

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

TESE DE DOUTORADO N° 60

CLÁUDIO JOSÉ DA SILVA DE SOUSA

CARACTERIZAÇÃO DOS AQUÍFEROS NA ILHA DO MARANHÃO:
reconhecimento, levantamento de áreas estratégicas e contribuições ao processo de gestão

BRASÍLIA/ DF

2021

CLÁUDIO JOSÉ DA SILVA DE SOUSA

TESE DE DOUTORADO N° 60

CARACTERIZAÇÃO DOS AQUÍFEROS NA ILHA DO MARANHÃO:

reconhecimento, levantamento de áreas estratégicas e contribuições ao processo de gestão

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, área de concentração de Hidrogeologia e Meio Ambiente, do Instituto de Geociências, da Universidade de Brasília, como requisito final para obtenção do grau de doutor.

Orientador: Dr. Welitom Rodrigues Borges

BRASÍLIA/ DF

2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SS725c Sousa, Cláudio José da Silva de
Caracterização dos aquíferos na Ilha do Maranhão:
reconhecimento, levantamento de áreas estratégicas e
contribuições ao processo de gestão / Cláudio José da Silva
de Sousa; orientador Weliton Rodrigues Borges. -- Brasília,
2021.
273 p.

Tese (Doutorado - Doutorado em Geociências Aplicadas) --
Universidade de Brasília, 2021.

1. Hidrogeologia. 2. Sistema Aquífero Barreiras
Itapecuru. 3. Ilha do Maranhão. I. Borges, Weliton
Rodrigues, orient. II. Título.

CLÁUDIO JOSÉ DA SILVA DE SOUSA

CARACTERIZAÇÃO DOS AQUÍFEROS NA ILHA DO MARANHÃO:

reconhecimento, levantamento de áreas estratégicas e contribuições ao processo de gestão

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, área de concentração de Hidrogeologia e Meio Ambiente, do Instituto de Geociências, da Universidade de Brasília, como pré-requisito final para obtenção do grau do doutor em Geociências Aplicadas e Geodinâmica.

Data ____/____/____

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges
Instituto de Geociências
Universidade de Brasília
Orientador

Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos
Instituto de Geociências
Universidade de Brasília
Avaliador interno

Prof. Dr. William August Sauck
Department Of Geosciences/ Institute For Water Sciences
Western Michigan University - USA
Avaliador externo

Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco
Departamento de Geologia/Instituto de Ciências
Universidade do Ceará
Avaliador externo

*Para a glória, para a honra, e para o louvor do Teu santo Nome, a Ti,
Senhor e Salvador JESUS CRISTO, Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e encorajamento, diariamente, presentes.

A minha amada família pelo apoio incondicional.

Ao Programa de Pós de Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, através dos Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges, Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos e Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha, pelo ensinamento e orientação prestados.

À Universidade Estadual do Maranhão, através da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, pela concessão do afastamento e bolsa de estudos; a Pró-Reitoria de Gestão de Pessoas, na pessoa do Prof. Dr. José Rômulo Travassos da Silva; e aos professores do Departamento de História e Geografia e de Engenharia Civil, do Campus Paulo VI.

À Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Maranhão, por meio da Superintendência de Recursos Hídricos, pela concessão dos dados de solicitação de outorga e perfuração de poços na Ilha do Maranhão.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

À Dra. Fernanda Fayad, do CBV Hospital de Olhos, pelo tratamento que proporcionou melhoria da qualidade visual, essencial à conclusão desse trabalho.

Às amigas forjadas durante o tempo de convivência em sala de aula, trabalhos de campos e demais atividades realizadas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica/IG/UnB.

A você, leitor, pelo interesse na leitura dessa pesquisa.

SOUSA, C. J. da S. de. 2021. Caracterização dos aquíferos na Ilha do Maranhão: reconhecimento, levantamento de áreas estratégicas e contribuições ao processo de gestão. **Tese de doutorado**. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. IG/UnB. Brasília-DF, 273p.

RESUMO

A presente pesquisa visa caracterizar os aquíferos na Ilha do Maranhão, localizada no litoral setentrional do Brasil, considerando aspectos geográficos, geofísicos e hidrogeológicos. A metodologia envolveu levantamento bibliográfico, contextualização geoambiental, qualificação do panorama das águas, tratamento e espacialização de parâmetros hidrogeológicos e síntese e contribuições ao processo de gestão. O Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru contribui com 47% da água destinada ao abastecimento urbano/rural e industrial na Ilha do Maranhão. Na porção superior é livre e constituído de arenitos, leitos de areia e argilitos; na inferior é confinado e formado por arenitos, intercalações de argilitos, siltitos, folhelhos e níveis calcíferos. Os poços tubulares cadastrados exibem profundidades entre 22 e 215 m e filtros entre 4 e 215 m. A porção centro-norte da área de estudo exhibe valores baixos de nível estático, nível dinâmico e rebaixamento; valores altos de carga hidráulica, vazão de teste, vazão específica, profundidade da interface entre os aquíferos Barreiras e Itapecuru e profundidade da interface água doce-água salgada. Na área de estudo, predominam poços com seções filtrantes em aquífero confinado, em regime permanente, com drenança das camadas confinantes. Os dados de testes de bombeamento tiveram melhor ajuste a solução de Hantush e Jacob (1955). As estimativas médias de transmissividade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento são de $8,33 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $1,93 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{s}$ e $2,49 \times 10^{-2}$. O pH médio das 92 amostras de água subterrânea é de 5,59; os íons mais frequentes são bicarbonato (28,54mg/ L), sódio (21,77 mg/ L) e cloreto (21,18 mg/ L); as fácies hidroquímicas mais recorrentes são a sódica cloretada (56% das amostras), sódica bicarbonatada (13%) e sódica mista (13%); 52% das amostras tiveram concentrações de nitrato $>10 \text{ mg}/\text{L}$; 100% das amostras apresentaram STD $< 500 \text{ mg}/\text{L}$ (águas doces); 48% das amostras foram enquadradas na Classe 1 e 52% na Classe 3. Os levantamentos de radar de penetração evidenciaram dois padrões de reflexão separados por sinais de alta amplitude, contínuos, paralelos a subparalelos, relacionados à superfície de descontinuidade erosiva entre o Grupo Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras, constituindo-se um marcador estratigráfico para estudos hidrogeológicos. A produtividade estimada a partir do modelo de Diniz *et al.* (2014) indicou que cerca de 77% da área de estudo exhibe produtividade moderada e baixa, 15% muito baixa e não produtiva e 8% alta. As reservas renováveis, permanentes e explotáveis foram estimadas em $0,064 \text{ km}^3/\text{ano}$, $1,294 \text{ km}^3$ e $0,193 \text{ km}^3/\text{ano}$, respectivamente. A avaliação das recargas considerou as áreas com carga hidráulica $\geq 20 \text{ m}$ (162 km^2); as classes de uso/cobertura vegetal favoráveis à infiltração das águas meteóricas (505 km^2); a relevância das unidades de conservação (473 km^2); as áreas com profundidade da interface água doce-água salgada $< 100 \text{ m}$ (331 km^2); e o domínio aflorante do aquífero Itapecuru no continente e (153.274 km^2). As proposições de gestão do aquífero foram orientadas segundo eixos conservação, preservação e recuperação; cadastro de poços e sistemas de informações de recursos hídricos; monitoramento quali-quantitativo; enquadramento das águas subterrâneas; autorização para perfuração de poços tubulares e outorga de direito de uso da água; capacitação profissional e ações educativas. Elas ressaltam que o conhecimento atual dos aquíferos na Ilha do Maranhão ainda não é satisfatório para a sua gestão adequada.

Palavras-chave: Hidrogeologia, Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, Ilha do Maranhão.

SOUSA, C. J. da S. de. 2021. Characterization of aquifers on the Ilha do Maranhão/Brazil: recognition, survey of strategic areas and contributions to the management process. **Doctoral Thesis**. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. IG/UnB. Brasília-DF, 273 p.

ABSTRACT

This research aims to characterize the aquifers on the Ilha do Maranhão, located on the northern coast of Brazil, considering geographical, geophysical and hydrogeological aspects. The methodology involved bibliographic review, geo-environmental contextualization, qualification of the water overview, treatment and spatialization of hydrogeological parameters and synthesis and contributions to the management process. The Barreiras-Itapecuru Aquifer System contributes 47% of the water destined for urban / rural and industrial supply on the Ilha do Maranhão. In the upper portion it is free and consists of sandstones, sand beds and clay stones; at the bottom it is confined and formed by sandstones, claystones, siltstones, shales and limestone levels. The registered tubular wells exhibit depths between 22 and 215 m and screens between 4 and 215 m. The north-central portion of the study area has low values of static level, dynamic level and drawdown; high hydraulic head values, pumping rate, specific capacity, depth of the interface between the Barreiras and Itapecuru aquifers and depth of the freshwater-saltwater interface. In the study area, wells with filter sections in a confined aquifer, in a permanent regime, with drainage of the adjoining layers, predominate. The data from pumping tests had a better fit to the solution of Hantush and Jacob (1955). The average estimates of transmissivity, hydraulic conductivity and storativity are $8.33 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.93 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{s}$ and $2.49 \times 10^{-2} \text{ m}/\text{s}$. The average pH of groundwater samples is 5.59; the most frequent ions are bicarbonate (28.45 mg/L), sodium (21.77 mg/L) e chloride (21.18 mg/L); the most frequent hydrochemical facies are chlorinated sodium (56% of samples), bicarbonated sodium (13%) and mixed sodium (13%); 52% of the samples had nitrate concentrations $> 10 \text{ mg}/\text{L}$; 100% had STD $< 500 \text{ mg}/\text{L}$ (fresh water); 48% of the samples were classified in Class 1 and 52% in Class 3. The ground penetrating radar surveys showed two patterns of reflection separated by high amplitude signals, continuous, parallel to subparallel, related to the erosive discontinuity surface between the Barreiras Group and Post-Barreiras Sediments, constituting a stratigraphic surface for hydrogeological studies. The productivity estimated from the model by Diniz *et al.* (2014) indicated that about 77% of the study area has moderate and low productivity, 15 percent very low and non-productive and 8% high. The renewable, permanent and exploitable groundwater reserves were estimated at $0.064 \text{ km}^3/\text{year}$, 1.294 km^3 and $0.193 \text{ km}^3/\text{year}$. The recharge evaluation considered the areas with hydraulic head $\geq 20 \text{ m}$ (162 km^2); the land use/land cover classes favorable to the infiltration of meteoric waters (505 km^2); the relevance of conservation units (473 km^2); areas with a depth of freshwater-saltwater interface $< 100 \text{ m}$ (331 km^2); and the outcropping domain of the Itapecuru aquifer on the continent and ($153,274 \text{ km}^2$). The aquifer management propositions were oriented according to conservation, preservation and recovery axes; registration of wells and water resource information systems; qualitative and quantitative monitoring; groundwater framework; authorization to drill tubular wells and granting groundwater rights; professional training and educational actions. They point out that the current knowledge of aquifers on Ilha do Maranhão is still not satisfactory for their proper management.

Keywords: Hydrogeology, Barreiras-Itapecuru Aquifer System, Ilha do Maranhão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Mapa de localização da Ilha do Maranhão na unidade morfoescultural do Golfão Maranhense e da Zona Costeira e Estuarina do Maranhão.....	22
Figura 3.2	Mapa de divisão política da Ilha do Maranhão.....	23
Figura 3.3	Mapa de microrregiões dos municípios do Golfão Maranhense	25
Figura 3.4	Mapa geológico-estrutural da Bacia Intracratônica de São Luís, onde está inserida a Ilha do Maranhão.....	26
Figura 3.5	Mapa geológico para a Ilha do Maranhão	34
Figura 3.6	Coluna estratigráfica proposta para Ilha do Maranhão.....	35
Figura 3.7	Mapa de unidades morfológicas da Ilha do Maranhão	40
Figura 3.8	Mapa de altimetria da Ilha do Maranhão	42
Figura 3.9	Mapa de declividade da Ilha do Maranhão.....	43
Figura 3.10	Mapa de orientação de vertentes da Ilha do Maranhão	44
Figura 3.11	Mapa de curvatura vertical da Ilha do Maranhão	46
Figura 3.12	Mapa de curvatura horizontal da Ilha do Maranhão.....	47
Figura 3.13	Mapa de formas de terreno da Ilha do Maranhão	48
Figura 3.14	Mapa de solos da Ilha do Maranhão	50
Figura 3.15	Mapa de cobertura vegetal e uso da terra da Ilha do Maranhão em 2010	53
Figura 3.16	Mapa de expansão urbana da Ilha do Maranhão de 1973 a 2010.....	56
Figura 3.17	Climograma e balanço hídrico climatológico para estação convencional de São Luís/MA, de 1961-1990.....	60
Figura 3.18	Estimativas da posição média pentadal da ZCIT, de julho de 2012 a junho de 2013, ao longo do Oceano Atlântico Equatorial	63
Figura 3.19	Anomalias de TSM no Atlântico Sul em 2009: a) fevereiro; b) março; c) abril.....	64
Figura 4.1	Regiões hidrográficas do Brasil: (a) disponibilidade hídrica em m ³ /s; (b) e retirada hídrica em m ³ /s, com destaque para Região Atlântico Nordeste Ocidental.....	65
Figura 4.2	Mapa de bacias e sistemas hidrográficos do Estado do Maranhão.....	66
Figura 4.3	Mapa de regiões hidrográficas da Ilha do Maranhão, com as classes de cobertura vegetal e uso da terra	68
Figura 4.4	Mapa de proporção da população das bacias hidrográficas em relação número de habitantes na Ilha do Maranhão, segundo o IBGE (2010).....	69

Figura 4.5	Mapa dos domínios hidrogeológicos do Brasil e aquíferos aflorantes no Estado do Maranhão	72
Figura 4.6	Mapa de ocorrência e classificação das águas subterrâneas da Ilha do Maranhão, baseado em Sousa (1997)	77
Figura 4.7	Valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ e condutividade elétrica: a) $\delta^{18}\text{O}$ x condutividade elétrica nos períodos chuvoso e seco; b) $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ nos períodos chuvoso e seca	78
Figura 4.8	Mapa de porcentagem dos domicílios particulares permanentes na Ilha do Maranhão com abastecimento de água através da rede geral	85
Figura 4.9	Mapa de porcentagem dos domicílios particulares permanentes na Ilha do Maranhão com abastecimento de água por poço ou nascente	86
Figura 4.10	Mapa dos sistemas de abastecimento de água na Ilha do Maranhão	87
Figura 4.11	Mapa de porcentagem dos domicílios particulares permanentes na Ilha do Maranhão com esgotamento sanitário via rede geral.....	90
Figura 4.12	Mapa de porcentagem dos domicílios particulares permanentes na Ilha do Maranhão com lixo coletado.....	92
Figura 4.13	Mapa de localização dos postos de revenda de combustíveis na Ilha do Maranhão	93
Figura 5.1	Mapa de localização dos poços tubulares que possuem perfis litológico e construtivo	97
Figura 5.2	Gráficos de profundidades inicial e final dos filtros nos poços cadastrados na Ilha do Maranhão: a) Sistema Aquífero Barreiras; b) aquífero	98
Figura 5.3	Mapa de profundidade do nível estático dos poços tubulares na Ilha do Maranhão	100
Figura 5.4	Mapa de profundidade do nível dinâmico dos poços tubulares na Ilha do Maranhão	101
Figura 5.5	Mapa de rebaixamento dos poços tubulares na Ilha do Maranhão	102
Figura 5.6	Mapa de carga hidráulica dos poços tubulares na Ilha do Maranhão	103
Figura 5.7	Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.	104
Figura 5.8	Mapa de profundidade da interface entre os grupos Barreiras e Itapecuru na Ilha do Maranhão	106
Figura 5.9	Mapa de espessura saturada do aquífero Barreiras.....	107
Figura 5.10	Mapa de vazão de teste dos poços tubulares na Ilha do Maranhão	109

Figura 5.11	Mapa de capacidade específica dos poços tubulares na Ilha do Maranhã	110
Figura 5.12	Mapa de profundidade da interface água doce-água salgada na Ilha do Maranhão	111
Figura 5.13	Características das linhas de fluxo nos ambientes estratificados: a) comportamento das componentes normal e tangencial da condutividade hidráulica; b) direção das linhas de fluxo segundo a variação da condutividade hidráulica.....	113
Figura 5.14	Regime de fluxo de poços: a) poço n° 5, em aquífero livre e em regime estacionário; b) poço n° 8, em aquífero confinado e em regime estacionário; c) poço n° 85, em aquífero confinado e em regime de fluxo estacionário; d) poço n° 80, em regime confinado e em regime transiente..	120
Figura 5.15	Regime de fluxo de poços: a) poço n° 60, em aquífero confinado e em regime estacionário; b) poço n°62, em aquíferos livre e confinado e em regime estacionário; c) poço n° 45, em aquíferos livre e confinado e em regime estacionário; d) poço n° 51, em aquíferos livre e confinado e em regime transiente.....	122
Figura 5.16	Avaliação da drenança das camadas confinantes do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, a partir de gráficos de rebaixamento versus tempo, de testes de bombeamento, comparados a gráficos diagnósticos no ambiente do AquiferTest Pro.....	125
Figura 5.17	Ajuste dos dados de testes de bombeamento, de poços com filtros em aquíferos e em regime estacionário, aos métodos de Hantush e Jacob (1955) e Neuman (1972, 1975): a) poços com SQE do método de Neuman <1 m ² ; b) SQE do método de Neuman >>1 m ²	127
Figura 5.18	Ajuste dos dados de testes de bombeamento, de poços em aquífero livre e em regime estacionário, aos métodos de Hantush e Jacob (1955) e Neuman (1972, 1975)	128
Figura 5.19	Mapa de transmissividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão	131
Figura 5.20	Mapa de coeficiente de armazenamento/rendimento específico do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.....	132
Figura 5.21	Mapa de condutividade hidráulica do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão	134

Figura 5.22	Mapa do potencial hidrogeniônico(pH) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão	136
Figura 5.23	Mapa de classificação das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão, segundo diagrama de Piper.....	140
Figura 5.24	Mapa de concentração do íon cloreto (Cl^- mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.....	141
Figura 5.25	Mapa de concentração do íon sódio (Na^+ , mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.....	144
Figura 5.26	Mapa de concentração do íon bicarbonato (HCO_3^- , mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão	145
Figura 5.27	Mapa de concentração do íon potássio (K^+ mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.....	147
Figura 5.28	Mapa de concentração do íon cálcio (Ca^{+2} mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.....	148
Figura 5.29	Mapa de concentração do íon magnésio (Mg^{+2} mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão	149
Figura 5.30	Mapa de concentração do íon sulfato (SO_4^{-2} , mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.....	151
Figura 5.31	Mapa de concentração do íon nitrato (NO_3^- , mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.....	153
Figura 5.32	Mapa de concentração de sólidos totais dissolvidos (mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão	156
Figura 5.33	Mapa de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão	157
Figura 5.34	Mapa de turbidez (uT) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão	159
Figura 5.35	Mapa de potabilidade da água nos pontos de amostragem, baseado nos parâmetros cloreto, sódio, sulfato, nitrato, STD e turbidez	161
Figura 6.1	Mapa geológico da Ilha do Maranhão com a localização das seções GPR e fotografias correspondentes às linhas de números 3, 6, 14, 15, 29 e 30. ...	164
Figura 6.2	Padrões de reflexão nas seções GPR: A) Rf1: estratificação plano-paralela; B) Rf2: estratificação plano-paralela à convoluta; C) Rf3: estratificação cruzada tangencial acanalada; D) estratificação plano-paralela	166

Figura 6.3	Interpretação das feições de radar na Ilha do Maranhão: A) seção GPR 3; B) seção GPR 6; C) seção GPR 14; D) seção GPR15; E) seção GPR 29; F) seção GPR 30).....	168
Figura 6.4	Seções GPR investigadas: A) seção GPR 3; B) seção GPR 14; C) seção GPR15; D) seção GPR 29; E) seção GPR 30.	169
Figura 6.5	Descontinuidades verticais associadas a falhas e fraturas nas seções GPR: A) trecho da linha 24; B) trecho da linha 28; C) trecho da linha 29; D) trecho da linha 30.....	171
Figura 7.1	Integração dos dados raster de transmissividade, condutividade hidráulica, vazão específica e vazão autorizada para composição de classes de produtividade de aquífero	174
Figura 7.2	Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru (a) na Ilha do Maranhão: b) produtividade da transmissividade; c) produtividade da condutividade hidráulica; d) produtividade da vazão específica; e) produtividade de vazão autorizada; f) distribuição em área da produtividade por região hidrográfica	175
Figura 7.3	Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão (a) versus contextualização geoambiental: b) geologia; c) geomorfologia; d) solos; e) cobertura vegetal e uso da terra.....	177
Figura 7.4	Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão (a) versus parâmetros geomorfométricos: b) altimetria; c) declividade; d) orientação de vertentes; e) formas de terreno.	178
Figura 7.5	Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão (a) versus parâmetros hidrogeológicos: b) carga hidráulica; c) profundidade da interface Barreiras-Itapecuru; d) profundidade da interface água doce/água salgada; e) assinatura hidroquímica da água.....	180
Figura 7.6	Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão (a) versus saneamento ambiental: b) abastecimento por poço ou nascente; c) esgotamento sanitário via rede geral; d) coleta de lixo; e) fontes prováveis de contaminação da água subterrânea	182
Figura 7.7	Espacialização das reservas renováveis na área de estudo através da operação de média zonal em ambiente SIG.....	184
Figura 7.8	Localização e variação do nível freático nos poços de monitoramento em 18/03/2015, 26/05/2015, 14/07/2015 e 15/09/2015.....	185

Figura 7.9	Avaliação das reservas de água do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão: a) reserva explotável; b) reserva renovável; c) reserva permanente	186
Figura 7.10	Espacialização das reservas permanentes na área de estudo através da operação de média zonais em ambiente SIG	187
Figura 7.11	Detalhamento das áreas de recarga: a) altitude; b) declividade; c) formas de terreno; d) uso do solo, unidades de conservação e influência da interface água doce-água salgada	190
Figura 7.12	Seções 2D de poços tubulares: a) Sistema Produtores do Paciência I; b) Sistema Produtor do Sacavém; c) localização dos poços tubulares na mapa de declividade	192
Figura 7.13	Avaliação das áreas de recarga do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão: a) mapa temático de áreas de recarga; b) unidades de conservação; c) carga hidráulica ≥ 20 m e profundidade da interface água doce-água salgada; d) área de afloramento do aquífero Itapecuru; e) distribuição das áreas de recarga por região hidrográfica.....	194

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1	Erro teórico ou máximo permitido segundo Custódio e Llamas (1983).....	17
Tabela 2.2	Erro teórico ou máximo permitido segundo Logan (1965)	17
Tabela 3.1	Dimensão territorial e populacional dos municípios da Ilha do Maranhão	21
Tabela 3.2	Unidades de conservação na Ilha do Maranhão.....	58
Tabela 3.3	Balanço hídrico climatológico normal, segundo Thornthwaite e Matter (1955), para estação convencional de São Luís/MA, no período de 1961-1990	61
Tabela 4.1	Índices de sustentabilidade hídrica para Ilha do Maranhão	77
Tabela 4.2	Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero através do método GOD no Reservatório do Batatã	82
Tabela 4.3	Sistemas produtores de água na Ilha do Maranhão.....	88
Tabela 4.4	Sistemas de esgotamento sanitário na Ilha do Maranhão	89
Quadro 5.1	Quantidade de poços cadastrados na Ilha do Maranhão, quanto ao tipo de aquífero, regime de fluxo e solução analítica aplicada e sinalizada	124
Tabela 5.1	Estatísticas médias de transmissividade (T), coeficiente de armazenamento (S), espessura saturada (b) e condutividade hidráulica (K), para o Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, na Ilha do Maranhão, referentes 146 poços tubulares	130
Tabela 5.2	Estatísticas das amostras de águas subterrâneas (valores em mg/L)	138

LISTA DE SIGLAS

ALUMAR	Complexo de Alumínio do Maranhão
ANA	Agência Nacional de Águas
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
CAEMA	Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão
CCCT	Com Coleta e Com Tratamento
CCST	Com Coleta e Sem Tratamento
CNARH	Cadastro Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONERH/MA	Conselho Estadual do Recursos Hídricos do Maranhão
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CTRS	Central de Tratamento de Resíduos Sólidos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
ENOS	El Niño - Oscilação Sul
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GERCO	Gerenciamento Costeiro do Maranhão
GOD	Groundwater occurrence; Overall aquifer class; Depth to groundwater
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPR	Ground Penetrating Radar
IAP	Índice de Ativação da Potencialidade
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMESC	Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos
INC	Instituto Nacional de Criminalística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IUD	Índice de Utilização da Potencialidade

MDE	Modelo Digital de Elevação
MS	Ministério da Saúde
NEB	Norte do Nordeste do Brasil
NUGEO	Núcleo Geoambiental
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
ONU	Organização das Nações Unidas
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PERH	Política Estadual de Recursos hídricos
PMSL	Prefeitura Municipal de São Luís
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PPP	Precise Point Positioning
RMGSL	Região Metropolitana da Grande São Luís
SCM	Sistemas Convectivos e Mesoescala
SCST	Sem Coleta e Sem Tratamento
SEGRH/MA	Sistema Estadual de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais
SI	Solução Individual
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SINFRA	Secretaria de Estado da Indústria e Comércio e Energia
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SIRH/MA	Sistema de Recursos Hídricos do Estado do Maranhão
SNIRH	Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos
SQE	Soma dos Quadrados dos Erros
SRH	Superintendência do Recursos Hídricos
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TSM	Temperatura de Superfície
VALE	Companhia Vale do Rio Doce
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCEM	Zona Costeira e Estuarina do Maranhão
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	4
1.2 Hipótese	5
1.3 Objetivos geral e específicos	5
1.4 Estrutura do trabalho	6
CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA	7
2.1 Levantamento bibliográfico	8
2.2 Contextualização geoambiental da área de estudo.....	8
2.3 Qualificação do panorama das águas superficiais e subterrâneas	10
2.4 Tratamento e espacialização de parâmetros hidrogeológicos	12
2.4.1 Banco de dados de poços tubulares.....	12
2.4.2 Parâmetros hidráulicos e dimensionais	13
2.4.3 Parâmetros hidrodinâmicos	15
2.4.4 Parâmetros hidroquímicos.....	16
2.5 Levantamentos de radar de penetração no solo	18
2.6 Síntese hidrogeológica e contribuições ao processo de gestão.....	19
CAPÍTULO 3 - CONTEXTUALIZAÇÃO GEOAMBIENTAL DA ILHA DO MARANHÃO	21
3.1 Geologia	24
3.2 Geomorfologia	36
3.3 Solos.....	49
3.4 Cobertura vegetal e uso da terra	52
3.5 Clima	57
CAPÍTULO 4 - PANORAMA DAS ÁGUAS NA ILHA DO MARANHÃO	65
4.1 Recursos hídricos superficiais	67
4.2 Recursos hídricos subterrâneas	71
4.3 Sistemas de abastecimento urbano	84
4.4 Sistemas de esgotamento sanitário.....	89
4.5 Destinação dos resíduos sólidos.....	89
4.6 Fontes prováveis de contaminação	91

CAPÍTULO 5 - CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DOS	
AQUÍFEROS NA ILHA DO MARANHÃO	95
5.1 Banco de dados de poços tubulares	95
5.2 Parâmetros hidráulicos e dimensionais.....	99
5.3 Parâmetros hidrodinâmicos	112
5.4 Parâmetros hidroquímicos	135
CAPÍTULO 6 - RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO APLICADO AOS	
SEDIMENTOS CENOZÓICOS DA ILHA DO MARANHÃO	163
6.1 Análise e interpretação das seções de radar	165
CAPÍTULO 7 - SÍNTESE HIDROGEOLÓGICA E CONTRIBUIÇÕES AO	
PROCESSO DE GESTÃO DO SISTEMA AQUÍFERO BARREIRAS-	
ITAPECURU NA ILHA DO MARANHÃO	172
7.1 Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru.....	174
7.2 Avaliação das reservas de água subterrânea	183
7.3 Definição das áreas de recarga local e regional.....	189
7.4 Contribuições ao processo de gestão do Sistema Aquífero Barreiras-	
Itapecuru.....	195
7.4.1 Arcabouço legal e institucional	195
7.4.2 Conservação, preservação e recuperação	197
7.4.3 Cadastro de poços tubulares e sistemas de informação de recursos hídricos.....	200
7.4.4 Monitoramento quantitativo e qualitativo	202
7.4.5 Enquadramento das águas subterrâneas	205
7.4.6 Autorização para perfuração de poços e outorga de direito de uso da água	206
7.4.7 Capacitação profissional e ações educativas.....	210
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	211
REFERÊNCIAS.....	218
APÊNDICE A – Cadastro de poços tubulares empregados na caracterização dos	
parâmetros hidráulicos, dimensionais e hidrodinâmicos do Sistema Aquífero	
Barreiras-Itapecuru.....	245
APÊNDICE B - Poços tubulares empregados na caracterização hidroquímica do	
Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru	250

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A Ilha do Maranhão¹, localizada na porção norte do litoral brasileiro, é constituída politicamente por quatro municípios: São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa. Sua ocupação remete à colonização portuguesa da capitania do Maranhão cujo êxito foi marcado pela expulsão dos franceses, na Batalha de Guaxenduba, em 1614. A posse do território conquistado culminou na implantação do primeiro traçado urbano, da então Vila de São Luís, pelo engenheiro-mor Francisco Frias de Mesquita, localizada nas imediações do forte homônimo, erigido pelos gauleses em 1612 (D'ABBENVILLE, 1874; D'EVREUX, 1874/2002, LACROIX, 2006).

Apesar da fundação assíncrona dos demais municípios – São José de Ribamar em 1627, Paço do Lumiar em 1761 e Raposa mais recentemente, em 1994 – o processo de ocupação da Ilha do Maranhão foi desencadeado a partir das transformações urbanísticas de São Luís. Até a década de 1970, as alterações no traçado primário de Frias de Mesquita situaram-se sobretudo no território entre rios Anil e Bacanga. Elas foram divididas em seis fases pelo IPHAN (2006) e remetem a implantação; expansão; reestruturação; melhorias e valorização arquitetônica; diferenciação funcional, normatização e controle do espaço urbano; e crescimento e modernização urbana.

Os períodos antes e após 1965 foram denominados de Urbanização Tradicional e Modernista, com o ulterior marcado pelo novo eixo de expansão da cidade, favorecido pela construção da Ponte José Sarney, na década de 1970, encurtando as distâncias entre o núcleo inicial e a faixa litorânea. Esse período foi assinalado pela inserção de grandes projetos nacionais, como o Complexo de Alumínio do Maranhão (ALUMAR) e Projeto Grande Carajás; pela construção da barragem do Bacanga e dos portos do Itaqui e da Ponta da Madeira; pelo aumento das correntes migratórias interior-capital; e pela implantação de amplos conjuntos habitacionais para população de baixa renda na região central da Ilha do Maranhão (BURNETT, 2002).

As transformações nos espaços após 1965 também estão relacionadas aos seguintes fatos: aprovação do Plano Diretor de São Luís de 1977; falência das políticas habitacionais e

¹ O termo Ilha do Maranhão é usado em alusão a designação Upaon-Açu, dada pelos indígenas que habitavam primitivamente a ilha, significando Ilha Grande do Maranhão. O termo Maranhão, conhecido entre os portugueses, fazia referência à localização da ilha no triplo estuário dos rios Mearim, Itapecuru e Munim (FEITOSA, 1987).

surgimento de empreendimentos imobiliários particulares; ações de revitalização e reconhecimento do Centro Histórico de São Luís como Patrimônio Cultural da Humanidade; construção da Avenida Litorânea e urbanização da Lagoa da Jansen; emancipação do município de Raposa em 1994; criação da Lei de Zoneamento, Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo de São Luís e da Região Metropolitana da Grande São Luís; movimentos sociais de lutas por moradias; criação dos planos diretores de São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa, entre outros (FONSECA NETO, 2002; BURNETT, 2002; COELHO, 2002; FERREIRA, 2002; LUZ, 2004; BURNETT E FERREIRA, 2009).

As mudanças na paisagem impulsionaram o aumento das demandas hídricas. Em vista disso, em 1980, houve a criação do Sistema Italuís, destinado ao abastecimento da Ilha do Maranhão a partir das águas do rio Itapecuru. A contribuição local se dá através do Reservatório do Batatã, criado em 1964, e dos rios da Prata e Mãe Isabel. Esses dois sistemas representam, hoje, aproximadamente 57% do recurso hídrico fornecido ao abastecimento da Ilha do Maranhão. O restante da água extraída, em torno de 43%, procede de poços tubulares operados pela Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão (CAEMA) e pelas prefeituras municipais.

Os poços tubulares na Ilha do Maranhão exploram as águas subterrâneas dos aquíferos Barreiras e Itapecuru. O primeiro, de idade miocênica, é constituído por arenitos pouco consolidados, argilas e argilitos; comumente ocorre como livre e devido a presença de níveis argilosos, localmente, há condições de confinamento. A profundidade média dos poços de 70 m e a vazão específica média de 5 m³/h/m conferem ao aquífero Barreiras potencialidade hidrogeológica alta, tendo em vista sua recarga pelas águas meteóricas e pela alimentação do rio Paciência (RODRIGUES *et al.* 1994; ANA, 2005).

O aquífero Itapecuru, de idade cretácea, é composto por arenitos, argilas, argilitos e intercalações de siltitos, folhelhos e calcários; possui grande abrangência nos estados do Maranhão, Pará e Tocantins, onde é comumente livre. Na Ilha do Maranhão, mostra-se confinado, com valores médios de profundidade dos poços e vazão específica de 85 m e 2,94m³/h/m, respectivamente. Na Província Sedimentar do Parnaíba, seu potencial hidrogeológico é considerado fraco a médio; na área de estudo é satisfatório para poços com vazão inferior a 40 m³/h e profundidade de até 250 m. Na área de estudo, sua recarga se dá pela drenança do aquífero miocênico, dificultada em parte, pelos estratos pelíticos (RODRIGUES, *et al.* 1994; ANA, 2005).

Entre os problemas que ameaçam a qualidade dos recursos hídricos na Ilha do Maranhão, a contaminação por efluentes domésticos é um dos mais recorrentes. De acordo com

o Atlas Esgotos (ANA, 2017b), da carga total produzida na Ilha do Maranhão (61.448.6 kg/dia), 77% retornam o meio ambiente sem tratamento. Os lançamentos de águas servidas sem o devido tratamento em rios, córregos e sistema de drenagem de águas pluviais; os vazamentos nas redes de esgoto; as descargas provenientes de fossas sépticas e outras formas de esgotamento são responsáveis por anomalias nos parâmetros que regulam a potabilidade da água (RABELO, 2006; SOEIRO, 2018; CORRÊA *et al.* 2019; ROCHA, 2019).

A ocupação dos espaços da Ilha até a década de 1970 estava concentrada nas regiões hidrográficas do Anil e Bacanga, retratando aspectos da Urbanização Tradicional (BURNETT, 1992). Com a mudança do eixo de expansão e as políticas habitacionais de 1970, a urbanização foi acentuada nas regiões do Paciência e Santo Antônio, onde se verificam as maiores cargas hidráulicas e topografia favorável à infiltração das águas meteóricas. O crescimento de áreas construídas e pavimentadas em detrimento de áreas vegetadas tem produzido aumento nas vazões máximas por ocasião de chuvas intensas nessas regiões, com frequentes registros de enxurradas, alagamentos e enchentes (CAVALCANTI JÚNIOR, 2016; COSTA *et al.*, 2017).

Na faixa costeira, o comprometimento nas áreas de recarga frente às práticas de uso do solo, o aumento das vazões de exploração e a profundidade dos poços tubulares acentuam os riscos de contaminação dos aquíferos pelo avanço da interface água doce/água salgada. A região do Itaqui-Bacanga, localizada na porção noroeste da Ilha do Maranhão, concentra um grande contingente populacional, indústrias e zona portuária. Seus aspectos geoambientais, as características hidráulicas e dimensionais dos aquíferos e a crescente exploração dos recursos hídricos subterrâneos têm condicionado problemas de contaminação dos poços tubulares por intrusão salina na região (SOARES, 2004).

A partir da década de 1960, a frota de veículos automotores teve um crescimento expressivo na Ilha do Maranhão, o que foi acompanhado pelo número de postos de revenda de combustíveis. Em 2019, de acordo com Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) eles totalizam 386 na área de estudo. As contaminações por vazamentos em tanques de armazenamento de combustíveis são uma ameaça à qualidade da água subterrânea e representam um fenômeno de abrangência mundial e detectado em cidades brasileiras. Os vazamentos procedem da corrosão dos tanques com término de sua vida útil. A contaminação dos aquíferos pelos compostos aromáticos da gasolina e o aumento de sua solubilidade pelo álcool etílico são relatados por Oliveira (1992), Corseuil e Marins (1997), Ferreira (2003), Brito *et al.* (2004), Tiburtius *et al.* (2004), Nunes e Corseuil (2007), Costa *et al.* (2009), entre outros.

Dessa forma, em face dos problemas ambientais decorrentes do processo de urbanização na Ilha do Maranhão e seu impacto na qualidade da água dos mananciais superficiais, a exploração dos recursos hídricos subterrâneos se apresenta como uma solução democrática e viável ao atendimento da crescente demanda dos usos consuntivos, sobretudo, abastecimento urbano/rural e industrial. No entanto, esse processo deve ocorrer em bases sustentáveis, de forma que as descargas extraídas não excedam as reservas renováveis. Para tanto, estudos quantitativos e qualitativos dos aquíferos Barreiras e Itapecuru precisam ser ampliados, com vistas ao mapeamento de suas recargas, estimativas de suas reservas, levantamento de seus agentes tensores e estabelecimento de ações de uso e gerenciamento de seus recursos.

1.1 Justificativa

Tendo em vista a expansão urbana na Ilha do Maranhão deflagrada notadamente a partir da década de 1970 e a consequente degradação dos mananciais superficiais, ocasionada, entre outros fatores, pelo lançamento de efluentes domésticos e industriais, tem-se que a principal fonte para abastecimento urbano/rural, industrial e outros usos consuntivos recai sobre os recursos hídricos subterrâneos. Na Ilha, os poços tubulares captam água dos aquíferos Barreiras e Itapecuru, cujos estudos partem de relatórios técnicos, trabalhos de conclusão de curso de graduação, algumas dissertações e teses de doutorado.

As pesquisas versam sobre aspectos relacionados à contaminação dos aquíferos, cadastro de poços tubulares, ações de gestão e dizem respeito a regiões relevantes da Ilha do Maranhão. Poucas abordagens aludem aos parâmetros dimensionais e hidrodinâmicos dos aquíferos em uma escala geográfica mais abrangente. Eles são recorrentes em relatórios técnicos de solicitação de perfuração de poços e de outorga direito de uso da água subterrânea, submetidos à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA), através da Superintendência de Recursos Hídricos.

Dessa forma, considerando-se: a) as condições insulares da área de estudo, sua geologia sedimentar em ambiente costeiro, marcado por expressivas amplitudes de marés, com exuberantes áreas de manguezal e regime pluviométrico notadamente de janeiro a junho; b) as transformações paisagísticas da área investigada frente ao processo de urbanização espontânea; c) a importância estratégica dos recursos hídricos subterrâneos para o desenvolvimento territorial da Ilha do Maranhão; surge a necessidade de se aprofundar os estudos hidrogeológicos dos aquíferos Barreiras e Itapecuru na Ilha do Maranhão, quanto aos seus

parâmetros hidráulicos, dimensionais, hidrodinâmicos e hidroquímicos, com vistas às suas potencialidades, disponibilidades e ações de gestão.

1.2 Hipótese

Em vista dos problemas ambientais advindos do processo de uso e ocupação da área de estudo, a pesquisa ora proposta visa confirmar a seguinte hipótese: **o conhecimento atual dos aquíferos na Ilha do Maranhão é suficiente para sua gestão adequada?**

1.3 Objetivos geral e específicos

Sob a égide da presente hipótese, a pesquisa tem por objetivo geral **caracterizar os aquíferos na Ilha do Maranhão em relação aos aspectos geográficos, geofísicos e hidrogeológicos.**

Especificamente, pretende-se:

- caracterizar o contexto geoambiental da Ilha do Maranhão quanto aos aspectos geológicos, geomorfológicos, pedológicos, de cobertura vegetal e uso da terra, e climáticos;
- descrever o panorama dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na Ilha do Maranhão;
- analisar a distribuição espacial dos parâmetros hidráulicos, dimensionais, hidrodinâmicos e hidroquímicos dos aquíferos na Ilha do Maranhão;
- interpretar os padrões de reflexão e as superfícies de descontinuidade em seções de radar de penetração no solo, aplicado aos sedimentos cenozóicos na Ilha do Maranhão;
- evidenciar as áreas de produtividade dos aquíferos na Ilha do Maranhão e sua relação com os aspectos geoambientais, hidráulicos, hidroquímicos e de saneamento ambiental;
- sistematizar o quadro institucional e legal dos recursos hídricos subterrâneos na Ilha do Maranhão e elencar as contribuições ao seu processo de gestão.

1.4 Estrutura do trabalho

A partir dos objetivos propostos, além do capítulo introdutório, a pesquisa encontra-se estruturada em outros sete capítulos, a saber:

- Capítulo 2: aborda a metodologia da pesquisa que contempla: levantamento bibliográfico, contextualização geoambiental da área de estudo, qualificação do panorama das águas na Ilha do Maranhão, caracterização hidrogeológica, síntese hidrogeológica e contribuições ao processo de gestão do sistema aquífero;
- Capítulo 3: descreve a contextualização geoambiental da área de estudo em termos de geologia, geomorfologia, solos, cobertura vegetal e uso da terra e clima;
- Capítulo 4: apresenta o panorama das águas na Ilha do Maranhão, em que são tratados os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, os sistemas de abastecimento urbano e de esgotamento sanitário, a destinação dos resíduos sólidos e as fontes prováveis de contaminação dos recursos hídricos;
- Capítulo 5: exhibe a caracterização hidrogeológica dos aquíferos na Ilha do Maranhão segundo os parâmetros hidráulicos, dimensionais, hidrodinâmicos e hidroquímicos;
- Capítulo 6: discorre acerca dos fundamentos, aquisição, processamento e análise das seções de radar de penetração no solo, concernentes aos sedimentos cenozóicos na Ilha do Maranhão;
- Capítulo 7: remete à síntese hidrogeológica, com enfoque na produtividade do sistema aquíferos, suas reservas e áreas de recarga, e as contribuições ao seu processo de gestão;
- Capítulo 8: alude às conclusões da pesquisa e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA

Na Ilha do Maranhão, as águas subterrâneas foram investigadas por Silva e Rebouças (1972), Aqua-Plan (1972), Rodrigues *et al.* (1994), Sousa (1997), Costa (2003), Luz (2003), Soares (2004), Pereira (2006), entre outros. Com exceção do trabalho de Sousa (1997), que propôs uma compartimentação hidrogeológica da Ilha, todos os demais abordam regiões específicas da área objeto de estudo, como as do Paciência, Sacavém, Itaqui-Bacanga, Reservatório do Batatã, Complexo Ponta da Madeira, entre outras.

As temáticas recorrentes dizem respeito à composição de cadastro de pontos d'água, contaminação das águas subterrâneas, definição de áreas de recarga e descarga e proposição de ações de gestão em áreas localizadas. Não se verificam pesquisas que abordam integralmente a Ilha do Maranhão em seus aspectos geográficos, geofísicos e hidrogeológicos, com levantamento de áreas prioritárias, de maior produtividade, destinadas à pesquisas futuras, de cunho detalhado.

Diante do exposto, em virtude da dimensão territorial da área de estudo; da presença significativa de áreas estuarinas; das variações expressivas de marés e suas interferências nos níveis estáticos e na penetração das águas salinas nos aquíferos costeiros; a presente pesquisa foi delineada como um estudo preliminar ou de reconhecimento dos aquíferos na Ilha do Maranhão.

De acordo com Custódio e Llamas (1983, *apud* FEITOSA; FEITOSA, 2008, p. 180), neste tipo de pesquisa “o objetivo principal é a identificação dos aquíferos mais importantes e suas recargas e descargas, verificação da qualidade das águas e uma primeira estimativa das suas geometrias e parâmetros hidrodinâmicos.” Essa tipologia de pesquisa conduz à eleição de áreas estratégicas para estudos detalhados posteriores.

Nesse sentido, a metodologia da pesquisa contempla as seguintes etapas: levantamento bibliográfico; contextualização geoambiental da área de estudo; qualificação do panorama das águas superficiais e subterrâneas; caracterização hidrogeológica; síntese hidrogeológica e contribuições ao processo de gestão do sistema aquífero, as quais são descritas a seguir.

2.1 Levantamento bibliográfico

Esta etapa compreendeu a aquisição, leitura e análise de livros impressos e digitais, teses de doutorado, dissertações de mestrado, trabalhos de conclusão de cursos de especialização e de graduação; artigos publicados em anais de eventos, em periódicos nacionais e internacionais; relatórios ambientais locais, regionais e nacionais; processos de solicitação de perfuração de poços e de outorga de água subterrânea; entre outros documentos. Também foram analisados documentos históricos digitalizados e disponibilizados através de bibliotecas *on line*.

A composição do documento ora exposto foi baseada nas Normas Brasileiras (NBR) 10520:2002 (Citações em documentos); 6028:2003 (Resumos); 14724:2011 (Trabalhos acadêmicos); 6027:2012 (Sumário); NBR 6024:2012 (Numeração progressiva das seções de um documento); e 6023:2018 (Referências – Elaboração). Todas as NBR foram consultadas na base de dados Target GEDWeb, da Biblioteca Central, da Universidade de Brasília.

2.2 Contextualização geoambiental da área de estudo

Essa etapa envolveu o levantamento, aquisição e organização de dados documentais e cartográficos concernentes aos temas: localização, geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura vegetal e uso da terra, clima e recursos hídricos. Os dados cartográficos (temáticos, cadastrais, modelos numéricos de terreno, imagens orbitais de sensoriamento remoto, censitários, entre outros) foram organizados no sistema de informação geográfica (SIG) ArcMap, v.10.5 (ESRI INC.), segundo a projeção UTM Zona 23S, modelo da Terra SAD69 e escala 1:250.000.

A cartografia das unidades de mapeamento dos dados temáticos de geologia, geomorfologia, pedologia, cobertura vegetal e uso da terra, de expansão urbana, regiões hidrográficas da Ilha do Maranhão, entre outros, foi apoiada no uso sistemático dos dados orbitais de sensoriamento remoto, órbita-ponto, 220/62, do MSS/Landsat-1, de 14/07/1973, e do TM/Landsat-5, de 20/06/1984, 23/09/1995, 24/11/2006 e 04/02/2010 (DGI/INPE); do modelo de elevação digital de altimetria e suas derivações, referentes à quadrícula 02S45, escala 1:250.000, do Topodata (VALERIANO, 2008); e das cartas topográficas da Divisão de Serviço Geográfico (DSG), na escala de 1:10.000.

A cartografia foi fundamentada no conceito de unidades de paisagem (TRICART, 1977, BERTRAND, 2007); constituída por componentes abióticos (rocha, solo, relevo, clima, recursos hídricos, ...) e bióticos (organismos animais e vegetais); que mantêm entre si um

equilíbrio dinâmico; e são passíveis de representação em escalas que variam de quilômetros a centenas de quilômetros. Também foi pautada no potencial das imagens orbitais de sensoriamento remoto para estudos integrados da paisagem (FLORENZANO, 1993; CREPANI *et al.* 1996). Partindo desses pressupostos, os dados geoespaciais tiveram seus limites conformados aos padrões texturais de relevo e drenagem, e de uso e cobertura vegetal das imagens orbitais, e dos modelos de elevação digital de altimetria e suas derivações morfométricas.

Quanto aos aspectos gerais, foram criados os mapas temáticos de localização da área de estudo no Golfão Maranhense e na Zona Costeira e Estuarina do Maranhão; de divisão política da Ilha do Maranhão e o de seu contexto regional do Estado. Para tanto, foram empregadas as malhas de municípios (IBGE, 2018a), microrregiões IBGE (2018b) e mesorregiões geográficas (IBGE, 2018c); de localidades, hidrográfica, rodoviária, ferroviária, portos e aeroportos (IBGE, 2017).

Os mapas temáticos de feições estruturais e unidades geológicas da Bacia Intracratônica de São Luís e da Ilha do Maranhão foram fundamentados nos levantamentos e pesquisas geológicas realizadas por Brasil (1973), Aranha *et al.* (1988), Rodrigues *et al.* (1990, 1994), Rossetti (1996, 2000, 2001a), Rossetti e Truckenbrodt (1997), Veiga Júnior (2000), Almeida (2000), Vasconcelos *et al.* (2004), Sousa *et al.* (2012), Rossetti *et al.* (2013), entre outros.

O mapa temático de compartimentação do relevo da Ilha do Maranhão foi baseado na taxonomia do mapeamento geomorfológico (IBGE, 2009); nos mapas geomorfológico (IBGE, 2011a) e de geodiversidade do Estado do Maranhão (DANTAS *et al.*, 2013); nas pesquisas de Brasil (1973), Maranhão (1998), Bezerra (2011), Silva (2012), entre outros. A caracterização morfológica apoiou-se nas imagens orbitais de sensoriamento remoto e no modelo de elevação digital de altimetria e suas derivações geomorfométricas locais: declividade, orientação de vertente, curvaturas horizontal e vertical, formas de terreno e relevo sombreado do Topodata (VALERIANO, 2008).

O mapa temático de solos da área de estudo foi baseado no Pedológico do Maranhão, na escala 1: 400.000 (IBGE, 2011b) e no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS *et al.*, 2013). O mapa temático de cobertura vegetal e o uso da terra da Ilha do Maranhão foi resultante da classificação das imagens orbitais TM/Landsat-5, órbita-ponto 220/62, de 02/04/2010, bandas espectrais de 1 a 5 e 7 (DGI/INPE), empregando-se o algoritmo K-Médias (SCHOWENGERDT, 2006; MATHER, 2010). A nomenclatura das classes temáticas foi estabelecida conforme Manual Técnico de Vegetação Brasileira (IBGE, 2013).

Sobre esse mapa, repousaram as áreas especiais obtidas junto ao Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (MMA, 2006).

O mapa temático de expansão urbana de 1973 a 2010 foi criado a partir das imagens orbitais MSS/Landsat-1 e TM/Landsat-5. As bandas espectrais MSS-4 a MSS-7 (14/07/1973) e TM1 a TM5 e TM7 (20/06/1984, 23/09/1995, 24/11/2006 e 04/02/2010) foram submetidas ao algoritmo K-Médias (SCHOWENGERDT, 2006; MATHER, 2010). Para cada data, foram extraídas as áreas urbanas e de solo exposto, designadas como expansão urbana, as quais foram sobrepostas do registro mais recente para o mais antigo.

A caracterização climática da Ilha do Maranhão foi baseada nas Normais Climatológicas de 1961 a 1990, do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2011), da estação meteorológica convencional de São Luís/MA (82280), localizada à 2° 32'S, 44°13'W e 50m de altitude. Sobre os dados de temperatura média e de precipitação acumulada mensais foram aplicadas as classificações climáticas de Köppen e Thornthwaite. Em seguida, foram analisados os sistemas meteorológicos de grande escala que modulam o tempo e clima das regiões tropicais, como o Norte do Nordeste do Brasil.

2.3 Qualificação do panorama das águas superficiais e subterrâneas

Em relação ao panorama das águas superficiais e subterrâneas na área de estudo, foram elaborados mapas temáticos de bacias e sistemas hidrográficos do Estado do Maranhão; de regiões hidrográficas do Brasil e das regiões hidrográficas da Ilha do Maranhão. Para tanto, foram empregados dados do Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão (NUGEO, 2016); do Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (SNIRH, 2017); e do Projeto de Gerenciamento Costeiro do Maranhão – GERCO (1998) e de Araújo *et al.* (2009).

O mapa de proporção da população por região hidrográfica foi composto a partir da grade estatística - quadrante ID076 (IBGE, 2010) - a qual foi importada e recortada segundo os limites das regiões hidrográficas da Ilha do Maranhão. Em seguida, foi calculada a população absoluta de cada região hidrográfica e os valores relativos em relação à população total da área de estudo.

Os mapas de domínios hidrogeológicos do Brasil e de sistemas aquíferos do Estado do Maranhão foram criados a partir dos dados do Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo (DINIZ *et al.* 2014). O mapa de ocorrência e classificação das águas subterrâneas da Ilha do

Maranhão (SOUSA, 1997) foi adaptado aos limites das regiões hidrográficas da Ilha do Maranhão.

Quanto ao saneamento ambiental da área objeto de estudo, os mapas temáticos de abastecimento, de esgotamento sanitário e de coleta de lixo foram produzidos a partir da malha de setores censitários (IBGE, 2010) e das informações por setor censitário contidas no arquivo Domicílio01_MA, disponível no site do IBGE. Do total de 241 variáveis incluídas nesse arquivo, foram processadas as seguintes:

- V002: número de domicílios particulares permanentes;
- V012: número de domicílios particulares permanentes abastecidos por água da rede geral;
- V013: número de domicílios particulares permanentes servidos por poço ou nascente no terreno ou na propriedade;
- V017: número de domicílios particulares permanentes com banheiro de uso exclusivo dos moradores ou sanitário e esgotamento sanitário via rede geral ou pluvial;
- V035: número de domicílios particulares permanentes com lixo coletado.

Para cada setor censitário, foram calculados os seguintes dados relativos:

- $\frac{V012}{V002}$: proporção dos domicílios particulares permanentes abastecidos por água da rede geral;
- $\frac{V013}{V002}$: proporção dos domicílios particulares permanentes servidos por água de poço ou nascente no terreno ou na propriedade onde estão construídos;
- $\frac{V017}{V002}$: proporção dos domicílios particulares permanentes com banheiro de uso exclusivo dos moradores ou sanitário e esgotamento sanitário via rede geral ou pluvial; e
- $\frac{V035}{V002}$: proporção dos domicílios particulares permanentes com coleta de lixo diretamente por serviço de limpeza ou em caçamba de serviço de limpeza.

As proporções calculadas foram inseridas na tabela de atributos do arquivo vetorial de setores censitários, no ArcMap, v.10.5 (ESRI INC.) e, em seguida, agrupadas segundo três intervalos de classes a partir dos valores de média (μ), desvio padrão (σ), mínimo (*mín*) e

máximo (*máx.*), a saber: $[\text{mín}, \mu - \frac{\sigma}{2}[; [\mu - \frac{\sigma}{2}, \mu + \frac{\sigma}{2}] \text{ e }]\mu + \frac{\sigma}{2}, \mu + \frac{\sigma}{2}]$. Essa operação culminou na composição dos mapas temáticos supracitados.

Em relação às fontes prováveis de contaminação das águas subterrâneas na área de estudo, foram cartografados os aterros e lixões sanitários, cemitérios, estações de tratamento de esgoto, propriedades rurais de hortifruticultura, áreas de extração de areia e argila, de rejeitos industriais e os postos de revenda de combustíveis. Estes últimos tiveram suas coordenadas geográficas obtidas mediante trabalho de campo realizado na área de estudo entre 2011 e 2012.

2.4 Tratamento e espacialização de parâmetros hidrogeológicos

Essa etapa contemplou três fases: composição de um banco de dados de poços tubulares; espacialização de parâmetros hidráulicos, dimensionais, hidrodinâmicos e hidroquímicos; e levantamentos de radar de penetração no solo.

2.4.1 Banco de dados de poços tubulares

O banco de dados de poços tubulares foi construído a partir de registros provenientes de Acqua-Plan (1972), Rodrigues *et al.* (1994), Soares (2004), Correia e Pires (2006), Pereira (2006), Prefeitura Municipal de São Luís (PMSL), CAEMA e Superintendência de Recursos Hídricos (SRH) da SEMA. Dessa última, também foram considerados 104 processos de solicitação de outorga de direito da água subterrânea, de 2009 a 2012.

Os registros pontuaram os parâmetros de localização, geológicos, hidrogeológicos, hidráulicos, hidrodinâmicos, operacionais de captação, construtivos, entre outros. Eles foram analisados e consistidos em relação aos seguintes critérios: existência de poços com coordenadas geográficas semelhantes; poços sem coordenadas geográficas; poços com coordenadas geográficas fora da área de estudo; poços com coordenadas geográficas inconsistentes; poços com coordenadas geográficas com dificuldade de leitura; poços sem perfis litológico e construtivo; e poços com perfis litológico e construtivos com dados ausentes, inconsistentes ou com dificuldades de leitura.

Após esse procedimento, os poços analisados e consistidos, em formato Microsoft Excel, foram importados para o sistema de gerenciamento, análise e visualização de dados ambientais e de água subterrânea - HydroGeo Analyst, v.2.16.1 (WATERLOO HYDROGEOLOGIC). A introdução das informações referentes aos perfis litológicos e

construtivos permitiu: a uniformização dos perfis segundo um padrão, uma vez que os mesmos provieram de fontes diversas, com estilos diferentes; a criação de seções 2D, com dados de nível estático, posição dos filtros, favorecendo o reconhecimento dos sistemas aquíferos presentes na área de estudo.

2.4.2 Parâmetros hidráulicos e dimensionais

A espacialização dos registros de poços se deu através de dois tipos de representação de dados espaciais: vetorial e raster. O primeiro contemplou um arquivo de pontos em cuja tabela foram armazenados atributos temáticos (requerente, município, bairro, finalidade, executor, aquífero captado, entre outros) e numéricos (número de ordem, profundidade, nível estático, nível dinâmico, rebaixamento, vazão de teste, entre outros). Essa camada de pontos permitiu a análise dos registros de poços em associação com outros dados espaciais produzidos na contextualização geoambiental.

Os registros de poços contendo os parâmetros nível estático, nível dinâmico, rebaixamento, vazão de teste e vazão específica, em formato Microsoft Excel, foram importados para o Surfer v.15 (GOLDEN SOFTWARE INC.). Eles foram submetidos à interpolação pelo método de Krigagem, gerando produtos raster (imagens em níveis de cinza) com 30m de resolução espacial. Esses produtos foram importados para o ArcMap, v.10.5 (ESRI INC.) e classificados em intervalos de valores, resultando em mapas temáticos quantitativos.

Para criação dos mapas temáticos de carga hidráulica, potenciométrico e direção de fluxo, inicialmente, procedeu-se ao nivelamento dos pontos d'água. Para isso, a camada de poços foi sobreposta ao MDE de altimetria, referente à quadrícula 02s45, com resolução espacial de 30m, do TOPODATA (VALERIANO, 2008), a partir do qual foi obtida a cota da boca do poço (CB). A carga hidráulica (h) foi calculada, subtraindo-se a cota da boca do poço pela sua respectiva profundidade (FEITOSA; FEITOSA, 2008). Os valores de carga hidráulica foram interpolados no Surfer e o raster produzido foi usado para criação do mapa de contornos (superfície potenciométrica) e de direção de fluxo.

O cálculo dos valores de carga hidráulica levou em consideração todos os registros de poços, não se fazendo diferenciação quanto ao aquífero captado. Isso porque, na grande maioria deles, os filtros acham-se posicionados em ambos os aquíferos: terciário e cretáceo, tornando complexa a definição de superfícies potenciométricas individualizadas. Para fundamentar essa decisão, procedeu-se à uma análise da profundidade inicial e final dos filtros, em conformidade com a informação do aquífero captado.

O mapa temático de profundidade da interface entre os aquíferos Barreiras e Itapecuru foi produzido mediante observação dos perfis litológicos e construtivos. De acordo com Acqua-Plan (1972), a transição entre as duas unidades estratigráficas está condicionada à presença de uma camada confinante ora formada por níveis de argila e calcário, calcarenito, calcilutito, ora por argilas. Esse entendimento foi empregado por Sousa (1997) e Soares (2004) para a criação de perfis geotopográficos na Ilha do Maranhão.

No Excel, os valores de profundidade da camada de transição foram subtraídos daqueles associados ao nível estático, obtendo-se a espessura saturada do aquífero Barreiras. Esses registros bem como os primeiros foram submetidos à interpolação pelo método de Krigagem, produzindo dois dados raster com 30 m de resolução espacial, os quais foram importados para o ArcMap, v.10.5 (ESRI INC.), e cujos valores foram agrupados em intervalos de classes. Essas operações culminaram nos mapas temáticos de profundidade da interface Barreiras-Itapecuru e de espessura saturada do aquífero do Barreiras.

Quanto a profundidade da interface água doce-água salgada (h_s), seus valores foram calculados mediante o modelo de Ghyben-Herzberg para um aquífero costeiro, o qual admite a existência de um equilíbrio hidrostático na região de contato entre a água doce e água salgada estacionária (MANOEL FILHO, 2008). A profundidade da interface (h_s) em qualquer ponto é dependente da altura da lâmina d'água acima do nível do mar (h_d), conforme Equação 2.1, onde o valor de $\delta = 40$ é função dos pesos específicos da água doce ($\gamma_d = 1,000 \text{ g/cm}^3$) e da água salgada ($\gamma_s = 1,025 \text{ g/cm}^3$), os quais são representados na Equação (2.2)

$$h_s = \delta \cdot h_d \quad (2.1)$$

$$\delta = \frac{\gamma_s}{(\gamma_s - \gamma_d)} \quad (2.2)$$

Na área de estudo, o nível médio do mar foi obtido mediante verificação das tábuas de marés do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil, referentes às estações Porto do Itaqui, Terminal Ponta da Madeira, São Luís e Terminal da Alumar, para o ano de 2019. Esse valor foi subtraído da carga hidráulica dos 106 poços tubulares, obtendo-se a correspondente altura da lâmina d'água (h_d) e, por conseguinte, a profundidade da interface água doce-água salgada (h_s).

Os valores de h_s foram interpolados pelo método de Krigagem no Surfer v.15, obtendo-se uma grade regular com resolução espacial de 30 m, a qual foi importada para o ArcMap,

v.10.5 (ESRI INC.). Os valores foram agrupados em intervalos de classes, produzindo-se, ao final, o mapa de profundidade da interface água doce-água salgada, o qual foi analisado à luz das regiões hidrográficas da Ilha do Maranhão e dos parâmetros hidroquímicos.

2.4.3 Parâmetros hidrodinâmicos

Em relação aos parâmetros hidrodinâmicos, foi programada a realização de testes de aquíferos nos poços tubulares dos sistemas produtores do Sacavém (13 poços, com profundidade média de 150 m e vazão de 0,25 m³/s, no aquífero Itapecuru) e do Paciência I e II (15 poços, com profundidade média de 60 m e vazão de 0,75 m³/s, no aquífero Barreiras) para estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos: condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S). A impossibilidade de realização desses procedimentos foi contornada com o emprego dos registros de testes de bombeamento dos poços inventariados.

Para tanto, percorridos os aspectos conceituais e os métodos aplicados a testes de bombeamento, investigou-se a solução analítica mais adequada às condições de fluxo para os aquíferos na área de estudo. Nesse sentido, por meio dos perfis litológicos e construtivos, classificou-se os aquíferos na posição das seções filtrantes, se livre ou confinado, e verificou-se a tipologia dos materiais geológicos das camadas aquíferas e dos horizontes confinantes, bem como sua capacidade de drenança. Dos registros de ensaios de bombeamento, com vistas a qualificação do regime de fluxo, se estacionário ou transiente, foram observados os aspectos: duração do teste, vazão de teste, rebaixamentos e método analítico aplicado pelo executor na estimação dos parâmetros hidrodinâmicos.

Esse método analítico foi confrontado ao obtido mediante inserção dos dados de testes de bombeamento no software AquiferTest Pro. v. 10.00 (Waterloo Hydrogeologic). A qualidade do ajuste foi avaliada pela soma dos quadrados dos erros (SQE), entre os valores observados e calculados. Os resultados dessa operação foram sistematizados em um quadro estruturado de acordo com o tipo de aquífero (nas linhas), regime de fluxo (nas colunas) e as soluções analíticas aplicada e ajustada. Ao final desse procedimento, verificou-se o modelo de fluxo mais recorrente e o método analítico mais bem avaliado para os poços cadastrados na pesquisa.

As estimativas de transmissividade, coeficiente de armazenamento e condutividade hidráulica, oriundas da solução analítica mais bem avaliada no AquiferTest, foram organizadas em uma planilha no Microsoft Excel e importados para o Surfer v.15 (GOLDEN SOFTWARE

INC.). Elas foram submetidas à interpolação pelo método de Krigagem, gerando produtos raster com 30m de resolução espacial.

Para os dois primeiros parâmetros, os níveis de cinza foram classificados segundo os limiares preceituados no Manual de Cartografia Hidrogeológica (DINIZ *et al.* 2014), os quais avaliam os aquíferos conforme a sua produtividade. Os registros de coeficiente de armazenamento, por sua vez, foram classificados conforme as ordens de grandeza esperadas para aquíferos livre, de 2 a 30% (WALTON, 1970), e confinado, 10^{-5} a 10^{-2} (FITT, 2015). Esses procedimentos resultaram na obtenção dos mapas temáticos dos parâmetros hidrodinâmicos transmissividade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento.

2.4.4 Parâmetros hidroquímicos

Quanto aos parâmetros hidroquímicos, a finalidade foi identificar e quantificar as principais características e constituintes das águas subterrâneas, visando estabelecer uma relação com os aspectos geoambientais. Para tanto, dados qualitativos dos poços cadastrados foram verificados para analisar a composição das águas dos aquíferos Barreiras e Itapecuru. A falta de registros de qualidade de água nos poços inventariados, em quantidade suficiente para promover a espacialização dos parâmetros na área de estudo, foi contornada com a utilização dos dados de qualidade do levantamento promovido pelo ANA, em novembro de 2017, para os Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de São Luís, cujas análises foram realizadas no Laboratório de Análises Mineraias da CPRM (ANA, 2018).

No total, foram investigados 100 poços regularmente distribuídos na Ilha do Maranhão, cujos dados contemplaram as propriedades físico-químicas (pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, turbidez e dureza); concentrações de cátions e ânions (cálcio, potássio, magnésio, sódio, cloreto, sulfato, carbonato e bicarbonatos); série de nitrogenados (nitrito, nitrato e amônia) e componentes secundários (ferro, manganês, silício, fluoreto, e fosfato); elementos traços (alumínio, boro, bário, entre outros); e elementos terras raras (ítrio, cério, lantânio, praseodímio, entre outros).

Do total de parâmetros analisados, foi organizada uma planilha no Microsoft Excel, constituída pelo número de série, latitude e longitude do poço cadastrado; parâmetros físico-químicos: pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos (STD) e turbidez; concentração de cátions (sódio, potássio cálcio e magnésio) e concentração de ânions (cloreto, carbonato, bicarbonato, sulfato e nitrato).

Esses parâmetros foram eleitos tendo em vista seguintes aspectos: classificação das águas subterrâneas segundo as espécies inorgânicas abundantes, através do diagrama de Piper, no software QualiGraf, v.1.17 (FUNCEME, 2014); contaminação da água subterrânea por atividades antrópicas, como esgotos domésticos, fossas sépticas, aterros sanitários e lixões; contaminação por intrusão salina, analisada juntamente com o dado de interface água doce/água salgada; e presença do marcador estratigráfico, constituído por níveis calcíferos entre as litologias dos grupos Barreiras e Itapecuru.

Para fins de classificação das águas subterrâneas, as amostras foram submetidas ao balanço iônico, cujo erro percentual ($Ep(\%)$) entre a concentração total (em miliequivalente por litro) de cátions ($r\sum p$) e ânions ($r\sum n$) não excedeu 10% (SANTOS, 2008). O software QualiGraf emprega dois métodos para aferir o balanço iônico. No primeiro (B.I.I), baseado em Custódio e Lhamas (1983), o erro prático (**Equação 2.3**) é comparado ao erro teórico ou máximo permitido, que considera os valores de condutividade elétrica – CE- (**Tabela 2.1**). Já no segundo (B.I.II), pautado em Logan (1965), o erro prático (**Equação 2.4**) é analisado também a luz do erro prático ou teórico, o qual é ponderado pelos valores de ânions ou cátions (**Tabela 2.2**).

$$Ep\% = \left[\frac{r\sum n - r\sum p}{\frac{1}{2}(r\sum n + r\sum p)} \right] \cdot 100 \quad (2.3)$$

$$Ep\% = \left[\frac{r\sum n - r\sum p}{r\sum n + r\sum p} \right] \cdot 100 \quad (2.4)$$

Tabela 2.1 - Erro teórico ou máximo permitido segundo Custódio e Llamas (1983).

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	200	500	2.000	>2.000
ERRO PERMITIDO (%)	30	10	8	4	<4

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de Santos, 2008.

Tabela 2.2 - Erro teórico ou máximo permitido segundo Logan (1965).

$\sum n$ ou $\sum p$	<1	1	2	6	10	30	>30
ERRO PERMITIDO (%)	30	10	8	4			<4

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de Santos, 2008.

Os registros dos 100 poços com os dados hidroquímicos, em formato Microsoft Excel, foram importados para o Surfer v.15 (GOLDEN SOFTWARE INC.), submetidos à Krigagem, gerando imagens em níveis de cinza, com resolução espacial de 30m. Elas foram transferidas para o ArcMap, v.10.5 (ESRI INC.), classificadas em intervalos de valores, resultando em

mapas temáticos dos parâmetros físico-químicos, cátions e ânions. Esses mesmos procedimentos de espacialização foram aplicados aos resultados oriundos do diagrama de Piper, o que permitiu a composição do mapa temático de classificação das águas subterrâneas da área de estudo.

As amostras de água subterrânea dos 100 poços tubulares foram avaliadas em relação ao consumo humano e seu padrão de potabilidade, com base na Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) Nº 396, de 7 de abril de 2008, e na Portaria do Ministério da Saúde (MS) Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Nesse procedimento, foram considerados os parâmetros cloreto, sódio, sulfato, nitrato, STD e turbidez, os quais foram classificados segundo os limites máximos permitidos estabelecidos na legislação. Os resultados foram espacializados no mapa temático de potabilidade da água nos pontos de amostragem.

2.5 Levantamentos de radar de penetração no solo

O radar de penetração no solo, em inglês *ground penetrating radar* (GPR), constitui um método geofísico que emprega ondas eletromagnéticas de alta frequência (10 a 1000 MHz), as quais são transmitidas em profundidade através de equipamentos constituídos por unidade controladora e antenas e transmissão e recepção dos sinais. As imagens produzidas em alta resolução são resultantes da reflexão da radiação com os materiais geológicos em subsuperfície, as quais são função de suas propriedades condutivas e dielétricas (ANNAN, 2001; JOL, 2009; ROBINSON *et al.*, 2013)

Na área de estudo, as investigações geofísicas de radar de penetração no solo foram realizadas no período de 09 a 14 de março de 2013, totalizaram 21,97 km de linhas, no sentido do Litoral de Mangues e Rias em direção aos Tabuleiros Costeiros Maranhenses. No levantamento foi empregado uma unidade de controle, modelo SIR3000, (GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS INC.) acoplada a uma antena blindada, modelo 5106, série 2434, com frequência de 200 MHz (Instituto Nacional de Criminalística – INC/Departamento de Polícia Federal). Os parâmetros de configuração do sistema para obtenção dos perfis de reflexão foram: espaçamento entre os traços: 0,05 m; amostragem temporal: 0,3417969 ns; número de amostras por traço: 1024; e janela temporal: 300 ns.

Os dados GPR foram adquiridos empregando-se o modo de operação perfil de reflexão e a técnica denominada *Common-offset*, em que a geometria das antenas transmissora e receptora é mantida a uma distância fixa ao longo do trajeto. Durante as aquisições, as antenas operaram em modo contínuo (rebocadas através de um veículo), com a orientação perpendicular

ao percurso (segundo o padrão transversal elétrico – TE, por proporcionar uma área de cobertura angular mais larga de um refletor em subsuperfície) e mantidas o mais próximo possível do terreno, visando minimizar a reflexão na interface ar-solo.

O processamento dos dados foi realizado no módulo *2D data analysis* do software Reflexw (SADMIER, 2012), onde procedeu-se à importação dos perfis no formato “.DZT”. Em seguida, foi realizada a correção do tempo zero, empregando-se a opção *Static Correction/muting*, no menu *Processing*. Os ruídos instrumentais de baixa frequência foram removidos através do filtro unidirecional (*1D Filter*), *subtract-mean (dewow)*.

Para realce das feições superficiais, foi aplicado um ganho de decaimento de energia (*energy-decay*) e para remoção da onda direta no solo foi aplicado o filtro bidimensional (*2D filter*) *background removal*. Os ruídos de alta frequência foram removidos através do filtro unidirecional (*1D Filter*). Em seguida, realizou-se o ajuste hiperbólico, cujos parâmetros de velocidade (v , m/ns) e largura (*width*) foram empregados na migração (*Kirchhoff migration*). Por fim, os dados de topografia foram inseridos nas seções, gerando-se os produtos cujos padrões de reflexão foram interpretados e contextualizados à geologia local e a outros levantamentos regionais realizados.

2.6 Síntese hidrogeológica e contribuições ao processo de gestão

Esta fase metodológica envolveu a confecção do mapa síntese de produtividade do sistema aquífero; a avaliação das reservas renovável, permanente e explotável; a definição das áreas de recarga local e regional; e a proposição de contribuições ao processo de gestão.

O primeira etapa foi baseada nos dados raster de transmissividade, condutividade hidráulica, vazão específica e vazão autorizada, obtidos através da interpolação dos registros pontuais dos poços tubulares no Surfer v.15 (GOLDEN SOFTWARE INC). Eles foram classificados segundo os limites propostos no Manual de Cartografia Hidrogeológica (DINIZ *et al.*, 2014) e, em seguida, submetidos a operação de média pontual, no ArcMap, v.10.5 (ESRI INC.). As classes temáticas foram analisadas conforme as regiões hidrográficas, os aspectos geoambientais, geomorfométricos, hidrogeológicos e de saneamento ambiental.

As estimativas de reservas reguladoras ou renováveis, geológicas ou permanentes e explotáveis ou disponibilidades foram baseadas em equações consagradas na bibliografia hidrogeológica (REBOUÇAS *et al.* 1994; COSTA, 2000; FEITOSA *et al.* 2008); nas avaliações de reservas em outros ambientes hidrogeológicos (GASPAR, 2006; CAMPOS *et al.* 2007; CORREA, 2011, SOUZA, 2013; SILVA, 2013; PAULA, 2015; OLIVERA, 2019, entre

outros.); e em dados de literatura (BERTOLDO OLIVEIRA, 2016). As estimativas foram processadas em ambiente SIG através das operações zonais de álgebra de mapas (TOMLIN, 1990) aplicadas a uma grade vetorial de 250 x 250m e dados raster derivados dos registros dos poços tubulares cadastrados.

As áreas de recarga foram contabilizadas a partir de informações concernentes aos seguintes aspectos:

- a) valores de carga hidráulica, procedentes dos registros dos poços tubulares cadastrados, a partir dos quais foram produzidas linhas de isovalores e de direção de fluxo, com vistas uma primeira compartimentação das áreas de recarga e descarga;
- b) morfologia do relevo com enfoque na hipsometria, declividade e formas de terreno;
- c) categorias de cobertura vegetal e uso da terra reclassificadas segundo sua aptidão à infiltração das águas meteóricas, quantificadas por região hidrográfica;
- d) domínio das unidades de conservação na área de estudo;
- e) heterogeneidade dos ambientes sedimentares estratificados, com observância aos contrastes de condutividade hidráulica entre os estratos e presença de feições estruturais horizontais e verticais;
- f) influência da profundidade da interface água doce-água salgada;
- g) região aflorante do aquífero cretáceo no continente.

A partir das experiências vivenciadas na aquisição, tratamento e síntese de dados, foi possível a proposição de contribuições ao processo de gestão do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão. Para tanto, foi exposto o arcabouço legal e institucional dos recursos hídricos subterrâneos nos cenários nacional e estadual. Em seguida, foram apresentadas as contribuições ao processo de gestão conforme os aspectos:

- a) conservação, preservação e recuperação;
- b) cadastro de poços tubulares e sistemas de informações hidrológicas;
- c) monitoramento quantitativo e qualitativo;
- d) enquadramento das águas subterrâneas;
- e) licenciamento para perfuração de poços e outorga de direito de uso;
- f) e capacitação profissional e ações educativas.

CAPÍTULO 3

CONTEXTUALIZAÇÃO GEOAMBIENTAL DA ILHA DO MARANHÃO

A Ilha do Maranhão está localizada na unidade morfoescultural do Golfão Maranhense (AB’SÁBER, 1960). De acordo com o El-Robrini *et al.* (2006), essa unidade faz parte da Zona Costeira e Estuarina do Maranhão (ZCEM), compreendida entre os litorais Ocidental e Oriental (**Figura 3.1**).

Segundo Feitosa (2006, 2013), o Golfão Maranhense abrange a reentrância delimitada, a oeste, pela ponta de Guajuru, no município de Cedral, e a leste pela ilha de Santaninha, no município de Humberto de Campos, tendo ao centro a Ilha de Upaon-Açu, mais conhecida como Ilha do Maranhão. Encontram-se também as ilhas Cajual, Caranguejos, Tauá-Mirim, Medo, Mãe D’água, Curupu, Pretos, Santana, Carrapatal, Rosário, Livramento, além das baías de Cumã, São Marcos, São José e Tubarão.

Esta reentrância comporta cerca de treze municípios, a saber: Cedral, Guimarães, Bequimão (fundo baía de Cumã), Alcântara, Bacurituba, Cajapió, São João Batista, Santa Rita, Bacabeira, Rosário, Axixá, Icatu e Humberto de Campos. Os municípios de Viana, Arari e Anajatuba acham-se representados em virtude de se localizarem na foz do rio Mearim, que deságua na baía de São Marcos, cujo fluxo é afetado pelo regime das marés. Outros rios maranhenses cuja foz situa-se no Golfão Maranhense são: Pericumã, na baía de Cumã, e Itapecuru e Munim, na baía de São José.

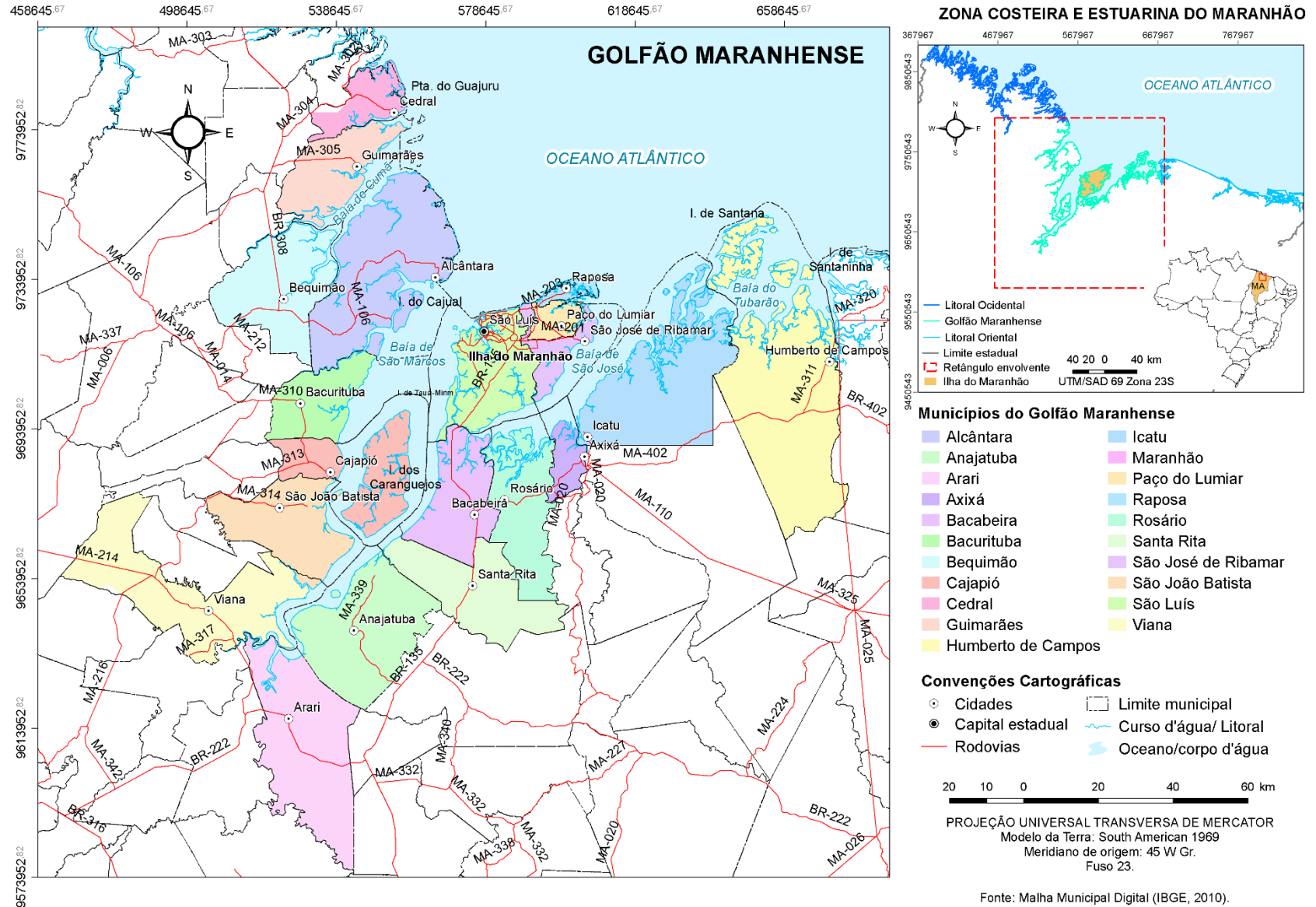
A Ilha do Maranhão (**Figura 3.2**) está limitada a norte pelo Oceano Atlântico; a sul, pela baía de São José e pelo Estreito dos Mosquitos, que a separa do continente; a leste, pela baía de São Marcos; a oeste, pela baía de São José; e a nordeste, pela Ilha de Curupu. Politicamente, a área de estudo é constituída pelos municípios de São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa os quais totalizam uma área territorial de 1.412,264 km² (**Tabela 3.1**).

Tabela 3.1 – Dimensão territorial e populacional dos municípios da Ilha do Maranhão.

MUNICÍPIO	ÁREA (km ²)	POPULAÇÃO TOTAL (hab.)	POPULAÇÃO URBANA (hab.)	POPULAÇÃO RURAL (hab.)
São Luís	834,785	1.014.837	958.522	56.315
São José de Ribamar	388,371	163.045	37.709	125.336
Paço do Lumiar	122,828	105.121	78.811	26.310
Raposa	66,280	26.327	16.675	9.652
Ilha do Maranhão	1.412,264	1.309.330	1.091.717	217.613

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de IBGE, 2010.

Figura 3.1 – Mapa de localização da Ilha do Maranhão na unidade morfoescultural do Golfão Maranhense e da Zona Costeira e Estuarina do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 3.2 – Mapa de divisão política da Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Segundo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010), a população total dos municípios da ilha é de 1.309.330 hab. Desse total, 83,38% e 16,62% dizem respeito às populações urbana e rural, respectivamente. O município de São Luís, onde se encontra a sede do governo do Estado do Maranhão, representa 59,11% da área territorial da ilha, concentrando 77,11% do seu contingente populacional.

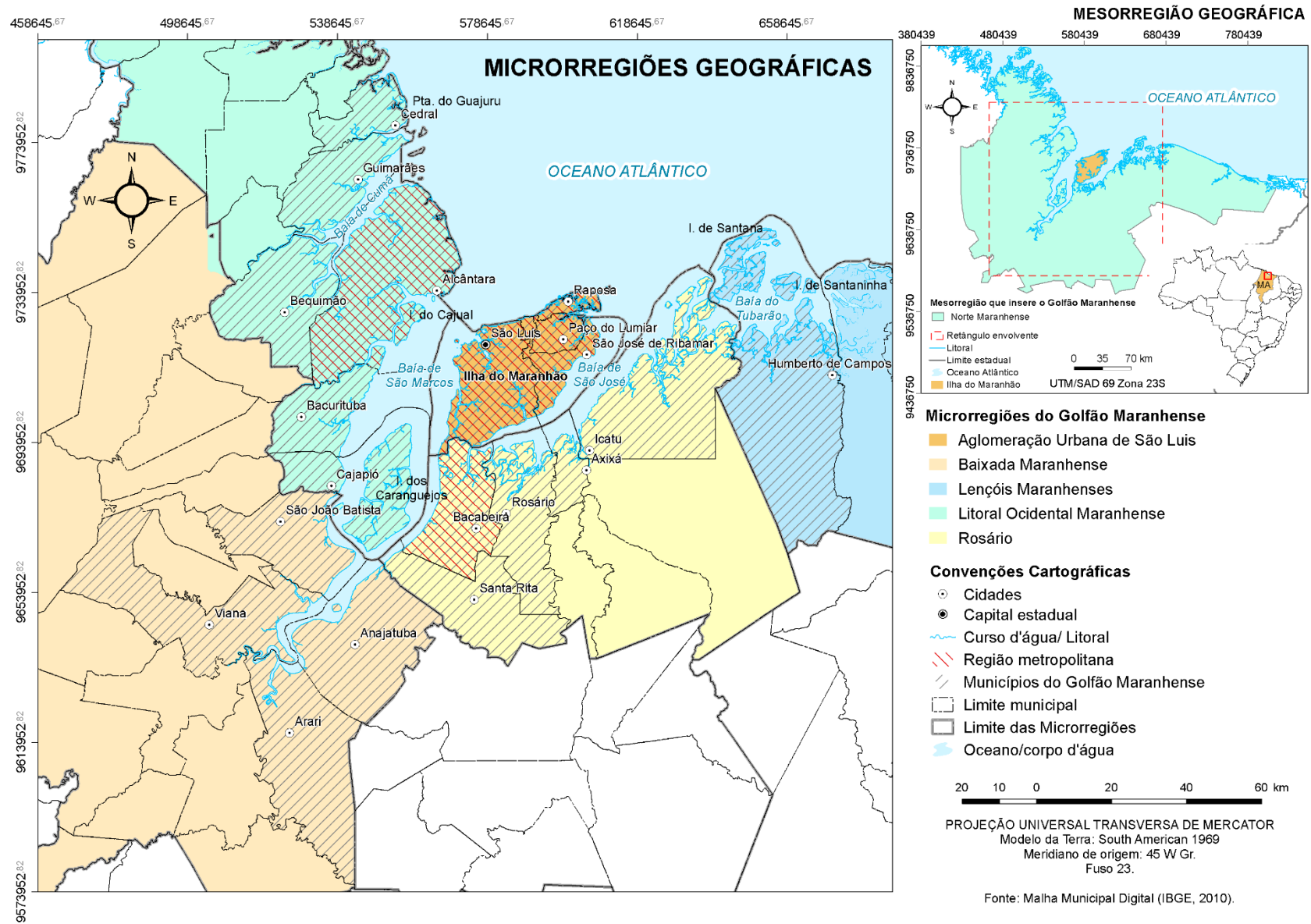
Quanto à divisão regional do Maranhão, de acordo com o IBGE (2010), a Ilha do Maranhão está inserida na Mesorregião Geográfica do Norte Maranhense, mais precisamente na Microrregião da Aglomeração Urbana de São Luís (**Figura 3.3**). Essa aglomeração juntamente com o município de Alcântara, pertencente à Microrregião do Litoral Ocidental Maranhense, forma a Região Metropolitana da Grande São Luís (RMGSL), criada pela Lei Complementar Estadual Nº 38, de 12 de janeiro de 1998. Ela teve a sua redação alterada pela Lei Complementar Nº 69, de 23 de dezembro de 2003, que inseriu o município de Bacabeira, na RMGSL.

3.1 Geologia

A Ilha do Maranhão está inserida na porção leste da Bacia Intracratônica de São Luís (**Figura 3.4**), integrante, juntamente com as bacias de Bragança-Viseu e Ilha Nova, do Sistema Grábens do Gurupi (AZEVEDO, 1991). Essas bacias pertencem a Província Costeira e Margem Continental Atlântico Equatorial (SCHOBENHAUS; BRITO NEVES, 2003; CORDANI *et al.*, 2009). Compreendem também o conjunto do Rifte Mesozóicos Abortados (MILANI *et al.*, 2007) no Cráton de São Luís, durante os processos de rifteamento do Megacontinente Gondwana (HASUI, 2012) e de Abertura do Atlântico Sul Equatorial, entre o final do Aptiano e início do Albiano, no Cretáceo Superior.

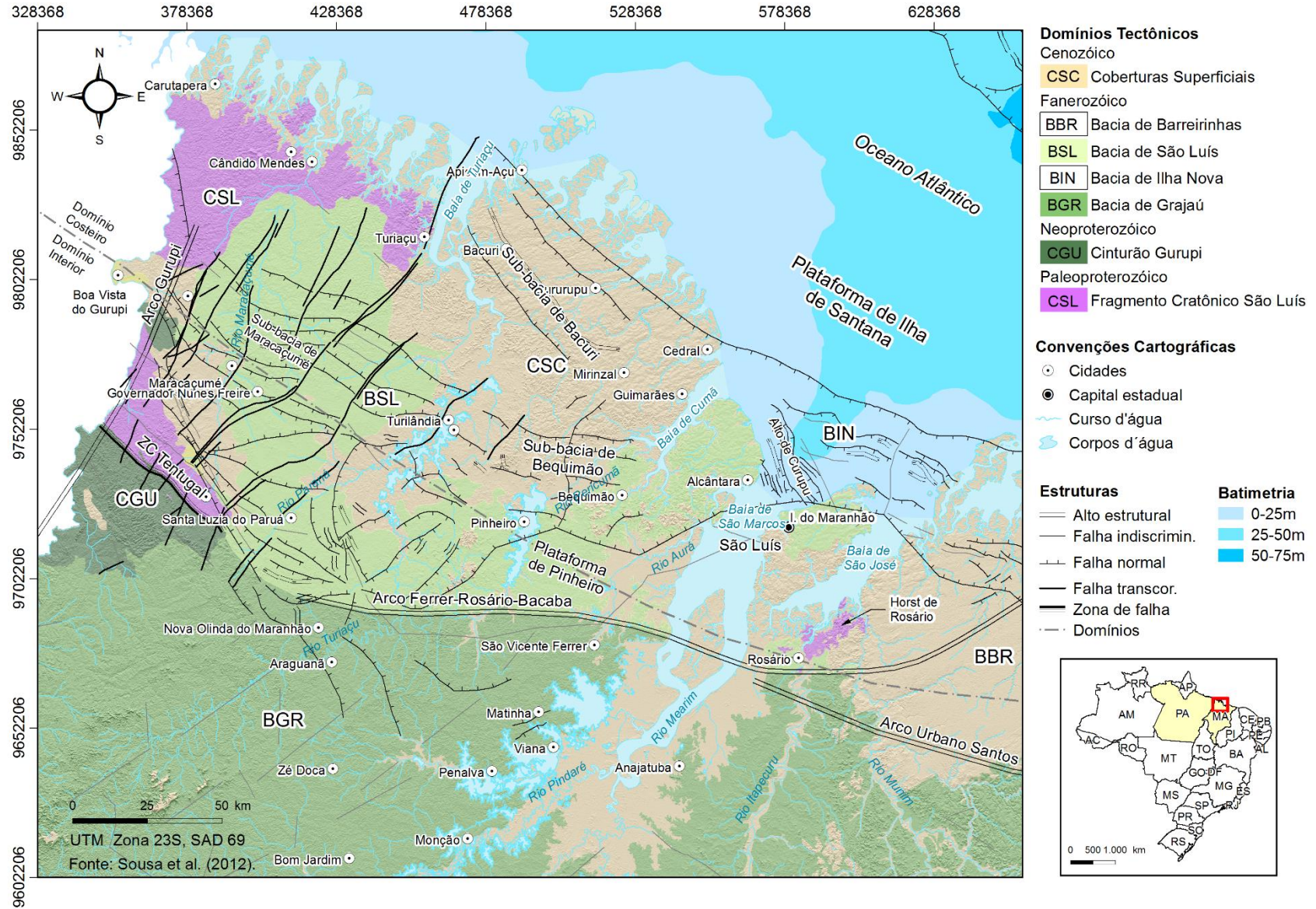
A Bacia Intracratônica de São Luís é limitada, a norte, com a Plataforma da Ilha de Santana, separando-a das bacias marítimas do Pará-Maranhão e Barreirinhas (porção submersa); a sul, com Arco Ferrer-Rosário-Bacaba, que a divide da Bacia de Grajaú; a leste, com Horst de Rosário, separando-a da porção emersa da Bacia de Barreirinhas; a oeste, com Arco do Gurupi, que confronta a Bacia de Bragança-Viseu; e a nordeste, com Alto de Curupu, limitando-a com a Bacia de Ilha Nova (REZENDE; PANPLONA, 1970, REZENDE; ARAÚJO, 1970; GORINI, 1981, ARANHA *et al.*, 1988).

Figura 3.3 - Mapa de microrregiões dos municípios do Golfão Maranhense.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 3.4 - Mapa geológico-estrutural da Bacia Intracratônica de São Luís, onde está inserida a Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O embasamento da bacia é constituído por rochas pré-silurianas (Cráton São Luís e Cinturão Orogênico do Gurupi) e por rochas sedimentares cambro-ordovicianas (Formação Bequimão) e devonianas (Formação Pimenteiras). Sobre esse substrato estão inseridas as sequências cretáceas (formações Grajaú e Codó, e Grupo Itapecuru) e cenozóicas (Grupo Barreiras e coberturas quaternárias).

As rochas pré-silurianas na região do Gurupi, entre o nordeste do Pará e noroeste do Maranhão, foram distintas em dois conjuntos: um associado à região costeira (Domínio Costeiro) e outro, a do interior (Domínio Interior). A constituição e a idade dos domínios foram obtidas, na maior parte, pelo método do Pb-Pb (KLEIN *et al.*, 2003; HASUI, 2012).

O Domínio Costeiro, correspondente ao Cráton de São Luís, de idade paleoproterozóica, é constituído por granitóides cálcico-alcálicos associados à subducção/arcs vulcânicos. O Domínio Interior, atribuído ao Cinturão Orogênico do Gurupi, de idade neoproterozóica, é composto por uma sequência metavulcano-sedimentar metamorfizada, em fácies xisto-verde, gnaisses em fácies anfíbolito, localmente migmatizados, com intercalações de rochas metassedimentares em fácies anfíbolito. (KLEIN *et al.*, 2003). O Cráton de São Luís (**Figura 3.4**) ocorre a sudoeste da bacia homônima e a sul da Ilha do Maranhão, na área da Suíte Intrusiva Rosário (GORAYEB *et al.*, 1999). O Cinturão Orogênico do Gurupi se verifica a sudoeste da Bacia Intracratônica de São Luís.

A Suíte Intrusiva Rosário ocorre em uma janela de aproximadamente 400 km², situada no interflúvio Mearim-Munim, a sul da Ilha do Maranhão. Compreende um batólito, de idade paleoproterozóica, constituído por um conjunto de plútons afetados por zonas de cisalhamento que imprimiram um metamorfismo em condições de fácies xisto-verde. Entre as litologias estão: metatonalitos, metagranodioritos, metagranitos, veios e diques leucocráticos, enclaves e diques máficos. A idade da Suíte Intrusiva Rosário, a partir do zircão, é similar a dos granitóides do Cráton de São Luís e do Cinturão Orogênico do Noroeste do Ceará, sendo, portanto, integrante dessas unidades geotectônicas (GORAYEB *et al.*, 1999).

As rochas sedimentares cambro-ordovicianas na Bacia de São Luís estão representadas pela Formação Bequimão, conforme Aranha *et al.*, (1988), constituída predominantemente de metapelitos cinza escuros a avermelhados, intercalados com arenitos, conglomerados e diamictitos (porção basal). A ausência fossilífera nessa seção, com mais de 2.000 m de espessura, torna sua datação questionável. No entanto, análises radiométricas (Rb/Sr) e correlações lito e sismoestratigráficas associam sua deposição à fase final do Ciclo Brasileiro. Conforme Zalan (2007), a Formação Bequimão, na porção central da Bacia de São Luís, ocorre

preservada como uma estreita faixa de direção WNW-ESSE, apresentando estratos de crescimento e depocentros controlados por falhas normais.

Segundo Zalan (2007), as rochas sedimentares devonianas da Bacia de São Luís são constituídas por arenitos e folhelhos e, subordinadamente, basaltos e diamictitos. Elas são correlacionadas à Formação Pimenteiras, de idade devoniana, pertencente ao Grupo Serra Grande, da Bacia do Parnaíba. Essas litologias encontram-se preservadas na borda sul da Bacia de São Luís, sobrepostas por sedimentos cretáceos aptianos e albianos. A presença da Sequência Devoniana é explicada pelo soerguimento do Arco Ferrer-Urbano Santos, no Neocomiano.

Este arco foi definido como alto gravimétrico regional entre as bacias de São Luís e Barreirinhas, São Luís e Epicontinental (atual Bacia de Grajaú), passando pelos municípios maranhenses de São Vicente de Ferrer e Urbano Santos. Ele foi interpretado como efeito do arqueamento do embasamento, com um eixo inicial bifurcando na altura de Rosário. Seu soerguimento inicial deu-se entre o Neocomiano e o Mesoptiano. O soerguimento complementar ocorreu no Cretáceo Superior e teve como consequência a formação da Bacia de São Luís. Esses dois arqueamentos resultaram na exposição e consecutiva erosão dos sedimentos paleozóicos da Bacia do Parnaíba, constituindo-se como área fonte de clásticos para as bacias limítrofes. A formação do arco tectônico constituiu uma das evidências do Evento Atlântico Precoce que antecedeu a abertura do Oceano Atlântico Sul (REZENDE; PAMPLONA, 1970; GORINI, 1981; CONCEIÇÃO *et al.*, 1988, CAPUTO, 1988; SOARES JÚNIOR *et al.*, 2008; SOARES JÚNIOR, 2009).

A base dos depósitos cretáceos na Bacia de São Luís está representada pelo Sistema Codó-Grajaú que constitui o ciclo deposicional característico da fase inicial de individualização da bacia. O Sistema é composto por arenitos médios da Formação Grajaú, concordantes com folhelhos escuros, localmente betuminosos, intercalados com lentes de calcário e gipsita/anidrita, e arenitos finos esbranquiçados da Formação Codó. Conforme Batista (1992), os sedimentos Codó-Grajaú, provenientes de testemunhos de poços na Bacia de São Luís, revelaram ambientes de leque aluvial, planície deltaica, lobo de suspensão, lacustre e lagunar, compondo um sistema flúvio-deltaico-lacustre, com breves invasões marinhas.

A Formação Itapecuru, sobreposta concordantemente ao Sistema Codó-Grajaú (LIMA *et al.*, 1994), foi inicialmente estudada por Lisboa (1914 *apud* RODRIGUES, 1994) que designou de Camadas Itapecuru aos sedimentos aflorantes nos rios Itapecuru e Alpercatas, a norte da cidade de Pastos Bons/MA. Campbell *et al.* (1949 *apud* RODRIGUES, 1994) denominou esses depósitos de Formação Serra Negra, posicionando-os entre a Formação Codó e a Formação Barreiras, na região da Serra Negra, ao sul de Grajaú/MA. Posteriormente, o

termo Formação Itapecuru foi referenciado aos depósitos entre a Formação Codó (Aptiano) e a Formação Pirabas/Barreiras (Oligo-Mioceno/Plioceno), na região oriental do Pará e ocidental do Maranhão (MESNER; WOOLDRIDGE, 1964; CERQUEIRA; MARQUES, 1985).

