



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA, NATUREZA E DINÂMICA
DO ESPAÇO – PPGeo UEMA

CHRISLIANNE COSTA PEREIRA

**VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA
BACIA DO RIO TIBIRI, SÃO LUÍS – MA**



São Luís

2022

CHRISLIANNE COSTA PEREIRA

**VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA
BACIA DO RIO TIBIRI, SÃO LUÍS – MA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço - PPGeo, da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Linha de Pesquisa: Dinâmica da Natureza e Conservação.

Orientadora: Prof. Dra. Ediléa Dutra Pereira.

São Luís

2022

Pereira, Chrislianne Costa.

Vulnerabilidade à intrusão salina na água subterrânea da Bacia do Rio Tibiri, São Luís – MA / Chrislianne Costa Pereira. – São Luís, 2022.

126 f

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço) - Universidade Estadual do Maranhão, 2022.

Orientadora: Profa. Dra. Ediléa Dutra Pereira.

1.Bacia do Rio Tibiri. 2.GALDIT. 3.Cunha salina. I.Título.

CDU: 556.31(812.1)

CHRISLIANNE COSTA PEREIRA

**VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA
BACIA DO RIO TIBIRI, SÃO LUÍS – MA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço - PPGeo, da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Aprovada: 01/08/222

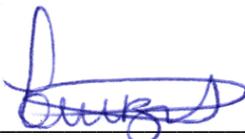
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Ediléa Dutra Pereira (Orientadora)
Universidade Estadual do Maranhão



Dr. João Paulo de Cárcomo Lobo Ferreira
Laboratório Nacional de Engenharia Civil



Prof. Dr. Luiz Carlos Araújo dos Santos
Universidade Estadual do Maranhão

*Dedico este trabalho a Deus, que eu posso
servi-lo em tudo o que me dispuser a fazer
minha família, que é o meu tudo.*

AGRADECIMENTO

Não poderia deixar de agradecer aos meus pais pelo suporte incondicional, tenho sorte de tê-los como um sólido alicerce na vida. Agradeço também às minhas irmãs Gill e Thais, que além de irmãs, são as minhas melhores amigas e ao meu cunhado Eslan, que é como um irmão também. À minha terna avó Raimunda Pontes (*in memoriam*) que habita em lembranças saudosistas; à Hildecir ou querida tia Deca, de grande participação ao longo da vida. Sou eternamente grata por todo apoio e compreensão. A fé em Deus e família são a minha base.

Agradeço também à prestatividade da equipe da CAEMA – Sacavém, especialmente, ao Adrian, que se dispôs a colaborar com a pesquisa de campo. Meu muito obrigada ao Jonas Jansen, que sempre foi meu incentivador, desde o início. Não sei como agradecer ao meu amigo Rodrigo Moreno por ter me acompanhado nas aventuras da área rural e por sua disposição em ajudar; ao grupo Conexão Tibiri e Ecobela, que pude conhecer e receber o apoio ao longo da pesquisa. Meu muito obrigada pela receptividade das associações de moradores, dos líderes de comunidades visitadas e moradores no geral; este contato é o que mais enriquece a experiência de campo ao longo da pesquisa. Gratidão, também, por ter Gustavo Dantas como amigo, comediante e melhor ouvinte. Todos os elos de amizade servem como suporte para a minha saúde emocional e, por isso, sou grata. Minha eterna gratidão à professora Ediléa Dutra, por seu bom humor, otimismo e apoio nas horas difíceis; agradeço também ao seu filho Daniel pelo apoio nas atividades em campo. Às pessoas que puderam somar durante o mestrado, especialmente à Nana Alves e ao professor Luiz Carlos. Obrigada aos parceiros de trabalho Silvia e Sandra, que me incentivaram a iniciar este mestrado, à Mariana Monteles, por ser tão solícita. Obrigada Bruno Martins, que mesmo nos conhecendo apenas a distância, colaborou grandemente com a troca de conhecimentos. Agradeço ao Rafa Wasilewski pela revisão textual, e a minha querida Ilga Kern, pela amizade e por todas as orações direcionadas a mim.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Estado do Maranhão - FAPEMA, pelo apoio concedido à pesquisa, ao PPGeo e à Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, pela oportunidade.

“Não existe gente comum. Você nunca falou com um simples mortal.”

