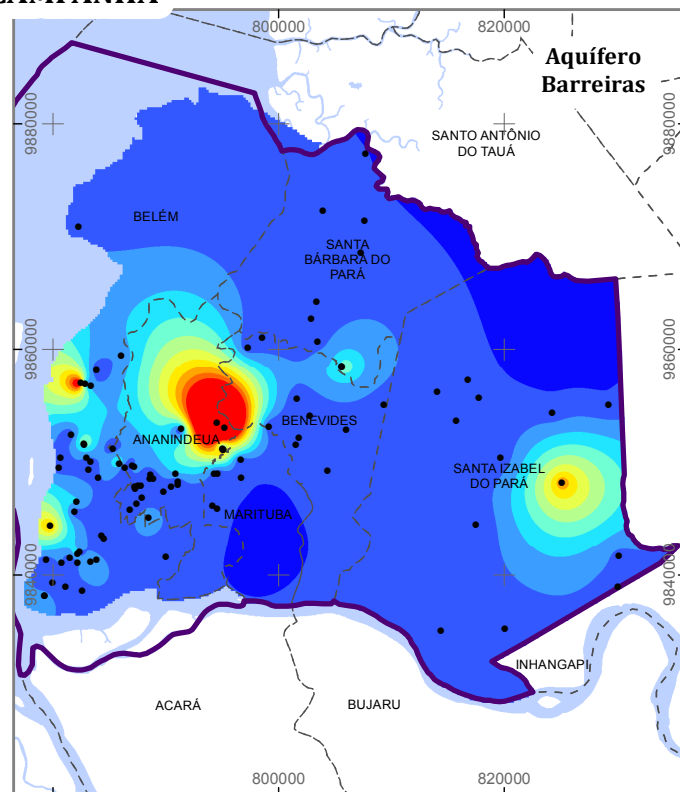
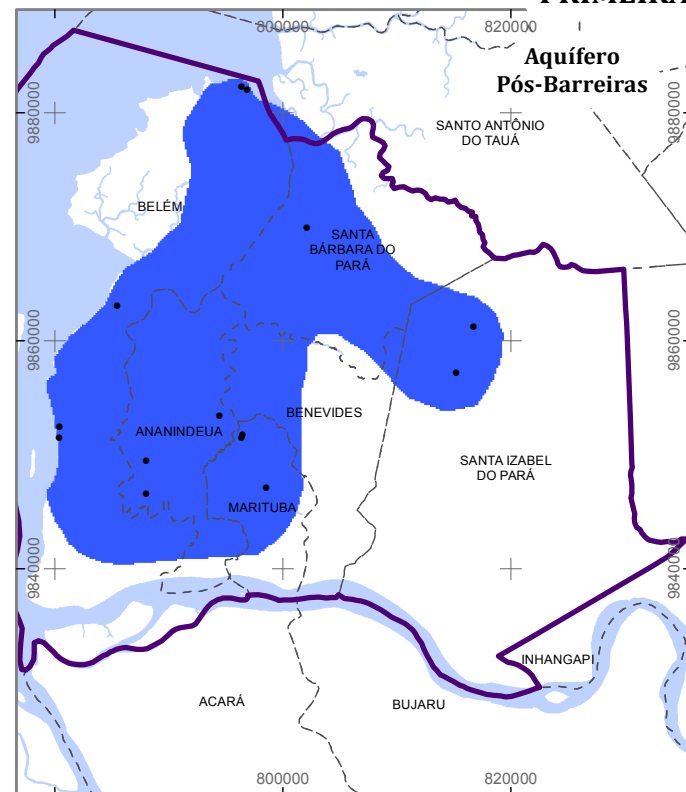
ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de Ferro (Fe): ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_70_Ferro_A3
Escala:	1:670.000

PRIMEIRA CAMPANHA

SEGUNDA CAMPANHA



LEGENDA

- Pontos Amostrados
- ▭ Área de Estudo
- - - Limite municipal
- Massa d'água
- Manganês (Mn - mg/L)**
- Limite Port. 2914/11 - 0,1 mg/L**
- 0 - 0.01
- 0.002 - 0.025
- 0.026 - 0.05
- 0.051 - 0.075
- 0.076 - 0.1
- 0.101 - 0.125
- 0.126 - 0.15
- 0.151 - 0.175
- 0.176 - 0.2
- 0.201 - 0.225
- > 0.225

Figura 71 – Mapas de isovalores de manganês (Mn) das águas subterrâneas da região de Belém – 1ª e 2ª campanhas de amostragens



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Isovalores de Manganês (Mn): ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_71_Manganes_A3
Escala:	1:670.000

8.4 PARÂMETROS ESPECÍFICOS

Na segunda campanha de amostragem de água subterrânea foram selecionados pontos de coletas de amostras para análises de alguns parâmetros específicos: metais pesados, índices de fenóis, BTEX e conteúdo bacteriológico.

8.4.1 Metais Pesados

Com relação aos metais pesados – bário, níquel, zinco, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio e arsênio –, a maioria das amostras selecionadas está abaixo dos respectivos valores máximos permitidos pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, apenas uma amostra (P14 – Posto de combustível – Bairro Pedreira/Belém – Aquífero Barreiras) apresenta valor (74,3 µg/L de As) acima do limite estabelecido como padrão de potabilidade.