Cunha (1968 *apud* RODRIGUES, 1994) empregou provisoriamente o termo Formação Alcântara aos depósitos cenomanianos constituídos de folhelhos sílticos, estratificados com leitões lenticulares de calcário esbranquiçado, aflorantes em Alcântara/MA. Rodrigues *et al.* (1990) dividiu os sedimentos Itapecuru, aflorantes na área da Bacia de São Luís, nos membros Inferior e Superior, denominando o segundo de Alcântara, coincidente em grande parte com a Formação Alcântara de Cunha (1968 *apud* RODRIGUES, 1994). Na mesma bacia, os autores designaram, provisoriamente, como Terciário Antigo aos sedimentos sobrepostos ao Membro Alcântara e sotopostos à Formação Barreiras, de idade plio-pleistocênica.

Aranha *et al.* (1988) dividiram operacionalmente a Formação Itapecuru em quatro ciclos (ITA I a IV), a partir de perfis elétricos, assinaturas sísmicas e análises litológicas, sendo os três primeiros concentrados no Albiano e o último no Cenomaniano. Os depósitos do Cenomaniano e os do Terciário Antigo, de Rodrigues *et al.* (1990), na Bacia de São Luís, foram denominados de Formação Itapecuru Superior por Rossetti (1996) que a subdividiu em duas unidades, referidas informalmente como Sucessão Inferior e Sucessão Superior. Elas são detalhadas em Rossetti e Truckenbrodt (1997), do ponto de vista sedimentológico e estratigráfico, sendo categorizadas como formações distintas.

A Sucessão Inferior, de idade cenomaniana, foi denominada de Formação Alcântara, com área-tipo localizada no município de Alcântara/MA; seção-tipo na Ilha do Livramento/MA; e sobreposta discordantemente aos sedimentos aptianos da Formação Codó. A Sucessão Superior, de idade entre o Turoniano e o Terciário Inferior (atual Paleógeno), foi denominada de Formação Cojupe, com área-tipo na rodovia Alcântara/Pinheiro-Porto de Cojupe/MA e seção-tipo localizada no extremo leste da rodovia.

Em virtude da criação das formações Alcântara e Cojupe, a Formação Itapecuru foi elevada à categoria de Grupo, conservando o mesmo termo, como referência às rochas sedimentares do Albiano ao Terciário Inferior (atual Paleógeno) da Bacia de São Luís. Além das unidades acima descritas, conforme Rossetti e Truckenbrodt (1997), o Grupo é integrado pela Unidade Indiferenciada (Eo/Mesoalbiano), separada da Formação Alcântara por descontinuidade regional.

As unidades estratigráficas do Grupo Itapecuru foram correlacionadas com sequências deposicionais investigadas por Rossetti (2001a), empregando perfis de raios gama de onze furos de sondagem entre as bacias de São Luís e Grajaú. A interpretação desses perfis associada a

dados faciológicos e estratigráficos levaram ao reconhecimento de três sucessões deposicionais de segunda ordem, designadas S1, S2 e S3, limitadas por discordâncias regionais, no topo e na base, e exibiram organização interna compatível com tratos sedimentares ou de sistema (POMEROL *et al.*, 2013).

A sequência deposicional S1, com espessura de quase 450 m, foi correlacionada com uma sucessão inferior, neoptiana, aflorante nas imediações da cidade de Codó/MA, composta por folhelhos betuminosos, calcários e evaporitos da Formação Codó (PAZ; ROSSETTI, 2001; PAZ, 2005). A sequência deposicional S2, com espessura atingindo cerca de 500 m, foi correlacionada à sucessão superior dos depósitos aflorantes nas proximidades de Codó/MA, representados por arenitos, argilitos e, subordinadamente, calcários formados entre o Meso/Neoalbiano (ROSSETTI *et al.*, 2001a). Essa sucessão foi correlacionada com algumas partes da Unidade Indiferenciada, de idade albiana, do Grupo Itapecuru.

A sequência deposicional S3, com espessura entre 600 a 800 m, foi subdividida em seis unidades cíclicas superpostas (S3a-f), com espessura máxima de 150 m. A unidade S3e foi correlacionada aos depósitos neoalbianos a cenomanianos da Formação Alcântara, expostos nas imediações da cidade de Alcântara/MA (ROSSETTI, 1996); e aos arenitos finos caulínicos e, subordinadamente, pelitos e arenitos conglomeráticos, neoalbianos a cenomanianos, aflorantes a 30 km, a nordeste de Açailândia/MA (ANAISSE JÚNIOR. *et al.* 2001). A unidade S3f, por sua vez, foi correlacionada à Formação Cojupe, de idade entre o Turoniano e o Terciário Antigo, na Bacia de São Luís (ROSSETTI; TRUCKENBRODT, 1997); e aos arenitos arcoseanos e pelitos laminados, aflorantes na borda centro-leste da Bacia de Grajaú (LIMA; ROSSETTI, 2001).

Quanto aos depósitos cenozóicos, de acordo com Rossetti *et al.* (2013a), os do Oligo-Mioceno e Mioceno, expostos ao longo das margens equatorial e leste do Brasil, são litoestratigraficamente conhecidos como formações Pirabas e Barreiras. Esses estratos se estendem por uma faixa de aproximadamente 5.000 km, entre as latitudes 4° N e 22° S, penetrando para o interior, a partir das margens equatorial e leste, até 1.000 km e 300 km, respectivamente. Eles afloram ao longo de falésias costeiras descontínuas, de vales fluviais, de cortes de estradas, de pedreiras, e estão depositados sobre as rochas pré-cambrianas e grábens cretáceos.

As unidades litoestratigráficas anteriormente mencionadas, segundo Rossetti (2006), constituem uma sequência deposicional resultante da gradação de estratos carbonáticos/siliciclásticos a totalmente siliciclásticos, designada Sucessão Pirabas/Barreiras, delimitada na base e no topo por discordâncias erosivas, marcadas por paleossolos lateríticos

mapeáveis em escala regional. Esse termo foi usado em alusão aos depósitos do Oligo-Mioceno e Mioceno, verificados nos estados do Pará e Maranhão. São bem expostos no norte da Bacia de São Luís (ROSSETTI, 2000); no centro-leste da Sub-bacia de Cametá, na porção leste do Sistema de Grábens do Marajó (ROSSETTI; SANTOS JÚNIOR, 2004); na Bacia de Bragança-Viseu (ARAI *et al.*, 1988; ROSSETT *et al.*, 1989, 1990; TRUCKENBRODT *et al.*, 1994); e nas Plataformas Bragantina e do Pará (ROSSETTI, 2001b; ROSSETTI *et al.*, 2012).

Na Bacia de São Luís, a Sucessão Pirabas/Barreiras, aflorante nas falésias costeiras, entre as cidades maranhenses de Alcântara e Guimaraes, foi descrita por Rossetti (2000) como constituída de arenitos, argilitos e, em menor proporção, conglomerados e calcários. Esses depósitos foram interpretados como preenchimento de um paleovale estuarino, onde foi possível o reconhecimento de três unidades estratigráficas (1 a 3), lateralmente contínuas por vários quilômetros de distância e limitadas por superfícies de descontinuidades (DS1 a DS4).

A Unidade 1, com espessura máxima de 10 m, jaz discordantemente sobre os depósitos cretáceos por meio da superfície de descontinuidade DS1. De acordo com Rossetti (2000, 2006), ela é marcada por relevo erosivo, de até 40m em escala de afloramento, correlacionada lateralmente com uma superfície planar, contendo paleossolo com concreções ferruginosas e bauxíticas. A Unidade 2, com espessura média de 10 m, encontra-se limitada na base e no topo pelas superfícies de descontinuidade DS2 e DS3. A primeira é irregular e ondulada, como se incisa nos depósitos da Unidade 1, enquanto a segunda é marcada por uma inconformidade regional, com relevo erosivo e feições claramente pedogenéticas. Elas denotam o cume de um episódio regressivo, relacionado à queda do nível relativo do mar e exposição subaérea.

De acordo com Rossetti (2000), as unidades 1 e 2 foram interpretadas como registros de duas parassequências sucessivas, de uma mesma sequência deposicional S1 (Formação Pirabas e a porção inferior da Formação Barreiras). Elas foram formadas durante os episódios de flutuação do nível relativo do mar e acham-se sobrepostas a um ciclo de mar baixo que formou a base do paleovale. A descontinuidade DS2 foi interpretada como uma superfície de ravinamento (RS), formada pela subida e paralização do nível médio do mar que provocou o recuo da paleocosta para o interior e ocasionou a inundação e o ravinamento dos canais de maré.

A Unidade 3, com até 24 m de espessura em escala de afloramento, acha-se sotoposta discordantemente aos Sedimentos Pós-Barreiras através da superfície de descontinuidade DS4. Essa inconformidade, intemperizada, com presença de paleossolo laterítico e acentuado relevo erosional, se estende por vários quilômetros além dos limites da área em destaque. Conforme Rossetti (2006), essa “[...] superfície registra períodos de climas tropicais, com estações secas e úmidas bem definidas, que podem ter acompanhado o rebaixamento do nível eustático

Tortoniano.” De acordo com Arai (2006), a Discordância Tortoniana foi produzida pela “[...] maior queda eustática do Neógeno, cuja causa está na formação da calota glacial da Antártida, há cerca de 10 milhões de anos.”

A Unidade 3 foi interpretada como uma sequência deposicional S2 (porções mediana e superior da Formação Barreiras) cujos estratos foram acomodados durante a subida do nível relativo do mar, logo após a gênese da superfície de descontinuidade DS3. Após o ponto máximo, no trato de sistema de mar alto, quando o paleovale foi completamente preenchido, houve uma queda do nível relativo do mar, por um prolongado período, produzindo a superfície de descontinuidade DS4, que assinala o final da sedimentação miocênica na Bacia de São Luís.

O Quaternário na Bacia de São Luís é representado pelos Sedimentos Pós-Barreiras, termo inicialmente aplicado por Sá (1969 *apud* ROSSETTI *et al.*, 2013b) aos depósitos arenosos finos a médios e, em geral, maciços que ocorrem sobrepostos discordantemente aos depósitos da Formação Barreiras, em várias localidades da costa brasileira. Essa unidade estratigráfica foi investigada no nordeste do Pará (ROSSETTI *et al.*, 1989, 2001b, 2008; ROSSETTI, 2001b; ROSSETTI; GÓES, 2001; TATUMI *et al.*, 2008); na porção *onshore* da Bacia de Barreirinhas, limítrofe à de São Luís (ALMEIDA-FILHO *et al.*, 2009); na Bacia do Paraíba, na margem leste (ROSSETTI *et al.*, 2011b; ROSSETTI *et al.* 2012a, GANDINI *et al.*, 2014), entre outras localidades.

Segundo Rossetti *et al.* (2013b), na zona costeira da Bacia de São Luís, entre Alcântara/MA e Guimarães/MA, os Sedimentos Pós-Barreiras formam três sucessões sedimentares intercaladas por descontinuidades erosivas. As sucessões 1 (basal) e 2 são constituídas por arenitos finos a médios enquanto a 3 é formada por areias finas a médias. Elas foram submetidas à datações por luminescência opticamente estimulada e revelaram idades entre Neopleistoceno e o Neo-holoceno (84.000 ± 6.000 anos e 500 ± 100 anos).

Para os autores, as sucessões 1 e 2 foram depositadas durante a tendência geral de queda do nível do mar após o Último Interglacial (130.000 a 120.000 anos). Elas correspondem às areias formadas por processos eólicos, tendo por fonte, provavelmente, depósitos produzidos durante o rebaixamento do nível do mar. A sucessão 3, por sua vez, foi depositada concomitante à Transgressão Holocênica, resultante do derretimento das geleiras formadas durante o *Younger Dryas* (~12.600 a 11.800 anos). Apesar de desenvolvida em condições de mar transgressivo a alto, essa última sucessão evidencia sedimentação sob a forma de dunas eólicas.

O embasamento teórico exposto anteriormente contribuiu para a proposição de um mapa geológico para a Ilha do Maranhão (**Figura 3.5**) e de uma coluna estratigráfica (**Figura 3.6**). A cartografia das unidades geológicas foi fundamentada também nos levantamentos geológicos formulados por Brasil (1973), Rodrigues *et al.* (1994), Veiga Júnior (2000), Almeida (2000), Vasconcelos *et al.* (2004) e Sousa *et al.* (2012).

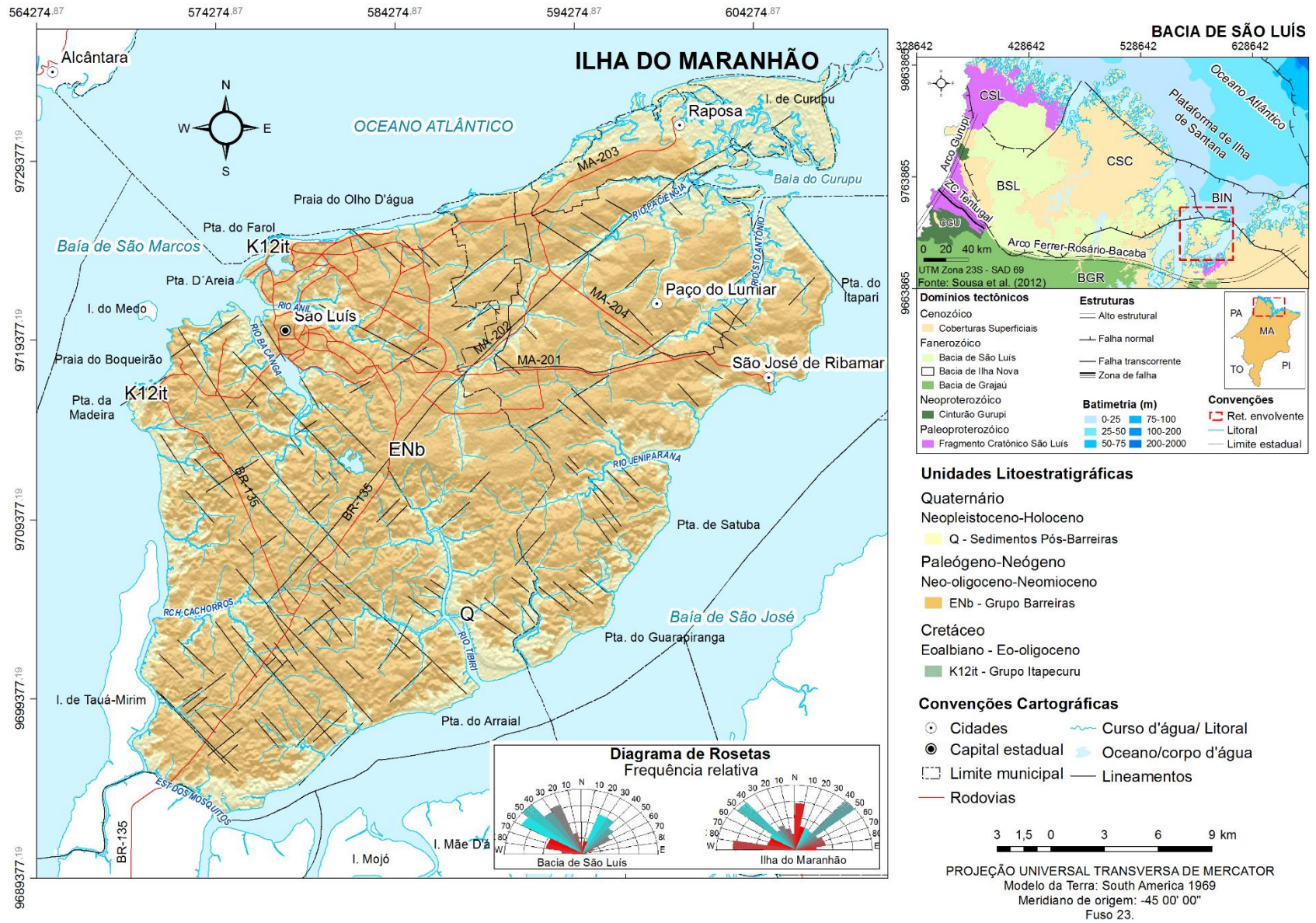
A base da coluna estratigráfica proposta para a área de estudo (**Figura 3.6**) é constituída pelas formações Codó e Grajaú, que ocorrem interdigitadas, com idades entre o Neoptiano e o Eoalbiano. Essas unidades acham-se, conforme Lima *et al.* (1994), sotopostas concordantemente ao Grupo Itapecuru. No entanto, Rossetti *et al.* (2001a), analisando os depósitos cretáceos nas imediações da cidade de Codó/MA, relatam que a transição Aptiano/Albiano se dá através de uma superfície de descontinuidade, de abrangência regional, marcada por relevo erosivo e paleossolo laterítico. Segundo os autores, as formações Codó e Grajaú são correlacionadas à Sequência Depositional S1 (ROSSETTI, 2001a).

Os depósitos albianos são representados pelo Grupo Itapecuru que, segundo Rossetti e Truckenbrodt (1997), é constituído pela Unidade Indiferenciada, basal, de idade entre o Eo e Neoalbiano; pela Formação Alcântara, de idade entre o Neoalbiano e o Cenomaniano; e pela Formação Cojupe, de idade entre o Turoniano e o Eopaleógeno. Os depósitos cretáceos não constituem unidade de cobertura na Ilha do Maranhão. Eles afloram em áreas restritas, na base das falésias costeiras, nas praias do Boqueirão, Olho D'água e Farol de São Marcos.

Quanto aos depósitos oligo-miocênicos, sua hierarquia litoestratigráfica ainda continua em pauta. O termo Formação Barreiras foi utilizado inicialmente por Oliveira e Ramos (1956) para retratar os sedimentos variegados encontrados ao norte de Recife/PE. A denominação Grupo Barreiras procedeu de Bigarella e Andrade (1964), mediante observação de sequências identificadas em poços nos arredores de Recife/PE. Ferraz e Valadão (2005) foram favoráveis à designação Grupo Barreiras, composto por uma sequência basal, do Plioceno, e outra superior, do Pleistoceno. De acordo com Arai (2006), é preferível a adoção do termo Grupo, uma vez que a Discordância Tortoniana separa a Unidade Barreiras em pelo menos duas sequências bem definidas.

Nos trabalhos de Rossetti (2000), na Bacia de São Luís, e Rossetti (2001b), no nordeste do Pará, a Discordância Tortoniana foi correlacionada às superfícies DS4 e SB3, respectivamente, que separam os Sedimentos Pós-Barreiras dos depósitos Barreiras, não se tratando, portanto, de duas sequências de uma mesma unidade. No entanto, em ambas as pesquisas, os depósitos Barreiras foram divididos em duas sequências, separadas por uma superfície de descontinuidade, marcada por relevo erosivo e paleossolo laterítico.

Figura 3.5 - Mapa geológico para a Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 3.6 – Coluna estratigráfica proposta para Ilha do Maranhão.

ÉON	ERA	PERÍODO	ÉPOCA	IDADE	UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	SEQUÊNCIA DEPOSICIONAL						
FANEROZÓICO	CENOZÓICO	Quaternário	Holoceno		Sedimentos Pós-Barreiras (Q)	Sucessão 3						
			Pleistoceno			Sucessão 2						
			Sucessão 1									
		Neógeno	Plioceno			Paleossolo laterítico	DS4					
					Mioceno	Neo	Formação Barreiras Média e Superior	Unidade 3				
						Meso		Paleossolo laterítico	DS3			
			Eo		Formação Barreiras Inferior	Unidade 2						
			Paleógeno		Oligoceno	Neo	Formação Pirabas	DS2 + RS				
						Meso		Unidade 1				
						Neo						
		Eoceno			Paleossolo laterítico/ bauxítico	DS1						
		Paleoceno										
		MESOZÓICO	Cretáceo		Superior	Maastrichtiano	Rossetti e Truckenbrodt (1997)	Grupo Itapecuru (K12it)	Formação Cojupe	f		
						Campaniano				S3	Formação Alcântara	e
						Santoniano						d
						Coniaciano						c
						Turoniano						b
						Cenomaniano						a
	Inferior	Albiano	Neo	Unidade Indiferenciada	S2							
			Meso		Formações Codó/Grajaú	S1						
			Eo									
		Aptiano	Neo									

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

No mapa geológico sugerido (**Figura 3.5**), os sedimentos do Oligoceno-Mioceno foram inseridos no Grupo Barreiras, em consonância com os levantamentos realizados por Veiga Júnior (2000), Vasconcelos *et al.* (2004) e Sousa *et al.* (2012). Esse entendimento é apoiado nas investigações realizadas por Rossetti (2000) no litoral maranhense, entre as cidades de Alcântara e Guimarães, e no estudo da evolução miocênica nos estados do Pará e Maranhão por Rossetti (2006).

O Grupo Barreiras (**Figura 3.6**) é constituído pelas formações Pirabas/Barreiras Inferior (Neo-oligoceno ao Eomioceno), sobrepostas discordantemente aos depósitos cretáceos do Grupo Itapecuru, e sotopostas discordantemente às formações Barreiras Médio e Superior (Mesomioceno ao Neomioceno). Elas, por sua vez, são sobrepostas discordantemente pelos Sedimentos Pós-Barreiras. Os clastos do Grupo Barreiras ocorrem ao longo dos tabuleiros, aflorando nas falésias costeiras, em cortes de estradas e em áreas de extração de argila.

Os Sedimentos Pós-Barreiras, de idade entre o Neopleistoceno e o Holoceno (TATUMI *et al.*, 2008; ALMEIDA FILHO *et al.*, 2009; ROSSETT *et al.*, 20011b; 2013b) estão sobrepostos discordantemente ao Grupo Barreiras (**Figura 3.6**). No mapa geológico proposto (**Figura 3.5**), eles integram os depósitos fluviolacustres, aluviões e coluviões, areias fluviomarinhas, areias eólicas e dunas costeiras, areias marinhas litorâneas, lamas de manguezais e areias de cordões litorâneos. Estas unidades, nos levantamentos realizados por Rodrigues *et al.* (1994), Veiga Júnior (2000), Vasconcelos *et al.* (2004) e Sousa *et al.* (2012), foram relacionadas ao Pleistoceno e ao Holoceno.

As direções preferenciais dos canais de drenagem na área de estudo são N40°-50°E, N40°-50°W e, secundariamente, N80°-90°W e N10°-20°E (**Figura 3.5**). Elas estão relacionadas à evolução neotectônica na Bacia de São Luís (FERREIRA JÚNIOR *et al.*, 1996), ou seja, à reativação de antigas zonas de cisalhamento pré-cambrianas e cretáceas, bem como à criação de novas estruturas entre o Mioceno e o Quaternário (MAIA; BEZERRA, 2011; BEZERRA *et al.*, 2014). Esses movimentos neotectônicos têm sido apontados como os responsáveis pelo desenvolvimento do relevo moderno, demonstrando que as margens passivas não permaneceram inativas e, sim, que experimentaram uma sismicidade significativa ao longo do Quaternário (ALMEIDA-FILHO *et al.*, 2009; ROSSETTI *et al.*, 2008, 2011a, 2012b).

3.2 Geomorfologia

A Ilha do Maranhão, também denominada Ilha de Upaon-Açu, está localizada a leste da Bacia Intracratônica de São Luís, mais precisamente, na porção central do Golfão Maranhense.

Essa grande reentrância do litoral maranhense está localizada entre a ponta de Guajuru, no município de Cedral, a oeste, e a ilha de Santaninha, no município de Humberto de Campos, a leste (FEITOSA, 2006, 2013). A ilha situa-se entre as baías de São Marcos e São José que, conforme Ab’Saber (2000), correspondem “[...] as duas mais largas rias do setor norte da costa brasileira, originadas pela ingressão marinha holocênica [...]”.

De acordo com Ab’Saber (1960), a Ilha do Maranhão corresponde a uma elevada plataforma de sedimentos terciários, ligeiramente isolada dos terrenos continentais pela erosão *post-pliocênica*, completamente insulada pela ingressão marinha profunda do Pleistoceno. Segundo o autor, os eventos responsáveis pela sua formação, bem como a da Baixada de Perizes, foram:

- a) soerguimento epirogenético dos sedimentos do Grupo Barreiras, seguido de superimposição hidrográfica e formação de uma superfície intermediária com canga laterítica no topo das formações terciárias;
- b) retomada da erosão fluvial, gerando uma separação entre a zona terciária da Ilha do Maranhão e as colinas terciárias do continente;
- c) afogamento dos antigos estuários de São Marcos (coletor de águas dos rios Mearim, Pindaré e Grajaú) e de São José (coletor dos rios Itapecuru e Munim) originando as baías homônimas, no Quaternário Antigo; e envolvimento do espigão terciário pelas águas ingressantes, conduzindo ao primeiro insulamento da Ilha do Maranhão;
- d) ligeiro soerguimento costeiro após a ingressão marinha do Pleistoceno Antigo, baseado em estudo dos baixos terraços marinhos e fluviais da Ilha do Maranhão e seus arredores;
- e) ingressão marinha, modesta e rasa;
- f) e assoreamento flúviomarinho do interior do Golfão Maranhense, responsável pelas feições geográficas atuais da região.

Segundo Ferreira Júnior *et al.* (1996), o primeiro soerguimento supracitado ocorreu no Pleistoceno ou até mesmo no Holoceno Antigo. Nessa época, houve o recuo da linha de costa que, no Terciário Superior, se situava nas proximidades da cidade de Mirinzal/MA, seguido da superimposição hidrográfica extensiva, segundo as principais direções estruturais. Conforme os autores, os rios Gurupi, Turiaçu, Pericumã e Mearim, durante a Transgressão Flandriana, constituíam verdadeiras rias, permitindo a entrada do mar até as proximidades das atuais cidades de Santa Helena/MA e Pinheiro/MA. No Holoceno Antigo, além dos eventos eustáticos, a movimentação transcorrente foi responsável por mudanças bruscas nos leitos dos cursos d’água de maior ordem e nas baías.

Soares Júnior *et al.* (2011) não mencionam a data de formação da Ilha do Maranhão, no entanto associam ao Pleistoceno (17.400 anos) à formação do quadro ambiental atual do litoral entre o nordeste do Pará e o noroeste do Maranhão. Nesse período de quiescência dos movimentos tectônicos e de influência das glaciações, os autores relatam que a linha de costa se encontrava nas proximidades da quebra da plataforma e um sistema de vales fluviais recortava o planalto costeiro e a plataforma continental; registram também a subida do nível do mar no Holoceno (5.200 anos) que levou ao afogamento da planície costeira, da rede de drenagem e modelagem de falésias do Grupo Barreiras. É desse último período o insulamento da Ilha de Marajó, localizada na foz do rio Amazonas.

Bartorelli (2012) correlaciona a segunda movimentação eustática, mencionada por Ab'Saber (1960), à Transgressão Flandriana. Ela ocorreu no Holoceno Médio, há 6.000 anos; está relacionada à Costa de Rias e Falésias do litoral ocidental do Maranhão e a de Dunas e Cordões Arenosos do litoral oriental do estado. O autor relata que o contraste entre os litorais se deve às influências estruturais e às movimentações das bacias de São Luís e Barreirinhas.

Quanto aos aspectos morfográficos, Brasil (1973) apresenta a relevo da Ilha do Maranhão constituído por formas de acumulação, representadas pela planície flúviomarina com rias e mangues; e por formas de dissecação, com a porção centro-norte caracterizada por relevo dissecado em colinas, com vales pouco profundos e ravinas, e a porção centro-sul, marcada por relevo dissecado em mesas, resultante da evolução dos processos de dissecação em interflúvios tabulares. Nessa região, conforme Miranda (2001), os canais de drenagem são curtos, numerosos e pouco profundos.

Maranhão (1998) destaca na área de estudo a prevalência de baixas amplitudes altimétricas e baixas declividades nos compartimentos morfológicos, em decorrência dos agentes morfogenéticos, com destaque para as ações antrópicas, climáticas e oceanográficas. As morfologias mais frequentes são as formas tabulares a subtabulares intercaladas por colinas dissecadas assentadas sobre rochas sedimentares.

Quanto ao mapeamento geomorfológico, Andrade *et al.* (2007) cartografaram a região do Itaquí-Bacanga, na escala 1:10.000, segundo cinco unidades: planalto costeiro (tabuleiro costeiro, superfície colinosa, dunas vegetadas, região interdunas e lagos perenes); planície estuarina (canal estuarino, vasa, planície de maré lamosa); planície litorânea (praia); planície fluvial (planície de inundação) e sistema antropogênico (área industrial, residencial e lago artificial).

Castro e Pereira (2012) criaram o mapa geológico-geotécnico da bacia hidrográfica do Riacho dos Cachorros, situada na porção oeste da Ilha do Maranhão. No substrato formado por

fácies arenosa, areno-argilosa e argilo-arenosa com presença de concreções lateríticas, os autores constataram um relevo colinoso, com declividade moderadamente plana a ondulada, resultante de processos erosivos em ravinas e voçorocas. Na planície flúviomarinha, com cotas abaixo de 5m, verificaram sedimentos argilosos e lamosos, com presença marcante de manguezal.

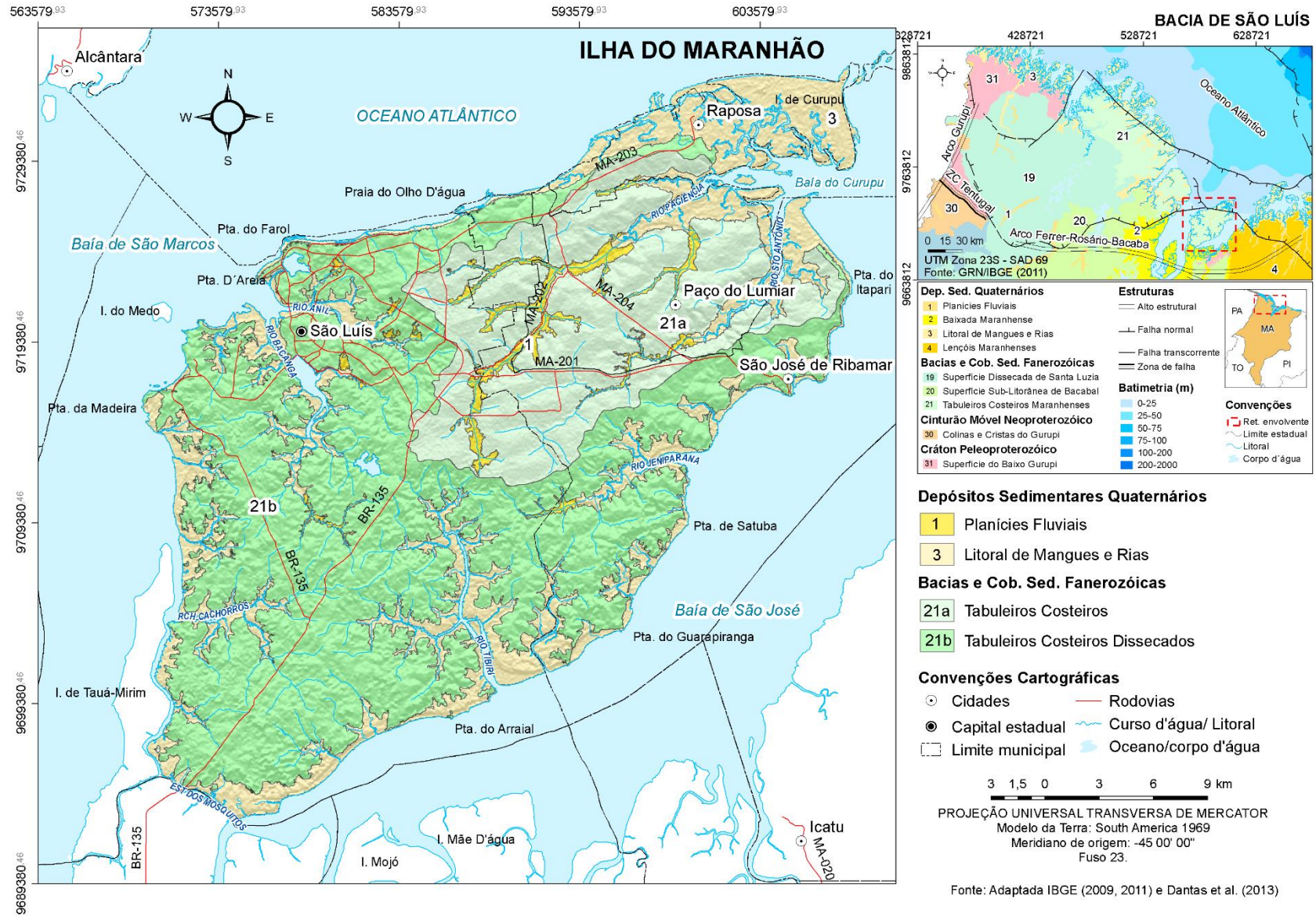
Teixeira e Souza Filho (2009) realizaram mapeamento dos ambientes costeiros do Golfão Maranhense, incluindo a Ilha do Maranhão; usaram imagens óticas TM/Landsat-4 e HRV/SPOT-2, microondas SAR/Radarsat-1 e MDE do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). A partir da análise e interpretação visual dos melhores produtos processados – composições coloridas falsa-cor TM/Landsat-4 4R5G1B e RHV/SPOT-2 3R2G1B e imagens SAR/Radarsat-1 – foram discriminados os seguintes ambientes costeiros: planalto costeiro (tabuleiro costeiro, paleodunas e lagos perenes); planície fluvial (canal estuarino, delta de maré vazante, lagos intermitentes, manguezal, pântanos: salino e de água doce, e planícies: de maré, de maré lamosa, maré arenosa, maré mista, de supramaré e arenosa); planície litorânea (dunas móveis e praia de macromaré) e sistemas antropogênicos (área construída e lago artificial).

Bezerra (2011), por sua vez, definiu cinco unidades morfoesculturais no domínio da Bacia de São Luís: superfície tabular, colinas dissecadas, depósito eólico, depósito quaternário fluvial e flúviomarinho. No âmbito da Ilha do Maranhão, o autor elaborou o mapa geomorfológico da Bacia do Rio Bacanga com base nas classes planície flúviomarinha, planície fluvial, colina dissecada e superfície tabular.

Silva (2012) adotou a taxonomia de Ross (2005) para a análise do relevo da Ilha do Maranhão, na escala 1:60.000, visando à compreensão de suas paisagens, com vistas ao planejamento ambiental. As paisagens geomorfológicas foram inseridas no domínio morfoestrutural da Bacia de São Luís e morfoescultural do Golfão Maranhão. Nesta unidade foram discriminados dois subcompartimentos morfoesculturais: os relevos denudacionais (tabuleiros com topos planos, falésias, colinas esparsas e vertentes) e os agradacionais (planícies fluviais, terraços marinhos, paleodunas, praias, dunas, apicuns e planícies de maré).

O embasamento teórico anteriormente exposto contribuiu para a proposição de um mapa de compartimentação do relevo da Ilha do Maranhão (**Figura 3.7**). A cartografia das unidades morfológicas (Tabuleiros Costeiros Maranhenses, Litoral de Mangues e Rias e Planície Fluviais) foi fundamentada também na taxonomia do mapeamento geomorfológico (IBGE, 2009), no mapa geomorfológico do Estado do Maranhão (IBGE, 2011a) e no mapa de geodiversidade do Estado do Maranhão (DANTAS *et al.*, 2013).

Figura 3.7 – Mapa de unidades morfológicas da Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

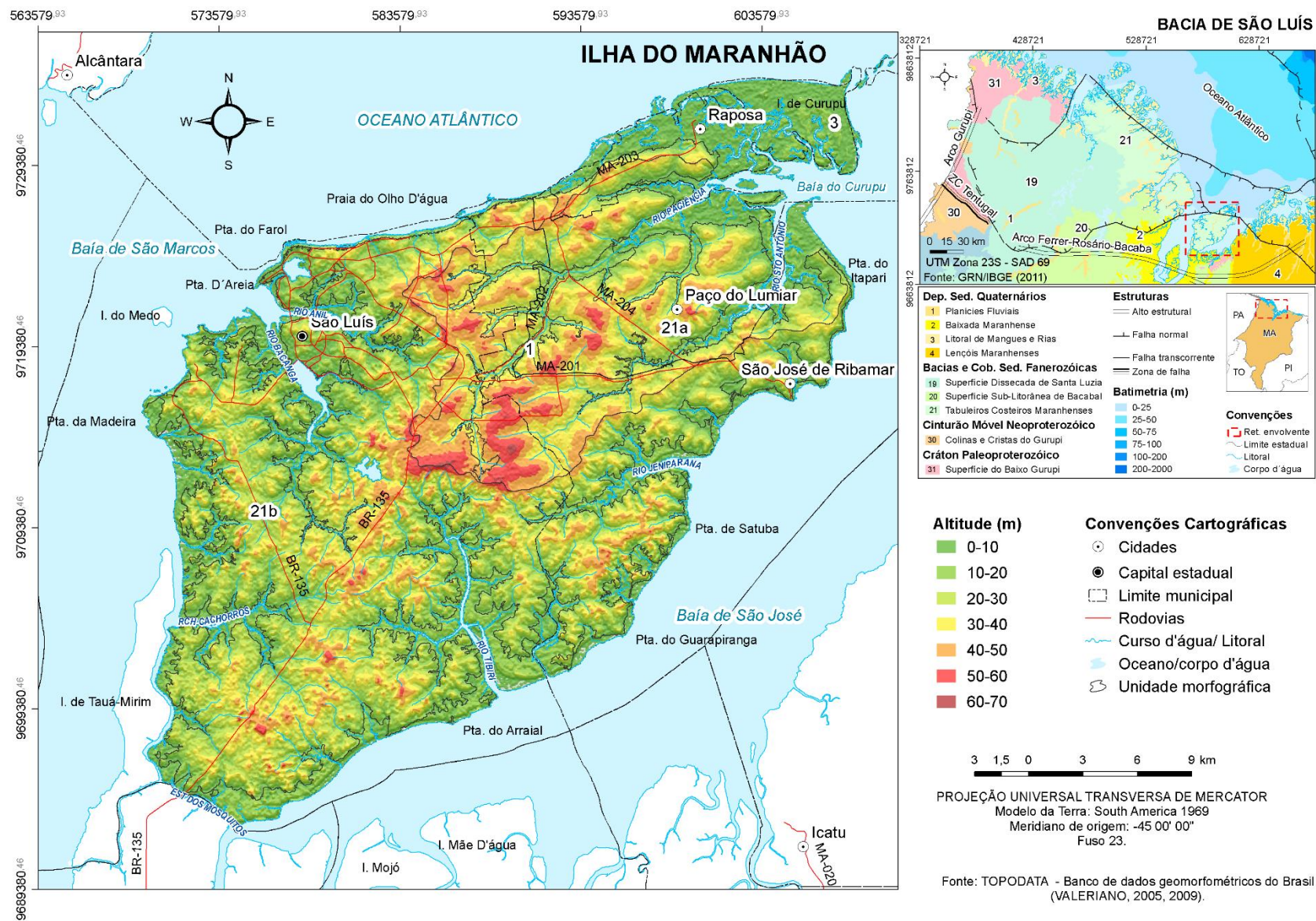
Os Tabuleiros Costeiros Maranhenses ocupam 672,83 km² (74%) da Ilha do Maranhão. De acordo com Feitosa (2006; 2013), eles constituem “[...] formas de relevo tabular e subtabular em bordas dissecadas em colinas com baixa, média e alta declividade, resultantes de processos erosivos, que deram origem a vales pouco profundos [...]” Segundo Dantas *et al* (2013), na área de estudo, essa tipologia de relevo encontra-se dividida em duas subunidades. A primeira, na porção centro-norte da Ilha, é representada por extensos tabuleiros de baixa amplitude altimétrica, enquanto a segunda, na região centro-sul, é dominada por tabuleiros intensamente esculpidos, em relevo de baixos platôs dissecados, entalhados por canais de média densidade de drenagem. Em vista disso, na **Figura 3.7**, essa unidade foi cartografada pelos números 21a e 21b.

O Litoral de Mangues e Rias (3), com 203,26 km², é mais extenso nos estuários dos rios Anil, Bacanga, Tibiri, Jeniparana, Paciência e na Ilha de Curupu (a nordeste). Essa unidade é modelada pela hidrodinâmica da costa submersa, pelo fluxo e refluxo das marés e pela ação dos ventos. Os processos marinhos e flúviomarinhos nela verificados são responsáveis pela conformação de mangues, vasas, apicuns, lagunas e falésias (FEITOSA, 2006; 2013). As Planícies Fluviais ocupam 24,07 km² da área investigada. De acordo com Teixeira e Souza Filho (2009), são áreas baixas, com cotas variando de 0 a 10 m, sujeitas à inundação durante os períodos de grandes cheias que bordejam os principais cursos d’água da Ilha do Maranhão, entre eles o Paciência, o Bacanga e o Santo Antônio.

Em relação aos aspectos morfométricos, na área investigada predominam elevações entre 20 a 30 m (**Figura 3.8**). Elas abrangem 241,51 km² e ocupam 23,83% do território. O relevo caracterizado por modelado suave-ondulado, com declividades entre 3 a 8% (**Figura 3.9**) que ocupam 541,46 km², ou seja, 60,15% do total. As elevações acima de 40m demarcam os divisores das bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão e ocorrem, sobretudo, na região centro-norte (21a), cujos terrenos caracterizam-se por declividades entre 3 a 8%. Nas proximidades do litoral, os relevos tabulares apresentam bordas abrutadas, com declividades entre 8 a 45%, ensejando à formação de barreiras terciárias, conhecidas por falésias (FEITOSA, 2006, 2013).

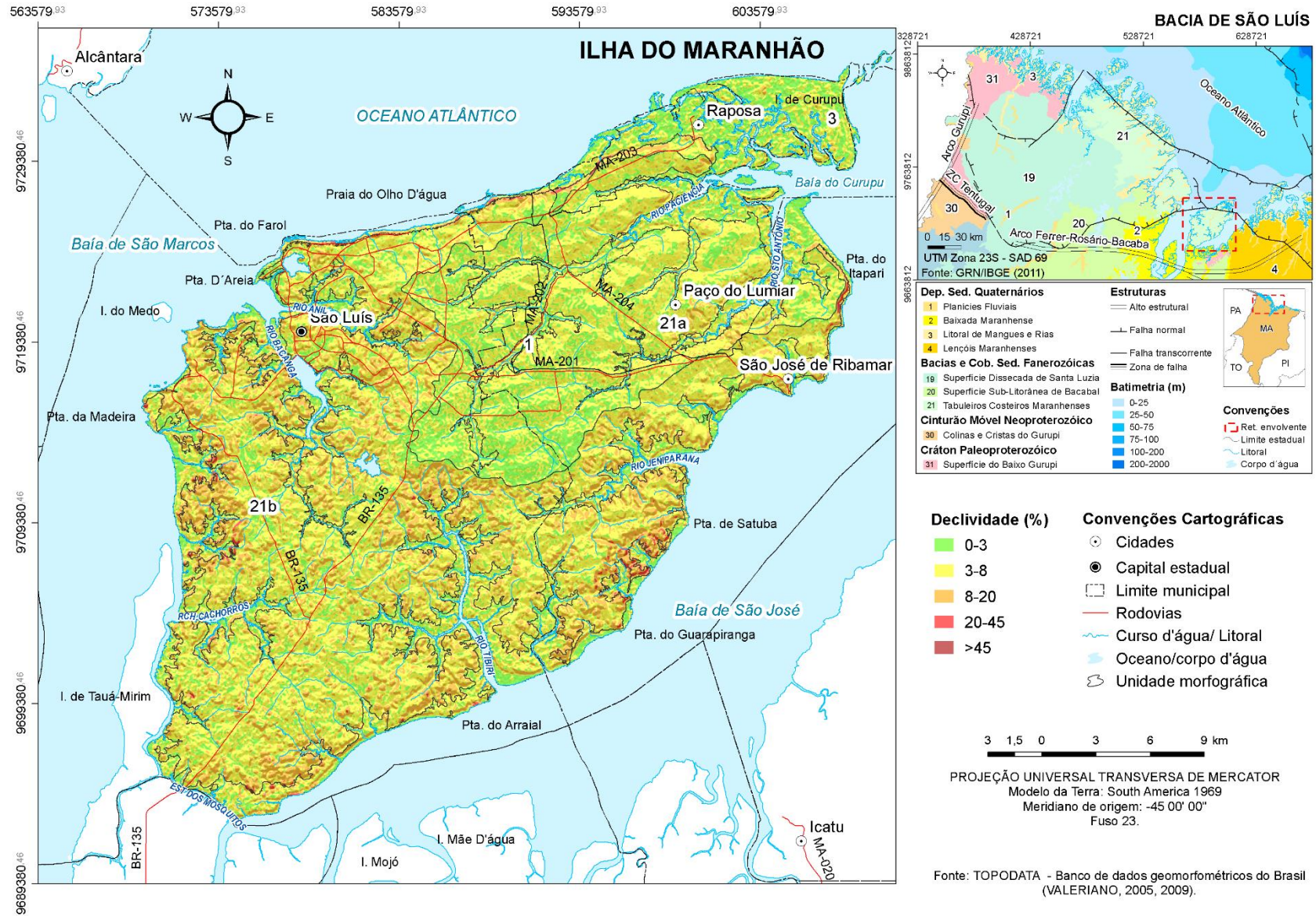
A orientação de vertentes diz respeito ao ângulo azimutal da maior inclinação do terreno, no sentido descendente, e, juntamente com a declividade, descreve tridimensionalmente o terreno (VALERIANO, 2008). No mapa de orientação de vertentes (**Figura 3.10**), parece não haver uma orientação preferencial das vertentes, o que pode ser explicado pelo modelado plano a suave-ondulado do relevo, conforme exposto anteriormente.

Figura 3.8 – Mapa de altimetria da Ilha do Maranhão.



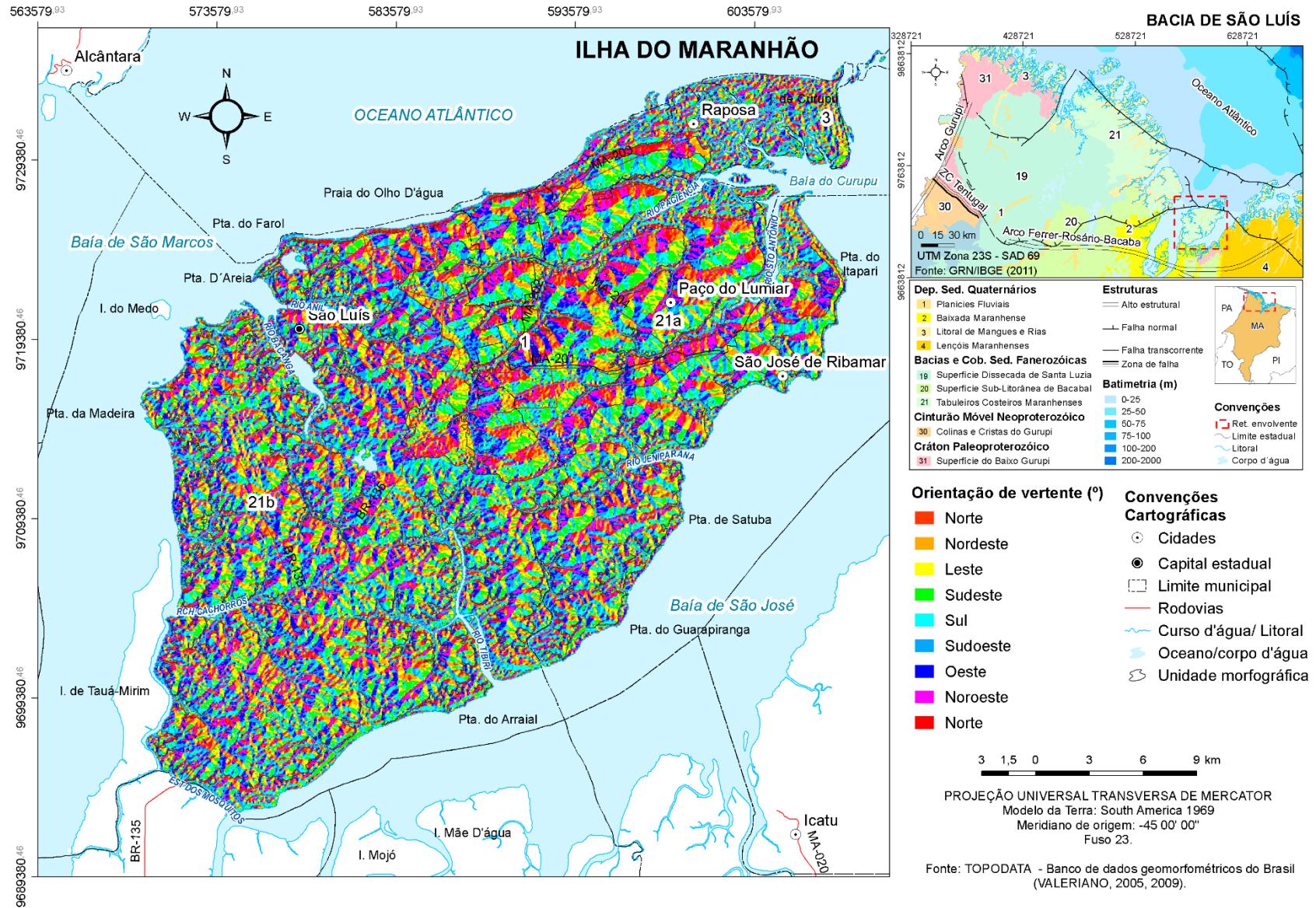
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 3.9 – Mapa de declividade da Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 3.10 – Mapa de orientação de vertentes da Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

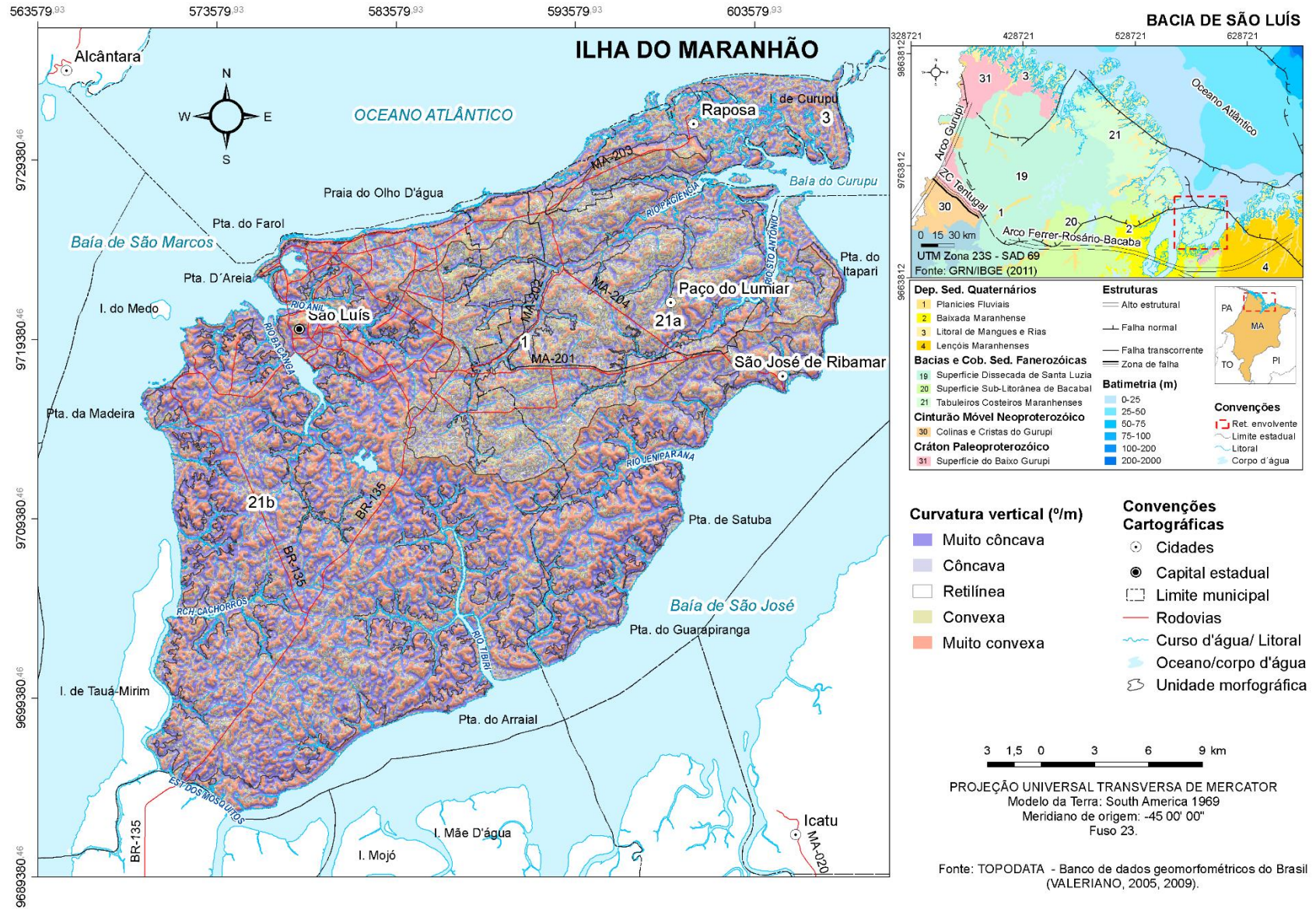
Nos Tabuleiros Costeiros (21a), por outro lado, a variável em tela evidencia um comportamento mais coerente do relevo, realçando canais de drenagem e divisores topográficos. Nessa unidade, o modelado é caracterizado por colinas alongadas segundo a direção NE-SW (com vertentes orientadas preferencialmente a NW-SE). Essa direção pode estar associada ao movimento neotectônico mais recente da Bacia Intracratônica de São Luís, ocorrido do Pleistoceno Médio ao Holoceno, cujo último episódio foi marcado pelo surgimento de falhas transcorrentes de direção NE-SW, dentre elas, a que controla a orientação geral da baía de São Marcos (FERREIRA JÚNIOR *et al.*, 1996).

A curvatura vertical (**Figura 3.11**) expressa o formato da vertente quando observada de perfil, podendo ser classificada em côncava, retilínea ou convexa (VALERIANO, 2008). Essa variável está associada à tipologia do fluxo hídrico ao longo da encosta e aos processos erosivos atuantes: as vertentes côncavas sugerem o fluxo concentrado e, por conseguinte, a predisposição à erosão subterrânea, com produção de ravinas e voçorocas; e as convexas, remetem ao fluxo laminar e à erosão homônima. As vertentes muito côncavas (282,41 km²) e muito convexas (233,06 km²) são mais frequentes nos Tabuleiros Costeiros Dissecados, na região centro-sul, e secundariamente nos Tabuleiros Costeiros, na porção centro-norte.

A observação da vertente segundo a sua projeção no plano horizontal define o caráter convergente ou divergente do fluxo de matéria (água, minerais e matéria orgânica dos solos) sobre o terreno, acionado pela ação da gravidade (VALERIANO, 2008; 2008a). Conforme o mapa de curvatura horizontal (**Figura 3.12**), as classes muito convergente e muito divergente ocupam respectivamente 340,94 km² e 335,22 km². As classes supracitadas apresentam ampla distribuição na área de estudo, exibindo um baixo contraste entre as unidades morfográficas. De acordo com Valeriano (2008), esse padrão homogêneo do mapa de curvatura horizontal, com baixa diferenciação entre as unidades, é esperado em se tratando de escalas generalizadas.

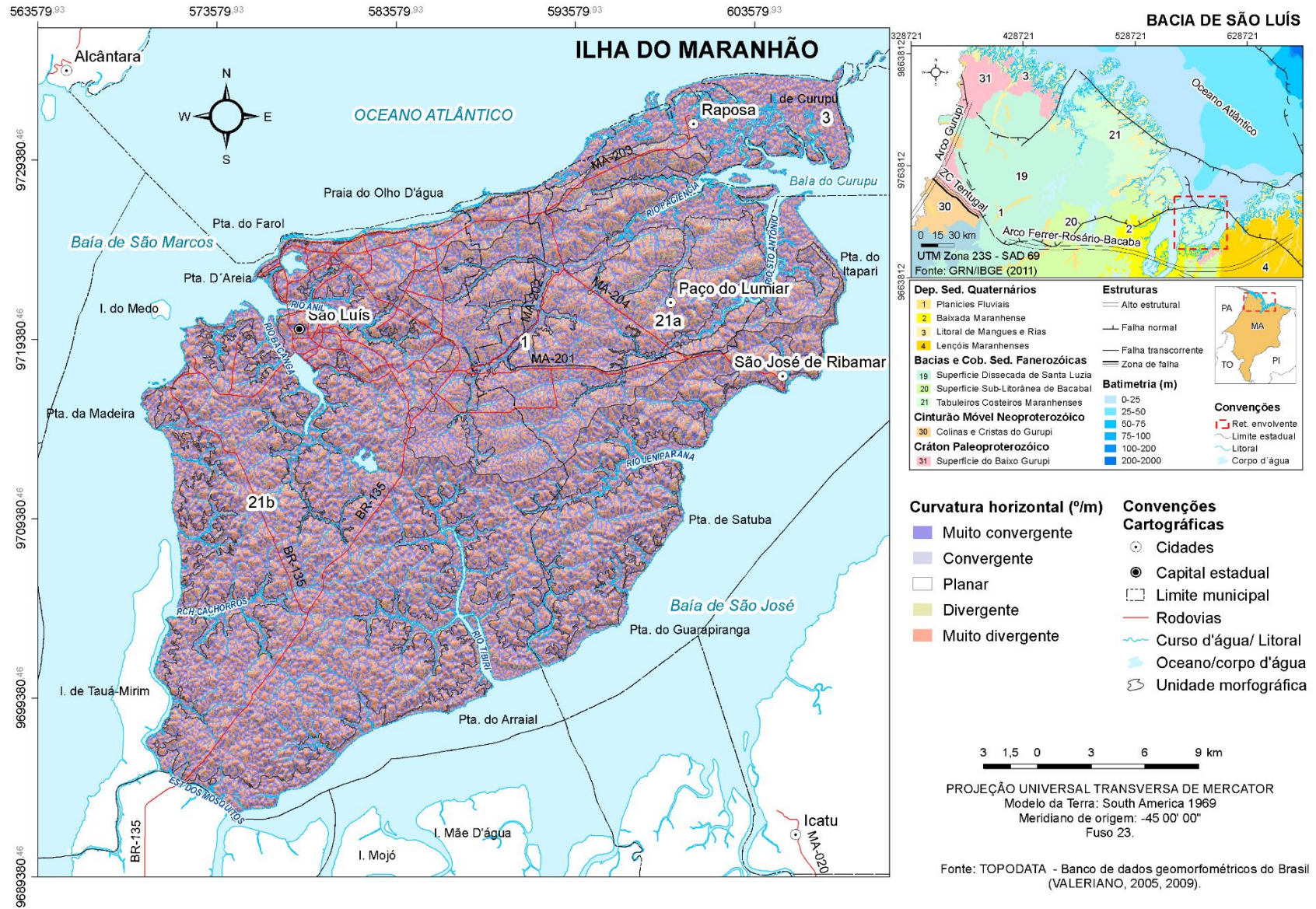
O mapa de formas de terreno (**Figura 3.13**) apresenta uma legenda que integra informações da curvatura horizontal (matiz) e da curvatura vertical (brilho). A classe convergente/côncava, em azul, retrata a situação de máxima concentração de fluxo hídrico e, por conseguinte, as áreas com maior influência de umidade. Por outro lado, a categoria divergente/convexa, em amarelo, configura as formas com maior dispersão de fluxo, logo mais secas (VALERIANO, 2008). Essas classes extremas cobrem 60,49 km² e 59,61 km² da área de estudo, principalmente, na porção centro-sul.

Figura 3.11 – Mapa de curvatura vertical da Ilha do Maranhão.



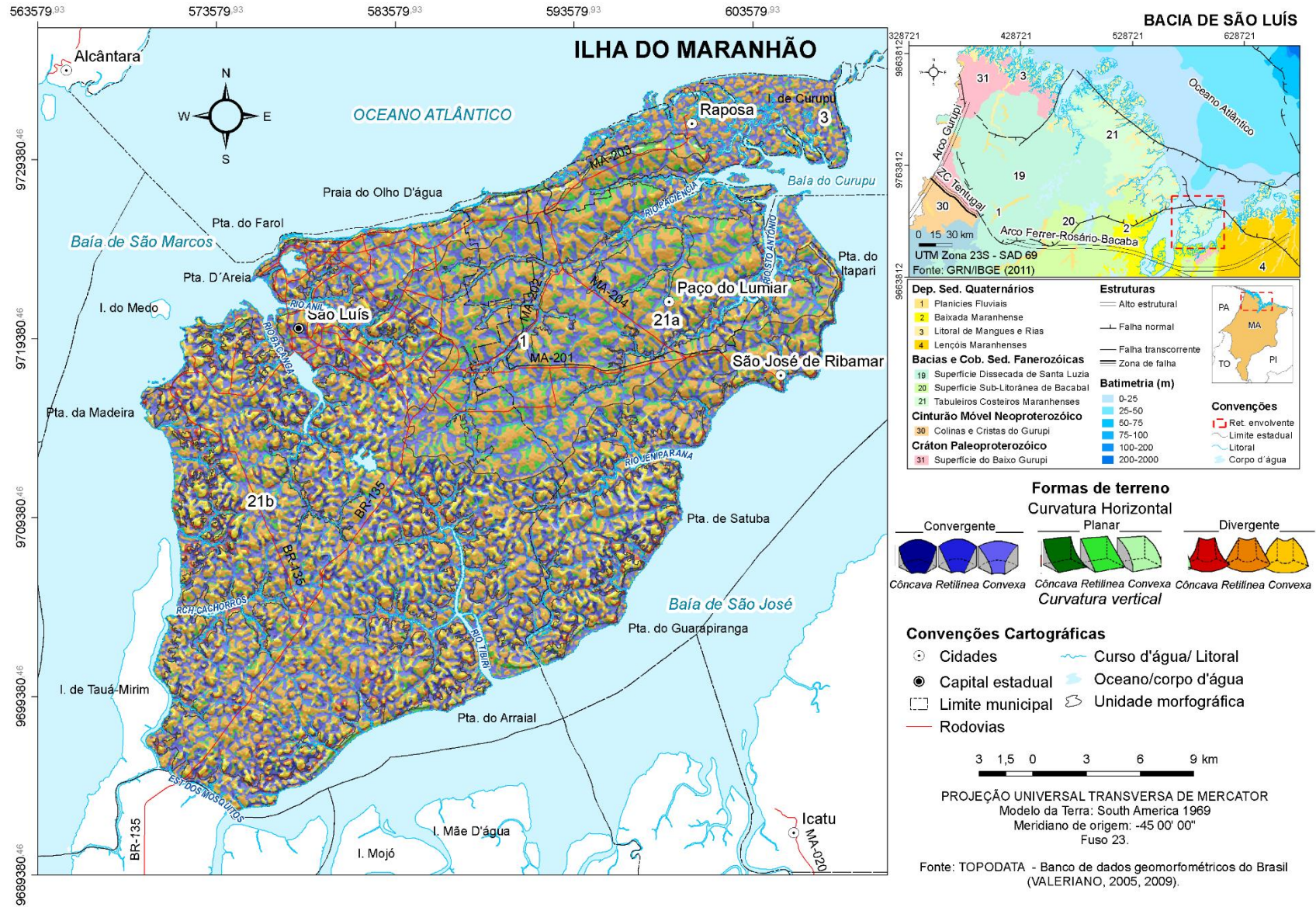
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 3.12 – Mapa de curvatura horizontal da Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 3.13 – Mapa de formas de terreno da Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os Tabuleiros Costeiros Dissecados concentram as formas de terreno mais frequentes na Ilha do Maranhão: as divergentes/retilíneas (300,19 km²), convergentes/retilíneas (258,50 km²) e planares/retilíneas (106,08 km²). O limite com os Tabuleiros Costeiros se configura pela menor incidência de formas divergentes/convexas (3,23 km²), em amarelo, e maior frequência de formas divergentes/retilíneas (87,74 km²), em laranja. Estas últimas capturam o modelado suave-ondulado da região centro-norte da Ilha do Maranhão, marcado por colinas alongadas, com amplos comprimentos de rampa, sugerindo contribuição significativa ao processo de infiltração de água no solo.

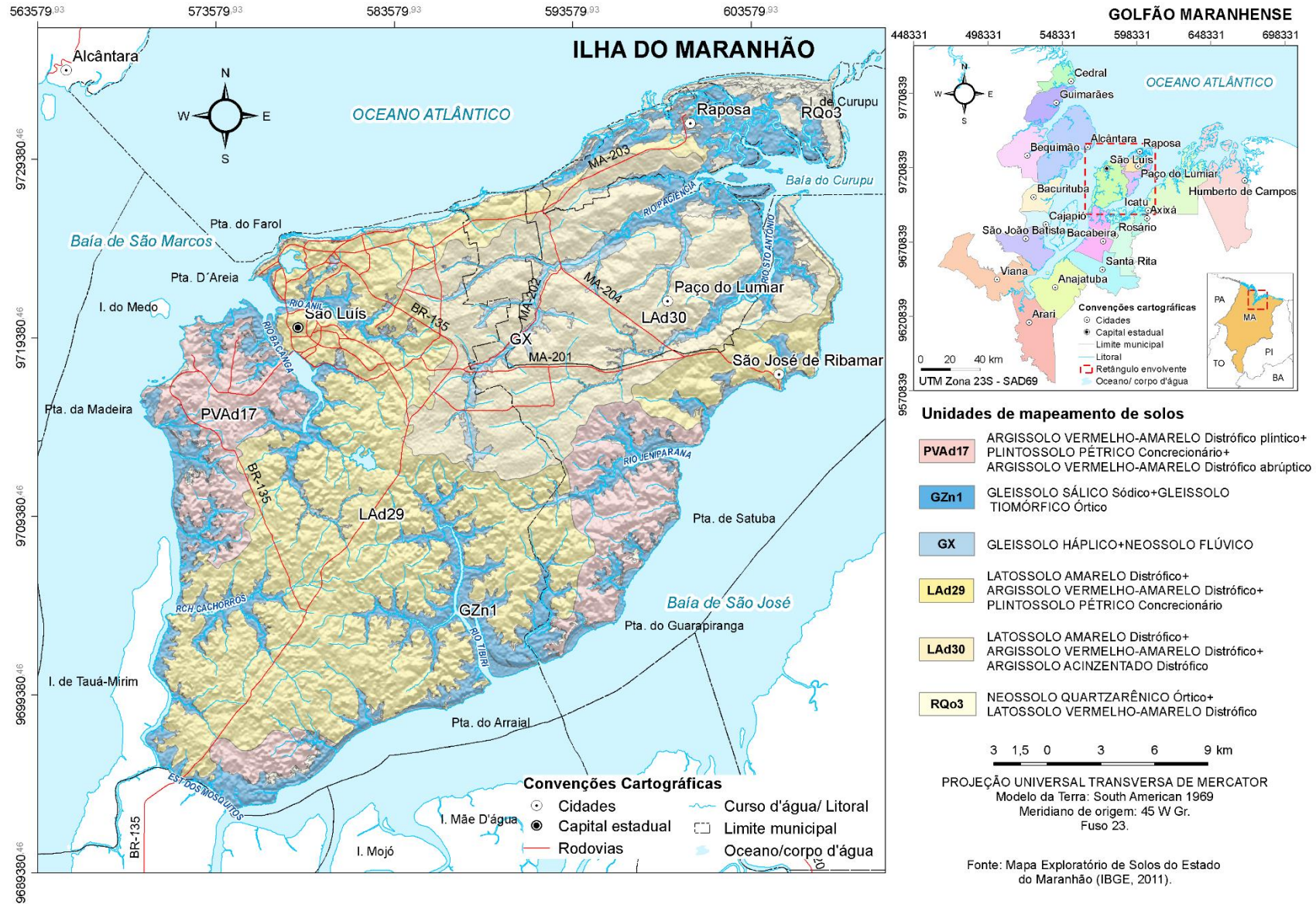
3.3 Solos

A caracterização dos solos da área de estudo foi baseada no Mapa Pedológico do Maranhão, na escala 1: 400.000 (IBGE, 2011b). As classes destacadas, em concordância com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS *et al.*, 2013), foram agrupadas em seis unidades de mapeamento (**Figura 3.14**).

Os Latossolos Amarelos (LAd29 e LAd30) são as classes de solos mais frequentes na Ilha do Maranhão. Eles ocorrem nos terrenos constituídos pelos litotipos do Grupo Barreiras e dos Sedimentos Pós-Barreiras, ao longo dos Tabuleiros Costeiros Litorâneos. Conforme Santos *et al.* (2013), IBGE (2007) e Lepsch (2002), são solos formados por material mineral, com horizonte B latossólico, cujos constituintes denotam elevado grau de intemperização, apresentando quantidades variáveis de óxidos de ferro e de alumínio, argilominerais, quartzo e outros minerais mais resistentes ao processo de intemperismo. São solos normalmente muito profundos, com horizontes A, B e C, exibindo pouca diferenciação de sub-horizontes e transições geralmente difusas ou graduais. Em relação fluxo hídrico, variam de fortemente e bem drenados.

Os Argissolos Vermelho-Amarelos (PVAd17) estão localizados a leste, oeste e no extremo sul da Ilha do Maranhão, no domínio dos Tabuleiros Costeiros Dissecados, em ambiente de relevo ondulado, ou em associação com os Latossolos Amarelos. De acordo com Santos *et al.* (2013), IBGE (2007) e Lepsch (2002), apresentam horizonte B textural (Bt), ou seja, mineral subsuperficial, com textura francoarenosa ou mais fina, em que houve incremento no teor de argila. A transição entre os horizontes A e Bt se dá de forma clara, abrupta ou gradual. Os Argissolos são de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, e com cores avermelhadas e amareladas.

Figura 3.14 – Mapa de solos da Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As classes anteriormente descritas encontram-se em associação com os Plintossolos Pétricos, solos desenvolvidos sob condições de restrição à infiltração da água gravitativa, sobretudo em locais de grande oscilação da superfície freática, ocasionando a formação de plintita. Esse material é rico em óxidos de ferro ou de ferro e alumínio, em forma de camadas ou de nódulos avermelhados, cujo processo de ressecamento, por exposição solar ou redução de umidade, dá origem a concreções ferruginosas de formas e dimensões variadas. Os solos em alusão correspondem aos antigos Concrecionários Lateríticos que, de acordo Araújo *et al.* (1973), na área de folha SA.23, exibem textura argilosa e arenosa, medianamente profundos e profundos, bem drenados, estrutura indiscriminada e maciça, ocorrendo em relevo geralmente ondulado, sobre litologias do Cretáceo até o Neógeno.

Segundo Santos *et al.* (2013), IBGE (2007) e Lepsch (2002), os Neossolos são constituídos por material mineral ou orgânico de pequena espessura, com ausência de alterações expressivas do material original, em virtude da baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos. Em vista disso, não se verifica a existência de horizonte B diagnóstico. Os Neossolos Quartzarênicos (RQo3) apresentam textura arenosa e francoarenosa em todos os horizontes até, no mínimo, a profundidade de 150 cm, a partir da superfície do solo ou até um contato lítico. Na Ilha do Maranhão, eles ocorrem ao longo do Litoral de Mangues e Rias, em ambiente de praias e dunas.

Os Gleissolos (GZn1, GX) são solos minerais com um horizonte glei, saturado com água durante um determinado período do ano, em virtude da elevação do nível freático. Tal condição cria um ambiente redutor e de solubilização do ferro, evidenciado por cores neutras dos minerais de argila, ou ainda de precipitação de compostos ferrosos. A penetração do ar proporcionada por pequenos orifícios deixados por raízes ou vermes pode levar à oxidação e à consequente formação de “mosqueados”. O horizonte saturado ocorre dentro dos primeiros 50 cm da superfície ou a uma profundidade entre 50 a 150 cm, desde que imediatamente abaixo do horizonte A ou E ou hístico (horizonte superficial essencialmente orgânico).

Na área de estudo, no domínio do Litoral de Mangues e Rias, verificam-se os Gleissolos Sállicos (GZn1), com caráter Sódico (saturação por sódio maior ou igual a 15%) em um ou mais horizontes dentro de 100 cm a partir da superfície. Eles ocorrem associados os Gleissolos Tiomórficos (GX), cujo caráter Órtico corresponde àqueles que não se enquadram no caráter Húmico (horizonte superficial escuro e espesso com baixos teores de cálcio trocável).

No domínio das Planícies Aluviais, se instalam os Gleissolos Hápllicos, termo empregado para denotar os solos que não se enquadram nas subordens Tiomorfo, Sállico e Melânico. Eles estão associados aos Neossolos Flúvicos que segundo Santos *et al.* (2013) são

originados de sedimentos aluviais, com horizonte A repousando sobre comada ou horizonte C, e que exibem caráter flúvico (termo usado para identificar solos formados a partir de sedimentos aluvionares ou colúvio-aluvionares). Na Ilha do Maranhão, eles são verificados ao longo das planícies dos rios Paciência e Santo Antônio.

3.4 Cobertura vegetal e uso da terra

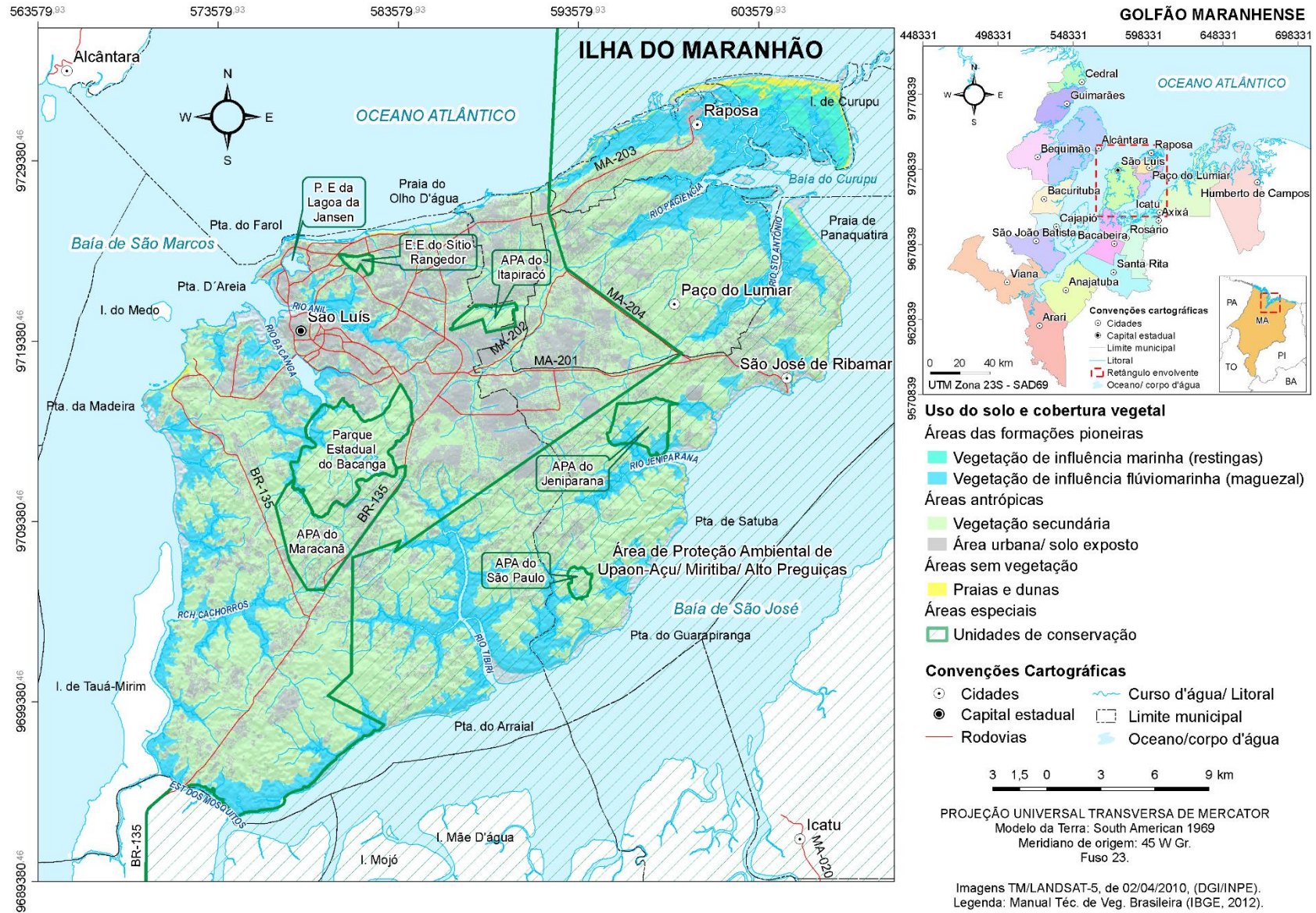
O mapa temático de cobertura vegetal e o uso da terra da Ilha do Maranhão (**Figura 3.15**) foi resultante da análise, interpretação e classificação das imagens orbitais TM/Landsat-5, órbita-ponto 220/62, de 02/04/2010, bandas espectrais de TM1 a TM5 e TM7. A nomenclatura das classes temáticas foi estabelecida conforme Manual Técnico de Vegetação Brasileira (IBGE, 2013). Elas foram organizadas segundo quatro categorias: áreas das formações pioneiras, áreas antrópicas, áreas sem vegetação e áreas especiais.

As formações pioneiras ocorrem ao longo do litoral, nas planícies fluviais e ao redor de depressões aluviais (pântanos, lagoas e lagoas). Trata-se de uma vegetação de primeira ocupação, de caráter edáfico, ocupando terrenos rejuvenescidos pela deposição de areias marinhas e fluviomarinhas, e de solos ribeirinhos aluviais e lacustres. Na categoria ora descrita, estão inseridas as vegetações com influências marinha (restingas) e flúviomarinha (manguezais e campos salinos).

A palavra restinga tem sido utilizada para designar as formações vegetais litorâneas, englobando diversas comunidades existentes em praias, antedunas, cordões arenosos, depressões entre cordões, margens de lagoas e até manguezais (LACERDA *et al.*, 1982). As restingas ocorrem sobre as planícies costeiras brasileiras, com grande heterogeneidade de tipos vegetacionais (“complexo da restinga”), com variações florísticas e fisionômicas em uma escala espacial relativamente pequena. Esse tipo de vegetação se particulariza em função da capacidade de adaptação à combinação de fatores como vento, areia e salinidade, variáveis com a topografia e distância do mar (SILVA, 2013).

Segundo Maranhão (1998), as restingas ocorrem de forma mais expressiva à nordeste da Ilha do Maranhão, na praia de Panaquatira, no município de São José de Ribamar, e nas praias de Carimã, do Canto e de Curupu (PINHEIRO; MACHADO, 2016), no município de Raposa. Entre as espécies presentes estão o *Anacardium occidentale* (caju), *Byrsonima crassifolia* (murici), *Euterpe oleracea* (açáí), *Mauritia flexuosa* (buriti) e *Spondias lutea* (cajá) (CABRAL FREIRE; MONTEIRO, 1993).

Figura 3.15 – Mapa de cobertura vegetal e uso da terra da Ilha do Maranhão em 2010.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os manguezais da Ilha do Maranhão estão inseridos na Amazônia Costeira, região que concentra a maior área contínua de mangues do mundo, com cerca de 8.900 km², ao longo dos estados do Amapá, Pará e Maranhão (MOCHEL, 2011). A porção compreendida entre a Baía de Marajó (PA) e a Ponta de Tubarão, na Baía de São José (MA), é denominada Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia. Ela corresponde a 650 km de litoral em linha reta, caracterizada por baixo relevo, ampla planície costeira, extensa plataforma continental adjacente e recortada por vários estuários (SOUSA FILHO, 2005).

No Maranhão, os manguezais ocorrem em extensas planícies lamosas, marismas hipersalinos, apicuns, brejos de água doce e várzeas de marés. As espécies arbóreas apresentam altura menor que 1 m, nos ambientes salinos, e maior que 35 m, nas áreas de maior aporte de águas doces e marés elevadas. As espécies presentes nos bosques mistos ou homogêneos são o mangue vermelho (*Rhizophora mangle*, *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii*), a siriba ou siriúba (*Avicennia germinans* e *Avicennia schaueriana*) e o mangue branco ou tinteira (*Laguncularia racemosa*) (MOCHEL, 1999, 2011).

Segundo Mochel *et al.* (2013), na Ilha do Maranhão, os manguezais estão distribuídos ao longo da linha de costa, em depressões atrás das praias e dunas, e nas margens de rios e igarapés. Em 1972, eles abrangiam 258 km² e em 1993 cobriam 189 km². Estudos realizados pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente, em 1993, empregando imagens SPOT de 1991, revelaram uma área de 158 km². De acordo com o Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC, 2011), em 2008, a área de manguezal na Ilha do Maranhão, obtida de classificação de imagens TM/Landsat-5, foi de 105 km²; o decréscimo em relação 1993 foi associado ao crescimento populacional e à especulação imobiliária.

Conforme Mochel *et al.* (2013), a degradação desse ecossistema na área de estudo está associada ao desmatamento da terra firme, erosão, assoreamentos ativos, exploração madeireira, manchas de óleo, deposição de lixo, entre outros agentes tensores. As intervenções antrópicas no meio ambiente e as consequências sobre os manguezais na Ilha do Maranhão foram abordadas em Gomes (2001) e Bezerra (2008), na bacia do Rio Anil; Coelho *et al.* (2007), no manguezal do Araçagy; Rocha Filho (2010), na Baía de São Marcos; Fonseca e Mochel (2016), na foz do Rio dos Cachorros.

O uso de dados de sensoriamento remoto ótico e de microondas na estimativa de cobertura e de mudanças em áreas de mangue na Ilha do Maranhão também foram observados por Rangel (2000), Souza Filho (2005), Espig *et al.* (2007), Barros (2009), Rodrigues *et al.* (2013), entre outros. Bezerra (2014) simulou o padrão de resposta e determinou a capacidade

de resistência do manguezal frente à elevação do nível do mar, empregando modelagem espacialmente explícita.

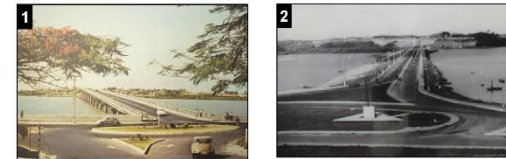
Em relação à vegetação secundária, ela abrange desde as florestas e campos originais alterados até as formações florestais espontâneas secundárias, em diversos estágios sucessionais (IBGE, 2012, 2013). Espírito Santo (2006) denominou essa classe de matas secundárias, referindo-se às formações oriundas da devastação das florestas pioneiras que se regeneram naturalmente nas áreas afetadas. No mapa de cobertura vegetal e uso da terra (**Figura 3.15**), as áreas de vegetação secundária abrangem aquelas que foram cartografadas como floresta secundária mista, mata galeria e capoeira por Maranhão (1998), e como florestas secundárias, babaçuais, mata galeria e de várzea pelo Gerenciamento Costeiro do Maranhão – GERCO (2010).

Quanto a classe área urbana/solo exposto, ela envolve as áreas de mineração, industriais, loteamentos, condomínios, chácaras, sítios, portos entre outras (IBGE, 2012). Adota-se o entendimento do IMESC (2011), ao estabelecer para Ilha do Maranhão a classe área ocupada/solo exposto, referindo-se às feições antropizadas, sem vegetação, influenciadas pelo processo de urbanização, excluindo os ambientes dunários e lacustres; segue-se também a definição do IBGE (2013), em alusão às vilas, cidades, complexos industriais, áreas urbano-industriais e outras em processo de urbanização incipiente.

A relação entre as classes vegetação secundária e áreas urbanas/solo exposto vêm sofrendo mudanças significativas, principalmente a partir de 1970, quando se deu a mudança do eixo de expansão da cidade de São Luís, proporcionada pela abertura de novos corredores, como a barragem do Bacanga e a primeira ponte sobre o rio Anil que encurtou o acesso entre o Centro Histórico e a faixa litorânea. Essas obras permitiram o crescimento da cidade para além dos limites naturais impostos pelos rios Anil e Bacanga.

No mapa de expansão urbana da Ilha do Maranhão (**Figura 3.16**), até 1973, a expansão urbana (52,22 km²) foi orientada do núcleo inicial da cidade de São Luís em direção a porção central da ilha. Em 1984, o crescimento urbano (62,53 km²) foi mobilizado pela abertura de novos corredores, pela expansão da zona industrial e pela atuação das políticas habitacionais. Em 1995, a expansão urbana sofreu uma queda (58,38 km²) ocasionada, entre outros motivos, pela falência das políticas habitacionais (BURNETT, 2002) e pela criação da Lei N° 3.253, de 29 de dezembro de 1992, de zoneamento, parcelamento, uso e ocupação do solo urbano, que regulou o “urbanismo espontâneo” da cidade de São Luís (ESPÍRITO SANTO, 2006).

Figura 3.16 – Mapa de expansão urbana da Ilha do Maranhão de 1973 a 2010. Notar os pontos numerados e as respectivas figuras à direita do mapa.



Ponte José Sarney (à esquerda) e Barragem do Bacanga (à direita) construídas na década de 1970.



Av. Litorânea (à esquerda) construída na década de 1990. Avenida Euclides Figueiredo edificada na década de 2000, após a construção da ponte Bandeira Tribuzzi.



Complexo Portuário do Maranhão formado pelo Porto da Ponta da Madeira da VALE (à esquerda), construído na década de 1980, e do Itaqui (à direita), instalado na década de 1970.



Expansão urbana à nordeste da Ilha (à esquerda) e conjunto habitacional Cidade Operária construído na década de 1980 (à direita).



Conjunto habitacional no município de São José de Ribamar, (à esquerda). Construção da Av. Quarto Centenário e de moradias na margem esquerda do rio Anil (à direita).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Em 2006, a expansão urbana (68,75 km²) ocorreu nas regiões periféricas ao município de São Luís, caracterizando um processo de conturbação urbana fomentado, possivelmente, pela criação da Lei Complementar Estadual N° 38, de 12 de janeiro de 1998, que institui a Região Metropolitana da Grande São Luís. Em 2010, a expansão urbana foi registrada principalmente em São José de Ribamar e Paço do Lumiar, relacionada aos conjuntos habitacionais do Projeto Minha Casa Minha Vida que atraíram um contingente populacional numeroso para esses municípios (IPEA, 2015).

No mapa de cobertura vegetal e uso da terra (**Figura 3.15**), as áreas sem vegetação são representadas pelas praias e dunas. No litoral norte da Ilha do Maranhão, a largura média das praias (250 m) é condicionada pela amplitude de maré, que chega até 7 m nas marés de sizígia. As praias apresentam baixa declividade, baixo índice de curvatura, são dissipativas e constituídas predominantemente por areias quartzosas, com fragmentos de conchas e restos de vegetais (SANTOS, 1989, 1996; FEITOSA; CHRISTOFOLETTI, 1993; FEITOSA, 1989, 1997; TAROUCO; SANTOS, 1997; SOBRINHO, 1998; VIANA, 2000). As dunas costeiras estão situadas na zona contígua à linha máxima de preamar, quase sempre desprovidas de vegetação e constituídas predominantemente por areias finas e muito finas (SANTOS, 1996).

Em relação às unidades de conservação, a listagem daquelas existentes na Ilha do Maranhão (**Tabela 3.2**) foi baseada no Cadastro Nacional de Unidades de Conservação, do Ministério do Meio Ambiente. As informações das unidades de conservação criadas anteriormente à implantação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (Lei N° 9.985, de 18 de julho de 2000) e que não pertencem às categorias previstas na referida lei foram obtidas de Porto (2008), dos Planos Diretores de São Luís (Lei N° 4.669, de 11 de outubro de 2006), São José de Ribamar (Lei N° 645, de 10 de outubro de 2006), Paço do Lumiar (Lei N° 225, de 10 de outubro de 2006) e do IMESC (2011).

3.5 Clima

Para caracterização climática da Ilha do Maranhão foram adotadas as Normais Climatológicas de 1961 a 1990, da estação meteorológica convencional de São Luís/MA (82280), localizada à 2° 32' S, 44°13' W, e altitude de 50 m. Sobre os dados de temperatura média e de precipitação acumulada mensais foram aplicadas as classificações climáticas de Köppen e Thornthwaite.

Tabela 3.2 – Unidades de conservação na Ilha do Maranhão.

1	2	3	4	5	6	7
Estadual	Área de Proteção Ambiental da Região do Maracanã	Área de proteção ambiental	Uso sustentável	Decreto Nº 12.103, de 01/10/1991	18,3100	São Luís
Estadual	Área de Proteção Ambiental de Upaon-Açu/ Miritiba/ Alto Preguiças	Área de proteção ambiental	Uso sustentável	Decreto Nº 12.248, de 05/06/1992	15.353,1	São Luís, São J. de Ribamar, Raposa, Paço do Lumiar
Estadual	Parque Estadual do Sítio Rangedor	Parque Estadual	Proteção integral	Decreto Nº 21.797, de 15/12/2005	1,2565	São Luís
Estadual	Área de Proteção Ambiental do Itapiracó	Área de proteção ambiental	Uso sustentável	Decreto Nº 15.618, de 23/06/1997	3,2200	São Luís, São J. de Ribamar
Estadual	Parque Estadual do Bacanga	Parque	Proteção integral	Decreto Nº 7.545 de 07/03/1980	31,15	São Luís
Estadual*	Parque Ecológico da Lagoa da Jansen	Parque	Uso sustentável	Decreto 4.878, de 23/06/1988	1,9600	São Luís
Federal	Reserva Particular do Patrimônio Natural Estância Pedreiras	Reserva particular do patrimônio natural	Uso sustentável	Portaria Nº 56, de 23/04/2001	0,3801	São Luís
Federal	Reserva Particular do Patrimônio Natural Fazenda Boa Esperança	Reserva particular do patrimônio natural	Uso sustentável	Portaria Nº 120-N, de 21/10/1997	0,7500	São Luís
Federal	Reserva Particular do Patrimônio Natural Jaguarema	Reserva particular do patrimônio natural	Uso sustentável	Portaria Nº 100-N, de 13/07/1998	0,7500	São Luís
Federal	Reserva Particular do Patrimônio Natural Sítio Jaguarema	Reserva Particular do patrimônio natural	Uso sustentável	Portaria Nº 2.468, de 26/12/1990	0,7680	São J. de Ribamar
Municipal*	Sítio Santa Eulália	-	Uso sustentável	-	-	São Luís
Municipal*	Parque Rio das Bicas	Parque	Uso sustentável	Lei Nº 3.019, de 28/12/1989	0,0450	São Luís
Municipal*	Parque do Bom Menino	Parque	Uso sustentável	Lei Nº 3.252, de 29/12/1992	0,0300	São Luís
Municipal*	Parque do Diamante	Parque	Uso sustentável	Lei Nº 3.019, de 28/12/1989	0,0290	São Luís
Municipal*	Área de Proteção Ambiental do Jeniparana	Área de proteção ambiental	-	Lei Nº645, de 10/10/2006	-	São J. de Ribamar
Municipal*	Área de Proteção Ambiental do São Paulo	Área de proteção ambiental	-	Lei Nº645, de 10/10/2006	-	São J. de Ribamar
Particular*	Parque Ambiental da ALUMAR	-	-	-	-	São Luís
Particular*	Parque Botânico da VALE	-	-	-	-	São Luís

Legenda: (1) Esfera administrativa; (2) Nome; (3) Categoria; (4) Grupo; (5) Último ato legal; (6) Área (km²); (7) Município da Ilha; (*) Unidades não cadastradas no CNUC; (-) sem informação.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de Cadastro Nacional de Unidades de Conservação, 2018; IMESC, 2011; Porto, 2008; Plano Diretor de São Luís (Lei Nº 4.669, de 11 de outubro de 2006); Plano Diretor de São José de Ribamar (Lei Nº 645, de 10 de outubro de 2006).

De acordo com a Classificação de Köppen, o clima na Ilha do Maranhão é do tipo Tropical de Savana (Aw), no qual a temperatura do mês mais frio é superior a $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Conforme o climograma (**Figura 3.17a**), a temperatura média anual é de $26,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. No período chuvoso, de janeiro a julho, as precipitações totalizam 2.142 mm , enquanto no período seco, de agosto a dezembro, atingem $148,2\text{ mm}$. Esses totais representam respectivamente $93,5\%$ e $6,5\%$ do total anual que é de $2.290,3\text{ mm}$. O maior volume de chuvas ocorre em abril, com média histórica de $475,9\text{ mm}$, ao passo que o menor ocorre em outubro, com registro de $7,6\text{ mm}$.

Para a segunda classificação climática, foram utilizadas as planilhas propostas por Rolim *et al.* (1988). Elas estimam os valores de evapotranspiração potencial mensal (ETP) a partir da temperatura média mensal (T), da precipitação acumulada mensal (P) e da altitude do local, empregando o método de Thornthwaite (1955). Posteriormente, baseado no método de Thornthwaite e Matter (1995), foi gerado o balanço hídrico climatológico que forneceu as estimativas de armazenamento de água no solo (ARM), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC).

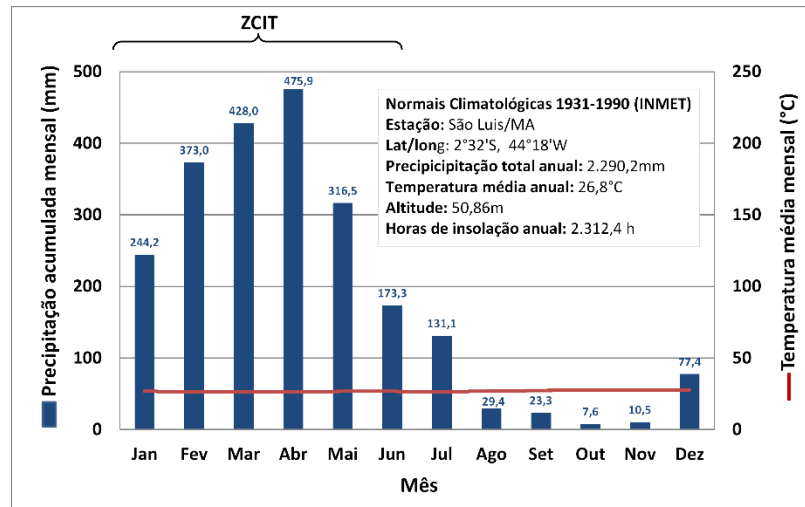
De acordo com os dados do balanço hídrico climatológico (**Tabela 3.3**), o clima na Ilha do Maranhão, conforme a classificação de Thornthwaite, é do tipo $AwA'a'$, ou seja, perúmido (A), com índice de umidade efetiva superior a 100; déficit moderado de umidade no inverno (w), explicado pelo índice de aridez entre 16,7 e 33,3; megatérmico (A'), com evapotranspiração potencial anual de 1.159 mm , acima do limite superior da classificação que é de 1140 mm ; e com 48% da evapotranspiração concentrada no verão (a').

Caracterizar o clima em termos de excedente e déficit de umidade do solo constitui objetivo principal do sistema de classificação climática de Thornthwaite. Nesse sentido, pela contabilização do balanço hídrico climatológico (**Figuras 3.17b, c, d**) e considerando a capacidade de água disponível no solo (CAD) de 100 mm (PEREIRA *et al.* 2002), o excedente hídrico estimado foi de $1.392,3\text{ mm}$, para o período de janeiro a julho. Esse valor foi obtido considerando-se a oferta hídrica de $2.142,0\text{ mm}$ da precipitação, a demanda de $652,5\text{ mm}$ da evapotranspiração potencial e a reposição de $97,2\text{ mm}$ do armazenamento.

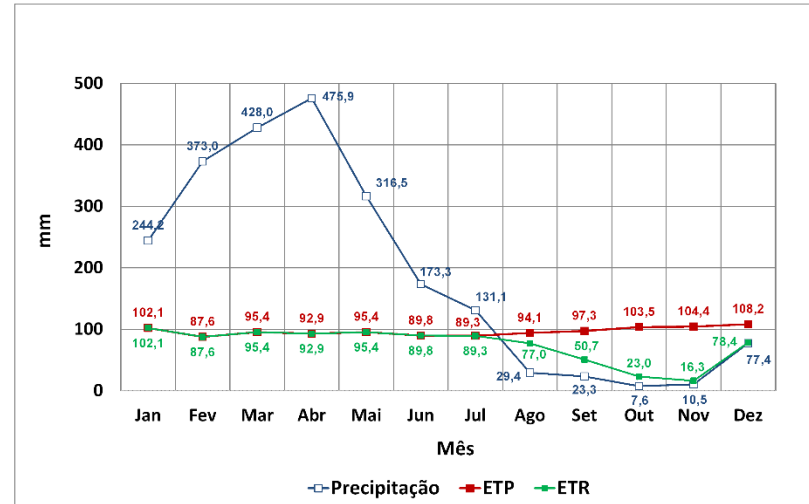
Nos meses de agosto a dezembro, a deficiência hídrica estimada foi de $262,0\text{ mm}$. Ela representa a parcela da evapotranspiração potencial ($507,5\text{ mm}$) não suprida pela precipitação ($148,2\text{ mm}$), menos a retirada referente ao armazenamento ($97,3\text{ mm}$). Os valores de excedente e deficiência hídrica supracitados são função da precipitação pluviométrica cujo regime é modulado pelos sistemas meteorológicos que atuam na região, os quais são discutidos a seguir.

Figura 3.17 - Climograma e balanço hídrico climatológico para estação convencional de São Luís/MA, de 1961-1990.

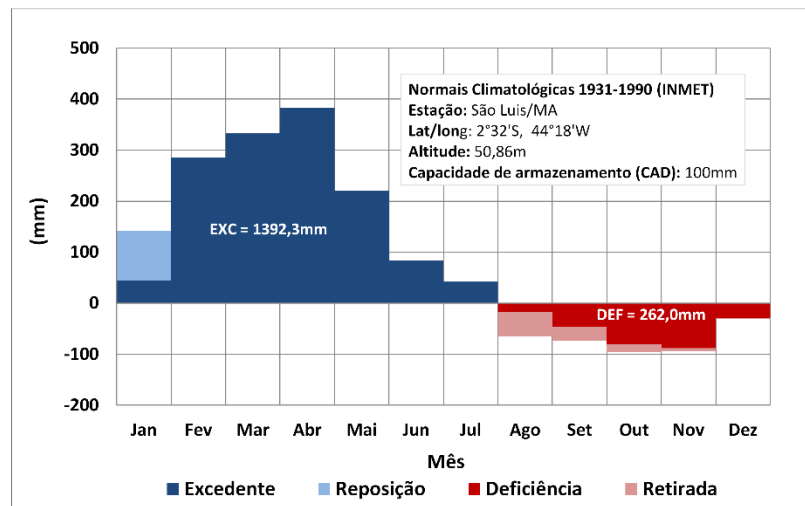
a) Climograma



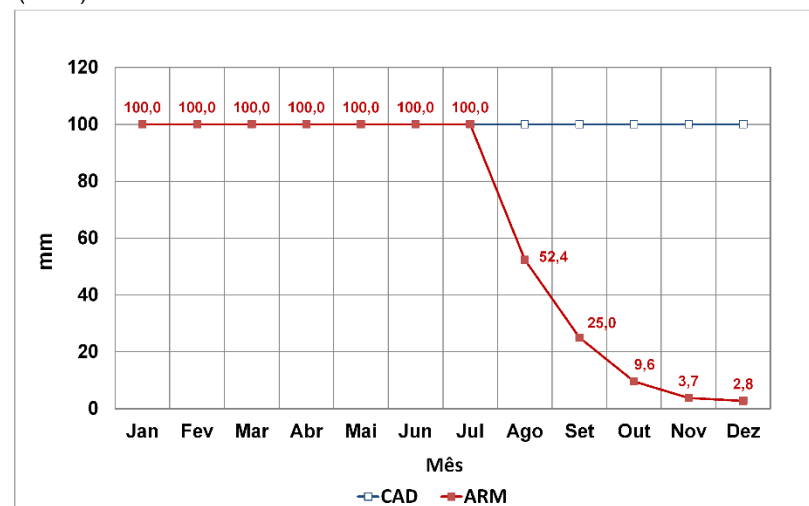
b) Variação anual da precipitação (P), evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR)



c) Deficiência (DEF) e excedente (EXC) hídricos



d) Capacidade de água disponível (CAD) e armazenamento mensal (ARM)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de INMET, 2011, e planilhas de Rolim *et al.*, 1988.