Do livro “O Peso da Glória” de C.S. Lewis

RESUMO

No período compreendido entre a década de 1970 e 1980, a cidade de São Luís apresentou um processo de industrialização tardio, marcado pela criação do Distrito Industrial em 1980. Este processo de industrialização foi acompanhado pelo adensamento populacional oriundo de fluxos migratórios para a capital e trouxe como consequência uma forte mudança na dinâmica demográfica na área da bacia do rio Tibiri e adjacências. Nessa perspectiva, as últimas décadas têm sido marcadas pela deterioração dos recursos hídricos subterrâneos devido a ocupação das áreas de recarga de aquífero e aumento da pressão sobre esses recursos na cidade de São Luís, o que indica a necessidade de planejamento e ações para a proteção dos seus aquíferos. Os aquíferos de ambientes insulares tornam-se ainda mais propícios à intrusão salina, a qual pode ocorrer no sentido horizontal, através da percolação da água oriunda do mar, ou também, verticalmente, por influência de manguezais e estuários. A presença de vegetação de mangue indica a ocorrência de águas salobras e ambiente estuarino presentes em todas as bacias costeiras da ilha ludovicense, como as bacias dos rios Tibiri, Anil, Paciência, Bacanga, Rio dos Cachorros, Santo Antônio, Igarauá e outros. Na bacia hidrográfica do rio Tibiri, a água subterrânea é utilizada para satisfazer diversos usos nas comunidades rurais, para o abastecimento público e privado de áreas residenciais e para atender a demanda hídrica de empresas situadas no Distrito Industrial. Diante da importância desta bacia hidrográfica e da problemática da cunha salina, tem-se o método GALDIT proposto por Chachadi e Lobo Ferreira (2001) como alternativa para investigar a vulnerabilidade de aquíferos à intrusão salina, classificando a área de estudo nas classes de vulnerabilidade alta ($>7,5$), média ($5 - 7,5$) e baixa (<5). Dito isto, esta pesquisa apresenta a Carta de Vulnerabilidade dos Aquíferos à Intrusão Salina na Bacia Hidrográfica do rio Tibiri. O estudo identificou as classes de vulnerabilidade na bacia do rio Tibiri, servindo como instrumento na tomada de decisões referentes à gestão de águas subterrâneas na cidade de São Luís. Os resultados obtidos apresentaram a classe de vulnerabilidade alta apenas na zona rural do Mato Grosso situada na margem esquerda, o que é agravado devido a sua localização próxima à foz do rio Tibiri, por onde ocorre a entrada das macromarés. As regiões rurais do Quebra Pote, Santa Helena e Itapera do Quebra Pote, localizados na margem direita do rio, na porção inferior, foram classificadas com vulnerabilidade moderada. Destaca-se que na porção superior da bacia nas regiões Tibirizinho e Tajaquaba, também indicaram vulnerabilidade moderada. Na margem esquerda do rio, a extensão da Andiroba até o bairro São Raimundo apresentou vulnerabilidade baixa à intrusão salina. Na margem direita, as comunidades Cinturão Verde e Tinaí também apresentaram vulnerabilidade baixa, apesar da proximidade à área de mangue. Além da dinâmica da natureza envolvendo o ecossistema estuarino, as características do uso do solo na bacia envolvendo uso residencial, industrial e rural exercem pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos. As classes de vulnerabilidades alta a moderada encontradas na área da bacia indicam a atuação da intrusão da cunha salina na bacia hidrográfica do rio Tibiri, que, apesar de ser majoritariamente rural, apresenta uma condição insular. Esta pesquisa demonstra a importância de utilizar as informações disponíveis referentes aos dados hidrodinâmicos dos poços tubulares e qualitativos das águas subterrâneas, para fins de monitorar o comportamento da cunha salina e subsidiar medidas mitigadoras para evitar a salinização das águas subterrâneas na bacia.

Palavras-chave: Bacia do rio Tibiri. GALDIT. Cunha salina.