8.4.2 Índices de Fenóis

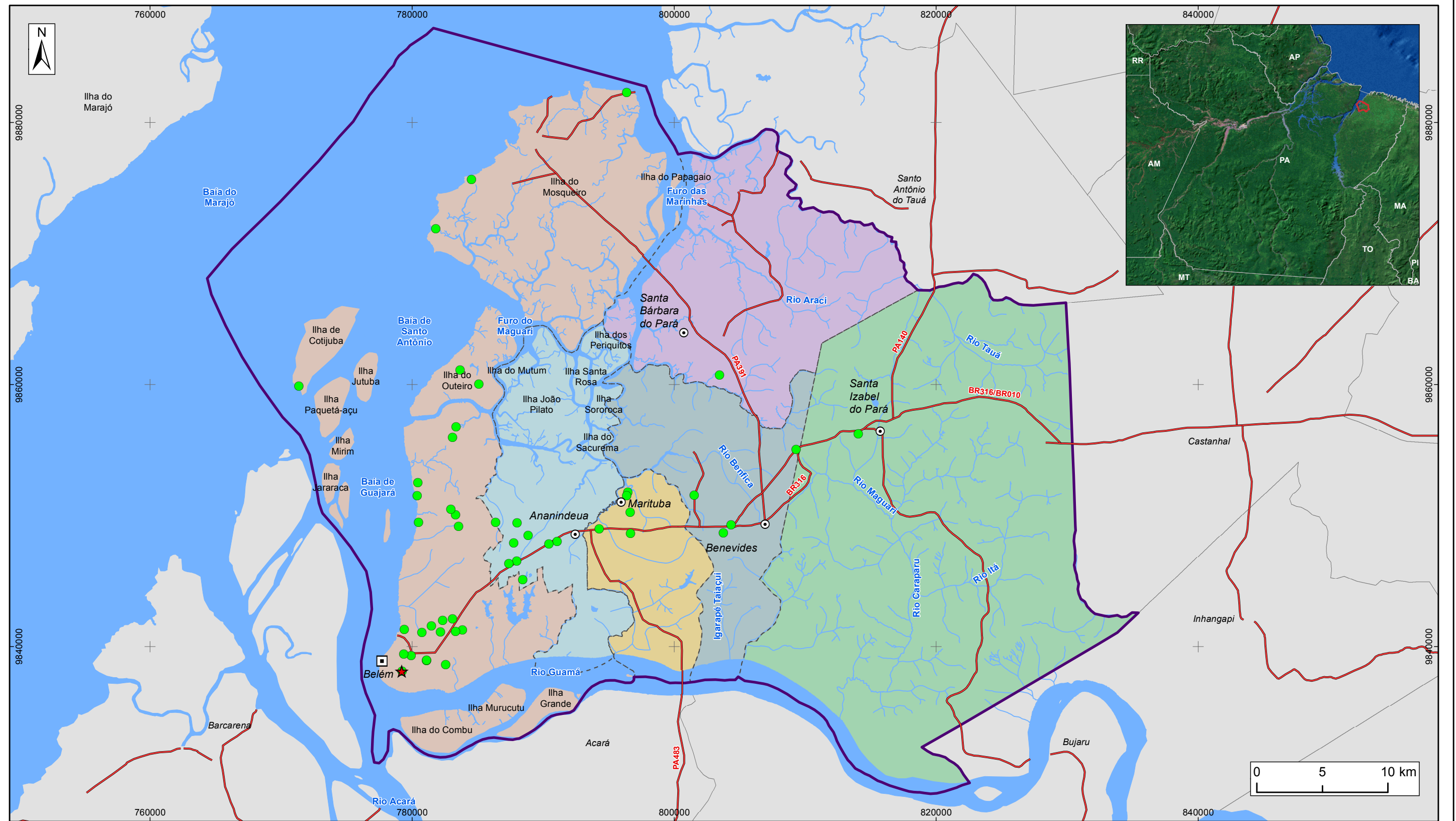
Quanto aos fenóis, variam de < 0,001 mg/L (1 µg/L) a 1,4 mg/L (1400 µg/L), a maioria abaixo do LQP aceitável para aplicação da resolução Conama 396/2008. No entanto, quatro amostras apresentam concentrações acima de 1 µg/L, necessitando de tratamento convencional prévio para consumo humano, conforme prevê a resolução Conama 20/1998, que estabelece que valores de fenóis acima de 1 µg/L necessitam de tratamento; já o limite máximo de conteúdo em fenóis para tratamento, segundo a mesma resolução, é de 30 µg/L. A amostra Rimas 5 (Poço RIMAS – SAAEB/ICO/SOUZA FRANCO/CPRM– Aquífero Pirabas Inferior) apresentou valor de 1,4 mg/L para índices de fenóis ultrapassando os valores máximos permitidos pelas legislações.

8.4.3 BTEX

A Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde, bem como a Resolução 396/2008 estabelecem valores máximos de 0,005 mg/L de benzeno, 0,17 mg/L de tolueno, 0,2 mg/L de etilbenzeno, e 0,3 mg/L de o-xileno, m,p-xileno e xileno em água para consumo humano. Todas as amostras analisadas apresentam valores inferiores aos máximos permitidos nas citadas Portaria e Resolução, sendo que todas as análises têm resultados abaixo do limite da técnica empregada para detecção desses compostos orgânicos.

8.4.4 Conteúdo Bacteriológico

Na água para consumo humano, o conteúdo bacteriológico deve estar ausente em 100 ml de amostra (Portaria 2914/2011 e a Resolução 396/2008). Dentre as amostras analisadas, apenas uma amostra (P134 – Faculdade – Bairro Batista Campos/Belém – Aquífero Barreiras) apresentou resultados positivos para análises de coliformes termotolerantes e totais, como também para *Escherichia Coli* (Figura 72).



LEGENDA

- ☐ Capital Estadual
- ⊙ Sede Municipal
- Rodovia
- ~ Hidrografia
- ☪ Massa d'água
- ⊕ Área de Estudo
- ⋯ Limite municipal
- Conteúdo bacteriológico**
- Colif. e E.Coli (100 ml de amostra)**
- Ausente
- ★ Presente

Figura 72 - Mapa de localização dos pontos de coleta de água para análise de conteúdo bacteriológico na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Pontos de monitoramento: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_72_Resultados_Coliformes_A3
Escala:	1:290.000

8.5 ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE OXIGÊNIO E HIDROGÊNIO (DEUTÉRIO)

Na segunda campanha de amostragem foram selecionados 33 poços para coleta amostras de águas subterrâneas no Município de Belém e adjacentes para análise dos isótopos ^{18}O e deutério. Em campo, foram seguidos todos os padrões recomendados para amostragem; em seguida, essas amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Hidrogeologia e Hidrogeoquímica do Departamento de Geologia Aplicada da UNESP, em Rio Claro, SP, para análises isotópicas.

O hidrogênio e o oxigênio da água ocorrem com diferentes combinações isotópicas em suas moléculas. Mais comum e de maior interesse para hidroquímica são as moléculas $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ (comum), $^1\text{HD}^{16}\text{O}$ (raro) e $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ (raro), que podem ser divididas entre moléculas leves ($^1\text{H}_2^{16}\text{O}$) e moléculas pesadas ($^1\text{HD}^{16}\text{O}$ e $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$).

Observou-se que as razões isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ variaram no intervalo de -5.42‰ a -1.48‰, enquanto que os resultados para δD oscilaram de -29.6‰ a -5.4‰. A maioria das amostras tem composição isotópica próxima à da linha meteórica global (LMG), confirmando sua origem meteórica. Nota-se que a média da composição isotópica de águas de chuva (GNIP – 1965/1990) encontra-se próximo à das amostras do Aquífero Barreiras (Figura 73).

As amostras do Aquífero Barreiras são em geral mais enriquecidas isotopicamente que as águas do Aquífero Pirabas Inferior, estas diferenças de valores isotópicos ficam evidentes nos mapas da Figura 74.