Tabela 3.3 – Balanço hídrico climatológico normal, segundo Thornthwaite e Matter (1955), para estação convencional de São Luís/MA, no período de 1961-1990.

MÊS	T (°C)	P (mm)	ETP (mm)	P – ETPT (mm)	NAC (mm)	ARM (mm)	ALT (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
JAN	26,8	244,2	102,1	142,1	0,0	100,0	97,3	102,1	0,0	44,9
FEV	26,3	373,0	87,6	285,4	0,0	100,0	0,0	87,6	0,0	285,4
MAR	26,2	428,0	95,4	332,6	0,0	100,0	0,0	95,4	0,0	332,6
ABR	26,4	475,9	92,9	383,0	0,0	100,0	0,0	92,9	0,0	383,0
MAI	26,6	316,5	95,4	221,1	0,0	100,0	0,0	95,4	0,0	221,1
JUN	26,7	173,3	89,8	83,5	0,0	100,0	0,0	89,8	0,0	83,5
JUL	26,4	131,1	89,3	41,8	0,0	100,0	0,0	89,3	0,0	41,8
AGO	26,9	29,4	94,1	-64,7	-64,7	52,4	-47,7	77,0	17,1	0,0
SET	27,3	23,3	97,3	-74,0	-138,7	25,0	-27,4	50,7	46,6	0,0
OUT	27,5	7,6	103,5	-95,9	-234,6	9,6	-15,4	23,0	80,5	0,0
NOV	27,7	10,5	104,4	-93,9	-328,5	3,8	-5,8	16,3	88,0	0,0
DEZ	27,6	77,4	108,2	-30,8	-359,3	2,8	-1,0	78,4	29,8	0,0
TOTAL		2.290,2	1.159,9	1.130,3		793,0	0,0	897,9	262,0	1.392,3
MÉDIA	26,8	190,9	96,7	94,2		66,1		74,8	21,8	116,0

Legenda: (T) temperatura; (P) precipitação; (ETP) evapotranspiração potencial; (NAC) negativo acumulado; (ARM) armazenamento; (ALT) $ARM_{final} - ARM_{inicial}$; (ETR) evapotranspiração real; (DEF) déficit hídrico; (EXC) excedente hídrico; (CAD) 100mm.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de INMET, 2011.

Os sistemas meteorológicos responsáveis pelas alterações no tempo e no clima das regiões tropicais são: os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) ou Ondas de Leste; os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN); e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Este último sistema de grande escala atua em várias regiões tropicais, como por exemplo, o Norte do Nordeste do Brasil (NEB) cujas precipitações são fortemente dependentes de sua posição e intensidade (UVO, 1989; MELO *et al.*, 2000; COÊLHO, 2002; SOUZA FILHO, 2003).

Na ZCIT, os ventos alísios de nordeste e sudeste, ao longo da zona equatorial, no ramo ascendente da célula de Hadley, ascendem por convecção, sofrem expansão térmica adiabática, e se condensam. A condensação é responsável pela liberação de calor latente e formação de intensa banda de nebulosidade (KEMP, 1994; LINACRE; GEERTS, 1997; THOMPSON, 1998; OPEN UNIVERSITY, 2001; ZÚÑIGA LÓPEZ; CRESPO DEL ARCO, 2010; WELLS, 2011; CRISTOPHERSON, 2012; PETERSON *et al.*, 2014). Seu posicionamento e intensidade atuam na qualidade do período chuvoso no NEB (HASTENRATH; HELLER; 1977; MOURA; SHUKLA, 1981; UVO, 1989; HASTENRATH, 1984; MELO *et al.*, 2000; POLZIN; HASTENRATH, 2014).

A marcha sazonal da ZCIT varia aproximadamente entre 10° N e 5° S. Sua posição climatológica mais ao sul (5° S) é atingida nos meses de março e abril quando a sua extremidade oeste repousa sobre o noroeste do Estado do Maranhão e são registradas as maiores médias da

série histórica em São Luís. Por outro lado, a posição climatológica mais ao norte (10° N) é alcançada nos meses de setembro, outubro e novembro, que caracterizam o máximo da estiagem, quando são registradas as menores médias da série histórica.

A marcha sazonal da ZCIT, nos hemisférios Norte e Sul, entre julho de 2012 e junho de 2013, é exibida através das pântadas (**Figura 3.18**). Elas representam a posição média da ZCIT entre os dias 1 a 5, 6 a 10, 11 a 15, 16 a 20, 21 a 25 e 26 a 31 de cada mês. A linha preta representa posição climatológica da ZCIT no respectivo mês. As estimativas foram adquiridas através dos Boletins de Monitoramento e Análise Climática (CLIMANÁLISE, 2012 e 2013), do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). Os gráficos ilustram o comportamento das Normais Climatológicas de precipitação acumulada referentes à estação convencional de São Luís.

A variabilidade da ZCIT em relação a sua posição climatológica é influenciada pela Temperatura da Superfície do Mar (TSM) dos oceanos Atlântico Tropical e Pacífico Equatorial (SOUZA-FILHO, 2003). As anomalias de TSM nos oceanos Atlântico Tropical (Dipolo do Atlântico) e Pacífico Equatorial (El Niño e La Niña) causam perturbações nas células de Hadley e de Walker que, por sua vez, interferem no comportamento climatológico da ZCIT (FERREIRA; MELLO, 2005).

Os desvios de TSM no Atlântico Tropical e no Pacífico Equatorial podem ocorrer simultaneamente. De acordo com Ferreira e Mello (2005), o El Niño e o Dipolo do Atlântico positivo causam estações secas ou muito secas no NEB. Por outro lado, a La Niña, associada ao Dipolo do Atlântico negativo são responsáveis por períodos considerados normais, chuvosos ou muito chuvosos na região. Ainda, segundo os autores, quando as águas do Pacífico Equatorial estão em condições normais de TSM e verifica-se um Dipolo do Atlântico negativo ou positivo a probabilidade de se ter um ano normal/chuvoso ou seco é alta.

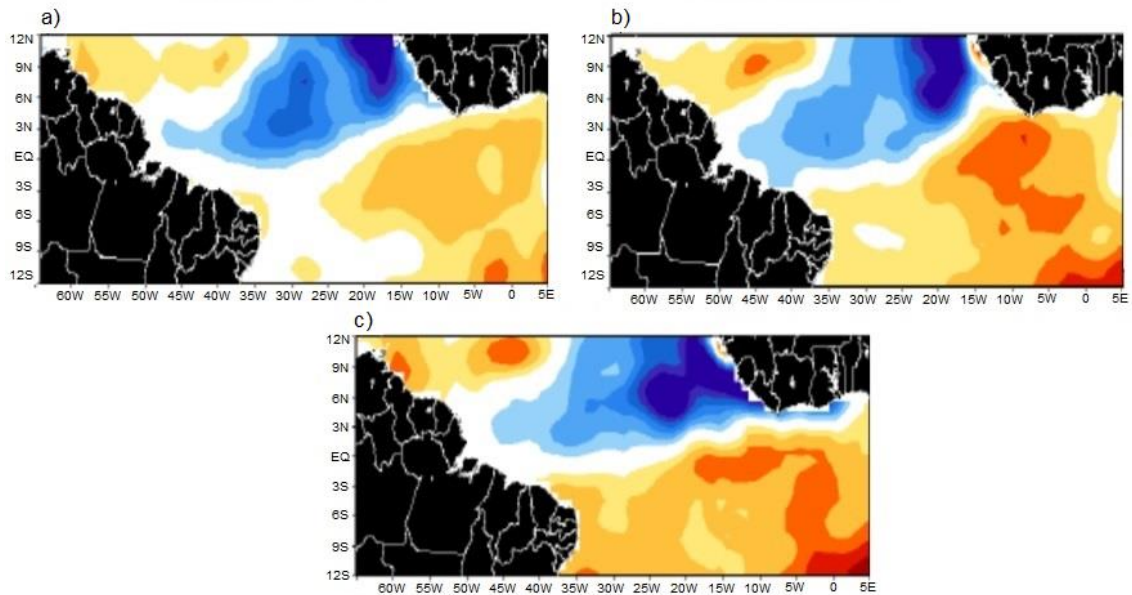
Menezes (2009) relata que levantamento realizado pelo Laboratório de Meteorologia do Núcleo Geoambiental (NUGeo), da Universidade Estadual do Maranhão, durante evento de El-Niño de 1997/1998, constatou que as chuvas no Estado ficaram reduzidas em 30% em relação as condições normais. O autor destaca que as interações oceano-atmosfera sobre o Atlântico e Pacífico Tropicais interferem na dinâmica dos sistemas atmosféricos que regulam a intensidade das chuvas no Maranhão. Segundo Boletim Meteorológico do NUGEO (2009), no primeiro semestre de 2009, as condições de ZCIT mais ao sul em relação a sua posição climatológica, os desvios negativos de TSM no Pacífico (La Niña) e as anomalias positivas no Atlântico Sul (**Figura 3.19**) contribuíram para ocorrência de chuvas intensas no Estado, culminando em enchentes severas.

Figura 3.18 – Estimativas da posição média pentadal da ZCIT, de julho de 2012 a junho de 2013, ao longo do Oceano Atlântico Equatorial.



Dados: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de Climanálise, v. 27, n. 7-12, 2012; v. 28, n.1-6, 2013.

Figura 3.19 – Anomalias de TSM no Atlântico Sul em 2009: a) fevereiro; b) março; c) abril.



Fonte: Adaptado de Boletim Meteorológico, out., 2009.

Cordeiro (2015) analisou e comparou as normais climatológicas de 1931-1960 e 1960-1990 com o período de 1991-2014. Ele concluiu que os sinais de grande escala como o El-Niño Oscilação Sul (ENOS), o Padrão Dipolo do Atlântico Tropical e a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) influenciam a variabilidade e o regime climático de São Luís; que 50% das chuvas são registradas no outono (março-abril-maio), onde o Dipolo do Atlântico e o ENOS influenciam significativamente a variabilidade trimestral, quadrimestral e anual; que em situação de Dipolo do Atlântico negativo/La Niña, as chuvas quadrimestrais e anuais ficam 27,4% acima da média; e que na condição de Dipolo do Atlântico positivo/El Niño, há redução de pluviosidade.

A distribuição espaço-temporal da pluviosidade na Ilha do Maranhão, em 2016, foi investigada por Pinheiro (2016). Os resultados apontaram que, de janeiro a junho e de julho a dezembro, os totais pluviométricos mensais acumulados em treze estações foram de 17.027,2 mm e 1.539,4 mm, respectivamente. Os meses de março (3.876,1 mm) e abril (3.870,2 mm) se destacaram como os mais chuvosos e os de setembro (8,4mm) e novembro (0,4 mm) como os de maior estiagem. Quanto à espacialidade da precipitação, os setores norte/nordeste e sul/sudoeste da ilha indicaram menor e maior volumes de chuva, respectivamente, tanto no período chuvoso como no de estiagem.

CAPÍTULO 4

PANORAMA DAS ÁGUAS NA ILHA DO MARANHÃO

De acordo com Organização das Nações Unidas – ONU (2015), o Brasil concentra 12% das reservas de água doce do mundo, porém a distribuição espaço-temporal dos recursos hídricos no território se dá forma desigual. De acordo com Agência Nacional de Águas – ANA (2017), a vazão média que escoa pelo território brasileiro é de 260.351 m³/s. Desse total, por exemplo, a Região Hidrográfica do Amazonas (**Figura 4.1**) dispõe de 65.617 m³/s e retira 124,77 m³/s para os diversos fins, enquanto a do Paraná, onde se concentram grandes cidades, indústrias, entre outras atividades, dispõe somente de 4.390 m³/s e retira 484,25 m³/s.

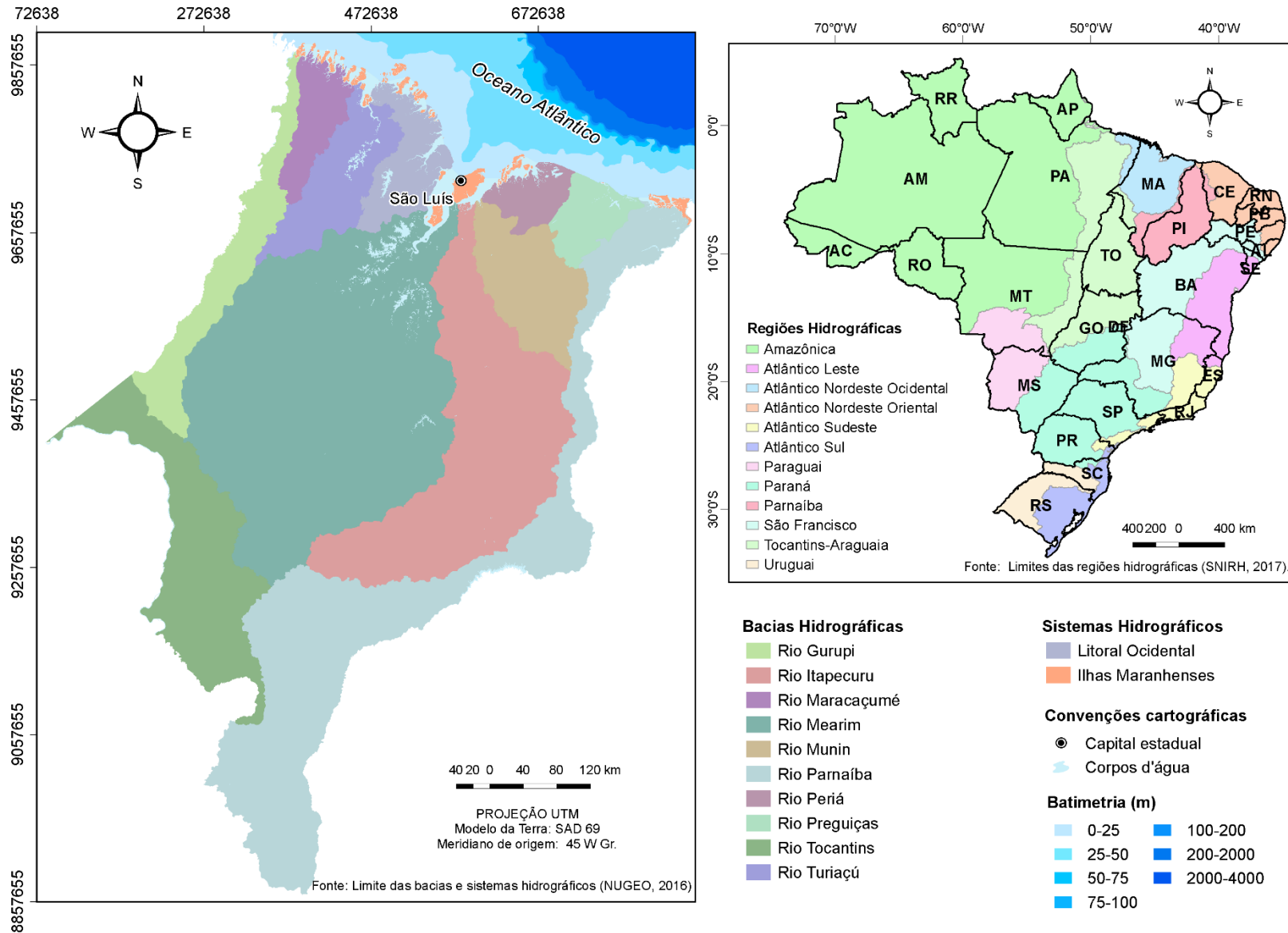
Figura 4.1 – Regiões hidrográficas do Brasil: (a) disponibilidade hídrica em m³/s; (b) e retirada hídrica em m³/s, com destaque para Região Atlântico Nordeste Ocidental.



Fonte: Adaptado de ANA, 2017.

A Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Ocidental, onde se insere a área de estudo, corresponde à aproximadamente 3% do território nacional (ANA, 2015) e 70% do Estado do Maranhão. Segundo NUGEO (2016), ela é constituída por bacias de domínio federal (Gurupi, no limite com o estado do Pará), estadual (Maracaçumé, Turiaçu, Mearim, Itapecuru, Munim, Piriá e Preguiças) e pelos sistemas hidrográficos do Litoral Ocidental e das Ilhas Maranhenses (**Figura 4.2**). As bacias de domínio estadual representam 60,9% do estado e concentram 53% de sua população total, que é de 6.569.683 habitantes (IBGE, 2010). Os sistemas hidrográficos englobam 219 ilhas do litoral maranhense, representam 1,09% do território e concentram 22 municípios, entre os quais, os que integram a Ilha do Maranhão.

Figura 4.2 – Mapa de bacias e sistemas hidrográficos do Estado do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.1 Recursos hídricos superficiais

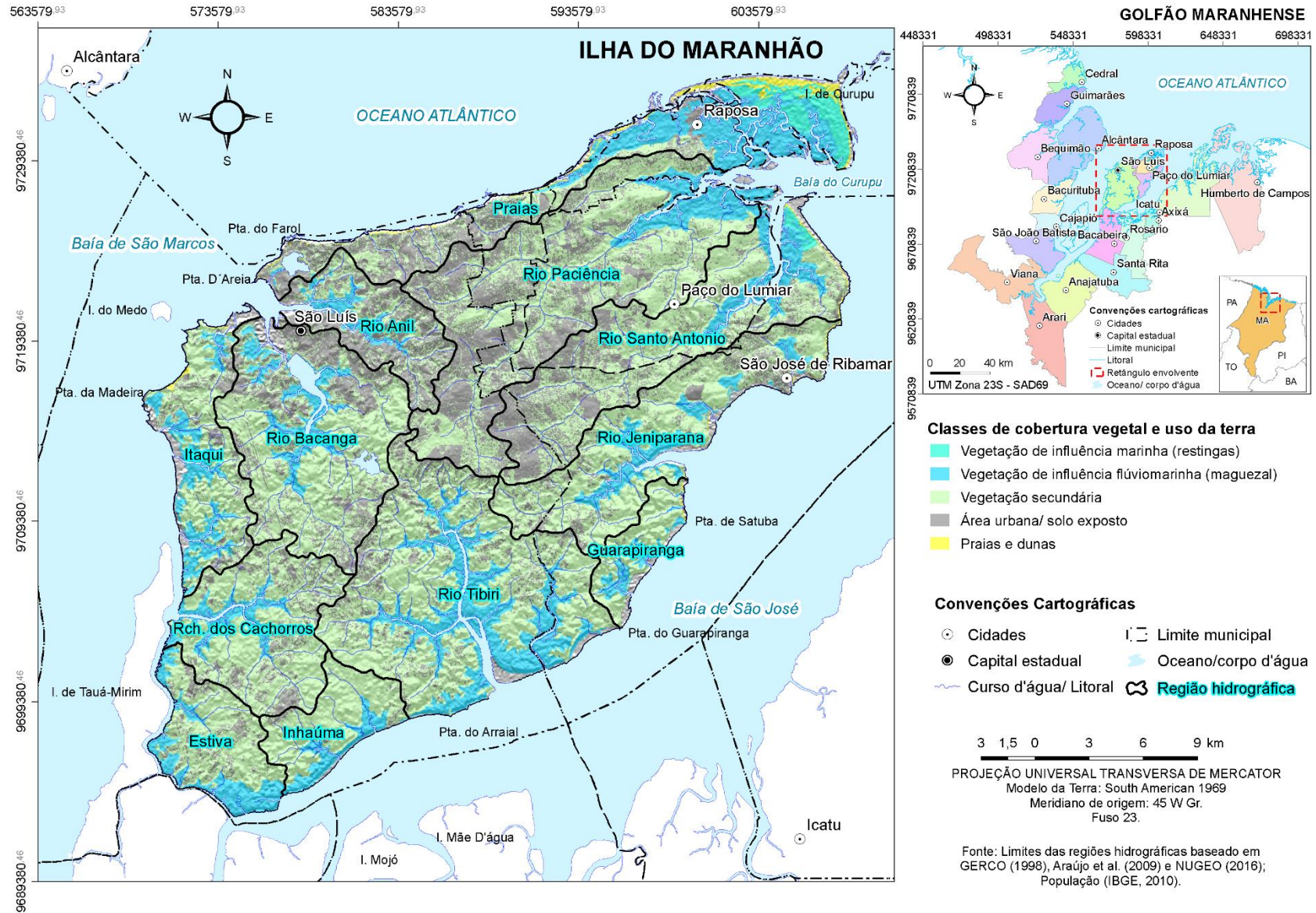
A rede hidrográfica na Ilha do Maranhão é formada por cursos d'água de pequeno porte, cujas nascentes estão situadas no domínio dos Tabuleiros Costeiros. Eles estão entalhados nos sedimentos areno-argilosos do Grupo Barreiras; sua hidrodinâmica é influenciada pelas oscilações das marés; e desaguam no Litoral de Mangues e Rias, em ambientes de praias, dunas, restingas e manguezais. Entre os principais rios estão: Anil, Bacanga, Paciência, Santo Antônio, Jeniparana, Guarapiranga, Tibiri e dos Cachorros.

Esses rios foram agrupados em 12 regiões hidrográficas com a finalidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos (**Figura 4.3**). Elas foram estabelecidas durante o projeto de Gerenciamento Costeiro do Maranhão – GERCO (1998), redefinidas por Araújo *et al.* (2009) e retratadas em vários relatórios ambientais, como GERCO (2010), IMESC (2011), NUGEO (2016), entre outros. Outra abordagem procedeu de Silva (2012) que segmentou ilha em 34 bacias hidrográficas, para fins de análise morfométrica, e definiu um Complexo de Bacias Costeiras, em função da limitação da escala cartográfica e da complexidade dos canais de drenagem em sistemas estuarinos.

Os nomes das regiões hidrográficas (**Figura 4.3**) seguem os verificados na literatura, porém o traçado dos divisores topográficos foi refinado a partir das imagens orbitais TM/Landsat-5, na composição colorida das bandas espectrais 4(R), 5(G) e 3(B), órbita-ponto 220/62, de 02/04/2010; dos MDE de altimetria e de relevo sombreado, referentes à quadrícula 02S45, com resolução espacial de 30m, do TOPODATA (VALERIANO, 2008); e do sistema de drenagem extraído automaticamente do MDE de altimetria; e das cartas topográficas da Divisão de Serviço Geográfico (DSG), na escala de 1:10.000.

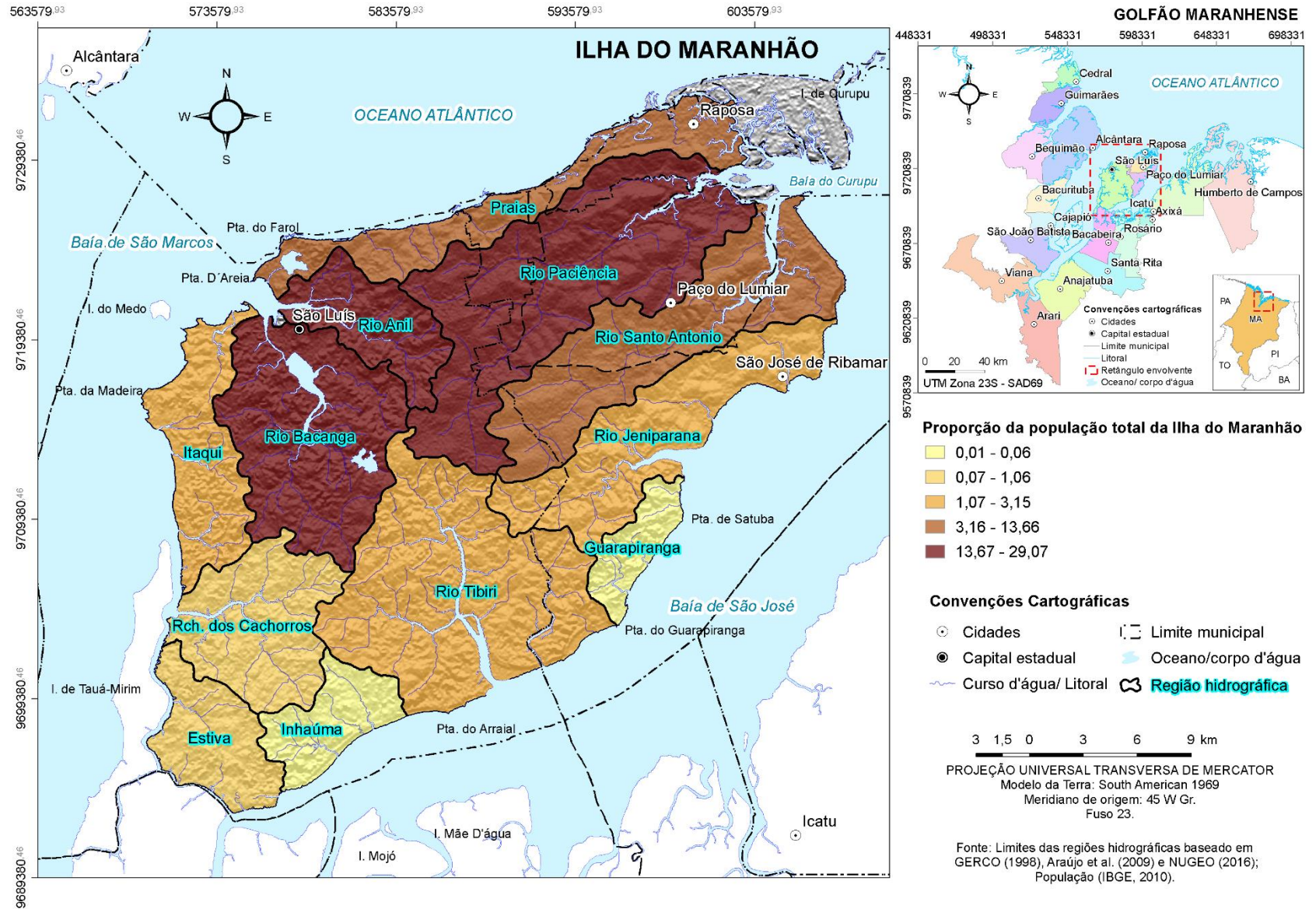
As regiões hidrográficas do Anil e Bacanga abrangem aproximadamente 145 km² (NUGEO, 2016) e concentram 37,5% da população total da Ilha do Maranhão (**Figura 4.4**). Seus rios principais circundam o promontório onde se deu a colonização inicial da região em 1612. Em vista disso, essas bacias são as que mais sofreram mudanças paisagísticas com o processo de urbanização, principalmente a partir da década de 1970. Entre os problemas ambientais estão o desaparecimento de córregos e brejos, ocupações desordenadas, desmatamento e assoreamento de margens, redução de pescado e lançamento de efluentes (IMESC, 2011). As ocupações irregulares e desmatamentos no Parque Estadual do Bacanga representam uma ameaça aos mananciais ali presentes, pois o mesmo aporta o Sistema Produtor do Sacavém.

Figura 4.3 - Mapa de regiões hidrográficas da Ilha do Maranhão, com as classes de cobertura vegetal e uso da terra.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 4.4 – Mapa de proporção da população das bacias hidrográficas em relação número de habitantes na Ilha do Maranhão, segundo o IBGE (2010).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As regiões hidrográficas do Paciência e Santo Antônio cobrem uma área estimada em 250 km² (NUGEO, 2016); agregam aproximadamente 42% da população da Ilha do Maranhão (**Figura 4.4**); e tiveram sua ocupação deflagrada, principalmente, a partir da década de 1970, com as políticas habitacionais voltadas à população de média e baixa rendas (BURNETT, 2002). Atualmente, essas regiões concentram a maior parte dos empreendimentos imobiliários verificados na ilha.

Os leitos dos rios principais foram denominados de “grande área produtora” (ACQUA-PLAN, 1972), onde os poços chegam a uma vazão máxima de 100 m³/h (RODRIGUES *et al.* 1994). Entre os problemas ambientais verificados estão: especulação imobiliária, supressão de mata ciliar, assoreamento, lançamento de efluentes domésticos, lixões dos municípios de São José de Ribamar (localidade Canavieira/Timbuba) e de Paço do Lumiar (entre as localidades de Pindoba e Iguaíba), entre outros (IMESC, 2011).

As regiões hidrográficas do Jeniparana, Guarapiranga, Inhaúma e Tibiri localizam-se na porção leste da Ilha do Maranhão e possuem uma extensão territorial aproximada de 263 km² (NUGEO, 2016). Apesar de abrangerem 30% da área de estudo, elas concentram somente 6% de sua população total (**Figura 4.4**), sobretudo a da sede municipal de São José de Ribamar, ao norte da região hidrográfica do Jeniparana.

Embora conservem as maiores taxas de cobertura vegetal da Ilha (**Figura 4.3**), as regiões supracitadas apresentam problemas ambientais relacionados à exploração mineral de argila; à presença do antigo aterro sanitário da Ribeira (desativado desde 2015 e submetido ao plano de recuperação de áreas degradadas); à existência de lagoas de resíduos de bauxita da ALUMAR, a noroeste da bacia de Inhaúma; e à construção de conjuntos habitacionais.

As regiões hidrográficas do Itaqui, Cachorros e Estiva estão situadas a oeste da Ilha do Maranhão; correspondem a uma área de 151 km² (NUGEO, 2016); concentram 4,19% da população total (**Figura 4.4**); e compreendem o Distrito Industrial de São Luís, localizado nas glebas Ceibini-Pedrinhas/Itaqui-Bacanga, uma área de 18.861,04 ha (SINFRA, 2015). Nessas regiões estão localizadas ALUMAR, VALE, os portos do Itaqui, da Ponta da Madeira e da ALUMAR.

Os problemas ambientais estão relacionados à extração mineral (principalmente na bacia dos Cachorros); expansão industrial; urbanização; desmatamentos; ocupação desordenada com ausência de infraestrutura; entre outros (IMESC, 2011; MACEDO; FEITOSA, 2011; CASTRO; SANTOS, 2012; SILVA; FARIAS FILHO, 2015; SANTOS, 2015).

4.2 Recursos hídricos subterrâneos

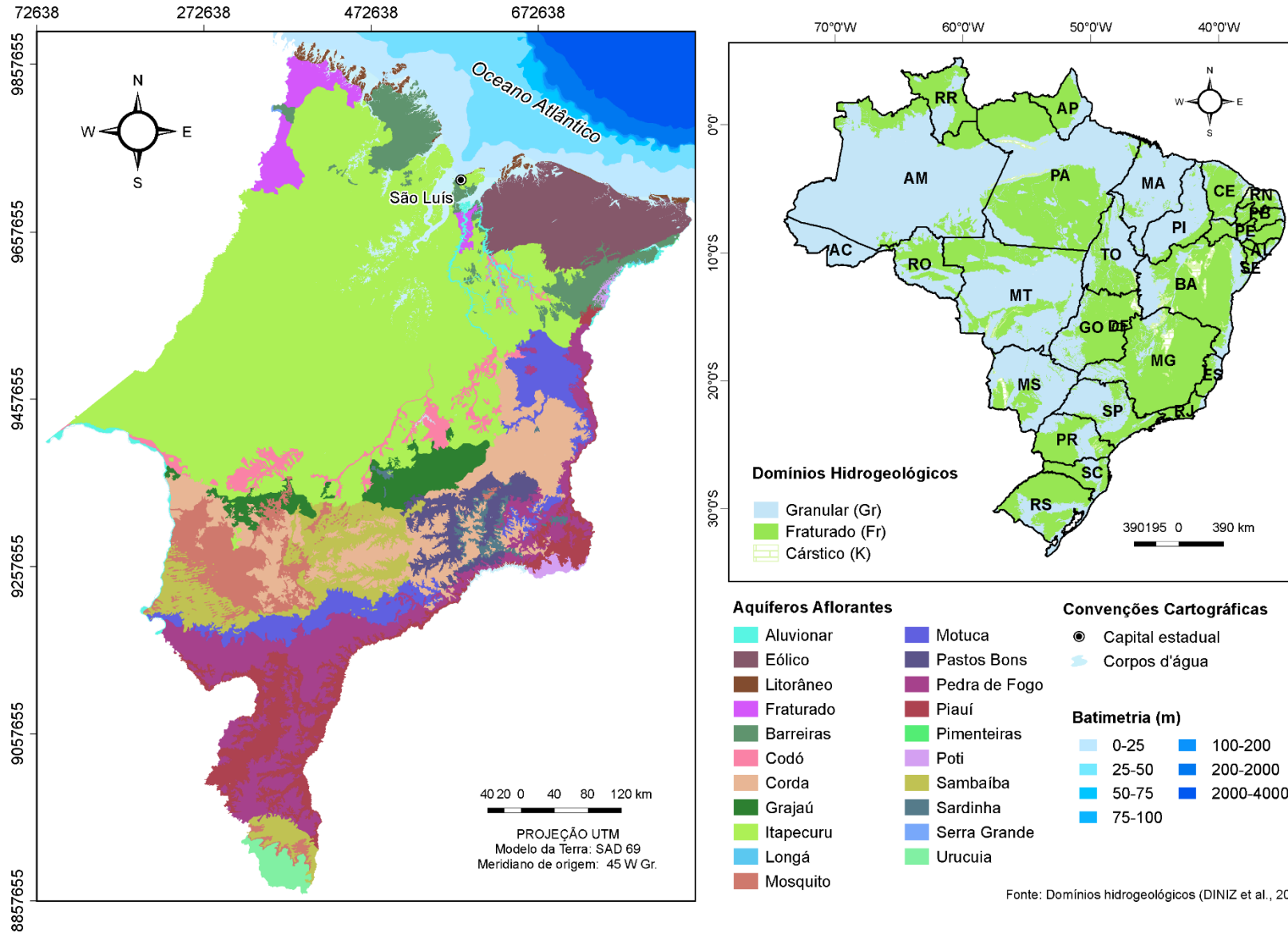
As águas subterrâneas desempenham um papel importante como fonte de água para os diversos usos. A grande capacidade de armazenamento e resiliência a longos períodos de estiagem, resultantes da variabilidade climática, fazem dos recursos hídricos subterrâneos uma alternativa relevante para o enfrentamento de períodos de escassez. No Brasil, a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos é estimada em 14.650 m³/s (ANA, 2017a). Sua distribuição no território nacional não é uniforme e a profundidade dos aquíferos é variável, ocorrendo regiões de escassez e outras com relativa abundância.

Segundo o Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo (DINIZ *et al.*, 2014, **Figura 4.5**), os sistemas aquíferos localizados em terrenos sedimentares ocupam 48% do território nacional. Eles são chamados aquíferos porosos ou granulares, onde a circulação e o armazenamento de água estão associados aos poros das rochas, denominada porosidade primária. No Estado do Maranhão, o domínio poroso ocupa 93,5% do seu território; concentra 18 aquíferos aflorantes, entre eles o Itapecuru (de maior abrangência no estado - 16,5%) e o Barreiras.

Regionalmente, os aquíferos Itapecuru e Barreiras foram descritos na área das folhas SA-23-Z-A (São Luís) e SA.23-X-C (Cururupu) por Rodrigues *et al.* (1994). O primeiro é constituído por arenitos avermelhados e esbranquiçados, médios a grosseiros, pouco argilosos, quartzosos, pintalgados de caulim. Apresenta estratificações cruzadas de grande porte e plano-paralelas, e pequenas intercalações de siltitos e folhelhos avermelhados. Seu potencial hidrogeológico é fraco, na Bacia do Parnaíba, e satisfatório, na área das folhas supracitadas, constituindo a principal fonte de captação de água subterrânea para poços com demanda inferior a 40 m³/h e profundidade de até 250 m.

A recarga do aquífero Itapecuru se dá preferencialmente pela infiltração direta das precipitações até a zona saturada, em parte, inibida pelos estratos pelíticos. Os valores médios de profundidade, nível estático e vazão de exploração dos poços perfurados são da ordem de 85m, 19 m e 13 m³/h, respectivamente. Na área da Ilha do Maranhão, onde o número de poços perfurados é maior, Rodrigues *et al.* (1994) relatam a possibilidade de descarga maior que recarga natural, com consequências no acentuado rebaixamento e no avanço da interface água-doce/água salgada. As águas provenientes desse aquífero são classificadas como carbonatadas e cloretadas.

Figura 4.5 – Mapa dos domínios hidrogeológicos do Brasil e aquíferos aflorantes no Estado do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O aquífero Barreiras, segundo Rodrigues *et al.* (1994), corresponde a unidade hidrogeológica mais promissora à captação de água na Ilha do Maranhão. É constituído por arenitos pouco consolidados, vermelhos e amarelados, com leitos de areias e argilitos continentais, e com ocorrência de areias brancas quartzosas no topo. Ele apresenta alta potencialidade para captação de água subterrânea, tendo em vista sua recarga pela precipitação local e pelas águas do rio Paciência. Nessa região, os poços registram vazão máxima de $100\text{m}^3/\text{h}$ e profundidade de média de 80 m. As águas do aquífero em questão estão classificadas como cloretadas e magnesianas sódicas.

Os aquíferos Itapecuru e Barreiras foram inicialmente estudados pela Aqua-Plan (1972), onde as investigações hidrogeológicas, em nível de planejamento geral, permitiram definir dois aquíferos, um livre e um confinado, bem como a identificação de duas áreas produtoras, a do Sacavém e do Paciência, as quais foram submetidas a estudos hidrodinâmicos.

Na área do Sacavém, o aquífero livre (terciário) tem espessura variável de 15 a 38 m. O aquífero confinado (cretáceo), de 30 a 80 m, é constituído de arenitos argilosos com intercalações descontínuas de argilas. Isoladamente, ele se comporta como drenante, recebendo uma recarga do aquífero superior através de uma camada confinante, ora formada por níveis de argila e calcário, ora apenas por argilas. As características hidrodinâmicas médias do aquífero confinado revelaram $K = 6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, $T = 3,2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 1,7 \times 10^{-4}$. Elas foram avaliadas através de testes de aquíferos, realizados em 10 poços do Sacavém, com captação exclusiva na zona confinada, e com a zona livre superior inteiramente isolada.

Na área do Paciência, o aquífero terciário é representado pela Formação São Luís, constituída de arenitos finos a médios, intercalados por camadas argilosas. A espessura do pacote sedimentar é da ordem de 90 m, com cerca de 40% de argilas. Nos poços perfurados, a espessura dos níveis areníticos saturados varia de 15 a 62 m. Os níveis estáticos variam de 0 a 4,15 m. O nível guia de calcário se faz notar em quase todos os poços, constituindo o topo da sequência cretácea. O aquífero cretáceo encontra-se armazenado em arenitos finos, argilosos, pertencente à Formação Itapecuru, sotopostos por uma camada confinante com aproximadamente 60 m de espessura, formada de calcarenito e argilas. A profundidade do nível piezométrico é da ordem de 30 m e o topo do aquífero se encontra a cerca de 130 m de profundidade. Estudos hidrodinâmicos na área do Paciência revelaram para o aquífero livre $T = 6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $S = 4,7 \times 10^{-2}$ e $K = 1,6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$; e para o aquífero cretáceo $T = 6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e $K = 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

O estudo hidrogeológico realizado Rebouças e Silva (1972), na área do Distrito Industrial do Itaqui, mostrou a possibilidade de captação de água subterrâneas para uma

população estimada em 200.000 hab. até o ano 2000. Os dados geológicos de superfície foram complementados por 12 sondagens elétricas verticais (linha AB máxima de 3000 m), realizadas pela Seção de Geofísica da SUDENE, em 1968, nas quais foram visualizados três horizontes geo-elétricos: um subsuperficial de 8 Ω .m; um de resistivo de 100 Ω .m; e um infinitamente condutivo.

Os dados geo-elétricos foram reinterpretados através de um poço de 430 m de profundidade (perfurado pela SUDENE em 1969). Constatou-se que o horizonte mais resistivo foi associado a uma camada arenosa com boas condições hidrodinâmicas. Trata-se de uma sequência de sedimentos clásticos finos, predominantemente arenosos, ricos em partículas silto-argilosas da Formação Itapecuru. Nos poços investigados, o horizonte aquífero foi atravessado a partir de 50 m de profundidade; exibiu espessura de 80 m e mostrou-se intercalado entre duas sequências predominantemente argilosas: uma superior com certo confinamento e outra inferior, com cerca de 100 m de espessura, constituindo uma barreira praticamente impermeável, seguida por uma camada arenosa com água salgada.

Para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos, foram realizados testes de aquíferos em dois poços: I-1 - com 430 m de profundidade, distanciado 16 m de um poço de observação de 250 m de profundidade; e C-2 - com 101 m de profundidade. Os resultados interpretados pelo método Theis forneceram os seguintes valores: para I-1 ($T = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, $K = 2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, $S = 5,1 \times 10^{-5}$); para C-2 ($T = 7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $K = 1,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ e $S = 3,5 \times 10^{-2}$).

Em virtude da proximidade do oceano, o nível d'água nos poços na área do Itaqui apresentou influência da ação periódica das marés, a qual foi detectada através de registradores automáticos. No poço I-1, de acordo com a relação de Ghyben-Herzberg, o contato água doce-água salgada foi calculado em 220 m de profundidade. Dessa forma, tendo em vista os grandes rebaixamentos do nível d'água dos poços e considerando o risco de contaminação pela água do mar, os cálculos preliminares demonstraram ser viável a implantação de 30 poços, segundo uma malha de 500 m de lado, sob um regime de bombeamento de 12/24 h, explorando cada um 10 l/s.

Sousa (1997) realizou a caracterização dos recursos hídricos na Ilha do Maranhão. Para tanto, diagnosticou os principais problemas ambientais; avaliou o risco de contaminação das águas subterrâneas; e analisou a sustentabilidade hídrica da área em questão. O estudo foi pautado nos mapas: litológico, de isoietas anuais, de pontos d'água, de ocorrências das águas subterrâneas, de recursos hídricos superficiais, e de fontes potenciais de poluição. Os resultados obtidos estão descritos nos parágrafos que se seguem.

A análise das bacias hidrográficas revelou que a permeabilidade dos materiais de superfície é superior à média; que os rios da Ilha são predominantemente efluentes na estação chuvosa e influentes no período de estiagem; e que, apesar da boa permeabilidade relativa superficial, a alimentação dos aquíferos é, em parte, dificultada por estratos lateríticos que constituem verdadeiras barreiras semipermeáveis, inibindo o movimento descendente, gerando um aumento no escoamento superficial.

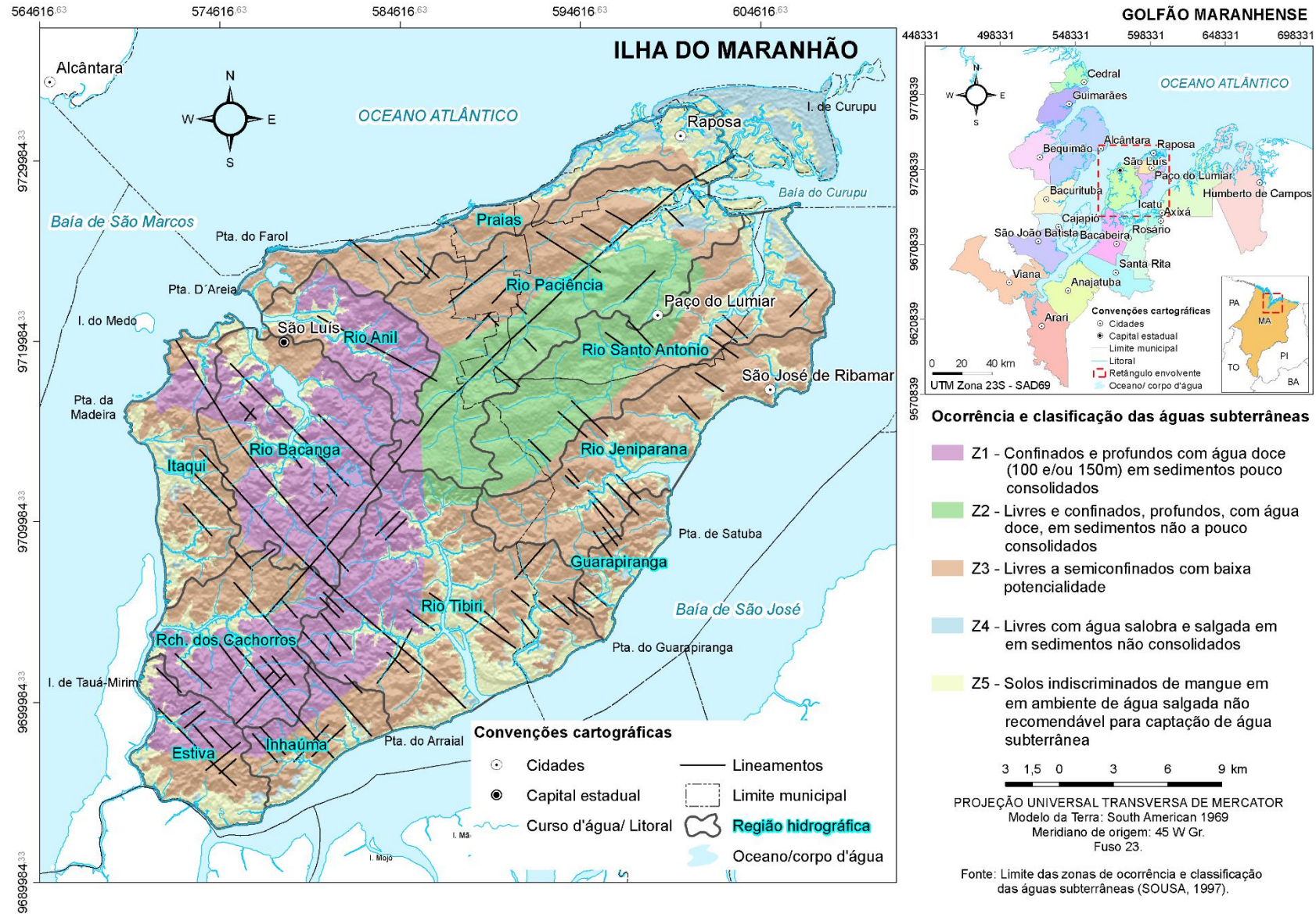
A partir do mapa litológico (com os lineamentos estruturais), das seções transversais W-E e WNW-ESE (criadas através de 20 perfis litoestratigráficos), das isolinhas dos dados de pontos d'água (281 poços listados em RODRIGUES *et al.*, 1994, contendo profundidade, nível estático e vazão de exploração) foi definido o mapa de ocorrência das águas subterrâneas (**Figura 4.6**) em que a Ilha do Maranhão foi compartimentada em cinco zonas. No mapa em questão, os limites propostos por Sousa (1997) foram sobrepostos à base cartográfica empregada na contextualização geoambiental da Ilha do Maranhão.

Na zona Z1, estão aquíferos confinados e profundos com água doce (100 m e/ou 150 m) em sedimentos pouco consolidados. Os aquíferos com mais de 200 m de profundidade apresentam água salgada. A zona Z2 é formada por aquíferos livres e confinados, profundos, com água doce, em sedimentos não a pouco consolidados. Nessa categoria, estão aqueles de boa potencialidade para captação de água subterrânea, com mais de 50 m de profundidade. Na zona Z3, estão aquíferos livres a semiconfinados com baixa potencialidade, como os situados em calhas de drenagem e planícies fluviais. Na Z4, estão aquíferos livres com água salobra e salgada em sedimentos não consolidados. A zona Z5 é representada pelos solos indiscriminados de mangue, em ambiente de água salgada, não recomendada para captação de água subterrânea.

A avaliação do risco de poluição das águas subterrâneas foi baseada na vulnerabilidade natural dos aquíferos, segundo o método proposto por Foster e Hirata (1988). Ele envolve três fatores: a) identificação do tipo de ocorrência das águas subterrâneas (0 a 1); b) caracterização do grau de consolidação da formação litológica sobre a zona saturada do aquífero (0,4 a 1,0); c) profundidade da superfície freática ou do teto dos aquíferos de confinados (0,4 a 1,0). Para avaliação das zonas mais vulneráveis à poluição dos aquíferos, Sousa (1997) empregou informações extraídas do mapa de fontes potenciais de poluição hídrica.

As cargas contaminantes foram consideradas alta (na zona urbana com saneamento inadequado) e moderada (Distrito Industrial e zonas de ocupação desordenada). Dos 8 locais avaliados quanto à vulnerabilidade natural dos aquíferos, 6 foram classificados como alta, 1 como baixa e 1 como extrema. Quanto ao risco de poluição, a variação na Ilha do Maranhão foi de moderada a alta.

Figura 4.6 – Mapa de ocorrência e classificação das águas subterrâneas da Ilha do Maranhão, baseado em Sousa (1997).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados de limites das zonas de ocorrência e de classificação das águas subterrâneas obtidos de Sousa, 1997.

A ameaça aos sistemas aquíferos foi relacionada à poluição por nitratos na zona Z2 e às atividades industriais situadas em terrenos com elevado grau de faturamento nos depósitos geológicos na zona Z1. Outro fator de risco apontado, foi ao avanço da interface água-doce/água-salgada, no setor do Itaqui, em poços perfurados entre 50 e 100 m da linha de maré alta.

A análise da sustentabilidade hídrica foi realizada a partir dos índices de ativação da potencialidade (IAP), de utilização da disponibilidade (IUD) e de utilização da potencialidade (IUP). Eles foram calculados através da potencialidade (Qp), disponibilidade (Qo) e demanda (Qd) hídricas, segundo três cenários: 1990, 2000 e 2010 (**Tabela 4.1**). De acordo com Sousa (1997), os valores baixos de IUP descrevem uma tendência de se atingir um limite máximo disponível do potencial; os relativamente baixos de IAP mostram a possibilidade de aumento de disponibilidade atual; e os relativamente altos de IUD apontam uma demanda reprimida.

Tabela 4.1 – Índices de sustentabilidade hídrica para Ilha do Maranhão.

PARÂMETRO	1990	2000	2010
Qp (hm ³ /ano)	676,16	676,16	676,16
Qo (hm ³ /ano)	227,41	227,41	227,41
Qd (hm ³ /ano)	220,85	273,32	346,45
IAP = Qo/Qp	0,336	0,336	0,336
IUD = Qd/Qo	0,971	1,202	1,523
IUP = Qd/Qp	0,327	0,404	0,512

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de Sousa, 1997.

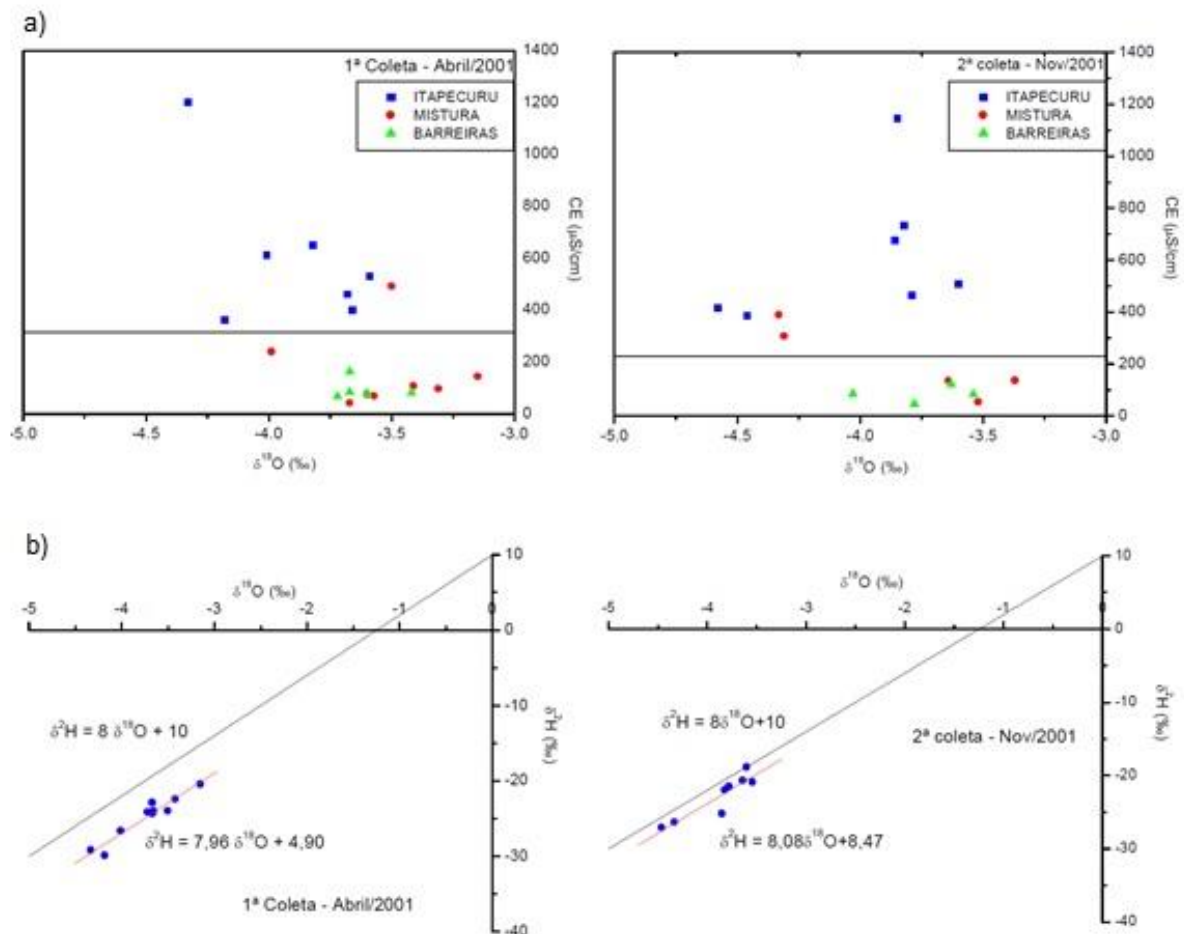
Pereira *et al.* (2002) analisaram a qualidade e as condições de recarga das águas subterrâneas na Ilha do Maranhão, a partir dos isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério, e de medidas de condutividade elétrica. As amostras foram coletadas em abril (período chuvoso) e novembro (período de estiagem) de 2001, em 7 poços do aquífero Itapecuru, 8 do aquífero Barreiras e 5 dos que exploram água dos dois aquíferos.

A condutividade elétrica variou de 40 a 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (período chuvoso) e de 45,6 a 1145 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (período seco), indicando águas pouco mineralizadas, explicadas pela alta pluviosidade e geologia sedimentar locais. Os registros do aquífero Barreiras foram menores que os do Itapecuru, sinalizando rápida recarga pelas águas pluviais.

O $\delta^{18}\text{O}$ variou entre -4,18 a -3,31‰ e -4,58 e 3,15‰, nas épocas chuvosa e seca, respectivamente, enquanto o $\delta^2\text{H}$ variou entre -29,9 e -20,45‰ e de -27,14 e -18,86‰. Os valores mais baixos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ foram relacionados ao aquífero Itapecuru. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ correlacionados aos de condutividade elétrica permitiram a separação entre as amostras dos aquíferos Barreiras e Itapecuru (**Figura 4.7a**). A correlação do $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ (**Figura**

4.7b) mostrou que os coeficientes angulares das retas estão próximos ao da reta meteórica mundial, indicando que a águas dos aquíferos provêm de chuvas formadas em condições de equilíbrio e sem evaporação durante a queda.

Figura 4.7 - Valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ e condutividade elétrica: a) $\delta^{18}\text{O}$ x condutividade elétrica nos períodos chuvoso e seco; b) $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ nos períodos chuvoso e seca.



Fonte: Adaptado de Pereira *et al.*, 2002.

Os autores correlacionaram dados de pluviosidade com os de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, em cidades como Belém e Manaus, que apresentam regime de chuva semelhante ao de São Luís. Eles observaram que chuvas intensas implicam em valores mais baixos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$; que as águas subterrâneas apresentam valores mais baixos que as chuvas normais, por serem resultantes de chuvas intensas; e que baixos valores de oxigênio-18 e deutério nas amostras de águas subterrâneas da Ilha do Maranhão são decorrentes de alta pluviosidade local.

Por fim, os valores de excesso de deutério foram de 5 e 8‰, nos períodos chuvoso e seco. Ele está associado a origem do vapor d'água que produz as chuvas. Em vista disso, aquelas que recarregam os aquíferos na Ilha do Maranhão são originadas de diferentes massas de vapor

d'água. Os valores observados no período seco na área investigada foram praticamente iguais aos verificados nas águas de chuva, nos períodos seco e chuvoso, em Belém. Essa constatação reforça a tese de que as águas subterrâneas na Ilha do Maranhão são provenientes chuvas intensas locais

Luz (2003) avaliou a ocorrência e o comportamento das águas subterrâneas na porção leste da Ilha do Maranhão com base em dados construtivos, hidrodinâmicos e espaciais de 112 poços tubulares, oriundos de Rodrigues *et al.* (1994) e SUDENE (1972). Os mapas de profundidade do nível d'água e de carga hidráulica produzidos, e os testes de aquíferos realizados permitiram a descrição dos sistemas aquíferos livre (Formação Barreiras) e confinado (Formação Itapecuru) na área investigada.

No aquífero terciário, os altos topográficos constituem as áreas de maior carga hidráulica e delimitam áreas de recarga. A profundidade do nível d'água menor que 50 m foi associada aos maiores índices de vulnerabilidade do aquífero (FOSTER; HIRATA, 1988), como nas áreas dos poços dos Sistemas Paciência I e II e na bacia do Jeniparana. As regiões favoráveis à exploração foram associadas à do Mato Escuro-Uirapuru-Paraná e Parque Zelândia, na bacia do Paciência; a de Tendal-Mirim-Maracujá-Cururuca, na bacia do Santo Antônio; a de Formigueiro-Marapin-Itapera e Cerâmica-Tinair; e a do Baiacu-Fazenda Palermo-Santana, na bacia do Jeniparana.

Quantos aos ensaios de bombeamento, o primeiro foi realizado em um poço no aquífero terciário, com bomba submersa, duração de 44 h 35 min, vazão constante de 180 m³/h, medidas de descarga feitas por método volumétrico (tonel de 220 l) e com análise de dois piezômetros à 50 e 100 m de distância. Os resultados conduziram ao rebaixamento de 11,50 m, $K=1,6 \times 10^{-4}$ m/s, $T = 6 \times 10^{-3}$ m²/s e $S = 4,7 \times 10^{-2}$. No aquífero confinado, o teste durou 26 h, para uma vazão constante de 54 m³/s, chegando-se ao rebaixamento de 25,35 m, $K = 6,2 \times 10^{-4}$ m²/s e $T = 5 \times 10^{-5}$ m/s. Neste teste, não houve reação no piezômetro, impossibilitando a obtenção de todos os parâmetros, os quais foram estimados pelo método de Jacob.

Entre as recomendações propostas por Luz (2003) estão: o estabelecimento de um controle de uso e ocupação do solo, com reconhecimento das áreas de recarga e descarga de água subterrânea no âmbito do plano diretor da cidade; reconhecimento de que a área se encontra submetida a elevados índices de vulnerabilidade do aquífero, com profundidade da água menor que 50 m; criação de área proteção dos campos de exploração da CAEMA, na bacia do Paciência; entre outras.

Soares (2004) analisou a vulnerabilidade à salinização das águas subterrâneas na área do Itaqui-Bacanga, noroeste da Ilha do Maranhão. De acordo como autor, na extremidade oeste da área, os sedimentos terciários desaparecem totalmente, dando lugar a uma camada característica de calcário e dolomito argilosos, isenta de sílica, creme esbranquiçada a acinzentada. Essa camada foi definida como um guia estratigráfico importante, assinala o final da sedimentação cretácea na zona costeira e o contato com os sedimentos terciários. Nas extremidades leste e sul, foi constatado que o pacote terciário atinge até algumas dezenas de metros.

O método empregado para analisar a intrusão salina foi o hidroquímico: estudo dos íons cloreto (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-), cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) e das razões iônicas $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ (0,1 a 5 nas águas continentais e 20 a 50 na água do mar), $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$ (0,3 a 1,5 para águas doces e da ordem de 5 para água do mar). Para tanto, foi realizado um cadastro de 51 poços dos quais, em apenas 29 deles, foram coletadas amostras para as análises químicas. Os resultados foram expostos juntamente com as seções geotopográficas, de direções W-E/SE e SW-NE/NW, criadas a partir dos perfis litológicos dos poços cadastrados.

Da análise das seções geotopográficas, Soares (2004) verificou que os poços apresentam nível estático abaixo do nível do mar, com exceção do C-10 (bairro Anjo da Guarda); que o contato estratigráfico Terciário/Cretáceo varia de 46 m, no poço C-03, a 140 m de profundidade, no poço C-10; que as diferentes cotas para a nível de calcário remetem a eventos tectônicos que ocorreram na área; que as variações físico-químicas acompanham o comportamento do contato estratigráfico Terciário/Cretáceo, sugerindo tempo de permanência recente da água no meio poroso; que no bairro Tamanção, nos poços P-12 e P13, os valores dos íons cloreto e magnésio, e as razões $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$, $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$ indicam condições de intrusão salina.

O zoneamento da vulnerabilidade à salinização dos aquíferos na área do Itaqui-Bacanga baseou-se na geologia, topografia, variáveis de exploração, proximidade da costa, densidade de poços e urbanização, e destacou as seguintes zonas de vulnerabilidade: a) alta: locais onde o fenômeno já ocorreu, reentrâncias com afogamento diário pelas marés e praias; b) média: altos topográficos medianamente afastados da costa, com alguma recarga pelas precipitações locais, onde o fator de transição corresponde a manutenção das áreas vegetadas e a desaceleração no processo de ocupação da área; c) baixa: cotas mais elevadas, com terrenos planos e arenosos onde a Formação Barreiras aumenta sua espessura.

Soares (2004) conclui que a área do Itaqui-Bacanga apresenta uma baixa vocação hidrogeológica como sistema produtor de águas subterrâneas; que em geral as águas apresentam dureza elevada, com teores elevados de cálcio e magnésio; e que o problema de salinização não

se generalizou em virtude da companhia de saneamento ter substituído grande parte do abastecimento local de águas subterrâneas pelo Sistema Italuís. As medidas para minimizar o avanço do processo de salinização foram: o controle de uso e ocupação do solo em áreas destinadas à recarga; a construção de pequenas barragens; o georreferenciamento e cadastramento dos poços da área; e o desenvolvimento de estudos abordando a influência das marés na salinização dos aquíferos.

Pereira (2006) avaliou a vulnerabilidade natural do solo e aquífero no Reservatório do Batatã, empregando o método do detalhamento progressivo. Na etapa geral foi produzido o mapa geológico-geotécnico, na escala 1:20.000, resultante da integração de informações geológicas, geomorfológicas, pedológicas e de campo. Este último contemplou 220 pontos, observados ao longo de 106 km², sendo 160 pontos estudados, 29 poços tubulares, 17 poços escavados e 14 ensaios com permeâmetro de Guelph modificado.

A partir das unidades geológico-geotécnicas definidas na primeira etapa, foi selecionada uma área de 6,6 km², visando estudos detalhados da vulnerabilidade natural e de potencial de contaminação do solo e do aquífero no Reservatório do Batatã. Para a escala pretendida de 1:10.000, a amostragem contou com 64 pontos observados, sendo: 31 pontos estudados, 3 poços tubulares, 9 poços escavados, 14 ensaios de laboratório e 7 *in situ*, com infiltrômetro de duplo anel. Foram criados mapas de declividade; de profundidade do nível da água subterrânea; de superfície potenciométrica do aquífero Barreiras, partir de 15 poços cadastrados na área; de coberturas de materiais inconsolidados; e de uso e ocupação do solo.

Durante a etapa de campo foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solos e realizados ensaios *in situ* para determinação da permeabilidade pelo método do infiltrômetro de duplo anel. Em laboratório, as amostras foram submetidas aos ensaios de granulometria, massa específica dos sólidos, limites de consistência e plasticidade, capacidade de troca catiônica, índices físicos e taxas de infiltração e condutividade hidráulica.

A partir das características genéticas do solo, da análise de amostras deformadas e indeformadas e ensaios *in situ*, o material inconsolidado foi classificado em cinco unidades: arenosa, laterítica, laterita coluvial, argila mosqueada e aluvionar. As características das unidades foram pautadas na descrição do material de origem, declividade, profundidade do nível estático, condutividade hidráulica, além da associação com os parâmetros morfológicos dos solos.

Para avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero, foi empregado o índice GOD (Tabela 4.2), proposto por Foster e Hirata (1988). Quanto às características litológicas e ao grau de confinamento das águas subterrâneas (parâmetro G), foi atribuído o valor 1,0: em virtude do aquífero Barreiras ser considerado livre, por sua constituição arenosa fina a média, com intercalações de silte e argila. Em relação à natureza composicional da zona não saturada (parâmetro O), foram empregadas as informações dos materiais inconsolidados, atribuindo-se os seguintes valores: arenosa (0,7), laterítica (0,7), laterita coluvial (0,8), argila mosqueada (0,3) e aluvionar (0,8). Quanto à profundidade do nível da água subterrânea (parâmetro D), foram considerados os valores: 1m (0,9), 5m (0,9), 10m (0,8), 15m (0,8) e 20m (0,7).

Tabela 4.2 – Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero através do método GOD no Reservatório do Batatã.

GRAU DE CONFINAMENTO DO AQUÍFERO LIVRE BARREIRAS					
PESO 1,0					
PROF. DO N.A.	OCORRÊNCIA DE ESTRATOS GEOLÓGICOS COBERTURA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS				
	ARENOSA PESO 0,7	LATERÍTICA PESO 0,7	LATERITA COLUVIAL PESO 0,8	ARGILA MOSQUEADA PESO 0,3	ALUVIONAR PESO 0,8
1m e 5m PESO 0,9	0,63	0,63	0,72	0,27	0,72
10m e 15m PESO 0,8	0,56	0,56	0,64	0,24	0,64
20m PESO 0,7	0,49	0,49	0,56	0,21	0,56

Fonte: Adaptado de Pereira, 2006.

Legenda: baixa (azul), moderada (verde), alta (amarelo), extrema (vermelho)

A vulnerabilidade natural foi associada ao uso e ocupação do solo, representado pelas classes: mata ciliar, capoeira baixa, área degradada (sem vegetação), urbanizada, em fase de urbanização e de palmáceas. Os resultados compuseram o mapa de vulnerabilidade natural e de potencial à contaminação do solo e aquífero no Reservatório do Batatã, constituído das classes extrema, alta, moderada e baixa. As áreas potenciais de contaminação no entorno do Reservatório do Batatã foram definidas quanto à natureza da fonte e à possível geração de substâncias contaminantes. O potencial alto foi associado às áreas urbanizadas; o médio, às áreas em fase de urbanização e as degradadas; e o potencial baixo, às áreas naturais de mata ciliar, capoeira e palmáceas.

Pereira (2006) finaliza seu estudo destacando os seguintes aspectos: a) as áreas de alta vulnerabilidade, representadas pelos materiais inconsolidados arenosos e lateríticos, têm como substrato a fácies arenosa da Formação Barreiras, no domínio dos tabuleiros; b) os tabuleiros constituem áreas de recarga indispensáveis à manutenção dos reservas hídricas da Ilha do

Maranhão, devendo ser protegidos por lei municipal; c) o desmatamento dessas áreas reduzem a porosidade do solo, tornando-o susceptível ao selamento e à diminuição do volume de infiltração; d) as argilas caulínicas, com baixa capacidade de troca catiônica, e portanto baixa adsorção de metais, são abundantes nos sedimentos argilosos da Formação Barreiras e do Terciário Paleógeno.

Barros (2013) empregou os isótopos ambientais oxigênio -18 e deutério na identificação da interação água subterrânea/água superficial na bacia hidrográfica do rio da Prata, em São Luís. As amostras de água da chuva foram coletadas na Vila Esperança, entre janeiro a junho de 2012. As demais, dos 19 pontos georreferenciados (2 de lagos, 2 de nascentes, 14 de poços tubulares e 1 de cacimba), foram obtidas nos períodos de outubro a dezembro de 2011 e de janeiro a setembro de 2012.

Os resultados da análise isotópica mostraram que: a) a reta meteórica local apresentou coeficiente angular próximo ao da reta meteórica mundial, indicando que as águas das chuvas são formadas em condições próximas a de equilíbrio e sem evaporação das gotas durante a queda; b) os valores médios mensais de oxigênio-18 e deutério nas chuvas sinalizaram forte efeito da quantidade: valores mais baixos nas chuvas de maior volume; e c) a recarga dos sistemas aquíferos foi identificada em 14 poços através da diferença entre medidas isotópicas de junho de 2012 (período chuvoso) e dezembro de 2011 (período seco).

Em relação aos aspectos hidroquímicos, o autor destacou que: a) as concentrações iônicas na área investigada satisfazem a ordem $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^+$ e $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{-2}$, classificando as águas como cloretadas sódicas, devido ao efeito dos aerossóis marinhos na área costeira; b) a condutividade elétrica aumenta com a profundidade dos poços e sua correlação com os teores de Cl^- é maior no final do período seco do que no final do chuvoso devido a recarga de água bicarbonatada; e c) as medidas de condutividade elétrica separam as águas subterrâneas em dois sistemas aquíferos: um com valores abaixo de $150\mu\text{S}/\text{cm}$ e outro com valores superiores a $200\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dias *et al.* (2014) analisaram dados quantitativos (níveis estático e dinâmico, vazões e tempo de bombeamento) e qualitativos (pH, cloreto, sódio, potássio, magnésio, cálcio), referentes ao período de 2008 a 2010, de 11 poços que integram o Programa de Monitoramento Hídrico do Complexo da Ponta da Madeira, administrado pela empresa VALE. Este programa tem por finalidade acompanhar as flutuações sazonais do nível d'água do aquífero local e caracterizar o comportamento da interface água doce-água salgado, em função da atuação de aspectos naturais e antropogênicos.

Os resultados constataram a relação entre recarga e pluviometria, uma vez que os dados de nível estático foram comparados aos totais de chuvas de 2008 e 2010. Quanto aos dados qualitativos, as águas apresentaram os seguintes valores médios: pH de 7,4; cloreto de 27,8mg/L, com o máximo de 176 mg/L em um poço mais próximo ao litoral; sólidos totais dissolvidos de 266,1 mg/L, definindo as águas como doces; sódio de 40,6 mg/L; potássio de 6,5 mg/L; cálcio de 28,4 mg/L; e ferro menor ou igual a 0,3 mg/L em 81% dos poços investigados. Os teores elevados de ferro nas águas subterrâneas foram associados à geologia local e, subordinadamente, ao transporte de minério de ferro.

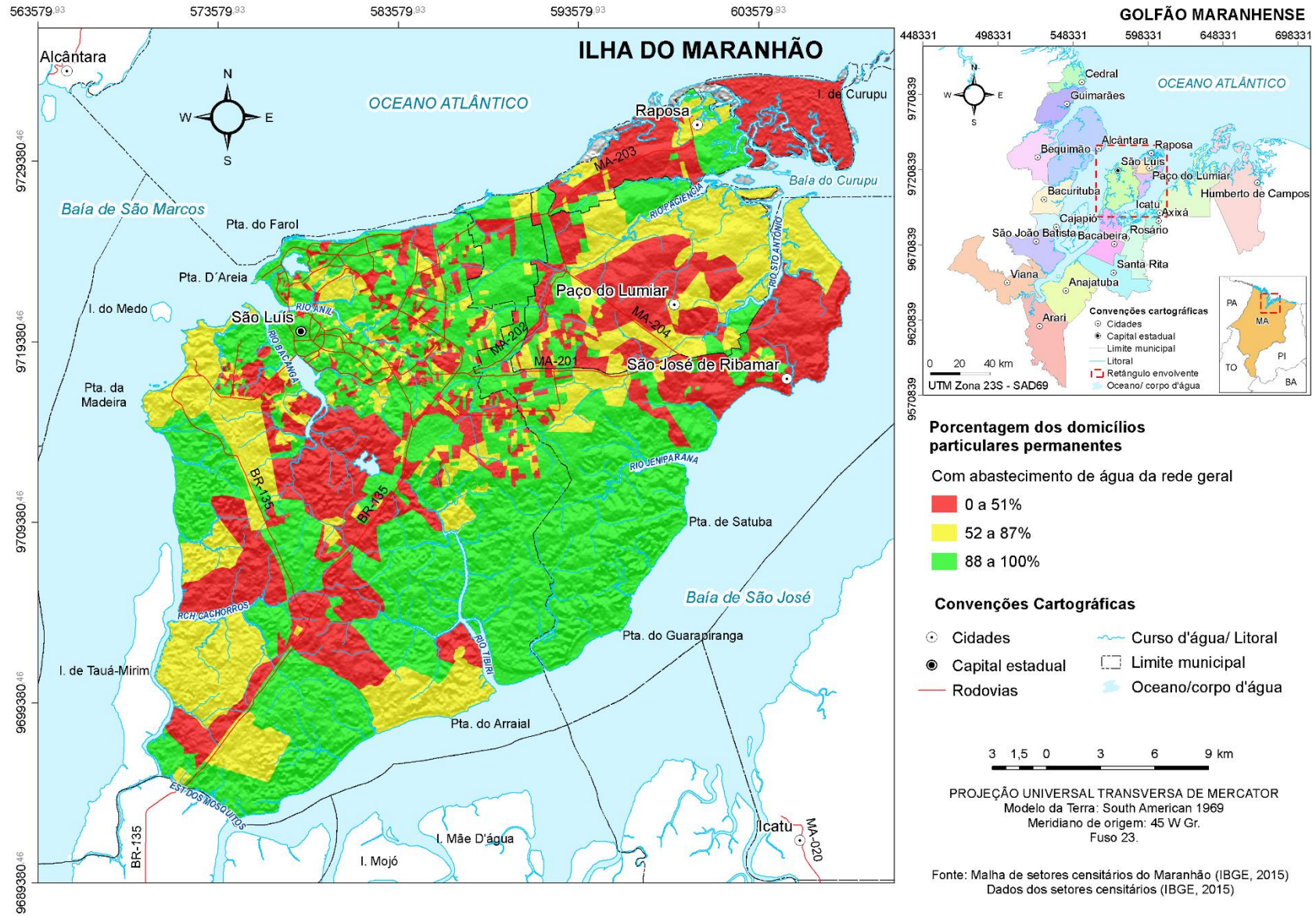
4.3 Sistemas de abastecimento urbano

De acordo com a Conjuntura dos Recursos Hídricos (ANA, 2017a), da vazão média de 260.351 m³/s que escoam pelo território brasileiro, 2.907,9m³/s são retirados para os diferentes usos. Desse total, 488 m³/s são destinados ao abastecimento urbano. Segundo o Atlas de Abastecimento Urbano (ANA, 2010), do total de municípios brasileiros, 47% são abastecidos por mananciais superficiais (rios, lagos ou reservatórios artificiais), 39% por águas subterrâneas e 14% pelo abastecimento misto. No Estado do Maranhão, dos 217 municípios, 74% são abastecidos exclusivamente por poços, 21% por mananciais superficiais e 5% têm um abastecimento misto.

Na Ilha do Maranhão, segundo dados dos setores censitários (IBGE, 2010), dos 344.146 domicílios particulares permanentes, 248.620 (69%) apresentam alguma ligação a uma rede geral de distribuição de água enquanto 32.761 (12%) são abastecidos por poços ou nascentes no terreno ou propriedade onde estão inseridos. A primeira situação é frequente na porção central da área de estudo (**Figura 4.8**), ao passo que a segunda ocorre com maior intensidade nas regiões nordeste e sudoeste da área investigada (**Figura 4.9**).

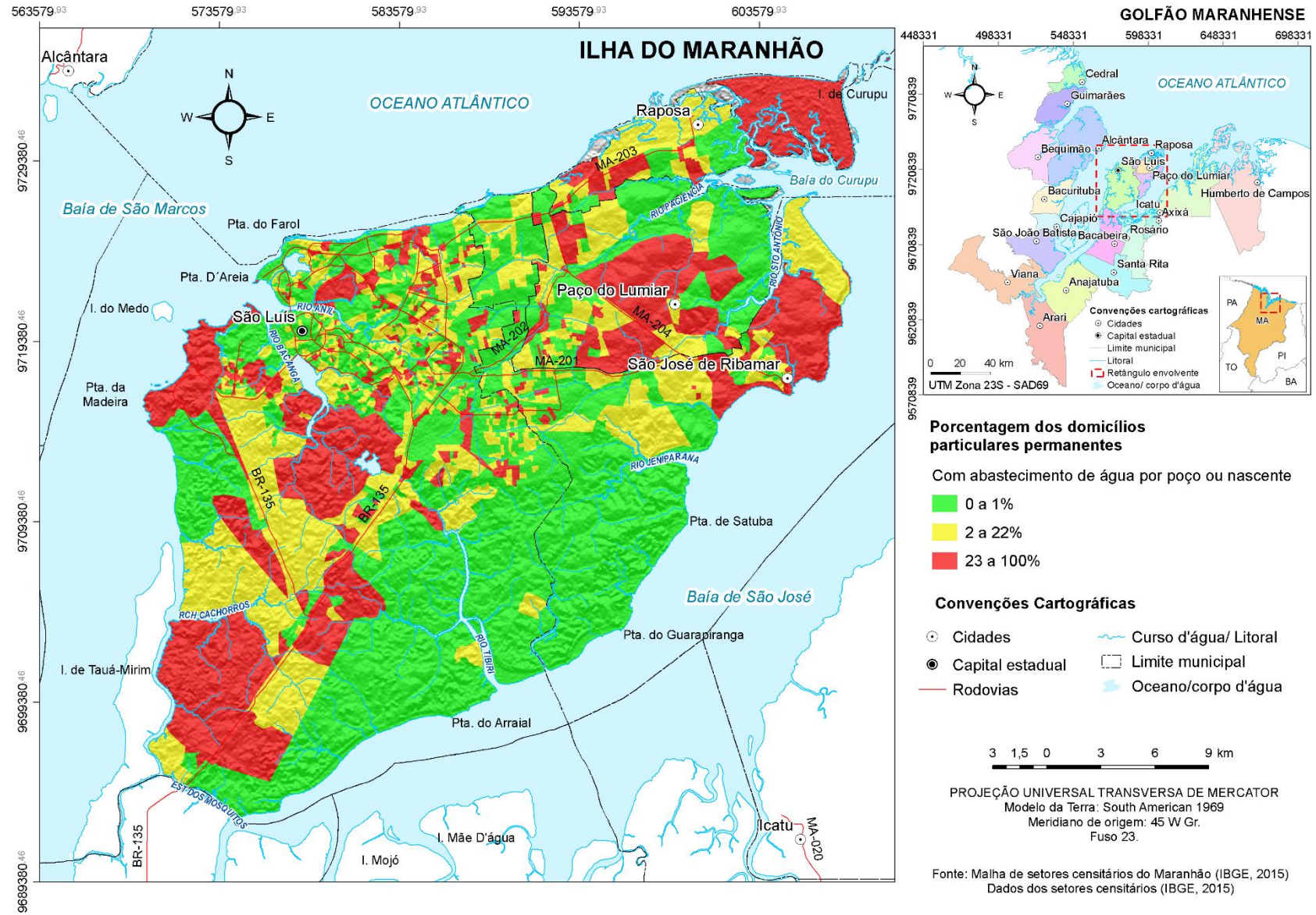
O abastecimento da Ilha do Maranhão é garantido por um sistema misto, constituído por mananciais superficiais e subterrâneos. O primeiro é formado pelo Sistema Italuís, construído em 1982, durante a gestão do governador João Castelo; tem como fonte de produção de água o rio Itapecuru, com captação situada nas proximidades da localidade Timbotiba, no município de Rosário. A vazão da adutora é de 1,8 m³/s, no entanto, perdas, rompimentos e corrosões nas tubulações da rede reduzem a mesma ao patamar de 1,45 m³/s. O Sistema do Sacavém é constituído pela Barragem do Batatã e pelos riachos do Prata e Mãe Isabel os quais são responsáveis pelo suprimento do centro da cidade de São Luís (**Figura 4.10**).

Figura 4.8 – Mapa de porcentagem dos domicílios particulares permanentes na Ilha do Maranhão com abastecimento de água através da rede geral.



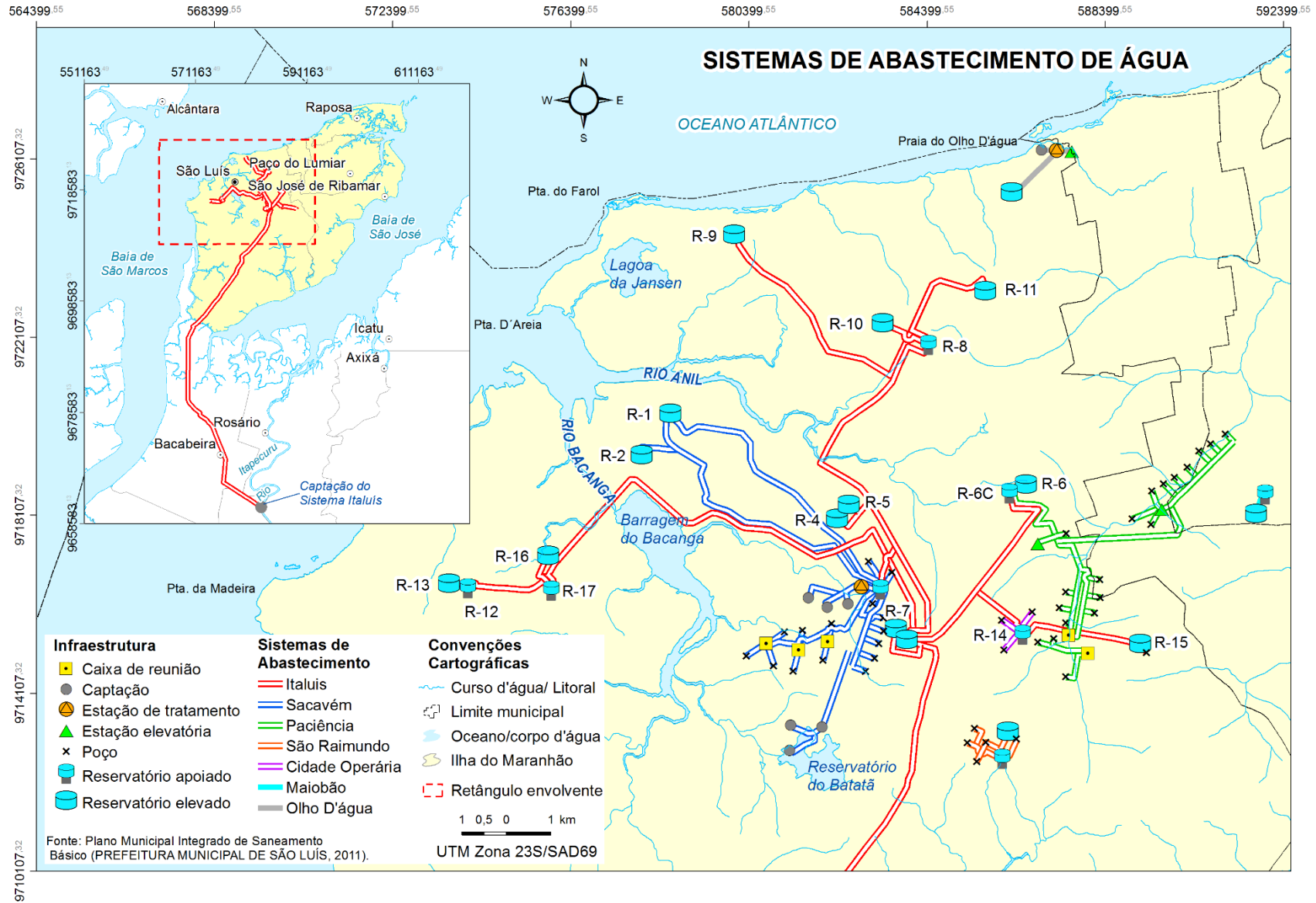
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 4.9 – Mapa de porcentagem dos domicílios particulares permanentes na Ilha do Maranhão com abastecimento de água por poço ou nascente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 4.10 – Mapa dos sistemas de abastecimento de água na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Em novembro de 2012, foi iniciada a obra de substituição da adutora do Sistema Italuís, financiada pelo Governo do Estado, em parceria com o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Os serviços foram realizados no trecho compreendido entre os quilômetros 25 e 44 da BR-135, na altura de Campo de Perizes. Eles envolveram a substituição de 19 km da adutora, empregando 1.500 tubos de aço, cada um com 12 m de comprimento e 1,40 m de diâmetro. As benfeitorias representaram um ganho de vazão de até 300 l/s.

A contribuição da água subterrânea para o abastecimento urbano da Ilha do Maranhão é garantida, principalmente, pelos sistemas produtores do Paciência (I e II) e do Sacavém, compostos por 14 e 13 poços tubulares que exploram os recursos hídricos dos aquíferos Barreiras (Terciário) e Itapecuru (Cretáceo), respectivamente. Outros conjuntos de poços, em menor escala geográfica, que garantem o abastecimento urbano são: Maiobão, Cidade Operária, São Raimundo (**Figura 4.10**). Há ainda poços de competência das prefeituras municipais e de particulares.

O resumo das informações relativas aos sistemas de abastecimento urbano na Ilha do Maranhão (**Tabela 4.3**) mostra que os mananciais superficiais representam 56,86% do abastecimento da área, já inclusas as atualizações do Sistema Italuís, contra 43,14% dos mananciais subterrâneos. No entanto, se forem computadas as expansões no Sistema Paciência I e II (implantação de seis novos poços, com dois já em funcionamento), com um incremento de 1.100 m³/h; as contribuições dos sistemas São Raimundo, Cidade Operária e aquelas provenientes dos poços particulares, a proporção dos mananciais subterrâneos excede a dos superficiais.

Tabela 4.3 – Sistemas produtores de água na Ilha do Maranhão.

SISTEMA	MANANCIAL	VAZÃO (m ³ /s)	%
SUPERFICIAL		2,32	56,86
ITALUÍS	RIO ITAPECURU	2,10	51,47
SACAVÉM	BARRAGEM DO BATATÃ RIO DA PRATA RIO MÃE ISABEL	0,22	5,39
SUBTERRÂNEO		1,76	43,14
PACIÊNCIA	14 POÇOS TUBULARES	0,75	18,38
SACAVÉM	13 POÇOS TUBULARES	0,25	6,13
MAIOBÃO	POÇOS TUBULARES	0,15	3,68
PREFEITURA DE SÃO LUÍS	POÇOS TUBULARES	0,32	7,84
PREFEITURA DE SÃO JOSÉ DE RIBAMAR	POÇOS TUBULARES	0,29	7,11
TOTAL GERAL		4,08	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de Silva *et al.*, 2005; de outorga de poços dos Sistemas Paciência e Sacavém, SRH/SEMA, 2012.

4.4 Sistemas de esgotamento sanitário

Quanto ao esgotamento sanitário (**Figura 4.11**), dos 344.146 domicílios particulares permanentes, 125.195 (34%) o fazem segundo a rede geral de esgoto ou água pluvial, cuja maior proporção encontra-se no município de São Luís. Por outro lado, grande parte das regiões nordeste, sul e leste da Ilha do Maranhão apresenta baixa proporção de domicílios atendidos por esse serviço, onde o despejo dos efluentes se dá ou por meio de fossa séptica ou rudimentar, ou via rio ou mar, ou outras formas de esgotamento.

Segundo Atlas Esgotos (ANA, 2017b), a carga total de efluentes produzida na Ilha do Maranhão é de 61.448,6 kg DBO/dia. Desse valor, 47.441,6 kg DBO/dia (77,21%) retornam ao meio ambiente sem tratamento, enquanto 14.007 kg DBO/dia (22,79%) são tratados ou passam por soluções individuais (**Tabela 4.4**).

Tabela 4.4 –Sistemas de esgotamento sanitário na Ilha do Maranhão.

MUNICÍPIO	CT (kg /dia)	SI (kg/dia)	SCST (kg/dia)	CCST (kg/dia)	CCCT (kg/dia)
SÃO LUÍS	53.753,8	10.441,4	17.460,3	23.820,1	2.032,0
SÃO JOSÉ DE RIBAMAR	2.128,5	558,1	1.509,0	61,4	0,0
PAÇO DO LUMIAR	4.590,0	869,6	1.980,4	1.740,0	0,0
RAPOSA	976,3	105,9	858,6	11,8	0,0
ILHA DO MARANHÃO	61.448,6	11.975,0	21.808,3	25.633,3	2.032,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de ANA, 2017b.

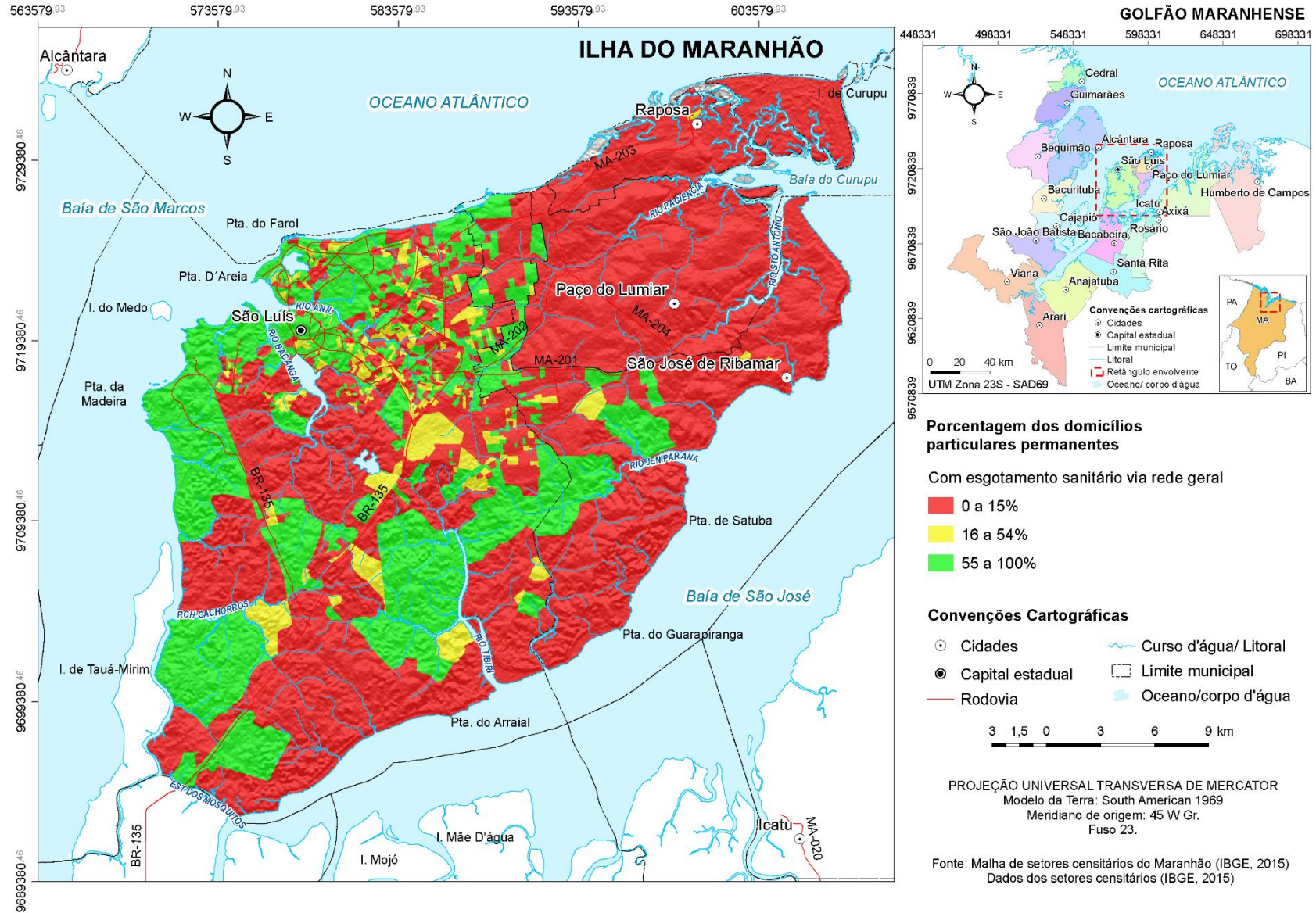
Legenda: CT (carga total); SI (solução individual); SCST (sem coleta e sem tratamento); CCST (com coleta e sem tratamento); CCCT (com coleta e com tratamento)

A coleta e o tratamento dos dejetos domésticos ocorrem unicamente no município de São Luís, através das estações de tratamento de esgotos (ETE) do Bacanga e do Jaracati (**Figura 4.12**) que processam 2.032 kg DBO/dia (7,8%) da carga total produzida (53.753,8kg DBO/dia). Em agosto de 2016, uma nova ETE foi instalada em São Luís, a do Vinhais, destinada a tratar 40% dos efluentes domésticos da capital. A ETE Anil encontra-se em fase de construção e ampliará para 70% a proporção de esgoto tratado na cidade de São Luís.

4.5 Destinação dos resíduos sólidos

Em relação aos resíduos sólidos (**Figura 4.12**), do total de 344.146 domicílios, 283.556 (75%) têm o lixo coletado diretamente por serviço de limpeza ou depositado em caçamba, tanque ou depósito, fora da moradia, sendo posteriormente coletado por empresa pública ou privada.

Figura 4.11 – Mapa de porcentagem dos domicílios particulares permanentes na Ilha do Maranhão com esgotamento sanitário via rede geral.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Dentre outras regiões da Ilha do Maranhão, destaca-se a nordeste com baixa proporção de domicílios com coleta de lixo, cujo destino pode ser queimado ou enterrado na propriedade, ou descartado em terreno baldio, logradouro, rio, lago ou mar.

Os resíduos sólidos do município de São Luís eram descartados no Lixão do Jaracati (**Figura 4.14**), localizado nas imediações do Igarapé homônimo, na Av. Carlos Cunha. Após a sua desativação, os resíduos foram destinados ao aterro sanitário da Ribeira, criado em 1996, situado no Distrito Industrial de São Luís, a menos de 7 km do Aeroporto Internacional Marechal Cunha Machado. Ele foi desativado em 25 de julho de 2015. O novo destino do lixo produzido na capital, bem como nos municípios de Raposa e Rosário, é a Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTRS), localizada no povoado Buenos Aires, no município de Rosário, a 60 km da capital, no continente.

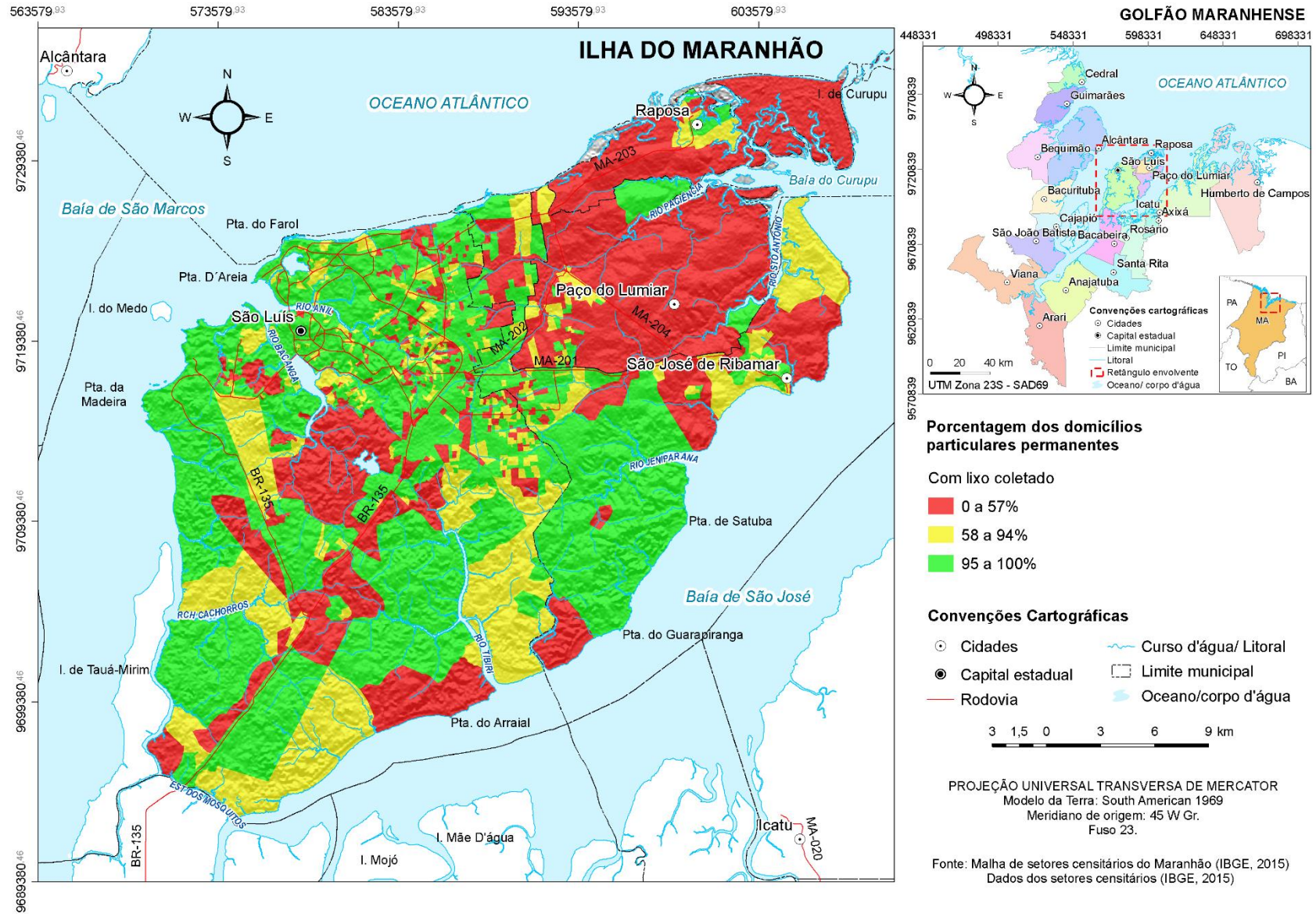
Quanto ao município de São José de Ribamar, os resíduos sólidos são descartados em lixão a céu aberto, situado no bairro Timbuba (**Figura 4.14**), em região limítrofe ao município de Paço do Lumiar. Este, por sua vez, descarta os resíduos produzidos no lixão localizado entre os povoados de Pindoba e Iguaíba, próximo ao Igarapé Iguaíba, afluente do rio Paciência, uma área de preservação ambiental. De acordo com reportagens em jornais locais, em ambos os casos, os lixões existem a pelo menos dez anos e não apresentam condições necessárias ao acolhimento dos resíduos produzidos nos dois municípios.

Além dos lixões acima descritos, o pesquisador da Universidade Estadual do Maranhão, Prof. Dr. Lúcio Macedo, identificou 490 lixões clandestinos somente na capital São Luís. Essa informação foi veiculada durante a edição do dia 23/06/2016, do Jornal Nacional. O pesquisador relatou o perigo que o produto da decomposição dos resíduos sólidos (chorume) representa para os sistemas aquíferos livres, que são mais vulneráveis à contaminação pelos efluentes.