ABSTRACT

During the 1970s and 1980s, the city of São Luís began, rather late, a process of industrialization, marked by the birth of the Industrial District in 1980. This was followed by a rapid increase in population density due to intense migration to the capital, resulting in a noticeable change in the demographics inside the Tibiri River basin and its neighboring areas. As a direct consequence of this, we have seen in the last few decades a significant deterioration of groundwater resources due to the occupation of recharging areas of aquifers, as well as the increased pressure on these resources by the city of São Luís. This indicates the city's need for careful planning and strategizing, in order to protect its aquifers. The aquifers of insular environments become even more prone to saline intrusion, which can occur horizontally, through water that trickles in from the sea, or also vertically, due to the influence of mangroves and estuaries. The presence of mangrove vegetation indicates that saline waters and an estuarine environment are present in all coastal basins of the city of São Luís, such as Tibiri, Anil, Paciência, Bacanga, Rio dos Cachorros, Santo Antônio, Igarauá and more. In the Tibiri River basin, groundwater is used for different purposes in rural communities, for public and private supply in residential areas, and to meet the demand of businesses located in the Industrial District. Given the importance of this watershed, and of the saline wedge problem, the GALDIT method proposed by Chachadi and Lobo Ferreira (2001) is one of the tools that can be used to investigate the vulnerability of the aquifers to saline intrusion, splitting up the area of focus into high vulnerability (>7.5), medium ($5 - 7.5$) or low (<5) classes. As such, this research study will thus apply the Aquifer Vulnerability Chart to Saline Intrusion to the areas of the Tibiri River Basin. This analysis identified the vulnerability classes inside the aforementioned regions, which could then be applied as a decision-making instrument regarding groundwater management in the city of São Luís. The results achieved show a high vulnerability only to the rural area of Mato Grosso, on the left bank of the river, which is heightened due to its location near the mouth of the Tibiri River, where the flow of the tide begins. The rural region of Quebra Pote, Santa Helena, and Itapera do Quebra Pote, located on the right bank of the river, on the lower part of the watershed, was classified as a region of moderate vulnerability. Likewise, the Tibirizinho and Tajaçuaba regions, in the upper part of the basin, also indicated moderate vulnerability. On the left bank of the river, the Andiroba extension to the São Raimundo neighborhood showed low vulnerability to saline intrusion. On the right bank, the communities of Cinturão Verde and Tinaí also showed low vulnerability, despite their proximity to the mangrove area. In addition to the natural processes of estuarine environments, the characteristics of land use in the basin involving residential, industrial, and rural uses, also strain the groundwater resources. The high and moderate vulnerability classes identified in the basin attests the occurrence of the saline wedge phenomenon inside the Tibiri River basin, which, despite being mostly rural, has an insular condition. This research study demonstrates the importance of using knowledge of hydrodynamics data of pipe wells and qualitative groundwater data analysis for the purposes of monitoring the saline wedge behavior and subsidizing measures that will mitigate the salinization of groundwater in the basin.

Keyword: Tibiri River Basin. GALDIT. Saline wedge intrusion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma representativo das etapas da pesquisa na bacia do rio Tibiri - 2022 ..	19
Figura 2 - Localização da bacia do rio Tibiri em São Luís – MA.....	21
Figura 3 - Precipitação Anual Registrada pela Estação Pluviométrica de São Luís – MA.....	22
Figura 4 - Depósitos sedimentares em ambiente fluvio-marinho às margens do rio Tibiri, no bairro Quebra-Pote, zona rural de São Luís – MA.	24
Figura 5 - Mapa de relevo da Bacia do rio Tibiri, São Luís – MA.	25
Figura 6 - Mapa Hipsométrico da área de estudo, São Luís - MA.	26
Figura 7 - Rio Tibiri na porção superior da bacia hidrográfica do rio Tibiri, no bairro São Raimundo, São Luís – MA.	27
Figura 8 - Mapa de geologia da Bacia do rio Tibiri, São Luís – MA.....	29
Figura 9 - Siltitos avermelhados da Formação Cujupe, Grupo Itapecuru, na bacia do rio Tibiri, em São Luís – MA.....	30
Figura 10 - Siltitos maciços avermelhados da Formação Cujupe, Grupo Itapecuru, na bacia do rio Tibiri, em São Luís – MA.	31
Figura 11 - Depósitos de mangue em ambiente estuarino no porto do Quebra Pote, bacia do rio Tibiri, São Luís - MA	33
Figura 12 - Mapa de solos da bacia do rio Tibiri em São Luís – MA.	34
Figura 13 - Porção superior da bacia do rio Tibiri, próximo à nascente do rio Tibiri, no bairro São Raimundo, em São Luís - MA.....	36
Figura 14 - Vegetação ciliar do trecho do rio Tibiri próximo à nascente, em São Luís - MA	36
Figura 15 - Porção superior da bacia do rio Tibiri, no bairro Tibiri, em São Luís - MA.....	37
Figura 16 - Mapa de drenagem da bacia do rio Tibiri de São Luís - MA	38
Figura 17 - Drenagem dendrítica no alto curso da bacia do rio Tibiri, em São Luís – MA.	38
Figura 18 - Desembocadura do rio Tibiri em área com entradas periódicas de maré, São Luís – MA.....	41
Figura 19 - Plantio de feijão no bairro Coquilho, área rural da bacia do rio Tibiri, em São Luís – MA.....	42
Figura 20 - Uso do solo para atividades agrícolas, área rural da bacia do rio Tibiri, em São Luís – MA.....	43
Figura 21 - Crescimento demográfico na cidade de São Luís de 1970 a 2010 - MA.	44
Figura 22 - Registro do Aterro da Ribeira atualmente desativado, em São Luís – MA.....	45
Figura 23 - Registro do Aterro da Ribeira atualmente desativado, em São Luís – MA.....	45