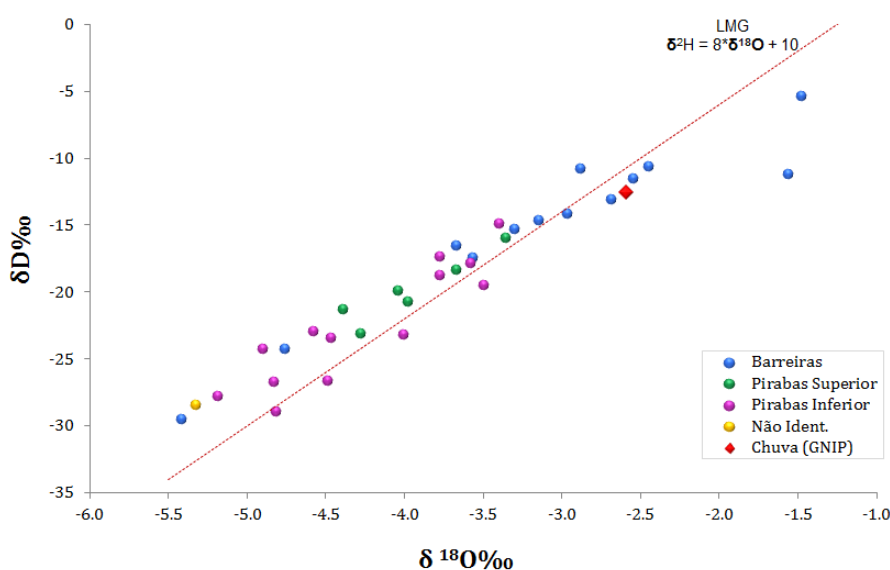
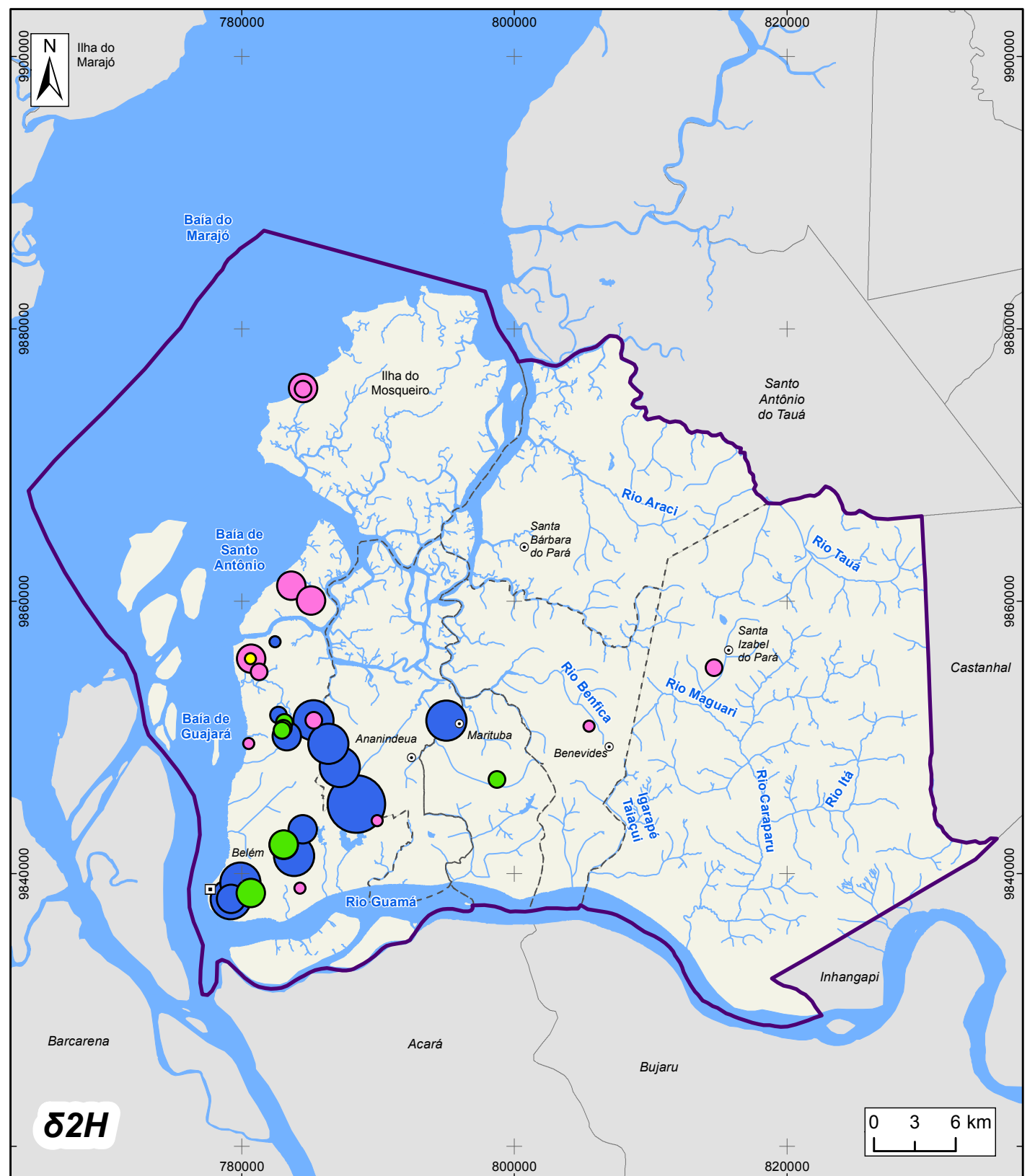
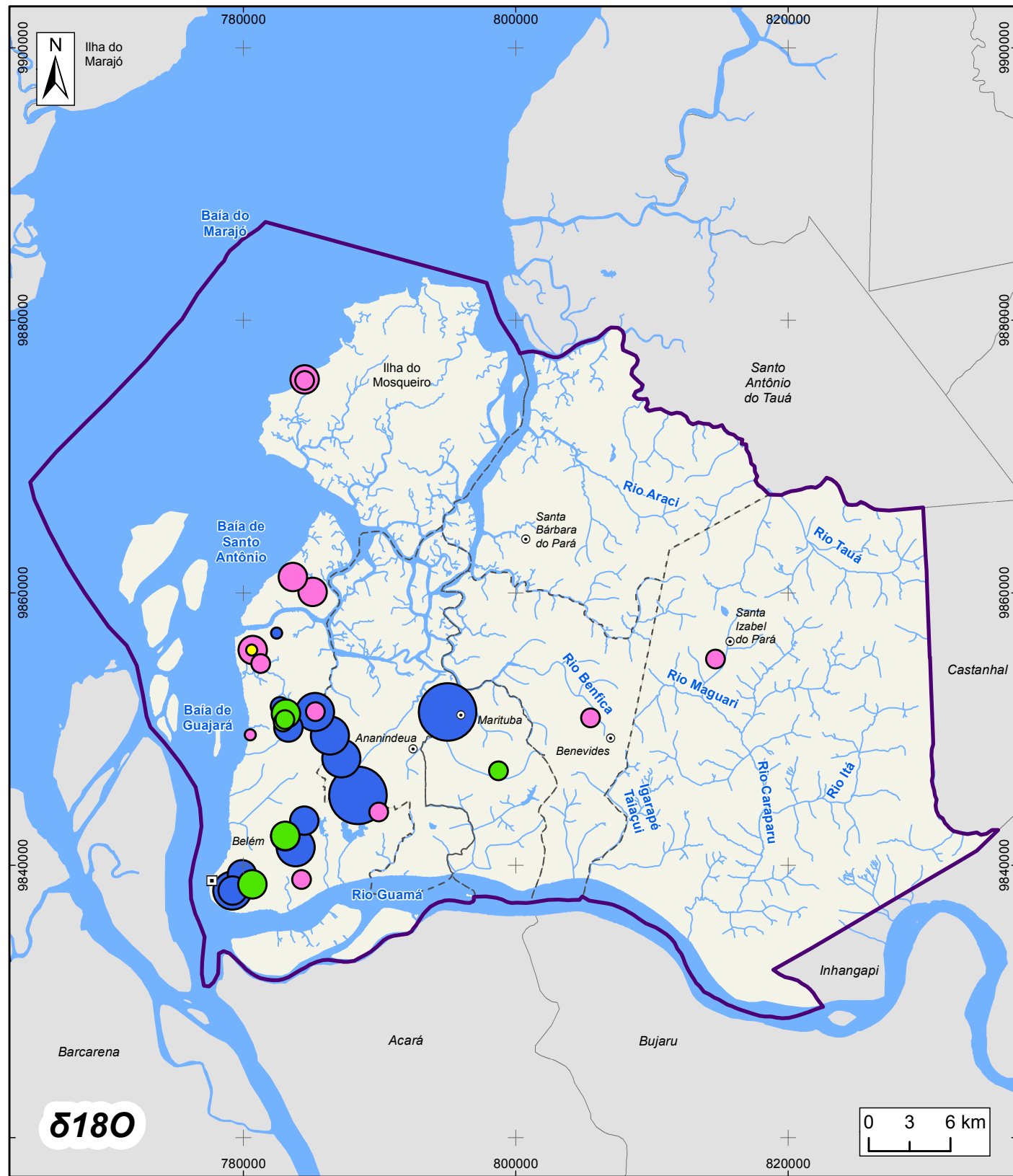


Figura 73 – Relação de $\delta^{18}\text{O}$ e δD para as amostras de águas coletadas na região de Belém.