4.6 Fontes prováveis de contaminação

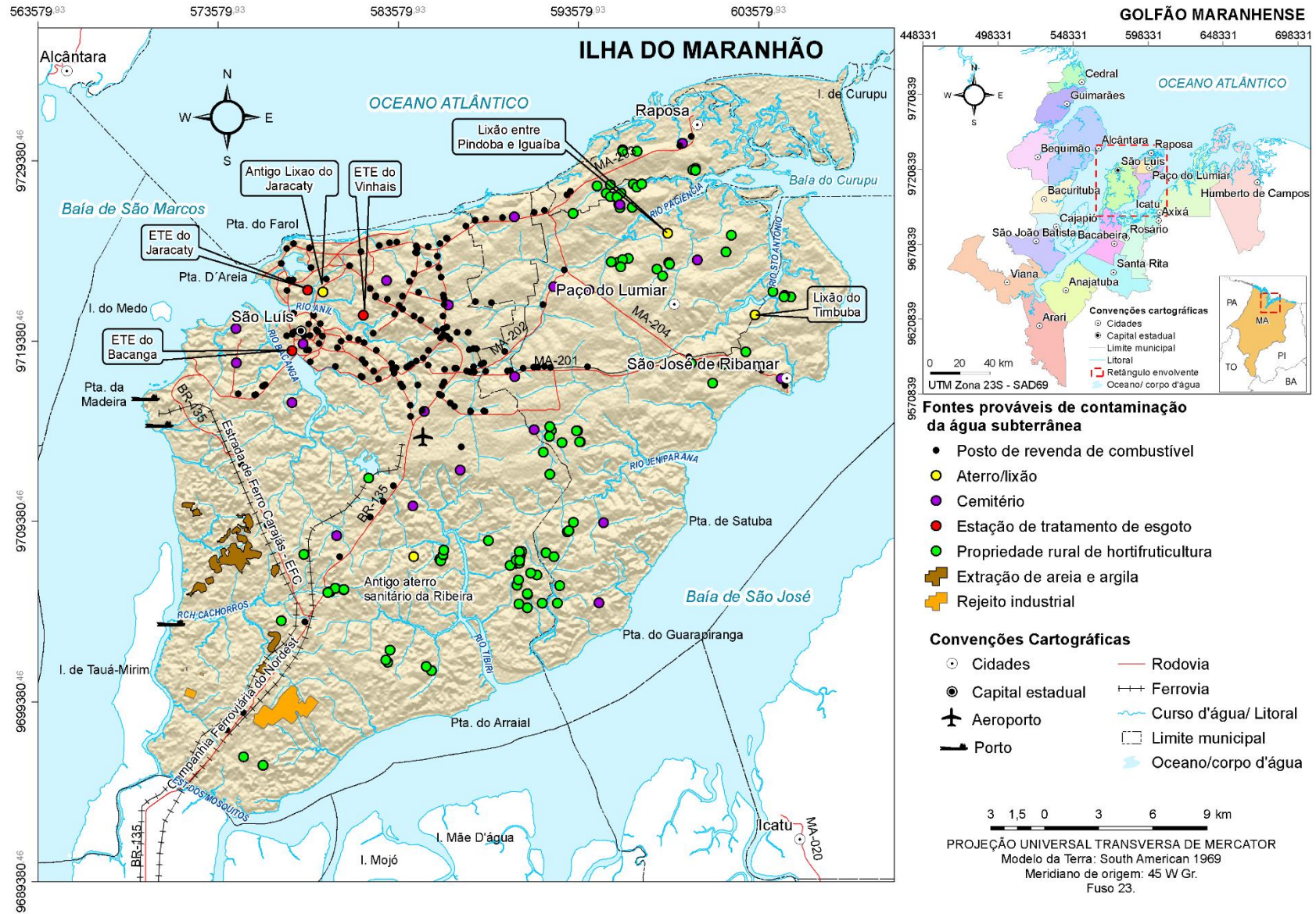
Entre as fontes potenciais de contaminação dos sistemas aquíferos estão os postos de revenda de combustíveis. Segundo a Associação Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2011), na Ilha do Maranhão há 196 postos de revenda de combustíveis, distribuídos ao longo dos principais corredores (**Figura 4.13**), com maior concentração na região central do município de São Luís. As contaminações na água subterrânea são originadas a partir dos vazamentos nos sistemas subterrâneos de armazenamento de combustíveis, ocasionados pela corrosão do material, ao final de sua vida útil.

Figura 4.12 - Mapa de porcentagem dos domicílios particulares permanentes na Ilha do Maranhão com lixo coletado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 4.13 – Mapa de localização das fontes prováveis de contaminação das águas subterrâneas na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As contaminações estão relacionadas aos compostos aromáticos Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno (BTEX), cuja composição na gasolina varia entre 10 e 50%. Em contato com a água subterrânea, esses hidrocarbonetos produzem uma fase dissolvida, que é função de sua solubilidade, a qual é ampliada pela adição de 20 a 25% de etanol na gasolina. As contaminações dos aquíferos por BTEX ocorrem em escala global e no Brasil foram estudadas por Oliveira (1992), Corseuil e Marins (1997), Aquino (2000), Dehaine (2001), Kaiper (2003), Ferreira (2003), Tiburtius *et al.* (2004), Marques (2007), Galante (2008), Varzacacou (2009), Brito *et al.* (2011), entre outros.

Além dos postos de revenda de combustíveis, a **Figura 4.13** ilustra a localização dos cemitérios, os quais são aproximadamente 21 espalhados na Ilha do Maranhão, com maior proporção na região centro-norte da área investigada; das estações de tratamento de esgotos, do Bacanga, Jacaraty e Vinhais; das propriedades rurais de hortifruticultura, cujo risco está associado à contaminação das águas subterrâneas por agrotóxicos e defensivos agrícolas; dos antigos lixões e aterros sanitários, que estão relacionados ao risco de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos por chorume; as áreas de extração de areia e argila, com maior expressão na região oeste da área de estudo; e as áreas de rejeitos industriais, cujos riscos estão associados às contaminações por metais.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DOS AQUÍFEROS NA ILHA DO MARANHÃO

A pesquisa ou exploração dos reservatórios subterrâneos, de acordo com Feitosa e Feitosa (2008), constitui uma fase mais lenta e dificilmente completa quando comparada a dos reservatórios superficiais. Para o conhecimento adequado dos aquíferos e suas respostas a exploração, os estudos são categorizados em preliminares ou de reconhecimento, gerais ou de viabilidade e detalhados. A pesquisa ora tratada se enquadra na primeira categoria e, portanto, esse capítulo descreve os aspectos hidráulicos, dimensionais, hidrodinâmicos e hidroquímicos dos aquíferos na Ilha do Maranhão.

5.1 Banco de dados de poços tubulares

O banco de dados de poços tubulares foi inicialmente elaborado a partir de pesquisa bibliográfica, em que foram considerados registros de cadastros preexistentes, sendo 77 da Acqua-Plan (1972); 281 de Rodrigues *et al.* (1994); 51 de Soares (2004); 50 de Correia e Pires (2006); 51 de Pereira (2006); 275 da PMSL; e 139 SRH/SEMA. Posteriormente, foram agregados 104 processos de outorga de água subterrânea, referentes à 137 poços tubulares da SRH/SEMA; 27 registros da Prefeitura de São José de Ribamar (PMSJR), de responsabilidade da CAEMA; e 17 da PMSL. Ao final, foram contabilizados 1.105 registros de poços tubulares na Ilha do Maranhão, os quais foram analisados quanto à localização e a existência de perfis litológico e construtivo.

Quanto ao primeiro critério, 35 poços não apresentaram informações de coordenadas geográficas; 34 exibiram coordenadas fora dos limites da área de estudo; 27 mostraram coordenadas inconsistentes; 1 com coordenadas geográficas com impossibilidade de leitura no documento original; 335 com coordenadas geográficas repetidas. Ao final dessa etapa, dos 673 poços contabilizados, 539 não possuíam perfis litológico e construtivo; 10 possuíam essas informações, porém de forma incompleta ou inconsistente; e 124 poços dispunham desses registros de forma consistente. Portanto, para composição do banco de dados foram consideradas as duas últimas parcelas, ou seja, 134 registros.

Os registros foram organizados mediante os seguintes parâmetros: a) número de ordem; b) fonte do registro; c) número e data, em se tratando de processo de outorga; d) requerente; e)

dados complementares sobre o poço; f) município, bairro e coordenadas UTM do poço; g) finalidade do poço e empresa executora da perfuração; h) aquífero captado, profundidade do poço, níveis estático e dinâmico, rebaixamento, vazão de teste e específica; i) diâmetro do poço, tipo de revestimento, material do filtro e do pré-filtro, e posição dos filtros; h) sistema de recalque; i) presença ou não de teste de vazão, duração e tempo de recuperação; j) vazão requerida, autorizada, período de bombeamento e número da autorização. Os registros estão expostos no Apêndice A do presente trabalho.

A maior parte dos 134 poços cadastrados está localizada na região oeste da Ilha do Maranhão (**Figura 5.1**), alinhados às principais rodovias; as menores concentrações estão nas regiões nordeste, nos municípios de Paço do Lumiar e Raposa, e na região leste dos municípios de São Luís e São José de Ribamar; 76% estão situados no município de São Luís; 59% exploram água do aquífero Barreiras, com profundidade média de 73 m; 27% são destinados ao consumo humano e 20% ao uso industrial; 64% dos registros são provenientes dos relatórios de outorga de água subterrânea, entre 2009 e 2010 da SRH/SEMA; 12% são registros da PMSL que estão distribuídos em comunidades como Andiroba, São Benedito, Cajueiro, Mata, Tajaçuaba, entre outras.

Em geral, nos poços cadastrados, as profundidades dos filtros inicial e final variam entre 4 e 119 m e entre 18 a 215 m, respectivamente. Quanto aos 80 poços no aquífero Barreiras (**Figura 5.2a**), os filtros iniciais estão entre 4 e 98 m, enquanto os finais se situam entre 18 e 172 m de profundidade. Em relação aos 13 poços do aquífero Itapecuru (**Figura 5.2b**), os filtros iniciais estão entre 12 e 119 m e os finais entre 24 e 215 m. No que concerne aos 19 poços com captação nos dois aquíferos (**Figura 5.2c**), os valores mantem-se entre 14 a 63 m, para os filtros iniciais, e entre 50 a 143 m, para os filtros finais. Por fim, para os poços que não possuem informações quanto aos aquíferos captados (**Figura 5.2d**), as profundidades inicial e final concentram-se entre 8 e 57 m e entre 38 e 124 m, respectivamente.

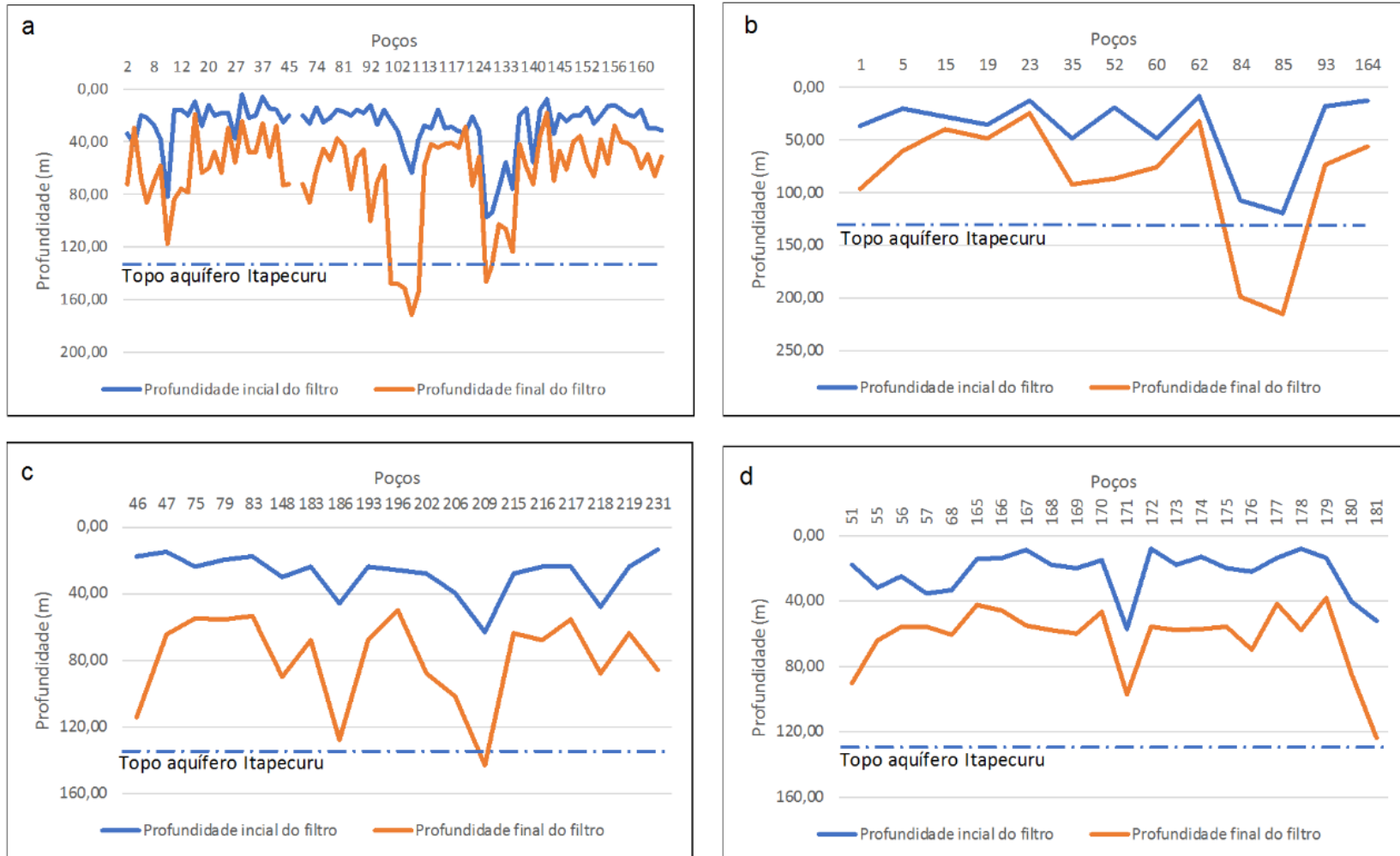
A posição dos filtros nos poços do aquífero Barreiras (**Figura 5.2a**) é mais coerente com a espessura do pacote sedimentar terciário verificado em literatura. De acordo com Acqua-Plan (1972), na zona produtora do Paciência, o empilhamento sedimentar é da ordem de 90 m, com o topo do aquífero confinado situado a 130 m de profundidade. Já na zona do Sacavém, a espessura vai de 15 a 38 m. A partir desses referenciais e considerando a profundidade dos filtros iniciais, todos os poços, provavelmente, captam o aquífero Barreiras. Quando, porém, é observada a profundidade dos filtros finais, 12 poços exibem valores acima de 100 m e 7 excedem de 130 m. Portanto, embora os filtros iniciais estejam no aquífero Barreiras, os finais, segundo o exposto, encontram-se no domínio do aquífero cretáceo.

Figura 5.1 – Mapa de localização dos poços tubulares que possuem perfis litológico e construtivo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.2 – Gráficos de profundidades inicial e final dos filtros nos poços cadastrados na Ilha do Maranhão: a) aquífero Barreiras; b) aquífero Itapecuru; c) aquíferos Barreiras e Itapecuru; d) aquíferos não informados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Em relação ao aquífero Itapecuru (**Figura 5.2b**), dos 13 registros, somente 2 apresentam filtros inicial e final em profundidades coerentes ao topo do aquífero cretáceo. Nos demais registros, os valores são mais apropriados ao aquífero Barreiras. Isso indica que esses poços podem estar captando as duas unidades hidrogeológicas. Nos poços cujos aquíferos não foram informados (**Figura 5.2c**), a profundidade dos filtros inicial e final exibem uma assinatura que se aproxima dos poços que captam as duas unidades hidrogeológicas: grande concentração dos filtros iniciais de entre 0 e 40 m e filtros finais entre 40 e 120 m de profundidade.

Diante do exposto, verifica-se que a grande maioria dos poços cadastrados apresenta filtros situados nos dois aquíferos: terciário e cretáceo, dificultando, dessa forma, o estudo isolado das duas unidades hidrogeológicas. Para contornar o problema ora posto, considerou-se a Ilha do Maranhão constituída, para fins de gestão, por um sistema aquífero denominado Barreiras-Itapecuru, empregando-se, para tanto, todos os registros de poços do banco de dados, para a análise dos parâmetros hidráulicos e dimensionais e hidrodinâmicos.

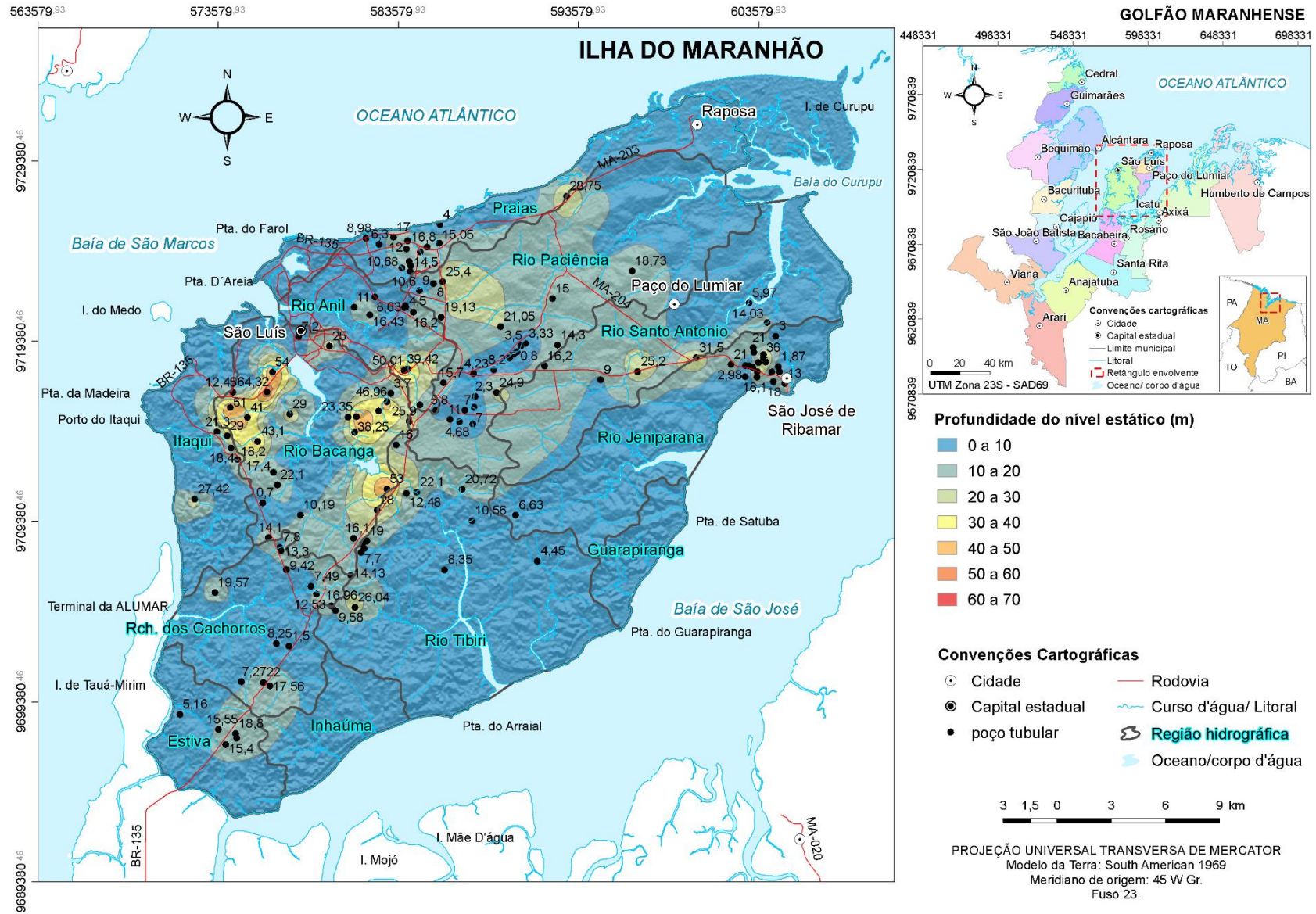
5.2 Parâmetros hidráulicos e dimensionais

Quanto aos parâmetros hidráulicos e dimensionais, o mapa de profundidade do nível estático (**Figura 5.3**) foi gerado mediante interpolação dos valores observados no banco de dados de poços os quais foram agrupados em sete intervalos de classes. As menores profundidades estão localizadas na região central da Ilha do Maranhão e ao longo da faixa litorânea, enquanto as maiores estão situadas na região hidrográfica do rio Bacanga. Nessa região e na do Riacho dos Cachorros também se verificam os valores mais acentuados de nível dinâmico (**Figura 5.4**) e de rebaixamento (**Figura 5.5**).

A carga hidráulica indica o nível de energia que a água se encontra; representa a contribuição da cota de elevação e da carga de pressão; e contribui juntamente com a aceleração da gravidade, no cálculo do potencial hidráulico. Uma vez que a gravidade é praticamente constante na superfície da terra, o potencial e a carga hidráulica são correlacionáveis, sendo a última considerada como um potencial em termos físico e matemático (FEITOSA; FEITOSA, 2008).

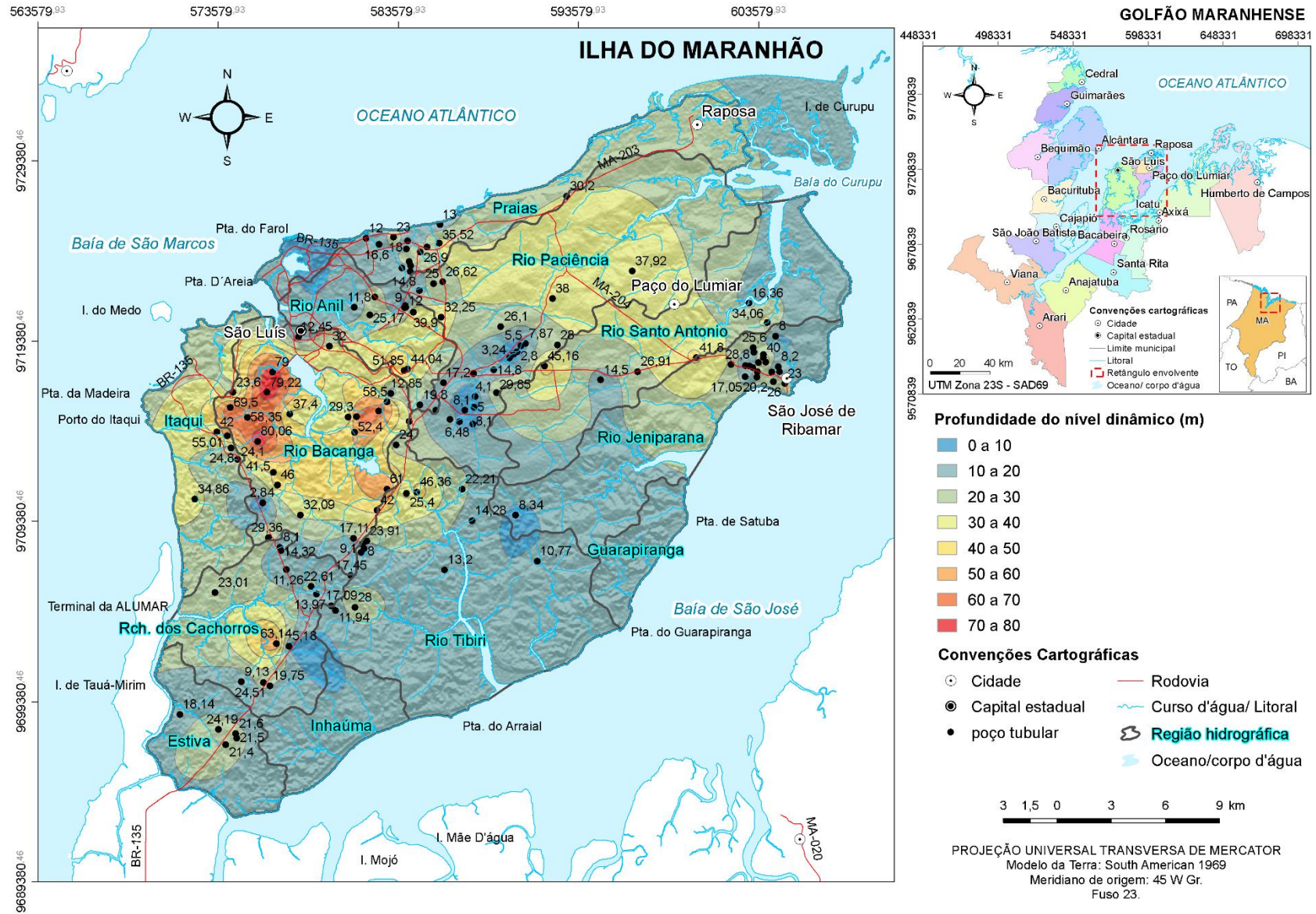
A carga hidráulica (**Figura 5.6**) é maior na porção central da Ilha do Maranhão, nos cursos alto e médio das regiões hidrográficas dos rios Paciência e Santo Antonio. Ela é menor no entorno, promovendo o movimento da água subterrânea segundo a direção ilustrada no mapa potenciométrico e de linhas de fluxo (**Figura 5.7**).

Figura 5.3 – Mapa de profundidade do nível estático dos poços tubulares na Ilha do Maranhão.



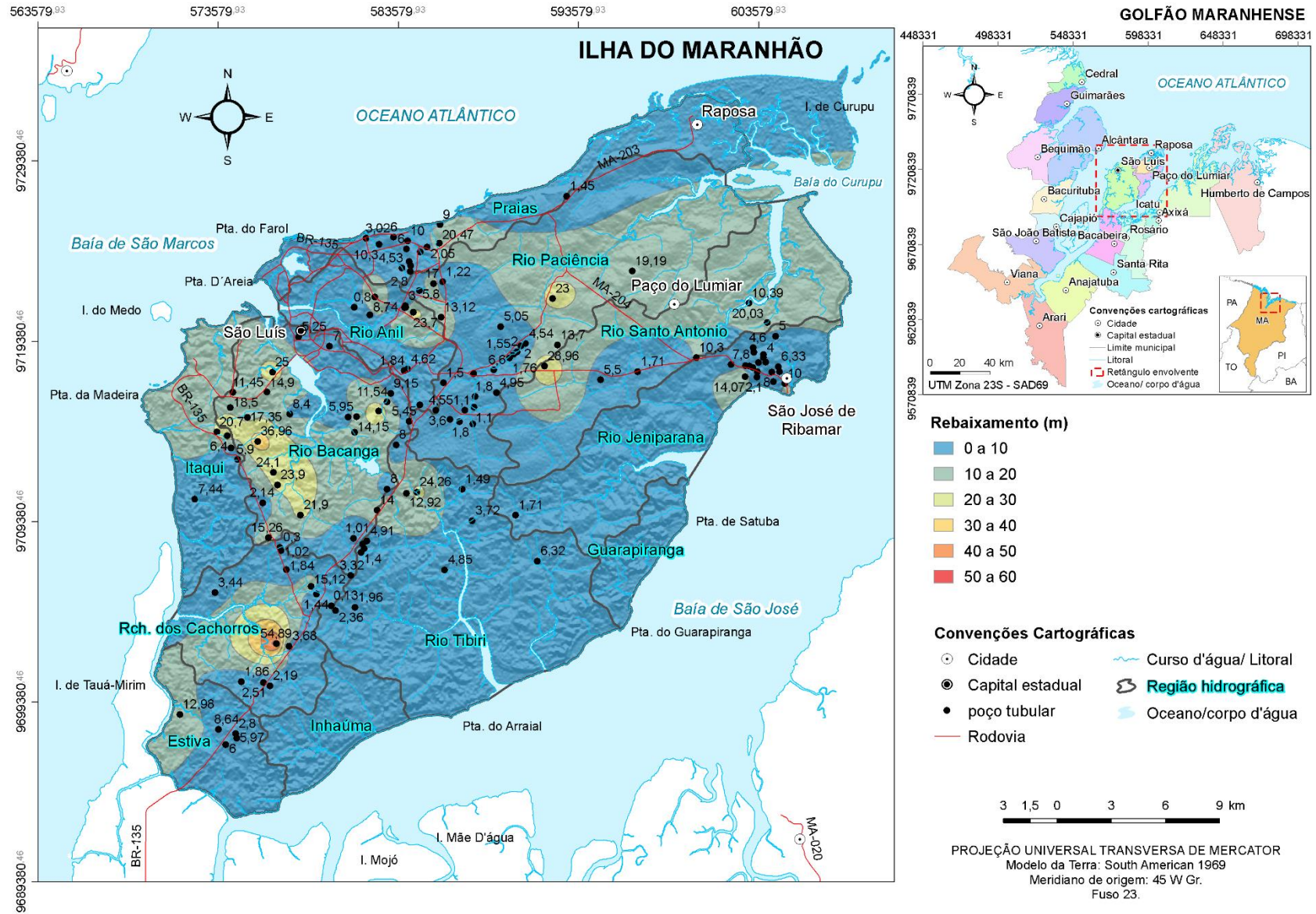
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.4 – Mapa de profundidade do nível dinâmico dos poços tubulares na Ilha do Maranhão.



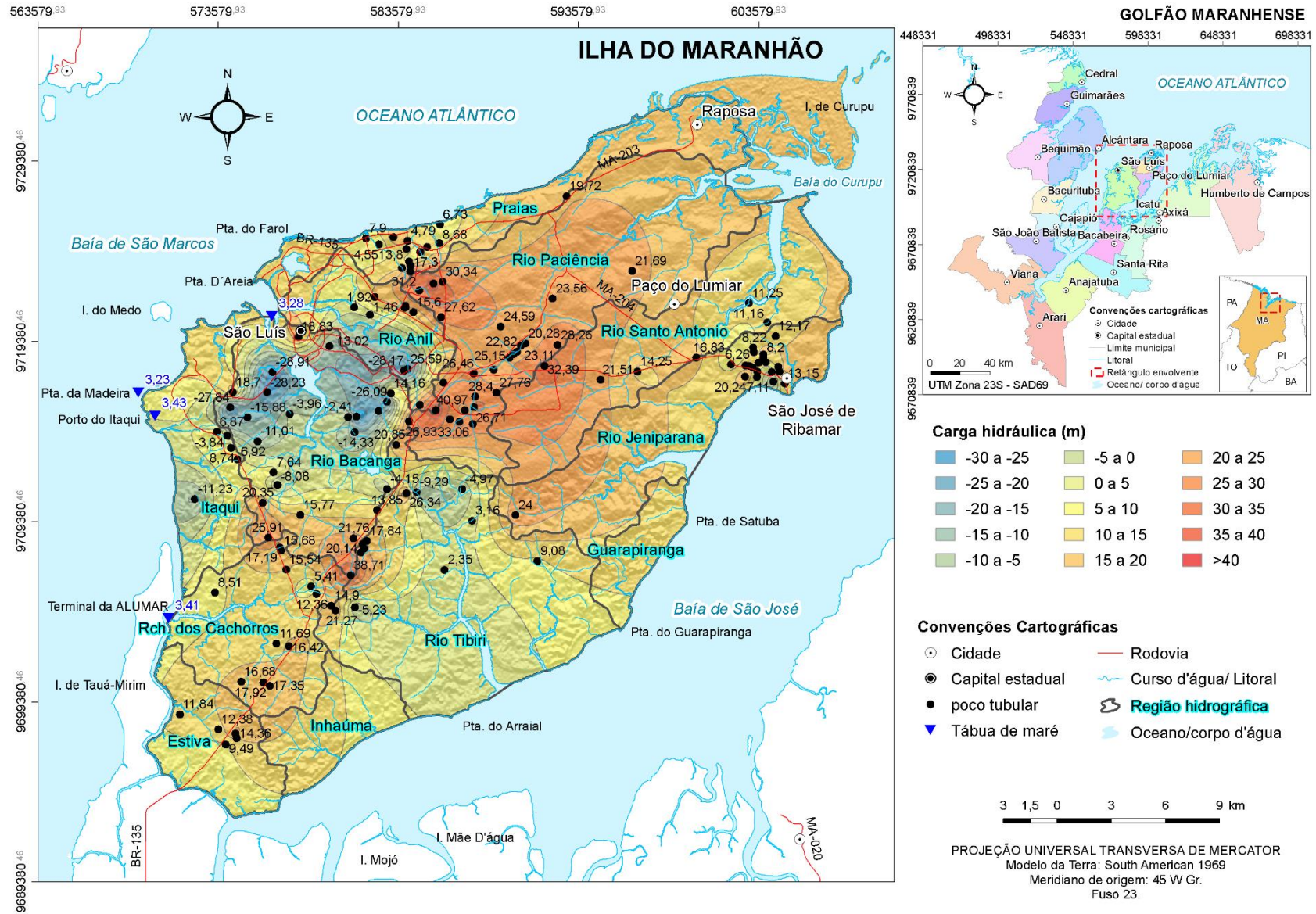
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.5 – Mapa de rebaixamento dos poços tubulares na Ilha do Maranhão.



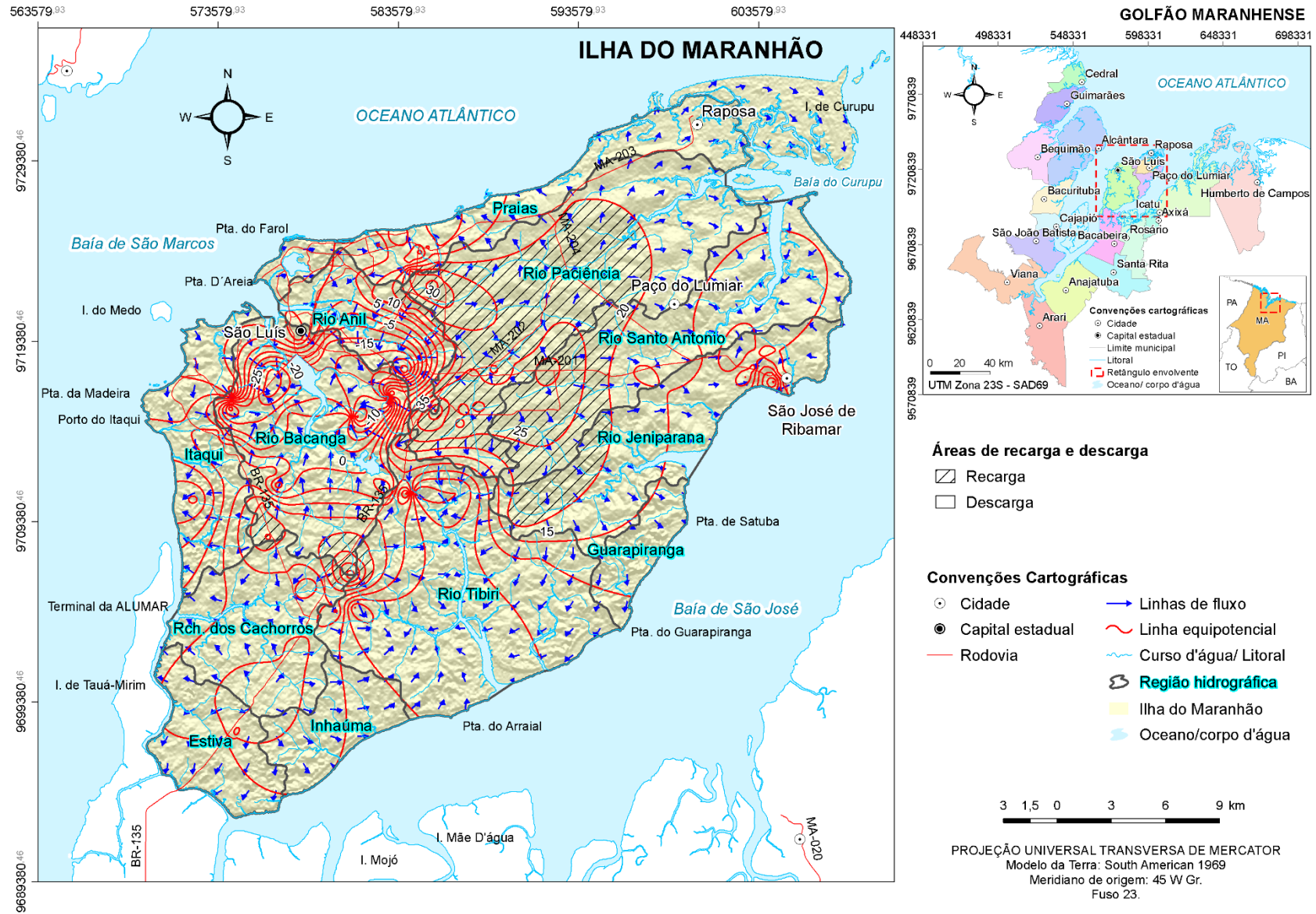
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.6 – Mapa de carga hidráulica dos poços tubulares na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.7 – Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

De acordo com Cabral (2008) e Fits (2015), as linhas de fluxo representam o escoamento no plano horizontal, onde a declividade da superfície freática é geralmente muito pequena. A condição normal das linhas de fluxo em relação às superfícies equipotenciais somente é válida se o meio é poroso e isotrópico; e se a resistência ao fluxo vertical é desconsiderada, em observância a aproximação de Dupuit-Forchheimer. Nesse caso, a carga hidráulica torna-se função apenas das coordenadas horizontais do meio poroso.

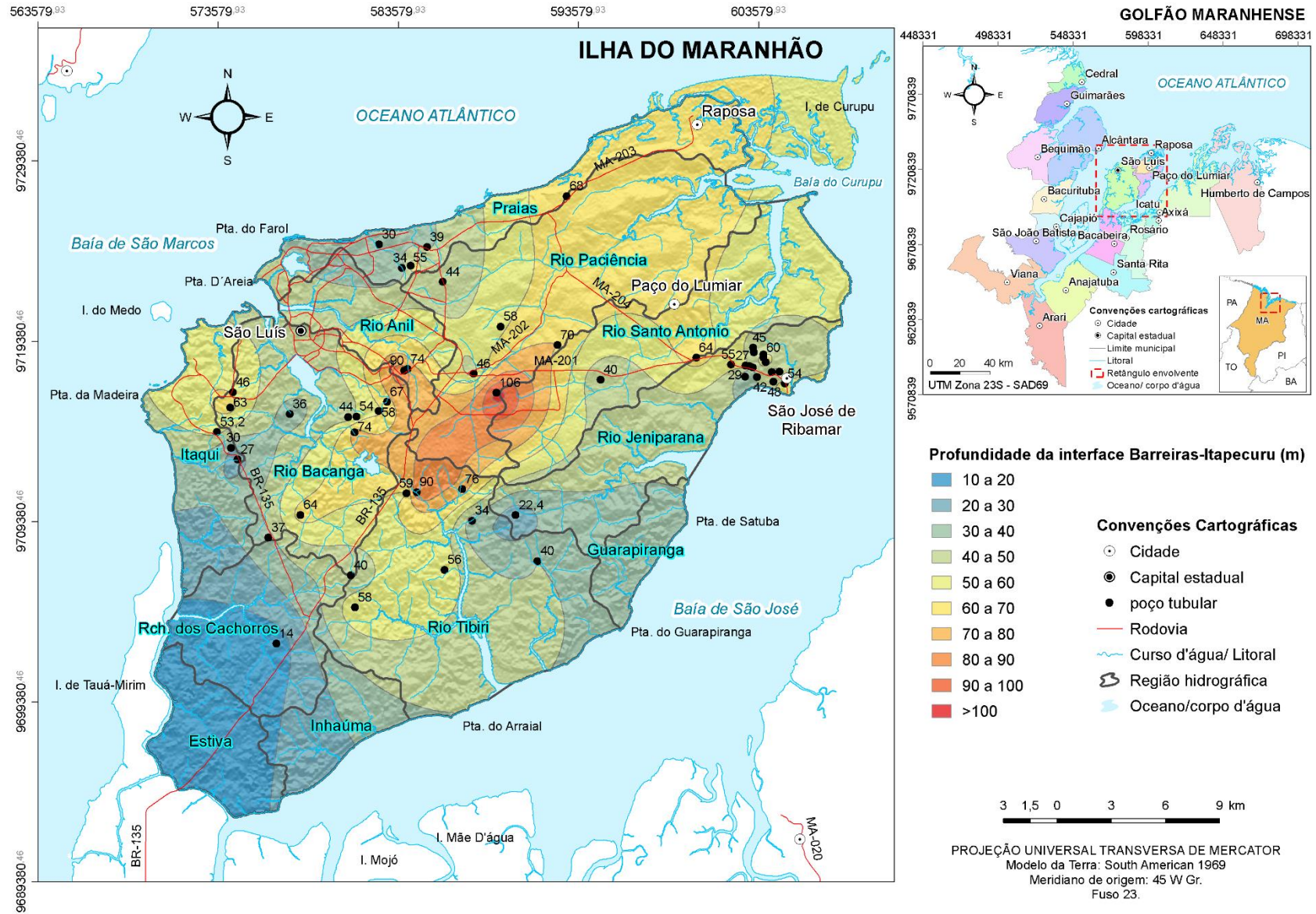
No mapa potenciométrico (**Figura 5.7**), os gradientes hidráulicos maiores e menores podem ser correlacionados às áreas com transmissividades menores e maiores, respectivamente. Semelhantemente, as linhas de fluxo convergentes e divergentes podem ser associadas às áreas de descarga e recarga sequencialmente (FEITOSA; FEITOSA, 2008). A partir dessa análise qualitativa, a região centro-norte da área de estudo se configura com transmissividade e recarga relevantes. Esta última foi delineada mediante classificação dos valores de carga hidráulica maiores ou iguais a 20 m. Ela abrange grande parte das regiões hidrográficas dos rios Paciência, Santo Antonio e Jeniparana.

O mapa de profundidade da Interface Barreiras-Itapecuru (**Figura 5.8**) foi produzido a partir dos poços cujos perfis litológicos evidenciaram o aquífero captado. Ao todo, foram considerados 54 registros cujo contato das unidades estratigráficas se deu em níveis de calcário, calcarenito, calcilito, argila compacta, argila calcífera, argila plástica, argilito calcífero, intercalações de calcário, folhelho e siltito, e material arenoso calcífero. Os valores de profundidade interpolados e classificados são mais elevados na região central da Ilha do Maranhão, no domínio dos Tabuleiros Costeiros. A interface é mais rasa ao sul da área de estudo e na faixa litorânea onde se verificam os afloramentos dos estratos cretáceos, como na Ponta Farol, Ponta de Guarapiranga, entre outras localidades.

Dos valores de profundidade da interface Barreiras-Itapecuru foram subtraídos aqueles referentes ao nível estático, obtendo-se a espessura saturada do pacote sedimentar do aquífero Barreiras (**Figura 5.9**). Em geral, a espessura do pacote sedimentar é maior na porção central da área de estudo, onde atinge valores entre 80 a 90 m, afinando em direção ao litoral. Os valores mais baixos remetem aos locais em que a interface Barreiras-Itapecuru é quase aflorante e o nível estático é profundo, como nas regiões hidrográficas do Riacho dos Cachorros, Estiva e Inhaúma.

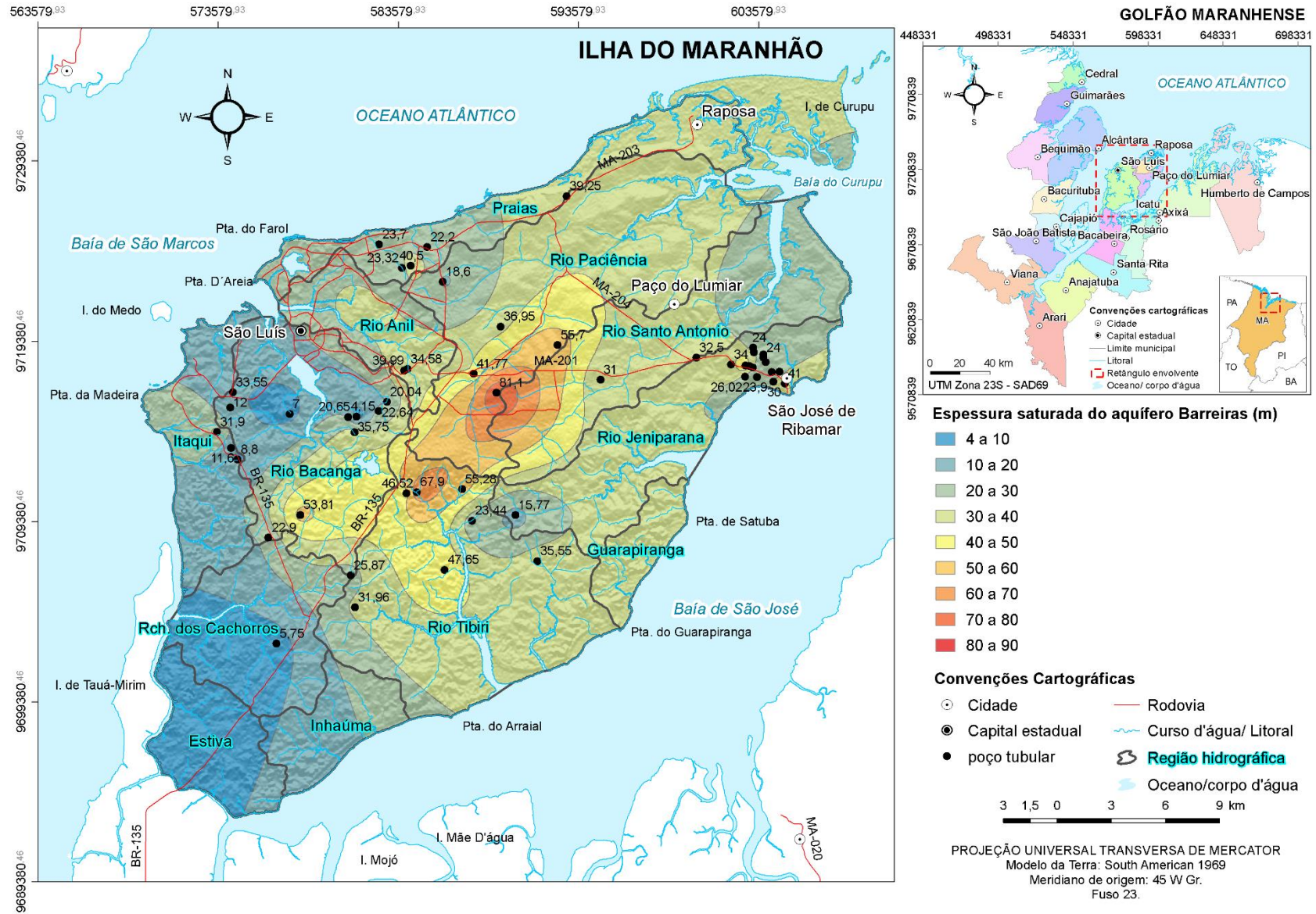
Em relação à vazão de teste, ela é empregada em ensaios de bombeamento para definir a capacidade produtiva de um poço e dimensionar a sua unidade de bombeio. Esse parâmetro está presente nos processos de solicitação de outorga de direito de uso da água subterrânea que são encaminhados ao órgão ambiental do estado, no caso a SRH/SEMA.

Figura 5.8 – Mapa de profundidade da interface entre os grupos Barreiras e Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.9 – Mapa de espessura saturada do aquífero Barreiras.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na mapa de vazão de teste (**Figura 5.10**), os valores mais elevados estão nas regiões hidrográficas dos rios Paciência e Santo Antônio, onde se encontra o sistema produtor do Paciência; na bacia do Bacanga, onde se situa o sistema produtor do Sacavém; e nas regiões do Riacho dos Cachorros, Estiva e Inhaúma, onde está implantado o Distrito Industrial de São Luís.

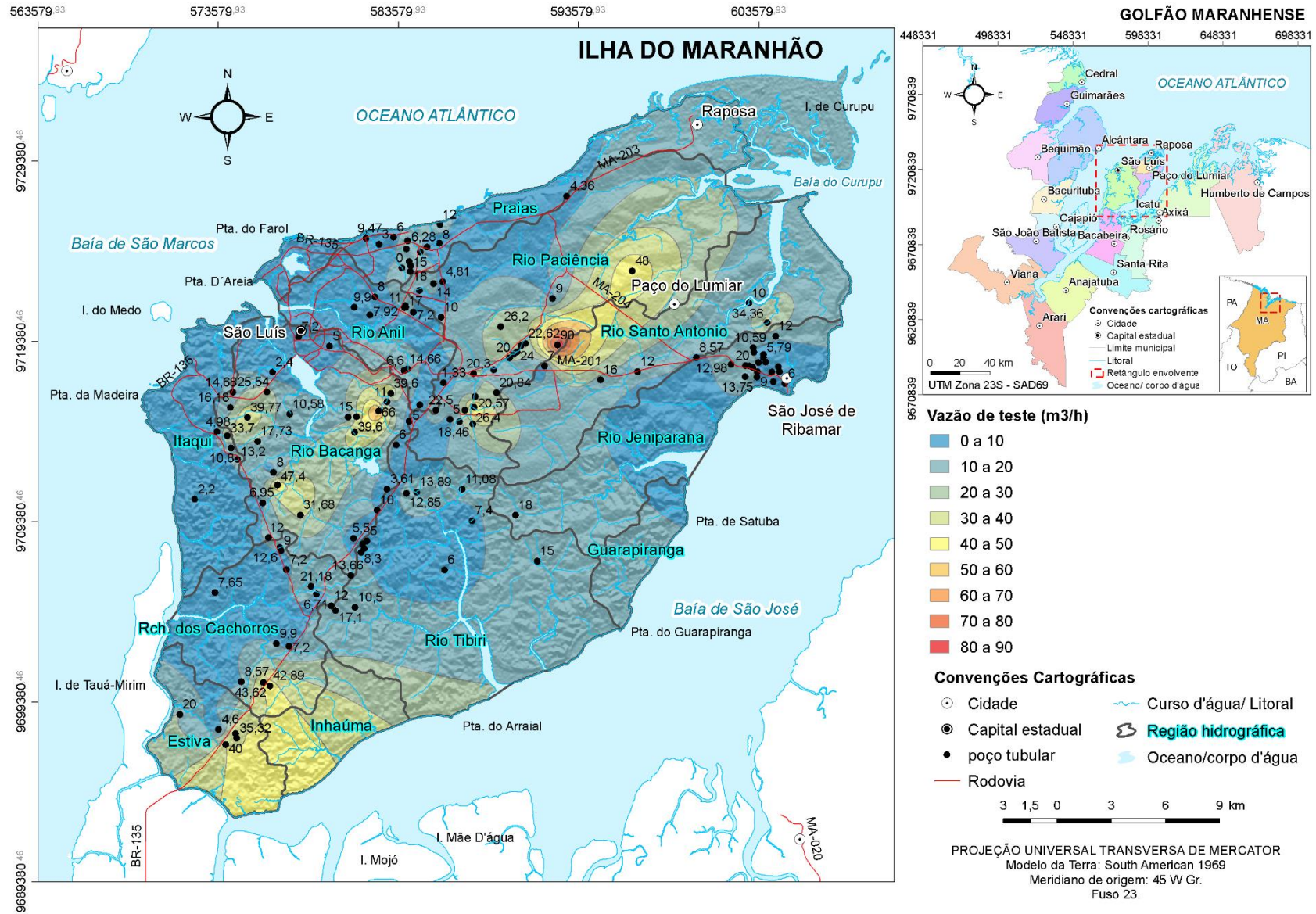
De acordo com Manoel Filho (2008), a vazão ou capacidade específica de um poço é a razão entre a vazão e o rebaixamento para um determinado tempo. Seu valor é empregado para medir a produtividade de um poço em regime estacionário. Segundo Feitosa *et al.* (2008a), este regime se estabelece quando a vazão bombeada em um poço se iguala àquela proveniente de fonte externa, cessando a contribuição do armazenamento e a evolução do cone de rebaixamento, situação em que o aquífero exerce a sua função apenas de transporte. No aquífero Barreiras, na região do Paciência, esse regime foi observado durante a execução de testes de aquíferos por Acqua-Plan (1972).

Na Ilha do Maranhão, os valores mais acentuados de capacidade específica destacam-se: no alto curso das regiões hidrográficas do Paciência e Santo Antonio (**Figura 5.11**) as quais apresentam grande potencial como área produtora de água subterrânea; no baixo curso da região hidrográfica do Anil; no alto curso das regiões hidrográficas do Riacho dos Cachorros, Inhaúma e Estiva, provavelmente, explicados pelo elevado grau de fraturamento dos materiais geológicos. Por outro lado, os valores mais baixos de capacidade específica estão nas regiões do Itaqui, Bacanga, Tibiri e no baixo curso das regiões do Paciência, Santo Antônio e Praias.

Quanto à profundidade da interface água doce-água salgada na área de estudo (**Figura 5.12**), seus valores foram estimados através do modelo de Ghyben-Herzberg para um aquífero costeiro, o qual admite um equilíbrio hidrostático, estacionário, na interface entre os dois meios. A partir dos registros de nível médio das estações maregráficas Porto do Itaqui (3,43 m), Terminal Ponta Madeira (3,23 m), São Luís (3,28 m) e Terminal da Alumar (3,41 m), foi obtido o valor do nível médio do mar na Ilha do Maranhão (3,35 m). Ele foi subtraído dos valores de carga hidráulica (h), para obtenção da altura da lâmina d'água acima do nível do mar (h_d) e, por conseguinte, da profundidade da interface água doce-água salgada (h_a).

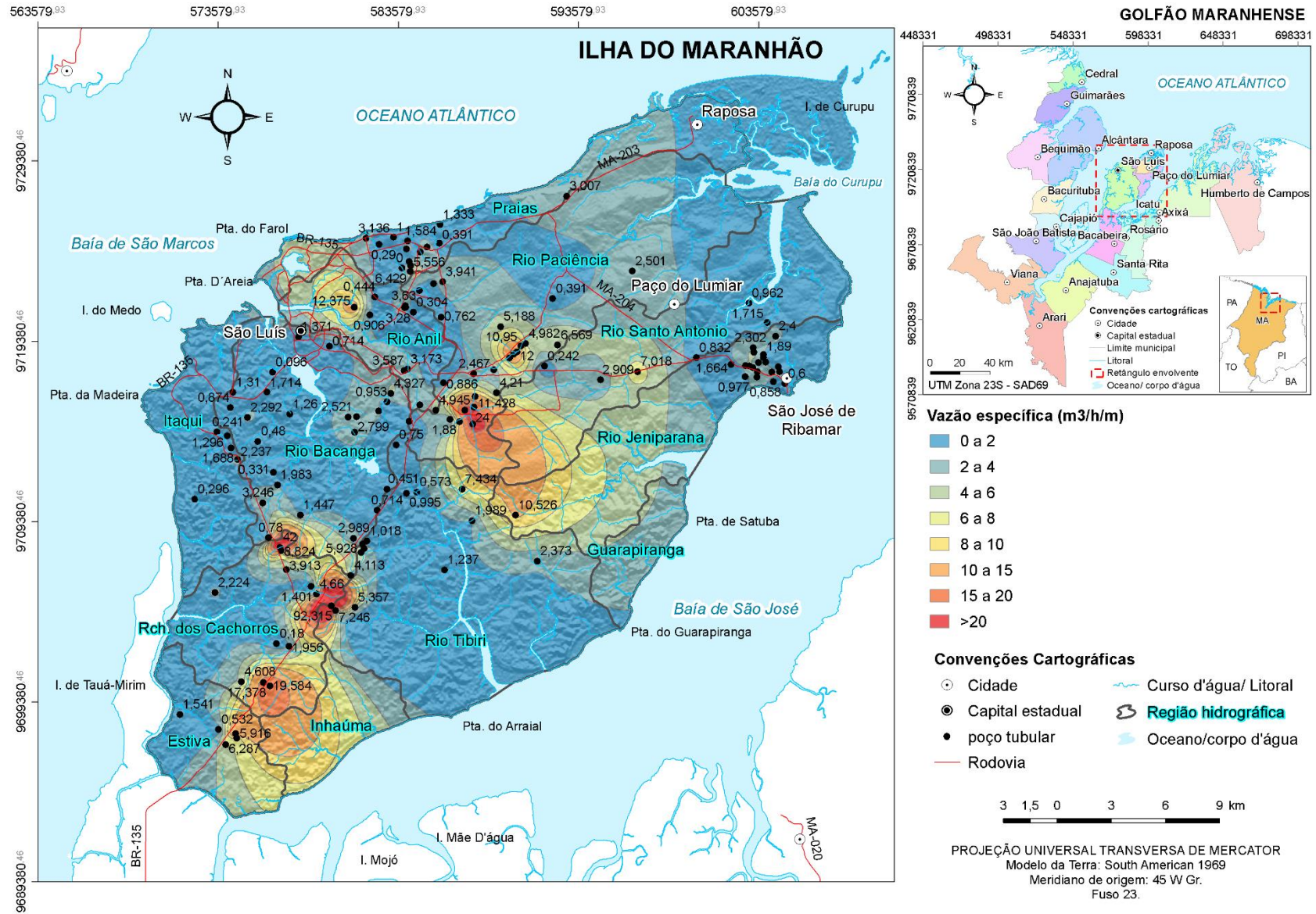
Os valores entre parênteses são provenientes das tábuas de marés de cada uma das estações maregráficas do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil. Eles correspondem ao nível médio do mar sobre o nível de redução. Este referencial refere-se ao zero das cartas náuticas e previsões das Tábuas de Maré; é obtido a partir das médias das mínimas observações de maré em uma estação (NM local).

Figura 5.10 – Mapa de vazão de teste dos poços tubulares na Ilha do Maranhão.



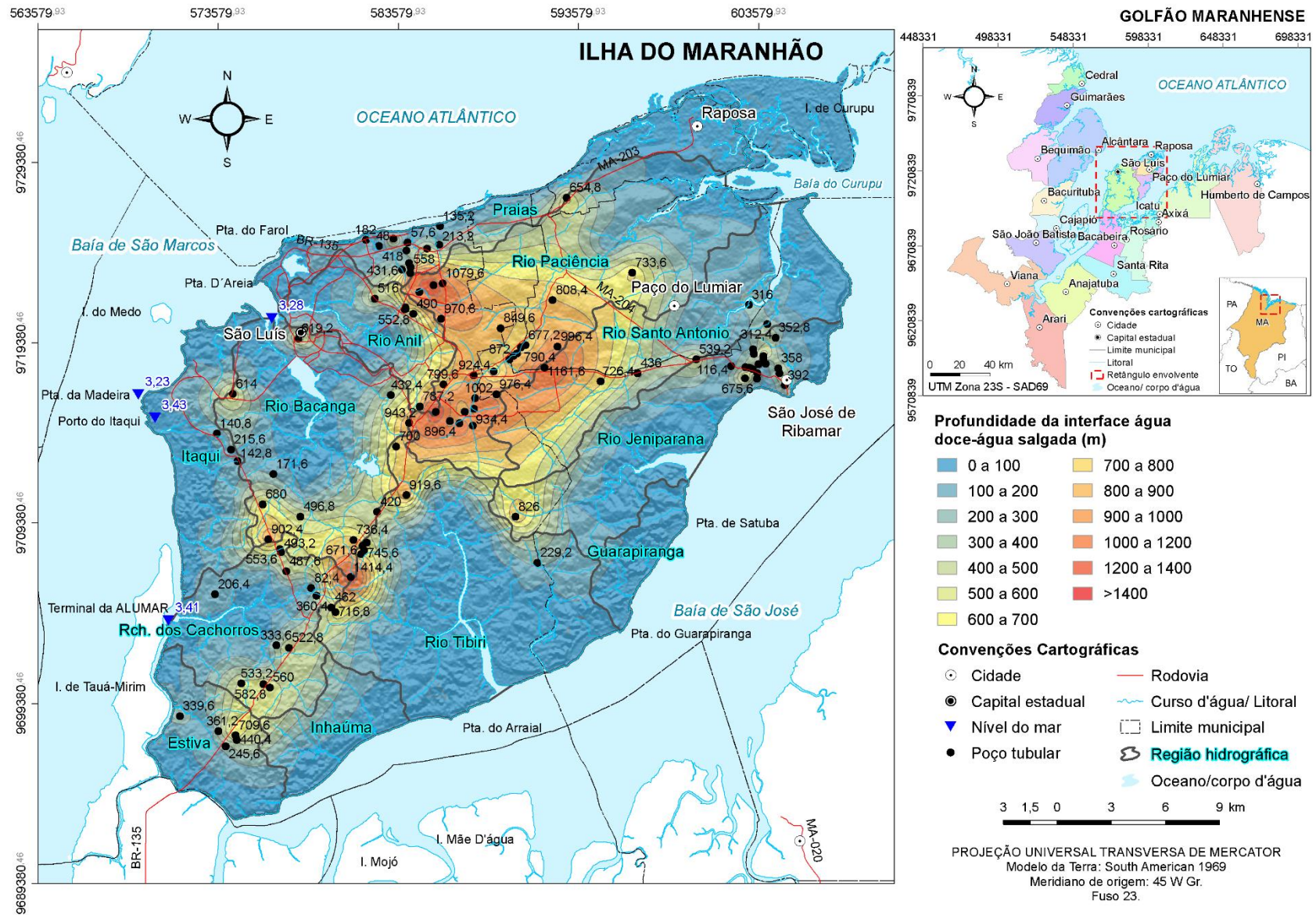
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.11 – Mapa de capacidade específica dos poços tubulares na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.12 – Mapa de profundidade da interface água doce-água salgada na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

De maneira geral, o comportamento da interface água doce-água salgada na Ilha do Maranhão segue o modelo proposto para um aquífero livre costeiro, com menores cotas nas porções litorâneas, aumentando em direção as porções interiores. As menores profundidades estão localizadas na porção centro-sul da área de estudo, marcada por tabuleiros costeiros dissecados, com destaque para as porções oeste da região hidrográfica do Bacanga, leste do Itaquí, oeste do Riacho dos Cachorros. Na porção centro-norte, a profundidade da interface recua significativamente para o litoral, com destaque para a região hidrográfica das Praias. No contato do Litoral de Mangues e Rias com os Tabuleiros Costeiros, o crescimento das cotas altimétricas explica o aumento significativo da profundidade da interface água doce-água-salgada.

5.3 Parâmetros hidrodinâmicos

Quanto aos parâmetros hidrodinâmicos condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento, a descrição que se segue foi baseada em Fetter (2001), Price (2004), Martinez (2005), Bell (2006), Gokhale (2007), Manoel Filho (2008), Aragon e Verma (2011), Karamouz *et al.* (2011), Mestrinho (2013), Fitts (2015), Freeze e Cherry (2017), Santos *et al.* (2018). A condutividade hidráulica (K) ou coeficiente de proporcionalidade da equação de Darcy, em um meio isotrópico, está associada a vazão que atravessa uma área de seção de unitária, segundo um gradiente hidráulico unitário.

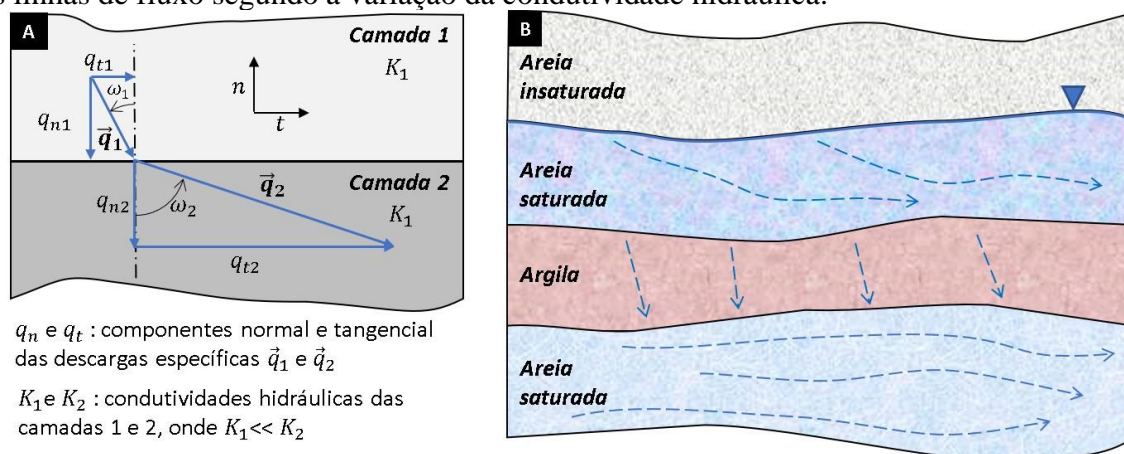
Ela representa a capacidade da formação aquífera desempenhar sua função de transporte ou condutor hidráulico. Para tanto, considera as características do meio sólido, como, porosidade, tamanho, distribuição e arranjo das partículas, e características do fluido que está escoando, tais como massa específica e viscosidade. Os registros de condutividade hidráulica para materiais inconsolidados e rochas sedimentares são: cascalho bem selecionado (10^{-4} a 10^{-2} m/s), areia bem distribuída (10^{-5} a 10^{-3} m/s), silte (10^{-8} a 10^{-6} m/s) e argila (10^{-11} a 10^{-8} m/s); arenito (10^{-10} a 10^{-6} m/s), folhelho (10^{-13} a 10^{-9} m/s), calcário (10^{-9} a 10^{-6} m/s).

Em uma formação geológica, os registros de condutividade hidráulica podem apresentar variações quanto à posição (heterogeneidade) e quanto à direção de medição (anisotropia). Ela é definida como homogênea quando a condutividade hidráulica é constante independentemente da posição [$K(x, y, z) = constante$] e heterogênea em situação contrária [$K(x, y, z) \neq constante$]. A formação geológica é conceituada como isotrópica quando os valores de condutividade hidráulica independem da direção de medição [$K_x = K_y = K_z$] e anisotrópica em condição oposta [$K_x \neq K_y \neq K_z$].

Apesar das condições de homogeneidade e isotropia adotadas como iniciais para a solução de equações diferenciais de fluxo, os ambientes geológicos são por natureza heterogêneos e anisotrópicos. Segundo Price (2004), no caso dos sedimentares, a anisotropia é explicada porque os grãos são assentados preferencialmente com o eixo mais curto ligeiramente vertical, tornando a permeabilidade paralela ao acamamento maior que a perpendicular às camadas, segundo um fator que varia de um quarto (1/4).

De acordo com Fitts (2015), o comportamento das linhas de fluxo nesses ambientes é semelhante ao observado na refração ótica (**Figura 5.13a**). Na camada superior (1), que apresenta menor condutividade hidráulica (K_1), a descarga específica (\vec{q}_1) é praticamente igual a sua componente normal à interface entre os dois meios (q_{n1}), ao passo que a componente tangencial (q_{t1}) é menor. Por outro lado, na camada inferior (2), de maior condutividade hidráulica (K_2), a componente tangencial da descarga específica (q_{t2}) aumenta em relação a sua componente normal (q_{n2}), fazendo como que a descarga específica resultante nesse estrato (\vec{q}_2) sofra um desvio. A **Figura 5.13b** ilustra esse processo em estratos com diferentes condutividades hidráulicas.

Figura 5.13 – Características das linhas de fluxo nos ambientes estratificados: a) comportamento das componentes normal e tangencial da condutividade hidráulica; b) direção das linhas de fluxo segundo a variação da condutividade hidráulica.



Fonte: Adaptado de Fitts, 2015.

A condutividade hidráulica [$L.T^{-1}$] constitui parâmetro fundamental de um aquífero sob o ponto de vista da qualificação. Seus valores podem ser estimados em laboratório, através de permeômetros de carga constante ou variável, onde as amostras deformadas ou indeformadas são submetidas a ensaios de infiltração. Em campo, os testes de infiltração na zona vadosa estão relacionados: à curva de distribuição granulométrica segundo Hazen (1911) ou Shepherd (1989); ao permeômetro Guelph com carga constante ou variável; aos anéis concêntricos; e ao

método *open end hole*. Esses dois últimos se destinam a obtenção da condutividade hidráulica vertical e, no caso do *open end hole*, segundo diferentes profundidades.

Na zona saturada, a condutividade hidráulica pode ser obtida pelo teste Slug e pelos ensaios de bombeamento. O primeiro se propõe estimar a condutividade hidráulica horizontal média em um volume imediatamente adjacente ao poço. O tratamento dos dados adquiridos envolve, entre outros, os métodos de Hvorslev (1951), Cooper *et al.* (1967) e Bower e Rice (1976). Quanto aos testes de bombeamento, eles podem ser classificados como de produção, quando se destinam a medir as perdas de carga em um poço e sua vazão de exploração, e de aquíferos, quando visam medir os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, principalmente na vizinhança do poço bombeado e secundariamente na dos poços de observação.

Os registros de rebaixamento versus tempo de bombeamento dos testes de aquíferos são analisados à luz das soluções ou métodos analíticos propostos para a equação geral de fluxo de água subterrânea para poços, com vistas a estimação dos parâmetros hidrodinâmicos. A transmissividade [$L^2.T^{-1}$] é definida como a taxa de escoamento através de uma faixa vertical de um aquífero com largura unitária, sujeita a uma variação unitária de gradiente hidráulico. Em estudos bidimensionais, esse parâmetro corresponde ao produto da condutividade hidráulica pela espessura da camada confinada (b) ou pela espessura saturada, no caso de aquífero livre, onde o fluxo é horizontal, portanto, sujeito a lei de Darcy.

A maioria dos sistemas aquíferos consiste em uma combinação de camadas de permeabilidades e espessuras variáveis. Nesse caso, estritamente, a transmissividade deve ser calculada a partir do somatório de cada permeabilidade pela sua respectiva espessura. Uma permeabilidade média pode então ser determinada dividindo a transmissividade total pela espessura total. Valores de transmissividade relacionados a capacidade produtiva da formação geológica são encontrados em Aragon e Verma (2011, *apud* CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983) a saber: muito baixa ($<10^{-5}$ m²/s), baixa (10^{-5} a 10^{-3} m²/s), média (10^{-3} m²/s), alta (10^{-3} a 10^{-2} m²/s) e muito alta ($>10^{-2}$ m²/s).

Quanto ao coeficiente de armazenamento, para um aquífero confinado, diz respeito a quantidade de água liberada por prisma de seção unitária e altura igual a espessura do aquífero, para uma variação unitária na carga hidráulica. Em um aquífero livre, está relacionado a água armazenada nos poros interconectados do meio e que pode ser drenada por gravidade, correspondendo, nesse caso, a própria porosidade efetiva (η_e). Esse parâmetro é conceituado como a razão entre o volume de água liberado pelos vazios, pelas forças gravitacionais (V_w) e o volume total (V_t). Nos aquíferos livres, o coeficiente de armazenamento varia entre 2 a 30% (WALTON, 1970) enquanto nos confinados, entre 10^{-3} a 10^{-5} .

No que concerne às soluções analíticas aplicadas a testes de aquíferos, elas variam segundo as características do modelo conceitual do aquífero (livre ou confinado); do regime de fluxo (estacionário ou transiente); da drenança das camadas confinantes (com ou sem drenança); da penetração dos poços no aquífero (total ou parcial); da presença ou não de fronteiras hidráulicas; da dimensão do fluxo (uni, bi ou tridimensional); entre outros aspectos. A seguir, faz-se uma breve descrição acerca dos métodos analíticos mais recorrentes na estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos.

O método de Theis (1935) é destinado à aquífero confinado, não drenante, em regime transiente, no qual a solução para a equação geral de fluxo bidimensional para um poço é aproximada pela função $W(u)$ (**Equação 5.1**). O ajuste dos dados de campo à curva teórica de Theis permite o cálculo da transmissividade (**Equação 5.2**) e do coeficiente de armazenamento (**Equação 5.3**), onde s é o rebaixamento; Q é a taxa de bombeamento; t é o tempo de duração do teste; e r é a distância entre o poço principal e o de observação.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (5.1)$$

$$T = \frac{Q}{4\pi s} \cdot W(u) \quad (5.2)$$

$$S = \frac{4Ttu}{r^2} \quad (5.3)$$

Cooper e Jacob (1946) propuseram uma simplificação para a solução de Theis (1935), para valores de $u < 0,01$, considerando somente os dois primeiros termos da função $W(u)$ (**Equação 5.4**). A partir dessa constatação, são obtidas as expressões que definem a transmissividade (**Equação 5.5**) e o coeficiente de armazenamento (**Equação 5.6**). Nessas fórmulas, a variação do rebaixamento (Δs) e o tempo limite de rebaixamento nulo (t_0) são obtidos a partir gráfico s versus $\log t$, tomando o intervalo de tempo correspondente a um ciclo logarítmico ($t_1 - t_2$) e o prolongamento da reta s versus $\log t$ até o seu intercepto com o eixo das abscissas.

$$W(u) = 0,5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} + \frac{u^4}{4.4!} \dots \quad (5.4)$$

$$T = \frac{0,183 \cdot Q}{\Delta s} \quad (5.5)$$

$$S = \frac{2,25Tt_0}{r^2} \quad (5.6)$$

Uma vez que a grande maioria das configurações geológicas não se enquadra às suposições de Theis (1935), Hantush e Jacob (1955) e Hantush (1960) propuseram uma solução analítica para aquífero confinado, com drenança e em regime transiente. No modelo de Hantush e Jacob (1955), o aquífero não bombeado teria uma carga hidráulica constante, fornecendo água através do aquífero bombeado. No modelo de Hantush (1960), os efeitos de armazenamento da camada confinante são considerados e a água que abastece o poço provém do aquífero bombeado, do armazenamento do aquífero bombeado e do aquífero não bombeado transmitida pelo aquífero bombeado.

Hantush e Jacob (1955) aproximaram a solução da equação geral de fluxo bidimensional através da função $W(u, \frac{r}{B})$, diferenciando da solução de Theis (1935) pela inclusão do termo adimensional (r/B) (**Equação 5.7**), onde r é a distância entre o poço bombeado e o de observação; B é o fator de drenança do aquífero bombeado; K_1 e b_1 são a condutividade hidráulica e a espessura do aquífero bombeado; e K' e b' são a condutividade hidráulica e espessura do aquífero sobrejacente. Semelhantemente ao método de Theis, o cálculo da transmissividade (**Equação 5.8**) e do coeficiente de armazenamento (**Equação 5.3**) para a solução referida provém do ajuste dos dados de campo ao conjunto de curvas teóricas.

$$\frac{r}{B} = r \sqrt{\frac{K'}{K_1 b_1 b'}} \quad (5.7)$$

$$T = \frac{Q}{4\pi s} \cdot W(u, \frac{r}{B}) \quad (5.8)$$

Para a situação de aquíferos livres e regime estacionário, a aproximação de Dupuit-Forchheimer (DUPUIT, 1863; FORCHHEIMER, 1886) procede do entendimento de que a dimensão horizontal do aquífero é superior a vertical. Em vista disso, o fluxo nessa direção é constante, ou seja, a carga hidráulica (h) varia apenas nas direções x e y , tornando a equação de fluxo bidimensional e horizontal. Dessas considerações, chega-se a **Equação (5.9)**, aplicada a dois poços de observação, onde $H_1 = H_0 - s_1$ e $H_2 = H_0 - s_2$ são cargas hidráulicas nesses poços; H_0 é a espessura saturada do aquífero em repouso; s_1 e s_2 são os rebaixamentos nos

poços de observação; Q é a descarga no poço bombeado; e r_1 e r_2 são as distâncias dos poços de observação ao de bombeamento.

$$H_2^2 - H_1^2 = \frac{Q}{\pi K} \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (5.9)$$

Neuman (1972, 1975) propôs a solução da equação de fluxo para um poço em aquífero livre submetido a bombeamento. Ela é aproximada partir da função $W(u_A, u_B, \eta)$ e dos termos u_A , u_B e η , expostos nas **Equações (5.10 a 5.13)**, onde s é o rebaixamento; Q é a taxa de bombeamento; T é a transmissividade; r é a distância do poço bombeando ao de observação; S é o coeficiente de armazenamento; S_y é rendimento específico; t é o tempo; b é a espessura saturada inicial do aquífero; e K_z e K_r são as condutividades hidráulicas vertical e horizontal. Se o aquífero é isotrópico, $K_z = K_r$ e o parâmetro adimensional $\eta = \frac{r^2}{b^2}$.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \eta) \quad (5.10)$$

$$u_A = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (5.11)$$

$$u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad (5.12)$$

$$\eta = \frac{r^2 K_z}{b^2 K_r} \quad (5.13)$$

A solução de Neuman (1972, 1975) considera os três segmentos presentes na curva de rebaixamento versus tempo de um poço em aquífero livre. O primeiro segmento, representado pela função $W(u_A, \eta)$, exibe comportamento semelhante ao da curva de Theis para aquífero confinado, a qual descreve o fluxo proveniente do armazenamento elástico (S) do aquífero. O segundo trecho descreve o fluxo oriundo da drenagem gravitacional do aquífero livre, reduzindo o rebaixamento e, por conseguinte, a inclinação da curva em relação a de Theis. O terceiro segmento é retratado na função $W(u_B, \eta)$, quando a curva tende novamente para a de Theis, situação que produz aumento no rebaixamento e liberação de água para o poço procedente do rendimento específico (S_y).

Uma vez expostas as soluções analíticas aplicadas a ensaios de bombeamento, o questionamento que se levanta é o seguinte: **qual a solução analítica mais adequada às condições de fluxo para aquíferos na Ilha do Maranhão?** Para isso, nos poços do banco de dados (item 5.1, banco de dados de poços tubulares) foram observados os seguintes aspectos: a) o tipo de aquífero na posição das seções filtrantes a partir dos perfis litológicos e construtivos; b) a drenança ou não das camadas confinantes; c) o regime de fluxo dos poços, se estacionário ou transiente, a partir registros dos ensaios de bombeamento.

Quanto ao primeiro aspecto, dos 134 poços tubulares cadastrados, 56 (41,8%) apresentam filtros exclusivamente em aquífero confinado; 22 (16,4%) exibem filtros unicamente em aquífero livre; 46 (34,3%) possuem seções filtrantes em aquíferos livre e confinado; e 10 (7,5%) não foram contabilizados por não conterem informações concernentes aos perfis litológicos. Em 122 poços (91%), os filtros estão posicionados principalmente em camadas de arenito e areia. Secundariamente, em 15 poços (11,2%), as seções filtrantes estão posicionadas em camadas de argila e argilito; em 13 poços (9,7%), em níveis de calcarenito e calcário; em 13 poços (9,7%), em estratos de siltito e silte; e em 6 poços (4,5%), em níveis de cascalho e conglomerado. Somente 2 poços apresentam grande parte de seus filtros posicionados em camadas de argila e secundariamente em níveis de calcarenito e arenito.

Em relação as camadas confinantes, em 82 poços (61,2%), elas estão representadas, sobretudo, por níveis de argila e argilito; em 13 poços (9,7%), por estratos de siltito e silte; e em 7 poços (5,2%), por leitos de folhelho, intercalações, calcilito e lateritos. Secundariamente, em 26 poços (19,4%), as camadas confinantes mais frequentes são argila e argilito; e em 13 poços (9,7%), ocorrem intercalações, calcário e siltito. Quanto à drenança ou não das camadas confinantes, como 29 poços apresentam seções filtrantes em níveis de argila, argilito, silte, siltito e calcário; e como os valores de condutividade hidráulica desses materiais são inferiores aos do arenito e areia; então, para fins de modelo conceitual, eles são definidos como aquitardos com drenança, ou seja, permitem certa percolação e armazenamento de água.

Quanto ao regime de fluxo, dos 134 poços tubulares do banco de dados, 85 (63,4%) apresentam registros de testes de bombeamento, dos quais 56 estão relacionados aos processos de outorga submetidos à SRH/SEMA; 16 são referentes à CAEMA; e 14 à PMSL. Em 53 poços (62,4%), os ensaios em geral variam de 1,5 a 24 h, com maior concentração entre 16,5 e 24 h. Em 45 poços (52,9%), os testes foram executados com vazão variável, de 2 a 27 m³/h, ao passo que em 40 poços (47,1%) eles ocorreram com vazão constante, entre 2 e 50 m³/h. Essa condição é essencial para definição das perdas de carga totais do poço bombeado e dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, a partir das soluções analíticas.

Nos testes de bombeamento, os rebaixamentos máximos da superfície potenciométrica ou freática estão entre 0,13 e 39,96 m, com maior expressão entre 0,13 e 7,5 m em 53 poços. O regime de fluxo estacionário é observado em 76 poços (56,72%), em que o rebaixamento máximo atingiu valores entre 0,13 e 28,96 m, com tempo de estacionamento entre 15 a 1.380 min. Nesse total, estão incluídos 12 poços em aquífero livre, 31 poços em aquífero confinado e 27 poços com filtros em ambos aquíferos. Quanto ao regime transiente, 9 poços se inserem nessa categoria, em que os rebaixamentos máximos estão entre 5,97 e 36,96 m, atingidos ao final dos testes de bombeamento com duração entre 8 e 24 h.

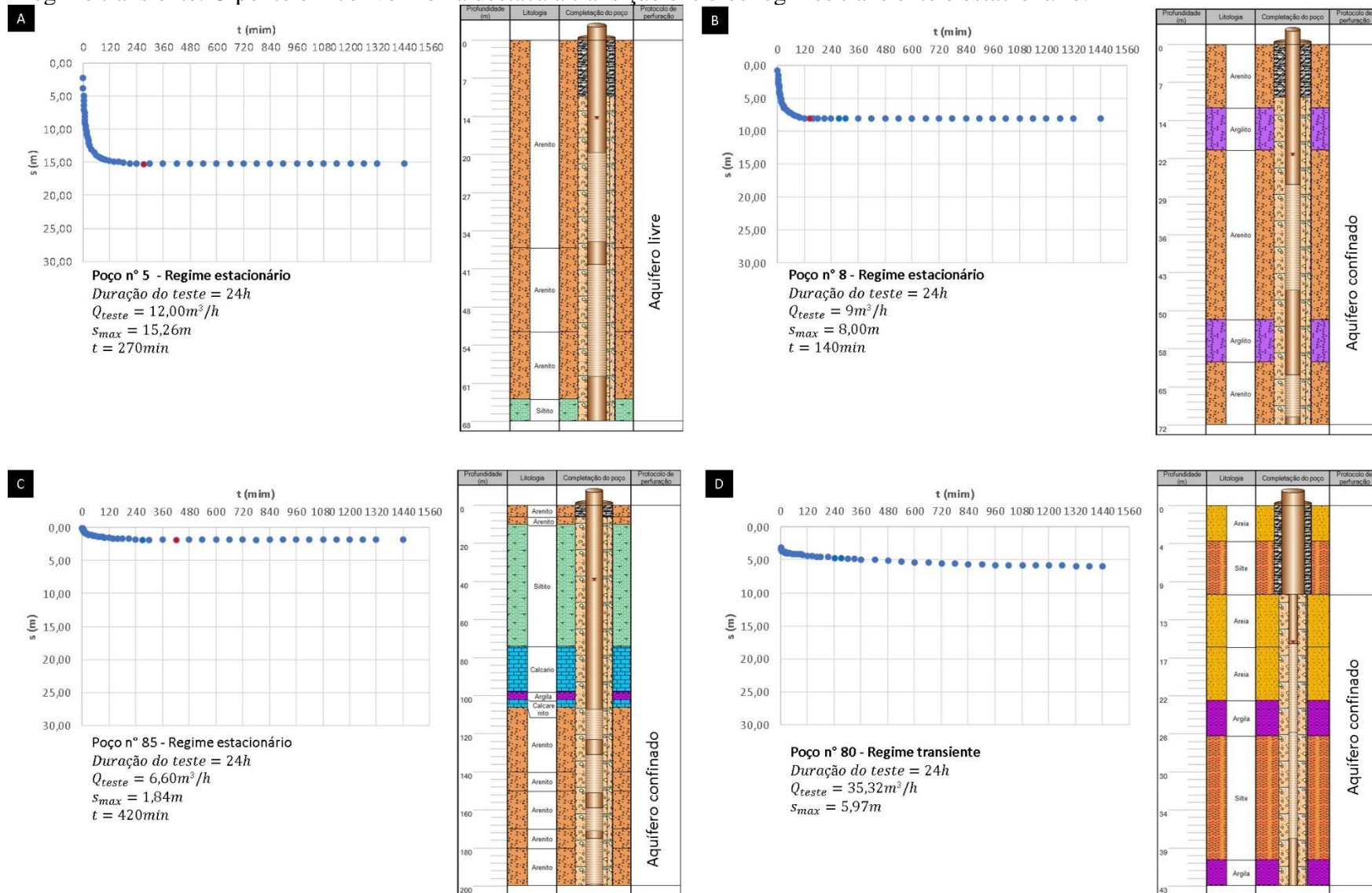
Como exemplo do acima exposto, a **Figura 15.4a** ilustra um poço com seção filtrante em aquífero livre e regime estacionário, submetido a teste de bombeamento de 24 h, com vazão constante de $12 \text{ m}^3/\text{h}$, cujo rebaixamento máximo de 15,26 m foi atingido ao final de 270 min. Em aquífero confinado, a **Figura 5.14b** ilustra o poço n° 8, submetido ao ensaio de bombeamento de 24 h, com vazão constante de $9 \text{ m}^3/\text{h}$, cuja estabilização do rebaixamento de 8 m foi alcançada decorridos 140 min.

Outro exemplo de poço em regime estacionário é observado na **Figura 5.14c**, cujo ensaio de bombeamento de 24 h, com vazão de $6,6 \text{ m}^3/\text{h}$, culminou com rebaixamento máximo de 1,84 m, ao cabo de 420 min. Por fim, a **Figura 5.14d** destaca o poço n° 80, em regime transiente, cujo rebaixamento não se manteve constante ao término do teste de 24 h, com vazão de $35,32 \text{ m}^3/\text{h}$. Este poço possui seção filtrante em horizontes de areia, silte e argila, limitados por níveis de silte e argila, nas porções superior e inferior. A extensão dos filtros a materiais com menor condutividade hidráulica em relação a areia mostra que essas camadas exibem certa drenança, o que reforça a necessidade de inclusão dessa propriedade nos modelos conceituais de fluxo para a área de estudo.

Dos 85 poços tubulares com testes de bombeamento, em 45 deles os parâmetros transmissividade, coeficiente de armazenamento e condutividade hidráulica não são verificados; em 8 poços são adotados valores de literatura; e em 32 poços - integrantes dos processos de outorga submetidos a SRH/SEMA - os parâmetros são estimados mediante aplicação de alguma solução analítica. Sobre esse último conjunto são observados os seguintes aspectos:

- a) em 9 registros, os processos de outorga exibem os parâmetros hidrodinâmicos determinados para os poços em questão, porém não destacam o método analítico aplicado aos testes de bombeamento. Trata-se de 1 poço em aquífero confinado e 8 poços com seções filtrantes nos dois aquíferos, livre e confinado;

Figura 5.14 – Regime de fluxo de poços: a) poço n° 5, em aquífero livre e em regime estacionário; b) poço n° 8, em aquífero confinado e em regime estacionário; c) poço n°85, em aquífero confinado e em regime estacionário; d) poço n° 80, em aquífero confinado e em regime transiente. O ponto em cor vermelha destaca a transição entre os regimes transiente e estacionário.

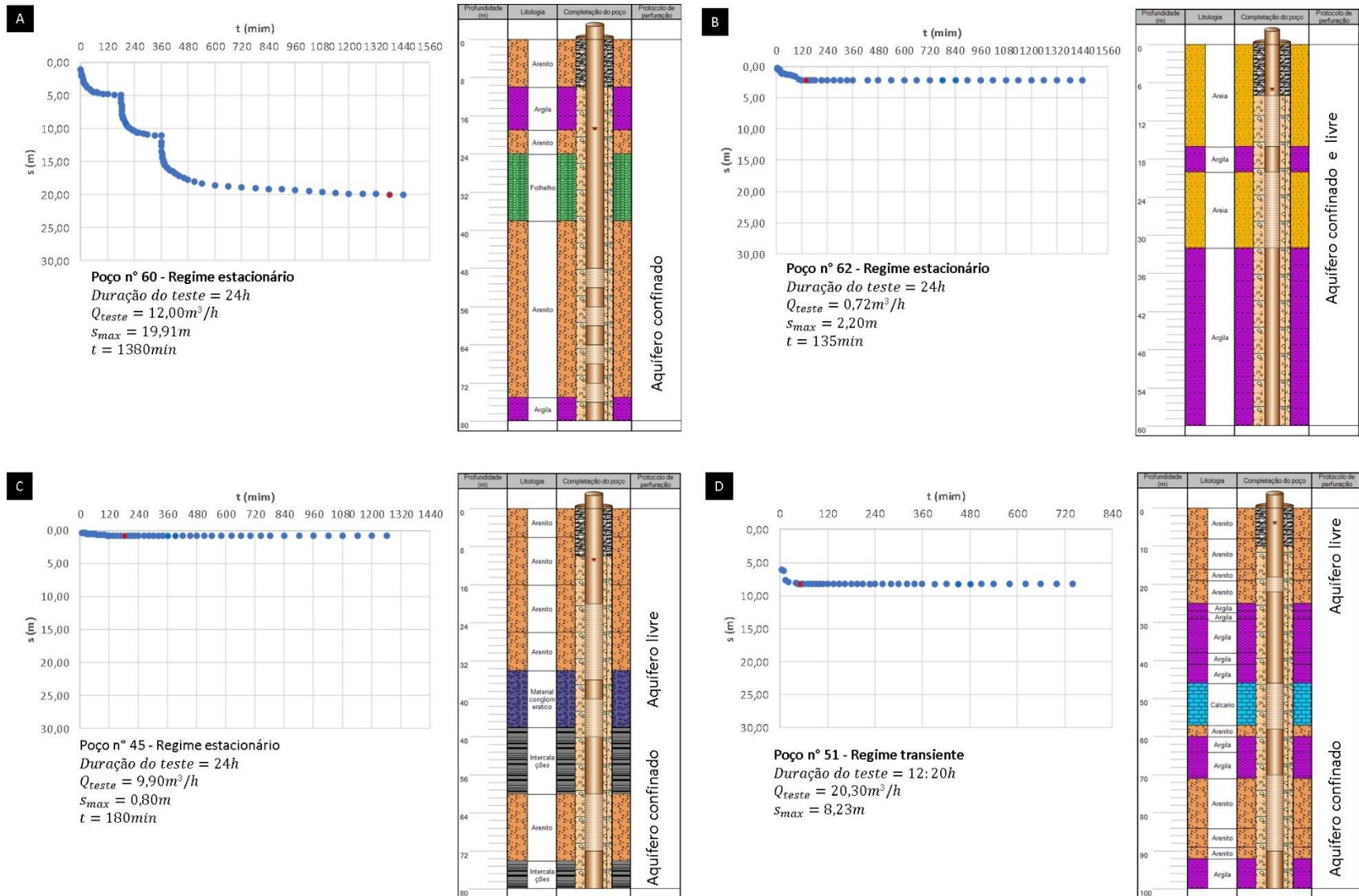


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

- b) em 19 poços, foi aplicado o método de Cooper e Jacob (1946) para aquíferos confinados, não drenantes, em regime transiente e com valor de $u < 0,01$. O poço de n° 80 (**Figura 5.14d**) é o que mais se aproxima das hipóteses do modelo, pois - salvo a drenança esperada dos níveis de silte e argila, transpassadas por seções filtrantes - ele acha-se em aquífero confinado e em regime transiente;
- c) dos 19 registros mencionados anteriormente, em 18 deles as suposições de Cooper e Jacob (1946) são pouco atendidas: todos estão em regime estacionário; 4 estão em aquífero livre, como o poço n° 5 (**Figura 5.14a**); 8 se encontram em aquífero confinado, como os poços n° 8 (**Figura 5.14b**) e n° 85 (**Figura 5.14c**); 4 apresentam filtros em ambos aquíferos; e 3 não exibem informação de perfil litológico;
- d) em 2 registros, foi aplicado método de Theis (1935): no poço n° 60 (**Figura 5.15a**), em aquífero confinado, e no poço n° 62 (**Figura 5.15b**), em aquíferos livre e confinado. Em ambos, o rebaixamento é estabilizado antes da conclusão do ensaio de bombeamento, confirmando o regime de fluxo estacionário, contrário, portanto, às hipóteses da solução aludida;
- e) em 2 registros, a aproximação de Dupuit-Forchheimer, destinada a aquíferos livres, foi aplicada para estimativa da condutividade hidráulica, a saber: nos poços n° 45 (**Figura 5.15c**) e n° 51 (**Figura 5.15d**), com filtros nos dois aquíferos, livre e confinado, e em regimes estacionário e transiente, respectivamente;
- f) aproximação de Dupuit-Forchheimer foi aplicada a outros 16 dos 19 poços que adotaram a solução de Cooper e Jacob (1946), visando o cálculo da condutividade hidráulica. Em todas as situações, os valores de r_1 e r_2 corresponderam, respectivamente, aos raios do poço e de influência do cone de rebaixamento, este último, definido em 200 m, em 16 poços, 150 m, em 1 poço e 500 m, em 2 poços. Os valores de H_1 e H_2 foram determinados subtraindo-se os registros de níveis dinâmico e estático, sequencialmente, do valor correspondente à profundidade dos poços.

Uma vez descritos os métodos analíticos e sua frequência de utilização nos processos de outorga, analisa-se a seguir o ajuste dos dados de testes de bombeamento às soluções analíticas pertinentes ao modelo de fluxo dos poços. Nessa análise, dos 134 poços tubulares cadastrados no banco de dados, foram considerados somente 77 registros, constituídos por aqueles que possuem perfis litológicos (sobre os quais foram definidos os tipos de aquíferos nas seções filtrantes e os materiais geológicos das camadas aquíferas e confinantes) e testes de bombeamento (a partir dos quais foram observados os regimes de fluxo).

Figura 5.15 – Regime de fluxo de poços: a) poço n° 60, em aquífero confinado e em regime estacionário; b) poço n° 62, em aquíferos livre e confinado e em regime estacionário; c) poço n°45, em aquíferos livre e confinado e em regime estacionário; d) poço n° 51, em aquífero livre e confinado e em regime transiente. O ponto em cor vermelha destaca a transição entre os regimes transiente e estacionário.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

No **Quadro 5.1**, os 77 registros são classificados conforme o tipo de aquífero e regime de fluxo. Ressalta-se a solução analítica aplicada nos processos de outorga e sinaliza-se aquela cujos dados de ensaios de bombeamento obtiveram melhor ajuste no AquiferTest Pro, v.10.00 (Waterloo Hydrogeologic). A qualidade do ajuste foi aferida pela média da soma dos quadrados dos erros (SQE) entre os dados observados e calculados.

Quanto a drenança ou não das camadas confinantes, foram empregados dados de testes de bombeamento de 7 poços tubulares no AquiferTest Pro, v.10.00 (Waterloo Hydrogeologic). Em todos os casos, as curvas de rebaixamento versus tempo foram comparadas a modelos teóricos, denominados de gráficos diagnósticos (**Figura 5.16**), os quais expressam os tipos de aquíferos, os efeitos dos poços e as condições de contorno atuantes em diferentes momentos durante a execução de um teste de bombeamento.

Nos poços analisados, os registros de rebaixamento versus tempo exibiram melhor aproximação ao gráfico diagnóstico de aquífero com drenança (B), a qual foi calculada a partir das estimativas de transmissividade (T) e resistência hidráulica (c), obtidas mediante ajuste dos dados de ensaios de bombeamento à solução analítica de Hantush e Jacob (1955). Os valores de drenança variaram entre 4,20 m (poço n° 60) e 17,24 m (poço n° 2), e os de resistência hidráulica entre $2,74 \times 10^4$ s (0,32 dia) a $7,70 \times 10^6$ s (89,12 dias). Esses resultados sinalizam que o modelo de fluxo atuante nos poços tubulares na Ilha do Maranhão envolve camadas confinantes de argila, argilito, silte, siltito e calcário com drenança.

Em relação ao tipo de aquífero, o **Quadro 5.1** exhibe 34 poços em aquífero confinado, 31 com filtros em ambos aquíferos e 12 em aquífero livre. Quanto ao regime de fluxo, os totais exibem 70 poços em regime estacionário ou permanente e 7 em regime transiente. **Desse cômputo, constata-se que o modelo de fluxo mais recorrente na área de estudo é de poços em aquífero confinado, com drenança e em regime permanente.** Nessa categoria, em 31 poços tubulares, embora as soluções de Cooper e Jacob (1946) e Theis (1935) tenham sido aplicadas, no AquiferTest, o melhor ajuste foi relacionado ao método de Hantush e Jacob (1955).

As médias dos valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento obtidos foram de $4,39 \times 10^{-4}$ m²/s e $5,44 \times 10^{-2}$, respectivamente, para um SQE médio de 1,546 m². Este erro foi inferior a 25,078 m², da solução de Theis (1935), cujas estimativas médias para transmissividade e coeficiente de armazenamento foram de $1,28 \times 10^{-3}$ m²/s e $3,5 \times 10^{-2}$. O Método de Cooper e Jacob (1946), apesar de não testado, estima-se apresentar resultados próximos aos de Theis por ser uma simplificação deste para valores de $u < 0,01$.

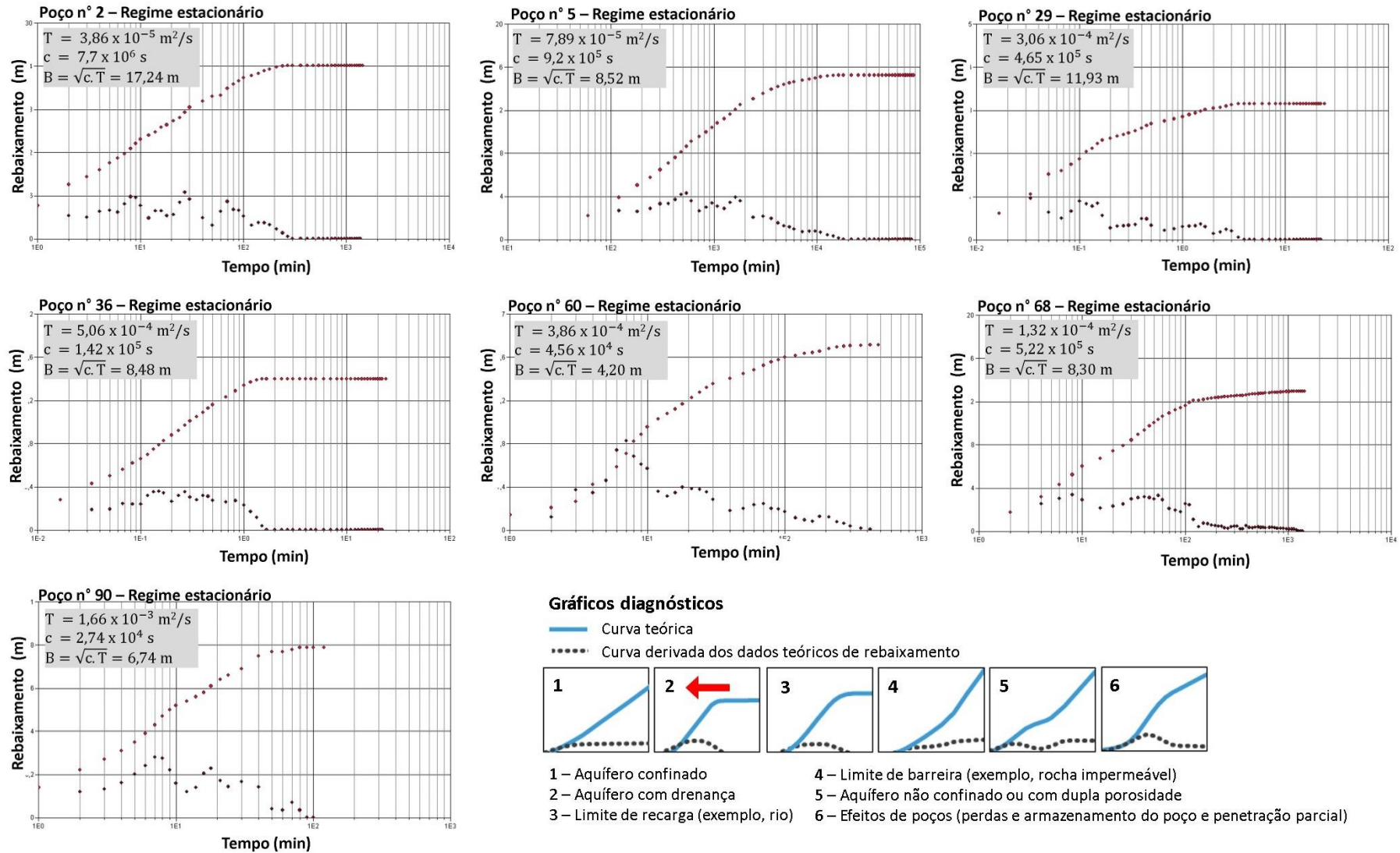
Quadro 5.1 – Quantidade de poços cadastrados na Ilha do Maranhão, quanto ao tipo de aquífero, regime de fluxo e soluções analíticas aplicada e sinalizada.