Figura 24 - Cais do bairro Quebra-Pote, zona rural de São Luís – MA.	46
Figura 25 - Vegetação de mangue às margens do rio Tibiri, no bairro da zona rural Tajaçuaba, em São Luís – MA.	47
Figura 26 - Área de ocupação em expansão no bairro da zona rural Itapera do Quebra Pote, em São Luís - MA.	48
Figura 27 - Área de solo exposto com disposição de resíduos próximo ao Residencial Ribeira, na zona rural de São Luís - MA.	48
Figura 28 - Classes de zoneamento na bacia do rio Tibiri, conforme a Lei Municipal Nº 3.253/1992.	50
Figura 29 - Divisão da bacia do rio Tibiri conforme a Lei de Zoneamento Municipal de São Luís - MA.	51
Figura 30 - Esquema da intrusão salina em um aquífero costeiro.	59
Figura 31 - Poço da CAEMA mapeado no bairro Santa Helena, área rural de São Luís - MA.	65
Figura 32 - Poço que atende o Residencial Ribeira, em São Luís - MA.	65
Figura 33 - Poço localizado na Zona Residencial do bairro São Raimundo, em São Luís - MA.	66
Figura 34 - Poço da CAEMA localizado no bairro São Raimundo, em São Luís - MA.	66
Figura 35 - Tela do programa AquiferWin onde as informações do teste de bombeamento são preenchidas	72
Figura 36 - Localização dos poços identificados na área da Bacia do rio Tibiri, São Luís – MA.	78
Figura 37 - Curva base do poço tubular P-48, porção noroeste da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	80
Figura 38 - Curva base do poço tubular P-38, porção noroeste da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	82
Figura 39 - Curva base do poço tubular P-37, na porção noroeste da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	83
Figura 40 - Curva base do poço tubular P-42, na porção noroeste da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	85
Figura 41 - Curva base do poço tubular P-63, na porção noroeste da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	86