LEGENDA

<ul style="list-style-type: none"> ▣ Capital Estadual ⊙ Sede Municipal ~ Hidrografia ☁ Massa d'água ⊕ Área de Estudo - - - Limite municipal 	<p>Aquífero</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Barreiras ● Pirabas Superior ● Pirabas Inferior ● Não Informado 	<p>δ 18O‰</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ < -5 ○ -4.9 - -4 ○ -3.9 - -3 ○ -2.9 - -2 ○ > -2 	<p>δ D‰</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ < -25 ○ -24.9 - -20 ○ -19.9 - -15 ○ -14.9 - -10 ○ > -10
---	---	--	--

Figura 74 – Distribuição de δ18O e δD nas águas subterrâneas da região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Dados de δ18O e δD: ANA/Profill

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_74_Resultados_18O_deuterio_A3
Escala:	1:400.000

8.6 ISÓTOPOS RADIOATIVOS DE HIDROGÊNIO (TRÍTIO) E CARBONO 14

O fenômeno da radioatividade presente nos isótopos instáveis, também chamados de radioisótopos, por estar estatisticamente relacionada com o tempo (mensurada em desintegrações por unidade de tempo), se presta para a determinação do tempo de permanência ou idade do traçador no aquífero, ou seja, constitui um meio de datação da água subterrânea.

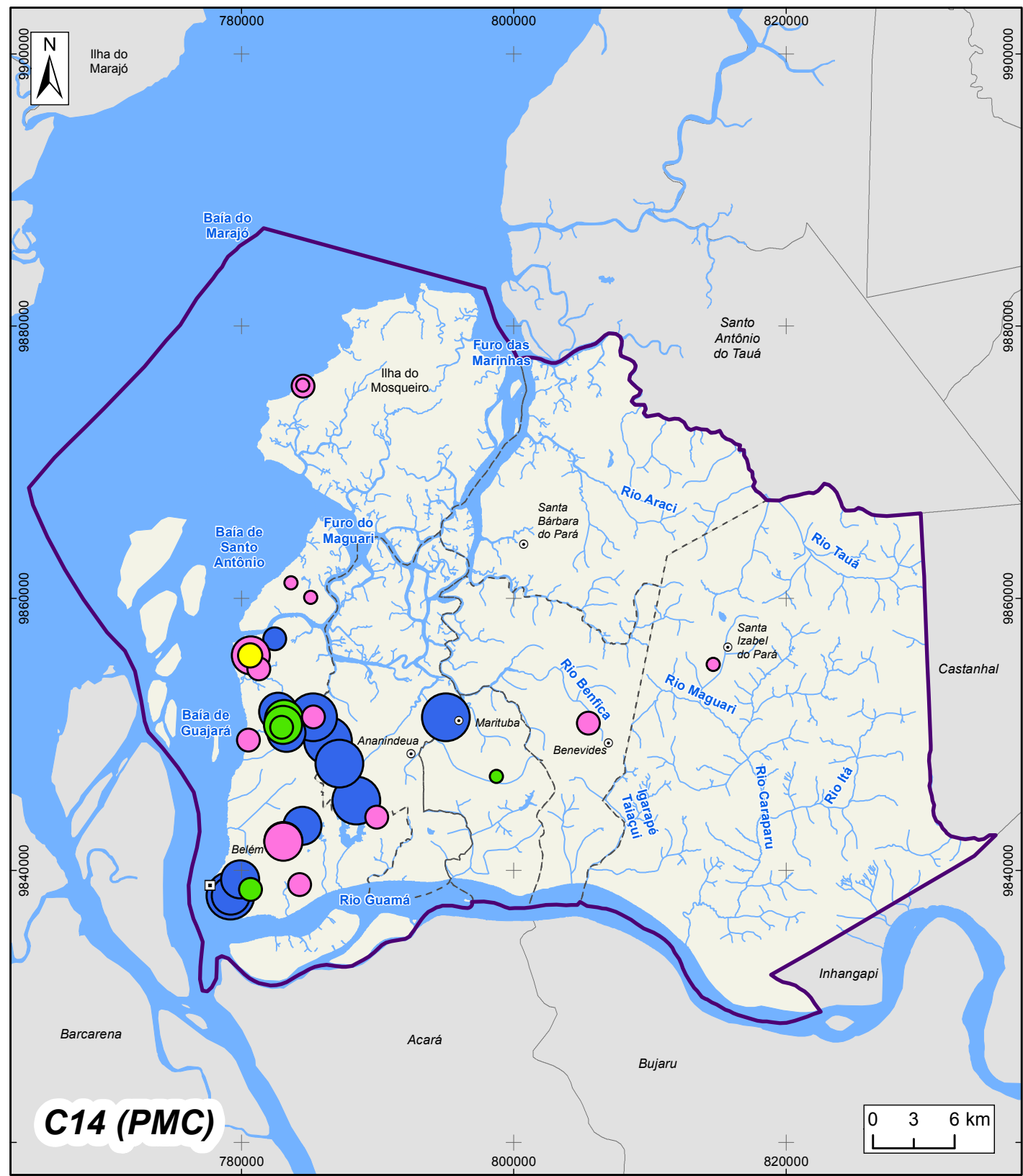
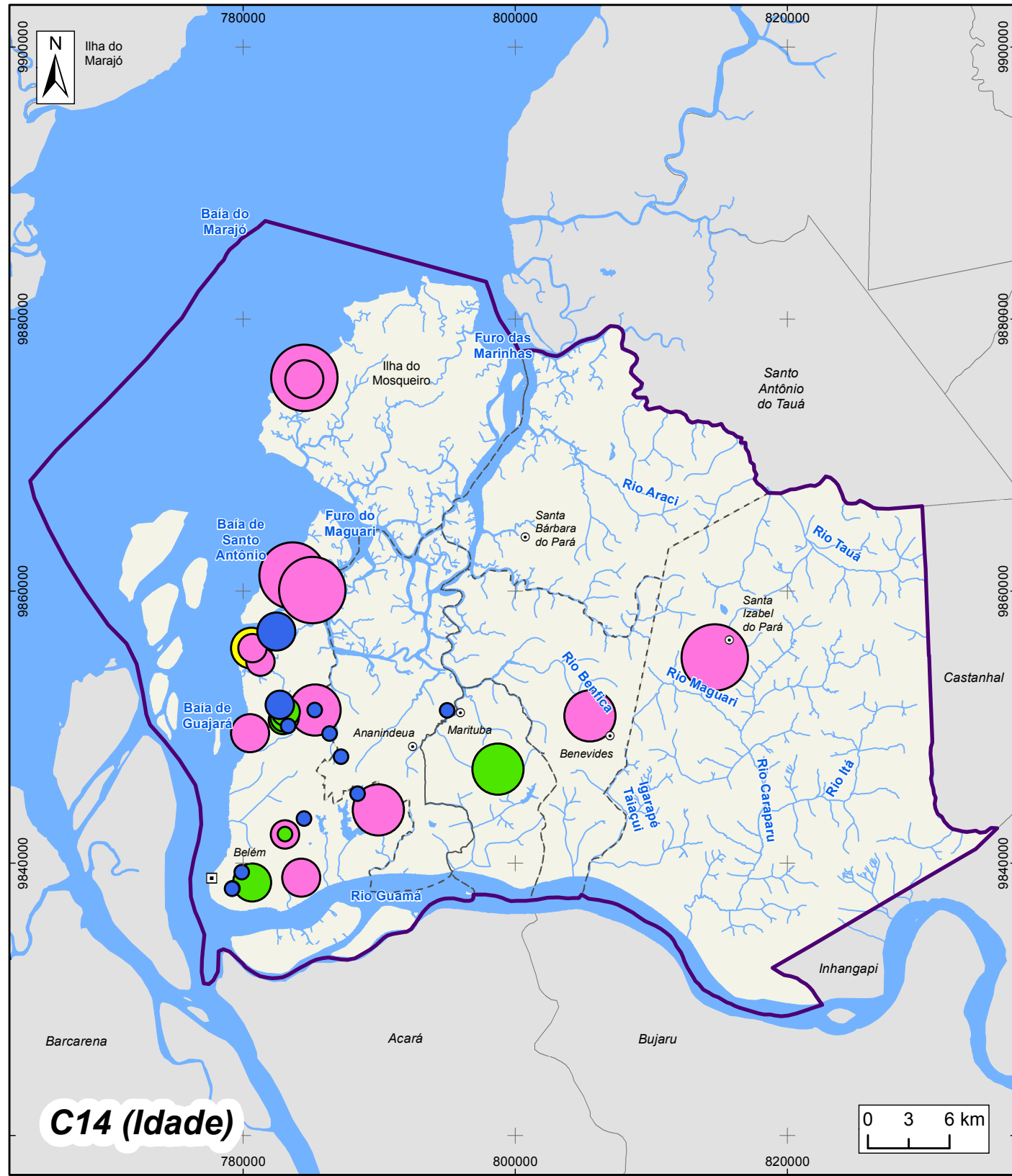
O ^{14}C e o T (^3H – Trítio) são amplamente utilizados na datação de água devido ao intrínseco tempo de meia-vida que possuem, respectivamente de 5.730 anos e 12,43 anos, que definem as faixas acessíveis de datação de 200 a 30.000 anos e 0 a 50 anos. Ambos os isótopos são de origem secundária e são produzidos na alta atmosfera em reações nucleares num bombardeio de fluxo de nêutrons da radiação cósmica secundária com átomos de nitrogênio presentes na atmosfera.