		REGIME DE FLUXO					TOTAL	
		ESTACIONÁRIO			TRANSIENTE			
TIPO DE AQUIFERO	LIVRE	POÇOS	SOLUÇÃO ANALÍTICA		POÇOS	SOLUÇÃO ANALÍTICA		12 (4)
			APLICADA	SINALIZADA		APLICADA	SINALIZADA	
	12 (4)	Cooper e Jacob (1946) (4)	Hantush e Jacob (1955) Neuman (1972, 1975)	0	-	-		
	CONFINADO	POÇOS	SOLUÇÃO ANALÍTICA		POÇOS	SOLUÇÃO ANALÍTICA		34 (10)
			APLICADA	SINALIZADA		APLICADA	SINALIZADA	
	31 (9)	Cooper e Jacob (1946) (7) Theis (1935) (1) Não informado (1)	Hantush e Jacob (1955)	3 (1)	Cooper e Jacob (1946) (1)	Hantush e Jacob (1955)		
AMBOS	POÇOS	SOLUÇÃO ANALÍTICA		POÇOS	SOLUÇÃO ANALÍTICA		31 (15)	
		APLICADA	SINALIZADA		APLICADA	SINALIZADA		
27 (14)	Cooper e Jacob (1946) (4) Dupuit-Forchheimer (2) Theis (1935) (1) Não informado (7)	Hantush e Jacob (1955) Neuman (1972, 19975)	4 (1)	Não informado (1)	Hantush e Jacob (1955)			
TOTAL		70 (27)			7 (2)		77 (29)	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

* Os números entre parênteses significam a quantidade de poços cujos dados hidrodinâmicos foram estimados.

Figura 5.16 – Avaliação da drenança das camadas confinantes do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, a partir de gráficos de rebaixamento versus tempo, de testes de bombeamento, comparados a gráficos diagnósticos no ambiente do AquiferTest Pro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

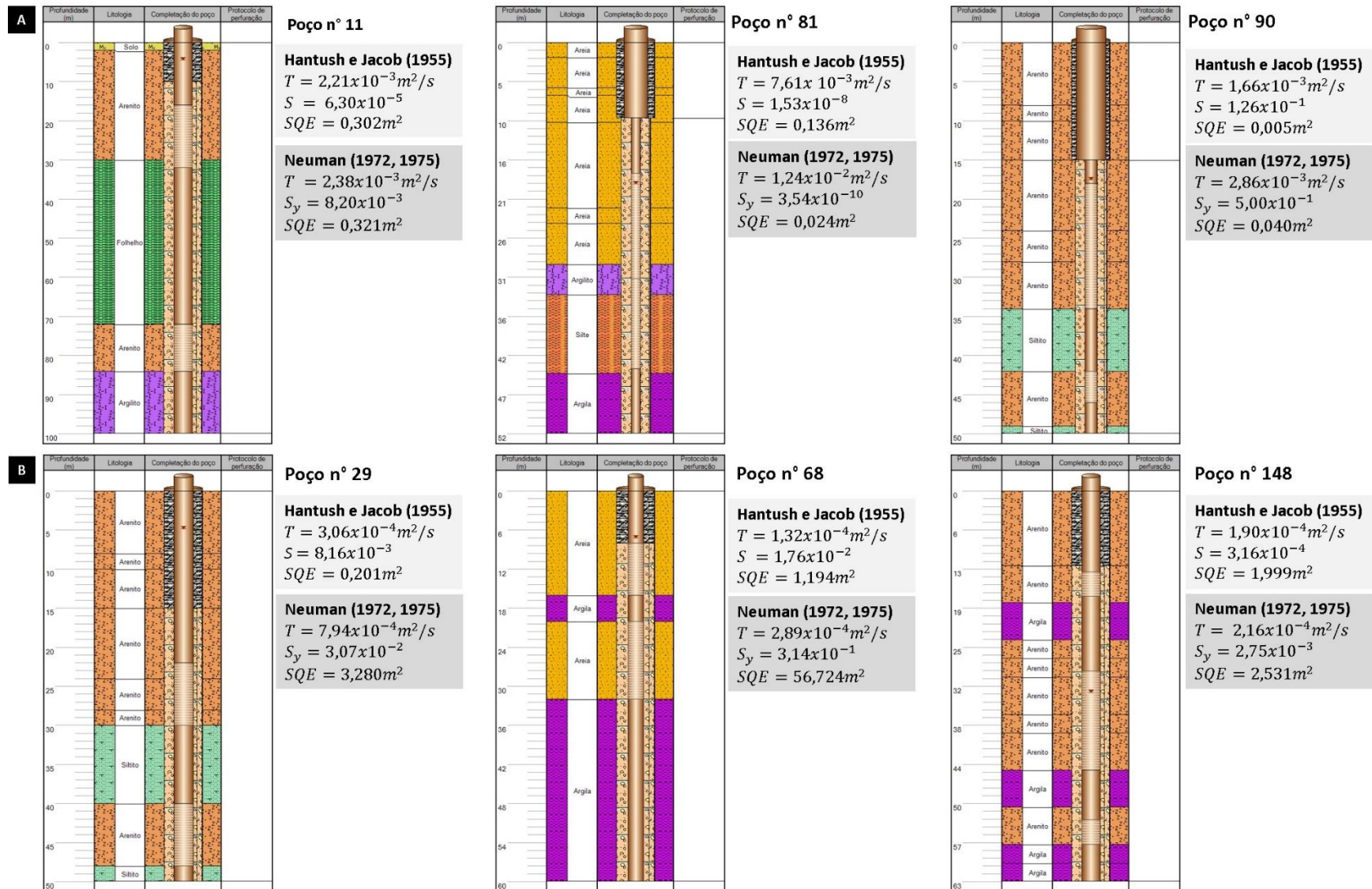
De acordo com Freeze e Cherry (2018), a solução de Theis (1935) produz rebaixamentos superestimados uma vez que não supõe a recarga do aquífero bombeado pela drenança das camadas confinantes. Nesses casos, as soluções de Hantusch e Jacob (1955) e Hantush (1960) são mais adequadas, pois modelam a descarga de um poço em aquífero confinado, com drenança, como procedente, no primeiro momento, do armazenamento elástico do aquífero. Em seguida, o fluxo se aproxima da condição estável, quando iniciam as contribuições de água removida do armazenamento e drenança dos aquíferos.

Em relação aos 27 poços com seções filtrantes nos dois aquíferos (**Quadro 5.1**), os métodos aplicados foram os de Cooper e Jacob (1946), Dupuit-Forchheimer e Theis (1935). No AquiferTest, os dados de testes de bombeamento exibiram melhor ajuste aos métodos de Hantush e Jacob (1955) e de Neuman (1972, 1975), cujas médias dos SQE atingiram 1,29 m² e 7,89 m², sequencialmente. Para as respectivas soluções analíticas, as estimativas médias de transmissividade e de coeficiente de armazenamento/armazenamento específico foram de $1,29 \times 10^{-3}$ m²/s e $3,16 \times 10^{-2}$ e de $2,67 \times 10^{-3}$ m²/s e $1,04 \times 10^{-1}$. Quanto ao método de Theis (1935), a média do SQE de 8,529 m² atestou a sua baixa aplicabilidade para poços com tais configurações, comportamento também esperado para o método de Cooper e Jacob (1946).

Em alguns registros, os valores de SQE relacionados ao método de Neuman (1972, 1975) foram inferiores a unidade ou ligeiramente superiores aos de Hantush e Jacob (1955) (**Figura 5.17a**). Esses resultados foram registrados em poços cuja extensão dos filtros no aquífero livre excedeu a do aquífero confinado, e em situações em que geometria do aquífero e aquíferos não se mostraram alinhadas ao modelo conceitual de Hantush e Jacob (1955): aquífero bombeado confinado por aquíferos e formações aquíferas nas porções superior e inferior. Os poços coerentes a essa configuração resultaram em valores de SQE de Neuman (1972, 1975) $> 1 \text{ m}^2$ e significativamente superiores aos de Hantush e Jacob (1955) (**Figura 5.17b**).

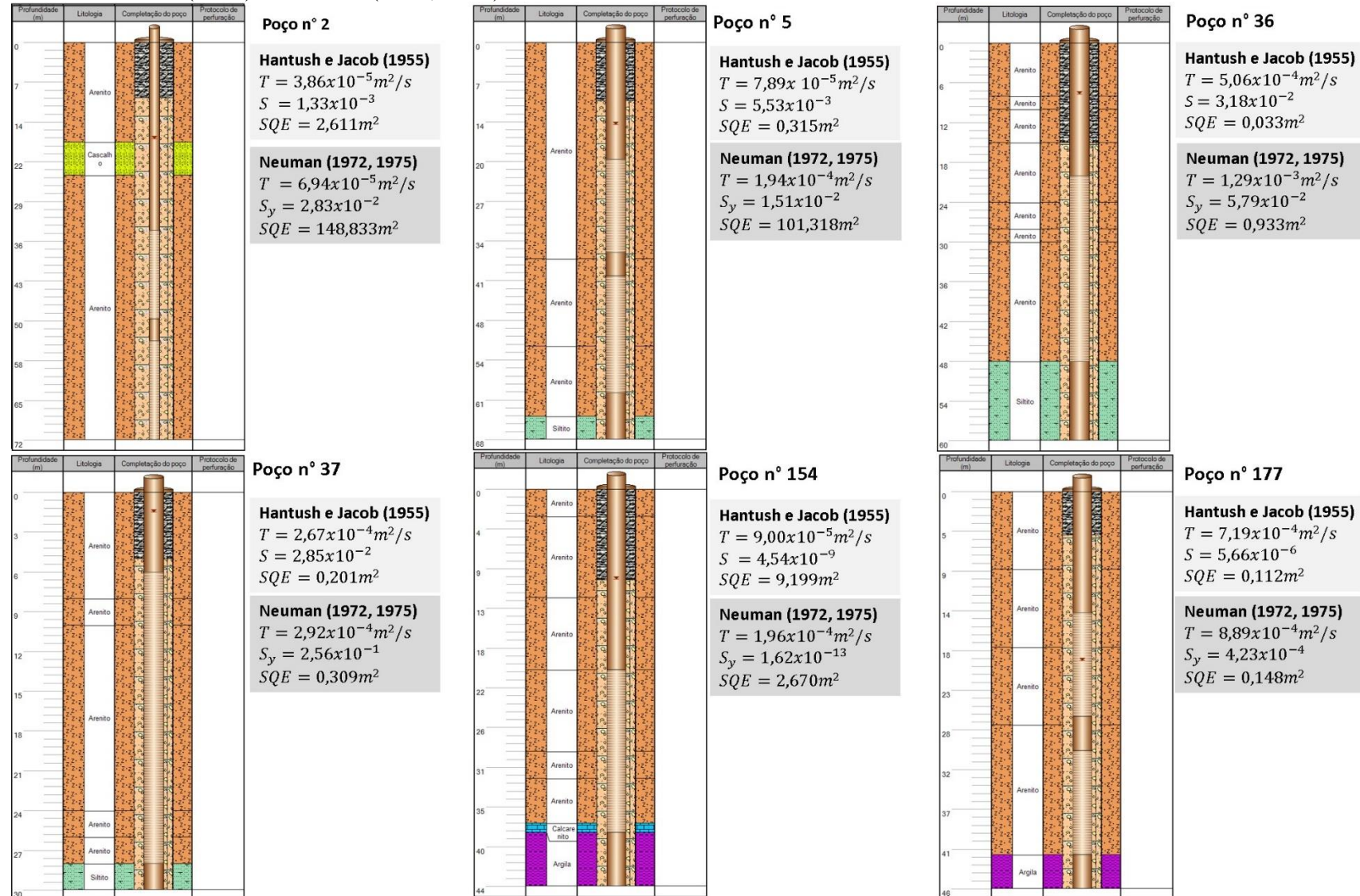
No que diz respeito aos 12 poços em aquífero livre (**Quadro 5.1**), a solução aplicada foi a de Cooper e Jacob (1946), que é uma simplificação do método de Theis (1935) para valores de $u < 0,01$. Ela é destinada a aquífero confinado, em regime transiente, sem drenança e que também conduz a superestimação dos rebaixamentos. Apesar do método de Neuman (1972, 1975) ser o mais apropriado a tipologia do aquífero livre, os dados de testes de bombeamento no AquiferTest exibiram melhor ajuste ao de Hantush e Jacob (1955) (**Figura 5.18**).

Figura 5.17 – Ajuste dos dados de testes de bombeamento, de poços com filtros em ambos aquíferos e em regime estacionário, aos métodos de Hantush e Jacob (1955) e Neuman (1972, 1975): a) poços com SQE do método de Neuman $< 1\text{m}^2$; b) poços SQE de Neuman $\gg 1\text{m}^2$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.18 – Ajuste dos dados de testes de bombeamento, de poços em aquífero livre e em regime estacionário, aos métodos de Hantush e Jacob (1955) e Neuman (1972, 1975).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Em relação aos 12 poços em aquífero livre, no AquiferTest, as estimativas médias de transmissividade e de coeficiente de armazenamento foram de $1,22 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e $1,67 \times 10^{-2}$, para um SQE médio de $1,175 \text{ m}^2$. A adequação dos dados à solução de Neuman (1972, 1975) resultou em valores médios de transmissividade e armazenamento específico de $5,49 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e de $7,92 \times 10^{-2}$, segundo um SQE médio de $21,569 \text{ m}^2$, expressivamente superior ao anterior.

O resultado favorável à solução de Hantush e Jacob (1955) pode estar associado ao fato de que, embora o aquífero livre tenha composição arenítica, alguns fatores podem influenciar na diferenciação da condutividade hidráulica entre diferentes horizontes, tais como: granulometria, grau de seleção dos grãos, forma e arredondamento das partículas, orientação espacial, grau de compactação e cimentação das partículas. Dessa modo, níveis com arenitos argilosos a siltosos, muito finos a finos estariam exercendo certo confinamento àqueles de granulometria média a grosseira e, por conseguinte, concebendo um modelo geométrico de aquífero mais coerente às hipóteses da solução em discussão.

Em relação aos 4 poços em aquífero confinado e aos 3 poços com filtros nos dois aquíferos (**Quadro 5.1**), ambos em regime transiente, a solução aplicada nos primeiros foi a de Cooper e Jacob (1946). Os registros de ensaios de bombeamento dos 7 poços apresentaram melhor ajuste a solução de Hantush e Jacob (1955), cujos valores médios de transmissividade e de coeficiente de armazenamento foram de $3,86 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e de $3,39 \times 10^{-3}$, para um SQE médio de $15,365 \text{ m}^2$. Este valor foi significativamente inferior ao obtido pelo método de Theis (1935), que foi de $49,021 \text{ m}^2$, demonstrando assim, a baixa adequação dessa solução analítica na estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos dos poços em questão.

Diante dos resultados anteriores, evidencia-se que os dados de testes de bombeamento dos 77 poços tubulares (**Quadro 5.1**) apresentaram melhor ajuste a solução de Hantush e Jacob (1955), cuja média geral de transmissividade e de coeficiente de armazenamento foram sequencialmente de $8,68 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e de $3,52 \times 10^{-2}$, para um SQE médio geral de $2,676 \text{ m}^2$. Este valor foi consideravelmente inferior ao obtido pelo método de Theis (1935) - $20,830 \text{ m}^2$ - cujas estimativas médias de transmissividade e de coeficiente de armazenamento foram de $2,82 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e de $1,84 \times 10^{-2}$. Em vista disso, a solução de Hantush e Jacob (1955) foi aplicada a outros registros de poços que apresentaram testes de bombeamento, com vistas a espacialização dos dados na área de estudo.

Além dos 77 poços destacados no **Quadro 5.1**, a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos por meio da solução de Hantush e Jacob (1955) - através do AquiferTest Pro, v.10.00 (Waterloo Hydrogeologic), - foi estendida a outros 71 poços, totalizando 146 registros, os quais foram espacializados através do Surfer v.15 (GOLDEN SOFTWARE INC.),

empregando o método de Krigagem. Os dados raster produzidos foram classificados segundo os limiares estabelecidos no Manual de Cartografia Hidrogeológica (DINIZ *et al.* 2014), os quais avaliam os aquíferos segundo a sua produtividade.

A transmissividade média na área de estudo, considerando os 146 poços tubulares, foi de $8,33 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, ordem de grandeza que abrange 53,37% da Ilha do Maranhão (**Figura 5.19**). Valores em torno de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ correspondem a 26,71% da área territorial e ocorrem sobretudo nas regiões hidrográficas do Paciência, Santo Antonio e Riacho dos Cachorros. Essas duas ordens de grandeza estão compreendidas entre os valores de referência obtidos por Acqua-Plan (1972) e Rebouças e Silva (1972) para os aquíferos Barreiras e Itapecuru, nas regiões do Paciência e Bacanga (área do Sacavém) e do Itaqui (**Tabela 5.1**).

Tabela 5.1 – Estatísticas médias de transmissividade (T), coeficiente de armazenamento (S), espessura saturada (b) e condutividade hidráulica (K), para o Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, na Ilha do Maranhão, referentes a 146 poços tubulares.

ESTATÍSTICA	HANTUSH E JACOB (1955)			
	T (m^2/s)	S	b (m)	K (m/s)
MÉDIA	$8,33 \times 10^{-4}$	$2,49 \times 10^{-2}$	57,00	$1,93 \times 10^{-5}$
DESVIO PADRÃO	$1,39 \times 10^{-3}$	$8,84 \times 10^{-2}$	27,30	$3,57 \times 10^{-5}$
MÁXIMO	$7,61 \times 10^{-3}$	$9,90 \times 10^{-1}$	165,00	$2,29 \times 10^{-4}$
MÍNIMO	$1,63 \times 10^{-11}$	$4,52 \times 10^{-10}$	14,30	$3,28 \times 10^{-13}$
*AQUÍFERO BARREIRAS	$1,00 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-2}$		$1,00 \times 10^{-4}$
*AQUÍFERO ITAPECURU	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$		$1,00 \times 10^{-5}$

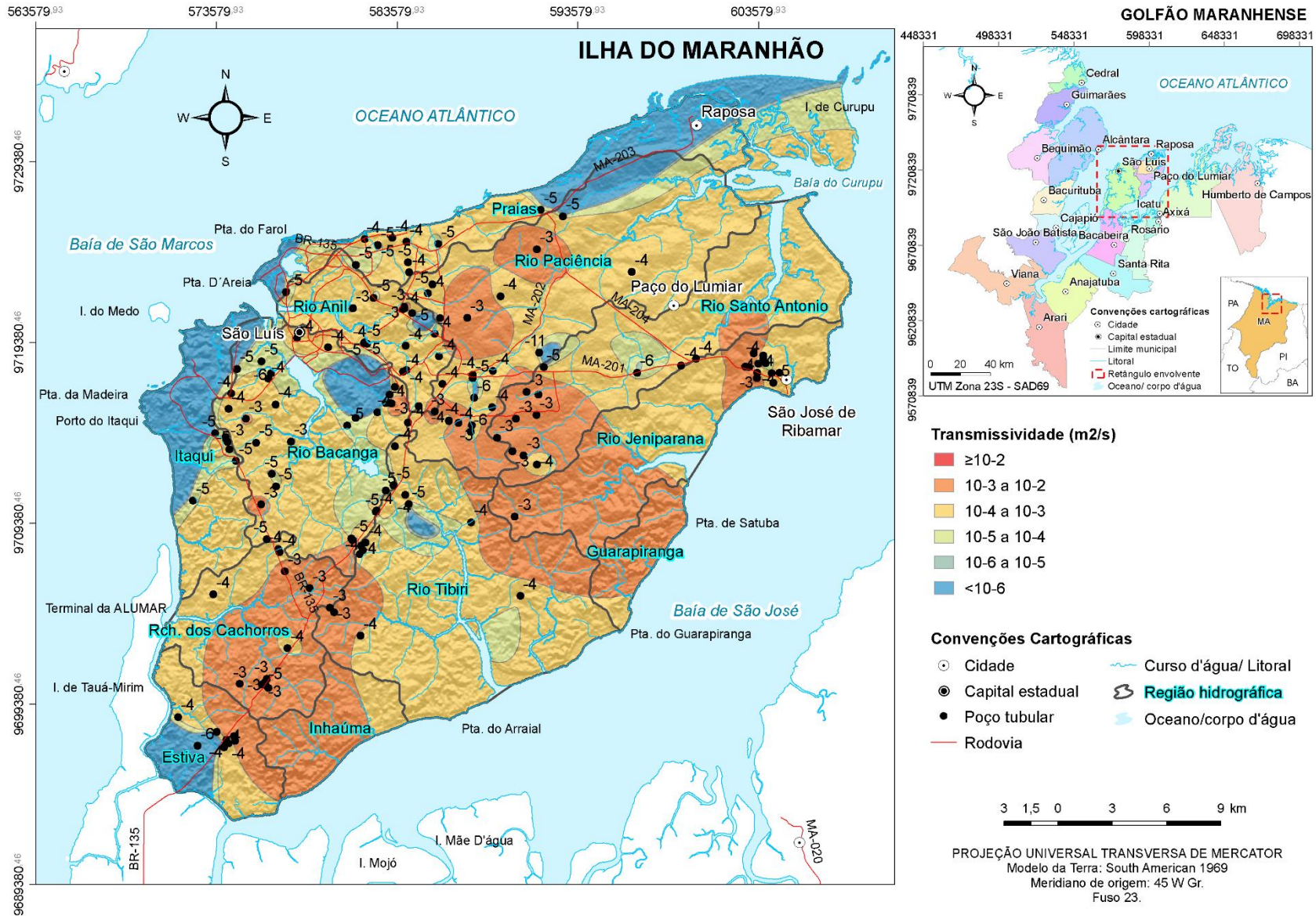
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

*Valores de referência de transmissividade, coeficientes de armazenamento e condutividade hidráulica são baseados em Acqua-Plan, 1972; Silva e Rebouças, 1972.

Os registros de transmissividade inferiores a $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ são verificados no extremo norte, na região das Praias, e a oeste e sul da área de estudo, nas regiões do Itaqui, Estiva e em algumas porções isoladas. Estimativas entre 10^{-4} e $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ abrangem aproximadamente 80% da área investigada e inserem o Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na categoria de produtividade moderada a alta, situando-o na média nacional de bons aquíferos, com fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades e irrigação em áreas restritas.

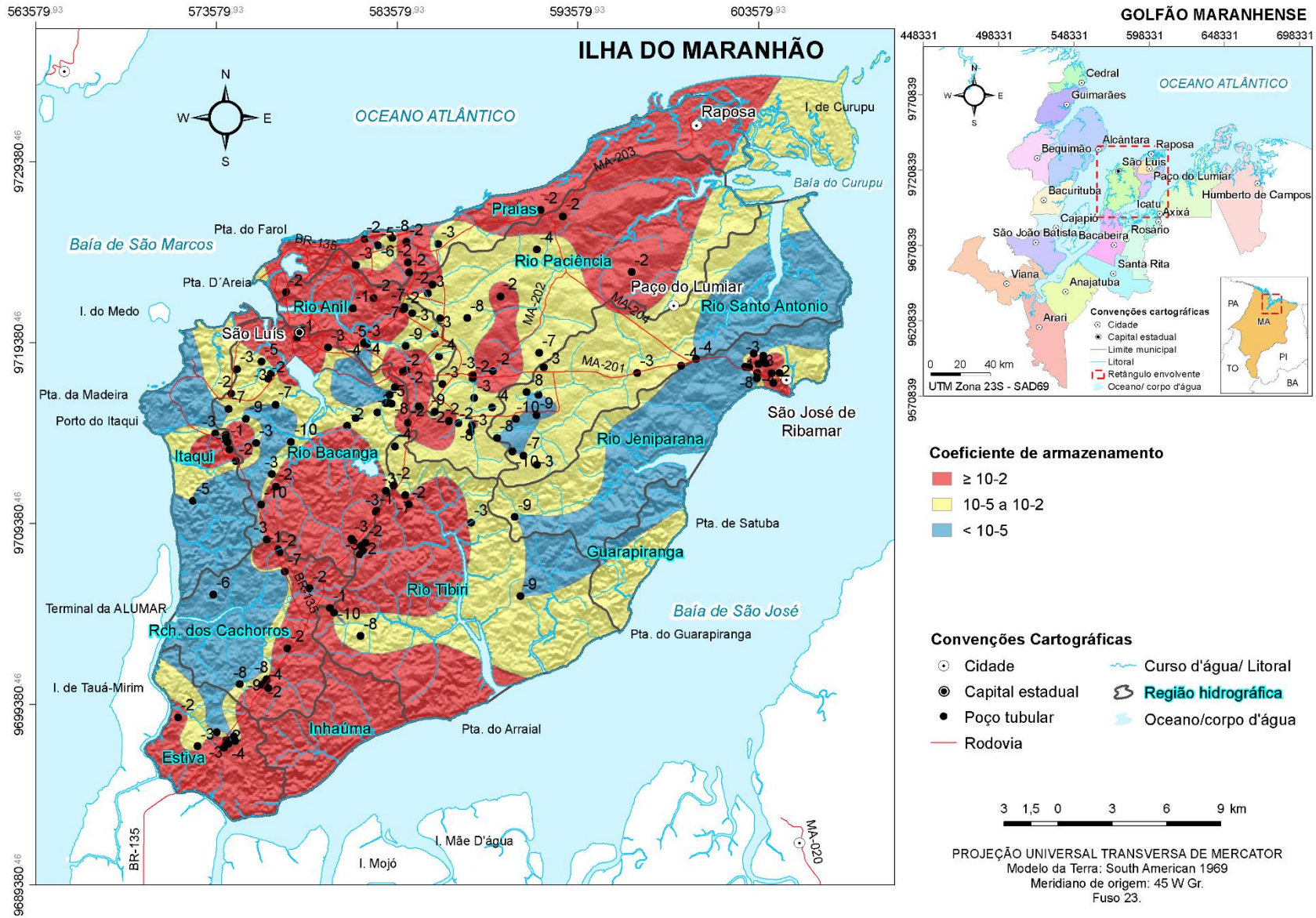
Os registros de coeficiente de armazenamento ilustrados na **Figura 5.20** são resultantes da aplicação do método de Hantush e Jacob (1955) aos dados de testes de bombeamento dos 146 poços tubulares. A solução analítica referida é enquadrada a poços em aquíferos confinados, drenantes cuja vazão provem inicialmente do armazenamento elástico do aquífero bombeado e posteriormente da drenança do aquífero não bombeado através do aquitardo.

Figura 5.19 – Mapa de transmissividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão. Os números negativos representam a ordem de grandeza do parâmetro hidrodinâmico em destaque.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.20 – Mapa de coeficiente de armazenamento/rendimento específico do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão. Os números negativos representam a ordem de grandeza do parâmetro hidrodinâmico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A referida solução foi empregada também a poços em aquífero livre cuja descarga nos primeiros instantes do bombeamento procede do armazenamento elástico e, em seguida, da produção ou rendimento específico; e ainda foi aplicada a poços com seções filtrantes nos dois aquíferos.

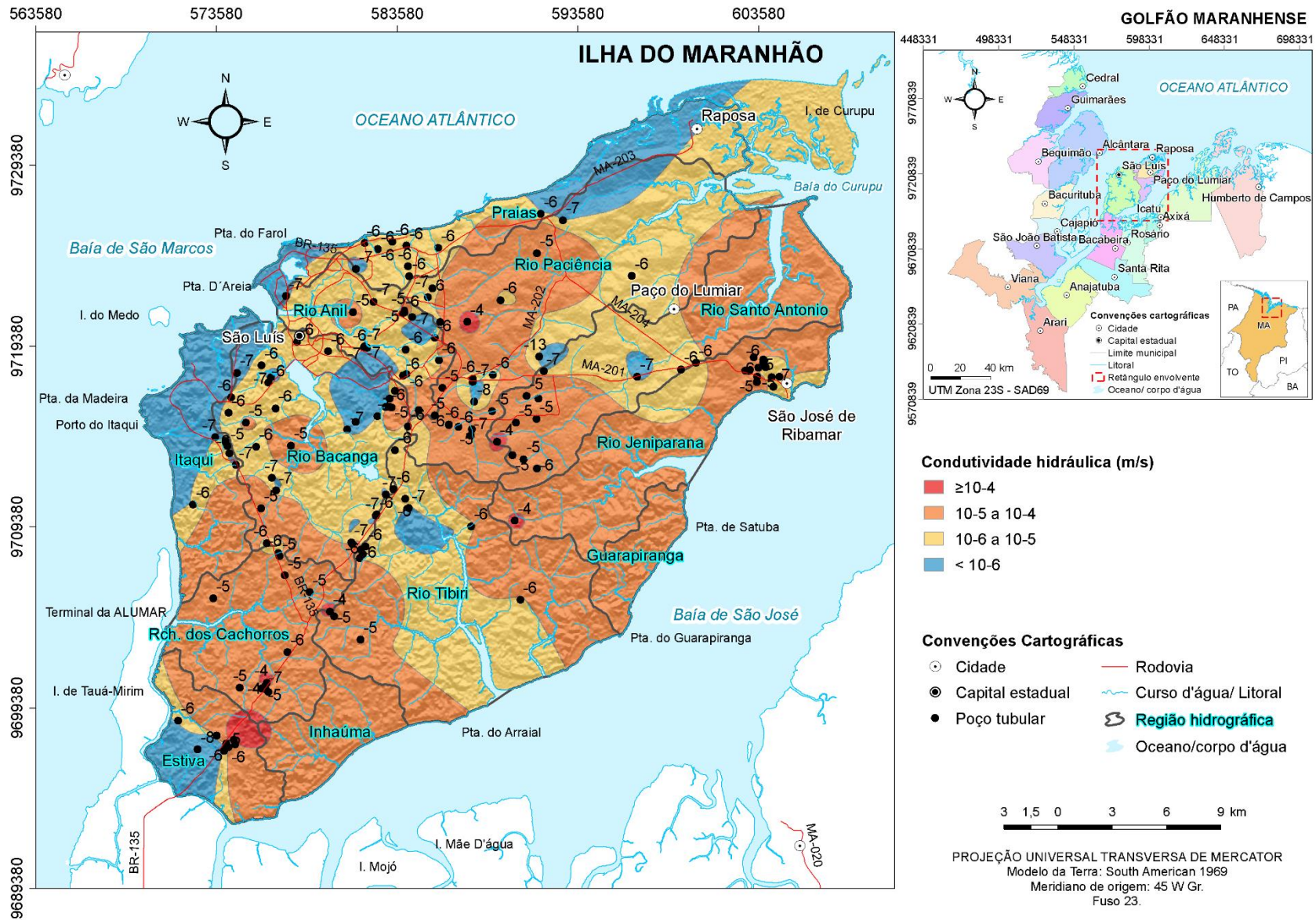
Em decorrência do exposto, na **Figura 5.20** são verificados valores de coeficiente de armazenamento com ordem de grandeza esperada para aquífero livre, entre 2 a 30% (WALTON, 1970), os quais são traduzidos na classe $\geq 10^{-2}$. Eles abrangem 40,69% da Ilha do Maranhão, sobretudo a região das Praias, norte do Paciência, sul do Bacanga, leste e sul do Tibiri, oeste do Riacho dos Cachorros, Inhaúma e Estiva. Ordens de grandeza características para aquíferos confinados, entre 10^{-5} e 10^{-2} (FITTS, 2015) acontecem em 37,95% da Ilha do Maranhão, especialmente nas regiões hidrográficas do Paciência e Santo Antônio.

Já os valores inferiores a 10^{-5} correspondem a 21,36%; limitam-se às porções leste e oeste da área objeto de estudo; e, por se encontrarem aquém do limiar entre 10^{-5} e 10^{-2} , podem estar relacionados à qualidade dos dados dos testes de bombeamento dos poços tubulares, ou situações de extremo confinamento do aquífero. Valores de coeficiente de armazenamento $< 10^{-5}$ foram verificados em poços tubulares de localidades como Vila Janaína, Gapara, Santa Efigênia, J. Lima, Coquilho, Jardim Tropical II, Itapiracó, entre outras, cujos ensaios de bombeamento datam em geral da década de 1990. Apesar disso, as estimativas de coeficiente de armazenamento mapeadas na Ilha do Maranhão se mostraram coerentes aos valores de referência para os aquíferos Barreiras e Itapecuru os quais situam-se, respectivamente, entre 10^{-2} e 10^{-4} (**Tabela 5.1**).

Em relação a condutividade hidráulica, os valores expostos na **Figura 5.21** resultam da razão entre a transmissividade e a espessura do aquífero - aproximada pela diferença entre a profundidade do poço e o nível estático - em cada um dos 146 poços. Os registros pontuais foram regionalizados e classificados segundo os níveis de produtividade listados no Manual de Cartografia Hidrogeológica (DINIZ *et al.* 2014). Na área de estudo, a média geral do parâmetro em discussão foi de $1,93 \times 10^{-5}$ m/s, estimativa coerente às ordens de grandeza de 10^{-5} e 10^{-4} m/s para aquíferos Itapecuru e Barreiras (**Tabela 5.1**).

Valores compreendidos na ordem de grandeza supracitada e maiores que 10^{-4} m/s totalizam 52,96% da área estudo; ocorrem nas regiões hidrográficas do Paciência, Santo Antonio, Riacho do Cachorros, Inhaúma, Jeniparana, Guarapiranga e leste e oeste do Tibiri; e sinalizam as áreas de produtividade alta a muita alta. Registros moderados, entre 10^{-6} e 10^{-5} m/s, cobrem 36,25% da Ilha do Maranhão e ocupam a sua porção central, interligando as regiões hidrográficas do Tibiri, Bacanga e Anil.

Figura 5.21 – Mapa de condutividade hidráulica do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão. Os números negativos representam a ordem de grandeza do parâmetro hidrodinâmico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As estimativas inferiores a 10^{-6} m/s ocupam 11,79 % do território investigado e situam-se principalmente na faixa litorânea, abrangendo parcelas significativas das regiões hidrográficas do Itaqui e Estiva, a noroeste e sul da área investigada. Elas sinalizam as áreas de produtividade baixa a muito baixa e pouco produtivas, cujos fornecimentos de água podem ser destinados para abastecimentos locais ou consumo privados, com continuidade possivelmente não garantida e para abastecimentos restritos com uso de bombas manuais.

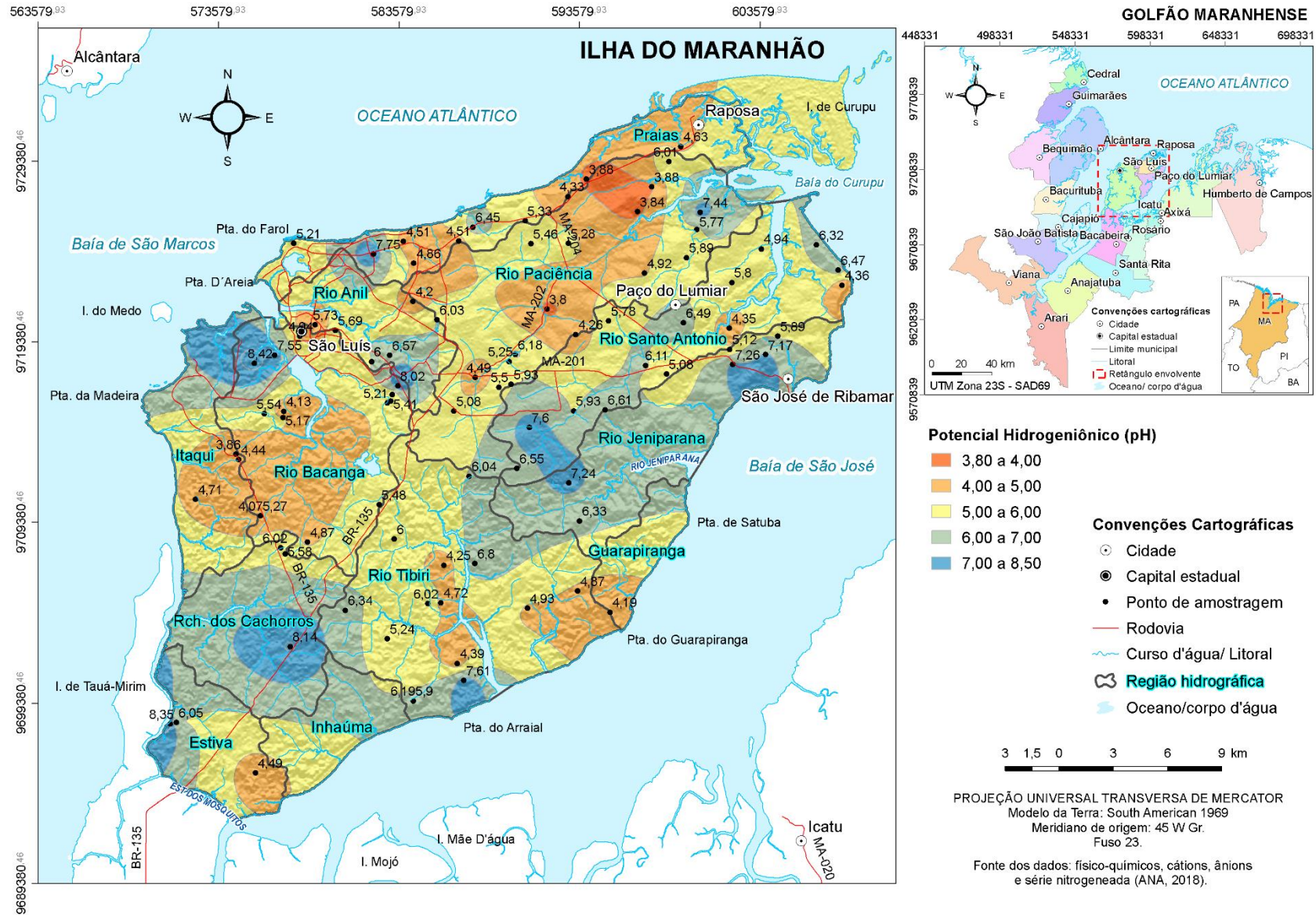
5.4 – Parâmetros hidroquímicos

Os aspectos teóricos concernentes à hidroquímica das águas subterrâneas foram fundamentados em Fetter (2001), Santos (2008), Hirata *et al* (2009), Spiro e Stigliani (2009), Albarède (2011), Merkel e Planer-Friedrich (2012), Mestrinho (2013), Freeze e Cherry (2017), entre outros. São apresentados mapas temáticos cujos dados primários dizem respeito às 100 amostras de água de poços tubulares (Apêndice B), coletadas em novembro de 2017, durante o período de estiagem, por ocasião dos Estudos Hidrogeológicos na Região Metropolitana de São Luís – MA (ANA, 2018). Desse total, foram desconsiderados 8 registros que exibiram teores de cloreto entre 119,34 e 679,89 mg/ L, uma vez que as águas subterrâneas geralmente apresentam concentrações inferiores a 100 mg/ L (SANTOS, 2008), evitando-se, portanto, deformações nos resultados hidroquímicos.

A hidroquímica das águas subterrâneas está relacionada a fatores intrínsecos e extrínsecos aos aquíferos. Os primeiros favorecem a ação dos processos geoquímicos que alteram a composição original da água meteórica, ao longo das linhas de fluxo, entre as áreas de recarga e descarga. Eles dependem do tipo, composição e estrutura das rochas; da espessura do manto de alteração; da agressividade da água e seu tempo de residência no ambiente subterrâneo, entre outros. Os extrínsecos associam-se aos aspectos climáticos e fisiográficos; à composição da água na área de recarga; às ações antropogênicas etc.

O potencial hidrogeniônico (pH) rege à concentração de íons de Hidrogênio na água oriundos do equilíbrio químico das reações. Ele regula a precipitação de muitos metais e a capacidade de ataque químico da água, cuja condição de pura, no meio ambiente, somente é encontrada no vapor d'água. Na área de estudo, o pH médio das 98 amostras de água de poços tubulares é de 5,59, com os valores mínimo e máximo de 8,42 e 3,80, situados respectivamente nas regiões hidrográficas do Paciência e do Bacanga (**Figura 5.22**).

Figura 5.22 – Mapa de potencial hidrogeniônico(pH) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O pH originário da interação do vapor d'água com o gás carbônico atmosférico é de 5,7 (FREEZE; CHERRY, 2017; SPIRO; STIGLIANI, 2009; FETER, 2001), próximo ao valor médio das amostras na área de estudo (**Tabela 5.2**). Isso sinaliza ser a precipitação pluviométrica a principal contribuição à recarga da água subterrânea na Ilha do Maranhão. Em contato com a camada superficial do solo e devido à grande concentração de gás carbônico proveniente da decomposição da matéria orgânica, os valores de pH ficam abaixo de 5. Ao infiltrar-se no solo, a água encontra minerais solúveis ao ácido carbônico, o qual é consumido e tem seu suprimento restabelecido pela água de recarga e pela ação dos processos biogeoquímicos.

As reações de dissolução dos carbonatos, de remoção de cátions dos aluminossilicatos, óxidos e outros minerais, e de trocas catiônicas elevam os valores de pH, STD, condutividade elétrica e turbidez da água. Tais processos se dão à medida que as águas fluem nas zonas de infiltração, atravessam as intermediárias e ingressam nas de fluxo lento, de maior tempo de residência. As fácies hidroquímicas detectadas nas águas subterrâneas, portanto, podem ser explicadas pelos fluxos entre as áreas de maior e menor potencial hidráulico, pela constituição dos materiais geológicos e pelas práticas de uso de solo reinantes na área pesquisada.

Freeze e Cherry (2017) analisam as águas subterrâneas em terrenos carbonáticos, em rochas cristalinas e em sistemas sedimentares complexos: depósitos glaciais e rochas sedimentares estratificadas. Entre os itens analisados pelos autores, está o que foi denominado de ordem de encontro, ou seja, a sequência de contato dos minerais ou grupos de minerais com a água, conforme seu movimento ao longo do sistema de fluxo. No que concerne aos estratos sedimentares, os principais processos geoquímicos são: troca catiônica, geração de CO₂ na zona do solo, redução bioquímica do sulfato e oxidação do sulfeto.

Segundos autores supracitados, em depósitos sedimentares estratificados, a composição química das águas subterrâneas é marcada pelos íons bicarbonato (HCO₃⁻) e sódio (Na⁺). Na área de estudo, a concentração média dessas espécies é de 28,54 mg/ L e 21,77 mg/ L (**Tabela 5.2**), respectivamente, seguidas pelo cloreto (Cl⁻, com 21,18 mg/L), as quais constituem os íons mais frequentes nas amostras de água analisadas. Em ordem decrescente, em relação aos íons dominantes, destacam-se ainda o sulfato (SO₄⁻², com 7,92 mg/ L), cálcio (Ca⁺², com 6,42 mg/L), magnésio (Mg⁺², com 4,11 mg/ L) e o potássio (K⁺, com 2,89 mg/L).

Tabela 5.2 - Estatísticas das amostras de águas subterrâneas, valores de referência para diferentes tipos de águas e máximos permitidos para potabilidade e para consumo humano.

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO	VALOR MÁXIMO	VALOR MÍNIMO	VALORES DE REFERÊNCIA (TIPOS DE ÁGUAS)	VALOR MÁXIMO PERMITIDO DE POTABILIDADE PORTARIA N° 2914/MS	VALOR MÁXIMO PERMITIDO PARA CONSUMO HUMANO RESOLUÇÃO N° 396/CONAMA
pH	-	5,59	1,13	8,42	3,80	5,5 a 8,5 (água subterrânea)	-	-
CE	µS/cm	190,06	158,31	765,00	37,80	5 a 50 (água doce) 50 a 50.000 (água do mar)	-	-
TURBIDEZ	uT	0,19	0,46	2,50	0,02	-	5	-
STD	mg/ L	129,07	95,66	450,18	34,33	<500 (água doce) 500 a 30.000 (água salobra) >30.000 (água salina)	1.000	1.000
Na ⁺	mg/ L	21,77	19,44	132,62	3,94	0,1 a 100 (água subterrânea) 1 a 150 (água doce) em média 11.100 (água do mar) 100.000 (salmoura)	200	200
K ⁺	mg/ L	2,89	4,44	36,27	0,18	0,1 a 4mg/L (água meteórica) <10 (água subterrânea) em média 400mg/L (águas do mar)	-	-
Ca ⁺²	mg/ L	6,42	11,14	60,49	0,21	0,1 a 10 (água meteórica) em torno de 480 (água do mar) 10 a 100 (água subterrânea)	-	-
Mg ⁺²	mg/ L	4,11	4,99	27,19	0,21	0,4 a 1,6 (água meteórica) 1 a 40 (água subterrânea)	-	-
Cl ⁻	mg/ L	21,18	16,97	89,54	4,90	10 e 250 (água doce) <100 (água subterrânea) 18.000 a 21.000 (água do mar) 220.000 (salmoura)	250	250
CO ₃ ⁻²	mg/ L	0,73	3,09	16,60	0,00	muito abaixo da concentração de bicarbonato (águas naturais)	-	-
HCO ₃ ⁻	mg/ L	28,54	63,63	255,23	0,00	50 a 350, até 800 (água doce) da ordem de 100 (água do mar)	-	-
SO ₄ ⁻²	mg/ L	7,92	8,26	50,44	0,49	<100 (água subterrânea)	250	250
NO ₃ ⁻	mg/ L	19,16	23,45	111,47	0,05	0,1 a 10 (água subterrânea) até 1.000 (água poluída) em torno de 1 (água do mar)	10	10

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados de Santos, 2008; Resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005; Resolução CONAMA N° 396, de 3 de abril de 2008; Portaria MS N° 2.914, de 12 de dezembro de 2011; Mestrinho, 2013.

Em virtude da concentração iônica das 42 amostras validadas pelo balanço iônico e empregadas na composição do diagrama de Piper, as águas subterrâneas na Ilha do Maranhão, considerando a amostragem procedida em novembro de 2017, exibem preferencialmente fácies **sódica cloretada (56%), sódica bicarbonatada (13%) e sódica mista (13%)**. Elas ocorrem em toda a área de estudo (**Figura 5.23**), com exceção da porção central e em algumas regiões localizadas, nas quais as águas são mistas, mistas bicarbonatadas e mistas cloretadas, representando 19% das amostras analisadas.

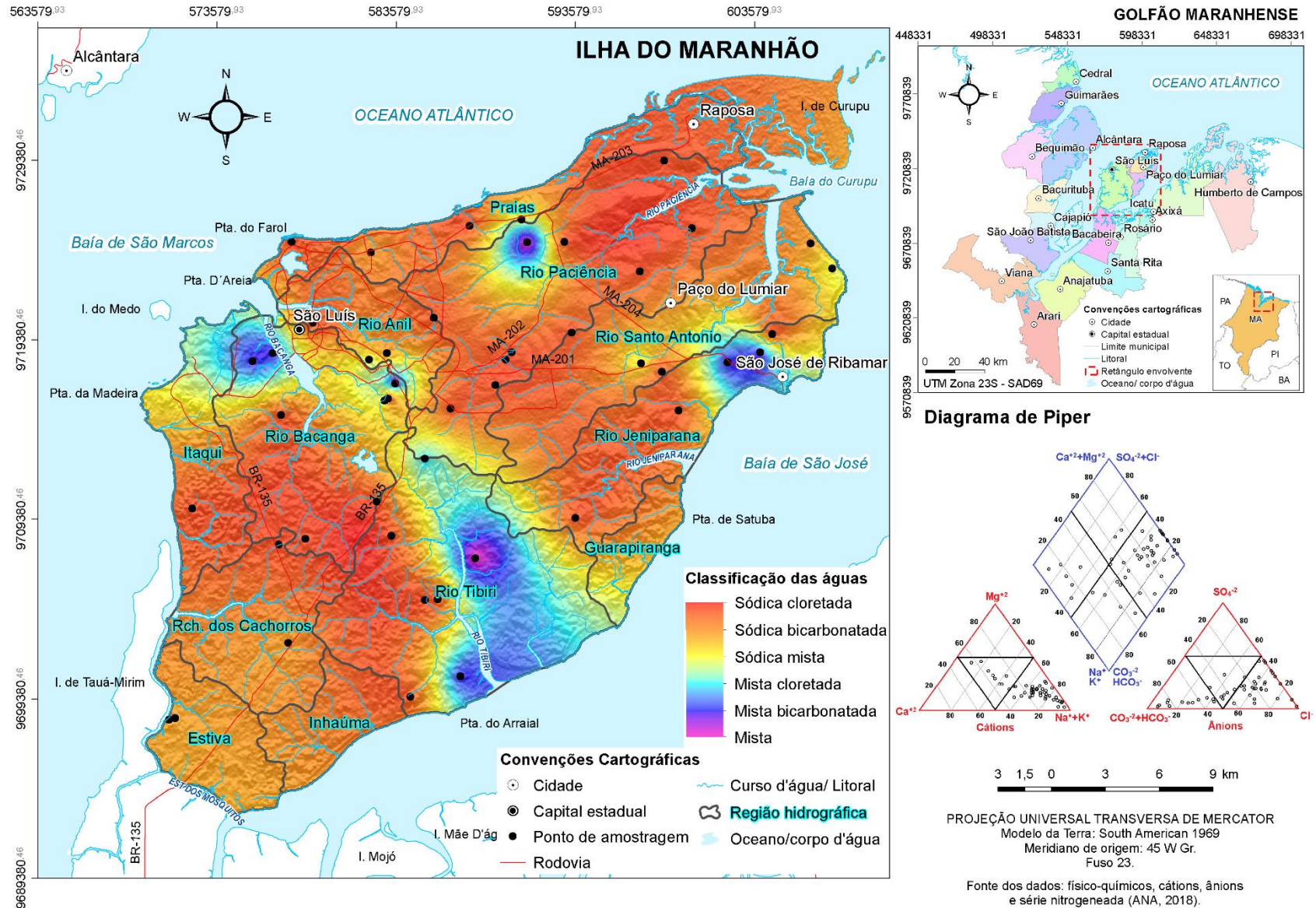
A tendência de águas cloretadas, bicarbonatadas e sódicas foi detectada em amostras de águas provenientes dos aquíferos Barreiras e Itapecuru por Rodrigues *et al* (1994), com a primeiras predominando no aquífero miocênico. Em poços da região Itaqui-Bacanga, Soares (2004) analisou a baixa vacação hidrogeológica da região em virtude da elevada salinidade, sugerindo recarga dos aquíferos miocênico e cretáceo pela água do mar.

Nos processos de outorga de água subterrânea, submetidos à SRH/SEMA, entre 2009 e 2012, o cloreto e o bicarbonato constam entre as espécies químicas mais frequentes nas amostras de água dos poços tubulares na área de estudo. As concentrações do íon cloreto (Cl^-) nos poços amostrados encontram-se abaixo do limite de referência para a água subterrânea, 100mg/ L, (**Figura 5.24**), com valores mais acentuados nas regiões hidrográficas do Bacanga (89,54mg/ L), Riacho dos Cachorros (81,39 mg/L) e Itaqui (76,97 mg/ L). Na porção centro-norte, as concentrações atingem valores máximos nas regiões do Santo Antonio (57,00 mg/ L) e Paciência (50,38 mg/ L).

Excetuando as contribuições oriundas de evaporitos, mais frequentes em zonas profundas de bacias sedimentares da Província Costeira e Margem Continental, e sabendo que a profundidade máxima dos poços na Ilha do Maranhão não excede 250 m, as concentrações acima, considerando a geografia da região e as condições de saneamento, podem estar relacionadas às intrusões salinas, efluentes domésticos e aerossóis marinhos.

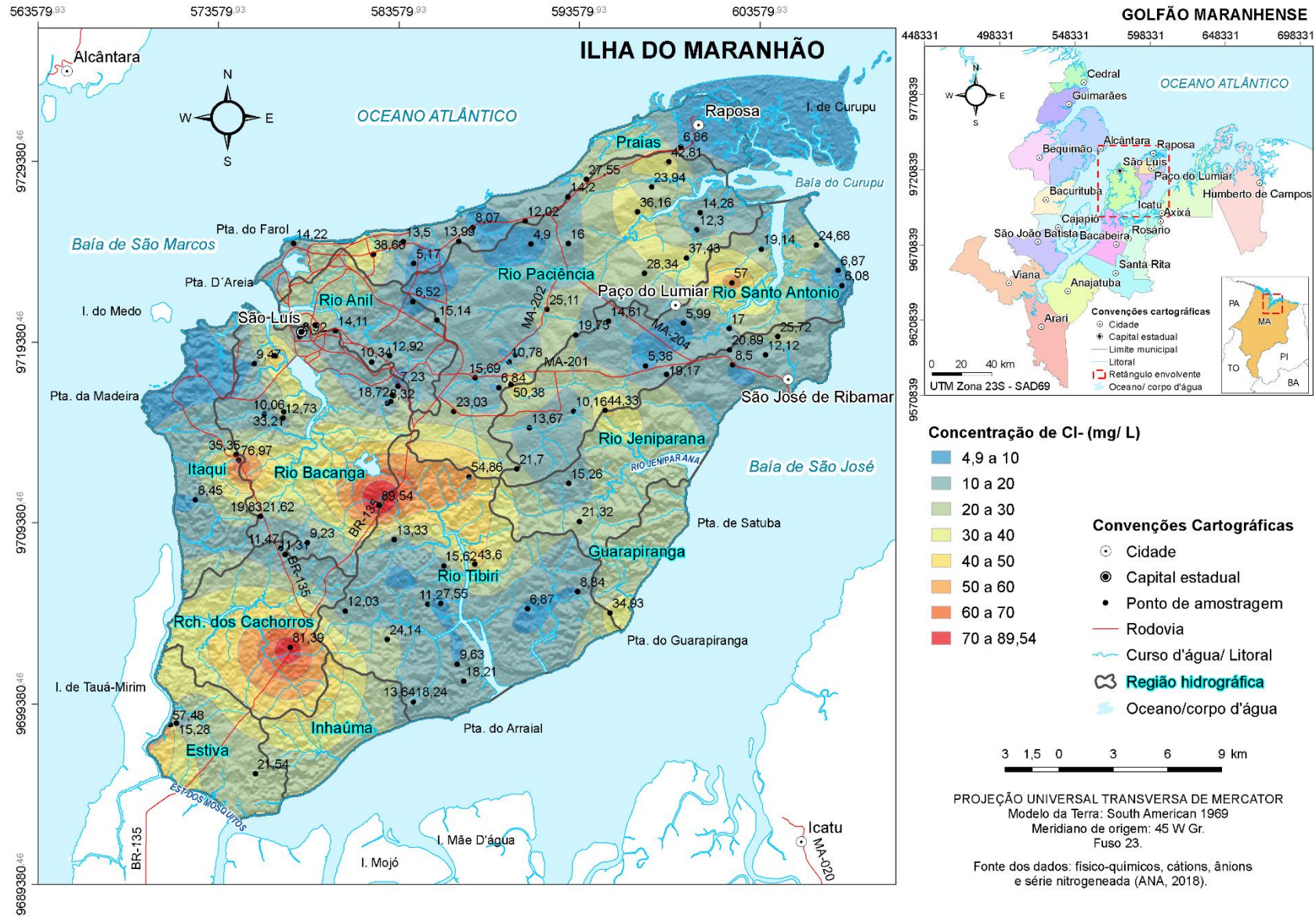
As intrusões salinas elucidam a presença íon cloreto notadamente na faixa litorânea onde a profundidade da interface água doce-água salgada é menor (**Figura 5.12**). Na porção centro-norte da Ilha, as concentrações podem ser explicadas pelas contribuições de efluentes domésticos, uma vez que, excetuando a região centro-oeste da área de estudo (**Figura 4.12**), somente 0 a 15% dos domicílios particulares permanentes possuem esgotamento sanitário via rede geral.

Figura 5.23 – Mapa de classificação das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão segundo do diagrama de Piper.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.24– Mapa de concentração do íon cloreto (Cl⁻ mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Outra explicação ao teor de cloreto nos poços amostrados pode ser as aportes dos aerossóis marinhos. Eles são produzidos durante a arrebentação das ondas que liberam gotículas de água. A consequente evaporação promove a cristalização de sais que mineralizam a chuva, principalmente, em ambientes costeiros. Lima (2007) realizou um estudo acerca da composição química da precipitação atmosférica da região do Minho (noroeste de Portugal); observou que, em termos médios, a precipitação regional enquadrou-se na fácies cloretada sódica; e que os constituintes predominantemente marinhos na precipitação foram sódio, cloreto e magnésio.

Na Ilha Grande (RJ), Souza *et al.* (2006) mostraram que 80% da concentração total de íons inorgânicos dissolvidos na água da chuva foram atribuídos ao cloreto e ao sódio. Relações binárias entre os íons Cl^- , Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} e SO_4^{-2} apresentaram valores de “r” entre 0,94 e 1, indicando a forte influência dos aerossóis de sal marinho na composição química da água da chuva. Partindo da premissa de que nas regiões costeiras todo Na^+ na chuva tem origem exclusiva na água do mar, os autores estimaram que 93%, 80% e 68% do Cl^- , Mg^{+2} e Ca^{+2} na água da chuva resultam dos aerossóis de sal marinho.

Na Ilha do Maranhão, os cloretos nos aerossóis marinhos foram quantificados por Sica (2006) para caracterização, classificação e mapeamento da corrosividade atmosférica de São Luís. A partir de 15 estações, a taxa de deposição dos principais contaminantes atmosféricos foi monitorada mensalmente de 2004 a 2006. Os resultados indicaram um teor médio de cloretos maior no período de estiagem (julho a dezembro: $105,05 \pm 51 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$) do que no período chuvoso (janeiro a junho: $31,26 \pm 19,29 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$); maior deposição nas estações próximas a orla (Praia do Meio: $376,36 \pm 284,54 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$) e menor na porção central da Ilha (UEMA: $11,46 \pm 41,15 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$). Esses resultados explicam a salinidade atmosférica da área estudo que é responsável pela mineralização das precipitações pluviométricas (pelos aerossóis marinhos) as quais constituem a principal recarga dos sistemas aquíferos.

Almeida (2013) também relacionou a influência dos aerossóis marinhos, de deposição seca e úmida, à fácies hidroquímica cloretada sódica, de 6 das 14 amostras de águas subterrâneas analisadas na área da bacia hidrográfica do Rio da Prata. Essa bacia está situada no entorno do Parque Estadual do Bacanga e contribui para o reservatório do Batatã, responsável pelo abastecimento de parte do município de São Luís. A amostragem foi realizada entre o período seco de 2011 e o de 2012 e observados 26 parâmetros de qualidade da água. As demais fácies hidroquímicas identificadas foram: bicarbonatada sódica, cloretada cálcica e mista sódica.

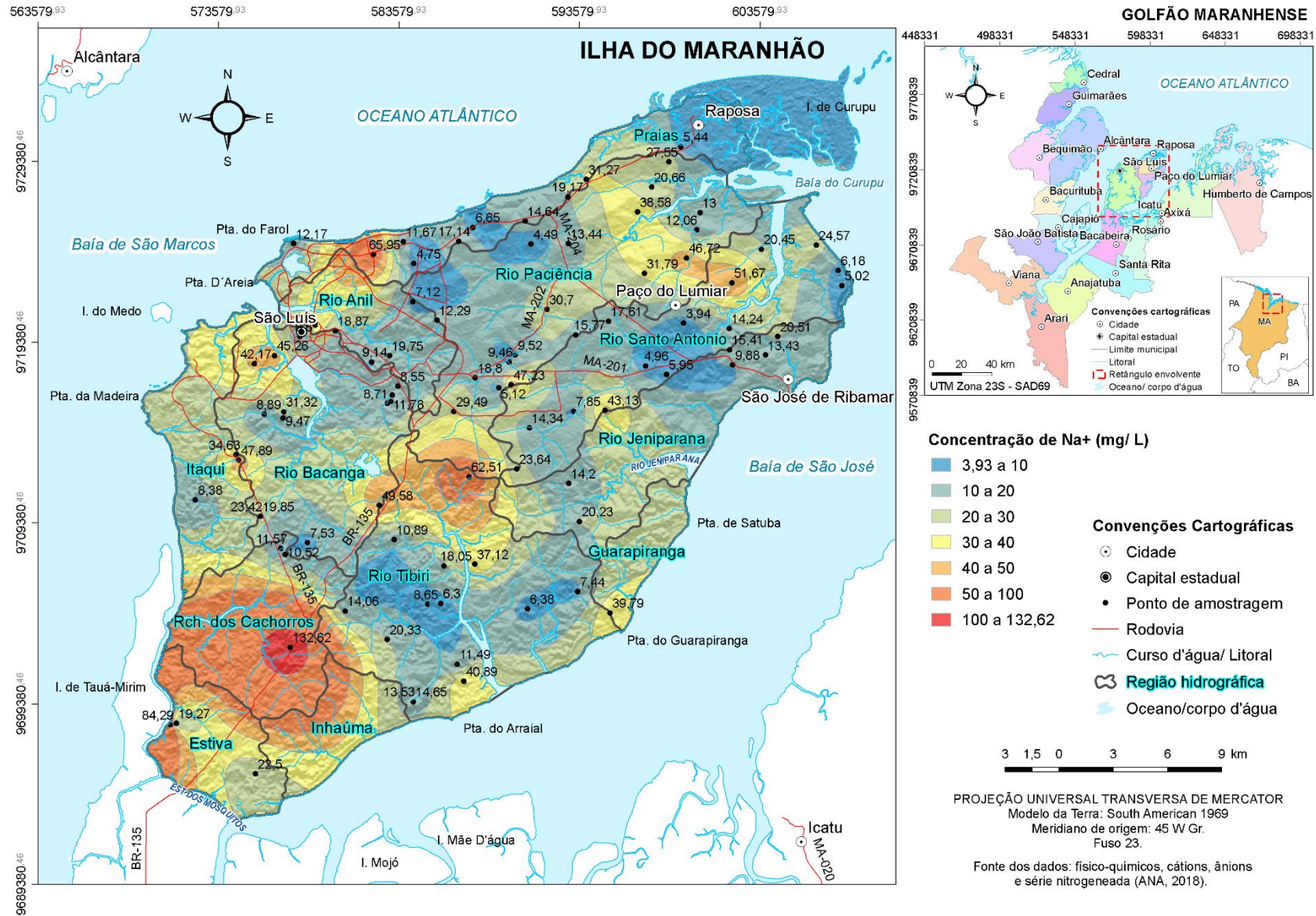
Em relação ao sódio (Na^+), Santos (2008) destaca que sua abundância nas águas subterrâneas está associada à ampla distribuição e baixa estabilidade dos minerais-fonte (feldspatos plagioclásios, anfibólios e piroxênios); a sua solubilidade elevada; e a difícil precipitação dos seus compostos em solução. Esse cátion é o principal responsável pelo aumento da salinidade na água subterrânea cuja concentração se eleva das zonas de recarga para os exutórios. Seu teor nas águas subterrâneas em geral varia de 0 a 100 mg/L (**Tabela 5.2**).

Na Ilha do Maranhão, a concentração de sódio (**Figura 5.25**) encontra-se acima de 100mg/ L na região hidrográfica do Riacho dos Cachorros (132,82 mg/L) e com valores notáveis nas regiões das Praias (65,95 mg/L) e do Tibiri (62,51 mg/L). Elas podem ser explicadas pelos aerossóis marinhos que mineralizam as águas pluviais; pelas contaminações por intrusão salina, nas imediações da faixa litorânea, onde a profundidade da interface água doce-água salgada é menor; pelas trocas catiônicas, embora os sistemas aquíferos, principalmente o Barreiras, sejam constituídos por clastos, em sua maioria, quartzosos, mais estáveis; e pelas contaminações por efluentes domésticos e industriais, como na região do Riacho dos Cachorros, nas imediações do Distrito Industrial de São Luís.

Quanto ao íon bicarbonato (HCO_3^-), sua frequência na água subterrânea é indicativa de fluxo local, mais dinâmico, com menor tempo de contato água-rocha, entre as áreas de recarga e descarga (SANTOS, 2008; FREEZE; CHERRY, 2017). Ele é resultante da dissolução do gás carbônico do solo na água meteórica e posterior ionização; da dissolução da calcita e dos minerais silicatados; e da redução dos sulfatos em ambiente de baixa pressão parcial de oxigênio. Seu domínio está relacionado aos valores de pH entre 6,4 e 10,3, correspondentes às condições de equilíbrio químico do ácido carbônico (H_2CO_3) a bicarbonato (HCO_3^-) e deste à carbonato (CO_3^{2-}). A relação entre essas espécies químicas produz um efeito tampão sobre o pH das águas naturais, mantendo a sua variação dentro de uma faixa relativamente estreita, regulando as reações químicas de processos associados à vida (SPENCER *et al.*, 2007).

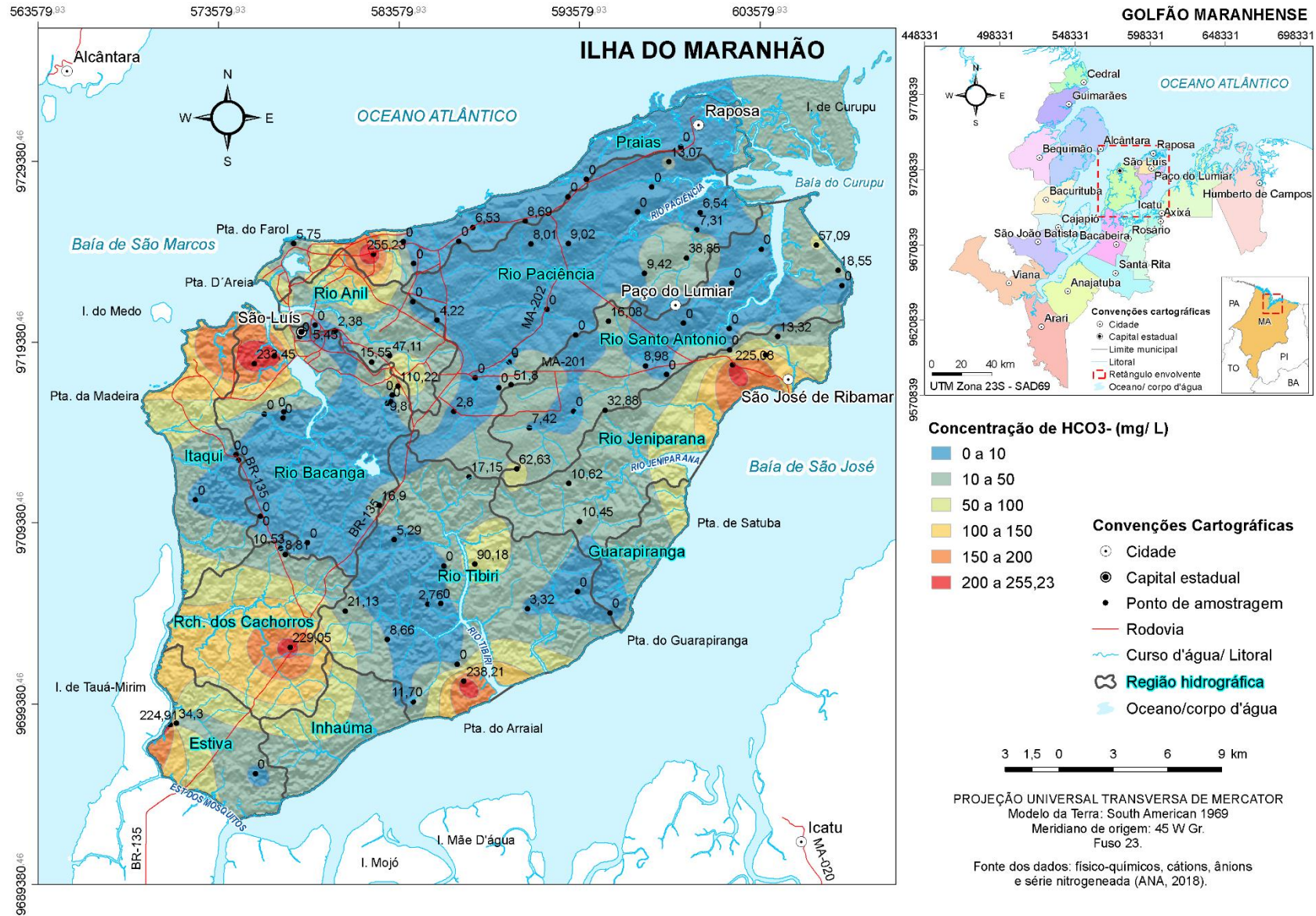
As maiores concentrações do íon bicarbonato estão situadas na faixa litorânea (**Figura 5.26**), nas regiões hidrográficas das Praias (255,23 mg/ L), Bacanga (242,88 mg/ L), Tibiri (238,21 mg/ L), Riacho dos Cachorros (229,05 mg/ L), Jeniparana (225,08 mg/ L) e Estiva (224,91 mg/ L). A explicação, provavelmente, se deve a menor profundidade da interface entre os aquíferos Barreiras e Itapecuru, chegando a 50 m nessas regiões. Ela é formada por níveis calcíferos cuja dissolução do carbonato de cálcio é indicativa da presença do íon bicarbonato como produto da reação química. Nesse caso, os filtros dos poços amostrados estariam captando água do aquífero Itapecuru, de recarga regional, com maior tempo de residência entre litologias carbonáticas ou dolomíticas.

Figura 5.25 – Mapa de concentração do íon sódio (Na^+ mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.26 – Mapa de concentração do íon bicarbonato (HCO_3^- mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

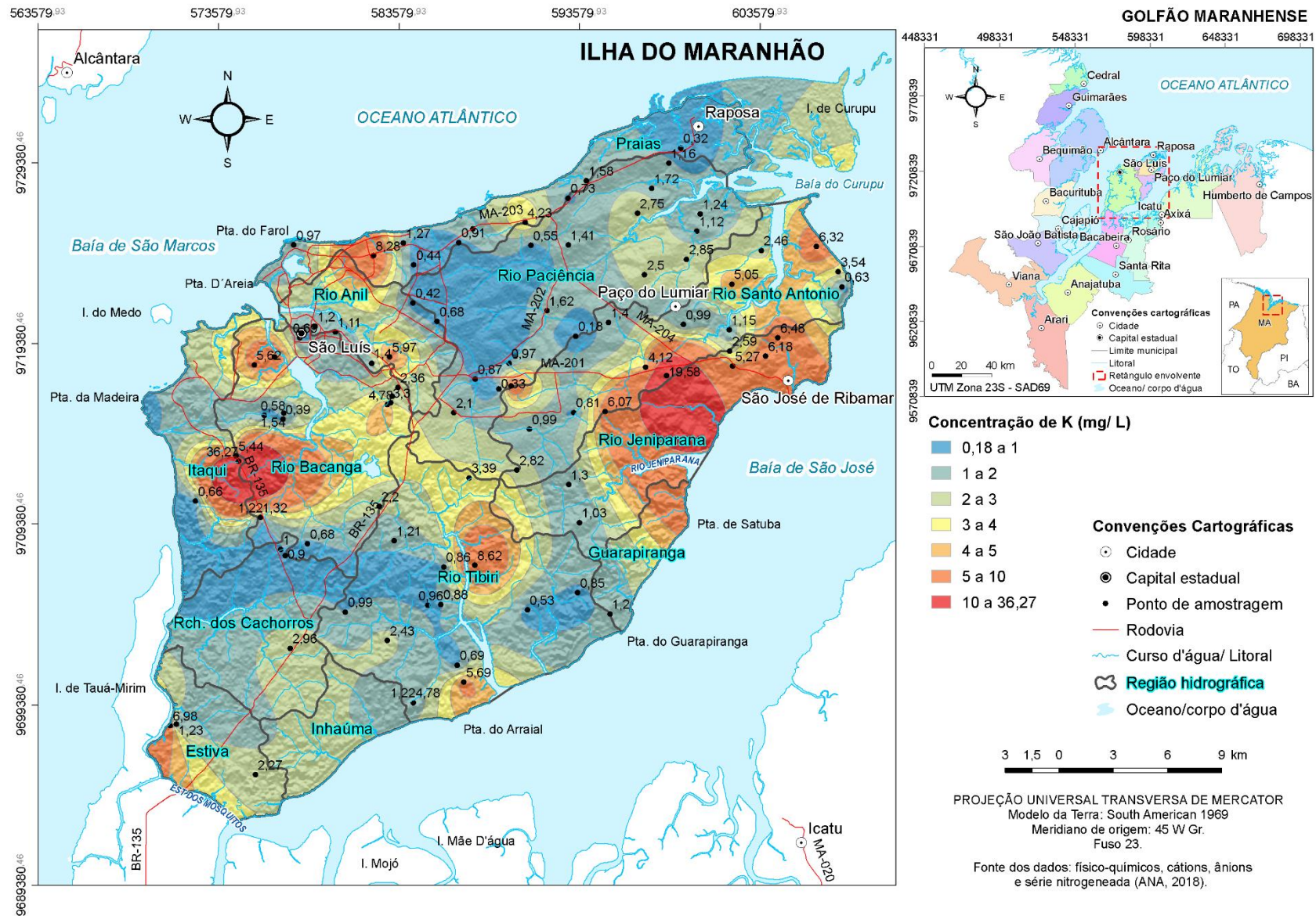
Quanto ao íon potássio (K^+), sua origem está relacionada ao intemperismo químico de rochas ígneas e metamórficas, constituídas por minerais como feldspato potássico (ortoclásio), biotita e muscovita. Os íons dessa espécie química podem ser lixiviados; permanecer adsorvidos na superfície dos argilominerais onde estarão sujeitos aos processos de trocas catiônicas; ou ser absorvidos pelas raízes das plantas. Em regiões costeiras, há ainda a contribuição dos aerossóis marinhos que mineralizam as águas meteóricas.

Na Ilha do Maranhão (**Figura 5.27**), a concentração média do íon potássio é de 2,89 mg/ L (**Tabela 5.2**), abaixo do valor de referência para as águas subterrâneas (<10 mg/ L). Os registros em geral exibem valores próximos aos de referência da água meteórica (0,1 a 4 mg/ L), excetuando aqueles verificados nas regiões hidrográficas do Itaqui (36, 27 mg/L) e do Santo Antonio (19,58 mg/ L), provavelmente relacionados a contaminações por água do mar ou devidos aos aerossóis marinhos.

Quanto aos íons cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}), suas origens nas águas subterrâneas estão associadas ao intemperismo de rochas ígneas e metamórficas constituídas por minerais máficos (olivina, piroxênios, anfibólios e biotita) e félsicos (plagioclásios cálcicos) cujos íons liberados são lixiviados, adsorvidos às superfícies dos argilominerais, onde estão sujeitos às trocas catiônicas. A dissolução das rochas carbonáticas, formadas por calcita e dolomita, e de rochas evaporíticas, constituídas por gipsita e anidrita, também são responsáveis pelo incremento de cálcio e magnésio nas águas subterrâneas. Nas regiões costeiras, esses íons podem ter procedência dos aerossóis marinhos ou das contaminações por água do mar.

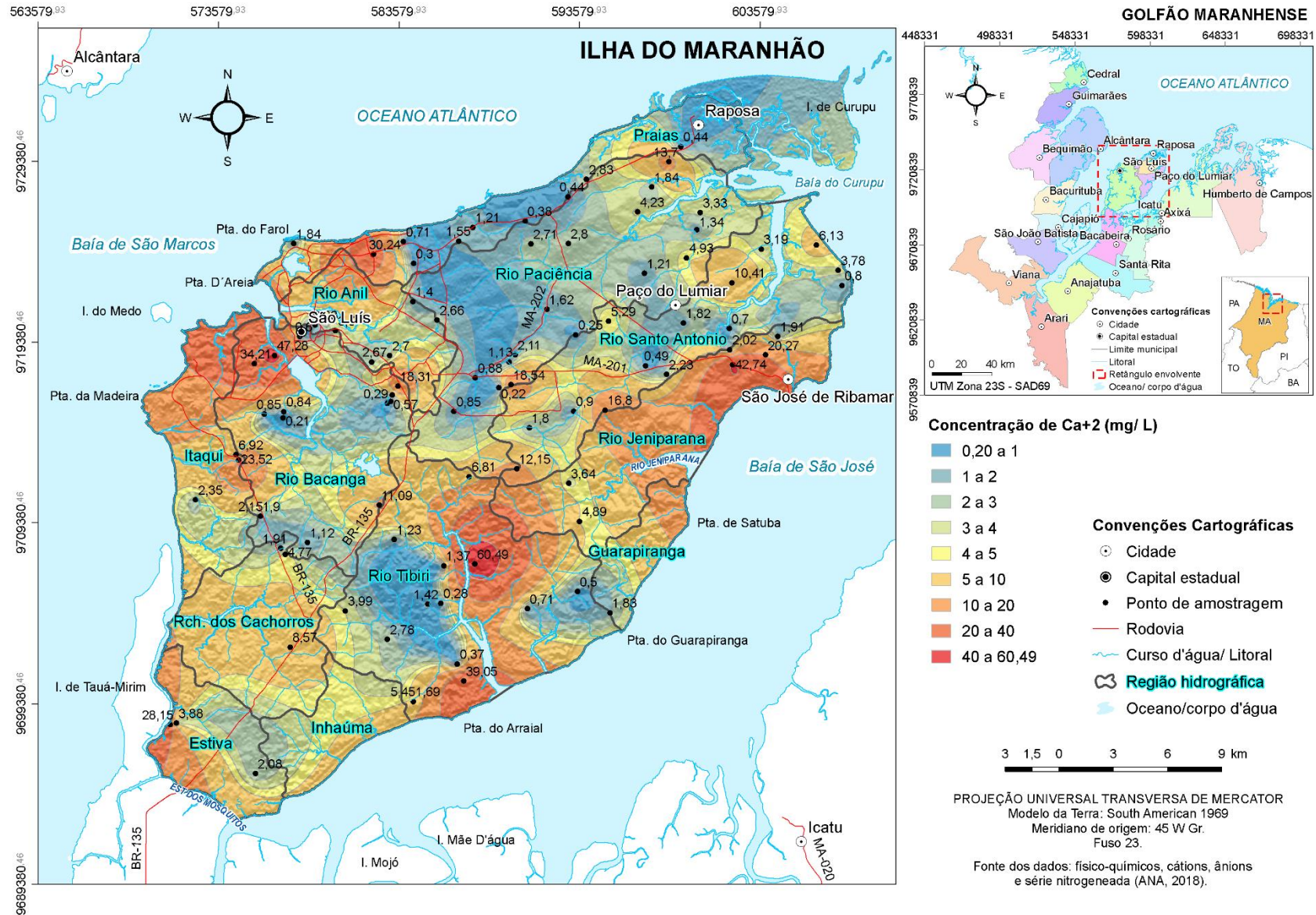
Nas águas subterrâneas, os valores de referência para o cálcio e magnésio são, respectivamente, de 10 a 100 mg/ L e de 1 a 40 mg/ L (**Tabela 5.2**). Na Ilha do Maranhão, a concentração média dos íons em tela é de 6,42 mg/ L e de 4,11 mg/ L, sequencialmente, e os maiores registros estão localizados na faixa litorânea: na região do Tibiri (60,49 mg/ L), para o cálcio (**Figura 5.28**), e nas regiões do Bacanga (27,19 mg/ L) e Jeniparana (26,9 mg/ L), para o magnésio (**Figura 5.29**). A origem provável desses íons em poços tubulares na faixa litorânea está associada a menor profundidade da interface entre os aquíferos Barreiras e Itapecuru, marcada por níveis calcíferos, os quais são solubilizados pelo ácido carbônico, liberando os cátions em alusão para a água subterrânea. Outra contribuição admissível está na dissolução dos aerossóis de sal marinho na água da chuva.

Figura 5.27 – Mapa de concentração do íon potássio (K⁺ mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



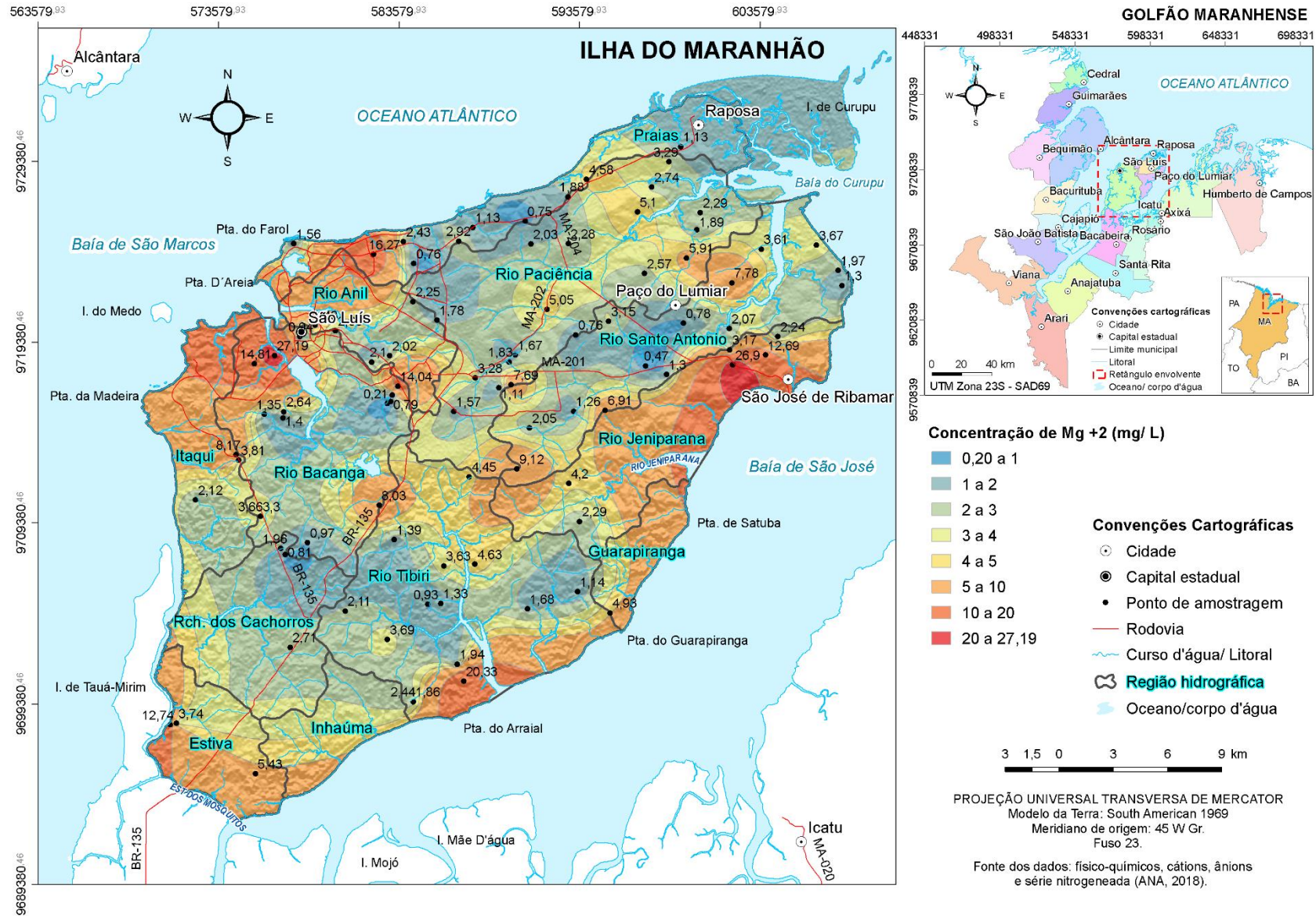
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.28 – Mapa de concentração do íon cálcio (Ca^{+2} mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.29– Mapa de concentração do íon magnésio (Mg^{+2} mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

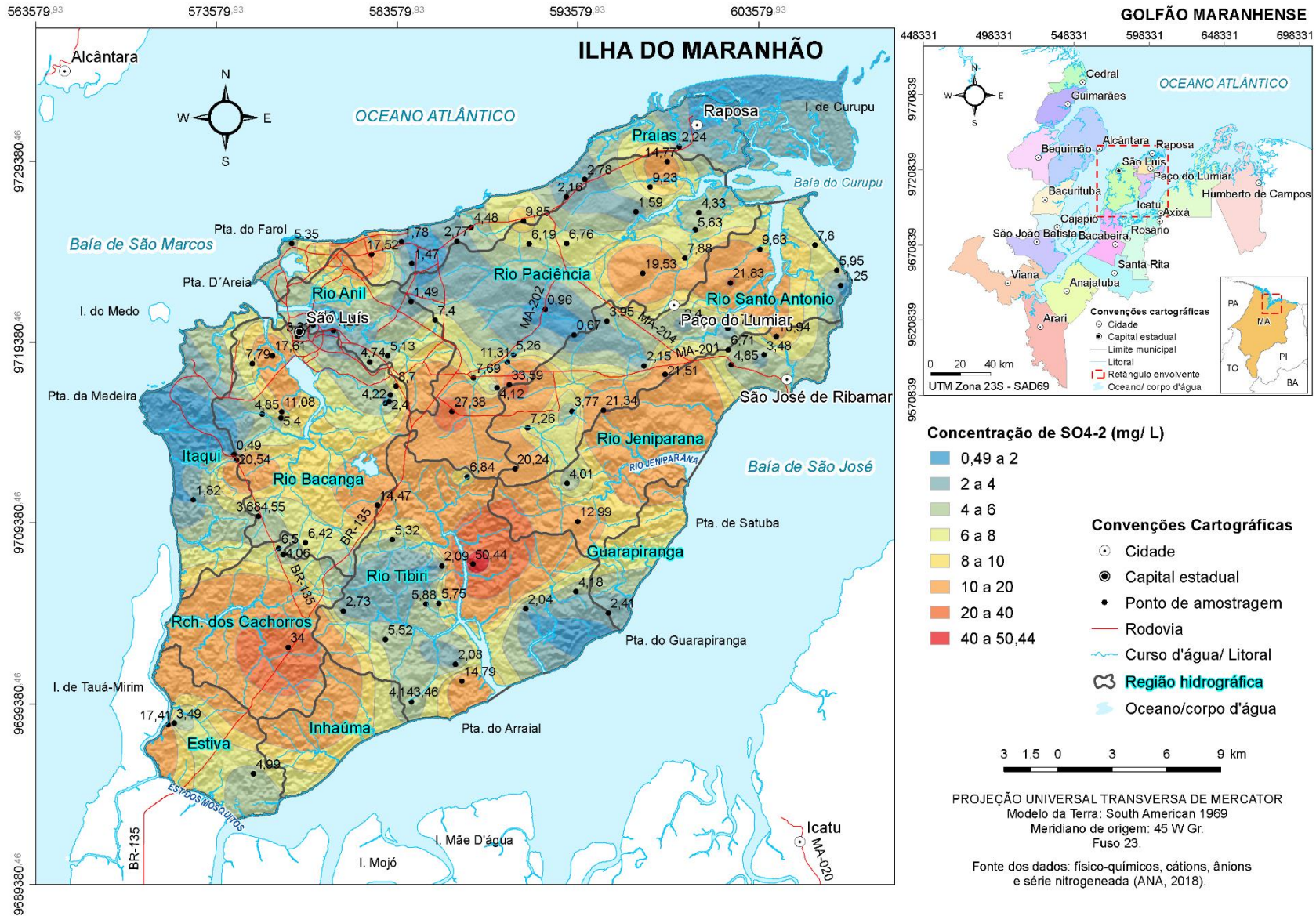
Em relação ao sulfato (SO_4^{-2}), segundo Santos (2008) e Freeze e Cherry (2017), trata-se de um ânion altamente deliquescente, moderadamente a muito solúvel, proveniente da oxidação da pirita e da dissolução de rochas evaporíticas formadas por anidrita e gipsita que raramente ocorrem em quantidades superiores a traços. Em vista disso, para que esse íon seja dominante nas zonas intermediárias de bacias sedimentares, onde o fluxo hídrico é mais lento, é necessário que a água subterrânea percorra distâncias consideráveis. O íon sulfato também pode ser consequente dos aerossóis de sal marinho; da queima de combustíveis fósseis que mineralizam as precipitações pluviométricas; do lançamento de esgotos domésticos; dos efluentes de indústrias de celulose e papel, químicas e farmacêuticas; e do uso de pesticidas em culturas agrícolas.

Nas águas subterrâneas, os valores de referência para o íon sulfato são concentrações abaixo de 100 mg/ L. Na área de estudo, as amostras apresentam registros abaixo desse limiar (**Figura 5.30**), com teor mais acentuado na região hidrográfica do Tibiri (50,44,14mg/ L). Ele pode ser explicado pelas contaminações da água do mar, uma vez que sulfato é um dos íons mais abundantes nesse ambiente (até 2.810 mg/ L no Oceano Atlântico), o que é corroborado pelo fato do poço tubular em questão se encontrar nas proximidades da faixa litorânea, onde a profundidade da interface água doce-água salgada é menor. As demais concentrações do íon sulfato na área de estudo podem ser resultantes dos aerossóis marinhos, da queima de combustíveis fósseis e de efluentes domésticos e industriais.

Em relação ao ânion nitrato (NO_3^-), conforme Santos (2008) e Manoel Filho (2008), trata-se de um íon muito solúvel, altamente deliquescente e muito móvel. Ele pode se deslocar com a água subterrânea, atingir extensas áreas e grandes profundidades em locais com componentes de fluxos verticais. Por se tratar do estágio final de oxidação da matéria orgânica, a presença do nitrato na água subterrânea é sugestiva de atividades antrópicas domésticas (rompimento de fossas sépticas e redes de esgotos, chorumes de aterros sanitários e lixões), agrícolas (uso de fertilizantes, herbicidas e pesticidas) e industriais (resíduos industriais, vazamentos).

De acordo com Freeze e Cherry (2017), o nitrato é o contaminante mais comum identificado na água subterrânea em virtude das atividades agrícolas e do lançamento de esgoto na superfície ou abaixo do solo. Sua origem está relacionada às fontes diretas ou à conversão do nitrogênio orgânico em amônia (NH_4) pelo processo de amonificação, e da amônia em nitrato pelo de nitrificação por oxidação. Tais processos ocorrem na zona de solo em que a matéria orgânica e o oxigênio são abundantes.

Figura 5.30 – Mapa de concentração do íon sulfato (SO_4^{2-} , mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O nitrato gerado é lixiviado para água subterrânea onde é transportado sem transformação, com pouco ou nenhum retardamento. Caso haja uma diminuição do potencial redox das águas subterrâneas, esse ânion pode, por desnitrificação, resultar em óxido nitroso (NO₂) ou nitrogênio (N₂), os quais são dissolvidos no meio aquoso.

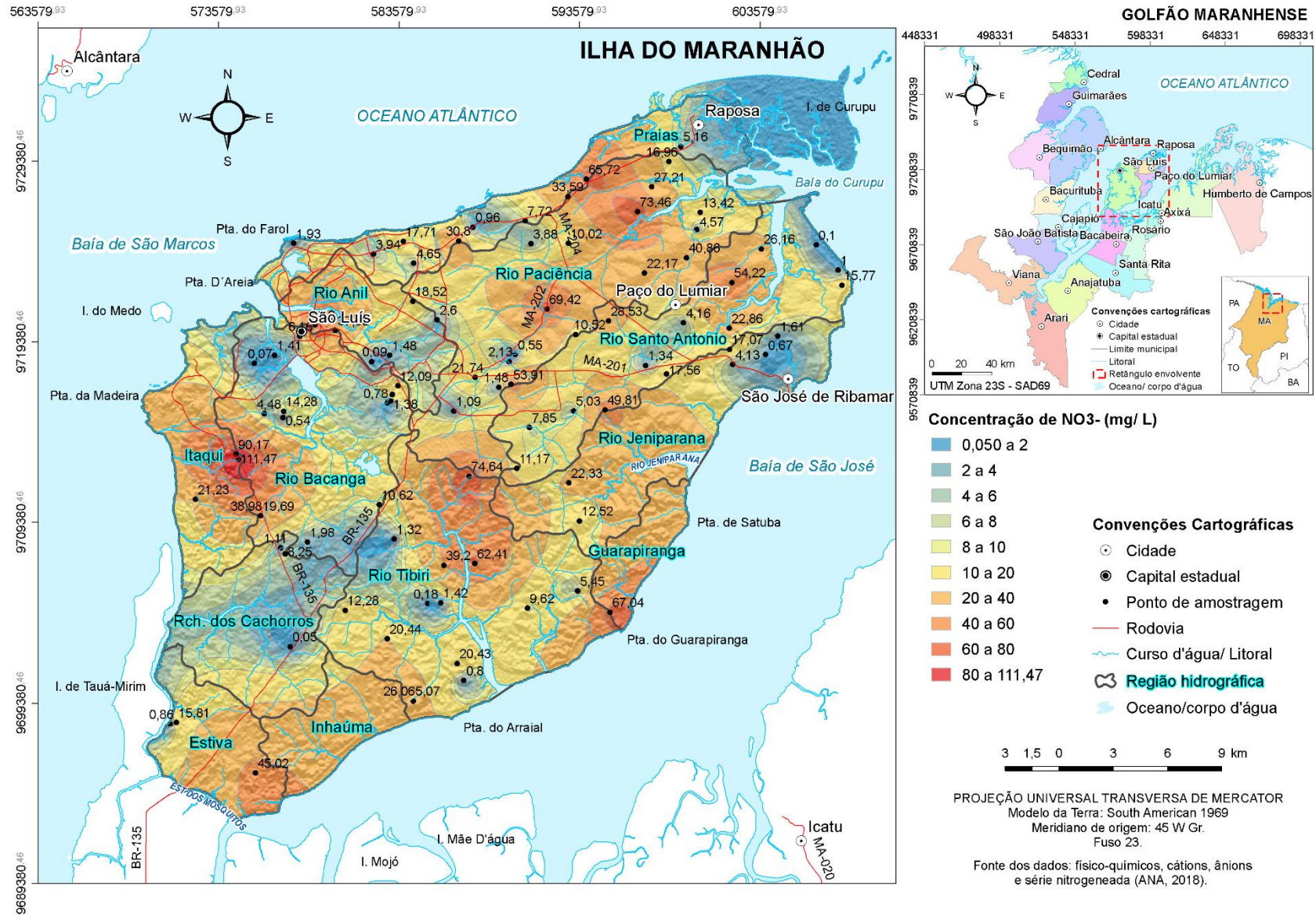
Nas águas subterrâneas, a concentração de nitrato é geralmente entre 0,1 a 10 mg/L. O limite superior define o valor máximo permitido para potabilidade (Portaria MS Nº 2.914, 12 de dezembro de 2011) e para o consumo humano (Resolução CONAMA Nº 369, de 3 de abril de 2008). De acordo com Santos (2008), teores acima de 5 mg/L podem ser indicativos de contaminação por atividades antrópicas.

Em águas poluídas, as concentrações chegam até 1.000 mg/L. Na Ilha do Maranhão, das 92 amostras de água subterrânea consideradas, aproximadamente 55% apresentam concentrações de nitrato acima de 10 mg/L (**Figura 5.31**), distribuídas em toda a área de estudo, com registros elevados nas regiões do Itaqui (111,47 e 90,17 mg/L), Tibiri (74,64 e 62 mg/L) e Paciência (73,46 e 69,42 mg/L). Por se tratar de um íon cuja origem está intimamente relacionada às atividades antrópicas, as concentrações verificadas na área de estudo têm como fonte provável o esgotamento sanitário dos efluentes domésticos.

Na Ilha do Maranhão, de acordo como o censo demográfico (IBGE, 2010), dos 344.146 domicílios particulares permanentes, somente 34% efetuam o esgotamento sanitário via rede geral, o restante o faz através de fossa séptica ou rudimentar, ou via mar ou outras formas de esgotamento. Ainda, conforme o Atlas Esgotos (ANA, 2017b), a carga total de efluentes na área investigada é de 61.448,6 kg DBO/ dia, dos quais 47.461,6 kg DBO/ dia retornam ao meio ambiente sem tratamento.

Outras fontes cabíveis para os teores de nitrato na área de estudo dizem respeito à disposição dos resíduos sólidos e às atividades agrícolas realizadas na área rural dos municípios da Ilha do Maranhão. Quanto ao primeiro, dos 344.146 domicílios particulares permanentes, 25% queimam os resíduos ou enterram na propriedade ou descartam em terrenos baldios, logradouros, rio ou mar. Em relação atividades agrícolas, segundo a Secretaria de Agricultura e Pesca do Estado do Maranhão (SAGRIMA), a área de estudo contém cerca de 107 propriedades rurais de hortifruticultura: sendo 52 em São Luís; 22 em São José de Ribamar; 24 em Paço do Lumiar; e 9 em Raposa.

Figura 5.31 – Mapa de concentração do íon nitrato (NO_3^- , mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Santos *et al.* (2012) investigaram a contaminação dos corpos d'água adjacentes às áreas agrícolas dos municípios de Raposa e São José de Ribamar, na Ilha do Maranhão, por agrotóxicos, e constataram que os mais utilizados pertencem a classe dos inseticidas organofosforados e piretróides, destacando o uso intensivo do herbicida glifosato, de elevado potencial ecotóxico. Os inseticidas paration metílico, metamidofós e cipermetina foram detectados na maioria das amostras de água, com algumas apresentando resíduos do inseticida organoclorado Aldrin.

Com respeito ao teor de STD, Santos (2008), Mestrinho (2013) e Freeze e Cherry (2017) descrevem-no como o peso integral dos constituintes minerais, voláteis ou não, dissolvidos na água, por unidade de volume, sendo função da natureza do soluto, pH, temperatura e pressão do ambiente. Em geral, sua concentração na água subterrânea é menor nas áreas de recarga e maior nas de descarga ou de maior profundidade. Segundo Fetter (2001), mais de 90% dos sólidos dissolvidos na água subterrânea são atribuídos aos íons Na^+ , Ca^{+2} , K^+ , Mg^{+2} , SO_4^{-2} , Cl^- , HCO_3^- e CO_3^{-2} , podendo o STD ser estimado a partir da soma das concentrações dos íons individuais.