Figura 42 - Curva base do poço tubular P-31, na porção inferior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	87
Figura 43 - Curva base do poço tubular P-29, na porção inferior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	89
Figura 44 - Mapa dos perfis litológicos na bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	93
Figura 45 - Perfil litológico do traçado A-B dos poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências, em São Luís.	94
Figura 46 - Perfil litológico do traçado C-D dos poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências, em São Luís – MA.	95
Figura 47 - Perfil litológico do traçado E-F dos poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências, em São Luís – MA.	96
Figura 48 - Perfil litológico do traçado G-H dos poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências, em São Luís – MA.	97
Figura 49 - Perfil litológico do traçado I-J dos poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências, em São Luís – MA.	98
Figura 50 - Mapa referente à espacialização do Parâmetro G, indicando o tipo de aquífero.	100
Figura 51 - Mapa referente à espacialização do Parâmetro A, indicando a condutividade elétrica	101
Figura 52 - Mapa referente à espacialização do Parâmetro L, indicando o nível piezométrico.	102
Figura 53 - Mapa da espacialização do Parâmetro D, indicando a distância dos poços em relação à influência marítima – Bacia do rio Tibiri – Ma.	103
Figura 54 - Abertura de poço da CAEMA para coleta direta da água do poço, em Itapera do Quebra Pote, São Luís – MA.	104
Figura 55 - Mapa da espacialização do Parâmetro I, indicando o índice de intrusão salina – Bacia do rio Tibiri – MA.	106
Figura 56 - Mapa da espacialização do Parâmetro T, indicando a espessura do aquífero dos poços– Bacia do rio Tibiri – MA.	107
Figura 57 - Carta de vulnerabilidade à intrusão salina na bacia hidrográfica do rio Tibiri, em São Luís – MA.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes de densidade de drenagem.....	39
Tabela 2: Classificações segundo o índice de circularidade – Ic.	40
Tabela 3: Parâmetros utilizados no GALDIT.....	68
Tabela 4: Classes de vulnerabilidade pelo método GALDIT.....	69
Tabela 5: Parâmetro G - Ocorrência do Aquífero	71
Tabela 6: Parâmetro A – Condutividade Hidráulica do Aquífero	72
Tabela 7: Parâmetro L – Nível Piezométrico	73
Tabela 8: Parâmetro D – Distância à linha da costa.....	73
Tabela 9: Parâmetro I – Impacto da intrusão marinha.....	75
Tabela 10: Parâmetro T – Espessura do Aquífero.....	76
Tabela 11: Parâmetros hidráulicos do Poço P48 da porção do curso superior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	81
Tabela 12: Parâmetros Hidráulicos do poço P-38 da porção do curso superior da bacia do rio Tibiri, São Luís – MA.....	82
Tabela 13: Parâmetros Hidráulicos do poço P-37 da porção do curso superior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	84
Tabela 14: Parâmetros Hidráulicos do poço P-42 da porção do curso superior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	85
Tabela 15: Parâmetros Hidráulicos do poço P-63 da porção do curso superior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	86
Tabela 16: Parâmetros Hidráulicos do poço P-31 da porção do curso inferior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	88
Tabela 17: Parâmetros Hidráulicos do poço P-29 da porção inferior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.	89
Tabela 18: Parâmetros Hidrodinâmicos dos poços tubulares da bacia do rio Tibiri, São Luís – MA, apresentados nas Figuras 37 a 43.	91
Tabela 19: Dados resultantes das análises de água coletadas a partir de poços tubulares da bacia do rio Tibiri, São Luís – MA.....	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações da Estação Pluviométrica consultada	23
Quadro 2 - Compartimentação do relevo da bacia do rio Tibiri – MA.....	25
Quadro 3 - Métodos destinados à avaliação da vulnerabilidade natural de um aquífero.....	56
Quadro 4 - Parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos.	61
Quadro 5 - Classes de produtividade dos aquíferos.	62

SUMÁRIO

1.	CAPÍTULO. APRESENTAÇÃO DA PESQUISA.....	19
1.1.	INTRODUÇÃO	19
1.2.	OBJETIVOS.....	20
1.2.1.	Geral	20
1.2.2.	Específico	20
1.3.	METODOLOGIA	20
1.3.1.	Método de abordagem.....	20
1.3.2.	Categoria Ambiente.....	20
2.6	Etapas da pesquisa.....	21
2.	CAPÍTULO. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
2.1.	Localização.....	20
2.2.	Clima	22
2.3.	Geomorfologia	23
2.4.	Geologia	28
2.4.1.	Grupo Itapecuru.....	29
2.4.1.1.	Formação Cujupe	30
2.4.1.2.	Formação Alcântara	31
2.4.1.3.	Unidade Indiferenciada	31
2.4.2	Formação Barreiras e Pós-Barreiras.....	32
2.4.3	Depósitos de Mangue	32
2.5.	Solo.....	33
2.5.1.	Latossolos.....	34
2.5.2.	Gleissolos	35
2.6.	Hidrografia	35
2.7.	Uso e Ocupação da Bacia do rio Tibiri	41
2.8.	Zoneamento da área de estudo	49
3	CAPÍTULO. BASE CONCEITUAL	52