Na análise de ^{14}C , as idades encontradas variam de moderna a 9.407 anos para o Aquífero Barreiras, 100 anos a 14.448 anos para o Aquífero Pirabas Superior e 1.543 anos a 28.864 anos para o Aquífero Pirabas Inferior (Figura 75).

Algumas considerações que podemos destacar nestas análises de Carbono-14: O poço P147 (COSANPA – Centro/Marituba – Aquífero Pirabas Superior – 14.448 anos) possivelmente explora água do Aquífero Pirabas Inferior; os poços P50 (Indústria – Maracacuera/Belém – Aquífero Barreiras – 9.407 anos) e P148 (Poço particular – Icoaraci/Belém – Aquífero Barreiras – 4.514 anos), provavelmente, captam águas de mais uma unidade aquífera e não somente do Aquífero Barreiras como informado. Os poços Rimas1 (COSANPA/5º SETOR – Aquífero Pirabas Superior – 100 anos), Rimas5 (ICOARACI/SOUZA FRANCO – Aquífero Pirabas Inferior – 1543 anos), P03 (COSANPA/5º Setor/FEMAC – Aquífero Pirabas Inferior – 1.843 anos) e Rimas6 (Icoaraci/Paracuri II – Aquífero Pirabas Inferior – 4.757 anos), possivelmente captam água também do aquífero Barreiras. O poço Rimas7 (ICOARACI/FUNASA – sem informação sobre as posições filtrantes – 6.422 anos), possivelmente pode ter filtros no Aquífero Pirabas inferior devido a sua profundidade (225 m), porém observa-se pela idade e pelas características hidroquímicas, uma provável mistura de águas dos aquíferos Barreiras e Pirabas neste poço.

Os resultados das análises de trítio (^3H) de água subterrânea nas áreas de estudo apresentam valores de $\delta^3\text{H}$ que variam até 1.53 TU, desta forma, tem-se águas com

recarga submoderna e mistura entre recarga submoderna e recarga recente. Somente no Aquífero Barreiras foram identificadas águas provenientes de misturas de recarga submoderna com recarga recente; são amostras que foram coletadas em poços rasos (até 50 metros de profundidade) e apresentam idade moderna na análise de carbono-14, o que corrobora com a pouca idade sugerida pelas análises de trítio (Figura 76).



C14 (Idade)

C14 (PMC)

LEGENDA

- | | | | |
|------------------|--------------------|-----------------|------------------|
| Hidrografia | 14C - Idade | 10.001 - 20.000 | 14C - PMC |
| Massa d'água | < 1.000 | > 20.000 | 0,02 - 0,10 |
| Área de Estudo | 1.001 - 5.000 | | 0,11 - 0,50 |
| Limite municipal | 5.001 - 10.000 | | 0,51 - 1,00 |
| Aquífero | | | 1,01 - 2,00 |
| Barreiras | | | |
| Pirabas Superior | | | |
| Pirabas Inferior | | | |
| Não Informado | | | |