Freeze e Cherry (2017) destacam a contribuição de Chebotarev (1955), ao analisar mais de 10.000 amostras de água de poços na Austrália e concluir que a composição química da água tende para a do mar, normalmente acompanhada de mudanças regionais nos ânions maiores, segundo a sequência $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{-2} \rightarrow \text{SO}_4^{-2} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{-2} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{-2} \rightarrow \text{Cl}^-$. Segundo Domênico (1972), nas grandes bacias sedimentares, a composição química está relacionada ao fluxo da água subterrânea nas zonas superior (de rápida circulação, baixos teores de STD e predomínio do ânion bicarbonato), intermediária (fluxo mais lento, maiores teores de STD e predomínio do ânion sulfato) e inferior (fluxo muito lento, altos teores de STD e predomínio do ânion cloreto).

Enquanto a ordem dos ânions acima é explicada pela disponibilidade e solubilidade dos minerais envolvidos, a sequência identificada por Germanov *et al.* (1958), intitulada eletrolítica, destaca a evolução dos ânions maiores a partir da tendência de diminuição do potencial redox ao longo do fluxo subterrâneo. Nos ambientes de rochas sedimentares estratificadas, o teor de STD é influenciado pelo contato da água com as diferentes camadas, as quais incluem arenitos, siltitos folhelhos, calcários e dolomitos.

Esses estratos estão presentes na geologia sedimentar da área de estudo: um ambiente insular, costeiro, com precipitações pluviométricas concentradas nos primeiros seis meses do ano. Essas características fisiográficas juntamente com baixo percentual de esgotamento sanitário via rede geral e práticas agrícolas provavelmente definem a seguinte ordem na

concentração iônica da água subterrânea na Ilha do Maranhão: $\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^+$. O teor de STD é dominado principalmente pelos três primeiros constituintes os quais representam 63,42% da concentração iônica média da água subterrânea, cabendo aos demais íons 32,58%.

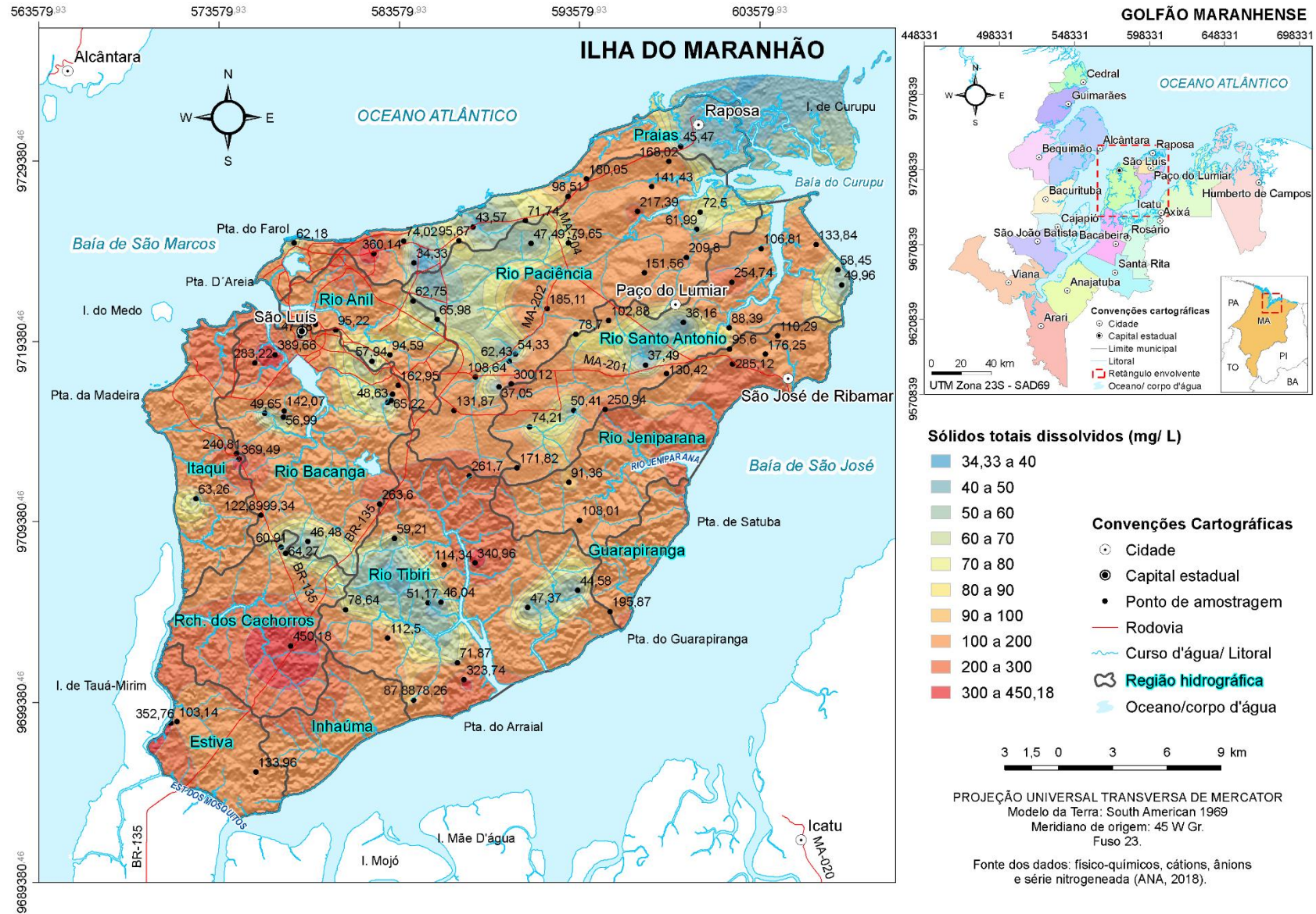
Na área de estudo, todas as 92 amostras analisadas apresentam $\text{STD} < 500 \text{ mg/L}$ (**Figura 5.32**), valor de referência para as águas doces, com base na Resolução CONAMA N°. 397, de 17 de março de 2005. Em relação à Resolução CONAMA N°. 396, de 3 de abril de 2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, e a Portaria MS N° 2.914, de 12 de dezembro de 2011, que rege o padrão de potabilidade da água para o consumo humano, todas as amostras consideradas exibem concentração de STD abaixo do valor de referência de 1.000 mg/L para ambas as legislações.

As maiores concentrações de STD estão localizadas na porção centro-sul e na faixa litorânea da Ilha do Maranhão (**Figura 5.32**), com destaque para as regiões hidrográficas do Riacho dos Cachorros ($450,18 \text{ mg/L}$), Bacanga ($389,66 \text{ mg/L}$), Itaqui ($369,49 \text{ mg/L}$), Praias ($360,14 \text{ mg/L}$) e Estiva ($352,76 \text{ mg/L}$). Do total de 50 poços tubulares com concentrações de STD inferiores a 100 mg/L , 30 deles estão situados na porção centro-norte da área de estudo. Desse quantitativo, 14 poços tubulares jazem nas regiões hidrográficas do Anil, Praias e Jeniparana, as quais apresentam concentração média de STD de $67,7 \text{ mg/L}$.

Os 16 poços restantes distribuem-se pelas regiões hidrográficas do Paciência e Santo Antônio, cuja concentração média de STD é de $61,73 \text{ mg/L}$. Diante dos resultados expostos, sabendo que as concentrações do parâmetro em discussão, em geral, elevam-se das áreas de recarga para as de descarga, a porção centro-norte da área de estudo, sobretudo as do Paciência e Santo Antônio, topograficamente mais elevadas que as demais, mostram-se como prováveis áreas de recarga dos sistemas aquíferos na área investigada.

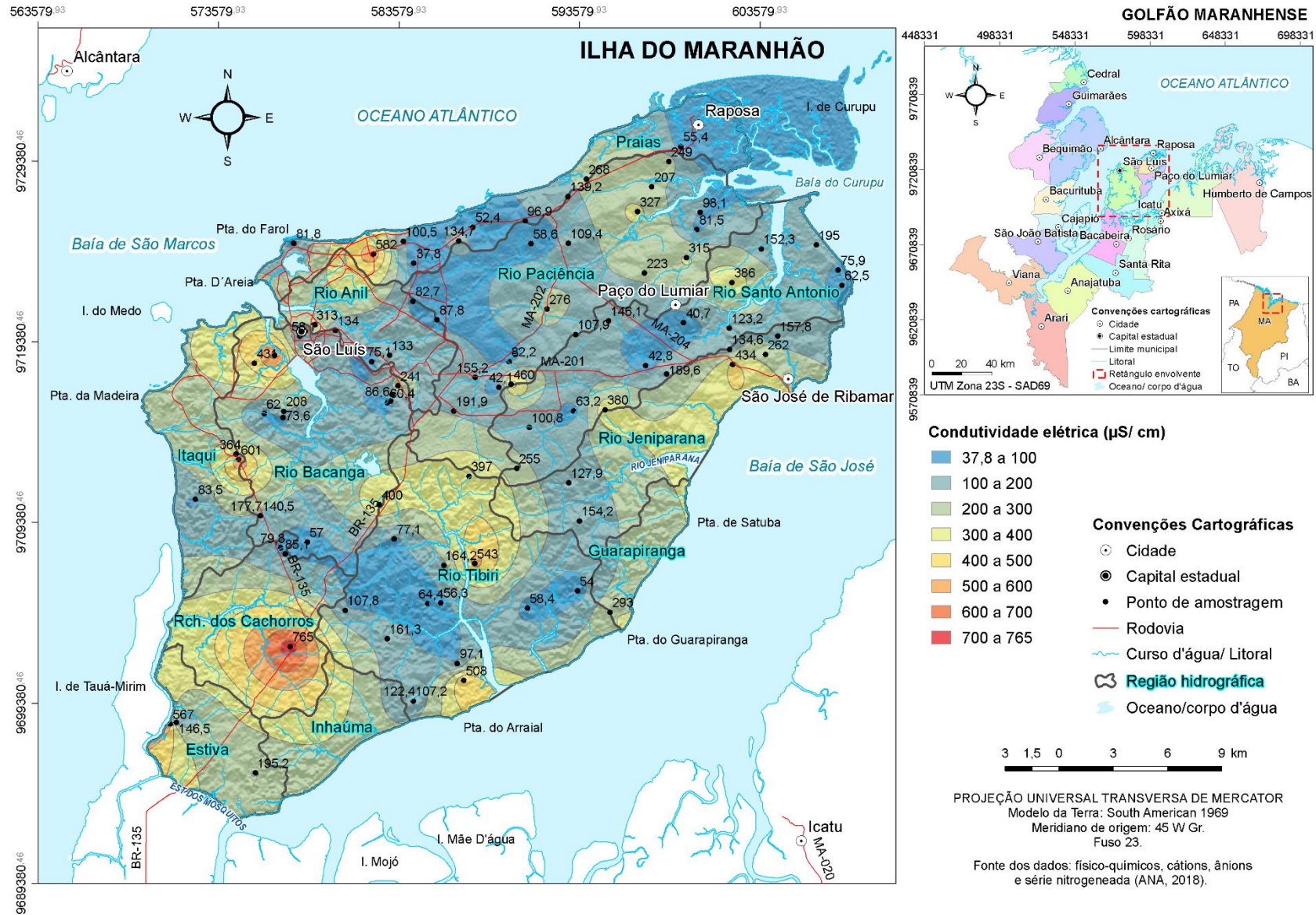
No que concerne a condutividade elétrica, de acordo Santos (2008) e Mestrinho (2013), sua estimativa é baseada no produto das concentrações de STD por fatores compreendidos entre 0,55 - 0,54 e 0,75 - 0,96. Ela corresponde a capacidade da água em conduzir a corrente elétrica por meio de substâncias dissolvidas; e depende do tipo, concentração, valência, mobilidade da espécie química e temperatura. Na área de estudo (**Figura 5.33**), os maiores registros de condutividade elétrica são notados nas regiões do Riacho dos Cachorros ($765 \mu\text{S/cm}$), Bacanga ($582 \mu\text{S/cm}$), Itaqui ($601 \mu\text{S/cm}$), Praias ($582 \mu\text{S/cm}$) e Estiva ($567 \mu\text{S/cm}$).

Figura 5.32 – Mapa de concentração de sólidos totais dissolvidos (mg/ L) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 5.33 – Mapa de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Uma vez que a condutividade elétrica é uma estimativa da quantidade de sais presentes na água (SILVEIRA *et al.* 2015), sua magnitude nas regiões destacadas está relacionada preferencialmente aos íons bicarbonato, sódio, cloreto, nitrato e sulfato. Eles representam aproximadamente 80% da concentração iônica média da água subterrânea dos poços amostrados. Esses íons remetem provavelmente a processos como: mineralização das águas pluviais pelos aerossóis de sal marinho; diluição do gás carbônico do solo na água da chuva e posterior ionização; trocas catiônicas; contaminações por intrusão salina e por efluentes domésticos.

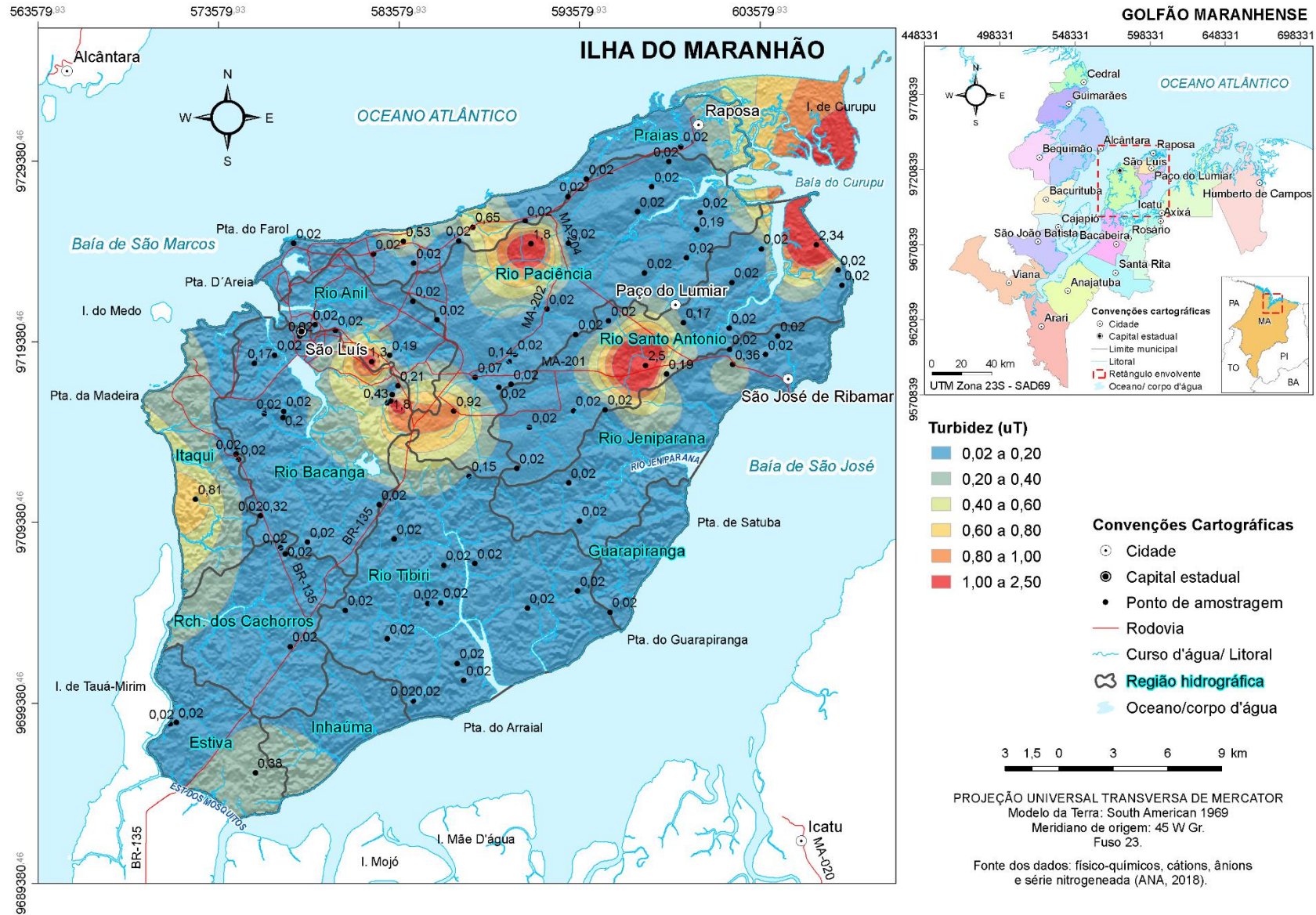
Em relação a turbidez, Santos (2008) define como a dificuldade da água em transmitir a luz, provocada pelos sólidos em suspensão: silte, argila, matéria orgânica, microorganismos e partículas inorgânicas. Em geral, as águas subterrâneas praticamente não têm sólidos em suspensão com exceção daquelas procedentes de aquíferos cársticos; de ambientes favoráveis à precipitação de compostos de ferro e manganês (responsáveis por incrustações em filtros e tubulações); ou de poços mal desenvolvidos.

A presença de ferrobactérias em águas com elevado teor de matéria orgânica dissolvida, bicarbonato e dióxido de carbono acarreta a produção de materiais mucilaginosos que podem favorecer ao aumento da turbidez. Águas subterrâneas com excesso de gás carbônico e sulfídrico são ácidas, causam a corrosão de revestimentos e filtros metálicos de poços tubulares cujos resíduos podem promover aumento da turbidez.

Em aquíferos granulares, danificações nos pré-filtros podem deixar as seções filtrantes expostas e permitir a passagem de sedimentos. Infiltrações através da zona não saturada a partir de águas de chuvas procedentes de depósitos de lixo ou de rejeitos de exploração mineral também podem contribuir para a elevação dos valores de turbidez. Por fim, problemas de cimentação e a presença de poços abandonados também podem cooperar para o incremento da turbidez das águas subterrâneas.

Na Ilha do Maranhão (**Figura 5.34**), os registros de turbidez estão abaixo dos valores de referência de 5uT, conforme a Portaria MS Nº 2.194, de 12 de dezembro de 2011. No entanto, os pontos amostrais mais acentuados estão localizados nas regiões hidrográficas do Santo Antônio (2,5 e 2,43 uT), Paciência (1,8 uT), Bacanga (1,8 uT) e Anil (1,3 uT).

Figura 5.34 – Mapa de turbidez (uT) das águas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Quanto à potabilidade da água, em uma situação hipotética, se fossem considerados somente os valores máximos permitidos dos parâmetros cloreto (< 250 mg/ L), sódio (< 200 mg/ L), sulfato (< 250 mg/ L), nitrato (< 10 mg/ L), STD (< 1.000 mg/ L) e turbidez (< 5 uT), estabelecidos na Resolução CONAMA N° 396, de 7 de abril de 2008, e na Portaria MS N° 2.914, de 12 de dezembro de 2011, na área de estudo, dos 92 pontos de amostragem analisados, 44 deles satisfariam aos padrões de potabilidade da água para o consumo humano.

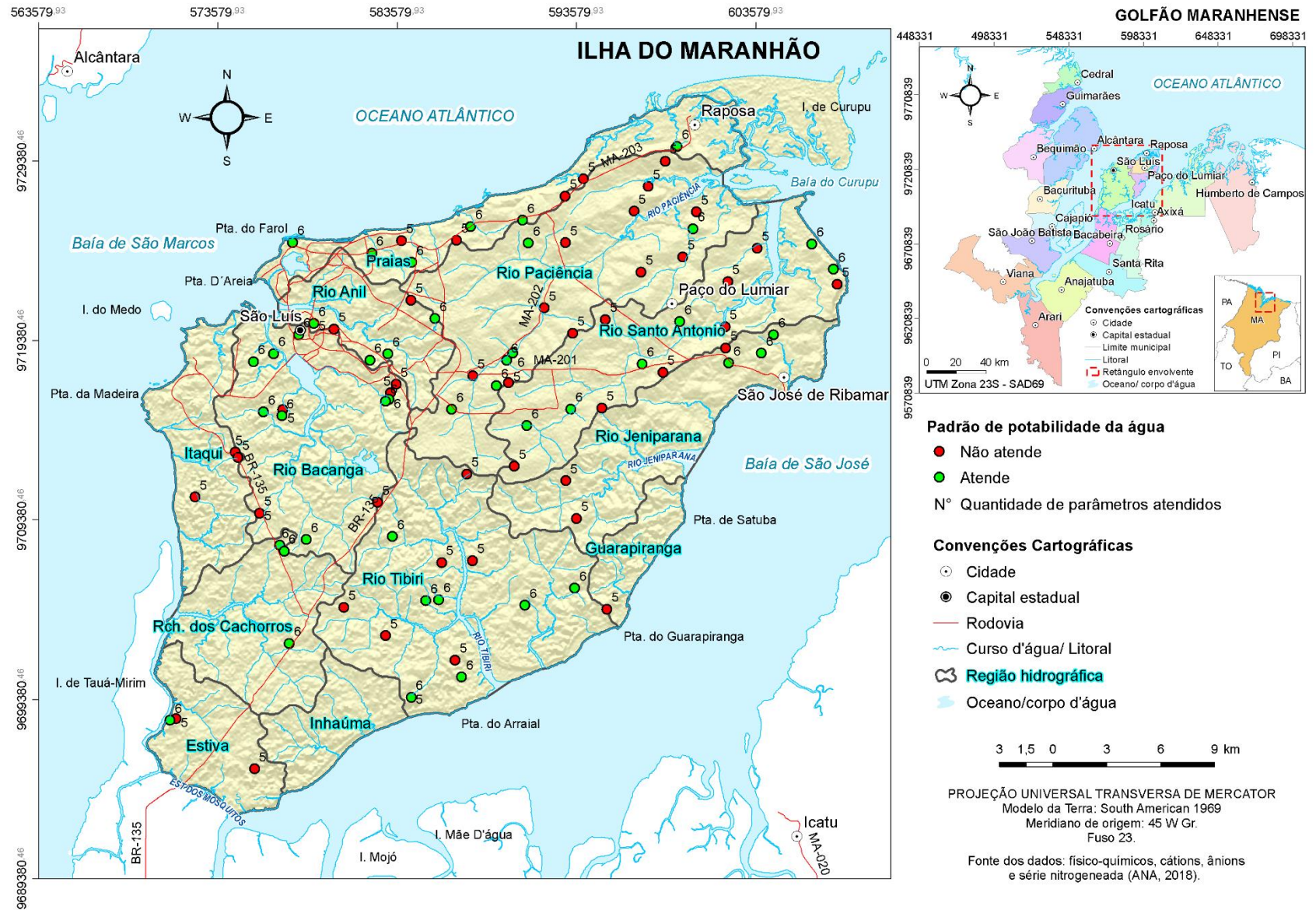
Em 48 pontos amostrais, os padrões de potabilidade da água não seriam atendidos unicamente em relação ao parâmetro nitrato (**Figura 5.35**), por superarem o valor máximo permitido na legislação anteriormente citada, que é de 10 mg/ L. Esse cenário aponta para a fragilidade dos sistemas de esgotamento sanitário na área de estudo. Eles constituem um dos principais responsáveis pela alteração na qualidade da água subterrânea, principalmente para o consumo humano. Essa constatação foi verificada nos trabalhos realizados por Amorim e Santos (2012), Coelho (2015) e Oliveira (2016), entre outros.

De acordo com o art. 12 da Resolução CONAMA n° 396, de 7 de abril de 2008, se os parâmetros cloreto (< 250 mg/ L), sódio (< 200 mg/ L), sulfato (< 250 mg/ L), nitrato (<10mg/L), STD (< 1.000 mg/ L) e turbidez (< 5 uT) e seus respectivos valores máximos permitidos fossem selecionados como critérios para enquadramento das águas subterrâneas, e considerando que o uso preponderante na área de estudo é o consumo humano, 44 amostras seriam enquadradas como Classe 1 e 48 como Classe 3, uma vez que as concentrações acima dos valores máximos permitidos estariam relacionadas às alterações da qualidade por atividades antrópicas.

Amorim e Santos (2012) analisaram a qualidade da água subterrânea na sub-bacia do rio Maracanã, na região centro-oeste da Ilha do Maranhão, por meio da amostragem de oito poços. Os resultados bacteriológicos confirmaram que todos os poços apresentaram contaminação por coliformes totais e em três deles por coliformes termotolerantes. Esses registros foram associados às deficiências no saneamento básico e à forma inadequada de construção e manutenção dos poços.

Bertoldo Oliveira (2016) procedeu à avaliação físico-química e bacteriológica da água subterrânea de oito poços nas comunidades de São Benedito, Porto Grande, Inhaúma e Estiva, no Distrito Industrial de São Luís. Apesar das concentrações de nitrito, nitrato e amônia estarem abaixo dos limites máximos permitidos na legislação, sob o ponto de vista bacteriológico, 75% e 12% das amostras apresentaram qualidade insatisfatória para coliformes totais e *Escherichia coli*, respectivamente.

Figura 5.35 – Mapa de potabilidade da água nos pontos de amostragem, baseado nos parâmetros cloreto, sódio, sulfato, nitrato, STD e turbidez. Os números acima dos pontos sinalizam o total de parâmetros atendidos pela Resolução CONAMA N° 396/2008 e pela Portaria MS N° 2.914/ 2011.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os resultados apontam para a falta de infraestrutura sanitária, com emprego de fossas sépticas e rudimentares para disposição dos efluentes domésticos, bem como para os problemas na disposição e coleta de resíduos sólidos.

Coêlho (2017) avaliou a qualidade sanitária do solo e da água dos poços tubulares da comunidade rural Cinturão Verde, no município de São Luís, por meio de análises físico-químicas, colimétricas e parasitológicas. As amostras foram coletadas entre janeiro e novembro de 2014 e aquelas correspondentes à transição entre os períodos seco e chuvoso foram as que registraram os maiores níveis de contaminação colimétrica, em uma relação direta com a ausência de saneamento básico.

CAPÍTULO 6

RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO APLICADO AOS SEDIMENTOS CENOZÓICOS DA ILHA DO MARANHÃO

O mapeamento geológico de áreas terciárias e quaternárias é dificultado pelo escasso número de afloramentos rochosos. Um método auxiliar na determinação da profundidade de sedimentos e rochas, bem como de suas estruturas internas, é o radar de penetração no solo, do inglês, *ground penetrating radar* – GPR (BRISTOW; JOL, 2003; BAKER; JOL, 2007; JOL, 2008).

O GPR é um método geofísico de superfície, não destrutivo e não invasivo, que faz uso de fontes artificiais responsáveis pela emissão de ondas eletromagnéticas em alta frequência, destinadas à obtenção de imagens de alta resolução do subsolo, empregando equipamentos apropriados (ANNAN, 2001). Além da fonte, a qualidade da imagem produzida depende das características físicas do meio, das condições de levantamento, da habilidade na aquisição das medidas e das técnicas de processamento aplicadas aos dados coletados.

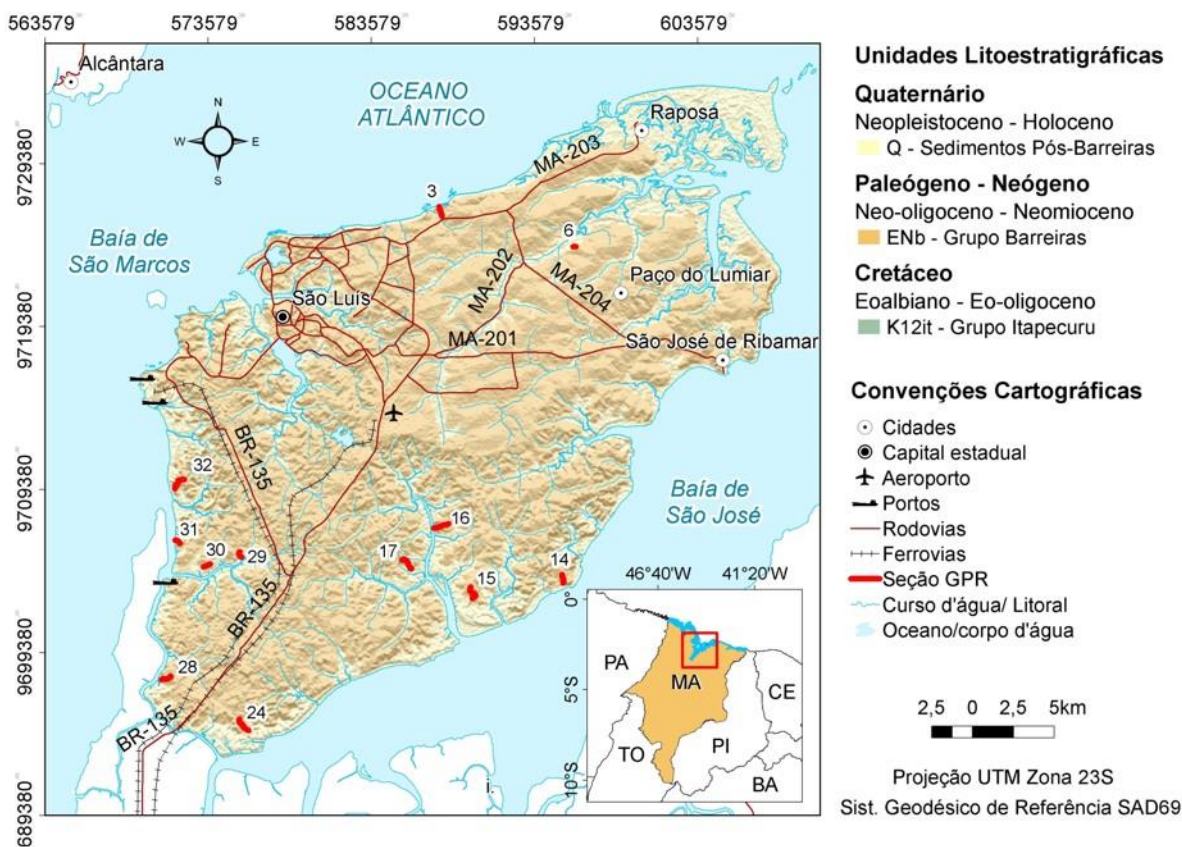
O GPR é usado em várias áreas do conhecimento, tais como: geologia, hidrogeologia, geofísica aplicada, caracterização de solos, mapeamento de pluma de contaminação, análise de pavimentos e de estruturas de construção civil, mapeamento de alvos urbanos (tubulações, galerias etc.), arqueologia, ciência forense, dentre outras (BERES Jr.; HAEINS, 1991; VEREECKEN *et al.*, 2006).

Quanto à geologia, o GPR é utilizado em sedimentologia, na interpretação de unidades estratigráficas, delimitadas por superfícies de descontinuidade, reconhecidas nas seções por reflexões de elevada amplitude; na associação de padrões de reflexão à estruturas sedimentares, auxiliando na caracterização de ambientes deposicionais (SMITH; JOL, 1995; ROSSETTI; GÓES, 2000; NEAL, 2004; ROBINSON *et al.*, 2013; SOUZA *et al.* 2014; TAMURA *et al.*, 2016); na investigação de feições geológicas estruturais em subsuperfície e suas correlações com eventos tectônicos neogênicos e quaternários (SOUZA, 2010); e na análise sedimentar de transição entre fases transgressiva/regressiva em bacias costeiras (LIMA, 2012).

No presente trabalho, os registros de GPR foram aplicados na investigação dos Sedimentos Cenozóicos da Ilha do Maranhão, mais precisamente nos depósitos quaternários, representados pelos Sedimentos Pós-Barreiras, no contato entre os Tabuleiros Costeiros Litorâneos e o Litoral de Mangues e Rias (**Figura 6.1**). Essa região é marcada pela presença de vegetação de influência flúviomarinha (manguezal), vegetação secundária no domínio da

Floresta Ombrófila Aberta com palmeiras; e quanto aos solos, predominam os Gleissolos, Latossolos e Argissolos.

Figura 6.1 – Mapa geológico da Ilha do Maranhão com a localização das seções GPR e fotografias correspondentes às linhas de números 3, 6, 14, 15, 29 e 30.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

6.1 Análise e interpretação das seções GPR

Na Ilha do Maranhão, as investigações GPR conduziram ao reconhecimento de estruturas sedimentares (SUGUIO, 2003) pré-deposicionais: superfícies de descontinuidades e paleocanais; sindeposicionais: estratificação plana e cruzada; e pós-deposicionais: falhas e fraturas. Elas estão relacionadas às condições de transporte e empilhamentos sedimentares, bem como aos eventos neotectônicos que ocorreram na área de estudo.

Para fins descritivos, as estruturas sedimentares foram relacionadas a padrões de reflexão caracterizados segundo a forma, mergulho, relacionamento e continuidade dos refletores nas seções GPR (NEAL, 2004). As feições foram observadas até a profundidade de aproximadamente 15 m, estimada a partir da velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio de 0,10 m/ns, obtida por meio de ajuste hiperbólico no Reflexw, e segundo uma janela temporal de 300 ns.

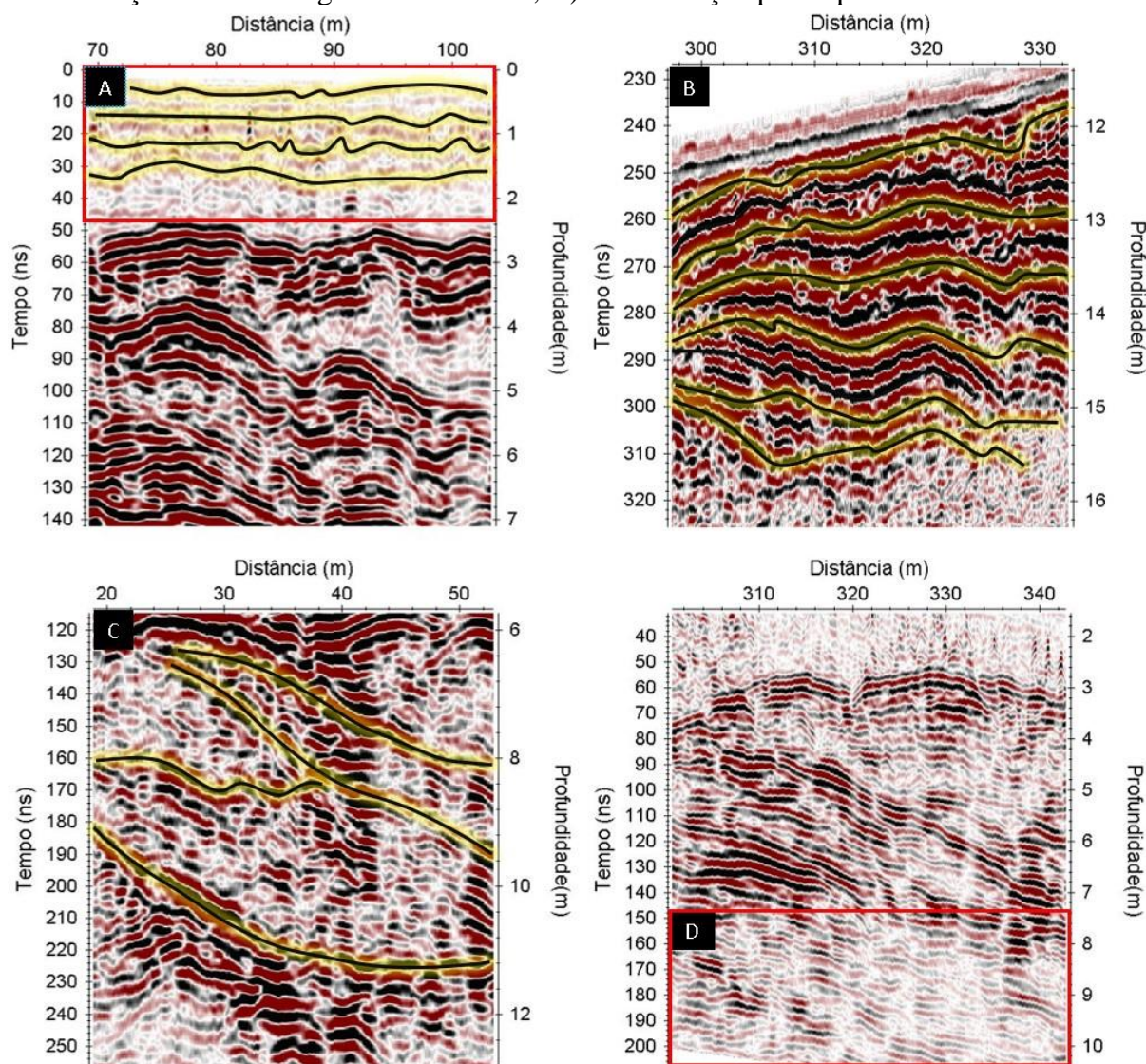
Da análise das seções GPR obtidas, foram identificadas e selecionadas quatro radarfácies representativas dos depósitos sedimentares locais. A primeira, Rf1 (**Figura 6.2A**), na porção superior das seções, entre a 1 a 3 m de profundidade, é marcada em geral por reflexões de amplitude baixa e em alguns trechos por sinal de amplitude média a alta. Quanto à forma, elas foram classificadas como planares; em relação ao mergulho e ao relacionamento entre os refletores, como horizontais e subparalelas; e quanto à continuidade das feições, moderadamente contínuas a descontínuas, com presença de feições hiperbólicas.

Essa radarfácies foi relacionada a depósitos areno-argilosos a argilosos com estratificação plano-paralela. Os sinais de amplitude moderadamente alta, paralelos e contínuos no topo dessa radarfácies representam estratificação dos materiais utilizados como sub-base das estradas de rodagem. As feições hiperbólicas na porção inferior estão associadas às concreções lateríticas, as quais são frequentes entre as camadas superficiais dos depósitos cenozóicos na área de estudo.

Na radarfácies Rf2 (**Figura 6.2B**), as reflexões ocorrem entre 3 a 8 m de profundidade e exibem em geral sinais de amplitude alta, intercalados em alguns trechos por feições amplitude baixa e zonas com ausência de sinal. Os refletores apresentam uma configuração sinuosa e em determinados intervalos planar; em relação ao mergulho, as feições são em sua maioria horizontais; quanto ao relacionamento e continuidade, os sinais são subparalelas e moderadamente contínuos a descontínuos. Essas características são compatíveis com pacotes arenosos, com estratificação plano-paralela à convoluta.

A radarfácies Rf3 (**Figura 6.2C**) é caracterizada em primeiro plano por feições inclinadas com comprimento superior a 10 m; sinais de amplitude moderadamente alta; configuração planar e ângulo de mergulho dos refletores maior que 6° . As feições são moderadamente contínuas a descontínuas e apresentam entre si um relacionamento oblíquo-tangencial. Em um segundo plano, ocorrem reflexões de amplitude baixa, forma planar, horizontal, paralelas e zonas com ausência de sinal. Essa interpretação é condizente com depósitos areno-argilosos com estratificação cruzada acanalada tangencial de grande porte.

Figura 6.2 - Padrões de reflexão nas seções GPR: A) Rf1: estratificação plano-paralela com presença de concreções lateríticas; B) Rf2: estratificação plano-paralela à convoluta; C) Rf3: estratificação cruzada tangencial acanalada; D) estratificação plano-paralela.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A radarfácies Rf4 (**Figura 6.2D**) corresponde a reflexões de amplitude média a baixa, descontínuas a caóticas e zonas com atenuação do sinal em profundidade. Esse aspecto está provavelmente relacionado a depósitos areno-argilosos com estratificação plano-paralela, os quais constituem as litologias mais recorrentes nos estratos sedimentares do Grupo Barreiras, na área investigada.

As características geológicas da área de estudo, juntamente com os padrões de reflexão identificados nas seções GPR, permitiram a proposição de duas unidades de radar (A e B) nos depósitos cenozoicos na Ilha do Maranhão. Essas unidades foram identificadas nos seis radargramas interpretados, a saber: 3 e 6, na região norte da área de estudo (**Figuras 6.3A e B**); 14 e 15, na porção leste (**Figuras 6.3C e D**); e 29 e 30, no compartimento oeste da área investigada (**Figuras 6.3E e F**). Os radargramas mencionados constituem partes representativas das seções integrais (**Figura 6.4**) com melhor contraste das feições interpretadas.

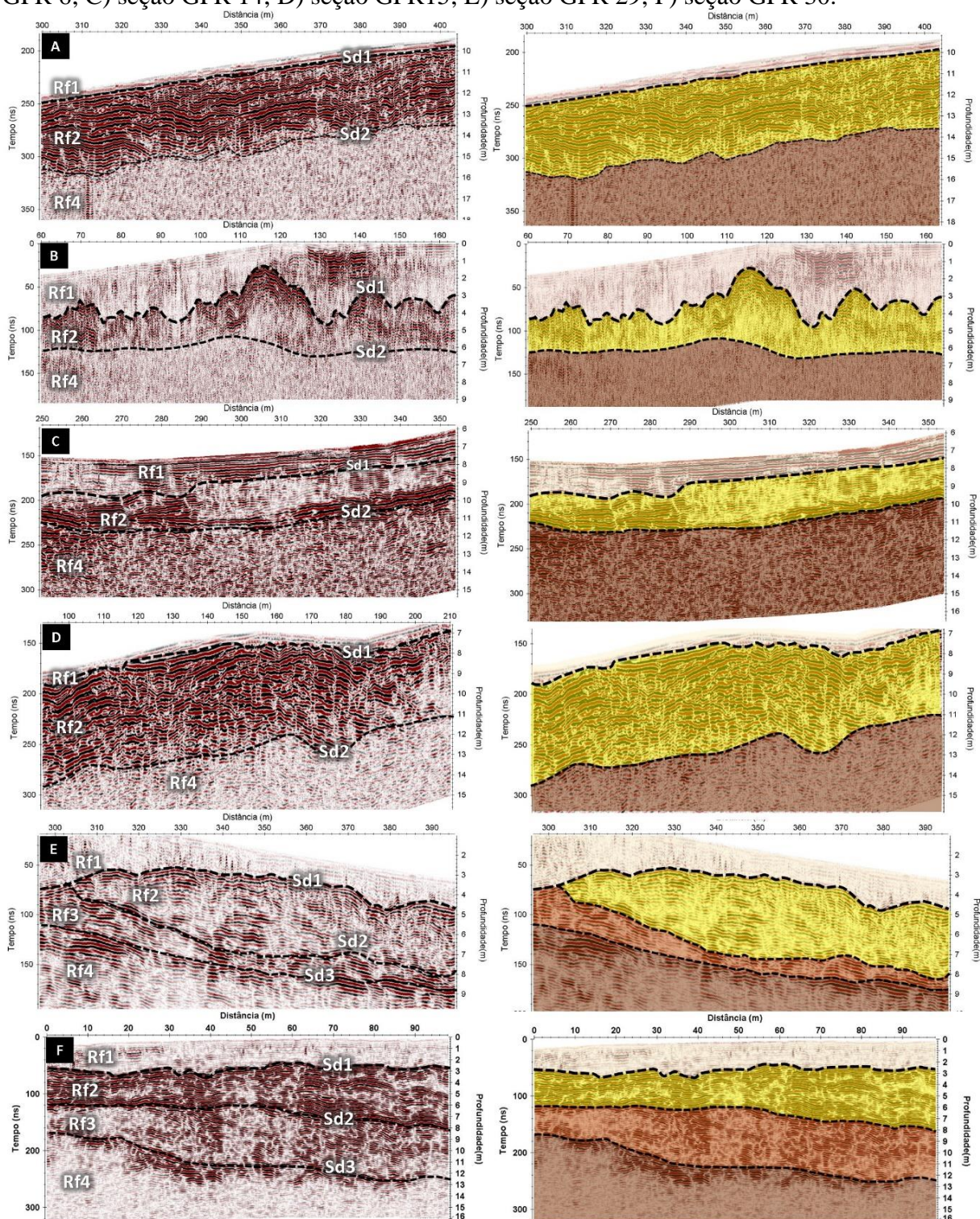
A unidade de radar “A” é constituída pela radarfácies Rf1; apresenta espessura de até 4 m (**Figura 6.3B**) e repousa discordantemente sobre a unidade B através da superfície de radar Sd1. Ela exhibe sinais de amplitude alta em todas as seções analisadas; continuidade lateral com truncamentos de reflexões subjacentes em padrão *Toplap* (**Figura 6.3D**); e topografia irregular, conformando feições associadas a antigos vales fluviais (**Figura 6.3B e E**). Estes aspectos conferem a superfície o caráter de uma descontinuidade erosiva.

A unidade de radar B é formada pelas radarfácies Rf2, Rf3 e Rf4 as quais foram relacionadas as subunidades B1, B2 e B3, respectivamente. A primeira, com espessura de até 4m, repousa subjacente a unidade A e sobrejacente a subunidade B3 através das superfícies Sd1 e Sd3 (**Figuras 6.3A, B, C e D**).

A subunidade B2 possui espessura também de até 4 m; repousa sobre a subunidade B1 e sob a subunidade B3 através das superfícies de radar Sd2 e Sd3, respectivamente. Seu padrão de reflexão associado à estratificação cruzada tangencial acanalada somente foi identificado nas seções da região oeste da área de estudo (**Figuras 6.3E e F**). A subunidade B3 encontra-se na base das seções analisadas na Ilha do Maranhão; possui espessura superior a 5 m (**Figura 6.3D**); acha-se sobrejacente em geral a subunidade B1 através da superfície Sd2; e exhibe padrão de reflexão caracterizado por forte atenuação em profundidade.

As unidades A e B descritas foram correlacionadas geologicamente aos Sedimentos Pós-Barreiras, do Neopleistoceno ao Holoceno, e aos depósitos do Grupo Barreiras, do Oligoceno/Mioceno ao Mioceno. Essa afirmação está apoiada nas investigações de Rossetti (2000), entre as cidades maranhenses de Alcântara e Guimarães na Bacia de São Luís, em que os depósitos da Sucessão Pirabas/Barreiras foram divididos em três unidades.

Figura 6.3 - Interpretação das feições de radar na Ilha do Maranhão: A) seção GPR 3; B) seção GPR 6; C) seção GPR 14; D) seção GPR15; E) seção GPR 29; F) seção GPR 30.



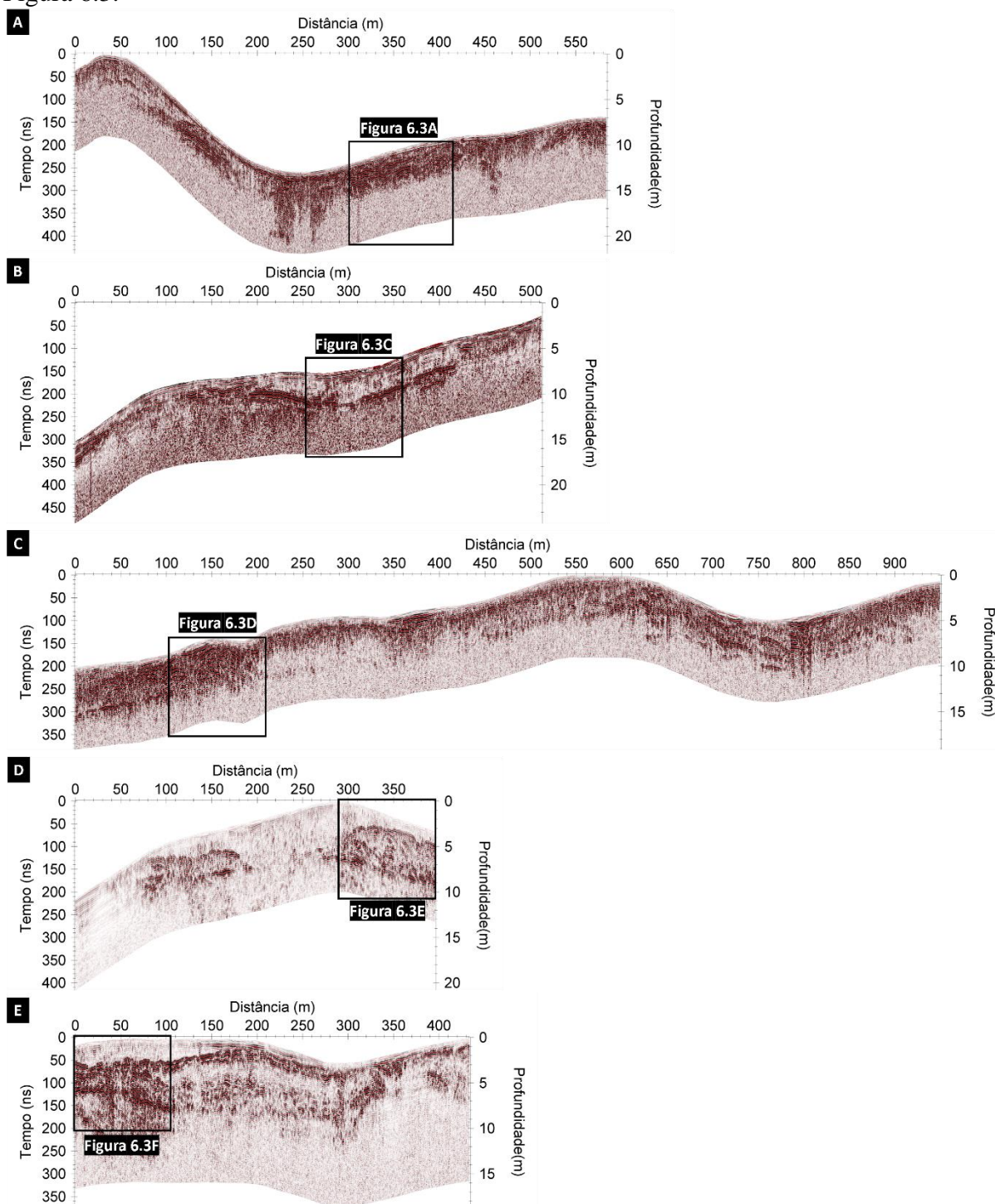
Unidade de radar A: Sedimentos Pós-Barreiras

- A** Depósitos areno-argilosos a argilosos, com estratificação plano-paralela
- Sd1 - Superfície descontinuidade erosiva
- Sd2 e Sd3: Superfícies de descontinuidade

Unidade de radar B: Grupo Barreiras

- B1** Depósitos arenosos com estratificação plano-paralela a convoluta
- B2** Depósitos areno-argilosos com estratificação cruzada
- B3** Depósitos areno-argiloso com estratificação plano-paralela

Figura 6.4 – Seções GPR investigadas: A) seção GPR 3; B) seção GPR 14; C) seção GPR15; D) seção GPR 29; E) seção GPR 30. Notar os trechos interpretados os quais são ilustrados na Figura 6.3.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

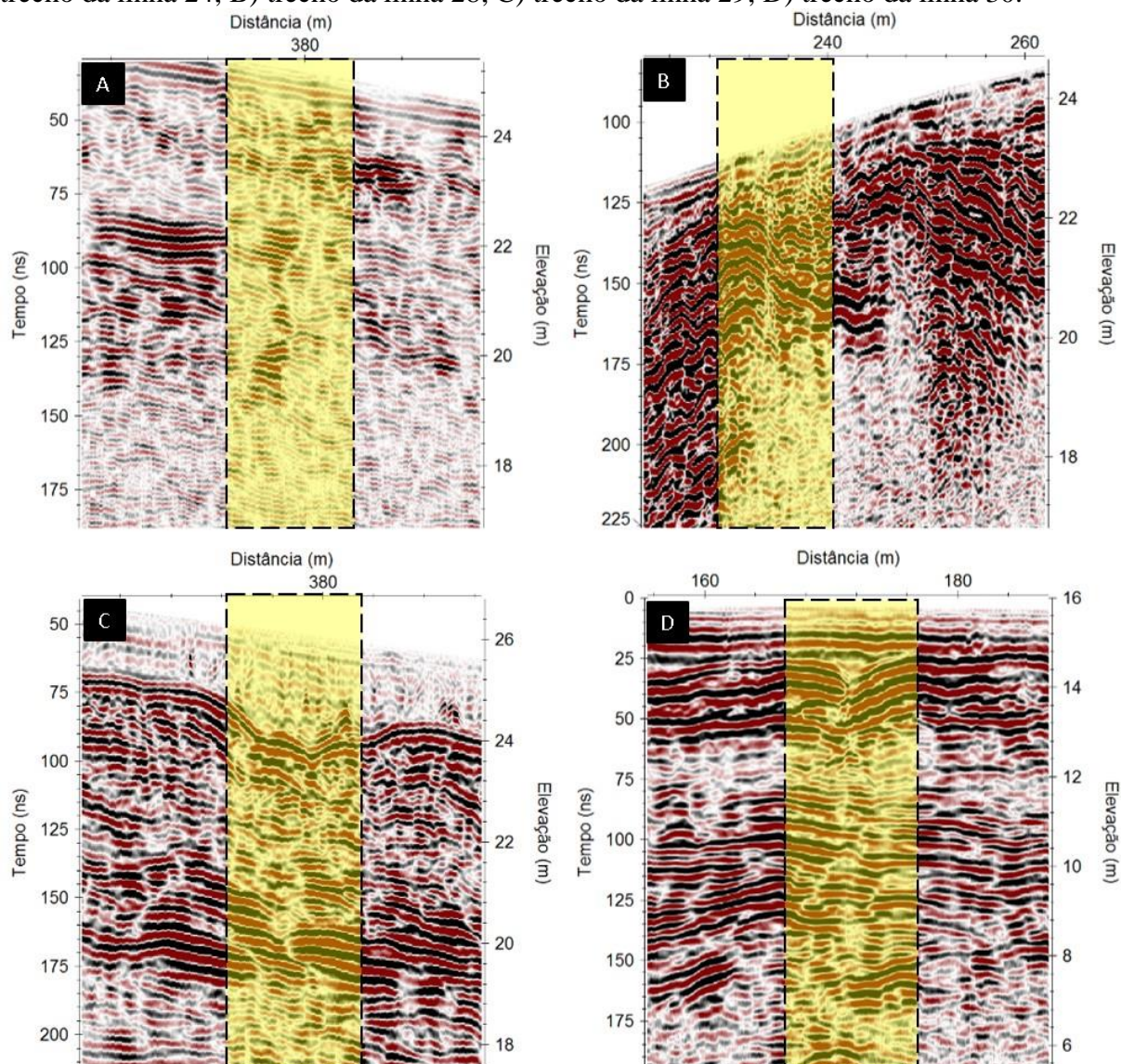
A unidade superior identificada por Rossetti (2000) encontra-se sotoposta a uma inconformidade intemperizada, com paleossolo laterítico, acentuado relevo erosional e extensão lateral quilométrica. Sua morfologia e constituição geológica podem explicar os sinais de alta amplitude associados à superfície de descontinuidade entre as unidades A e B, nas seções GPR, na Ilha do Maranhão, mais destacadas nas **Figuras 6.3B e E**. Nessa mesma região da Bacia de São Luís, os Sedimentos Pós-Barreiras foram datados por Rossetti *et al.* (2013b), por meio de luminescência opticamente estimulada, e apontaram deposição entre ao Neopleistoceno e o Holoceno, período semelhante ao obtido por Tatum *et al.* (2008) para esses depósitos no nordeste do Pará.

Nessa porção do Pará, os levantamentos GPR realizados por Rossetti e Góes (2001) levaram a identificação de quatro unidades de radar, sendo duas superiores e duas inferiores, associadas respectivamente aos Sedimentos Pós-Barreiras e a Sequência Pirabas/Barreiras. Segundo os autores, no limite entre as duas unidades, acha-se uma superfície de descontinuidade de até 600 km entre o litoral do Pará e Maranhão. A continuidade das investigações GPR nessa região conduziu Rossetti *et al.* (2001) ao reconhecimento de três unidades de radar nos Sedimentos Pós-Barreiras, com a inferior repousando sobre embasamento miocênico, marcado por discordância com forte relevo erosivo.

Na região leste da Ilha de Marajó, no litoral do Pará, Souza *et al.* (2014) definiram duas unidades de radar através de levantamentos GPR: a primeira foi relacionada aos depósitos da Formação Barreiras e a segunda aos Sedimentos Pós-Barreiras. Conforme os autores, elas se mostraram intercaladas por um horizonte irregular laterítico (em alguns locais, somente a 1 ou 2 m abaixo da superfície) associado nas seções de radar por reflexões de alta amplitude, contínuas, acompanhadas de reflexões hiperbólicas e sobrepostas por alguns metros por sinais caóticos de baixa amplitude.

Na Ilha do Maranhão, além dos padrões de reflexão descritos anteriormente, as seções GPR evidenciaram segmentos deslocados, lateralmente limitados por ausência de sinal, verticais a subverticais que se projetam para cima (**Figura 6.5**). Esses padrões foram relacionados a falhas e fraturas nos estratos do Grupo Barreiras, em concordância ao verificado por Rossetti *et al.* (2012b) no leste da Ilha de Marajó. Nessa região, depósitos cenozóicos com feições similares evidenciaram períodos de instabilidade tectônica, associada a movimentos *strike-slip* que produziram estruturas transtensivas e transpressivas durante o terciário.

Figura 6.5 - Descontinuidades verticais associadas a falhas e fraturas nas seções GPR: A) trecho da linha 24; B) trecho da linha 28; C) trecho da linha 29; D) trecho da linha 30.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A ascendência dessas feições na unidade relacionada aos Sedimentos Pós-Barreiras (**Figura 6.5**) é consistente com as reativações sin ou pós-deposicionais verificadas no Neopleistoceno-Holoceno. Estes aspectos foram tratados por Rossetti *et al.* (2011a, b), Bezerra *et al.* (2014), entre outros, ressaltando a tectônica e a eustasia como fatores controladores da acumulação sedimentar e da erosão de unidades neogênicas e quaternárias na margem continental brasileira.

Os movimentos neotectônicos são apontados como responsáveis pela esculturação do relevo moderno, evolução e desenvolvimento de sistemas deposicionais, entalhamento de corpos d'água, soerguimentos e subsidências, criando espaços para renovada sedimentação. Eles demonstram que as margens passivas não permaneceram tectonicamente inativas após a

ruptura continental, mas que experimentaram uma importante sismicidade ao longo do Quaternário (ROSSETTI *et al.* 2008; ALMEIDA-FILHO *et al.*, 2009; MAIA; BEZERRA, 2011; BURBANK; ANDERSON, 2011).

As descontinuidades verticais presentes nos depósitos cenozoicos apresentam uma série de implicações. Elas ilustram a ação da neotectônica na área de estudo e suas consequências nas movimentações de massa em áreas de risco de deslizamento; na presença de fluxos verticais que acentuam a recarga dos sistemas aquíferos pelas águas pluviais; e na contaminação da água subterrânea por fluidos provenientes de vazamentos em sistemas de esgotamento sanitário, sistemas subterrâneos de armazenamento de combustíveis e de resíduos sólidos.

CAPÍTULO 7

SÍNTESE HIDROGEOLÓGICA E CONTRIBUIÇÕES AO PROCESSO DE GESTÃO DO SISTEMA AQUÍFERO BARREIRAS-ITAPECURU NA ILHA DO MARANHÃO

A síntese hidrogeológica é a etapa da metodologia de pesquisa de água subterrânea de integração e convergência dos dados, visando atingir uma caracterização da unidade ou unidades aquíferas em estudo (FEITOSA; FEITOSA, 2008). A dimensão territorial empregada como base de integração foi Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, no domínio insular, costeiro e sedimentar da Ilha do Maranhão. Ela foi representada no ambiente dos sistemas de informação geográfica a partir de dados temáticos, cadastrais, modelos numéricos de terreno, imagens de satélites, dados censitários, entre outros.

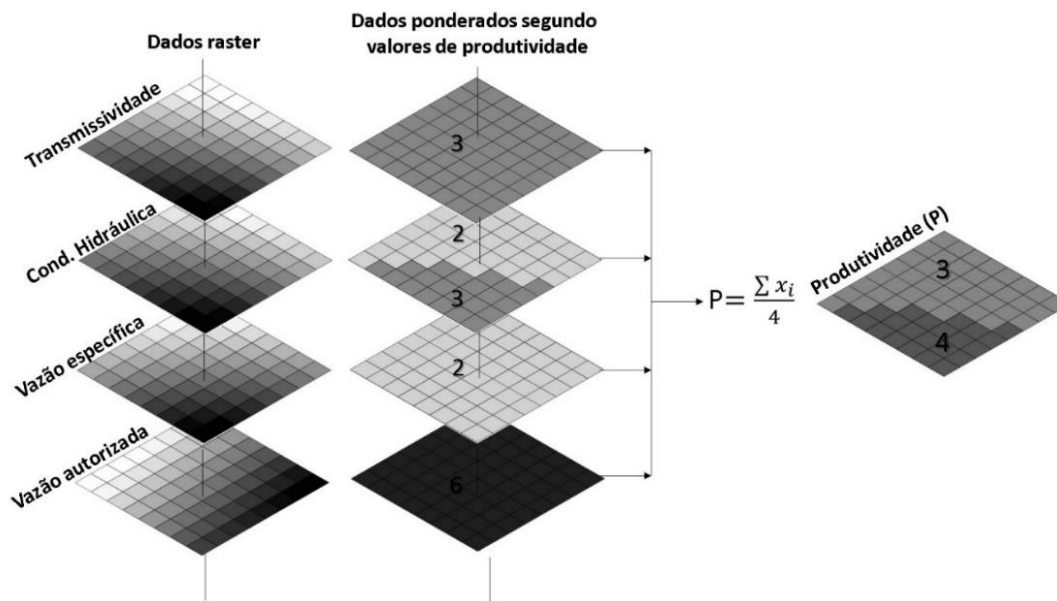
A estrutura de integração (SANTOS, 2004) foi baseada nos dados raster de transmissividade, condutividade hidráulica, vazão específica e vazão outorgada, derivados dos registros de poços tubulares na área estudo, e no modelo de produtividade de aquífero de Diniz *et al.* (2014), o qual é fundamentado nos princípios da Cartografia Hidrogeológica de Struckmeier e Margat (1995).

No caso em estudo, a vazão autorizada foi empregada em substituição a vazão de teste. Isso se deu em virtude de o mapa síntese de produtividade gerado delinear, de forma mais coerente, regiões da Ilha do Maranhão retratadas na literatura como produtoras de água subterrânea e como de baixa vocação hidrogeológica. Entre as primeiras, estão as do Paciência e Santo Antônio, descritas por Acqua-Plan (1972), Rodrigues *et al.* (1994), Sousa (1997), e no segundo caso encontra-se a porção noroeste da área de estudo, investigada por Soares (2004), com histórico de salinização de poços tubulares por intrusão salina.

Nesse sentido, cada célula dos dados raster, de 30 x 30m de resolução espacial, foi ponderada segundo uma escala de produtividade distribuída entre as categorias muito alta (1), alta (2), moderada (3), baixa (4), muito baixa (5) e pouco produtiva ou não aquífera (6). A configuração final da produtividade de uma determinada célula foi determinada a partir da média aritmética dos temas individuais (**Figura 7.1**). Os conjuntos espaciais definidos permitiram o reconhecimento de áreas estratégicas compatíveis ao Estudo Preliminar e de Reconhecimento, as quais foram analisadas segundo as aspectos geoambientais, geomorfométricos, hidrogeológicos e de saneamento ambiental. Além disso, é apresentada a avaliação das reservas hídricas subterrâneas, a definição das áreas de recarga e descritas as

contribuições ao processo de gestão do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, na Ilha do Maranhão.

Figura 7.1 – Integração dos dados raster de transmissividade, condutividade hidráulica, vazão específica e vazão autorizada para composição das classes de produtividade de aquífero.



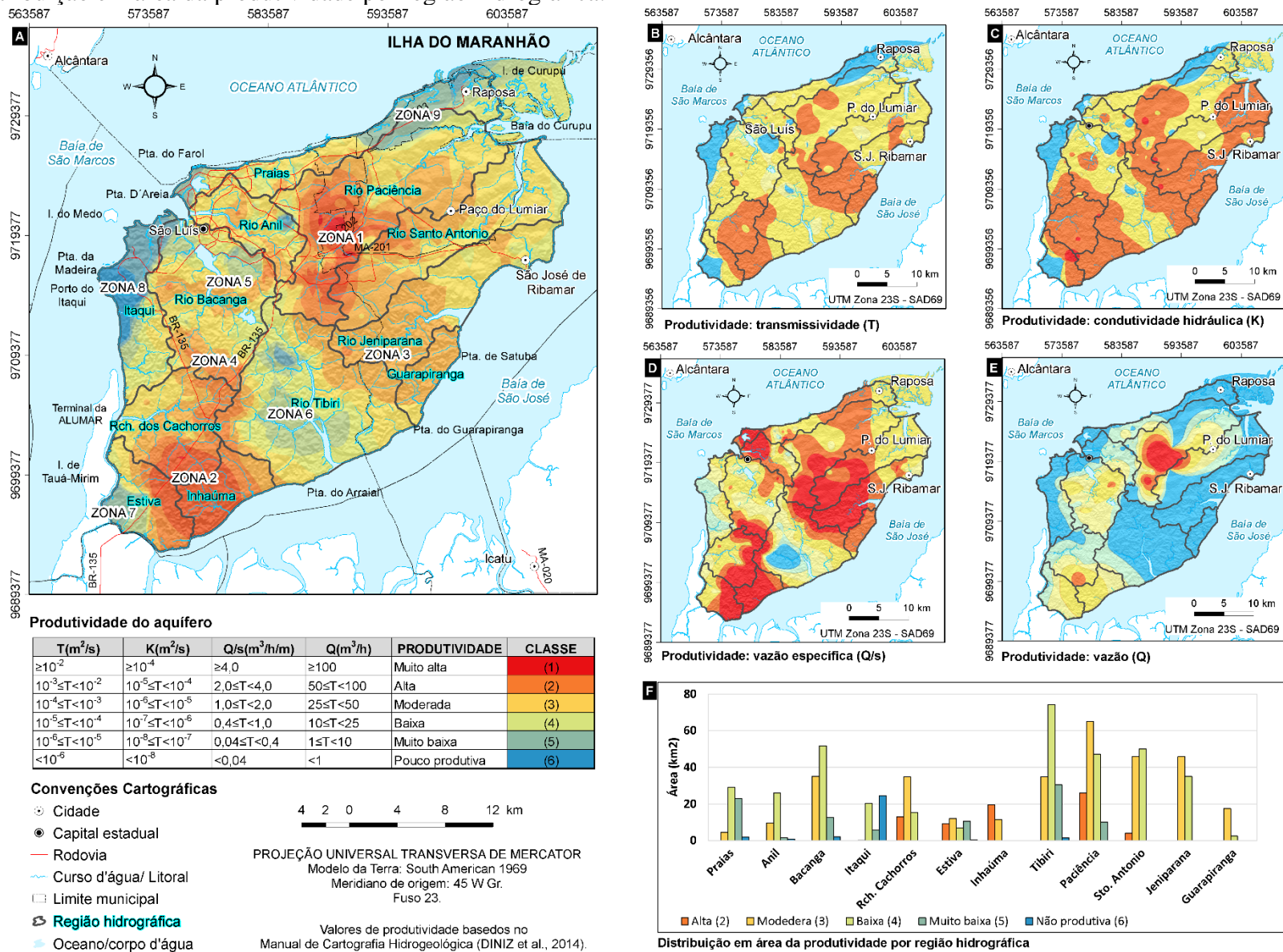
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

7.1 Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru

A **Figura 7.2a** ilustra o mapa síntese de produtividade para o Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, criado a partir da média dos valores de produtividade dos parâmetros transmissividade (**Figura 7.2b**), condutividade hidráulica (**Figura 7.2c**), vazão específica (**Figura 7.2d**) e vazão outorgada (**Figura 7.2e**). Em geral, a categoria alta (2) ocupa aproximadamente 72 km² da Ilha do Maranhão e corresponde a 8% do seu território. As categorias moderada (3) e baixa (4) são as mais frequentes na área de estudo, abrangem em torno de 317 km² e 379 km², respectivamente, e respondem por 42% e 35% da área investigada. As feições muito baixa (5) e não produtiva (6) envolvem 104 km² e 33 km² e dizem respeito a 11% e 4% da área aludida.

Em relação à distribuição da produtividade por região hidrográfica (**Figura 7.2f**), os maiores percentuais da categoria alta (2) estão localizados nas regiões do Paciência (26%), Inhaúma (20%), Riacho dos Cachorros (18%), Estiva (13%) e Santo Antônio (6%). A categoria moderada (3) está presente sobretudo na região hidrográfica do Paciência (21%), seguida pelas regiões do Santo Antônio (14%), Jeniparana (14%), Riacho dos Cachorros (11%), Bacanga (11%) e Tibiri (11%).

Figura 7.2 – Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru (a) na Ilha do Maranhão: b) produtividade da transmissividade; c) produtividade da condutividade hidráulica; d) produtividade da vazão específica; e) produtividade de vazão autorizada; f) distribuição em área da produtividade por região hidrográfica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A categoria baixa (4) ocorre principalmente na região do Tibiri (20%) e secundariamente nas regiões do Bacanga (14%), Santo Antônio (13%), Paciência (12%) e Jeniparana (9%). Por fim, a categoria muito baixa (5) é mais expressiva nas regiões do Tibiri (29%) e das Praias (22%) enquanto a não produtiva se destaca na região do Itaqui (74%).

Essa descrição evidencia a vocação hidrogeológica moderada a baixa do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, na Ilha do Maranhão, o que retrata um comportamento mediano entre as potencialidades individuais dos aquíferos. Na Província do Parnaíba, o aquífero Itapecuru apresenta potencial fraco (LEAL, 1977), médio a fraco (CPRM, 2012) e na área de estudo, satisfatório (RODRIGUES *et al.*, 1994). O aquífero Barreiras, por outro lado, na Ilha do Maranhão é relatado como de potencial hidrogeológico elevado (RODRIGUES *et al.* (1994), sobretudo pela recarga do rio Paciência e das precipitações pluviométricas.

Do exposto, configuram-se na Ilha do Maranhão áreas de produtividade alta (2) a moderada (2), nas suas porções centro-norte e sul, e muito baixa (5) a pouco produtiva (6), no trecho central e na faixa litorânea. Na primeira situação, destacam-se cinco zonas.

- Zona 1: dos altos cursos das regiões hidrográficas do Paciência e Santo Antônio;
- Zona 2: do centro-leste da região hidrográfica do Riacho dos Cachorros, leste da Estiva e de Inhaúma;
- Zona 3: do centro-oeste da região hidrográfica do Jeniparana e de Guarapiranga;
- Zona 4: dos divisores topográficos entre as regiões hidrográficas do Tibiri, Riacho dos Cachorros e do Bacanga;
- Zona 5: da porção central da região hidrográfica do Bacanga.

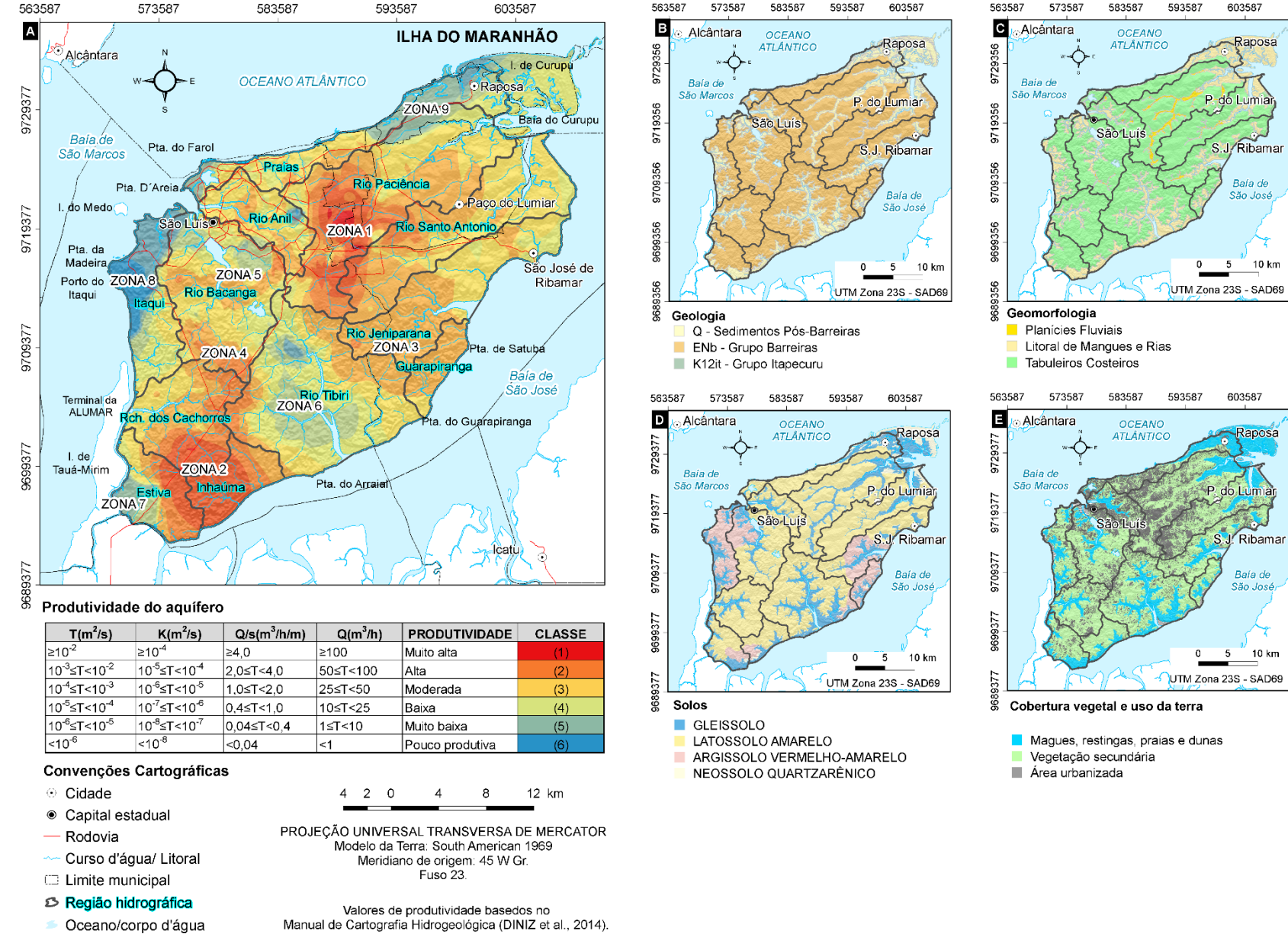
Em relação a segunda situação, assinalam-se quatro zonas:

- Zona 6: da porção central da região hidrográfica do Tibiri;
- Zona 7: do setor centro-oeste da região hidrográfica da Estiva;
- Zona 8: da porção centro-norte da região hidrográfica do Itaqui;
- Zona 9: da porção leste da região hidrográfica das Praias.

O panorama geoambiental e geomorfométrico da produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru é exposto nas **Figura 7.3** e **7.4**, a partir das quais são abordados os seguintes aspectos:

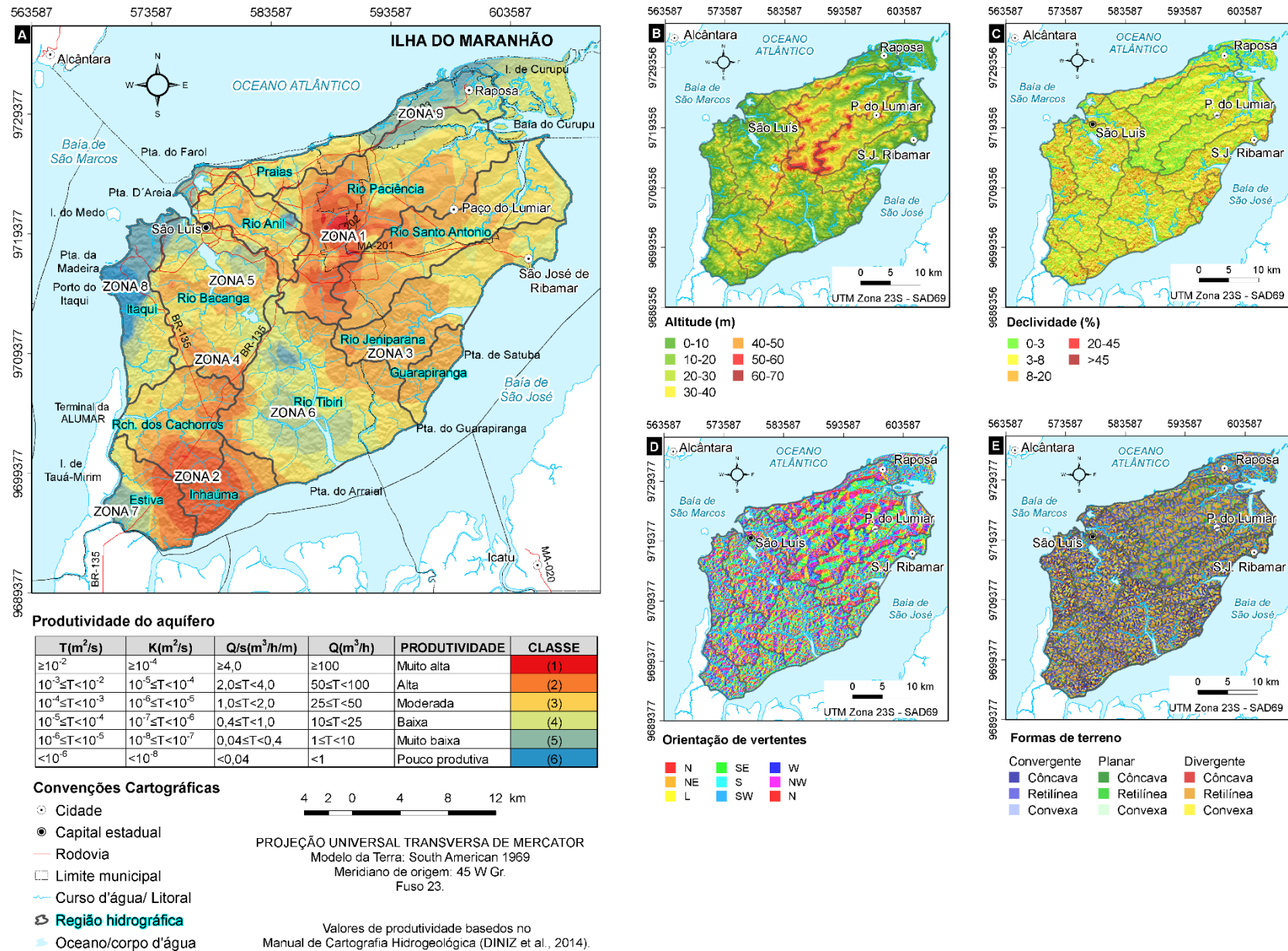
- a) em geral, as zonas possuem como unidade litoestratigráfica de cobertura os sedimentos oligo-miocênicos do Grupo Barreiras (**Figura 7.3b**), de maior espessura na Zona 1, afinando em direção às porções litorâneas, onde afloram os depósitos cretáceos do Grupo Itapecuru, principalmente na Zona 8;

Figura 7.3 – Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão (a) versus contextualização geoambiental: b) geologia; c) geomorfologia; d) solos; e) cobertura vegetal e uso da terra.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 7.4 – Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão (a) versus parâmetros geomorfológicos: b) altimetria; c) declividade; d) orientação de vertentes; e) formas de terreno.



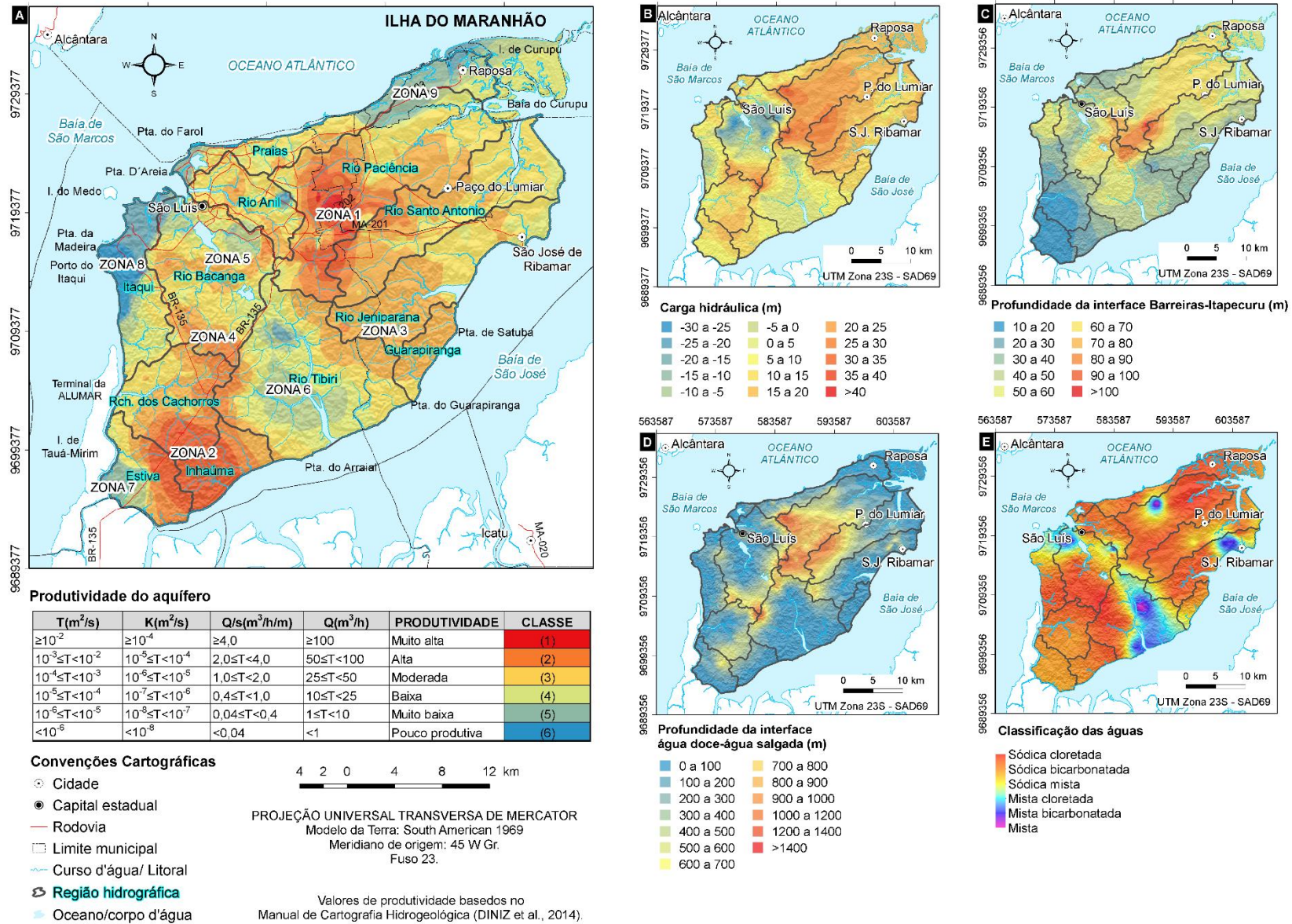
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

- b) os Tabuleiros Costeiros Litorâneos (**Figura 7.3c**), com elevações acima de 50m (**Figura 7.4b**), modelado plano a suave ondulado (**Figura 7.4c**), vertentes orientadas à noroeste e sudeste (**Figura 7.4d**) e formas de terreno convergentes e côncavas (**Figura 7.4e**) são frequentes na Zona 1;
- c) nas zonas 2, 3 e 4, os Tabuleiros Costeiros Litorâneos exibem um aspecto mais dissecado, ondulado a forte ondulado e com predomínio de formas divergentes e convexas. Nas zonas 6, 7, 8 e 9, as feições concernentes ao Litoral de Mangues e Rias são frequentes;
- d) os sedimentos cenozóicos do Grupo Barreiras, em sua maioria, são capeados pelos Latossolos Amarelos (**Figura 7.3d**). Os Argissolos Vermelho-Amarelos são mais recorrentes nas Zonas 3 e 8 e os Gleissolos, nos domínios do Litoral de Mangues e Rias, são mais frequentes nas Zonas 6, 8 e 9;
- e) as áreas urbanizadas (**Figura 7.3e**) exibem maior densidade na Zona 1, reduzindo nas Zonas 5, 6, 8 e 9, onde as feições associadas à vegetação secundária, mangues, restingas e praias são mais recorrentes.

Em relação à conjuntura dos parâmetros hidráulicos, dimensionais e hidroquímicos, expostos na **Figura 7.5**, são levantadas as seguintes questões:

- a) a espessura dos sedimentos cenozóicos é maior na porção centro-norte da Ilha do Maranhão, na Zona 1, onde se registram, conforme dados de poços tubulares cadastrados, cargas hidráulicas acima de 20 m (**Figura 7.5b**), se configurando como a principal área de recarga do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão. Secundariamente, as Zonas 3 e 4 também assinalam valores de carga hidráulica maior ou igual 20 m;
- b) os valores de carga hidráulica negativos são verificados a jusante da Zona 5 e na Zona 6. Eles indicam que a cota da boca do poço tubular é menor que a do nível estático. Como a referência para as altitudes ortométricas é o geoide, o qual é materializado pelo nível médio do mar através dos continentes, valores negativos de carga hidráulica advertem para situação em que nível estático se encontra abaixo do nível médio do mar, elevando os riscos de salinização dos poços tubulares pela ação das marés;
- c) a profundidade da interface entre os depósitos sedimentares dos Grupos Barreiras e Itapecuru é maior na porção central da Ilha do Maranhão, chegando ao patamar de 100 m nas Zonas 1 e 3 (**Figura 7.5c**), reduzindo em direção as regiões litorâneas, onde afloram os depósitos cretáceos do Grupo Itapecuru, como na Zona 8;

Figura 7.5 – Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão (a) versus parâmetros hidrogeológicos; b) carga hidráulica; c) profundidade da interface Barreiras-Itapecuru; d) profundidade da interface água doce/água salgada; e) assinatura hidroquímica da água.



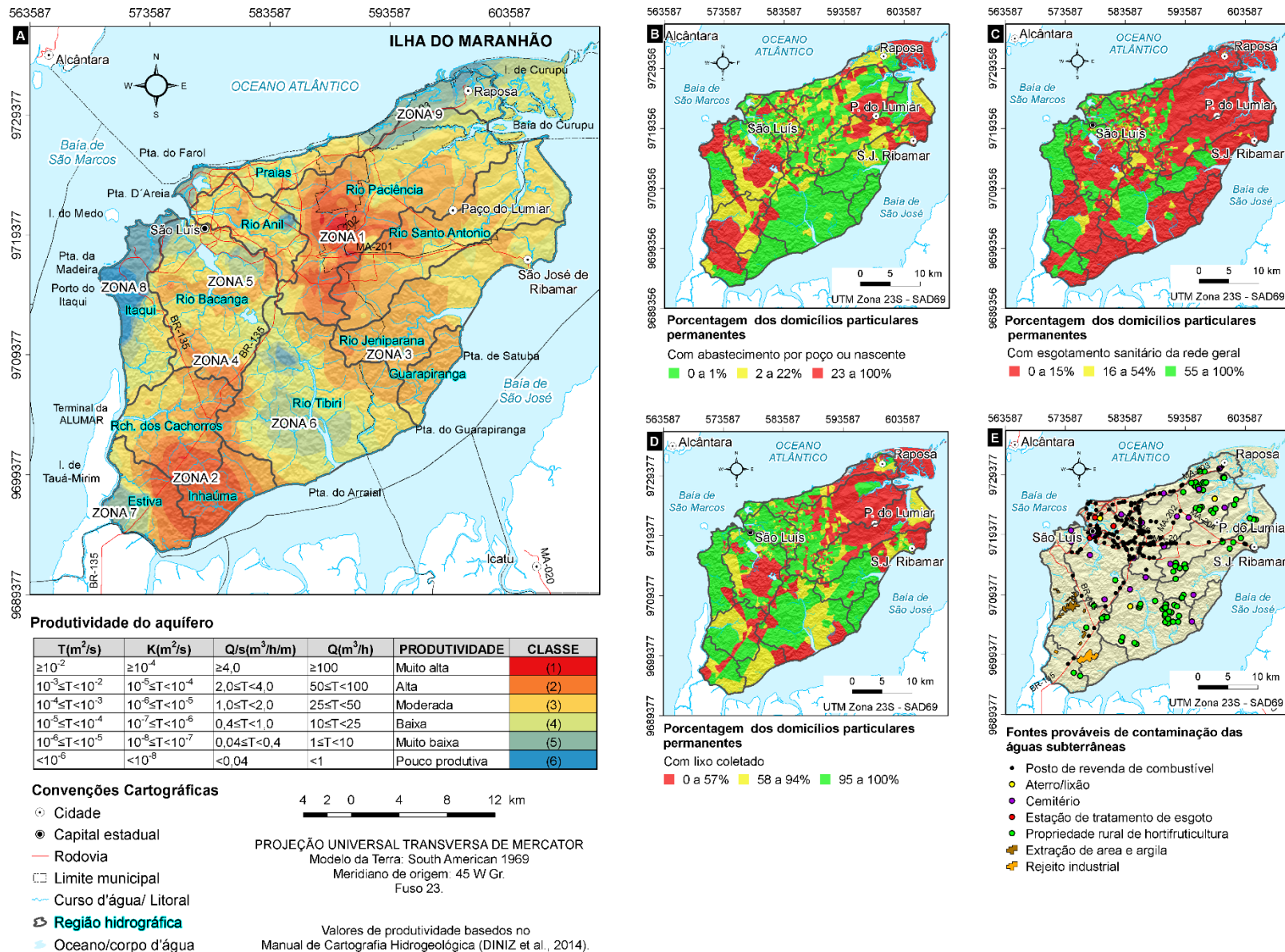
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

- d) a interface água doce-água salgada (**Figura 7.5d**) é maior na porção central da área de estudo, conforme princípio de Ghyben-Herzberg, atingindo valores acima de 1.000m, nas Zonas 1 e 4, e entre 100 e 400 m, na faixa litorânea e nos estuários dos rios da Ilha do Maranhão, como nas Zonas 6, 7, 8 e 9;
- e) a assinatura hidroquímica das águas subterrâneas (**Figura 7.5e**) é em geral sódica-cloretada a sódica bicarbonatada em todas as Zonas, com exceção da 6 e 8, as quais exibem fácies mista cloretada a mista bicarbonatada.

Quanto à situação das áreas de produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru e o quadro do saneamento ambiental na Ilha do Maranhão (**Figura 7.6**), são apresentados os seguintes aspectos:

- a) com exceção das Zonas 3 e 6, as demais Zonas estão localizadas nas porções da Ilha do Maranhão onde a proporção dos domicílios particulares permanentes com abastecimento por poço ou nascente é mais elevada (**Figura 7.6b**);
- b) ressalvando alguns recortes na porção central da Ilha do Maranhão, nas demais regiões, a proporção dos domicílios particulares permanentes com esgotamento sanitário via rede geral atinge entre 0 a 15% (**Figura 7.6c**). Neste caso, a destinação final dos efluentes domésticos se dá pelo uso de fossas sépticas, valas ou outras formas de esgotamento, que acentuam o potencial de contaminação das águas subterrâneas por efluentes domésticos. Esse cenário é o que o mais explica as concentrações de nitrato acima de 10 mg/ L na área de estudo;
- c) quanto aos resíduos sólidos, a proporção dos domicílios permanentes com lixo coletado é menor na região nordeste da área de estudo (**Figura 7.6d**). A Zona 1, de maior concentração populacional, exhibe parcela significativa de domicílios não atendidos por coleta, o que acarreta o descarte inadequado no terreno, elevando o potencial de infiltração de líquidos resultantes da decomposição dos resíduos acumulados;
- d) em relação às fontes prováveis de contaminação das águas subterrâneas, a maior concentração está na porção centro-norte da área de estudo (**Figura 7.6e**). A Zona 1 é a que exhibe maior variabilidade e densidade de fontes, entre elas, postos de revenda de combustível, cemitérios e propriedades rurais. A Zona 2 se destaca quanto à presença de área de rejeito industrial, a Zona 3 pela densidade de propriedades rurais e a Zona 4 pela presença de áreas de mineração de areia e argila.

Figura 7.6 – Produtividade do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão (a) versus saneamento ambiental: b) abastecimento por poço ou nascente; c) esgotamento sanitário via rede geral; d) coleta de lixo; e) fontes prováveis de contaminação da água subterrânea.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

7.2 Avaliação das reservas de água subterrânea

O uso do termo avaliação das reservas em lugar de cálculo, recomendado por Feitosa *et al.* (2008b), é justificado pela complexidade geológica dos reservatórios subterrâneos; pela dificuldade que eles oferecem a uma compreensão satisfatória das suas geometrias; e pela variação de suas propriedades hidrodinâmicas. Esse procedimento é um mecanismo importante de conhecimento da potencialidade do sistema aquífero e do processo de gestão das águas subterrâneas.

As reservas renováveis ou reguladoras correspondem ao volume acumulado no aquífero em função da porosidade efetiva ou do coeficiente de armazenamento (COSTA, 2000); possuem tempo de circulação local, geralmente, associadas a um ciclo hidrológico anual (CAMPOS *et al.*, 2007); e representam o comportamento mediano das variações sazonais do nível da água (FEITOSA *et al.* 2008b). Entre os métodos existentes para estimativa, foi empregado o das variações potenciométricas sazonais (**Equação 7.1**) cujas variáveis envolvidas são a área de ocorrência do aquífero (A), a porosidade efetiva (η_e) e a variação anual do nível freático (Δh).

$$R_r = A \cdot \eta_e \cdot \Delta h \quad (7.1)$$

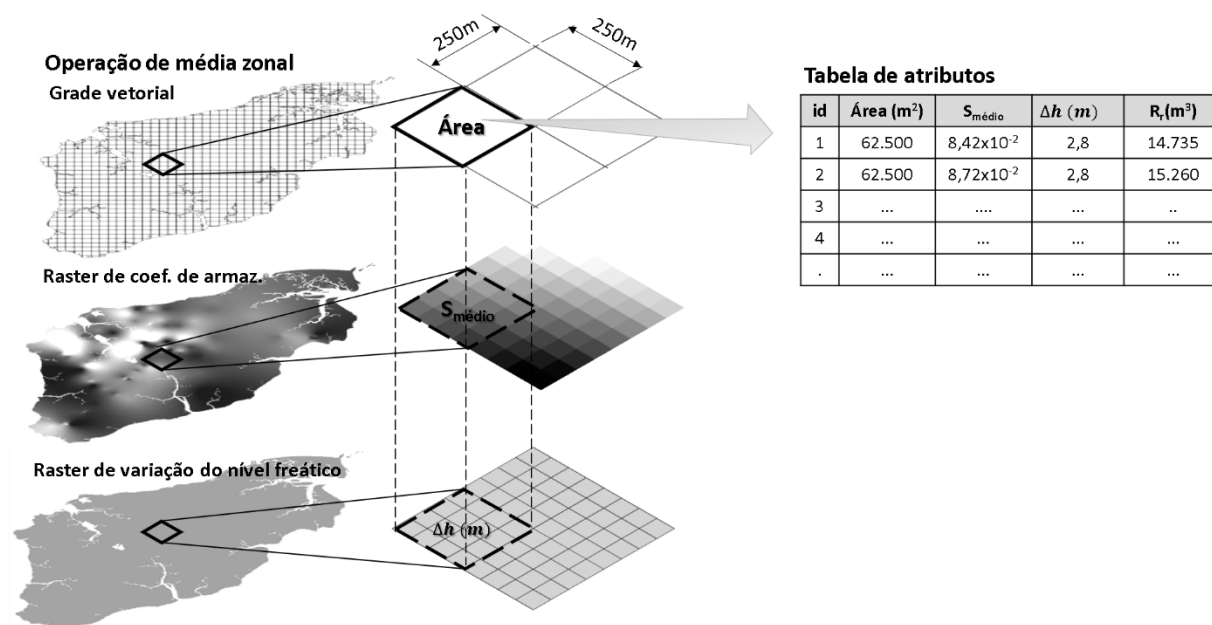
A **Equação (7.1)** foi implementada no ambiente SIG, em que a área de ocorrência do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, supostamente igual à do território da Ilha do Maranhão, foi discretizada segundo uma grade vetorial com células de 250 x 250 m (**Figura 7.7**). No intuito de se representar as variações espaciais das reservas renováveis e dada a falta de registros de porosidade efetiva para os depósitos miocênicos na área de estudo, a variável em destaque foi aproximada pelos valores de coeficiente de armazenamento (S).

Os registros de coeficiente de armazenamento são resultantes do ajuste dos dados de testes de bombeamento dos poços tubulares à solução de Hantusch e Jacob (1995), no AquiferTest Pro (vide item 5.3). A média na área de estudo é de $2,49 \times 10^{-2}$, abaixo dos valores de porosidade efetiva observados na literatura, tais como os descritos a seguir, o que implica em uma estiva conservadora para as reservas renováveis.

Os valores de porosidade efetiva nos depósitos miocênicos em outros ambientes hidrogeológicos são de 5%, no Aquífero Barreiras, no Baixo Rio Doce, Espírito Santo, (GONÇALVES; VIEIRA, 2018), na Região Metropolitana de Recife, Pernambuco (MONTEIRO *et al.*, 2002) e na Região Metropolitana de Fortaleza (LEMOS, 2018); de 6 a

15%, na Formação Barreiras em Maceió, Alagoas (ANA, 2011); e de 10 e 15% no Sistema Aquífero Dunas-Barreiras, em Natal, Rio Grande do Norte (MELO, 1995; MANOEL FILHO; CASTRO, 2002).

Figura 7.7 - Espacialização das reservas renováveis na área de estudo através da operação de média zonal em ambiente SIG.

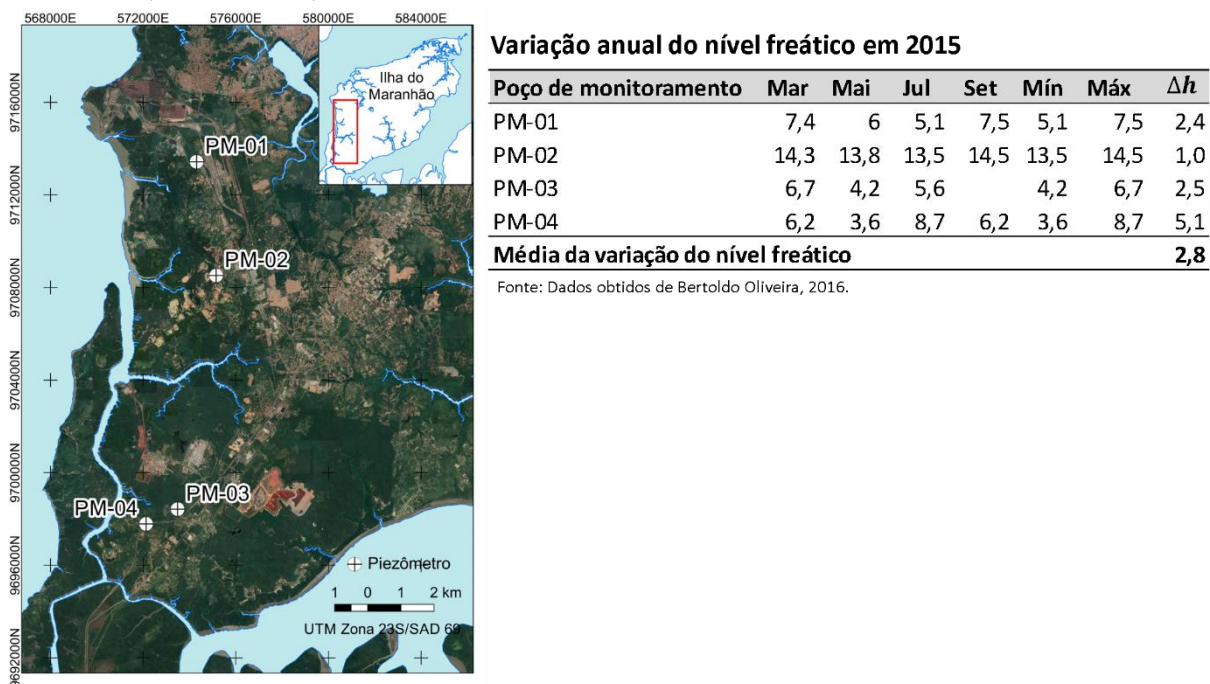


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Quanto à variação anual do nível freático (Δh), sua avaliação se deu através dos dados sazonais de poços de monitoramento (piezômetros) construídos pela Universidade Federal do Maranhão e coletados por Bertoldo Oliveira (2016), nas datas de 18/03/2015, 26/05/2015, 14/07/2015 e 15/09/2015. Os poços de monitoramento estão localizados nas localidades de São Benedito, Porto Grande, Inhaúma e Estiva (**Figura 7.8**). Para os 4 registros, foram definidos os valores máximo e mínimo, calculadas as variações de nível freático e a média geral para o ano em alusão a qual foi estimada em 2,8m.