3.1	O Conceito de Vulnerabilidade	52
3.1.1	Vulnerabilidade social.....	52
3.1.2	Vulnerabilidade natural	53
3.1.3	Vulnerabilidade ambiental	54
3.2	Métodos para avaliação da vulnerabilidade	54
3.3	Casos de aplicação do método GALDIT.....	57
3.4	O Fenômeno da Cunha Salina.....	58
3.5	Dados Hidrodinâmicos.....	59
3.6	Método de interpolação.....	63
4	CAPÍTULO. ETAPAS DE TRABALHO	64
4.1	Levantamento bibliográfico	64
4.2	Reconhecimento de campo.....	64
4.3	Elaboração da base cartográfica.....	67
4.4	Determinação dos dados hidrodinâmicos.....	67
4.5	Aplicação do método GALDIT	67
5	CAPÍTULO. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
5.1	Distribuição dos poços tubulares e cacimba na área de estudo.....	77
5.2	Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos através do programa <i>Aquífer Win</i>	
32	80	
5.2.1	Perfis Litológicos da Área de Estudo	91
5.3	Avaliação dos dados hidrodinâmicos do método GALDIT	99
5.3.1	Parâmetro G – Ocorrência do Aquífero	99
5.3.2	Parâmetro A – Condutividade Hidráulica	100
5.3.3	Parâmetro L – Nível Piezométrico	101
5.3.4	Parâmetro D – Distância da Linha de Costa	102
5.3.5	Parâmetro I – Impacto da Intrusão Salina	103
5.3.6	Parâmetro T – Espessura do Aquífero.....	106
5.3.7	Espacialização do método GALDIT	107

6	CAPÍTULO. CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
7	REFERÊNCIAS	113
8	ANEXOS.....	119

LISTA DE SIGLAS

ALUMAR - Consórcio de Alumínio do Maranhão S.A
CAEMA - Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão
CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DSG - Diretoria de Serviço Geográfico
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GPS - Global System Position
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MA - Maranhão
ND – Nível Dinâmico
NE – Nível Estático
PPGEO - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço
SEMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais
SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG - Sistema de Informação Geográfica
UEMA - Universidade Estadual do Maranhão
ZEE MA - Zoneamento Ecológico-Econômico do Maranhão

1. CAPÍTULO. APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

1.1. INTRODUÇÃO

No período compreendido entre a década de 1970 e 1980, a cidade de São Luís apresentou um processo de industrialização marcado pela criação do Distrito Industrial. Este processo de industrialização foi acompanhado pelo adensamento populacional oriundo de fluxos migratórios para a capital, o que aumentou, conseqüentemente, a pressão sobre os recursos hídricos locais. No município de São Luís, o abastecimento de água é provido por água superficial do Sistema Italuís, que capta água do rio Itapecuru, por águas subterrâneas provenientes dos sistemas Sacavém, Paciência, por poços tubulares de particulares e pelo reservatório Batatã, que recebe contribuições pluviais e subterrâneas; contudo, a Companhia de Saneamento Ambiental do Estado do Maranhão - CAEMA já indicou perdas de poços tubulares isolados causados pelo avanço da cunha marinha (MARTINS, 2019).

Devido à sua localização, os aquíferos costeiros estão mais propícios à intrusão salina, a qual pode ocorrer no sentido horizontal, através da percolação da água oriunda do mar, ou ainda, verticalmente, por camadas salinizadas como manguezais e estuários (SOBRINHO *et al.*, 2015). A problemática da intrusão salina em aquíferos pode ser agravada diante da superexploração de poços tubulares, o que pode ser controlada a partir de políticas de gestão hídrica.

Na cidade de São Luís se tem as macromarés, duas preamares e duas baixamarés com períodos de 6 em 6 horas, com prisma de maré que atingem cotas de 7,2m de amplitude (REIS, 2005). A presença de vegetação de mangue indica a ocorrência de águas salobras e ambiente estuarino presentes em todas as bacias costeiras da ilha ludovicenses, como Tibiri, Anil, Paciência, Bacanga, Rio dos Cachorros, Santo Antônio, Igarau e outras. Na bacia do rio Tibiri, a água subterrânea é utilizada para satisfazer usos diversos em comunidades rurais, para o abastecimento público e privado de áreas residenciais e para atender a demanda hídrica de empresas situadas no Distrito Industrial.

Diante do exposto, o conhecimento da vulnerabilidade dos aquíferos em relação à intrusão salina na ilha se torna uma ferramenta para auxiliar as tomadas de decisões direcionadas ao planejamento dos recursos hídricos subterrâneos genuinamente ludovicenses.