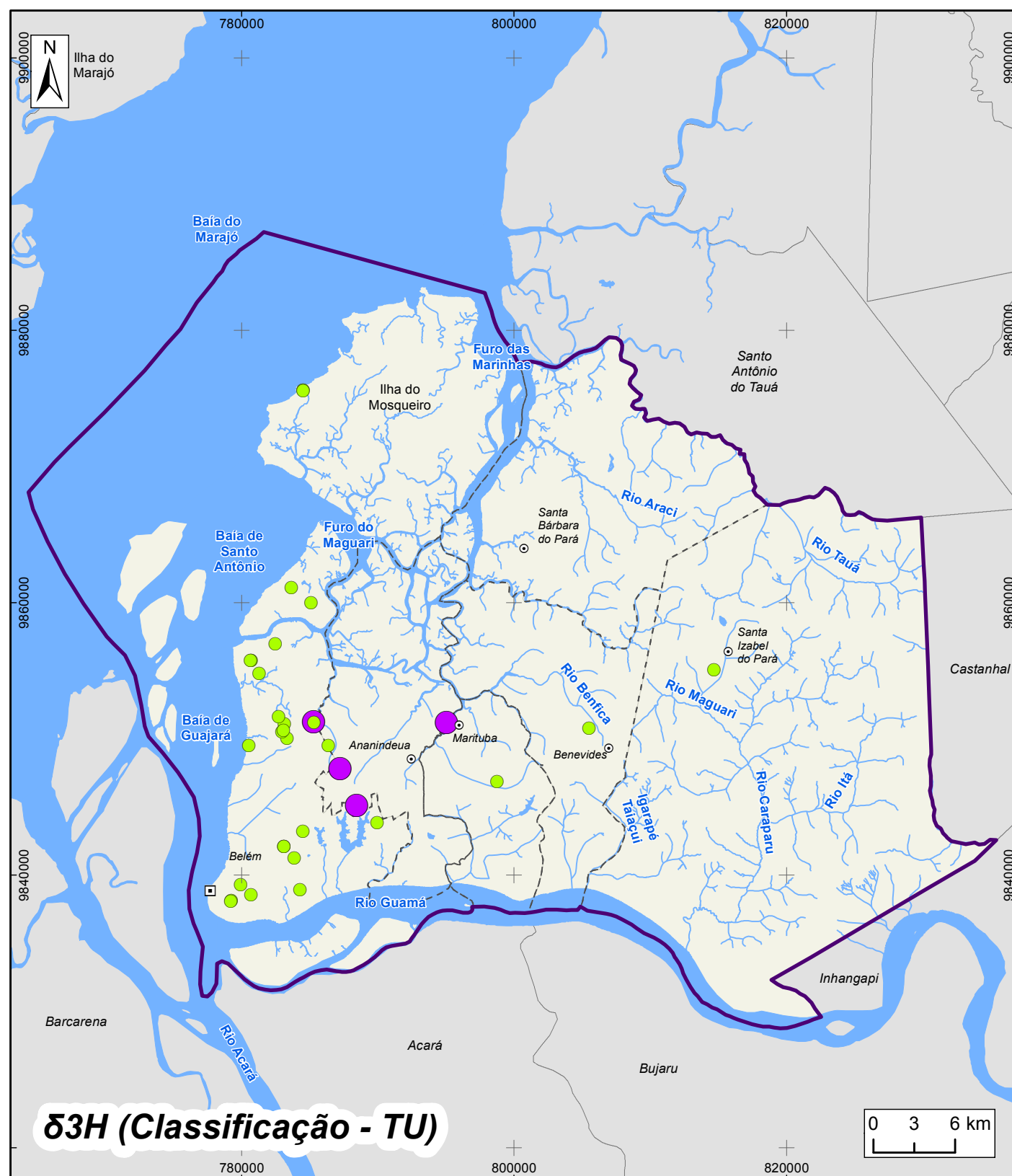
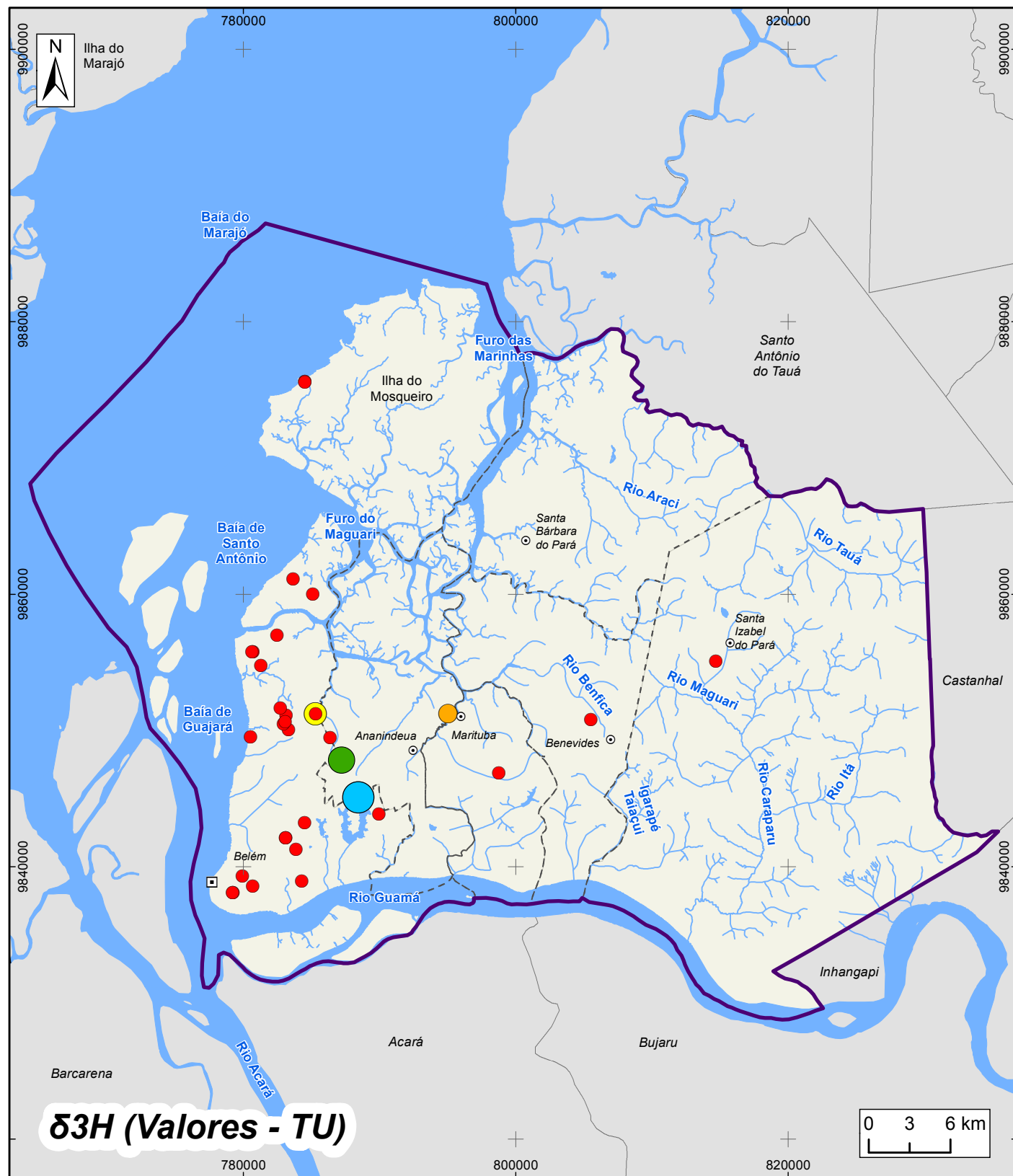
Figura 75 – Mapas de distribuição de 14C (Idade e PMC- porcentagem de carbono moderno) dos pontos de coleta de água subterrânea na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Dados de Idade e PMC: ANA/Profill

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_75_Resultados_C14_A3
Escala:	1:400.000



LEGENDA

- | | | |
|------------------------|--------------------|------------------------------------|
| □ Capital Estadual | Tritio (TU) | Tritio (TU) - Classificação |
| ○ Sede Municipal | ● <0,8 | ● Submoderna (anterior 1952) |
| ~ Hidrografia | ● 0.81 - 1.00 | ● Mistura (Submoderna/Recente) |
| ☑ Massa d'água | ● 1.01 - 1.20 | |
| ⊕ Área de Estudo | ● 1.21 - 1.40 | |
| - - - Limite municipal | ● 1.41 - 1.53 | |

Figura 76 – Mapa de localização e classificação das análises de δ3H dos pontos de coleta de água subterrânea na região de Belém



ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO DE BELÉM/PA

Fonte: Limites políticos: IBGE. Hidrografia: CPRM. Ilhas: adaptado de SEMAS/PA. Dados de Tritio: ANA/Profil