Considerando os valores mencionados acima, a reserva renovável total na Ilha do Maranhão foi estimada em: $R_r = 912 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot 2,49 \times 10^{-2} \cdot 2,8 \text{ m} = 63.584.640 \text{ m}^3 = \mathbf{0,064 \text{ km}^3/\text{ano}}$. Apesar das incertezas inerentes aos dados hidrogeológicos, o mapa de reservas renováveis (**Figura 7.9b**) evidencia os setores das regiões hidrográficas do Bacanga, Tibiri, Riacho dos Cachorros, Inhaúma e Estiva com registros superiores a 30.000 m³/ano, enquanto nas demais regiões predominam reservas inferiores a esse valor.

Figura 7.8 – Localização e variação do nível freático nos poços de monitoramento em 18/03/2015, 26/05/2015, 14/07/2015 e 15/09/2015.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados de poços de monitoramento de poços de Bertoldo Oliveira, 2016.

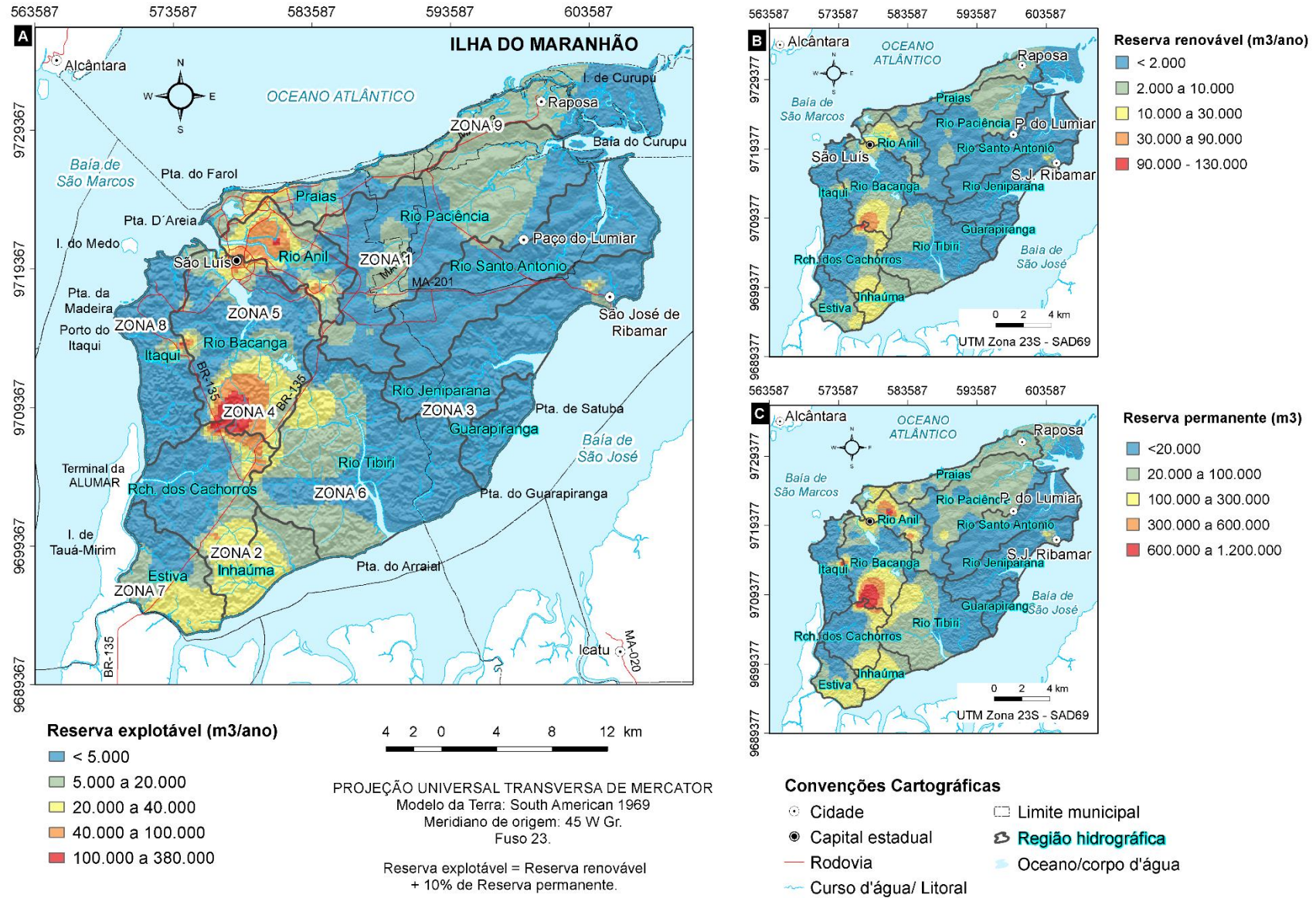
Esses resultados podem ser explicados pelo fato da região centro-sul da Ilha do Maranhão, em geral, concentrar os menores valores de carga hidráulica quando comparados aos da região centro-norte (>20 m), principalmente no Tabuleiro Central do Tirirical. Dessa forma, os influxos de águas meteóricas nos meses de janeiro a junho na porção centro-norte seriam conduzidos para a centro-sul nos meses subsequentes.

Segundo Costa (2000), as reservas permanentes correspondem ao volume armazenado no aquífero, abaixo da posição mínima do nível freático, não sujeito às suas variações sazonais, e função da porosidade efetiva ou do coeficiente de armazenamento. Conforme Feitosa *et al.* (2008b), sua estimativa considera as reservas de saturação e de pressão relacionadas, respectivamente, aos aquíferos livre ($R_{sat, livre}$) e confinado ($R_{pres. conf.}$).

A **Equação (7.2)** resume o exposto, em que (A) é área de ocorrência do aquífero; (n_e) é a porosidade efetiva; (H_0) é espessura saturada do aquífero livre, abaixo da posição mínima do nível freático; (S) é o coeficiente de armazenamento; e (b) é a espessura saturada do aquífero confinado.

$$R_p = R_{sat, livre} + R_{pres., conf.} = A \cdot n_e \cdot H_0 + A \cdot S \cdot b \quad (7.2)$$

Figura 7.9 – Avaliação das reservas de água do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão: a) reserva explotável; b) reserva renovável; c) reserva permanente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

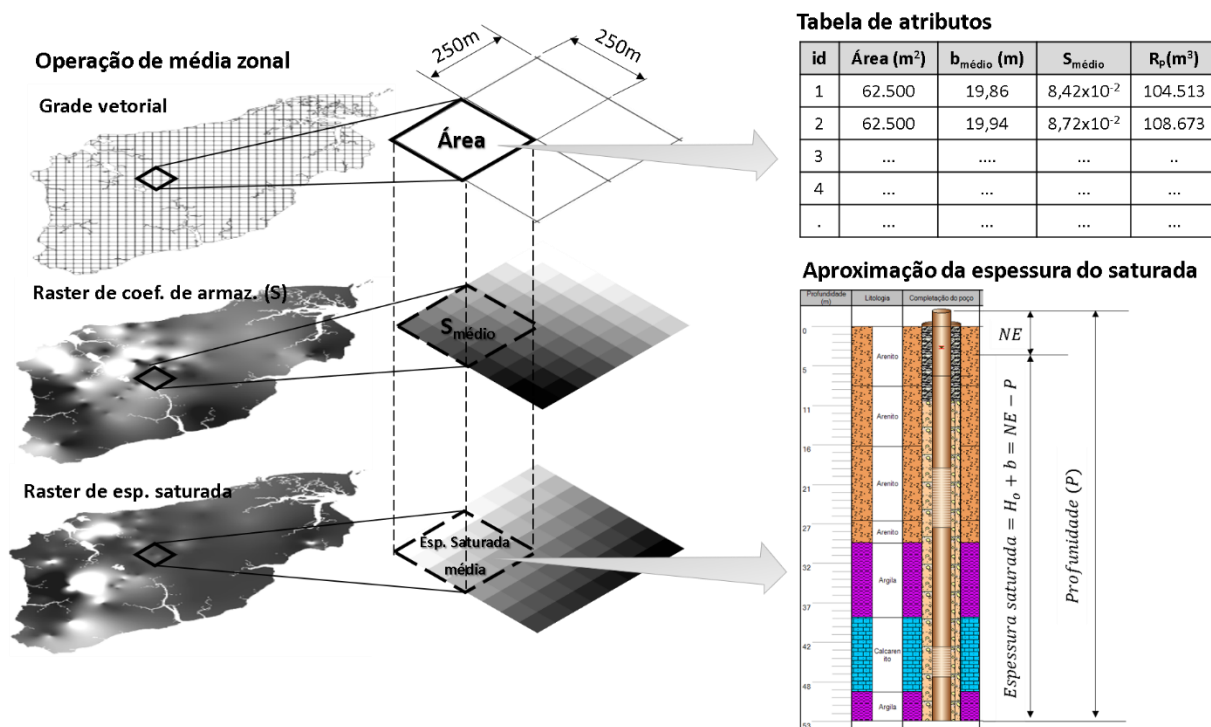
Para a estimativa das reservas permanentes no Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru foi considerado o somatório das reservas de saturação do aquífero livre e de pressão do aquífero confinado (**Equação 7.3**) e as seguintes suposições:

- a área de contribuição dos aquíferos livre e confinado foi aproximada pela área do território da Ilha do Maranhão;
- os valores de porosidade efetiva (n_e) foram aproximados pelos de coeficiente de armazenamento (S). Com isso, na **Equação (7.3)**, assumiu-se que $n_e = S$;
- a espessura saturada ($H_0 + b$) foi aproximada pela diferença entre profundidade do poço (P) e a do nível estático (NE) (**Figura 7.10**).

$$R_p = A \cdot n_e \cdot H_0 + A \cdot S \cdot b = A \cdot S \cdot (H_0 + b) = A \cdot S \cdot (P - NE) \quad (7.3)$$

A **Equação (7.3)** foi representada em ambiente SIG (**Figura 7.10**), a partir da grade vetorial com células amostrais de 250 x 250 m e dados raster de coeficiente de armazenamento e de espessura saturada. Sobre eles foram aplicadas operações zonais e os resultados concernentes a cada área amostral, agrupados em intervalos de classes, produzindo-se o mapa temático de reservas permanentes (**Figura 7.9c**).

Figura 7.10 - Espacialização das reservas permanentes na área de estudo através da operação de média zonais em ambiente SIG.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Analisando-se os valores médios das variáveis da **Equação (7.3)**, as reservas permanentes para o Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão foram estimadas em $R_p = 912 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot 2,49 \times 10^{-2} \cdot 57 \text{ m} = 1.294.401.600 \text{ m}^3 = \mathbf{1,294 \text{ km}^3}$. Sua distribuição na área de estudo é mais expressiva na porção centro-sul, entre as regiões hidrográficas do Bacanga, Riacho dos Cachorros, Tibiri, Inhaúma e Estiva, onde se verificam valores acima de 100.000 m³. Na porção centro-norte, constata-se o aumento das reservas permanentes em relação às renováveis, nas regiões hidrográficas do Paciência e das Praias, onde os valores acham-se entre 20.000 a 100.000 m³.

Segundo Feitosa *et al.* (2008b), as reservas exploráveis correspondem a vazão média anual extraída artificialmente do aquífero sem que se produzam efeitos indesejáveis, de forma a garantir a gestão racional do sistema aquífero. Esta definição está relacionada ao conceito de vazão de segurança (do inglês *safe yield*). Campos *et al.* (2007) descreve três abordagens para a estimativa das reservas exploráveis: a) como uma porcentagem das reservas renováveis; b) como equivalentes às reservas renováveis; c) como uma somatória das reservas renováveis a uma porcentagem das reservas permanentes (**Equação 7.4**).

$$R_e = R_r + \%R_p \quad (7.4)$$

Segundo Costa (2008) e Feitosa *et al.* (2008b), essa última abordagem define a potencialidade do aquífero. O percentual das reservas permanentes depende de fatores conhecidos e quantificados mediante o monitoramento das respostas do aquífero ao bombeamento. Trata-se, portanto, de uma variável de decisão, com reavaliações concomitantes ao estágio de conhecimento do aquífero. Segundo Campos *et al.* (2007), a porcentagem das reservas permanentes é função do tipo e das características do aquífero, de suas fácies geológicas, do grau de circulação hídrica no sistema e de variáveis de decisão do ponto de vista de custos e benefícios.

As porcentagens adotadas para o cômputo das reservas exploráveis variam de acordo com as características dos aquíferos. Corrêa (2011) relatou variação entre 0 a 40%: com valores mínimos ou nulos aplicáveis a áreas com grande declividade, solos rasos e balanço hídrico desfavorável; e máximos para sistemas aquíferos com balanço hídrico favorável. Nesse sentido, foram observadas porcentagens de 10% (COSTA, 2000; GASPAR, 2006; OLIVEIRA, 2019), entre 5 a 12% (CAMPOS *et al.*, 2007), 6 e 8% (PAULA, 2015), 8 a 15% (SILVA, 2013), entre outros. Para o Aquífero Barreiras, as porcentagens empregadas foram de 0,2% em Recife,

Pernambuco (MONTEIRO *et al.* 2002) e Maceió (ANA, 2011), e de 0,6%, na Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará, (LEMOS, 2018).

Para a situação da Ilha do Maranhão, apesar das condições favoráveis de balanço hídrico, das extensas áreas de relevo plano a suave-ondulado e da espessura sedimentar cenozóica suscetível à infiltração da água meteórica, optou-se por percentuais modestos de reservas permanentes, visando estimativas mais conservadoras de reservas exploráveis. Para tanto, entre outros, foram ponderados os seguintes aspectos: a demanda de água para fins de abastecimento urbano/rural e industrial, o baixo grau de conhecimento e monitoramento das respostas dos sistemas aquíferos ao bombeamento, a urbanização acentuada nas áreas de maior carga hidráulica e a singularidade do ambiente insular.

Nesse sentido, foi adotado uma porcentagem de 10%/ano, aplicada às reservas permanentes e somada às reservas renováveis para a estimativa das reservas exploráveis. O valor geral para o Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru é de $R_e = R_r + \%R_p = 0,064 \text{ km}^3 / \text{ano} + 0,1 / \text{ano} \cdot 1,294 \text{ km}^3 = \mathbf{0,193 \text{ km}^3 / \text{ano}}$. Sua espacialização na área de estudo se deu pela aplicação da **Equação 7.4** a cada célula da grade vetorial de 250 x 250m, sendo mobilizadas as reservas anteriormente estimadas.

Os conjuntos espaciais representados na **Figura 7.9a** constituem uma aproximação do tema em questão e mostram que as reservas exploráveis $< 20.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ abrangem aproximadamente 796 km^2 (87%) da área de estudo. As reservas exploráveis $\geq 20.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ ocupam em torno de 116 km^2 (13%), com cerca de 78% delas localizadas na porção centro-sul da Ilha do Maranhão, entre o sul da região hidrográfica do Bacanga, norte do Riacho do Cachorros e leste do Tibiri; e entre as regiões de Inhaúma, Estiva e Riacho dos Cachorros.

7.3 Definição das áreas de recarga local e regional

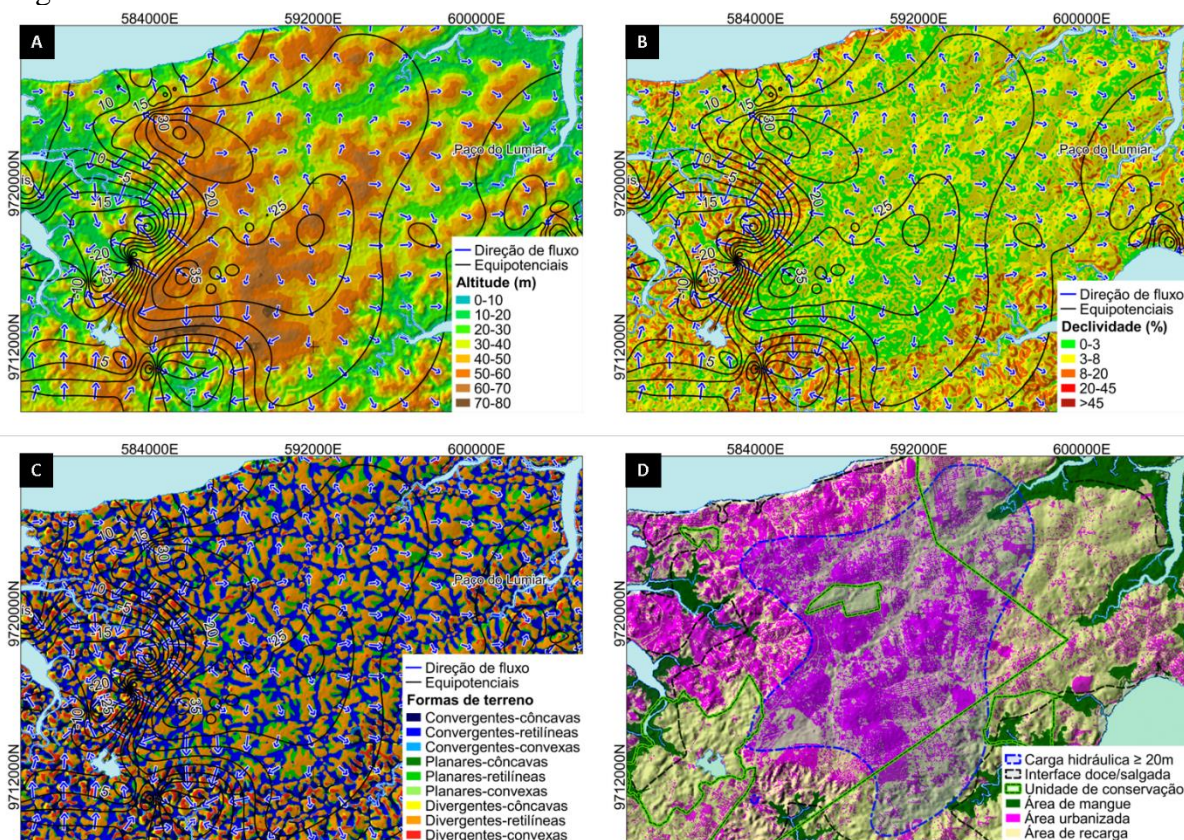
De acordo com Freeze e Cherry (2018), área de recarga pode ser definida como a porção da bacia de drenagem na qual o fluxo saturado das águas subterrâneas é direcionado para longe do nível freático; há uma componente da direção de fluxo da água subterrânea que é descendente. Por outro lado, uma área de descarga constitui a porção da bacia de drenagem na qual o fluxo de água subterrânea é direcionado para o nível freático, com uma componente da direção do fluxo próximo da superfície que é ascendente.

A definição das áreas de recarga se dá inicialmente com o levantamento do potencial hidráulico o qual constitui a energia mecânica associada a um fluido em movimento (Equação de Bernoulli: representada pela energia cinética, pela energia de potencial gravitacional e de

pressão) por unidade de massa. Seu módulo em um determinado ponto é função do produto da carga hidráulica pela aceleração da gravidade cuja constância na superfície terrestre torna o potencial e a carga hidráulica perfeitamente correlacionáveis. Os registros de carga hidráulica são, portanto, a base para a definição do fluxo da água subterrânea e, por conseguinte, das áreas de recarga e descarga em uma unidade aquífera.

Na área de estudo, os valores de carga hidráulica foram estimados a partir dos registros dos poços tubulares cadastrados, mediante subtração da cota da boca do poço pela profundidade do nível estático (vide item 5.2). Em geral, as linhas de fluxo manam da região centro-norte e de outras áreas de menor extensão territorial, na porção centro-sul, todas com carga hidráulica ≥ 20 m. Morfológicamente, esses conjuntos espaciais estão situados nos domínios dos Tabuleiros Costeiros, exibem elevações acima de 50 m (**Figura 7.11a**), declividades entre 0 a 3% e 3 a 8%, e se acham caracterizados por relevos planos a suave-ondulados (**Figura 7.11b**) e formas de terreno divergentes-retilíneas, planares-retilíneas e convergentes-retilíneas (**Figura 7.11c**).

Figura 7.11 – Detalhamento das áreas de recarga: a) altitude; b) declividade; c) formas de terreno; d) uso do solo, unidades de conservação e influência da interface água doce-água salgada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Além dos aspectos topográficos, a avaliação das áreas de recarga levou em consideração as categorias de cobertura vegetal e uso da terra. Elas foram reclassificadas segundo a susceptibilidade à infiltração das águas meteóricas as quais constituem a principal suprimento das águas subterrâneas na área de estudo. Nesse sentido, foram definidas como áreas de recarga aquelas concernentes à vegetação de influência marinha (restingas), vegetação secundária, dunas e praias; e excluídas as áreas urbanizadas e as áreas de vegetação de influência flúviomarinha (manguezal).

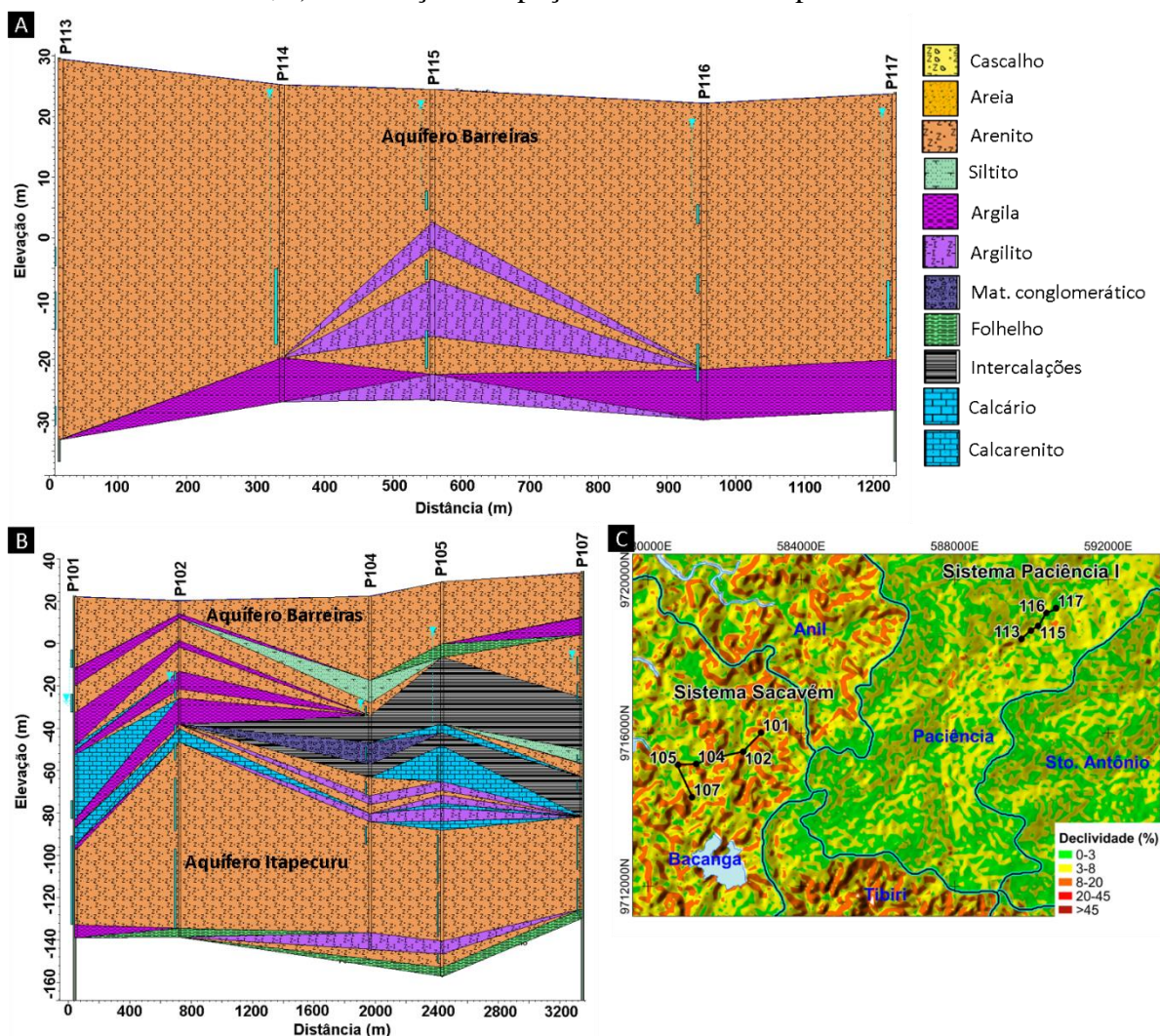
A **Figura 7.11d** ilustra a porção centro-norte da Ilha do Maranhão, circunscrita ao limite de carga hidráulica ≥ 20 m, com 73 km² do seu território constituído de áreas urbanizadas, excetuando os vales fluviais e o entorno de unidades de conservação. Elas são resultantes das mudanças paisagísticas pelas quais vêm passando as regiões hidrográficas do Paciência e Santo Antônio, desde a década de 1980, principalmente com a construção de condomínios residenciais de unidades multifamiliares, com até três pavimentos.

O fluxo de água subterrânea entre as áreas de recarga e descarga, além das variações topográficas e tipos de cobertura e uso do solo, é afetado pela heterogeneidade dos materiais geológicos. Os contrastes de condutividade hidráulica entre camadas reduzem os gradientes horizontais nos aquíferos e elevam os gradientes verticais nos aquíferos. No Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, as camadas aquíferas são representadas por areia e arenito enquanto as camadas confinantes estão associadas a níveis de argila, argilito, siltito e calcário.

Os contrastes de condutividade hidráulica são recorrentes em ambientes geológicos estratificados. Esse aspecto é contemplado nas seções bidimensionais dos poços tubulares dos Sistemas Produtores do Paciência I (**Figura 7.12a**) e Sacavém (**Figura 7.12b**) localizados, respectivamente, nas regiões hidrográficas do Paciência e Bacanga (**Figura 7.12c**). A partir da análise das seções bidimensionais, são destacados os seguintes aspectos:

- a) os contrastes tendem a ser menos expressivos no Grupo Barreiras, constituído em sua maioria por níveis de arenito, argila e argilito;
- b) são mais acentuados no Grupo Itapecuru, formado por arenito, argila, argilito, siltito, calcário e intercalações;
- c) na porção centro-norte da Ilha do Maranhão, os menores contrastes, a maior espessura sedimentar do Grupo Barreiras e o modelado plano a suave ondulado do relevo induzem a ocorrência de sistemas de fluxos horizontais. Eles são direcionados às regiões topograficamente mais baixas bem como à recarga do aquífero cretáceo.

Figura 7.12 – Seções 2D de poços tubulares: a) Sistema Produtores do Paciência I; b) Sistema Produtor do Sacavém; c) localização dos poços tubulares na mapa de declividade.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na área de estudo, a recarga do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru é influenciada pelas superfícies de descontinuidade, de abrangência regional, entre as coberturas quaternárias e os depósitos cenozóicos do Grupo Barreiras. Essas descontinuidades são marcadas por paleossolos lateríticos e detectáveis em seções radar de penetração no solo por sinais de grande amplitude, baixa frequência, contínuas a moderadamente contínuas. Elas podem se constituir em superfícies de retenção hídrica, favorecendo o escoamento lateral, com consequente formação de aquíferos suspensos os quais podem aflorar ao longo de falésias costeiras.

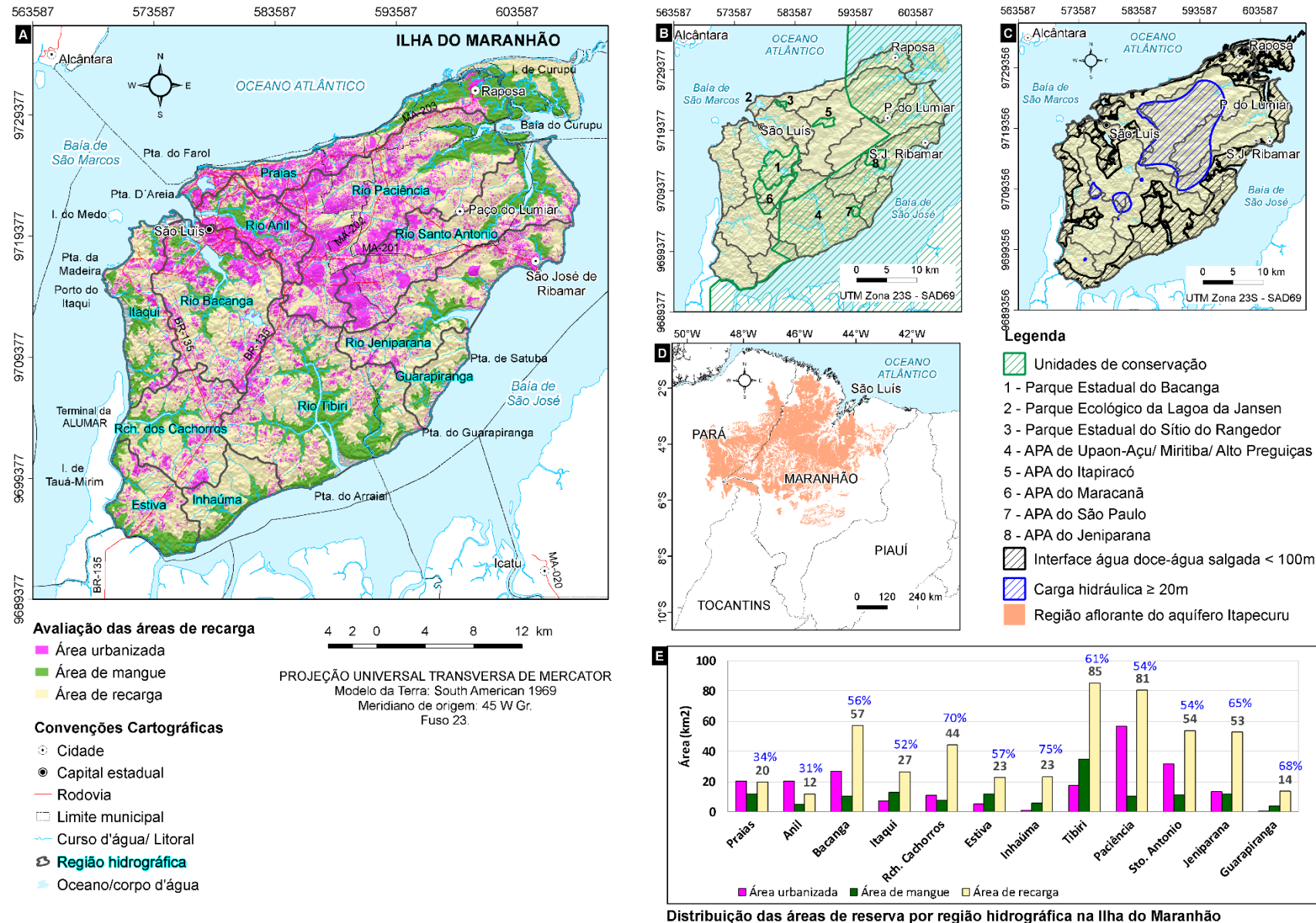
Além das reflexões horizontais, as seções de radar exibem feições verticais a subverticais marcadas por descontinuidades e ausência de sinal nos depósitos do Grupo Barreiras, com prolongamento para os depósitos recentes. Elas estão associadas a falhas e fraturas, evidenciam a ação da tectônica neogênica na área de Ilha do Maranhão, condicionam

cursos d'água, elevam a permeabilidade dos depósitos miocênicos em profundidade e contrariamente acentuam os riscos de contaminação das águas subterrâneas pela percolação de efluentes domésticos e industriais.

Diante do exposto, a **Figura 7.13** exhibe uma síntese da avaliação das áreas de recarga do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão, a partir da qual são pontuados os seguintes aspectos:

- a) as áreas de recarga segundo a reclassificação das categorias de cobertura vegetal e uso da terra (**Figura 7.13a**) abrangem aproximadamente 505 km² (56%), com maior concentração nas regiões hidrográficas do Tibiri (85 km²), Paciência (80km²), Bacanga (57 km²), Santo Antonio (54 km²) e Jeniparana (53 km²). Todas as regiões hidrográficas exibem proporção de áreas de recarga em relação as suas áreas totais superior a 50%, com exceção das regiões das Anil (31%) e Praias (34%);
- b) as unidades de conservação (**Figura 7.13b**) abrangem 473 km² (51%) da área investigada; desempenham um papel relevante na proteção das nascentes de mananciais superficiais na Ilha do Maranhão, no disciplinamento do uso do solo e na recarga do sistema aquífero. Elas estão representadas pelos Parques Estaduais do Bacanga e do Sítio Rangedor, pelo Parque Ecológico da Lago da Jansen e pelas Áreas de Proteção Ambiental do Upaon-Açu/Miritiba/Alto Preguiças, do Itapiracó, da Região do Maracanã, de São Paulo e do Jeniparana;
- c) as áreas de carga hidráulica ≥ 20 m (**Figura 7.13c**) envolvem aproximadamente 162km² da área de estudo, dos quais 151 km² (93%) estão concentrados na porção centro-norte, sobretudo nas regiões hidrográficas do Paciência e do Santo Antônio (81%);
- d) as áreas com profundidade da interface água doce-água salgada <100 m (**Figura 7.13c**), definidas segundo a abordagem de Ghyben-Herzberg, abrangem em torno de 331 km² (36%) da Ilha do Maranhão. Elas ressaltam os riscos de salinização dos poços tubulares por avanço da interface água doce-água salgada, em regiões costeiras, quando submetidos a elevadas taxas de bombeamento;
- e) além da recarga local, o sistema aquífero em estudo conta com uma recarga regional, procedente do aquífero Itapecuru, no continente, (**Figura 7.13d**) cuja área aflorante é de aproximadamente 153.274 km², entre os estados do Maranhão (73%), Pará (25%) e Tocantins (2%).

Figura 7.13 – Avaliação das áreas de recarga do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão: a) mapa temático de áreas de recarga; b) unidades de conservação; c) carga hidráulica $\geq 20\text{m}$ e profundidade da interface água doce-água salgada; d) área de afloramento do aquífero Itapecuru; e) distribuição das áreas de recarga por região hidrográfica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

7.4 - Contribuições ao processo de gestão do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru

O termo gestão de recursos hídricos está relacionado ao conjunto de ações necessárias para garantir água bruta em quantidade e qualidade adequadas aos usos múltiplos para as presentes e futuras gerações. Inclui ações de normalização, planejamento, regulação, fiscalização e aplicação de penalidades, capacitação e comunicação, entre outras.

7.4.1 Arcabouço legal e institucional

Quanto aos aspectos normativos, a gestão dos recursos hídricos foi estabelecida com a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), cujos instrumentos, conforme art. 5º, são: os planos de recursos hídricos, o enquadramento dos corpos de água, a outorga de direitos de uso de recursos hídricos, a compensação dos municípios e o sistema de informações sobre recursos hídricos.

Em relação aos Planos de Recursos Hídricos, de acordo com o art. 6º da lei supracitada, são definidos como “[...] planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação da PNRH e o gerenciamento dos recursos hídricos [...]”. O seu conteúdo deve minimamente, entre outros aspectos, abordar as prioridades para outorga de direitos de uso dos recursos hídricos. Esses instrumentos são descritos no art. 11 da Lei 9.433 e têm como objetivos “[...] assegurar o controle qualitativo e quantitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso a água [...]”.

De acordo com o art. 2º da Resolução nº 22, de 24 de maio de 2002, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), no que diz respeito as águas subterrâneas, os Planos de Hídricos devem promover a caracterização dos aquíferos e suas interdependências com outros aquíferos, mananciais superficiais, e meio ambiente, visando uma visão sistêmica e integrada das águas. Para tanto, segundo art. 3º da mesma resolução, o documento deve constar de: caracterização espacial do aquífero e físico-química e biológica das águas, cômputo de suas águas no balanço hídrico, estimativas de recargas e descargas, reservas permanentes e exploráveis, e medidas de uso e proteção dos aquíferos.

Em relação às outorgas, elas são formalmente definidas no art. 1º da Resolução CNRH nº 16, de 8 de maio de 2001, que apresenta os aspectos gerais para sua emissão pelo poder público. Entre os usos aos quais as outorgas estão sujeitas, cita-se a extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo. Na sua concessão - conforme

a Resolução CNRH n° 15, de 11 de janeiro de 2001, em seu art. 3º, inciso III - deverão ser considerados critérios pertinentes à gestão integrada dos recursos hídricos, visando evitar o comprometimento qualitativo e quantitativo dos aquíferos e dos corpos de água superficiais interligados.

A gestão integrada dos recursos hídricos é observada no art. 88, inciso I, do Decreto n° 13.494, de 12 de novembro de 1993, do Governo do Estado do Maranhão, que regulamentou o Código de Proteção do Meio Ambiente do Estado do Maranhão (Lei n° 5.405, de 04 de abril de 1992). Ela também está presente nos primeiros artigos da Lei n° 8.149, de 15 de junho de 2004, do Governo do Estado do Maranhão, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos hídricos (PERH), o Sistema Estadual de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos (SEGRH/MA) e dá outras providências. Essa lei foi regulamentada pelos decretos da SEMA, n° 27.845, de 18 de novembro de 2011 (em relação as águas superficiais) e n° 28.008, de 30 de janeiro de 2012 (em relação às subterrâneas), que também regulamentou a Lei n° 5.405, de 08 de abril de 1992. Estes dois decretos foram revogados pelo então Decreto SEMA n° 34.847, de 14 de maio de 2019.

De acordo com art. 4º do ulterior decreto, a gestão do SEGRH/MA é de responsabilidade da SEMA a quem compete, segundo o art. 5º, inciso II, a emissão de “[...] Autorização para Perfuração de Poços, a Outorga de Direito de Uso Preventivo e a de Direito de Uso dos Recursos Hídricos.” Este tema é abordado no Capítulo V do decreto em discussão e os procedimentos operacionais e prazos para efetivação dos pedidos são tratados na Resolução n° 57, de 21 de maio de 2019, do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Maranhão (CONERH/MA). Ela estabelece os critérios gerais para Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos e dá outras providências.

O pleito de outorga, segundo o art. 14 da Resolução CONERH/MA, n° 57, de 21 de maio de 2019, será efetivado por meio de autorização do órgão gestor. Para tanto, conforme art. 4º, para execução da obra, é necessário a emissão da Autorização de Perfuração de Poço Tubular após análise dos estudos e projetos. Em seguida, segundo art. 5º, procede-se a solicitação de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos mediante documentos e estudos definidos em portaria. A vigência das autorizações é limitada ao prazo máximo de 35 anos: sendo de até 30 anos para abastecimento público; de até 10 anos para uso industrial e agrossilvipastoril; e de até 5 para usos diversos. Desses procedimentos, estão isentos os usos considerados insignificantes como: poços amazonas, de pesquisa ou monitoramento com caráter exclusivo de pesquisa.

Os processos de Autorização para Perfuração de Poços e de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos são instruídos conforme documentação listada na Portaria SEMA n° 57, de 15 de maio de 2012. Além de formulários, registro no Cadastro Nacional de Recursos Hídricos (CNARH), identificação de pessoa física ou jurídica, são requisitados documentos técnicos concernentes à caracterização da área em relação aos aspectos gerais, geológicos, hidrogeológicos (parâmetros hidráulicos, dimensionais, hidrodinâmicos e hidroquímicos dos aquíferos existentes e condições de aproveitamento), construtivos do poço e do sistema de recalque ou bombeamento, entre outros.

Em relação as contribuições ao processo de gestão do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão, a descrição foi baseada no Capítulo II – Das Ações de Gestão das Águas Subterrâneas, do Decreto n° 28.008, de 30 de Janeiro de 2012, do Governo do Estado, com enfoque nos seguintes aspectos: conservação, preservação e recuperação; cadastro de poços e sistemas de informações hidrológicas; monitoramento quantitativo e qualitativo; enquadramento das águas subterrâneas; licenciamento para perfuração de poços e outorga de direito de uso; e capacitação profissional e ações educativas.

7.4.2 Conservação, preservação e recuperação

Quanto ao primeiro aspecto, o inciso X, art. 7° da Lei n° 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que estabeleceu a PNRH, propõe “[...] a criação de áreas sujeitas a restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos”. O inciso VIII, art. 3° da Lei n° 8.149, de 15 de junho de 2004, que definiu PERH, menciona “[...] a conservação e a proteção permanente de áreas dotadas de características fisiográficas indutoras de recarga natural de aquíferos, para dinâmica das águas superficiais”. O inciso V, da Resolução CONERH/MA n° 57, de 21 de maio de 2019, define as áreas de recarga como “[...] zonas de máxima infiltração de águas pluviais, geradoras de carga hidráulica suficiente para induzir fluxos no meio subterrâneo [...]”, constituídas de materiais clásticos ocorrentes nas superfícies de tabuleiros, chapadas, entre outras formas. Por fim, o ar. 20, da Resolução CONAMA n° 396, de 3 de abril de 2008, relata que os órgãos ambientais e os de recursos hídricos deverão implementar Áreas de Proteção de Aquíferos, visando a qualidade dos recursos em questão.

Diante do exposto e considerando que as regiões hidrográficas dos rios Paciência e Santo Antônio exibem produtividade de aquífero moderada a alta, com cargas hidráulicas $\geq 20\text{m}$; que apresentam cotas altimétricas $\geq 50\text{ m}$, com relevo plano (0 a 3%) a suave ondulado (3 a 8%) e formas de terreno convergentes e côncavas, favoráveis a acumulação do fluxo

hídrico; que essas regiões concentram os maiores contingentes populacionais da Ilha do Maranhão, deflagrados a partir da década 1980, com menores proporções de domicílios particulares permanentes abastecidos por água da rede geral, esgotamento sanitário via rede geral e de lixo coletado; recomenda-se a criação do Comitê da Região Hidrográfica dos Rios Paciência e Santo Antônio e posterior Agência de Águas e Plano de Recursos Hídricos.

As características geográficas e hidrogeológicas, anteriormente mencionadas, assinalam a posição estratégica das regiões hidrográficas do Paciência e do Santo Antônio como produtoras de águas subterrâneas e de recarga do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru na Ilha do Maranhão. Por outro lado, a condução do fluxos hídricos para as demais porções da área de estudo pode favorecer o transporte de contaminantes, principalmente os relacionados a baixa proporção dos domicílios atendidos pelos sistemas de esgotamento sanitário. Nesse sentido, ressalta-se a importância de mecanismos de controle do uso e ocupação do solo, e de planejamento e gerenciamento integrado dos recursos hídricos nessas bacias metropolitanas, conforme art. 10, do Decreto nº 28.008, de 30 de janeiro de 2012.

Ainda, em relação a temática conservação, preservação e recuperação, reafirma-se a importância desempenhada pelas unidades de conservação, como áreas de recarga natural do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru e como zonas de proteção de nascentes dos principais rios que drenam a Ilha do Maranhão. Entre as unidades estão: o Parque Estadual do Bacanga (onde está a bateria de poços tubulares do Sistema Produtor do Sacavém), o Parque Estadual do Sítio Rangedor, o Parque Ecológico da Lagoa da Jansen, a APA da Região do Maracanã, a APA do Itapiracó, a APA do Jeniparana, a APA do São Paulo e a APA de Upaon-Açu/Miritiba/Alto Preguiças. Esta última é a que apresenta maior extensão territorial, abrangendo as porções sul e leste da área estudo.

Em relação as áreas de restrição e controle, segundo o art. 9º, do Decreto nº 28.008, de 30 de janeiro de 2012, elas são qualificadas pelo disciplinamento dos volumes exploráveis máximos diários, pelo controle máximo de fontes poluidoras já instaladas e pela restrição a implantação de novas atividades potencialmente poluidoras. Nessa categoria, sugere-se a inserção de áreas de restrição e controle no entorno de zonas com profundidade da interface água doce-água salgada de até 100m, segundo o modelo de Ghyben-Herzberg, sobretudo nas regiões hidrográficas do Itaqui, Bacanga e Riacho dos Cachorros. Essas regiões apresentam histórico de salinização de poços por intrusão salina (REBOUÇAS, SILVA, 1972; SOARES, 2004), concentram grandes empresas, a zona portuária, o Distrito Industrial do Itaqui, além de expressivo contingente populacional.

Nessas regiões propensas à contaminação dos poços tubulares por água do mar e onde se verifica a oscilação dos níveis estáticos pelas variações das marés, recomenda-se a instalação de poços de monitoramento, alinhados perpendicularmente a linha de costa, necessários para investigação da interface água doce-água salgada, em diferentes profundidades, e para validação de resultados de métodos geoeletricos aplicados ao comportamento hidrodinâmico da interface água doce-água salgada.

Em virtude das descargas crescentes e como forma de atenuar o crescimento da base da cunha salina em direção as regiões interiores, recomenda-se, mediante conhecimento detalhado dos parâmetros hidráulicos e geométricos do aquífero, a definição de vazões críticas a partir das quais o avanço da interface é deflagrado. Como forma de restituir ou favorecer o equilíbrio entre as descargas e recargas de aquíferos costeiros, sugere-se a introdução de barreiras hidráulicas, através de recarga artificial, por método superficial direto: como bacias de inundação ou alteração da calha de rios, ou subsuperficial direto: como injeção de água nas zonas saturada ou não saturada através de poços de injeção.

Quanto aos procedimentos de recarga artificial, não deverão alterar a qualidade da águas subterrâneas Classes 1, 2, 3 e 4, levando a restrição aos usos preponderantes, conforme art. 23 da Resolução CONAMA nº 396, de 7 de abril de 2008. Uma vez introduzidos procedimentos, faz-se necessário a criação de programa de monitoramento da qualidade, segundo o art. 25 do presente regulamento.

Em se tratando de uso da água para fins industrial ou abastecimento humano, em regiões costeiras, susceptíveis à contaminação de poços por avanço da cunha salina, recomenda-se ainda, a construção de baterias de poços. Nestes sistemas, as reduções nos rebaixamentos máximos disponíveis e nas vazões máximas das unidades integrantes são compensadas pelo aumento na descarga global da bateria (MANOEL FILHO *et al.*, 2008). A invasão da água salgada pode ser regulada através do espaçamento entre os poços e das taxas de bombeamento, que deverão ser baixas para evitar a retirada de água salina da base da interface.

Em relação as áreas de proteção de poços tubulares, descritos na art. 9º, inciso II, da Decreto 28.008, de 30 de janeiro de 2012, recomenda-se a utilização coordenada dos métodos de Cartografia de Vulnerabilidade dos Aquíferos e dos Perímetros de Proteção de Poços, os quais são descritos em Foster *et al* (2002), Hirata e Fernandes (2008), Hirata *et al.* (2009), entre outros. Os primeiros são aplicados em escala regional, entre 1:100.000 a 1:250.000, visam a proteção do aquífero, o levantamento de áreas prioritárias e exigem menor complexidade em se tratando de áreas densamente ocupadas e com grande densidade de poços. Entre os métodos

para determinação da vulnerabilidade de aquíferos estão o GOD (HIRATA; FOSTER, 1988); Drastic (ALLER *et al.* 1987), Sintacs (CIVITA *et al.*, 1990).

Os Perímetros de Proteção de Poços visam a restrição da ocupação humana no entorno das captações através do traçado das zonas de contribuição de poços ou zonas de captura. Eles apresentam menor aplicabilidade em aquíferos explorados por número considerável de poços, em regime variável de bombeamento e em área de crescimento urbano notável. Em vista disso, exibem maior eficiência em aquíferos simples, homogêneos e isotrópicos, em pequenas áreas, (escalas ≥ 10.000) ou no detalhamento de áreas prioritárias discriminadas na Cartografia de Vulnerabilidade de Aquíferos.

De acordo com USEPA (1987, 1994), distância, rebaixamento, tempo de trânsito da água, linhas de fluxo e capacidade de assimilação dos contaminantes são critérios usados para definir zonas de influência, de transporte e de contribuição. Essas tipologias de áreas de proteção de poços podem ser delimitadas usando métodos tais como: Raio Fixo Arbitrado/Calculado, Analíticos (baseados no tempo de transporte, rebaixamento e limites de fluxo); Mapeamento Hidrogeológico, Métodos Computacionais Semi-Analíticos e Modelos Numéricos de Fluxo/Transporte.

7.4.3 Cadastro de poços tubulares e sistemas de informação de recursos hídricos

Os estudos hidrogeológicos podem ser realizados em nível preliminar ou de reconhecimento, geral ou de viabilidade e de detalhamento (FEITOSA; FEITOSA, 2008). Nessas três categorias, são necessários materiais documentais, cartográficos e de investigações de campo. Nesse contexto, os cadastros e o monitoramento de poços tubulares acentuam a compreensão dos processos de transporte, armazenamento, recarga e descarga, hidroquímicos entre outros das águas subterrâneas, bem como contribuem para a concepção e validação de modelos fundamentados em bases mais realistas.

No que concerne ao Estado do Maranhão, a organização e disponibilização de informações sobre águas subterrâneas estão preceituadas no art. 6º, §1º, do Decreto nº 34.847, de 14 de maio de 2019, que relata acerca do Sistema de Recursos Hídricos do Estado do Maranhão (SIRH/MA) e sua compatibilidade com o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM); com o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH/ANA); com o CNARH/ANA e demais sistemas designados pelo órgão gestor.

Apesar de definidos nos instrumentos normativos, cadastros de poços tubulares consistentes e sem falhas representam um cenário distante do requerido para qualificação dos sistemas aquíferos em seus aspectos quantitativos e qualitativos. No caso do SIAGAS, na Ilha do Maranhão, existem 1.013 apontamentos de poços tubulares, estruturados por local, profundidade, tipo de formação geológica, níveis estático e dinâmico e vazão. No geral, os registros exibem falhas (ausência de dados) e em somente 136 deles são verificados dados de perfis litológico e construtivo.

O CNARH - criado nos termos da Resolução ANA, nº 317, de 26 de agosto de 2003 - contém os registros dos usuários de recursos hídricos superficiais e subterrâneos; inclui informações sobre a vazão utilizada, local de captação, denominação e localização do curso d'água, empreendimento do usuário, sua atividade ou a intervenção que pretende realizar, como derivação, captação e lançamento de efluentes. A ANA e órgãos gestores são responsáveis pela manutenção e inserção das informações, respectivamente. No painel gerencial de outorgas da ANA, na data de 24/06/2020, para as águas subterrâneas de domínio federal são exibidos 25 registros e para as de domínio estadual nenhum registro é apresentado.

Em termos de cadastros oficiais, os dados disponíveis mostram-se limitados às demandas dos estudos hidrogeológicos e, portanto, recomenda-se a composição de um cadastro de poços tubulares que contemple os seguintes atributos:

- a) gerais: coordenadas do ponto de captação, data de perfuração, requerente, município, bairro, finalidade e executor de obra. Quanto ao primeiro atributo, recomenda-se a obtenção da localização através de receptores *Global Navigation Satellite System (GNSS)* topográficos ou geodésicos, de frequência simples ou dupla. As coordenadas obtidas devem ser pós-processadas usando, p.ex., o Método *Precise Point Positioning (PPP)* que garante precisão de 1 a 5 cm (receptores de dupla frequência) e 5 a 10 cm (receptores de frequência simples). Essa abordagem torna as coordenadas adequadas os trabalhos hidrogeológicos, principalmente quanto a definição de Perímetros de Proteção de Poços cujos mapeamentos exigem escalas cartográficas grandes (p. ex. 1:10.000);
- b) construtivos: perfil construtivo e perfil litológico, diâmetro da perfuração, diâmetro do poço, tipo de revestimento, tipo de filtro, profundidade dos filtros, pré-filtro e sistema de recalque;
- c) hidráulicos e dimensionais: aquífero explorado, altitude ortométrica da boca do poço, profundidade, nível estático, nível dinâmico, rebaixamento, vazão de teste, vazão requerida, vazão autorizada e período bombeamento;

- d) hidrodinâmicos: dados de testes de bombeamento de 24 horas e de recuperação, transmissividade, coeficiente de armazenamento (para aquífero confinado), porosidade efetiva (para aquífero livre) e condutividade hidráulica;
- e) hidroquímicos: pH, condutividade elétrica, STD, turbidez e dureza; sódio, potássio, cálcio e magnésio; carbonato, bicarbonato, cloreto e sulfato; amônia, nitrito, nitrato; ferro e fósforo; BTEX, fenóis, coliformes fecal e total.

7.4.4 Monitoramento quantitativo e qualitativo

Quanto ao monitoramento, Mestrinho (2008) define como um instrumento de avaliação quantitativa e qualitativa do estado atual do aquífero, envolvendo de forma sistemática coleta, armazenamento, análise e interpretação de dados, segundo duas abordagens: básica ou específica. A primeira está relacionada à variação espacial e temporal das reservas, recursos e qualidade da água durante exploração, enquanto a segunda está associada às ações de detecção, prevenção, avaliação e vigilância das condições do aquífero. As abordagens de monitoramento do aquífero e das captações também variam nas dimensões espacial e temporal.

As escalas geográficas regional e local de monitoramento da água subterrânea são enfatizadas por Fetter (2001), quando destaca as razões para execução de tal procedimento: determinar a qualidade da água da região ou poço específico; determinar a extensão da contaminação das águas subterrâneas por uma fonte conhecida; e monitorar uma fonte potencial de contaminação para determinar se a água subterrânea foi contaminada.

O monitoramento é apontado como um dos procedimentos para proteção e conservação das águas subterrâneas na Proposta de Resolução CNRH, nº 92, de 5 de novembro de 2008. O art. 6º enfatiza a necessidade de dispositivos nas captações que favoreçam o monitoramento quantitativo e qualitativo. Já o art. 9º ressalta o monitoramento para captações com indícios de superexploração, poluição e contaminação da água subterrânea. O art. 10º por sua vez destaca que os programas de monitoramento devem ser implementados em abordagens como: proteção, restrição e controle, influência de empreendimentos, risco geotécnico, superexploração, intrusão marinha, recarga-descarga e recarga artificial. Nessas áreas, os órgãos públicos podem exigir dos usuários o monitoramento das águas outorgadas.

A Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas, descrita na Resolução CNRH nº 107, de 13 de abril de 2010, deverá ser planejada e coordenada pela ANA, e implementada pela CPRM, em articulação com os órgãos gestores estaduais. Conforme o art. 3º, a escolha dos pontos de monitoramento considerará: o uso e

ocupação do solo; a demanda pela água subterrânea; a caracterização geológica, hidrogeológica, hidroquímica e climática; a vulnerabilidade natural dos aquíferos, o risco de poluição e áreas contaminadas; os aquíferos de importância estratégica; e a proximidade de estações hidrometeorológicas.

De acordo com o art. 5º da resolução citada, as campanhas de coleta de água ocorrerão a cada cinco anos, em que serão analisados parâmetros relacionados na Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008, em função da hidroquímica natural da água, do uso e ocupação do solo e dos usos preponderantes da água subterrânea. Uma outra campanha com frequência semestral considerará os parâmetros pH, cloretos, nitrito e nitrato, dureza e alcalinidade totais, ferro, STD e coliformes termotolerantes. Ainda, uma campanha de medição contínua e automática avaliará o nível estático, temperatura e condutividade elétrica.

Segundo CPRM (2020), a Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS), utilizando os critérios de seleção dos pontos de monitoramento e diante das demandas específicas dos órgãos gestores, selecionou para o programa de implantação da rede de monitoramento 32 aquíferos do território brasileiro, entre eles o Barreiras e o Itapecuru. O programa é constituído por poços existentes (cedidos) e construídos, totalizando, atualmente, 400 registros consistidos e armazenados no SIAGAS. Entre os relatórios técnicos diagnósticos produzidos pela RIMAS, há um referente ao aquífero Itapecuru, na Província Sedimentar do Parnaíba, no Estado do Pará, onde o mesmo é livre a semiconfinado, enquanto na Ilha do Maranhão é confinado.

No âmbito estadual, o monitoramento das águas subterrâneas é observado no Decreto nº 28.008, de 30 de janeiro de 2012, do Governo do Estado que, a despeito de sua revogação, traz no Capítulo VI orientações acerca dessa ação de gestão. O art. 20 ressalta a implantação de poços de monitoramento qualitativo nas áreas de influência de depósitos de combustíveis, cemitérios, aterros sanitários, indústrias e nas bacias de recepção de efluentes. Para tanto, as autorizações de construção e funcionamento atenderão à geologia local, à direção e sentido do fluxo subterrâneo e ao número mínimo de três poços de monitoramento. Caso seja inviável a utilização de poços, o monitoramento será realizado através de métodos geofísicos. Por fim, o art. 46 destaca as obrigações do outorgado quanto às atividades de monitoramento descritas no ato de outorga ou em outros atos administrativos.

Diante do exposto, em relação ao Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru e as captações de águas subterrâneas, recomenda-se o monitoramento:

- a) do nível estático, pH, turbidez, condutividade elétrica, STD, nitrato e coliformes termotolerantes, com frequência mínima semestral, para análise da variação da

superfície potenciométrica (aquífero confinado) e/ou freática (aquífero livre); para avaliação da reserva renovável; e para subsidiar proposta de enquadramento das águas subterrâneas em classes, conforme arts. 12 e 13 da Resolução CONAMA, n° 396, de 3 de abril de 2008. Esse monitoramento deve ser realizado em poços tubulares dedicados exclusivos para tal finalidade;

- b) das variações nos níveis estáticos em virtude das oscilações de marés em poços localizados nas regiões do Itaqui, Bacanga e Riacho dos Cachorros os quais são administrados por empresas aí instaladas;
- c) de sobreposições entre raios de influência de poços tubulares, visando a estimativa de interferências e seus efeitos sobre os rebaixamentos máximos disponíveis e vazões máximas. As sobreposições podem ser empregadas como instrumento de gerenciamento durante a locação de poços, evitando-se regiões de grande incidência. Esse produto seria gerado a partir das coordenadas geodésicas dos poços tubulares, da equação de raio de influência e de procedimentos de análise espacial em sistemas de informação geográfica. Para o cálculo do parâmetro em discussão, na ausência de dados hidrodinâmicos calculados, poderiam ser usados valores de literatura para os aquíferos Barreiras e Itapecuru;
- d) das concentrações de BTEX nos poços tubulares perfurados em postos de revenda e distribuidoras de combustíveis na Ilha do Maranhão;
- e) das fontes potenciais de contaminação como: cemitérios, lixões, fossas, ETEs, currais/pocilgas/granjas, postos e distribuidoras de combustível, indústrias, curtumes, locais de utilização de agrotóxicos, rejeitos industriais, áreas de mineração, entre outras. Sugere-se a realização de levantamentos geofísicos de radar de penetração no solo e de eletrorresistividade, visando o monitoramento de prováveis plumas de contaminação em lixões, cemitérios e postos de revenda de combustível e rejeitos de indústria (mediante autorização).
- f) das áreas de mineração: extração de areia e argila, nas regiões hidrográficas do Itaqui, e Riacho dos Cachorros, na porção oeste da Ilha do Maranhão, onde parcela significativa dos sedimentos cenozóicos são extraídos. Essas atividades removem parte dos materiais da zona não saturada e interferem no retardamento de contaminantes (razão entre a velocidade da água subterrânea e a do contaminante) o qual é função da densidade seca dos grãos e da porosidade. Mudanças na paisagem da região e a contaminação da água de poços em comunidades tradicionais são relatados em Castro e Pereira (2012), Santos (2015); Silva e Farias Filho (2015).

- g) de propriedades de hortifruticultura nas áreas rurais dos municípios da Ilha do Maranhão, quanto à provável contaminação dos corpos d'água adjacentes às áreas agrícolas.

7.4.5 Enquadramento das águas subterrâneas

Quanto ao enquadramento das águas subterrâneas em classes, trata-se de um instrumento estabelecido no art. 5º, da Lei 8.149, de 15 de junho de 2004. Segundo o art. 8º, esse procedimento visa assegurar a qualidade da água de acordo com os usos mais exigentes e diminuir os custos de combate à poluição dos recursos hídricos mediante ações preventivas permanentes. A proposição de enquadramento é realizada pelas Agências de Águas, encaminhada ao Comitê de Bacia Hidrográfica e apreciada pelo CONERH/MA.

Essa tramitação ressalta a importância desses instrumentos das políticas nacional e estadual de recursos hídricos para o “[...] estabelecimento de metas ou objetivo de qualidade da água a ser, obrigatoriamente, alcançado ou mantido em um aquífero, conjunto de aquíferos ou porção destes de acordos com os usos preponderantes pretendidos ao longo do tempo”, o que define o termo enquadramento, conforme a Resolução CONAMA, nº 396, de 7 de abril de 2008, em seu art. 1º, inciso VIII.

No que diz respeito a área de estudo, a partir das 92 amostras de água analisadas no item 5.4 da pesquisa, foi postulada uma situação fictícia de se considerar somente seis parâmetros e seus respectivos valores máximos permitidos para enquadramento das águas subterrâneas, a saber: cloreto (< 250 mg/ L), sódio (< 200 mg/ L), sulfato (< 250 mg/ L), nitrato (< 10 mg/ L), STD (< 1.000 mg/L) e turbidez (< 5 uT). Em 44 amostras, os valores de referência de qualidade ficaram abaixo dos máximos permitidos enquanto nas 48 amostras restantes o nitrato não foi atendido. Portanto, o primeiro grupo estaria inserido na Classe 1 e o restante na Classe 3, por se tratar de alterações na qualidade devido às atividades antrópicas.

Diante do exposto, a questão que se coloca é que: como os poços tubulares na área de estudo possuem seções filtrantes geralmente nos dois aquíferos, e como a classificação está relacionada à profundidade da captação (art. 29 da Resolução CONAMA nº 396, de 7 de abril de 2008), a classe de enquadramento, portanto, estará relacionada ao conjunto dos aquíferos Barreiras e Itapecuru, tal como preconizado na definição de enquadramento. Em vista disso, recomenda-se:

- a) a adoção dos parâmetros supracitados, acrescidos do referente aos coliformes termotolerantes (em observância ao art. 12, Parágrafo Único, da Resolução

CONAMA n° 396, de 7 de abril de 2008) e seus respectivos valores máximos de referência, para enquadramento das captações de águas subterrâneas na Ilha do Maranhão;

- b) que nas regiões hidrográficas de maior adensamento populacional, como as do Paciência, Santo Antônio, Anil, Bacanga e Jeniparana, as águas subterrâneas sejam enquadradas como Classe 1 ou Classe 2 (nesse caso quando o valor de referência de qualidade, em pelo menos um dos parâmetros, for maior ou igual ao valor máximo permitido mais restritivo, com exceção do nitrato) e nas demais nas regiões como Classe 3, devido as alterações na qualidade pelas atividades antrópicas;
- c) que nas captações onde a condição de qualidade da água subterrânea estiver em desacordo com os padrões exigidos para a classe de seu enquadramento sejam realizadas ações de controle ambiental para adequação à classe pretendida, conforme art. 30 da resolução referida anteriormente;
- d) que seja implantado frequência de monitoramento semestral para manutenção das classes de enquadramento definidas; e conforme art. 30 §3° [...] constatada a impossibilidade de adequação prevista, deverão ser realizados estudos visando o reenquadramento da água subterrânea [...]

7.4.6 Autorização para perfuração de poços e outorga de direito de uso da água

No Estado do Maranhão, os pedidos de autorização para perfuração de poços tubulares e de outorga de direito de uso da água subterrânea são instruídos conforme a Portaria SEMA n° 57, de 15 de maio de 2012. Em ambos os casos, o requerente deve apresentar um formulário único que alude a dois documentos. O primeiro, “Informação sobre a necessidade de outorga”, deve apresentar o projeto básico do empreendimento e a caracterização ambiental, detalhando a interferência no corpo hídrico; as vazões captadas e/ou lançadas, com registro fotográfico legendado e mapa de localização. O segundo documento, “Estudo Hidrogeológico”, é estruturado em seis itens de caracterização: da área, geológica, hidrogeológica, hidroquímica, do poço e da bomba.

Diante das sobreposições temáticas dos documentos mencionados anteriormente, da necessidade de simplificação documental e da verificação dos processos de solicitação de perfuração e de outorga de direito de uso da água entre 2009 e 2012, recomenda-se a composição de um único documento, intitulado “Estudo Hidrogeológico”, formatado segundo as normas de informação e documentação da ABNT, e constituído por:

- a) elementos pré textuais: capa (contendo título, requerente, empresa executora, local e data); sumário e resumo (apresentando o estudo hidrogeológico);
- b) textuais: introdução (contextualização da solicitação e exposição de sua justificativa e objetivos); desenvolvimento (caracterização do empreendimento, dos aspectos geoambientais e hidrogeológicos, e conclusão);
- c) elementos pós-textuais: referências bibliográficas, apêndices e anexos.

Em relação à **caracterização do empreendimento**, propõe-se que sejam abordados os seguintes aspectos:

- a) dados do requerente, natureza do empreendimento e finalidade do recurso hídrico em suas diferentes fases;
- b) localização e situação: da captação de água subterrânea no contexto urbano/rural; da bacia/sub-bacia hidrográfica onde a captação está inserida; das instalações do empreendimento e de outros poços tubulares no entorno;
- c) mapas temáticos de localização e situação em escalas cartográficas compatíveis ao tema representado, produzidos em ambiente de sistemas de informação geográfica, evitando-se o emprego de recortes de mapas, cartas, plantas, imagens ou de dados oriundos de portais da Internet.

Em relação à **caraterização geoambiental** da região de ocorrência do aquífero/sistema aquífero explotado, sugere-se a inclusão dos seguintes aspectos:

- a) gerais: localização e situação regional;
- b) geológicos: contexto tectono-estrutural e sedimentar das unidades estratigráficas, suas unidades de fácies e litofácies, distribuição geográfica e relações de contato;
- c) geomorfológicos: formas de relevo em seus aspectos qualitativos (depressões, planícies, tabuleiros, chapadas, entre outras) e quantitativos (altitude, declividade etc.);
- d) pedológicos: tipos de solos e características granulométricas, texturais, estruturais, de consistência e porosidade;
- e) climatológicos: classificação do clima segundo de Köppen e Thornthwaite e principais sistemas meteorológicos atuantes na região;
- f) hidrogeográficos: bacias/sub-bacias hidrográficas e características do sistema drenagem;
- g) fitogeográficos: tipo e distribuição da cobertura vegetal, e unidades de conservação;
- h) de uso e ocupação do solo: classes de uso do solo ocorrentes na região;

- i) saneamento ambiental: sistemas de abastecimento, de esgotamento sanitário e de coleta de resíduos sólidos;

Quanto à **caracterização hidrogeológica**, a Portaria SEMA nº 57, de 15 de maio de 2012, faz menção unicamente aos aquíferos existentes e às condições de aproveitamento. Em vista disso, recomenda-se a realização de levantamento bibliográfico, visando agregar às fontes já consagradas e amplamente utilizadas, outras pesquisas executadas. A seguir, são elencados outros eixos temáticos relevantes para a composição do Estudo Hidrogeológico, a saber:

- a) ocorrência, extensão, constituição litológica e relações de contato entre camadas;
- b) classificação: quanto ao tipo de porosidade (intragranular, fraturado, cárstico, fissurado-cárstico e dupla porosidade); posição relativa da superfície potenciométrica (livre, artesiano, totalmente confinado e semiconfinado); e variação da condutividade hidráulica (anisotropia e heterogeneidade);
- c) parâmetros hidráulicos e dimensionais: níveis estático e dinâmico, rebaixamento, vazão específica, carga hidráulica, porosidade, porosidade efetiva, retenção específica, espessura total e saturada;
- d) parâmetros hidrodinâmicos: transmissividade, coeficiente de armazenamento e condutividade hidráulica;
- e) parâmetros hidroquímicos: fácies hidroquímicas, potabilidade e enquadramento das águas, fontes potenciais e vulnerabilidade à contaminação;
- f) produtividade do aquífero, estimativa de recarga e descarga, avaliação das reservas e ações de gestão.

Em relação aos parâmetros hidrodinâmicos, de acordo com Portaria SEMA nº 57 de 15 de maio de 2012, eles são exigidos quando do pedido de outorga de direito de uso da água e devem estar acompanhados da análise do teste de aquífero. Ademais, é solicitado ao requerente apresentação da ficha do teste de bombeamento de 24 h e de recuperação. Nesse sentido, tendo vista que os ensaios de bombeamento são classificados em de produção, que visam determinar a vazão de exploração e as perdas de cargas totais que ocorrem no poço, e de aquífero, quando objetivam a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos (FEITOSA; DEMÉTRIO, 2008), recomenda-se:

- a) o registro dos poços/piezômetros localizados no raio de influência do poço perfurado, os quais podem ser empregados como poços de observação. O raio de influência ($R = 1,5\sqrt{T \cdot t/S}$) pode ser estimado a partir de valores de transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) de literatura, para um

tempo (t) de 24 h. Não se observando nenhum poço/piezômetro no entorno, recomenda-se a implantação de piezômetros;

- b) a realização de pré-teste, com antecedência mínima de 24 h, para definição da vazão de teste, previsão dos níveis dinâmicos, verificação das condições do local etc.;
- c) a realização de teste de produção escalonado com duração de 24 h, em intervalos distintos: primeiro estágio de 4 h, com menor vazão; segundo estágio de 4 h, com vazão intermediária; e terceiro estágio de 16h, com vazão máxima. Em todas as etapas, as vazões devem permanecer constantes e haver medição dos rebaixamentos no poço bombeado;
- d) que na última etapa do teste escalonado, com duração de 16 h, os rebaixamentos também sejam medidos no poço tubular/piezômetro mais próximo ao poço bombeado e no seu raio de influência, visando a estimação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero explotado;
- e) que o método analítico empregado para a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos seja coerente ao modelo de fluxo do aquífero (livre ou confinado, com ou sem drenança, regime de fluxo estacionário ou transiente). Essas informações podem ser observadas através do perfil litológico e construtivo do poço, da constituição litológica das camadas e da estabilização ou não dos rebaixamentos.

Para fins de outorga, a Portaria SEMA n° 57 de 15 de maio de 2012, solicita a caracterização hidroquímica, do poço e do seu sistema de recalque. Quanto às análises bacteriológicas e físico-químicas, os parâmetros mínimos exigidos são: pH, cor, turbidez, temperatura, condutividade elétrica, nitrato, sódio, ferro, cloretos, sulfetos, fosfatos, amônia, E. coli ou coliformes termotolerantes. Sugere-se, para fins de determinação das fácies hidroquímicas da água subterrânea, a inclusão, entre os cátions, do potássio, cálcio e magnésio; entre os ânions, do bicarbonato, carbonato e sulfato. Para fins de enquadramento, em concordância com art.12 da Resolução CONAMA n° 396, de 7 de abril de 2008, recomenda-se a inclusão do STD que, juntamente com o nitrato e os coliformes termotolerantes, compõem o mínimo necessário.

Em relação as características do poço tubular, são solicitadas a vazão requerida, período de bombeamento, unidade geológica aflorante, profundidade do poço, níveis estático e dinâmico, vazão de teste e específica, material e diâmetro do revestimento e dos filtros, profundidade dos filtros, perfis litológico e construtivo. Em relação às seções filtrantes, conforme discutido no item 5.1, elas estão distribuídas nos aquíferos Barreiras e Itapecuru, aspecto recorrente nos poços da Ilha do Maranhão.

Essa prática construtiva dificulta a obtenção de parâmetros hidráulicos, dimensionais, hidrodinâmicos e hidroquímicos característicos de cada aquífero; compromete a avaliação de reservas, disponibilidade e potencialidade dos aquíferos; aumenta a vulnerabilidade à contaminação cruzada causada pela captação do aquífero freático; afeta o cálculo da eficiência hidráulica dos poços por envolver perdas lineares (BQ) de ambos aquíferos e pela elevação das perdas não lineares (CQ^n) em virtude ampliação no comprimento dos filtros. Em vista disso, para fins de gestão, recomenda-se o tratamento conjunto das unidades hidrogeológicas sob a denominação Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru (SABI).

7.4.7 Capacitação profissional e ações educativas

Entre as ações de gestão das águas subterrâneas preceituadas no Decreto nº 28.008, de 30 de janeiro de 2012, estão os programas destinados à capacitação de pessoal na área de recursos hídricos e as campanhas educativas, visando conscientizar a sociedade para a utilização racional das águas subterrâneas. No que concerne à área objeto de estudo, recomenda-se:

- a) a ampliação do quadro de servidores efetivos do órgão gestor estadual de recursos hídricos, com formação específica em recursos hídricos, tendo em vista a continuidade das ações de gestão e as agendas estabelecidas em escalas estadual e federal;
- b) a realização de cursos de capacitação na área de recursos hídricos subterrâneos, veiculados através de convênios e parcerias com instituições de ensino superior locais e regionais, conselhos estaduais de meio ambiente e de recursos hídricos;
- c) a realização de treinamento no manuseio de equipamentos e softwares específicos para aquisição e processamento de dados de recursos hídricos subterrâneos;
- d) o desenvolvimento de ações em educação ambiental junto às populações das regiões hidrográficas de maior produtividade de água subterrânea e de alterações nos padrões de uso do solo, entre outras;
- e) o desenvolvimento de aplicativos onde o usuário possa registrar a localização e dados básicos de sua captação, visando a configuração de disponibilidade instalada nas regiões hidrográficas de interesse.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A Ilha do Maranhão está localizada na região leste da Bacia Intracratônica de São Luís, integrante do Sistema de Grábens do Gurupi. Sua gênese remonta ao processo de rifteamento do Megacontinente Gondwana e de abertura do Atlântico Equatorial durante o Cretáceo. Sobre o embasamento Paleoproterozóico do Fragmento Cratônico de São Luís e das sequências paleozóicas das formações Bragança e Pimenteiras foram depositados os sedimentos aptianos das formações Codó/Grajaú; albianos a eo-paleocênicos do Grupo Itapecuru; oligo-miocênicos do Grupo Barreiras; e pleisto-holocênicos dos Sedimentos Pós-Barreiras.

Essas litologias associadas aos processos tectônicos, eustáticos, erosivos, climáticos e flúviomarinhos configuraram a geografia da área de estudo. Ela é constituída em sua maioria por Tabuleiros Costeiros Litorâneos, com elevações acima de 50m, marcados por topografia plana ondulada a ondulada, capeada por Latossolos e Argissolos. A paisagem é recortada por canais de drenagem curtos, números e pouco profundos, cuja descarga nos ambientes estuarinos é responsável pela conformação de falésias, mangues, restingas, apicuns, planícies de marés, praias e dunas.

Além das formações pioneiras nos ambientes estuarinos, a flora da região é constituída por vegetação secundária, com presença de palmeiras, no domínio da Floresta Ombrófila Densa. As áreas especiais completam o cenário botânico e contemplam as unidades de conservação. O clima Tropical de Savana e Megatérmico caracteriza a área de estudo, cujas precipitações de janeiro a junho, com pico em março-abril-maio, são moduladas pela ZCIT e pelas interações oceano-atmosfera nas bacias do Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical.

Os recursos hídricos superficiais são representados pelas 12 regiões hidrográficas cujo processo de ocupação, deflagrado a partir da década de 1970, com a mudança do eixo de expansão da cidade de São Luís, levou ao comprometimento dos aspectos quantitativos e qualitativos da água destinada sobretudo ao abastecimento urbano e rural. Ele é suprido pelo rio Itapecuru (no continente), pela Barragem do Batatã e pelos riachos do Prata e Mãe Isabel (nos domínios da ilha) que representam 53% do abastecimento da Ilha do Maranhão. A contribuição subterrânea (47%) provém de poços tubulares que exploram dos aquíferos Barreiras e Itapecuru, em profundidades que variam entre 22 m e 215 m.

Em geral, os poços exibem filtros nos dois aquíferos: os primeiros posicionados entre 0 e 40m, e os finais, atingindo profundidades acima de 200 m. Essa configuração dificultou a

modelagem de superfícies potenciométricas para cada unidade hidrogeológica. A simplificação, portanto, para fins de gestão, consistiu na definição de um sistema hidráulico único, constituído por estratos oligo-miocênicos do Grupo Barreiras e cretáceos do Grupo Itapecuru, denominado Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, semelhantemente ao observado nos sistemas aquíferos Dunas-Barreiras em Natal (MELO, 1995), Barreiras Barreiras-Marituba em Maceió (NOBRE; NOBRE, 2000).

Na Ilha do Maranhão, o Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru, na porção superior, é livre e constituído por arenitos pouco consolidados com leitos de areias e argilitos continentais; na porção inferior, é confinado e formado por arenitos com intercalações de argilitos, siltitos, folhelhos e níveis calcíferos. Eles constituem um marcador estratigráfico entre as unidades oligo-miocênica e cretácea, a uma profundidade de aproximadamente 106 m, na porção centro-norte da Ilha do Maranhão, aflorando em pontos do litoral, em virtude da redução do pacote sedimentar superior.

O tratamento e espacialização dos parâmetros hidráulicos e dimensionais evidenciaram a região centro-norte da área de estudo, sobretudo os cursos alto e médio das regiões hidrográficas do Paciência, Santo Antônio e Jeniparana, com carga hidráulica ≥ 20 m. Esse resultado é corroborado pela profundidade da interface entre os aquíferos Barreiras e Itapecuru e, por conseguinte, pela espessura saturada do aquífero Barreiras as quais exibem maiores registros nas regiões destacadas. Nessas regiões ocorrem os menores valores de níveis estático e dinâmico; menores valores de rebaixamento; maiores registros de vazões de teste; e acentuados valores de capacidade ou vazão específica nos poços instalados. A profundidade da interface água doce-água salgada também é maior na porção central da Ilha e reduz em direção ao litoral, com destaque para as regiões do Itaqui, Riacho dos Cachorros e Estiva.

Quantos aos aspectos hidrodinâmicos, na Ilha do Maranhão, predominam poços com seções filtrantes em aquífero confinado, em regime permanente, com drenança das camadas confinantes, as quais estão representadas por níveis de argila, argilito, siltito e calcário. Em vista disso, a solução analítica que melhor ajustou os dados de testes de bombeamento foi de Hantush e Jacob (1955). As estimativas médias de transmissividade, coeficiente de armazenamento e de condutividade hidráulica para a área de estudo foram de $8,33 \times 10^{-4}$ m²/s, $2,49 \times 10^{-2}$ e $1,93 \times 10^{-5}$ m/s, respectivamente. Essas ordens de grandeza acompanham os valores de literatura para os aquíferos Barreiras ($T = 10^{-3}$ m²/s, $S = 10^{-2}$ e $K = 10^{-4}$ m/s) e Itapecuru ($T = 10^{-4}$ m²/s, $S = 10^{-4}$ e $K = 10^{-5}$ m/s) baseados em Acqua-Plan (1972) e Rebouças (1972).

Quanto à espacialização dos parâmetros hidrodinâmicos, estimativas de transmissividade entre 10^{-4} e 10^{-3} m²/s abrangem 80% da área de estudo; de condutividade

hidráulica $\geq 10^{-5}$ m/s ocorrem em torno de 52% da área investigada; e de coeficiente de armazenamento entre 10^{-5} e 10^{-2} e $\geq 10^{-2}$ compreendem aproximadamente 37% e 40% da área de estudo. Esses intervalos situam-se entre as porções centro-norte e centro-sul da Ilha do Maranhão, com destaque para as regiões hidrográficas do Paciência, Santo Antônio, Riacho dos Cachorros. Por outro lado, os menores registros de transmissividade ($< 10^{-6}$ m²/s) e condutividade hidráulica ($< 10^{-6}$ m/s) verificam-se nas regiões do Itaqui, Estiva e Praias; e os mais deprimidos de coeficiente de armazenamento ($< 10^{-5}$) ocorrem nas porções oeste e leste da Ilha do Maranhão.

Em relação aos parâmetros hidroquímicos, as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru exibem pH médio de 5,59 - próximo ao valor de equilíbrio de 5,7 oriundo da interação do vapor d'água com o gás carbônico atmosférico - indicando ser a água meteórica a fonte basilar de recarga dos mananciais subterrâneos na área investigada. Os íons mais frequentes nas amostras de água dos poços tubulares são o bicarbonato (28,54 mg/ L), sódio (21,77 mg/ L) e cloreto (21,18 mg/ L). Eles conferem as águas subterrâneas fácies hidroquímicas sódica cloretada (56% das amostras), sódica bicarbonatada (13%) e sódica mista (13%).

Essas fácies hidroquímicas ocorrem em toda a Ilha do Maranhão, com exceção da porções central da região do Tibiri e noroeste da área de estudo, entre as regiões do Bacanga e Itaqui, onde predominam fácies mista cloretada e bicarbonatada, associadas à presença de cálcio (6,42 mg/ L) e magnésio (4,11 mg/ L). Nas fácies hidroquímicas mais recorrentes, as fontes prováveis dos íons cloreto e sódio foram creditadas aos aerossóis marinhos, efluentes domésticos e intrusões salinas. Já os íons bicarbonato, cálcio e magnésio tiveram suas procedências relacionadas aos processos de formação e dissociação do ácido carbônico, resultante da reação da água meteórica com o CO₂ do solo, e da dissolução da calcita nos níveis calcíferos entre os aquíferos Barreiras e Itapecuru.

Quanto ao íon sulfato, sua concentração foi abaixo de 100 mg/ L em todas as amostras. Em relação ao nitrato, as concentração atingiram mais de 10 mg/ L em 52% das amostras analisadas, alcançando valores acentuados nas regiões do Itaqui, Tibiri e Paciência. A procedência foi relacionada aos efluentes domésticos e ao uso de fertilizantes agrícolas nas áreas rurais. No que tange ao STD, 63,42% da concentração média das amostras são dominadas pelos íons bicarbonato, sódio e cloreto; 100% apresentam teor abaixo de 500 mg/L (águas doces), com maior incidência na porção centro-sul e faixa litorânea da Ilha do Maranhão, e menor no domínio dos Tabuleiros Costeiros das regiões do Paciência e Santo Antônio.

Em um cenário de enquadramento das águas subterrâneas, levando-se em consideração os parâmetros cloreto, sódio, sulfato, nitrato, STD e turbidez, preceituados na Resolução CONAMA n° 396/2008, 48% das amostras foram inseridas na Classe 1 enquanto 52% foram enquadradas na Classe 3, esta última, sobretudo, pela influência antropogênica nas concentrações de nitrato acima de 10 mg/ L. Isso representa um cenário preocupante para a qualidade das águas subterrâneas, dada a conjuntura das políticas de saneamento na região e a solubilidade e mobilidade do contaminante juntamente com a água subterrânea, podendo atingir extensas áreas e profundidades, em locais com componentes de fluxos verticais.

Quanto aos levantamentos de radar de penetração no solo na Ilha do Maranhão, entre o Litoral de Mangues e Rias e os Tabuleiros Costeiros, os registros assinalam, em geral, dois padrões de reflexão separados por sinais de alta amplitude, contínuos, paralelos a subparalelos. Eles foram relacionados à superfície de descontinuidade, marcada por relevo erosivo, paleossolo laterítico, o qual remete à transição entre a sedimentação neogênica do Grupo Barreiras e a quaternária dos Sedimentos Pós-Barreiras, constituindo-se um marcador estratigráfico relevante para estudos hidrogeológicos.

Essas superfícies de descontinuidade são resistivas, apresentam baixa drenança e sua continuidade lateral pode ser indutora de escoamento horizontal, conduzindo a existência de aquíferos suspensos temporários e de nascentes ao longo das falésias costeiras. A presença de falhas e fraturas nos depósitos miocênicos e quaternários, observadas nos radargramas, representam incremento significativo nos fluxos verticais e, por conseguinte, nas taxas de infiltração nos depósitos cenozoicos, as quais constituem importante mecanismo de estabilidade da interface água doce-água salgada em ambientes costeiros insulares. Contrariamente, essas deformações acentuam a vulnerabilidade à poluição dos aquíferos rasos, favorecendo o transporte de contaminantes resultantes das atividades antrópicas.

Diante do arcabouço teórico e dos produtos gerados na fases de caracterização hidrogeológica, os produtos de síntese contemplaram a produtividade, a avaliação das reservas e das áreas de recarga, e a proposições à gestão do Sistema Aquífero Barreiras Itapecuru. A produtividade estimada a partir do modelo de Diniz *et al.* (2014), fundamentada nos princípios de Cartografia Hidrogeológica de Struckmeier e Margat (1995), e espacializada através das técnicas de análise espacial de dados indicaram que cerca de 77% da área de estudo exibe produtividade entre moderada e baixa, 15% mostra produtividade muito baixa e não produtiva e 8% apresenta produtividade alta.

Os conjuntos espaciais modelados permitiram a definição de 9 zonas: sendo 5 de produtividade alta a moderada e 4 de produtividade muito baixa a não produtiva. Na primeira

categoria estão as zonas: dos altos cursos das regiões hidrográficas do Paciência e Santo Antônio; do centro-leste da região hidrográfica do Riacho dos Cachorros, leste da Estiva e de Inhaúma; do centro-oeste da região hidrográfica do Jeniparana e de Guarapiranga; dos divisores topográficos entre as regiões hidrográficas do Tibiri, Riacho dos Cachorros e do Bacanga; e da porção central da região hidrográfica do Bacanga. Na segunda categoria estão as zonas: da porção central da região hidrográfica do Tibiri; do setor centro-oeste da região hidrográfica da Estiva; da porção centro-norte da região hidrográfica do Itaqui; e da porção leste da região hidrográfica das Praias.

No que concerne a avaliação das reservas renováveis, considerando o método das variações potenciométricas sazonais, a estimativa geral para a Ilha do Maranhão foi de 0,064km³/ano. As reservas geológicas ou permanentes foram estimadas ponderando-se as contribuições das reservas de saturação e de pressão dos aquíferos Barreiras e Itapecuru, chegando-se ao valor de 1,294 km³. Em virtude do baixo grau de conhecimento e monitoramento das respostas do sistema aquífero ao bombeamento, optou-se por percentual de 10% das reservas permanentes para o cálculo das reservas exploráveis, cujo valor médio para área de estudo foi de 0,193 km³/ano. Desse total, valores < 20.000 m³/ano ocupam 87% da área de estudo enquanto registros ≥ 20.000 m³/ano remontam a 13%, com maior concentração na porção centro-sul da Ilha do Maranhão.

A avaliação áreas de recarga considerou os domínios espaciais com carga hidráulica ≥20 m os quais encerram 162 km² da área investigada; as áreas de vegetação de influência marinha (restingas), vegetação secundária, dunas e praias as quais abrangem 505 km² da Ilha do Maranhão, com maior concentração nas regiões hidrográficas do Tibiri, Paciência, Bacanga, Santo Antônio; as unidades de conservação que envolvem aproximadamente 473 km² do território e que atuam na proteção das nascentes dos principais rios da Ilha e no disciplinamento do uso do solo; as áreas com profundidade da interface água doce-água salgada inferior a 100m, estimadas através do modelo de Ghyben-Herzberg, que compreendem cerca de 331 km² da área investigada; e por fim, a recarga regional originária da área aflorante do aquífero Itapecuru no continente, de aproximadamente 153.274 km² entre os estados do Maranhão, Pará e Tocantins.

Quanto ao arcabouço legal e institucional, no Estado do Maranhão, a Política Estadual de Recursos Hídricos foi instituída através da Lei n° 8.149, de 15 de junho de 2004, regulamentada pelo então Decreto n° 34.847, de 14 de maio de 2019. Ele estabelece a SEMA como órgão gestor do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado do Maranhão, cabendo a ela, entre outras atribuições, a emissão de Autorização para Perfuração de Poço, a Outorga de Direito de Uso preventiva e a Outorga de Direito de Uso de Recursos

Hídricos. Para tanto, os critérios gerais estão ordenados na Resolução CONERH/MA n° 57, de 21 de maio de 2019, e os procedimentos operacionais listados na Portaria SEMA n° 57, de 15 de maio de 2012.

O Decreto n° 28.008, de 30 de janeiro de 2012, foi empregado como instrumento norteador para a proposição das ações de gestão do sistema aquífero em estudo, as quais foram estruturadas ao longo de seis eixos : conservação, preservação e recuperação; cadastro de poços e sistemas de informações de recursos hídricos; monitoramento quali-quantitativo; enquadramento das águas subterrâneas; autorização para perfuração de poços tubulares e outorga de direito de uso da água; capacitação profissional e ações educativas.

Ao todo foram elencadas aproximadamente 30 proposições, o que remete a hipótese levantada no início da pesquisa, a saber: **o conhecimento atual dos aquíferos na Ilha do Maranhão é suficiente para sua gestão adequada?** Diante do exposto, apesar da relevância do conhecimento produzido; da base legal e institucional envolvida no gerenciamento integrado dos recursos hídricos subterrâneos na Ilha do Maranhão e no Estado; e da contribuição da pesquisa ora proposta; conclui-se que o conhecimento atual das unidades hidrogeológicas ainda não atingiu o patamar satisfatório para sua gestão adequada.

Essa assertiva está assentada sobre o quantitativo de proposições elencadas e sobre necessidade de investigação de aspectos essenciais para melhoramento das características geométricas e dimensionais dos aquíferos, de seus parâmetros hidráulicos e hidrodinâmicos, de suas potencialidades e disponibilidades efetiva e instalada, permitindo a melhor configuração dos cenários de superexploração. Entre outras recomendações citam:

- a) estimativa da espessura dos aquíferos Barreiras e Itapecuru através métodos geofísicos;
- b) definição dos parâmetros hidrodinâmicos atuais dos aquíferos Barreiras e Itapecuru;
- c) monitoramento do nível estático para estimativa das reservas renováveis;
- d) levantamento da quantidade de poços tubulares perfurados para fins de estimativa das disponibilidades efetiva e instalada na Ilha do Maranhão;
- e) avaliação do comportamento da interface água doce-água salgada através de métodos geofísicos;
- f) avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos sistemas aquíferos através dos métodos GOD, Drastic, Sintacs, entre outros;

- g) avaliação dos riscos de contaminação dos aquíferos na Ilha do Maranhão pelos hidrocarbonetos procedentes de vazamentos em sistemas de armazenamento subterrâneos de combustíveis em postos de revenda e distribuidoras;
- h) avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas na Ilha do Maranhão pela drenança da Lagoa do Jansen;
- i) realização de estudos nas regiões hidrográficas de Inhaúma, Riacho dos Cachorros, Itaqui e Estiva quanto ao risco de contaminação por rejeitos industriais e mineração;
- j) realização de estudos hidrogeológicos nas Ilhas de Tauá-Mirim e Curupu.

REFERÊNCIAS

AB’SÁBER, A. N. Fundamentos da geomorfologia costeira do Brasil Atlântico inter e subtropical. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, n. 1, p. 27-43, 2000.

AB’SÁBER, A. N. Contribuição à geomorfologia do Estado do Maranhão. **Notícia Geomorfológica**, ano 3, n. 3, p. 35-40, 1960.

ACQUA-PLAN. **Abastecimento d’água**: planejamento geral, São Luiz – MA. Recife: SUDENE, 1972. 55p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Disponibilidades e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2005. Disponível em <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2020.

_____. **Atlas Brasil**: abastecimento urbano de água. Panorama nacional. Brasília: ANA/Engecorps/Cobrape, 2010. Disponível em <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/downloads/atlas/Resumo%20Executivo/Atlas%20Brasil%20-%20Volume%201%20-%20Panorama%20Nacional.pdf>>. Acesso em: 7 jul. 2013.

_____. **Atlas esgotos**: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília: ANA, 2017b. 88p. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2018.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: regiões hidrográficas brasileiras, edição especial. Brasília: ANA, 2015. 163p. Disponível em: <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_2015.pdf>. Acesso em: 02. fev. 2018.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil, 2017**: relatório pleno. Brasília: ANA, 2017a. 169p. Disponível em: <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2017_rel.pdf>. Acesso em: 10. jun. 2018.

_____. **Estudos hidrogeológicos da região metropolitana de São Luís – MA**. Subsídio para uso sustentável dos recursos hídricos. Relatório parcial 07 – levantamento altimétrico; ensaios de infiltração; datação por termoluminescência; análises físico-químicas, bacteriológicas e isotópicas; balanço hídrico e elaboração de modelo numérico. Brasília: ANA, CPRM, 2018. 122p.

_____. Resolução n° 317, de 26 de agosto de 2003. Institui o Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH). Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2003/317-2003.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

_____. **Estudos hidrogeológicos para subsidiar a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió**. Vol. IV – Avaliação da recarga natural, reservas e potencialidades dos aquíferos; exutórios naturais, balanço hidrogeológico e análise econômica da água subterrânea; plano de gestão e seleção de pontos para implantação de sensores telemétricos. Brasília: ANA, SIP, 2011. 118p. Disponível em: <<https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?id=265&currTab=simple>>. Acesso em: 21. jul. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL E BICOMBUSTÍVEIS.

Sistema de consulta de postos revendedores. Disponível em:

<<http://www.anp.gov.br/?id=1086>. 2011>. Acesso em 28 jun. 2011.

ALBARÈDE, F. **Geoquímica uma introdução.** São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 400p.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J.; HACKETT, G. **DRASTIC:** a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. Washington: Environmental Protection Agency Report 600/2-87-035, 1987

ALMEIDA, H. G. de. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil.** São Luís SW/NW, Folhas SA.23-V e AS.23-Y. Estados do Maranhão e Pará. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM, 2000.

ALMEIDA, J. B. **A qualidade de águas superficiais e subterrâneas na Bacia do Rio da Prata/São Luís Maranhão sob efeito da ação antrópica.** 2013. 121f. Tese (Doutorado em Física). Universidade Federal Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em:<

<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/13877>

<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/7257>>. Acesso em: 01. jan. 2020.

ALMEIDA-FILHO, R.; ROSSETTI, D. de F.; MIRANDA, F. P.; FERREIRA, F. J.; SILVA, C.; BEISL, C. Quaternary reactivation of a basement structure in the Barreirinhas Basin, Brazilian Equatorial Margin. **Quaternary Research**, v. 72, p. 103-110, 2009.

AMORIM, K. C.; SANTOS, J. H. S. dos. Levantamento das áreas de risco de contaminação das águas subterrâneas na sub-bacia do rio Maracanã. **Cad. Pesq.**, v. 19, n. especial, p. 14-23, jul. 2012.

ANAISSE JÚNIOR, J.; TRUCKENBRODT, W.; ROSSETTI, D. de F. Fácies de um sistema estuarino-lagunar no Grupo Itapecuru, área de Açailândia/MA, Bacia de Grajaú. In: ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú.** Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 119-150.

ANNAN, A. P. **Ground penetrating radar:** workshop notes. Mississauga, Ontário: Sensors & Software Inc., 2001. 197p.

ANDRADE, M. M. N. de; SOUZA FILHO, P. W. M.; SZLAFZTEIN, C. F. Mapa geomorfológico da região Itaqui-Bacanga, São Luís (MA), usando imagens de alta resolução e sistemas de informações geográficas. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 11., 2007, Belém. **Anais eletrônicos...** São Paulo: ABEQUA, 2007. Disponível em:<

http://www.abequa.org.br/trabalhos/2007_milena_marilia_gerenciaimento.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2015.

AQUINO, W. F. **Métodos geofísicos eletromagnéticos aplicados ao diagnóstico da contaminação do solo e da água subterrânea em área de infiltração de resíduos industriais.** 2000. 134f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ARAGON, A. A.; VERMA, M. P. The slug test as a technical tool in aquifers characterization. In: DOMINIC. P. TORRES. (Org.). **Water Engineering.** New York: Nova Science Publishers, Incorporated, 2011. p. 149-188. Disponível em:

<<http://ebookcentral.proquest.com/lib/univbrasil-ebooks/detail.action?docID=3021376>>.

Acesso em: 08. abr. 2020.

ARAI, M. A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. **Geologia USP, Série Científica**, v. 6, n. 2, p. 1-6, out. 2006

- ARAI, M.; UESUGUI, N.; ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no nordeste do Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1988. p. 738-752.
- ARANHA, L. G. de F.; LIMA, H. P.; SOUZA, J. M. P. de; MAKINO, R. K.; FIGUEIRAS, A. J. M. Evolução tectônica e sedimentar das bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1988. p. 2487-2497.
- ARAÚJO, E. P. de; TELES, M. G. L.; LAGO, W. J. S. Delimitação das bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão a partir de dados srtm. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos/SP: INPE, 2009. p. 4631-4638. Disponível em: <<http://mar.te.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.23.07.25/doc/4631-4638.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2018.
- AZEVEDO, R. P. de. **Tectonic evolution of Brazilian equatorial continental margin basins**. 1991. 494f. Thesis (Ph. D.) - University of London, London, 1991.
- BAKER, G. S.; JOL, H. M. **Stratigraphic analyses using gpr**. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 2007. 181p.
- BARROS, J. F. **Contribuição de isótopos ambientais na identificação da interação água subterrânea/água superficial na Bacia Hidrográfica do rio da Prata-MA**. 2013. 115f. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- BARTORELLI, A. Contexto geológico e evolução da rede hidrográfica do Brasil. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M. de; BARTORELLI, A. (Org.). **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012. p. 574-610.
- BATISTA, A. M. **Caracterização paleoambiental dos sedimentos Codó-Grajaú, Bacia de São Luís (MA)**. 1992. 102f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Pará, Belém, 1992.
- BELL, F. G. **Engineering geology**. Oxford: Elsevier Science & Technology, 2006. Disponível em: <<http://ebookcentral.proquest.com/lib/univbrasil-ebooks/detail.action?docID=285826>>. Acesso em: 08. abr. 2020
- BERES, M.; HAEINS, F. P. Application of ground-penetrating-radar methods in hydrogeologic studies. **Groundwater**, v. 29, n. 3, p. 375-386, May-Jun., 1991.
- BERTOLDO OLIVEIRA, J. M. **Qualidade da água subterrânea na região do distrito industrial de São Luís – MA**. 2016. 87f. Dissertação (Mestrado em Saúde e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2016.
- BERTRAND, G.; BERTRAND, C. **Uma geografia transversal e de travessias: o meio ambiente através dos territórios e das temporalidades**. Maringá: Ed. Massoni, 2007. 332p.
- BEZERRA, D. da S. **Ecosistema de manguezal em meio urbano no contexto de políticas públicas de uso e ocupação do solo na bacia do rio Anil, São Luís, Maranhão**. 2008. 221f. Dissertação (Mestrado em Saúde e Ambiente) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2008.
- BEZERRA, D. da S. **Modelagem da dinâmica do manguezal frente à elevação do nível do mar**. 2014. 98f. Tese (Doutorado em Ciências do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

BEZERRA, F. H. R.; ROSSETTI, D. de F.; OLIVEIRA, R. G.; MEDEIROS, W. E.; BRITONEVES, B. B.; BALSAMO, F.; NOGUEIRA, F. C. C.; DANTAS, E. L.; ANDRADES-FILHO, C.; GÓES, A. M. Neotectonic reactivation of shear zone and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. **Tectonophysics**, v. 614, p. 78-90, 2014.