Sob esta perspectiva, esta pesquisa visa a elaboração da carta de vulnerabilidade de aquíferos à intrusão salina na bacia hidrográfica do rio Tibiri utilizando o método GALDIT. O estudo possibilitará reconhecer os poços tubulares que se encontram penetrados pela cunha

salina da Baía do Arraial, assim, o produto desta pesquisa subsidiará a gestão hídrica de águas subterrâneas na bacia hidrográfica do Tibiri, cidade de São Luís.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Geral

Avaliar a vulnerabilidade à intrusão salina na área de influência bacia hidrográfica do rio Tibiri para subsidiar políticas de conservação de água doce na cidade de São Luís.

1.2.2. Específicos

- Gerar um banco de dados dos poços georreferenciados na bacia do rio Tibiri;
- Analisar as características físico-químicas da água subterrânea;
- Reconhecer e caracterizar o comportamento hidrodinâmico dos aquíferos Barreiras e Itapecuru na bacia hidrográfica do rio Tibiri.
- Elaborar a carta de vulnerabilidade à intrusão da cunha salina na bacia do Rio Tibiri e suas adjacências sob um raio de 2Km a partir das margens da bacia;

1.3. Metodologia

1.3.1. Método de abordagem

O método de abordagem empregado no desenvolvimento dessa pesquisa foi o método científico hipotético-indutivo, o qual parte da observação e experimentação, tendo sua origem no problema, procurando soluções por meios teóricos, hipóteses e tentativas. Ainda de acordo com os autores Japiassú e Marcondes (2001, p. 130), esta lei é gerada com base em observações. Ressalta-se que este método não garante o estabelecimento de uma verdade absoluta, entretanto, oferece evidências e razões para a sua aceitação. O método torna-se mais fidedigno à medida que ocorre um maior número de observações que o confirme.

1.3.2. Categoria Ambiente

O presente estudo requer a análise e discussão acerca das dinâmicas da sociedade que modificam e exercem pressões sobre as dinâmicas da natureza. Com base no exposto, a categoria ambiente consegue contemplar o foco desta pesquisa. A geografia ambiental traz uma perspectiva intermediária, onde é possível encontrar um ponto intermediário entre a “geografia física” e a “geografia humana”, favorecendo assim, a produção de um conhecimento híbrido (SOUZA, 2018). Segundo Nunes (2014, p. 40) “o conceito de ambiente deve ser entendido

como o espaço em que a natureza humana vive e interage em sociedade, de modo harmônico ou conflituoso com a natureza (biótica e abiótica)”.

A autora Suertegaray (2001, p. 28), por sua vez, reconhece que as concepções a respeito do conceito de ambiente podem variar dentre os geógrafos:

A ótica ambiental, na perspectiva naturalista/naturalizante, ainda se auxilia de conceitos que não dimensionam a tensão sob a qual se originam os impactos, mas esta não tem sido a regra. Por conseguinte, podemos afirmar que a Geografia tem pensado o ambiente diferentemente da Ecologia, nele o homem se inclui não como ser naturalizante, mas como um ser social produto e produtor de várias tensões ambientais.

O positivismo predominou na Geografia durante o período da modernidade industrial (MOREIRA, 2011), período em que a dinâmica da natureza era estudada por geógrafos físicos sem apresentar uma conexão com a sociedade.

Sob a ótica do neopositivismo, a natureza passa a ser tratada em observância às suas estruturas e funcionalidades. Esta vertente traz consigo a tendência de fragmentação da natureza onde cada subunidade (o ar, água e solo) se vincula a um sistema maior. De forma semelhante ao positivismo, o neopositivismo retoma uma geografia onde a natureza é tratada como algo não correlacionado à natureza humana. A proposta de uma geografia voltada a dados quantitativos possibilita previsões de fatores ambientais. O crescente número de estudos sobre impactos ambientais e conservação de recursos naturais indica o resgate da associação entre ambiente e sociedade, uma vez que a degradação ambiental traz consequências diretas sobre a qualidade de vida humana (NUNES, 2014). O interesse sobre os impactos ambientais e a forma em que esses impactos afetam a vida humana promove a aproximação entre a geografia física e humana.

Souza (2019) descreve a Geografia Ambiental como uma plataforma capaz abrir caminhos para o diálogo de saberes entre as ciências da natureza e as da sociedade, privilegiando assim, o hibridismo sobre o seu objeto de conhecimento.