Sistema de Coordenadas:	UTM
Datum Horizontal:	SIRGAS 2000
Unidade:	Metros
Fiscalização:	ANA
Data:	Junho/2018
Arquivo:	Figura_76_Resultados_Tritio_A3
Escala:	1:400.000

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEY, W.M.; REILLY, T.E.; FRANKE, O.L. Sustainability of Groundwater Resources. USGS Circular 1186. 79 pp.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA) and WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 1368 p. 2012.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2004. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco. ANA/GEF/PNUMA/OEA. Subprojeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco -PBHSF (2004-2013). 106 p. 2004.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. Brasília. Cadernos de Recursos Hídricos. 134 p. 2005.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasil. ANA. 432 p. 2013.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2015. Atualização da base de demandas de recursos hídricos no Brasil. Nota Técnica nº 56/2015/SPR. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/snirh/snirh-1/acesso-tematico/usos-da-agua>>. Acesso em: novembro de 2017.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2017. Atlas Brasil de Despoluição de Bacias Hidrográficas. Disponível em: <<http://atlasesgotos.ana.gov.br/>>. Acesso em: novembro de 2017.
- APPELO, C.A.J.; POSTMA, D. Geochemistry, groundwater and pollution. 2ª ed. Amsterdam: Balkema Publishers, 650p, 2005.
- ARAI, M., UESUGUI, N. ROSETTI, D. F.; GÓES, A. M. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no Nordeste do Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém. Anais... Belém: SBG, P. 738-752.1988.
- BARBOSA JR, A. R. 2006. Vazões Mínimas. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Graduação).

- BARROS, A.E.F.; COSTA, W.A.; LIMA, W.N. Estudo espectroscópico preliminar sobre a matéria orgânica de folhelhos associados à Formação Pirabas (Falésia da Praia do Bispo, Ilha dos Mosqueiro-PA). *Geochim. Brasil*, 19(1) 060-066, 2005.
- BARROS, A.E.F.; COSTA, W.A.; TAVORA, V.A. Contribuição à mineralogia e à geoquímica de sedimentitos de perfil litológico (ilha de Mosqueiro, PA). In: VIII SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, (Manaus, AM).
- BJORLYKKE, K. & EGEBERG, P.K. Quartz cementation in Sedimentary Basins. *AAPG Bulletin*, v.77, p.1538-1548, 1993.
- CABRAL, N.M.T. Impacto da Urbanização na Qualidade das Águas Subterrâneas nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal – Belém/PA. 2004, 289f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2004.
- CAMPBELL, D. F. Revised report on the reconnaissance geology of the Maranhão Basin. CNP, Rio de Janeiro, 1949. (Relat. Int.).
- CAMPOS, G.M. Estatística prática para docentes e pós-graduandos. Notas de aula. http://www.furp.usp.br/restauradora/gmc/gmc_livro/gmc_livro.html. 2002.
- CAMPOS, H. Estatística experimental não paramétrica. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz - USP”, São Paulo, 343p., 1979.
- CARNIER NETO, Dagmar. Análise das séries temporais de monitoramento de nível d'água em poços no aquífero Rio Claro. 2006. vii, 61 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006.
- CLARK, I.D. & FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997.
- COOPER, H. H. & JACOB, C. E. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history, *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 27, pp. 526-534.
- COSTA – CONSULTORIA E SERVIÇOS TÉCNICOS E AMBIENTAIS LTDA. 1999. Plano diretor dos recursos hídricos da bacia do rio Mundaú. Secretaria de Estado de Recursos Hídricos e Irrigação. Maceió. Alagoas. 746 p.

- COSTA NETO, P.L.O. Estatística. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 264p., 1977.
- COSTA, J. B. S.; BORGES, M. S.; BEMERGUY, R. L.; FERNANDES, J. M. G.; COSTA Jr., P. S.; COSTA, M. L. A evolução cenozoica da região de Salinópolis, nordeste do Estado do Pará. *Geociências*, v. 12, n. 2, p. 373-396. 1993.
- COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; BEMERGUY, R. L.; VILLEGAS, J. M. C. Tectonics and paleogeography of the Marajó Basin, northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 74, p. 519-531, 2002.
- COSTA, W. D.; COSTA, W. D. 1997. Disponibilidades hídricas subterrâneas na Região Nordeste do Brasil. *Água em Revista*, Belo Horizonte, v. 5, n. 9, p.47-59.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Feitosa, F. A. C. & Manoel Filho, J. (Coords.). Fortaleza: CPRM / LABHID – UFPE, 412 p. il. 1997.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Estudos hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e Adjacências. 2002.
- CRAIG, H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961. 133: 1702-1703.
- CUSTÓDIO, E & LLAMAS, M.R. Hidrologia subterrânea. 2ª ed. Barcelona: Ediciones Omega, 2v, 2350 p., 1996.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. 2005. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. CDROM.
- DEVLIN, J. F. & SOPHOCLEOUS, M. 2004. The persistence of the budget myth and its
- FERREIRA, C. S. Características lito-paleontológicas na Formação Pirabas, Estado do Pará. In: CONFERÊNCIA GEOLÓGICA DAS GUIANAS, 1966, Belém. *Anais...* Belém, 1966, v.6, p. 101-111, 1966.
- FETTER, C. W. Applied Hydrogeology. 4ª ed. Prentice-Hall, Inc., USA. 598 p. 2001.
- FOSTER, S.S.D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, in W. van Duijvanbooden and H.G. van Waegeningh (eds.), *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Proceedings and Information No. 38 of the*

International Conference held in the Netherlands, in 1987, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands. 1987.

FOSTER, S; HIRATA, R. Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes. (Tradução de Ricardo Hirata, Sueli Yoshinaga, Seiju Hassuda, Mara Akie Iritani). Boletim do Instituto Geológico, n. 10, 92 p. 1993.

FOSTER, S; HIRATA, R; GOMES, D; D'ELIA, M; PARIS, M. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Publicação Servmar – Serviços Técnicos Ambientais Ltda. 114 p. 2006.

GAT, J.R. Oxygen and Hydrogen Isotopes in the Hydrologic Cycle. Rev. Earth Planet v.24. 225-262p, 1996.

GODWIN, H. Half life of radiocarbon. Nature 195, 984 p., 1962.

GÓES, A. M. Modelo deposicional preliminar para Formação Pirabas nordeste do Pará. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, v 2, p. 3-15. 1990.

GULER, C.; THYNE, G.D. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. Journal of Hydrology, Amsterdam, v.285, p 177-198, 2004.

HEM, J.D. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Alexandria: U.S.G.S., U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2254. 272 p., 1985.

HIRATA, R.C.A. & FERREIRA, L.M.R. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. Revista Brasileira de Geociências. 31(1), p 43-50. 2001.

IG – INSTITUTO GEOLÓGICO. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB. Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE. São Paulo: IG/ Cetesb/ DAEE. 2 v. mapas. (Série Documentos). 1997.]

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotope methods for dating old groundwater. IAEA, Vienna, 357p., 2013.