BEZERRA, J. F. R. **Geomorfologia e reabilitação de áreas degradadas por erosão com técnicas de bioengenharia de solos na bacia do rio Bacanga, São Luís – MA**. 2011. 249f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

BEZERRA, F. H. R.; ROSSETTI, D. de F.; OLIVEIRA, R. G.; MEDEIROS, W. E.; BRITONEVES, B. B.; BALSAMO, F.; NOGUEIRA, F. C. C.; DANTAS, E. L.; ANDRADES-FILHO, C.; GÓES, A. M. Neotectonic reactivation of shear zone and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. **Tectonophysics**, v. 614, p. 78-90, 2014.

BIGARELLA, J. J.; ANDRADE, G. O de. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreiras). **Arquivos do Instituto de Ciências da Terra**, v. 2, p. 2-14, 1964.

BOLETIM METEOROLÓGICO. **Edição especial**. São Luís: Núcleo Geoambiental, out. 2009. Disponível em < <http://www2.uema.br/imagens/bltesp2009.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2018.

BOUWER, H.; RICE, R. C. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 423-428, 1976

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Projeto Radam**. Folha SA.23 São Luís e parte da folha SA.24 Fortaleza: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1973.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação e dá outras providências. **Presidência da República**, Brasília, DF. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=322>> Acesso em: 20 jan. 2018.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. Presidência da República, Brasília, DF. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm>. Acesso em: 13 jun. 2020.

BRISTOW, C. S.; JOL, H. M. **Ground penetrating radar in sediments**. London: Geological Society, 2003. 327p.

BRITO, F. V. do, OLIVEIRA, A. S. de, NEVES, H. C., AZEVEDO, J. A. T., BHERING, D. L., REIS, S. M. dos, MACHADO, M. C. S., AZEVEDO, G. C., CARVALHAES, G. K. Estudo da contaminação de águas subterrâneas por BTEX oriundas de postos de distribuição no Brasil. In: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Congr. Bras. de P&D. em Petróleo e Gás, 3. 2004. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0563_05.pdf>. Acesso em 28 jun. 2011.

BURBANK, D. W.; ANDERSON, R. S. **Tectonic geomorphology**. 2. ed. NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011. 274p. Disponível em: < http://www.cec.uchile.cl/~fegallar/Tectonic_Geomorphology.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2016.

- BURNETT, F. L. **Além do rio Anil, urbanização e desenvolvimento sustentável**: estudo sobre a sustentabilidade dos tipos de urbanização na cidade de São Luís do Maranhão. 2002. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Urbano). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002.
- BURNETT, F. L.; FERREIRA, E. A. Relatório N° 20 – município de São Luís: avaliação da Lei N° 4669/2006. In: SANTOS JÚNIOR, O. A. dos; MONTANDON, D. T. **Os planos diretores municipais pós-estatuto da cidade**: balanço crítico e perspectivas. Rio de Janeiro: Letra Capital: Observatório das Cidades: INPUR/UFRJ, 2011. Disponível em: < <http://pt.scribd.com/doc/126034588/MA-Relatorio-Municipal-n%C2%BA20-Sao-Luis-Frederico-Lago-Burnett-e-Edelcy-Ferreira-Jun-2009#scribd>>. Acesso em: 02 nov. 2013.
- CABRAL, J. da S. P. Movimento das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 77-91.
- CABRAL FREIRE, M. C. C.; MONTEIRO, R. A. Florística das praias da Ilha de São Luís, Estado do Maranhão (Brasil): diversidade de espécies e suas ocorrências no litoral brasileiro. **Acta Amazônica**, v. 23, n. 2-3, p. 125-140, 1993.
- CAMPOS, J. E. G.; GASPAR, M. T. P.; GONÇALVES, T. D. **Gestão de recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal**: diretrizes, legislação, critérios técnicos, sistema de informação geográfica e operacionalização. Brasília: Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal, 2007. 153p. Disponível em: <http://www.adasa.df.gov.br/images/storage/area_de_atuacao/recursos_hidricos/regulacao/resolucoes_estudos/Estudo_Eloi-Gestao_DF_Integrado.pdf>. Acesso em: 19. Jul. 2020.
- CAPRI, E.; CIVITA, M.; CORNIELO, A.; CUSIMANO, G.; DE MAIO, M.; DICCI, D.; FIORUCCI, A.; HAUSER, S.; PISCIOTTA, A.; PRANZINI, G.; TREVISAN, M.; DELGADO HUERTAS, A.; FERRARI, F.; FRULLINI, R.; NISI, B.; OFFI, M.; VASELLI, O.; VASSALLO, M. Assessment of nitrate contamination risk: the italian experience. **Journal of Geochemical Exploration**, v.102, n.2, p.71-86, ago. 2009.
- CAPUTO, M. V. Análise do modelo geotectônico de Rabinowitz e Labrecque. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., 1988, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1988. p. 2292-2307.
- CASTRO, H. F. R.; PEREIRA, E. D. Cartografia geológico-geotécnica da bacia hidrográfica do rio dos Cachorros. **Revista GEONORTE**, v. 3, n. 4, p. 750-759, 2012.
- CASTRO, T. C. S. de; SANTOS, F. R. B. dos. Diagnóstico ambiental da atividade de extração mineral classe 2 na bacia hidrográfica do Rio do Cachorros, São Luís – MA, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 67-76, jan.-fev., 2012. Disponível em: < <http://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RBGA/article/download/1152/1576>>. Acesso em: 16 fev. 2018.
- CAVALCANTI JÚNIR, F. A. **Zoneamento do escoamento superficial da bacia hidrográfica do rio Paciência, Ilha do Maranhão, MA**. 2016. 240f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Presidente Prudente, 2016. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/134353> >. Acesso em: 16. fev. 2018.
- CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, L. F. S. P. Avaliação geoquímica da Bacia de São Luís. **Boletim Técnico da Petrobras**, v. 28, n. 3, p. 151-158, jul./set., 1985.

CHRISTOPHERSON, R. W. **Geossistemas**: uma introdução à geografia física. Tradução: Francisco Eliseu Aquino et al.; revisão técnica: Francisco Eliseu Aquino, Jefferson Cardia Simões, Ulisses Franz Bremer. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 728 p.

CIVITA, M. *et al.* **Carta de la vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane**. Firenze: Gruppo Nazionale per la Difesa Delle Catastrofi Idrogeologiche, 1990. 56p.

CLIMANÁLISE. **Boletim de monitoramento e análise climática**. Cachoeira Paulista: CPTEC/INPE, v. 27, n. 7-12, fev./mar. 2012. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/index0312.shtml>>. Acesso em: 25 jul. 2015.

_____. **Boletim de monitoramento e análise climática**. Cachoeira Paulista: CPTEC/INPE, v. 28, n. 1-6, jan./jun. 2013. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/index0312.shtml>>. Acesso em: 25 jul. 2015.

COELHO, M. T. de M. **Avaliação da eficácia da lei de uso e ocupação do solo em São Luís**: o caso da Lagoa da Jansen. 2002. 145f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Urbano). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002. Disponível em: <<http://www.liber.ufpe.br/teses/arquivo/20030904152257.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2013.

COELHO, S. C. **Condições sanitárias do solo e da água dos poços tubulares da comunidade rural Cinturão Verde de São Luís- MA: parâmetros físicos e químicos, colimétricos e parasitológicos**. 2017. 127f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública e Meio Ambiente) – Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2017.

COELHO, A. C. P.; PAIXÃO, V. M.; OLIVEIRA, T. S.; RIBEIRO, E. B. R.; CARVALHO-NETA, R. N. F. Impactos causados por tensores de origem antrópica no manguezal do Araçagy – Ilha de São Luís – MA. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 8., 2007, Caxambu. **Anais...** Caxambu: SEB, 2007. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/267559487>>. Acesso em: 6 jan. 2018.

COELHO, C. J. C.; DAMÁSIO, E. Aspectos da disponibilidade e dos usos da água na Bacia do rio Bacanga/ Ilha do Maranhão (I. de São Luís) – Ma. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**, v. 19, p. 73-84. 2006

COELHO, M. de S. **Estudo da estrutura vertical horizontal da precipitação e da circulação atmosférica na região da ZCIT**. 2002. 158f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS)**. 2020. Disponível em: <<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>>. Acesso em: 7 jul. 2020.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO MARANHÃO (CAEMA). **Relatório anual da qualidade da água produzida pelo sistema de abastecimento de água de São Luís**. 2013. Disponível em: <http://www.caema.ma.gov.br/portalcama/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=546&Itemid=93>. Acesso em: 8 nov. 2015.

CONCEIÇÃO, J. C. de J. ZALAN, P. V. WOLFF, S. Mecanismo, evolução e cronologia do rift sul-atlântico. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 2, n. 2/4, p. 255-265, abr./dez., 1988.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

_____. Resolução nº 396, de 7 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília, DF. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). Resolução nº 22, de 24 maio de 2002. Dispõe sobre os planos de recursos hídricos. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2022.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

_____. Resolução nº 16, de 8 de maio de 2001. Estabelece critérios gerais para outorga de direito de uso dos recursos hídricos. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=97757>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

_____. Resolução nº 107, de 13 de abril de 2010. Estabelece diretrizes e critérios a serem adotados para planejamento, implantação e operação da Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas subterrâneas. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20100520_Resolucao%20cnrh%20107_%20monitoramento%20AS.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

_____. Proposta de Resolução nº 92, de 5 de novembro de 2008. Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro. Disponível em: <https://www.abas.org/arquivos/resolucao_cnrh_92_prot_conserv_as.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS/MA (CONERH/MA). Resolução nº 57, de 21 de maio de 2019. Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos e dá outras providências. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=377937>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

COOPER, H. H.; BREDEHOEFT, J. D; PAPADOPULOS, I. S. Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water. **Water Resources Research**, v. 3, n. 1, p. 263– 269, 1967.

COOPER, H. H.; JACOB, C. E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 27, n. 4, p. 526-534, aug.1946

CORDANI, U. G.; BRITO NEVES, B. B. de; THOMAZ FILHO, A. Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras (atualização). **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 17, n. 1, p. 205-219, nov. 2008/mai. 2009.

CORDEIRO, P. W. S. **Variações do regime climático de São Luís - MA**. 2015. 115f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2015.

CORSEUIL, H. X., MARINS, M. D. M. 1997. Contaminação de águas subterrâneas por derramamentos de gasolina: o problema é grave? **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n.2, p. 50-54. 1997.

CORRÊA, P. M. **Crítérios para determinação de vazões outorgáveis em mananciais subterrâneos: aplicação no Distrito Federal**. 2011. 104f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Disponível em: <
https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/17849/1/2011_PolianaMarcolinoCorrea.pdf>. Acesso em: 30. jul. 2020.

CORRÊA, E. L. S.; PINHEIRO, K. S. F.; SOUSA, C. J. S.; DIAS, L. J. B. da S. Qualidade das águas e nível trófico da bacia do rio Paciência, na Ilha do Maranhão, Brasil. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, v. 21, n. 2, p. 437-453, set. 2019. Disponível em: <
<https://rcgs.uvanet.br/index.php/RCGS/article/view/521> >. Acesso: 19. ago. 2020.

COSTA, C. M.; SILVA, Q. D.; COSTA, I. R. dos S.; BARROS, D. V.; TEIXEIRA, E. C. Suscetibilidade a inundações a partir das variáveis morfométricas na região hidrográfica Eliezer Silva – alto curso do rio Paciência. **Revista Encontro Geográfico**, n. 13, p. 68-80, 2017. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/323759459>>. Acesso em: 19. Ago. 2020.

COSTA, A. H. R.; NUNES, C. C.; CORSEUIL, H. X. Biorremediação de águas subterrâneas impactadas por gasolina e etanol com o uso de nitrato. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n.2, p. 265-274, abr./jun. 2009.

COSTA, H. de O. S. **Análise hidrogeológica aplicada à gestão das águas - região oeste da Ilha de São Luís**. 2003. Monografia (Especialização em Recursos Hídricos e Meio Ambiente) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2003.

COSTA, W. D. Avaliação de reservas, potencialidades e disponibilidade de aquíferos. **Revista Águas Subterrâneas**, 2000. Disponível em: <
<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/22276/14619>>. Acesso em: 21. jul. 2020.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V. **Curso de sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico**. São José dos Campos: INPE, 1996. 18p.

D'ABEVILLE, C. **História da missão dos padres capuchinhos na Ilha do Maranhão e suas circunvizinhanças**. Traduzida e anotada por Cezar Augusto Marques. São Luís: Typ. do Frias, 1874. 456 p.

DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; BANDEIRA, I. C. N.; SOUZA, L. V. de; RENK, J. F. C. Compartimentação geomorfológica. In: BANDEIRA, I. C. N (Org.). **Geodiversidade do Estado do Maranhão**. Teresina: CPRM. 2013. p. 31-62.

D'EVREUX. **Viagem ao norte do Brasil**: feita nos anos de 1613 a 1614. Traduzida por Cezar Augusto Marques. São Paulo: Siciliano, 2002. 436 p.

DEHAINE, J. **Detecção da pluma de contaminação de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método radar de penetração**. 2001. 159f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

DIAS, S. B.; SANTANA, C.; SOARES, D.; SOARES, R. V. Análise dos dados qualitativos dos poços tubulares em produção do Complexo Ponta da Madeira, São Luís/MA. **Revista Águas Subterrâneas**, 2014. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28260>>. Acesso em: 6 jun. 2018.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. de C. da; PAULA, T. L. F. de. **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo**: instruções técnicas. Brasília: CPRM, 2014. 46p. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Mapa-Hidrogeologico-do-Brasil-ao-Milionesimo-756.html>>. Acesso em: 14 mai. 2018.

DUPUIT, J. **Estudes théoretiques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et a travers les terrains perméables**. 2.ed. Dunod: Paris, 1863.

EL-ROBRINI *et al.* Maranhão. In: MUEHE, D. (Org.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: MMA, 2006. p. 87-130. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_arquivos/ma_erosao.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2013.

ESPIG, S.; REIS, I. A.; ARAÚJO, E. P. de. Identificação do ecossistema de mangue na Ilha do Maranhão através de técnicas de classificação utilizando imagens do sensor CCD/CBERS-2. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007, p. 5731-5737. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.14.34/doc/5731-5737.pdf>>. Acesso em: 6 jan. 2018.

ESPÍRITO SANTO, J. M. São Luís: uma leitura da cidade. **São Luís**: Prefeitura de São Luís/Instituto de Pesquisa e Planificação da Cidade, 2006. 94p.

FEITOSA, A. C. Controvérsias na denominação da Ilha do Maranhão: uma contribuição ao ensino da geografia. **Geonordeste**, ano IV, n. 1, p. 71-76. 1987.

FEITOSA, A. C., 1989. 196f. **Evolução morfogenética do litoral norte da Ilha do Maranhão**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 1989.

_____. Morfodinâmica da área costeira a nordeste da Ilha do Maranhão. In: SIMPÓSIO DE QUANTIFICAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS, 8., 1997, Rio Claro. **Anais...** Rio Claro: UNESP, 1997. v.1, p. 45-47.

_____. Relevô do estado do Maranhão: uma nova proposta de classificação topomorfológica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA/ REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6., 2006, Goiânia. **Anais eletrônicos...** Goiânia: UGB, IAG, 2006. Disponível em: <<http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/sinageo/articles/476.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2015.

_____. A zona costeira e o litoral na Ilha do Maranhão, estado Maranhão – Brasil. In: ENCUESTRO DE GEÓGRAFOS DE AMÉRICA LATINA, 14., 2013, Lima. **Anais eletrônicos...** Lima/Peru: EGAL, 2013. Disponível em: <>. Acesso em: 13 jun. 2015.

FEITOSA, A. C.; CHRISTOFOLETTI, A. C. F. E. A. Caracterização geomorfológica das praias do litoral norte do município de São Luís Ma. In: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 5., 1993, São Paulo. **Anais...**São Paulo: USP, 1993. v. 1, p. 231-236.

FEITOSA, E. C.; FEITOSA, F. A. C. Metodologia básica de pesquisa de água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 179-207.

- FEITOSA, F. A. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. Testes de bombeamento em poços tubulares. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 507-523.
- FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA, E. C.; MANOEL FILHO, J. Análise de fluxo para meios homogêneos. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008a. p. 525-573.
- FEITOSA, E. C.; MANOEL FILHO, J.; COSTA, W. D.; FEITOSA, F. A. C.; DEMÉTRIO, J. G. A.; FRANÇA, H. P. M. de. Avaliação de recursos hídricos. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008b. p. 661-671.
- FERRAZ, C. M. L.; VALADÃO, R. C. Barreiras: formação ou grupo? (contribuições da análise geomorfológica do litoral sul da Bahia e das “Chapadas do Jequitinhonha”). In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 11., 2005. **Anais...** São Paulo: ABEQUA Disponível em: <http://www.abequa.org.br/trabalhos/0114_artigo_caio_ferraz_versao_final_.pdf>. Acesso em: 18 set. 2014.
- FERREIRA, A. J. de A. Dinâmica de ocupação espacial/uso do solo em São Luís no período de 1950 a 2000. **Cad. Pesq.**, v. 13, n. 2, p. 23-36, jul./dez. 2002.
- FERREIRA, S. M. **Relação entre a espessura real e aparente da gasolina com etanol e da gasolina pura em colunas de laboratório**. 2003. 107f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- FERREIRA JÚNIOR, C. R. P.; COSTA, J. B. S.; BEMERGUY, R. L.; HASUI, Y. Neotectônica da região da bacia de São Luís. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5., 1996, Belém. **Anais...** Belém: SBG/NO, 1996. p. 297-300.
- FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. da S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15-28, dez. 2005.
- FERREIRA, S. M. **Relação entre a espessura real e aparente da gasolina com etanol e da gasolina pura em colunas de laboratório**. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 107p.
- FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2001. 615p.
- FITTS, C. R. **Águas subterrâneas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- FLORENZANO, T. G. **Unidades geomorfológicas da região sudeste (SP) identificadas através de imagens de satélites**. 1993. 173 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.
- FONSECA NETO, H. da. **Potencial de integração de uma área periférica ao centro histórico: o caso do Aterro do Bacanga em São Luís – MA**. 2002. 162f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Urbano). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2002. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br:8080/xmlui/handle/123456789/3411>>. Acesso em: 02 nov. 2013.
- FONSECA, I. L. A.; MOCHEL, F. R. Fitomassa aérea de um manguezal no estuário do rio dos Cachorros, São Luís, Maranhão, Brasil. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**, v. 26, p. 17-25, 2016.

- FORCHHEIMER, P. Ueber die ergiebigkeit von brunnen-anlagen und sicker-schlitzten. **Z. Architekt. Ing. Ver. Hannover**, v. 32, p. 539-563, 1886.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: WHO-PAHO/HPE-CEPIS, 1988. 81p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Protección de la calidad del agua subterránea**: guia para empresas de agua, autoridades municipales e agencias ambientales. Washington: Banco Internacional de Reconstrucción y Foment/ Banco Mundial, 2002. 115p.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Águas subterráneas**. São Paulo: Everton de Oliveira, 2017.
- GALANTE, G. C. S. **Plumas de contaminação por hidrocarbonetos em diferentes cenários hidrogeológicos paulistas**. 2008. 140f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.
- GANDINI, R.; ROSSETTI, D. de F.; GUIMARÃES NETTO, R.; BEZERRA, F. H. R.; GÓES, A. G. Neotectonic evolution of the Brazilian northeastern continental margin based on sedimentary facies and ichnology. **Quaternary Research**, v. 82, n. 2, p. 462-472, set. 2014.
- GASPAR, M. T. P. **Sistema Aquífero Urucuia**: caracterização regional e proposta de gestão. 2006. 204f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/6742>>. Acesso em: 8. ago. 2020.
- GERENCIAMENTO COSTEIRO DO MARANHÃO. **Subprojeto 01**: diagnóstico ambiental da Ilha do Maranhão com a implementação do Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro do Estado do Maranhão – GERCO Ilha do Maranhão – Etapa 1. São Luís: SEMA, 2010. Disponível em: <<file:///C:/Users/Claudio/Downloads/GERCO%20-%20Final.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2018.
- GOKHALE, K. V. G. K. **Principles of engineering geology**. Hyderabad: Global Media, 2007. Disponível em: <<http://ebookcentral.proquest.com/lib/univbrasilia/ebooks/detail.action?docID=3011320>>. Acesso em: 08. abr. 2020.
- GOMES, C. de M. T. **Degradação ambiental urbana e qualidade de vida nas áreas de manguezais ocupadas por palafitas em São Luís – MA**. 2001. 68f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2001.
- GONÇALVES, J. A. C.; VIEIRA, E. M. Aquífero Barreiras: alto potencial hídrico subterrâneo na porção do Baixo Rio Doce no Estado do Espírito Santo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 20., 2018. **Anais...** Campinas: ABAS. Disponível em: <<10.13140/RG.2.2.32663.62882>>. Acesso em: 21. jul. 2020.
- GORAYEB, P. S. de S.; GAUDETTE, H.; MOURA, C. A. V.; ABREU, F. de A. M. de. Geologia e geocronologia da Suíte Intrusiva Rosário, Nordeste do Brasil, e sua contextualização geotectônica. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 4, p. 571-578, 1999.
- GORINI, M. A. The tectonic fabric of Equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to Northeastern Brazil. In: Projeto REMAC. **Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira, e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, CENPES, DINTEP, 1981. p.11-116.

GOVERNO DO ESTADO DO MARANHÃO. Decreto nº 13.494, de 12 de novembro de 1993. Regulamenta o Código de Meio Ambiente do Estado do Maranhão. Disponível em: <<http://stc.ma.gov.br/legisla-documento/?id=2601#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2013.494%20DE%2012,que%20lhe%20conferem%20o%20art.>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

_____. Decreto nº 5.405, de 8 de abril de 1992. Institui o Código de Proteção de Meio Ambiente e dispõe sobre o Sistema Estadual de Meio Ambiente e o uso adequado dos recursos hídricos do Estado do Maranhão. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=129406>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

_____. Decreto nº 8.149, de 15 de junho de 2004. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, o Sistema de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos, e da outras providências. Disponível em: <<http://stc.ma.gov.br/legisla-documento/?id=2016>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

_____. Decreto nº 27.845, de 18 de novembro de 2011. Regulamenta a Lei nº 8.149 de 15 de junho de 2004. Disponível em: <<http://stc.ma.gov.br/legisla-documento/?id=4690>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

_____. Decreto nº 28.008, de 30 de janeiro de 2012. Regulamenta a Lei nº 8.149 de 15 de junho de 2004. Revogado pelo Decreto nº 34.847, de 14 de maio de 2019. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=237511>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

_____. Decreto nº 34.847, de 14 de maio de 2019. Regulamenta a Lei nº 8.149 de 15 de junho de 2004. Revogado pelo Decreto nº 34.847, de 14 de maio de 2019. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=377721>>. Acesso em: 13 jun. 2020.

HANTUSH, M. S.; JACOB, C. E. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 36, n. 1, pp. 95-100, 1955.

HANTUSH, M. S. Modification of the theory of leaky aquifers. **Journal of Geophysical Research**, v. 65, n. 11, p. 3713-3725, 1960.

HASTENRATH, S. Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic sector. **Monthly Weather Review**, v. 112, p. 1097-1107, Jun. 1984.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climate hazards in Northeast Brazil. **Quart. J. R. Met. Soc.**, 103, p. 77-92, 1977.

HASUI, Y. Tectônica de placas e evolução dos continentes. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M. de; BARTORELLI, A. (Org.). **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012. p. 66-111.

HAZEN, A. Discussion: dams on sand foundations. **Transactions, American Society of Civil Engineers**, v. 73, p. 199-203, 1911

HIRATA, R.; VIVIANI-LIMA, J. B.; HIRATA, H. A água como recurso. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M. de; TAIOLI, F. (Org.). **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p. 448-477.

HIRATA, R.; FERNANDES, A. J. Vulnerabilidade à poluição de aquíferos: In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 405-424.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Maranhão**: malha municipal. Escala 1:250.000. 2018a. Disponível em: <
<https://portaldemapas.ibge.gov.br/porta1.php#mapa222138>>. Acesso em: 13 out. 2019.

_____. **Maranhão**: microrregiões. Escala 1:250.000. 2018b. Disponível em: <
<https://portaldemapas.ibge.gov.br/porta1.php#mapa222110>>. Acesso em: 13 out. 2019.

_____. **Maranhão**: mesorregiões. Escala 1:250.000. 2018c. Disponível em:
 <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/porta1.php#mapa222082>>. Acesso em: 13 out. 2019.

_____. **Bases cartográficas contínuas**: abastecimento, saneamento, energia, comunicação, estrutura econômica, hidrografia, limites, localidade, transporte. Escala 1:250.000. 2017. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/porta1.php#mapa220344>>. Acesso em: 13 out. 2019.

_____. **Base de informações do censo demográfico 2010**: resultados da sinopse MA. Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopseporsetores/> >. Acesso em: 17 ago. 2015.

_____. **Manual técnico uso da terra**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 171p. Disponível em< <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2018.

_____. **Manual técnico de vegetação brasileira**. 2. ed. rev. ampli. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 271p. Disponível em< <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2018.

_____. COORDENAÇÃO DE RECURSOS NARURAS E ESTUDIS AMBIENTAIS **Estado do Maranhão**: geomorfologia. Escala 1:400.000. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2011a. Disponível em: <
ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/geomorfologia/unidades_federacao/ma_geomorfologia.pdf>. Acesso em: 16 out. 2013.

_____. **Manual técnico de geomorfologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182p. Disponível em: <
ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/recursos_naturais/manuais_tecnicos/manual_tecnico_geomorfologia.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2016.

_____. **Estado do Maranhão**: pedologia. Escala 1:400.000. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2011b. Disponível em: <
ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/unidades_da_federacao/ma_pedologia.pdf>. Acesso em: 16 out. 2013.

_____. **Manual técnico de pedologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 182p. Disponível em: < <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37318.pdf> >. Acesso em: 24 fev. 2016.

HVORSLEV, M. J. Time lag soil permeability in ground-water observations. Waterways Experiment Station Corps of Engineers, U. S. Army, **Bulletin**, v. 36, p. 1-50, 1951.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). **Cidades históricas; inventário e pesquisa**: São Luís: Rio de Janeiro: IPHAN/Conselho do Senado Federal, 2006. 570 p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Governança metropolitana do Brasil**. Relatório de pesquisa. Caracterização e quadro de análise comparativa da governança metropolitana no Brasil: análise comparativa das funções públicas de interesse comum (componente 2). Região Metropolitana da Grande São Luís. Rio de Janeiro: IPEA, 2015. 86p. Disponível em:

<http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/re11_1_rmgs1.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2018.

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS (IMESC). **Situação ambiental da Ilha do Maranhão**. São Luís: IMESC, 2011. 57p. Disponível em: <

<http://imesc.ma.gov.br/src/upload/publicacoes/579d2d5480334a4bafbd95d68fcaceaf.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Normais climatológicas do Brasil. Período de 1961-1990. 2011. Disponível em: <

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em 25 jul. 2011.

JOL, H. M. **Ground penetrating radar: theory and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2008. 544p.

KAIPER, B. I. A. **Influência do etanol na solubilidade de hidrocarbonetos aromáticos em aquíferos contaminados por óleo diesel**. 2003. 176f. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

KARAMOUZ, M.; AHMADI, A.; AKHBARI, M. **Groundwater hydrology: engineering, planning, and management**. Boca Roca: Taylor & Francis Group, 2011. Disponível em:

<<http://ebookcentral.proquest.com/lib/univbrasil/ebooks/detail.action?docID=1449378>>. Acesso em: 07. abr. 2020.

KEMP, D. D. **Global environmental issues: a climatological approach**. London, GRB: Routledge, 1994. 241 p. Disponível em: <

<http://site.ebrary.com/lib/univbrasil/docPrint.action?encrypted=41d95d3cad16e92c6071f51372fb13ed35c3017d8ab5bd10847b9891b638f7931%E2%80%A6>> Acesso em: 27 set. 2014.

KLEIN, E. L.; MOURA, C. A. V. Síntese geológica e geocronológica do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi na região do rio Gurupi (NE-Pará/NW-Maranhão). **Geologia USP, Série Científica**, v. 3, p. 97-112, ago. 2003.

LACERDA, L. D.; ARAÚJO, D. S. D.; MACIEL, N. C. **Restingas brasileiras: uma bibliografia**. Rio de Janeiro: Fundação José Bonifácio, 1982. 56p.

LACROIX, M. de L. L. **Jerônimo de Albuquerque Maranhão: guerra e fundação no Brasil colonial**. São Luís: UEMA, 2006. 167 p.

LEMO, E. C. L. Análise das reservas, potencialidades e disponibilidades das águas subterrâneas em Maracanaú-Ceará. **Revista Ifes Ciência**, v. 4, n. 2, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.36524/ric.v4i2.346>>. Acesso em: 21. jul. 2020.

LEPSCH, I. F. Formação e conservação de solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.

LIMA, H. P.; ARANHA, L. G. F.; FEIJÓ, F. J. Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Graben de Ilha Nova. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 111-116, jan. /mar. 1994.

LIMA, L. G. de. **Estratigrafia e evolução holocênica de uma barreira costeira transgressiva/ regressiva, litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2012. 119f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Porto Alegre, 2012.

LIMA, R. D.; ROSSETTI, D. de F. Análise faciológica e sequencial de depósitos de delta de baía (Neocretáceo), leste da Bacia de Grajaú, MA. In: ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 151-174.

LIMA, A. S. Contributo dos aerossóis marinhos continentais para a composição química da precipitação atmosférica na região do Minho (NW de Portugal). In: CONGRESSO IBÉRICO DE GEOQUÍMICA, 6., 2007, Portugal. **Anais eletrônicos...** Vila Real: SPG, 2007. p. 442-445. Disponível em: < <https://www.socgeol.org/documents/contributo-dos-aerossóis-marinhos-e-continentais-para-a-composicao-quimica-da-precipitacao-atmosferica-na-regiao-do-minho-nw-de-portugal>>. Acesso em: 08 fev. 2020.

LINACRE, E.; GEERTS, B. **Climates and weather explained: an introduction from a southern perspective**. London, GRB: Routledge, 1997. 443 p. Disponível em: < <http://site.ebrary.com/lib/univbrasil/detail.action?docID=10057321&p00=climates+weather+explained%3A+introduction+southern+perspective>> Acesso em: 27 set. 2014.

LUZ, D. S. da. **Análise hidrogeológica aplicada à gestão das águas - região leste da Ilha de São Luís – MA**. 2003. 43f. Monografia (Especialização em Gestão de Recursos Hídricos e Meio Ambiente) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2003.

LUZ, J. S. da. **Lutas por moradia e expansão do espaço urbano na cidade de São Luís**. 2004. 132f. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas). Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2004.

MACEDO, J. R. dos S.; FEITOSA, A. C. Intervenção humana na paisagem da bacia do Igarapé da Guia, município de São Luís – MA. **Cad. Pesq.**, v. 18, n. 2, p. 27-37, mai./ago., 2011. Disponível em: < <http://www.periodicoeletronicos.ufma.br/index.php/cadernosdepesquisa/article/viewFile/515/283>>. Acesso em: 16 fev. 2018.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R. Neotectônica, geomorfologia e sistemas fluviais: uma análise preliminar do contexto nordestino. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 3, p. 37-46, 2011.

MANOEL FILHO, J. Ocorrências das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 53-75.

MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. Capacidade de produção de poços. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 617-644.

MANOEL FILHO, J.; CASTRO, V. L. L. de. Avaliação e exploração do Aquífero Dunas-Barreiras na região do subsistema lacustre do Bonfim – RN. **Revista Águas Subterrâneas**, 2002. Disponível em: < <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22572>>. Acesso em: 19. jul. 2020.

MARANHÃO. Lei Complementar n° 38, de 12 de janeiro de 1998. Dispõe sobre a Região Metropolitana da Grande São Luís. **Assembléia Legislativa**, São Luís, MA. Disponível em < http://arquivos.al.ma.leg.br:8080/ged/legislacao/LC_038>. Acesso em: 02 nov. 2013.

MARANHÃO. Lei Complementar n° 69, de 23 de dezembro de 2003. Dá nova redação à Lei Complementar no 038, de 12 de janeiro de 1998. **Assembléia Legislativa**, São Luís, MA. Disponível em < http://arquivos.al.ma.leg.br:8080/ged/legislacao/LC_069>. Acesso em: 02 nov. 2013.

MARANHÃO. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Coordenadoria de Programas Especiais. Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro **Macrozoneamento do Golfão Maranhense**. Diagnóstico ambiental da microrregião da Aglomeração Urbana de São Luís e dos municípios de Alcântara, Bacabeira e Rosário. Diagnóstico socioambiental. São Luís: SEMA/MMA/PNMA, 1998. 39p.

MARQUES, S. G. **Metodologia geofísica para contaminação por hidrocarbonetos – estudo de caso em posto de combustíveis**. 2007. 98f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MATHER, P. M.; KOCH, M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 4. ed. NJ: John Wiley & Sons, 2010. 462 p. Disponível em: < <http://site.ebrary.com/lib/univbrasil/reader.action?docID=10446751>>. Acesso em: 10 nov. 2013.

MARTINEZ, A. P. E. **Fundamentos de hidrogeologia**. Madri: Mundi Prensa, 2005. Disponível em:< <http://ebookcentral.proquest.com/lib/univbrasil/ebooks/detail.action?docID=3175843>>. Acesso em: 07. Abr. 2020.

MELO, J.G. 1995. 196f. **Impactos do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal/RN**. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1995. Disponível em: < https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-12112015-144250/publico/Melo_Doutorado.pdf >. Acesso em: 8. ago. 2020.

MELO, A, B. C de.; et al. Estudo climatológico da posição da ZCIT no Atlântico equatorial e sua influência sobre o Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9., 2000, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000. p. 1142-1147. Disponível em: < <http://www.cbmet.com/cbm-files/12-3ee699909a8af8f107c8b4a2d78e26c2.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2014.

MELO, A, B. C de; NOBRE, P.; MENDES, D.; BOTTINO, M. J. A zona de convergência intertropical sobre o oceano Atlântico: climatologia. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2002, Foz do Iguaçu-PR. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: SBMET, 2002. p. 681-686. Disponível em: < <http://www.cbmet.com/cbm-files/11-ca2ceab51d628883e4192023675150e6.pdf>> Acesso em: 20 out. 2014.

MENEZES, R. H. N. de. **Caracterização agroclimática e análise do rendimento agrícola do Estado do Maranhão**, Brasil. 2009. 188f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009. Disponível em: < http://www.dca.ufcg.edu.br/posgrad_met/teses/RonaldoHaroldoNascimentoMenezes_2009.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2018.

MERKEL, B. J.; PLANER-FRIEDRIC, B. **Geoquímica das águas subterrâneas**. Campinas: Editora da Unicamp, 2012. 244p.

MESNER, J. C.; WOOLDRIDGE, L. C. Estratigrafia das bacias paleozóica e cretácea do Maranhão. **Boletim Técnico da Petrobrás**, v. 7, n. 2, p. 137-164, abr./jun. 1964.

MESTRINHO, S. S. P. Qualidade e classificação das águas subterrâneas. In: GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALES, V. G (Org.). **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. 2. ed. rev. e atualizada. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 109-143.

_____. Monitoramento em água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 673-685.

MILANI, E. J.; RANGEL, H. D.; BUENO, G. V.; STICA, J. M.; WINTER, W. R.; CAIXETA, J. M.; PESSOA NETO, O. da C. Bacias sedimentares brasileiras – cartas estratigráficas. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 183-205, mai./nov. 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Cadastro nacional de unidades de conservação**. 2006. Disponível em: < <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 03 out. 2018.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Gabinete do Ministro**, Brasília, DF. Disponível em < http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/asabesp_doctos/PortariaMS291412122011.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2020.

MIRANDA, E. E. de. (Coord.). **Zoneamento ecológico-econômico do Estado do Maranhão**: mapa geomorfológico, folha SA.23-Z, escala 1:500.000. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2001. Disponível em: < <http://www.zee.ma.gov.br/icon/mfisico/g48.png>>. Acesso em: 4 abr. 2016.

MOCHEL, F. R. **Caracterização espectral e mapeamento dos manguezais por sensoriamento remoto na Baía de Turiiaçu, Maranhão, Brasil**. 1999. 153f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1999.

_____. Manguezais amazônicos: status para conservação e a sustentabilidade na zona costeira maranhense. In: MARTINS, M. B.; OLIVEIRA, T. G. de. org. **Amazônia maranhense: diversidade e conservação**. Belém: MPEG, 2011. p. 93-118.

MOCHEL, F. R. et al. Degradação dos manguezais na Ilha de São Luís (MA): processos naturais e impactos antrópicos. In: PROST, M. T.; MENDES, A. C. **Ecossistemas costeiros: impactos e gestão ambiental**. 2. ed. rev. atual. Belém: MPEG, 2013. p. 113-130.

MONTEIRO, A. B.; COSTA, W. D.; LIMA FILHO, M. de; BARBOSA, D. L. Hidrogeologia e gestão do Aquífero Barreiras nos bairros de Ibura e Jordão – Recife – Pernambuco. **Revista Águas Subterrâneas**, 2002. Disponível em: < <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/22625/14853> >. Acesso em: 21. jul. 2020.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in the Northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 2653-2675, Dec.1981.

NEAL, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth-Science Reviews**, v. 66, p. 261-330, 2004.

NOBRE, M. de. M. M; NOBRE, R. C. M. Uso sustentável de águas subterrâneas na região metropolitana de Maceió. **Revista Águas Subterrâneas**, 2000. Disponível em: < <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24328/16327>>. Acesso em: 31. ago. 2020.

NÚCLEO GEOAMBIENTAL (NUGEO). **Bacias hidrográficas e climatologia no Maranhão**. São Luís: NUGEO/CCA/UEMA, 2016. 165p. Disponível em: < <http://www.nugeo.uema.br/upnugeo/publicacoes/Bacias%20Hidrogr%C3%A1ficas%20e%20Climatologia%20-%20MA>>. Acesso em: 10 fev. 2018.

NEUMAN, S. P. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. **Water Resources Research**, v. 8, n. 4, p. 1031-1045, 1972.

_____. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. **Water Resources Research**, v. 11, n. 2, p. 329– 342, 1975.

NUNES, C. C.; CORSEUIL, H. X. Importância do etanol na atenuação natural de águas subterrâneas impactadas por gasolina. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 259-265, jul./set. 2007.

OLIVEIRA, E. **Contaminação de aquíferos por hidrocarbonetos provenientes de vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo**. 1992. 112f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

OLIVEIRA, G. N. R. **Caracterização regional e propostas para a gestão do Aquífero Batalha, Estado de Minas Gerais**. 2019. 136f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2019. Disponível em: < <https://repositorio.unb.br/handle/10482/37196>>. Acesso em: 18. jul. 2020.

OLIVEIRA, P. E.; RAMOS, J. R. de A. Geologia das quadrículas de Recife e Pontas de Pedra. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, DNPM, 1956. 60p.

OPEN UNIVERSITY. **Ocean circulation**. Jordan Hill, GBR: Butterworth-Heinemann, 2001. 287p. Disponível em: < <http://site.ebrary.com/lib/univbrasil/reader.action?docID=10190755&ppg=1>> Acesso em: 27 Sep. 2014.

PAULA, T. L. F. de. **Comportamento hidráulico de aquíferos sedimentares e metassedimentares de dupla porosidade da Região do Alto Paraguai, MT**. 2015. 129f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: < <https://repositorio.unb.br/handle/10482/18582>>. Acesso em: 18. jul. 2020.

PAZ, J. D. S. da. **Fácies, petrografia e geoquímica da Formação Codó, Neo-Aptiano, Bacia de São Luís-Grajaú**. 2005. 162f. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

PAZ, J. D. S. da; ROSSETTI, D. de F. Reconstrução paleoambiental da Formação Codó (Aptiano), borda leste da Bacia do Grajaú, MA. In: ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 77-100.

PEDRÃO, E. **Palinoestratigrafia e evolução paleoambiental de rochas sedimentares aptianas cenomanianas das bacias de Bragança-Viseu e São Luís (margem equatorial brasileira)**. 1995. 225f. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

PEDRÃO, E.; BARRILARI, I.; LIMA, H. Revisão bioestratigráfica dos rifts da região norte do Brasil Bagança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBG/SP, 1992. p. 462.

PEREIRA, A. R. ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, E. D. **Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero do Reservatório do Batatã – São Luís (MA)**. 2006. 133f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2006. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/102894>>. Acesso em: 3 jun. 2018.

PEREIRA, L.; SANTIAGO, M. M. F.; MENDONÇA, L. A. R.; FRISCHKORN, H.; MENDES FILHO, J. Caracterização isotópica das águas subterrâneas da Ilha de São Luís/MA – Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, 2002. Disponível em: < <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22809> >. Acesso em: 4 jun. 2018.

PETERSON, J.; SACK, D.; GABLER, R. R. **Fundamentos de geografia física**. Tradução: Thiago Humberto Nascimento; revisão técnica: Marina Vicente Vieira. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 485 p.

PINHEIRO, C. U. B.; MACHADO, D. da S. A paisagem e a vegetação na ilha de Curupu, litoral ocidental do estado do Maranhão. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 7, n. 2, fev.-mai., p. 84-100, 2016.

PINHEIRO, R. A. Distribuição espaço-temporal da pluviosidade na Ilha do Maranhão no ano de 2016. **Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 3, n. 8, p. 126-141, jan./abr. 2017. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.18764/2446-6549.v3n8p126-141>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

POLZIN, D.; HASTENRATH, S. Climate of Brazil's Nordeste and tropical Atlantic sector: preferred time scales of variability. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 2, p. 153-160, jun. 2014.

POMEROL, C.; LAGABRIELLE, Y.; RENARD, M.; GUILLOT, S. **Princípios de geologia: técnicas, modelos e teorias**. 14. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1017p.

PORTO, K. B. **A contribuição do uso público para conservação das áreas urbanas de interesse ambiental: a microbacia do Jaracaty em São Luís – MA**. 2008, 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

PREFEITURA DE SÃO LUÍS. Lei nº 3.253, de 29 de dezembro de 1992. Dispõe sobre o zoneamento, parcelamento, uso e ocupação do solo urbano e dá outras providências. **Diário Oficial do Município**, São Luís, MA, 15 abr. 1993. p. 6-28 Disponível em: <https://www.saoluis.ma.gov.br/midias/anexos/1188_3-lei_n._3.253_de_29.12.1992_d.o.m._n.88._pags._06-27.pdf>. Acesso em: 10 set. 2015.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DE RIBAMAR. Lei nº 645, de 10 de outubro de 2006. Dispõe sobre o plano diretor do município de São José de Ribamar, Estado do Maranhão, e trata de outras providências. São José de Ribamar, MA. Disponível em: <http://www.saojosederibamar.ma.gov.br/abrir_arquivo.aspx/Lei_Ordinaria_645_2006?cdLocal=5&arquivo={260EB625-7A71-BC7E-ACD4-A5684A0ACCE4}.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2018.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO LUÍS. Lei Ordinária nº 4.669, de 11 de outubro de 2006. Dispõe sobre o plano diretor de São Luís e dá outras providências. **Diário Oficial do Município**, São Luís, MA, 11 out. 2006. Disponível em:

<https://www.saoluis.ma.gov.br/midias/anexos/1188_8-lei_n.4.669_de_11.10.2006_d.o.m._n.195_-_completo.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2015.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO LUÍS. **Plano municipal integrado de saneamento básico**. Diagnóstico da situação dos sistemas e da prestação dos serviços. São Luís: ESSE Engenharia e Consultoria/HIDRAELE, 2011. 242p.

PRICE, M. **Introducing groundwater**. London: Taylor & Francys Group, 2004. 296p. Disponível em: <<http://ebookcentral.proquest.com/lib/univbrasil-ebooks/detail.action?docID=127>>. Acesso em: 07 abr. 2020.

RABELO, R. G. dos S. **Dinâmica de uso e ocupação do solo, e suas implicações nos parâmetros físico-químicos das águas na bacia hidrográfica do Rio Santo Antonio**. 2006. 93f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2006.

RANGEL, M. E. S. 2000. 112f. **Contribuição dos dados integrados dos sistemas sensores TM/Landsat-5 e ERS-1/SAR para o estudo de uso e cobertura da terra no nordeste da Ilha do Maranhão**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

REBOUÇAS, A. da C.; SILVA, A. B. **Estudo hidrogeológico do distrito industrial de Itaqui-Maranhão**. Recife: SUDENE, 1972. 83p.

REBOUÇAS, A. da C.; RICCOMINI, C.; ELLERT, N.; DUARTE, U.; MELITTO, K. M.; SOUZA, J. C. S. de. Diagnóstico hidrogeológico da R.M.S.P: uso e proteção. **Revista Águas Subterrâneas**, 1994. p. 93-102. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24361/16359>>. Acesso em: 19. jul. 2020.

REZENDE, W. M.; ARAÚJO, E. Integração geológica regional das áreas continental e oceânica da bacia de Barreirinhas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24., 1970, Brasília. **Anais...** Brasília: SBG, 1970. p. 141-155.

REZENDE, W. M.; PANPLONA, H. R. P. Estudo do desenvolvimento do arco Ferrer-Urbano Santos 1970. **Boletim Técnico Petrobrás**, v. 13, n. 1/2, p. 5-14, jan./jun. 1970.

RIO BRANCO, W. L. C. **Políticas e gestão ambiental em áreas protegidas de São Luís – Maranhão**: o parque ecológico da Lagoa da Jansen. 2012. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita, Presidente Prudente, 2012.

ROBINSON, M.; BRISTOW, C.; McKINLEY, J.; RUFFELL, A. **Ground penetrating radar: techniques in geomorphology**. London: British Society for Geomorphology, part. 1, sec. 5.5, p. 1-26, 2013. Disponível em: <http://geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/1.5.5_GPR.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2018.

ROCHA FILHO, A. C. R. **Avaliação estrutural da vegetação de bosques de mangues potencialmente vulneráveis ao derrame de óleo na baía de São Marcos – Maranhão, Brasil**. 2010. 70f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2010.

ROCHA, A. O. B. 2009. **Detecção de mudanças nas áreas de cobertura de mangue através da subtração de imagens-proporção de vegetação na Ilha do Maranhão**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2009.

ROCHA, M. C. da. **Saneamento e qualidade das águas na bacia hidrográfica do rio Paciência, Ilha do Maranhão, Brasil**. 2019. 91f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019.

RODRIGUES T. C. S.; FRANK, T.; SOUZA, U. D. V.; KUX, H. J. H. Análise da evolução da cobertura do solo em áreas de manguezais na Ilha do Maranhão, entre os anos de 1988 e 2010 com dados de sensoriamento remoto orbital. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2013, p. 1798-1805. Disponível em: < <http://marte2.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.52.53> >. Acesso em: 12 jan. 2018.

RODRIGUES, T. L. das N.; ARAÚJO, C. C. de; CAMOZZATO, E.; RANGRAB, G. E. (Org.). **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil**. São Luís. Folha SA.23-Z-A. Cururupu. Folha SA.23-X-C. Estado do Maranhão. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1994. 114p.

RODRIGUES, T. L. das N.; LOVATO, O. G.; CAYE, B. R. **Estratigrafia da folha São Luís (SA.23-Z-A) / MA**. Trabalho realizado para o Programa Grande Carajás – PGC, Comissão DNPM/CPRM/Porto Alegre, 1990.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente Excel para cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de culturas e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. 8. Ed. São Paulo: Contexto, 2005. 85p.

ROSSETTI, D. de F. Arquitetura deposicional da Bacia de São Luís-Grajaú. In: ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001a. p. 31-66.

_____. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of the sea level changes. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, p. 77-89, 2001b.

_____. Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão. **Geologia USP, Série Científica**, v. 6, n. 2, p. 7-18, out. 2006.

_____. Fácies sedimentares em um vale inciso no Cretáceo Superior (Formação Itapecuru) da Bacia de São Luís, norte do Brasil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5., 1996, Belém. **Anais...** Belém: SBG/NO, 1996. p. 192-194.

_____. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luís Basin, northern Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 133, p. 295-324, 2000.

ROSSETTI, D. de 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, ago. 2013a.

ROSSETTI, D. de F.; ROCCA, R. R.; TATUMI, S. H. Evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na zona costeira da Bacia de São Luís, Maranhão, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais**, v. 8, n. 1, p. 11-25, jan.-abr. 2013b.

- ROSSETTI, D. de F.; BEZERRA, F. H. R.; GÓES, A. M.; NEVES, B. B. B. Sediment deformation in Miocene and post-Miocene strata, Northeastern Brazil: evidence for paleoseismicity in passive margin. **Sedimentary Geology**, v. 235, p. 172-187, 2011a.
- ROSSETTI, D. de F.; BEZERRA, F. H. R.; GÓES, A. M.; VALERIANO, M. M. ANDRADES-FILHO, C. O.; MITTANI, J. C. R.; TATUMI, S. H.; BRITO-NEVES, B. B. Late Quaternary sedimentation in the Paraíba Basin, Northeastern Brasil: landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. **Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology**, v. 300, p. 191-204, 2011b.
- ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M. Imaging Upper Tertiary to Quaternary deposits from northern Brazil applying ground penetrating radar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 2, p. 195-202, jun. 2001.
- ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M.; ARAI, M. A passagem Aptiano-Albiano na Bacia de Grajaú, MA. In: In: ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT. **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001a. p. 101-118.
- ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M.; SOUZA, L. S. B. Estratigrafia da Sucessão Sedimentar Pós-Barreiras (Zona Bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 19, n. 2, p. 113-130, 2001b.
- ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M.; VALERIANO, M. M.; MIRANDA, M. C. C. Quaternary tectonics in the passive margin: Marajó Island, northern Brazil. **Journal of Quaternary Science**, v. 23, n. 2, p. 121-135, 2008.
- ROSSETTI, D. de F.; SANTOS JÚNIOR, A. E. Facies architecture in a tectonically influenced estuarine incised valley fill of Miocene age, northern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 17, p. 267-284, 2004.
- ROSSETTI, D. de F.; GÓES, A. M.; BEZERRA, F. H. R.; VALERIANO, M. M.; BRITO-NEVES, B.; OCHOA, F. L. Contribution to the stratigraphy of the on shore Paraíba Basin, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84, n. 2, p. 313-333, 2012a.
- ROSSETTI, D. de F.; SOUZA, L. S. B.; PRADO, R.; ELIS, W. R. Neotectonics in the northern equatorial Brazilian margin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 37, p. 175-190, 2012b.
- ROSSETTI, D. de 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, n. 1, p. 25-74, 1989.
- 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. de F.; TRUCKENBRODT, W. Revisão estratigráfica para os depósitos do Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, Maranhão. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra**, v. 9, p. 29-41, 1997.
- SADMIER. **Reflexw - GPR and seismic processing software**. Versão 7.0. Karlsruhe, Germany: Sandmier Geophysical Research, 2012.
- SANTOS, H. G. dos... [et al.]. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

SANTOS, J. H. S. dos. **Análise por geoprocessamento da ocupação na franja costeira ao norte da cidade de São Luís – MA**. 1996. 149f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

_____. **Introdução ao estudo geomorfológico da praia da Ponta D'areia – São Marcos**. 1989. 64f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 1989.

SANTOS, A. C. Noções de hidroquímica. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 347-357.

SANTOS, C. L. dos; SILVA, H. S. V. P. da; ANDRADE, G. V. de; NUNES, G. S. Avaliação da contaminação de corpos d'água adjacentes a áreas agrícolas da Ilha de São Luís (MA) por agrotóxicos. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 22, p. 85-95, jan./dez., 2012.

SANTOS, P. M.; ALFARO, P. E. M.; GONZÁLEZ, E. M.; GIL, F. V.; GARRIDO, M. M.; ALCAIDE, S. D.; CASTAÑO, S. C. **Hidrogeología: principios y aplicaciones**. Madrid: McGraw-Hill, 2018. Disponível em < <https://ebookcentral.proquest.com/lib/univbrasilia-ebooks/detail.action?docID=5636222> > Acesso em: 13. abr. 2020.

SCHOBENHAUS, C.; BRITO NEVES, B. B. A geologia do Brasil no contexto Plataforma Sul-Americana. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, F. H (Org.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e sig**. Brasília: CPRM, 2003. p. 5-25. Disponível em: < http://www.cprm.gov.br/didote/pdf/geologia_tectonica.pdf >. Acesso em: 29 jul. 2014.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. 3. ed. London: Academic Press, 2006. 558 p. Disponível em: < <http://site.ebrary.com/lib/univbrasilia/reader.action?docID=10186058>>. Acesso em: 10 nov. 2013.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (SEMA). Portaria n° 57, de 15 de maio de 2019. Dispõe sobre o conjunto de documentos referente a pedido de autorização para perfuração de poços e outorga de direito de uso da água. Disponível em <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=241667>>. Acesso em 13 jun. 2020.

SECRETARIA DE ESTADO DA INDÚSTRIA E COMÉRCIO E ENERGIA (SINFRA). **Distritos industriais**. 2015. Disponível em: < <http://www.seinc.ma.gov.br/distritos-industriais/>>. Acesso em: 2 fev. 2018.

SHEPHERD, R. G. Correlations of permeability and grain size. **Groundwater**, v. 27, n. 5, p. 618-730, set. 1989.

SICA, Y. C. **Mapeamento do corrosividade atmosférica de São Luís – MA e a correlação com as variáveis ambientais que influenciaram na degradação dos materiais metálicos**. 2006. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006. Disponível em: < <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/7257> >. Acesso em: 07. jan. 2020.

- SILVA, T. M. G. da. **Caracterização do Sistema Aquífero Parecis na região centro-oeste do Estado de Mato Grosso**: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. 2013. 98f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: < https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13677/1/2013_TalitaMenezesGomesSilva.pdf >. Acesso em: 18. jul. 2020.
- SILVA, J. S.; FARIAS FILHO, M. S. Análise da cobertura do solo da bacia do Rio dos Cachorros em São Luís (MA) entre os anos de 1988 e 2010 a partir de imagens de sensores orbitais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35. 2015, Natal. **Anais eletrônicos...** Natal: SBCS, 2015. Disponível em: <<http://eventosolos.org.br/cbcs2015/arearestrita/arquivos/866.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2018.
- SILVA, M. R. N.; RODRIGUES, R. R.; LEITE, I. M.; MENDES, J. L. P.; FERNANDES, J. de R. R. Oferta e demanda de água na Ilha de São Luís. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais...** ABES, 2005. p. 1-7.
- SILVA, Q. D. **Mapeamento geomorfológica da Ilha do Maranhão**. 2012. 249f. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012.
- SILVA, R. M. N.; RODRIGUES, E. E.; LEITE, I. M.; MENDES, J. L. P.; FERNANDES, J. R. D. Oferta e demanda de água na ilha de São Luís. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23. 2005, Campo Grande. **Anais eletrônicos...** Campo Grande: ABES, 2005. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/IV-003.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2014.
- SILVA, S. M. **Diagnóstico das restingas do Brasil**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Botânica, 2013. 30p. Disponível em:< http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round8/round8/guias_r8/sismica_r8/%C3%81reas_Priorit%C3%A1rias/Restingas.pdf >. Acesso em: 6 jan. 2018.
- SMITH, D. G.; JOL, H. M. Ground penetrating radar: antennae frequencies and maximum probable depths of penetrating in Quaternary sediments. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, p. 93-100, 1995.
- SOARES JÚNIOR, A. D. HASUI, Y.; COSTA, J. B. S.; MACHADO, F. B. Evolução do rifteamento e paleogeografia da margem atlântica equatorial do Brasil: Triássico ao Holoceno. **Geociências**, v. 30, n. 4, p. 669-692, 2011.
- SOARES JÚNIOR, A. V.; ALMEIDA, J. R. C. de; SILVA JÚNIOR, O. G. da; MACHADO, F. B. SOUZA, I. A. Arcabouço estrutural do Sistema de Grábens Gurupi, margem atlântica equatorial do Brasil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 11., 2009, São Pedro (SP). **Anais...** São Pedro: SBG, 2009. Disponível em: < <http://www2.rc.unesp.br/eventos/geologia/tectonico2011/upload/simpgeo2009-0139-1-A-01.doc> > Acesso em: 20 fev. 2014.
- SOARES JÚNIOR, A. V.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y. Evolução da margem atlântica equatorial do Brasil: três fases distensivas. **Geociências**, v. 27, n. 4, p. 427-437, 2008.
- SOARES, L. A. L. **Análise da vulnerabilidade à salinização das águas subterrâneas da Ilha de São Luís**: estudo de caso na área Itaqui-Bacanga. 2004. 146f. Dissertação (Mestrado em Saúde e Ambiente) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2004.

SOBRINHO, J. P. C. **Estudo morfodinâmico da Praia do Meio - São José de Ribamar – MA**. 1998. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 1998.

SOEIRO, R. C. d. S. **Análise espacial da qualidade microbiológica da água na Bacia Hidrográfica do rio Paciência**. 2018. 80f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2018.

SOUSA, C. S.; KLEIN, E. L.; VASQUEZ, M. L.; LOPES, E. C. S.; TEIXEIRA, S. G.; OLIVEIRA, J. K. M.; MOURA, E. M.; LEÃO, M. H. B. Mapa geológico e recursos minerais do Estado do Maranhão. In: KLEIN, E. L.; SOUSA, C. S. (Org.). **Geologia e recursos minerais do Estado do Maranhão: sistemas de informações geográficas – sig**, Escala 1:750.000. Belém: CPRM, 2012. Disponível em < http://geobank.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.download.downloadlayouts?p_webmap=N>. Acesso em: 11 nov. 2014.

SOUSA, S. B. de. **Recursos hídricos da Ilha do Maranhão**. 1997. 186f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

SOUZA, P. A. de; MELLO, W. Z. de; MOLDONADO, J. Composição química da chuva e aporte atmosférico na Ilha Grande, RJ. **Química Nova**, v. 19, n. 3, p. 471-476, 2006. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422006000300013&script=sci_abstract&tlng=pt >. Acesso em: 28 jan. 2020.

SOUZA, L. S. B. **Evidências tectônicas no leste da Ilha do Marajó: integração de dados morfoestruturais e geofísicos**. 2010. 203f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, São Paulo, 2010. Disponível em: < www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44141/tde-23012011-201301/.../LSBS.pdf > Acesso em: 5 mai. 2016.

SOUZA, M. M. de. **Determinação das áreas de recarga para gestão do sistema aquífero físsuro-cárstico da região de São Sebastião/DF**. 2013. 84f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/13941>>. Acesso em: 18. jul. 2020.

SOUZA, L. S. B.; ROSSETTI, D. de F.; PRADO, R. L. Radar de penetração no solo aplicado à caracterização de estruturas tectônicas miocênicas e quaternárias no leste da Ilha de Marajó (PA). **Brasilian Journal of Geology**, v. 44, n. 1, p. 55-72, March, 2014.

SOUZA FILHO, F. de. A. de. Variabilidade e mudança climática nos semiáridos brasileiros. In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. (Org.). **Clima e recursos hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 2003. p. 77-116.

SOUZA FILHO, P. W. M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 427-435, 2005.

SPENCER, J. N.; BODNER, G. M.; LYMAN, H. R. **Química: estrutura e dinâmica**. 3. ed. v.2. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 375p.

SPIRO, T. G.; STIGLIANI, W. M. **Química ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 334p.

STRUCKMEIER, W. F.; MARGAT, J. **Hydrogeological maps: a guide and a standard legend**. Hanover. Hanover: Verlag Heinz Heise, v. 17, 1995. 193p.

TAMURA, L. N.; ALMEIDA, R. P. de; TAIOLI, F.; MARCONATO, A.; JANIKIAN, L. Ground penetrating radar investigation of depositional architecture: the São Sebastião and Marizal formations in the Cretaceous Tucano Basin (Northeastern Brazil). **Brazilian Journal of Geology**: v. 46, n. 1, p. 15-27, March, 2016.

TAROUCO, J. E. F.; SANTOS, J. H. S. Morfodinâmica da Praia do Araçagy, Paço do Lumiar – MA. In: FORUM LATINO-AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 1. Curitiba, 1997. **Anais...** Curitiba, v. 1, 1997, p. 474.

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

TEIXEIRA, S. G.; SOUZA FILHO, P. W. M. Mapeamento de ambientes costeiros tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) utilizando imagens de sensores remotos orbitais. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, supl. 1, p. 69-82, 2009.

THEIS, C. V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 16, p. 519-524, 1935.

THOMPSON, R. D. **Atmospheric processes and systems**. London, GRB: Routledge, 1998. 216p. Disponível em: < <http://site.ebrary.com/lib/univbrasil/dettaglio.action?docID=10054831&p00=atmospheric+processes+systems>>. Acesso em: 27 set. 2014.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. **Publications in climatology**, v. 8, n. 1, 1955.

THORNTON, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94. Jan., 1948. Disponível em: < <http://www.jstor.org/stable/210739>> Acesso em: 10 out. 2014.

TIBURTUS, E. R. L.; PERALTA-ZAMORA, P. P.; LEAL, E. S. Contaminação de águas por BTXS e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. **Quím. Nova**, v. 27, n. 3, p. 441-446. 2004.

TOMLIN, C. D. **Geographic information systems and cartographic modeling**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1990. 249p.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. 91p.

TRUCKENBRODT, W.; NOGUEIRA, A. C. R.; GÓES, A. M. Conteúdo fossilífero e estruturas sedimentares nos sedimentos Barreiras, NE do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Camburiú. **Anais...** Camburiú: SBG, 1994. p. 210-211.

UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Guideline for delineation of wellhead protection**. Washington, D. C., 1987. 122p. (440-6-87-009).

_____. **Handbook**: ground water and wellhead protection. Washington, D. C., 1994. 288p. (EPA/625/R-94/001).

UVO, C. **A zona de convergência intertropical (ZCIT) e a precipitação da região Norte do Nordeste do Brasil**. 1989. 99f Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989. Disponível em: < <http://mtc-m05.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.26.22.54/doc/publicacao.pdf>> Acesso em: 10 out. 2014.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 73-93.

_____. **TOPODATA**: guia para utilização de dados geomorfológicos atuais. São José dos Campos: INPE, 2008a.

VARZACACOU, N. do N. **Interação de gasolina, benzeno, tolueno e xilenos com argilominerais esmectitos da Formação Resende, Bacia de São Paulo**. 2009. 79f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VASCONCELOS, A. M.; VEIGA-JÚNIOR, J.; COLARES, J. Q. S.; RIBEIRO, J. A. P.; GOMES, I. P.; MEDEIROS, M. F.; FORGIARINI, I. I. Folha SA.23-São Luís. In: SCHOBHENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; SANTOS, J. O. S.; ABRAM, M. B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G. M. M.; VIDOTTI, R. M.; RAMOS, M. A. B.; JESUS, J. D. A. de (Ed.). **Carta geológica do Brasil ao milionésimo**: sistema de informações geográficas. Programa de geologia do Brasil. Brasília: CPRM, 2004. Disponível em <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/4970>>. Acesso em: 2 mar. 2014.

VEIGA JÚNIOR, J. P. (Org.) **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil**. São Luís NE/SE, Folhas SA.23-X e SA.23-Z. Estados do Maranhão e Piauí. Escala 1:500.000. Brasília: CPRM, 2000.

VERECKEN, H.; BINLEY, A.; CASSIANI, G.; REVIL, A.; TITOV, K. **Applied Hydrogeophysics**. Dordrecht: Springer, 2006. 371p.

VIANA, J. R. Estudo da morfodinâmica da Praia de São Marcos, São Luís MARANHÃO. 2000. 91f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Geografia) Universidade Federal do Maranhão, 2000.

VIEGAS, M. C. P. **Políticas públicas e o ecossistema de manguezal**: caso da lagoa da Jansen. 1996. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 1996.

WALTON, W. C. **Groundwater resource evaluation**. New York: McGraw-Hill, 1970. 644p.

WELLS, N. C. **Atmosphere and ocean**: a physical introduction. 3. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012. 439p. Disponível em: <<http://site.ebrary.com/lib/univbrasilvia/detail.action?docID=10522343&p00=atmosphere+ocean%3A+physical+introduction>> Acesso em: 27 set. 2014.

ZALAN, P. V. Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 341-345, mai./nov. 2007.

ZÚÑIGA LÓPEZ, I.; CRESPO DEL ARCO, E. **Meteorologia y climatología**. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2010. 270p. Disponível em: <<http://site.ebrary.com/lib/univbrasilvia/detail.action?docID=10609046&p00=meteorologia+climatologia>> Acesso em: 27 set. 2014.

APÊNDICE A – Cadastro de poços tubulares empregados na caracterização dos parâmetros hidráulicos, dimensionais e hidrodinâmicos do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N
1	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	581092,99	9708440,01	USO INDUSTRIAL	ITAPECURU	100,00	16,10	17,11	5,50	640,00	20,00
2	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	576647,49	9712088,27	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	72,00	17,40	41,50	8,00	50,00	6,25
3	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	581591,29	9708123,78	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	36,00	19,00	21,00	6,00	24,00	4,00
4	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	585541,21	9722572,40	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	72,00	8,00	25,00	14,00	280,00	20,00
5	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	576361,40	9708474,05	ABASTECIMENTO PÚBLICO	ITAPECURU	68,00	14,10	29,36	12,00	120,00	10,00
7	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	582403,62	9709994,53	ABASTECIMENTO PÚBLICO	BARREIRAS	90,00	28,00	42,00	10,00	40,00	4,00
8	SRH-SEMA	S. J. RIBAMAR	584183,06	9723801,44	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	72,00	21,00	29,00	9,00	400,00	20,00
9	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	583451,39	9713625,53	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	60,00	16,00	24,00	6,00	40,00	5,00
10	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	582958,92	9711169,64	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	119,00	53,00	61,00	3,61	60,00	10,00
11	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	583994,13	9721252,93	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	100,00	4,50	12,00	17,00	17,00	2,00
12	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	583925,25	9721237,62	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	80,00	5,65	9,00	11,00	10,00	1,00
13	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	583965,46	9721342,00	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	80,00	5,55	8,55	12,40	6,66	1,50
15	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	584767,01	9715835,90	CONSUMO HUMANO	ITAPECURU	49,00	18,78	19,80	2,49	24,80	10,00
16	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	576043,79	9710410,23	OUTROS	BARREIRAS	22,00	0,70	2,84	6,95	168,00	4,00
18	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	579023,99	9705335,00	CONS. HUM. E INDUSTRIAL	BARREIRAS	42,00	12,53	13,97	6,71	93,94	14,00
19	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	579761,08	9719093,63	USO INDUSTRIAL	ITAPECURU	50,00	25,00	32,00	5,00	5,00	1,00
20	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	584095,39	9724940,69	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	80,00	10,00	18,00	15,84	110,88	14,00
21	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	583314,16	9725158,23	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	56,00	17,00	23,00	6,00	6,00	20,00
22	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	584182,19	9714928,88	OUTROS	BARREIRAS	68,00	25,90	31,35	5,00	40,00	8,00
23	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	577361,52	9706689,18	CONSUMO HUMANO	ITAPECURU	28,00	9,42	11,26	7,20	7,20	3,00
26	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	586434,75	9715026,71	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	30,00	11,00	14,60	5,00	40,00	8,00
27	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	585958,57	9720703,98	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	60,00	19,13	32,25	10,00	5,00	0,50
28	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	585882,86	9725857,77	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	30,00	4,00	13,00	12,00	120,00	24,00
29	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	581680,07	9707865,19	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	50,00	4,85	8,00	9,54	38,16	4,00
35	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	576590,28	9717659,56	CONS. HUM. E INDUSTRIAL	ITAPECURU	102,00	54,00	79,00	2,40	24,00	10,00
36	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	581503,62	9707647,28	CONS. HUM. E INDUSTRIAL	BARREIRAS	60,00	7,70	9,10	8,30	8,30	10,00

37	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	577509,80	9702447,39	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	30,00	1,50	5,18	7,20	72,00	10,00
38	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	577009,57	9707930,51	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	60,00	7,80	8,10	12,60	10,00	2,00
39	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	582499,22	9724744,46	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	34,00	6,30	16,60	3,00	40,50	7,38
44	SRH-SEMA	P. LUMIAR	596567,10	9723271,76	IRRIGAÇÃO	BARREIRAS	78,00	18,73	37,92	48,00	840,00	21,00
45	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	581124,20	9721254,57	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	80,00	11,00	11,80	9,90	100,00	5,00
46	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	574399,00	9716542,00	USO INDUSTRIAL	AMBOS	115,00	12,45	23,60	14,68	80,00	6,00
47	SRH-SEMA	S. J. RIBAMAR	588883,54	9717790,00	USO INDUSTRIAL	AMBOS	91,00	8,20	14,80	19,46	90,00	6,00
48	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	586073,43	9717059,69	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	30,00	15,70	17,20	1,33	30,00	0,50
50	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	573994,40	9696975,76	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	80,00	15,40	21,40	40,00	720,00	18,00
51	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	587755,59	9717578,21	CONSUMO HUMANO	-	100,00	4,23	12,46	20,30	560,00	16,00
52	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	584023,18	9724494,57	USO INDUSTRIAL	ITAPECURU	91,00	12,00	18,00	15,40	360,00	24,00
55	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	584790,54	9724336,91	CONSUMO HUMANO	-	80,00	16,80	26,90	13,20	400,00	20,00
56	SRH-SEMA	P. LUMIAR	591684,10	9717993,36	USO INDUSTRIAL	-	60,00	16,20	45,16	7,00	7,00	2,00
57	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	582267,19	9721837,34	USO INDUSTRIAL	-	60,00	8,63	26,64	8,00	16,00	0,50
60	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	581836,88	9708287,61	CONSUMO HUMANO	ITAPECURU	80,00	19,00	23,91	5,00	10,00	2,00
62	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	578035,06	9719613,51	USO INDUSTRIAL	ITAPECURU	60,00	7,20	12,45	7,20	6,00	1,00
67	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	577058,88	9707749,32	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	90,00	13,30	14,32	9,00	40,00	8,00
68	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	571446,43	9698660,43	USO INDUSTRIAL	-	65,00	5,16	18,14	20,00	5,00	2,00
74	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	581783,84	9725086,62	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	70,00	8,98	12,00	9,47	22,00	15,00
75	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	585171,80	9724599,23	OUTROS	AMBOS	60,00	16,80	18,85	6,28	2,00	0,33
76	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	585851,36	9724813,77	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	50,00	15,05	35,52	8,00	8,00	1,00
77	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	584244,52	9723258,21	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	70,00	10,60	13,40	18,00	270,00	15,00
79	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	584744,82	9722185,66	CONSUMO HUMANO	AMBOS	64,00	9,00	14,80	8,08	7,00	2,00
80	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	574602,00	9697332,00	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	43,00	15,53	21,50	35,32	660,00	20,00
81	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	574541,01	9697585,27	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	52,00	18,80	21,60	41,80	900,00	20,00
83	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	586038,49	9722679,58	USO INDUSTRIAL	AMBOS	100,00	25,40	26,62	4,81	10,00	2,50
84	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	584087,25	9717830,37	CONSUMO HUMANO	ITAPECURU	200,00	39,42	44,04	14,66	550,00	11,00
85	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	583912,40	9717742,04	CONSUMO HUMANO	ITAPECURU	215,50	50,01	51,85	6,60	550,00	11,00
86	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	584417,07	9720984,62	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	80,00	16,20	39,90	7,20	120,00	10,00

89	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	576099,70	9700437,27	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	60,00	22,00	24,51	43,62	1400,00	20,00
90	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	576442,33	9700246,39	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	50,00	17,56	19,75	42,89	1600,00	20,00
92	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	585657,47	9715546,73	CONSUMO HUMANO	BARREIRAS	108,00	5,80	10,35	22,50	20,00	2,00
93	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	592147,27	9721750,95	USO INDUSTRIAL	ITAPECURU	80,00	15,00	38,00	9,00	9,00	12,00
94	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	573506,00	9714340,00	CONS. HUM. E INDUSTRIAL	BARREIRAS	72,00	21,30	42,00	4,98	8,00	2,00
100	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	583153,51	9716472,47	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	52,00	3,70	12,85	39,60	1090,80	20,00
101	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	582952,51	9716008,93	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	152,00	46,96	58,50	11,00	600,00	20,00
102	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	582482,82	9715508,69	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	152,00	35,36	63,62	66,00	1384,60	20,00
104	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	581262,82	9715193,12	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	160,00	49,85	64,60	31,60	1240,00	20,00
105	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	580787,24	9715168,83	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	174,00	23,35	29,30	15,00	878,00	20,00
107	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	581151,15	9714324,21	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	160,00	38,25	52,40	39,60	888,80	20,00
113	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	589737,24	9718453,04	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	60,00	1,48	3,24	20,00	5400,00	20,00
114	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	589985,98	9718667,22	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	50,00	1,70	3,25	24,75	5760,00	20,00
115	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	590171,35	9718790,85	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	52,00	0,80	2,80	24,00	3600,00	20,00
116	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	590387,74	9719129,41	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	50,00	3,50	5,50	21,90	5760,00	20,00
117	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	590641,06	9719252,99	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	50,00	3,33	7,87	22,62	21073,20	20,00
119	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	587828,92	9716303,85	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	54,00	2,30	4,10	20,57	3756,48	20,00
121	SRH-SEMA	P. LUMIAR	587780,69	9715714,32	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	38,70	2,10	5,00	56,57	2880,00	20,00
123	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	587704,45	9714777,82	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	79,00	7,00	8,10	26,40	-	-
124	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	587263,62	9715538,99	ABASTEC. E ESGOT. SANITÁRIO	BARREIRAS	58,00	7,00	8,10	26,00	1200,00	20,00
128	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	574243,81	9715691,34	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	150,00	51,00	69,50	16,18	888,00	20,00
129	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	575202,68	9715135,37	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	142,70	41,00	58,35	39,77	1008,00	20,00
132	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	576866,36	9711400,34	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	139,00	22,10	46,00	47,40	788,00	20,00
133	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	575768,33	9713814,41	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	117,99	43,10	80,06	17,73	577,00	20,00
136	SRH-SEMA	SÃO LUÍS	574073,14	9714122,37	USO INDUSTRIAL	BARREIRAS	133,00	29,00	55,01	33,70	610,92	18,00
138	CAEMA	S. J. RIBAMAR	604051,44	9720423,08	-	BARREIRAS	43,00	14,03	34,06	34,36	-	-
139	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603275,23	9719011,09	-	BARREIRAS	63,00	21,00	25,60	10,59	-	-
-140	CAEMA	S. J. RIBAMAR	596859,85	9717692,09	-	BARREIRAS	76,00	25,20	26,91	12,00	-	-
141	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603036,11	9721486,29	-	BARREIRAS	40,00	5,97	16,36	10,00	-	-

142	CAEMA	S. J. RIBAMAR	604520,32	9719658,13	-	BARREIRAS	24,00	3,00	8,00	12,00	-	-
143	CAEMA	S. J. RIBAMAR	602036,14	9718084,61	-	BARREIRAS	74,00	21,00	28,80	12,98	-	-
145	CAEMA	S. J. RIBAMAR	602836,76	9717399,57	-	BARREIRAS	53,00	2,98	17,05	13,75	-	-
148	CAEMA	S. J. RIBAMAR	600109,28	9718460,60	-	AMBOS	94,00	31,50	41,80	8,57	-	-
149	CAEMA	S. J. RIBAMAR	594808,92	9717232,86	-	BARREIRAS	62,00	9,00	14,50	16,00	-	-
150	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603255,92	9717917,92	-	BARREIRAS	44,00	9,00	15,60	12,00	-	-
151	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603061,40	9717991,76	-	BARREIRAS	40,00	6,80	9,33	15,65	-	-
152	CAEMA	S. J. RIBAMAR	602854,51	9718022,61	-	BARREIRAS	60,00	2,25	11,05	20,00	-	-
153	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603491,17	9717388,66	-	BARREIRAS	78,00	18,10	20,20	9,00	-	-
154	CAEMA	S. J. RIBAMAR	604299,60	9717671,50	-	BARREIRAS	44,00	9,97	14,60	12,00	-	-
155	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603975,72	9718215,26	-	BARREIRAS	63,00	32,52	35,30	5,66	-	-
156	CAEMA	S. J. RIBAMAR	604661,15	9717962,96	-	BARREIRAS	32,00	1,87	8,20	1,68	-	-
157	CAEMA	S. J. RIBAMAR	604725,79	9717674,26	-	BARREIRAS	48,00	12,20	15,75	10,08	-	-
158	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603305,94	9718765,41	-	BARREIRAS	45,00	8,55	10,09	8,04	-	-
159	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603846,30	9718626,84	-	BARREIRAS	49,00	25,68	28,40	5,14	-	-
160	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603574,22	9718200,20	-	BARREIRAS	63,00	21,00	26,00	10,50	-	-
161	CAEMA	S. J. RIBAMAR	605031,06	9717026,10	-	BARREIRAS	54,00	13,00	23,00	6,00	-	-
162	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603849,27	9718461,01	-	BARREIRAS	76,00	36,00	40,00	5,79	-	-
163	CAEMA	S. J. RIBAMAR	603509,00	9717693,57	-	BARREIRAS	55,00	30,00	32,00	6,87	-	-
164	CAEMA	S. J. RIBAMAR	604398,03	9717134,04	-	ITAPECURU	60,00	18,00	26,00	6,86	-	-
165	PMSL	SÃO LUÍS	590085,27	9709725,08	-	-	50,60	6,63	8,34	18,00	-	-
166	PMSL	SÃO LUÍS	572280,26	9710613,66	-	-	50,00	27,42	34,86	2,20	-	-
167	PMSL	SÃO LUÍS	574859,36	9700473,28	-	-	59,00	7,27	9,13	8,57	-	-
168	PMSL	SÃO LUÍS	573598,10	9697821,00	-	-	60,00	15,55	24,19	4,60	-	-
169	PMSL	SÃO LUÍS	580098,57	9704425,20	-	-	64,00	9,58	11,94	17,10	-	-
170	PMSL	SÃO LUÍS	579867,14	9704692,48	-	-	55,00	16,96	17,09	12,00	-	-
171	PMSL	SÃO LUÍS	577547,89	9715330,31	-	-	100,00	29,00	37,40	10,58	-	-
172	PMSL	SÃO LUÍS	578737,58	9705755,56	-	-	60,00	7,49	22,61	21,18	-	-
173	PMSL	SÃO LUÍS	587115,46	9711164,04	-	-	80,00	20,72	22,21	11,08	-	-

174	PMSL	SÃO LUÍS	574285,87	9713459,02	-	-	61,00	18,40	24,80	10,80	-	-
175	PMSL	SÃO LUÍS	586981,90	9714901,09	-	-	60,00	4,68	6,48	18,46	-	-
176	PMSL	SÃO LUÍS	574653,01	9712817,07	-	-	74,00	18,20	24,10	13,20	-	-
177	PMSL	SÃO LUÍS	573395,35	9705423,83	-	-	46,00	19,57	23,01	7,65	-	-
178	PMSL	SÃO LUÍS	587667,12	9709410,35	-	-	61,00	10,56	14,28	7,40	-	-
179	PMSL	SÃO LUÍS	591294,11	9707166,42	-	-	42,00	4,45	10,77	15,00	-	-
180	PMSL	SÃO LUÍS	584027,25	9710932,56	-	-	90,00	12,48	25,40	12,85	-	-
181	PMSL	SÃO LUÍS	581991,76	9720827,27	-	-	132,00	16,43	25,17	7,920	-	-
183	CORREIA E PIRES (2006)	RAPOSA	592926,97	9727428,13	CONSUMO HUMANO	AMBOS	72,00	28,75	30,20	4,36	-	-
186	CORREIA E PIRES (2006)	P. LUMIAR	592422,02	9719160,05	CONSUMO HUMANO	AMBOS	130,00	14,30	28,00	90,00	-	-
193	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	583781,37	9723433,20	-	AMBOS	72,00	10,68	15,21		-	-
196	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	584253,96	9723571,10	CONSUMO HUMANO	AMBOS	58,00	14,50	17,20	15,00	-	-
202	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	589262,11	9720190,10	CONSUMO HUMANO	AMBOS	93,00	21,05	26,10	26,20	-	-
206	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	589018,01	9716511,92	CONSUMO HUMANO	AMBOS	110,00	24,90	29,85	20,84	-	-
209	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	576274,08	9716551,86	CONSUMO HUMANO	AMBOS	151,00	64,32	79,22	25,54	-	-
215	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	578139,85	9709728,93	IRRIGAÇÃO	AMBOS	72,00	10,19	32,09	31,68	-	-
216	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	580940,87	9706377,91	IRRIGAÇÃO	AMBOS	75,00	14,13	17,45	13,66	-	-
217	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	581165,85	9704602,97	IRRIGAÇÃO	AMBOS	75,00	26,04	28,00	10,50	-	-
218	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	584600,13	9711000,07	CONSUMO HUMANO	AMBOS	97,00	22,10	46,36	13,89	-	-
219	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	586140,86	9706683,04	IRRIGAÇÃO	AMBOS	72,00	8,35	13,20	6,00	-	-
231	CORREIA E PIRES (2006)	SÃO LUÍS	576814,50	9702587,19	CONSUMO HUMANO	AMBOS	90,00	8,25	63,14	9,90	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021, com dados obtidos de SRH/SEMA; CAEMA; PMSL; Correia e Pires, 2006.

Legenda: A) número de ordem; B) fonte; C) município; D) coordenada UTM E (m); E) coordenada UTM N (m); F) finalidade; G) aquífero explotado; H) profundidade(m); I) nível estático (m); J) nível dinâmico; K) vazão de teste (m³/h); L) vazão autorizada (m³/dia); M) -taxa de bombeamento; (-) sem registro.

APÊNDICE B - Poços tubulares empregados na caracterização hidroquímica do Sistema Aquífero Barreiras-Itapecuru

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	PSL - 01	583209,25	9716453,08	4,890	169,500	117,690	0,020	24,164	1,766	2,733	1,289	27,740	0,000	0,000	4,280	24,300
2	PSL - 02	583120,10	9716089,45	5,410	86,600	65,220	1,800	11,779	3,295	0,569	0,794	18,720	0,000	0,000	2,400	1,380
3	PSL - 03	597241,74	9718070,30	6,110	42,800	37,490	2,500	4,961	4,116	0,486	0,466	5,360	0,000	8,980	2,150	1,340
4	PSL - 04	598395,45	9717599,69	5,080	189,600	130,420	0,190	5,948	19,578	2,233	1,302	19,170	0,000	0,000	21,510	17,560
5	PSL - 05	606700,24	9724754,99	6,317	195,000	133,840	2,340	24,568	6,319	6,134	3,670	24,680	0,000	57,090	7,800	0,100
6	PSL - 06	608122,88	9722516,46	4,358	62,500	49,960	0,020	5,023	0,629	0,797	1,296	6,080	0,000	0,000	1,250	15,770
7	PSL - 07	605073,57	9717062,10	3,800	3272,000	1683,620	0,130	44,363	620,940	37,695	5,309	679,890	0,000	0,000	137,140	43,070
8	PSL - 08	607912,25	9723355,68	6,470	75,900	58,450	0,020	6,178	3,543	3,779	1,966	6,870	0,000	18,550	5,950	1,000
9	PSL - 09	603881,79	9718671,43	7,169	262,000	176,250	0,020	13,434	6,184	20,269	12,692	12,120	0,000	135,910	3,480	0,670
10	PSL - 10	602073,60	9718120,00	7,259	434,000	285,120	0,360	9,878	5,272	42,740	26,901	8,500	13,500	225,080	4,850	4,130
11	PSL - 11	589784,44	9717030,54	5,931	460,000	300,120	0,020	47,234	7,222	18,537	7,694	50,380	0,000	51,800	33,590	53,910
12	PSL - 12	604562,95	9719694,60	5,890	157,800	110,290	0,020	20,514	6,475	1,912	2,236	25,720	0,000	13,320	10,940	1,610
13	PSL - 13	601891,87	9718963,59	5,120	134,600	95,600	0,020	15,408	2,591	2,015	3,169	20,890	0,000	0,000	6,710	17,070
14	PSL - 14	589103,95	9716866,26	5,500	42,100	37,050	0,020	5,118	0,325	0,224	1,110	6,840	0,000	0,000	4,120	1,480
16	PSL - 16	601867,13	9720143,14	4,345	123,200	88,390	0,020	14,244	1,151	0,697	2,072	17,000	0,000	0,000	1,710	22,860
17	PSL - 17	593254,38	9715551,45	5,930	63,200	50,410	0,020	7,848	0,812	0,897	1,259	10,160	0,000	0,000	3,770	5,030
18	PSL - 18	592944,04	9727429,56	4,334	139,200	98,510	0,020	19,170	0,733	0,436	1,875	14,200	0,000	0,000	2,160	33,590
20	PSL - 20	595191,04	9720543,44	5,780	146,100	102,880	0,020	17,615	1,396	5,285	3,145	14,610	0,000	16,080	3,950	28,530
21	PSL - 21	590566,10	9726084,62	5,328	96,900	71,740	0,020	14,639	4,232	0,378	0,745	12,020	0,000	8,690	9,850	7,720
22	PSL - 22	587676,27	9725734,84	6,450	52,400	43,570	0,650	6,652	1,262	1,206	1,130	8,070	0,000	6,530	4,480	0,960
23	PSL - 23	599343,53	9720425,68	6,490	40,700	36,160	0,170	3,938	0,992	1,816	0,780	5,990	0,000	0,000	2,400	4,160
24	PSL - 24	590883,30	9724810,97	5,460	58,600	47,490	1,800	4,493	0,552	2,710	2,028	4,900	0,000	8,010	6,190	3,880
25	PSL - 25	593373,88	9719788,51	4,260	107,900	78,700	0,020	15,768	0,183	0,252	0,764	19,750	0,000	0,000	0,670	10,520
26	PSL - 26	599184,47	9730202,40	4,630	55,400	45,470	0,020	5,439	0,323	0,435	1,132	6,860	0,000	0,000	2,240	5,160
28	PSL - 28	593965,32	9728389,54	3,880	268,000	180,050	0,020	31,268	1,579	2,829	4,576	27,550	0,000	0,000	2,780	65,720

29	PSL - 29	586889,77	9724971,46	4,510	134,700	95,670	0,020	17,136	0,910	1,548	2,921	13,990	0,000	0,000	2,770	30,800
30	PSL - 30	598522,35	9729373,75	6,010	249,000	168,020	0,020	27,549	1,155	13,698	3,289	42,810	0,000	13,070	14,770	16,960
31	PSL - 31	596786,02	9726585,85	3,840	327,000	217,390	0,020	38,576	2,745	4,230	5,097	36,160	0,000	0,000	1,590	73,460
32	PSL - 32	591771,58	9721186,81	3,800	276,000	185,110	0,020	30,702	1,617	1,615	5,048	25,110	0,000	0,000	0,960	69,420
34	PSL - 34	597587,46	9727962,71	3,880	207,000	141,430	0,020	20,656	1,723	1,841	2,741	23,940	0,000	0,000	9,230	27,210
35	PSL - 35	592957,97	9724832,88	5,280	109,400	79,650	0,020	13,437	1,409	2,796	2,275	16,000	0,000	9,020	6,760	10,020
36	PSL - 36	577546,11	9702492,84	8,140	765,000	450,180	0,020	132,620	2,960	8,573	2,710	81,390	0,000	229,050	34,000	0,050
37	PSL - 37	575614,63	9695489,01	4,486	195,200	133,960	0,380	22,502	2,268	2,084	5,432	21,540	0,000	0,000	4,990	45,020
38	PSL - 38	580599,78	9704500,69	6,340	107,800	78,640	0,020	14,055	0,990	3,994	2,106	12,030	0,000	21,130	2,730	12,280
40	PSL - 40	583315,67	9708447,61	6,000	77,100	59,210	0,020	10,892	1,213	1,232	1,385	13,330	0,000	5,290	5,320	1,320
41	PSL - 41	571238,88	9698296,92	6,050	146,500	103,140	0,020	19,267	1,225	3,875	3,741	15,280	0,000	34,300	3,490	15,810
42	PSL - 42	586806,40	9701560,88	4,388	97,100	71,870	0,020	11,493	0,688	0,370	1,942	9,630	0,000	0,000	2,080	20,430
43	PSL - 43	584360,66	9699485,35	6,190	122,400	87,880	0,020	13,529	1,222	5,449	2,435	13,640	0,000	0,000	4,140	26,060
44	PSL - 44	570914,25	9698200,92	8,350	567,000	352,760	0,020	84,286	6,981	28,145	12,739	57,480	11,500	224,910	17,410	0,860
45	PSL - 45	587168,18	9700618,83	7,606	508,000	323,740	0,020	40,894	5,689	39,046	20,332	18,210	14,100	238,210	14,790	0,800
46	PSL - 46	582938,81	9702926,29	5,237	161,300	112,500	0,020	20,334	2,433	2,780	3,687	24,140	0,000	8,660	5,520	20,440
47	PSL - 47	595265,69	9704397,29	4,190	293,000	195,870	0,020	39,792	1,203	1,833	4,931	34,930	0,000	0,000	2,410	67,040
48	PSL - 48	593468,93	9705566,98	4,870	54,000	44,580	0,020	7,437	0,854	0,496	1,141	8,840	0,000	0,000	4,180	5,450
49	PSL - 49	590692,46	9704611,54	4,925	58,400	47,370	0,020	6,380	0,530	0,712	1,681	6,870	0,000	3,320	2,040	9,620
51	PSL - 51	587985,02	9707202,22	8,160	888,000	510,700	0,020	91,162	7,048	52,138	20,409	124,360	0,000	228,370	44,240	0,050
52	PSL - 52	593574,95	9709454,74	6,330	154,200	108,010	0,020	20,228	1,029	4,891	2,293	21,320	0,000	10,450	12,990	12,520
53	PSL - 53	587465,52	9711934,87	6,040	397,000	261,700	0,150	62,511	3,388	6,806	4,447	54,860	0,000	17,150	6,840	74,640
54	PSL - 54	590802,39	9714625,58	7,600	100,800	74,210	0,020	14,335	0,992	1,795	2,053	13,670	0,000	7,420	7,260	7,850
55	PSL - 55	590111,67	9712368,73	6,550	255,000	171,820	0,020	23,640	2,822	12,151	9,122	21,700	0,000	62,630	20,240	11,170
56	PSL - 56	592976,03	9711555,47	7,240	127,900	91,360	0,020	14,198	1,299	3,640	4,198	15,260	0,000	10,620	4,010	22,330
57	PSL - 57	586588,89	9716393,58	6,900	1232,000	679,940	0,020	196,490	5,684	13,340	22,380	318,540	0,000	10,510	44,340	2,340
58	PSL - 58	599341,17	9715430,14	7,969	1110,000	619,920	0,020	152,400	12,731	38,166	21,369	195,970	17,800	210,480	25,350	6,800

59	PSL - 59	594998,77	9715617,72	6,610	380,000	250,940	0,020	43,125	6,069	16,801	6,912	44,330	0,000	32,880	21,340	49,810
60	PSL - 60	591964,32	9718332,46	8,048	1504,000	813,770	0,020	308,540	5,312	22,654	8,083	320,640	10,600	178,540	43,940	0,890
61	PSL - 61	590018,95	9718683,01	6,180	69,400	54,330	0,020	9,515	0,934	2,108	1,670	11,830	0,000	9,940	5,260	0,550
62	PSL - 62	587801,31	9717405,40	4,490	155,200	108,640	0,070	18,804	0,869	0,875	3,279	15,690	0,000	0,000	7,690	21,740
63	PSL - 63	585168,84	9704875,97	6,020	64,400	51,170	0,020	8,648	0,959	1,419	0,932	11,200	0,000	2,760	5,880	0,180
64	PSL - 64	586051,71	9707000,04	4,250	164,200	114,340	0,020	18,046	0,855	1,370	3,627	15,620	0,000	0,000	2,090	39,200
65	PSL - 65	582478,60	9710354,94	5,480	400,000	263,600	0,020	49,583	2,202	11,092	8,025	89,540	0,000	16,900	14,470	10,620
66	PSL - 66	585179,23	9712744,34	8,370	1298,000	712,420	0,020	130,050	9,899	93,788	42,598	288,150	0,000	208,760	82,580	0,030
67	PSL - 67	585889,22	9704928,58	4,720	56,300	46,040	0,020	6,302	0,875	0,275	1,328	7,550	0,000	0,000	5,750	1,420
68	PSL - 68	586609,49	9715539,08	5,080	191,900	131,870	0,920	29,490	2,096	0,847	1,571	23,030	0,000	2,800	27,380	1,090
69	PSL - 69	572308,07	9710645,78	4,710	83,500	63,260	0,810	8,382	0,663	2,348	2,121	8,450	0,000	0,000	1,820	21,230
70	PSL - 70	578513,19	9708283,50	4,865	57,000	46,480	0,020	7,532	0,684	1,123	0,966	9,230	0,000	0,000	6,420	1,980
71	PSL - 71	577027,83	9707957,13	6,020	79,800	60,910	0,020	11,567	1,002	1,906	1,958	11,470	0,000	10,530	6,500	1,110
72	PSL - 72	575896,04	9709748,50	4,070	177,700	122,890	0,020	23,423	1,224	1,901	3,658	19,830	0,000	0,000	3,680	38,980
73	PSL - 73	575896,04	9709748,50	5,270	140,500	99,340	0,320	19,845	1,324	2,154	3,298	21,620	0,000	0,000	4,550	19,690
74	PSL - 74	574549,41	9713143,90	3,864	364,000	240,810	0,020	34,627	5,435	6,921	8,173	35,350	0,000	0,000	0,490	90,170
75	PSL - 75	602016,78	9722666,79	5,800	386,000	254,740	0,020	51,665	5,047	10,405	7,776	57,000	0,000	0,000	21,830	54,220
76	PSL - 76	600270,53	9726549,26	7,440	98,100	72,500	0,020	12,997	1,239	3,331	2,289	14,280	0,000	6,540	4,330	13,420
77	PSL - 77	599502,77	9724041,51	5,890	315,000	209,800	0,020	46,719	2,850	4,929	5,906	37,430	0,000	38,850	7,880	40,860
78	PSL - 78	603648,05	9724528,35	4,940	152,300	106,810	0,020	20,455	2,455	3,186	3,607	19,140	0,000	0,000	9,630	26,160
79	PSL - 79	600073,09	9725603,13	5,770	81,500	61,990	0,190	12,061	1,118	1,335	1,893	12,300	0,000	7,310	5,630	4,570
80	PSL - 80	597181,81	9723187,45	4,920	223,000	151,560	0,020	31,793	2,496	1,213	2,567	28,340	0,000	9,420	19,530	22,170
81	PSL - 81	576691,27	9718645,43	7,550	642,000	389,660	0,020	45,258	6,882	47,283	27,187	54,740	16,600	242,880	17,610	1,410
82	PSL - 82	575554,84	9718196,13	8,420	431,000	283,220	0,170	42,171	5,620	34,211	14,811	9,470	11,800	233,450	7,790	0,070
84	PSL - 84	583823,40	9724944,50	4,510	100,500	74,020	0,530	11,667	1,275	0,712	2,429	13,500	0,000	0,000	1,780	17,710
85	PSL - 85	582156,43	9724250,14	7,750	582,000	360,140	0,020	65,952	8,282	30,236	16,265	38,660	0,000	255,230	17,520	3,940
86	PSL - 86	577744,06	9724839,52	5,206	81,800	62,180	0,020	12,171	0,972	1,842	1,563	14,220	0,000	5,750	5,350	1,930

87	PSL - 87	584388,61	9723731,54	4,863	37,800	34,330	0,020	4,745	0,437	0,296	0,764	5,170	0,000	0,000	1,470	4,650
88	PSL - 88	578932,34	9720325,53	3,984	313,000	208,530	0,020	41,386	1,423	1,369	5,922	31,690	0,000	0,000	2,010	75,040
89	PSL - 89	578932,34	9720325,53	5,730	68,300	53,630	0,020	10,528	1,198	0,934	1,482	11,310	0,000	5,450	6,180	0,800
90	PSL - 90	578089,29	9719698,12	4,942	58,100	47,180	0,020	8,603	0,692	0,603	0,937	8,920	0,000	0,000	3,320	6,160
91	PSL - 91	584350,70	9721629,06	4,200	82,700	62,750	0,020	7,123	0,422	1,404	2,245	6,520	0,000	0,000	1,490	18,520
92	PSL - 92	585684,23	9720600,24	6,030	87,800	65,980	0,020	12,285	0,680	2,656	1,783	15,140	0,000	4,220	7,400	2,600
93	PSL - 93	580053,93	9720013,19	5,690	134,000	95,220	0,020	18,866	1,112	3,495	2,634	14,110	0,000	2,380	1,230	37,530
94	PSL - 94	572197,67	9709979,29	7,769	1412,000	786,500	0,020	180,740	7,943	69,862	22,073	302,040	12,900	175,740	32,040	0,040
95	PSL - 95	577195,42	9715534,56	4,130	208,000	142,070	0,020	31,323	1,537	0,837	2,642	33,210	0,000	0,000	11,080	14,280
96	PSL - 96	577266,66	9707633,12	5,580	85,100	64,270	0,020	10,523	0,900	4,774	0,809	11,310	0,000	8,810	4,060	8,250
97	PSL - 97	576113,65	9715393,65	5,540	62,000	49,650	0,020	8,891	0,584	0,851	1,345	10,060	0,000	0,000	4,850	4,480
98	PSL - 98	577146,32	9715184,17	5,170	73,600	56,990	0,200	9,469	0,392	0,209	1,397	12,730	0,000	0,000	5,400	0,540
100	PSL - 100	582051,88	9718286,52	6,000	75,100	57,940	1,300	9,135	1,395	2,670	2,102	10,340	0,000	15,550	4,740	0,090
101	PSL - 101	583515,26	9716940,38	8,020	241,000	162,950	0,210	8,554	2,358	18,306	14,044	7,230	0,000	110,220	8,700	12,090
102	PSL - 102	582935,49	9715994,49	5,210	60,400	48,630	0,430	8,713	4,783	0,293	0,205	8,320	0,000	9,800	4,220	0,780
103	PSL - 103	582935,49	9715994,49	7,930	828,000	481,180	0,020	120,160	5,411	33,689	12,198	119,340	0,000	206,830	33,690	0,080
104	PSL - 104	583058,20	9718626,41	6,570	133,000	94,590	0,190	19,753	5,967	2,700	2,020	12,920	0,000	47,110	5,130	1,480
105	PSL - 105	589670,72	9718285,27	5,250	82,200	62,430	0,140	9,461	0,972	1,130	1,826	10,780	0,000	0,000	11,310	2,130
106	PSL - 106	584360,66	9699485,35	5,901	107,200	78,260	0,020	14,646	4,775	1,690	1,860	18,240	0,000	11,700	3,460	5,070
107	PSL - 107	574685,99	9712857,53	4,440	601,000	369,490	0,020	47,887	36,266	23,515	3,811	76,970	0,000	0,000	20,540	111,470
108	PSL - 108	587780,41	9707101,76	6,800	543,000	340,960	0,020	37,116	8,615	60,485	4,634	43,600	0,000	90,180	50,440	62,410

Fonte: Elaborado pelo autor, com dados obtidos de ANA, 2018.

Legenda: A) número de ordem; B) código; C) coordenada UTM E (m); D) coordenada UTM N (m); E) pH; 6) condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); F) STD (mg/L); G) turbidez (uT); H) Na^+ (mg/L); I) K^+ (mg/L); J) Ca^{+2} (mg/L); K) Mg^{+2} (mg/L); L) Cl^- (mg/L); M) CO_3^{-2} (mg/L); N) HCO_3^- (mg/L); O) SO_4^{-2} (mg/L); P) NO_3^- (mg/L).