- LANDIM, P.M.B. Análise estatística espacial de dados geológicos multivariados. DGA/IGCE/UNESP Rio Claro. Laboratório de Geomatemática, texto didático 15, 158 p. 2006.
- LIBBY, W.F. Radiocarbon Dating. University of Chicago Press, Chicago, 124p.,1952. (Also published in Phoenix Science Series, second ed., 1965).
- MACE, R. E.; MULLICAN, W. F. & WAY, T. Estimating Groundwater Availability in Texas. Texas Water Development Board – TWDB. Texas. 16 p. 2001.
- MENDES, R. L. R. Geofísica aplicada ao mapeamento de aquíferos da região metropolitana de Belém. Dissertação de Mestrado. UFPA. 2000.
- MENG, S.X. & MAYNARD, J.B. Use os statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior: water chemical data from the Botucatu aquífer in São Paulo state, Brazil. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 250, p. 78-97, 2001.
- MOOK, W.G. Carbon-14 in hydrogeological studies. In: Handbook of environmental isotope geochemistry (Fritz, P, and Fontes, J.C., editors), Vol 1, Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, 49-74p, 1980.
- NIMMO, J.R., HEALY, R.W., STONESTROM, D.A. Aquífer recharge. In: Anderson, M.G., Bear, J. (Eds.), Encyclopedia of Hydrological Science, vol. 4. Wiley, Chichester, UK, pp. 2229– 2246. 2005.
- NORDSTROM, D.K. & MUNOZ, J.L. Geochemical Thermodynamics. Menlo Park, California. The Benjamin/Cummings Co., Inc. 477p, 1985.
- OLIVEIRA, J. G. F.; SILVA, R. C. S. Geologia e recursos minerais da Folha Belém - SA.22-X-D-III, Estado do Pará, escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil. Projeto Cartografia da Amazônia. CPRM: Belém. 2011.
- PARKHURST D.L. & APPELO P. User's guide to Phreeqc (Version 2) – A computer program for speciation. speciation. batch-reaction. one-dimensional transport. and inverse geochemical calculations: Denver: USGS, 1999, 310p. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259.

- PAULA E SILVA, F. 2003. Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 166 p.
- PETRI, S. Foraminíferos miocênicos da Formação Pirabas. Boletim Faculdade de Filosofia Ciências e Letras (Geologia), 216: 1-79. 1957.
- PICANÇO, F.E.L.; LOPES, E.C.S & SOUZA, E.L.de. Fatores responsáveis pela ocorrência de ferro em águas subterrâneas da Região Metropolitana de Belém/PA. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002, São Paulo. Resumos. São Paulo. ABAS, 2002.
- PIPER, A.M.A.A. Graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Reprinted: American Geophysical Union Transactions, v.25, p. 914-923, 1944.
- PORTARIA 2914 DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011 – Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.
- RESOLUÇÃO 396 DE 03 DE ABRIL DE 2008 – MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE E CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.
- RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: US Department of Agriculture, 1954. 160p. USDA Agricultural Handbook, 60
- ROCHA, G. A. (org.). 2005. Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Nota Explicativa. DAEE, IG, IPT, CPRM. São Paulo. 119 p.
- RORABAUGH, M. J. 1953. Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well, Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., vol. 79, separate no. 362, 23 pp.
- ROSSETI, D.F. Evolução Sedimentar Miocênica nos Estados do Pará e Maranhão. Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, v. 6, n. 2, p. 7-18, 2006.
- ROSSETTI, D. F. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. Journal of South American Earth Sciences, 14: 77-89. 2001.

- ROSSETTI, D. F. Paleosurfaces from northeastern Amazonia as a key for reconstructing paleolandscapes and understanding weathering products. *Sedimentary Geology* v. 169, n. 3-4, p. 151-174, 2004.
- ROSSETTI, D. F. The role of tectonics on the preservation of estuarine valleys in areas with low accommodation rates: examples from Upper Cretaceous and Miocene Successions in Northern Brazil. *In*: R. W. Dalrymple, D. A. Leckie, R. W. Tillman (edit), *Incised Valley in Time and Space*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication n. 85, p.199-218. 2006.
- ROSSETTI, D. F.; BEZERRA, F. H. R.; DOMINGUEZ, J. M. L. Late Oligocene-Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. *Earth-Science Reviews*, v. 123, p. 87-112. 2013.
- ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. Geologia. *In*: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. (Eds.) *O Neógeno da Amazônia Oriental*. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi. p. 13-52, 2004.
- ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. A influência marinha nos Sedimentos Barreiras. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi (Série Ciências da Terra)*, v. 2, p. 17-29, 1990.
- ROSSETTI, D. F.; SANTOS JR., A. E. A. Facies architecture in a tectonically-influenced estuarine incised valley fill of Miocene age, Northern Brazil. *Journal of South America Earth Sciences*, v. 17, n. 4, p. 267-284, 2004.
- ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; GÓES, A. M. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região bragantina, nordeste do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi (Série Ciências da Terra)*, v. 1, p. 25-74, 1989.
- SÁ, J. H. S. Contribuição à geologia dos sedimentos Terciários e Quaternários da Região Bragantina, Estado do Pará. *Boletim Geológico. UFR* 3: 21-36. 1969.
- SABESP-CEPAS. 1994. Diagnóstico hidrogeológico da região metropolitana de São Paulo. Relatório Final. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo e Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas da Universidade de São Paulo – USP. 115p.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO PARÁ – SEMA.
Resolução nº 10 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH. Dispõe sobre os critérios para análise de Outorga Preventiva e de Direito de Uso de Recursos Hídricos e dá outras providências. 2010.

SELLEY, R.C. Ancient Sedimentary environment. Second edition. Cornell University Press. 290 pp. 1978.

SIMMERS, I. 1990. Aridity, groundwater recharge and water resources management. *In*: Groundwater recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge. David N. Lerner, Arie S. Issar, Ian Simmers. Internat. Association of Hydrogeologists – Hannover: Heisse.

STIFF, H.A. JR. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. Reprinted: Journal of Petroleum Technology, Oxford, v. 3, n. 10, p. 15-16, 1951.

STUIVER, M & POLACH, H. Discussion: Reporting of ¹⁴C data. Radiocarbon 19(3):355-363p., 1977.

STUMM, W. Chemistry of the solid-water interface: processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems. Wiley-Interscience publication. 1992.

TATUMI, S. H; da SILVA, L. P; PIRES; E. L; ROSSETTI, D. F; GÓES; A. M & MUNITA, C. S. Datação de Sedimentos Pós-Barreiras no Norte do Brasil: implicações paleogeográficas. Revista Brasileira de Geociências, v. 38, n. 3, p:514-524, 2008.

THEIS, C. V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Am. Geophys. Union Trans., vol. 16, pp. 519-524.

TODD, D. K. Groundwater Hydrology. Nova York: John Wiley & Sons Inc. 320p. 1959.

VIDAL, A.C.; CHANG, H.K. Caracterização Hidroquímica dos Aquíferos da Bacia de Taubaté. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.32, n. 2, p. 267-276, 2002

ANEXOS

DISPONÍVEIS EM MEIO DIGITAL

ANEXO I – PERFILAGENS GEOFÍSICAS

**ANEXO II – POÇOS SELECIONADOS PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO
PIRABAS**

**ANEXO III – POÇOS SELECIONADOS PARA AVALIAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO
BARREIRAS**



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

Setor Policial, área 5, Quadra 3,
Blocos "B", "L", "M", "N", "O" e T.
PABX: (61) 2109-5400 | 21095252
www.ana.gov.br



Av. Iguazu, 451, 6º andar, Petrópolis.
Porto Alegre - RS. CEP: 90470-430
Fone | Fax: (51) 3211-3944
www.profill.com.br