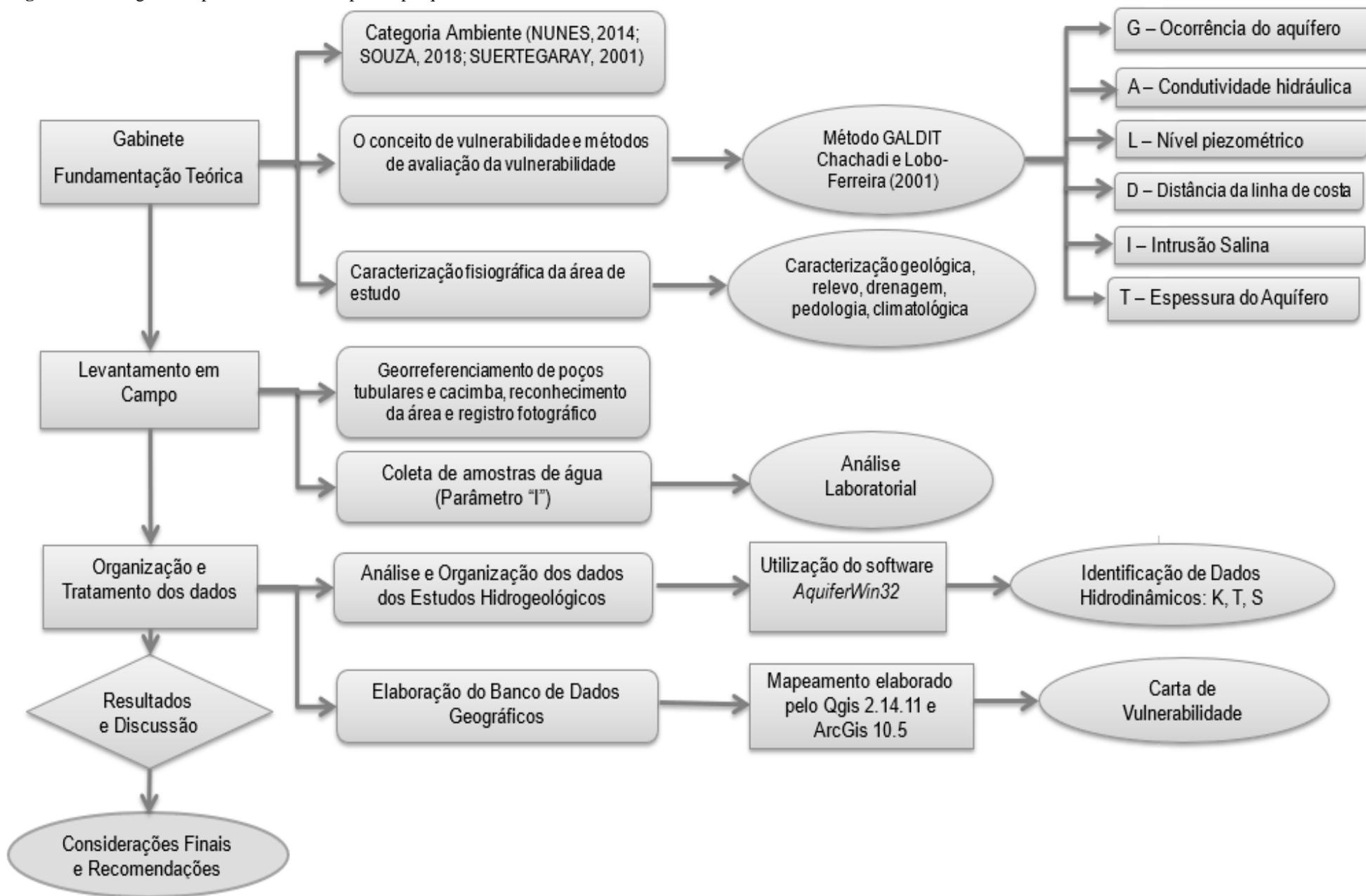
Diante do exposto, esta pesquisa aborda seu tema com base na categoria ambiente ao propor correlacionar a gestão e uso de recursos hídricos subterrâneos com o impacto sobre a vulnerabilidade à salinização de aquíferos.

2.6 Etapas da pesquisa

As etapas da pesquisa foram representadas, de uma forma resumida, através do fluxograma exibido na Figura 1.

CAPÍTULO 1. APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

Figura 1 - Fluxograma representativo das etapas da pesquisa na bacia do rio Tibiri - 2022



2. CAPÍTULO. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização

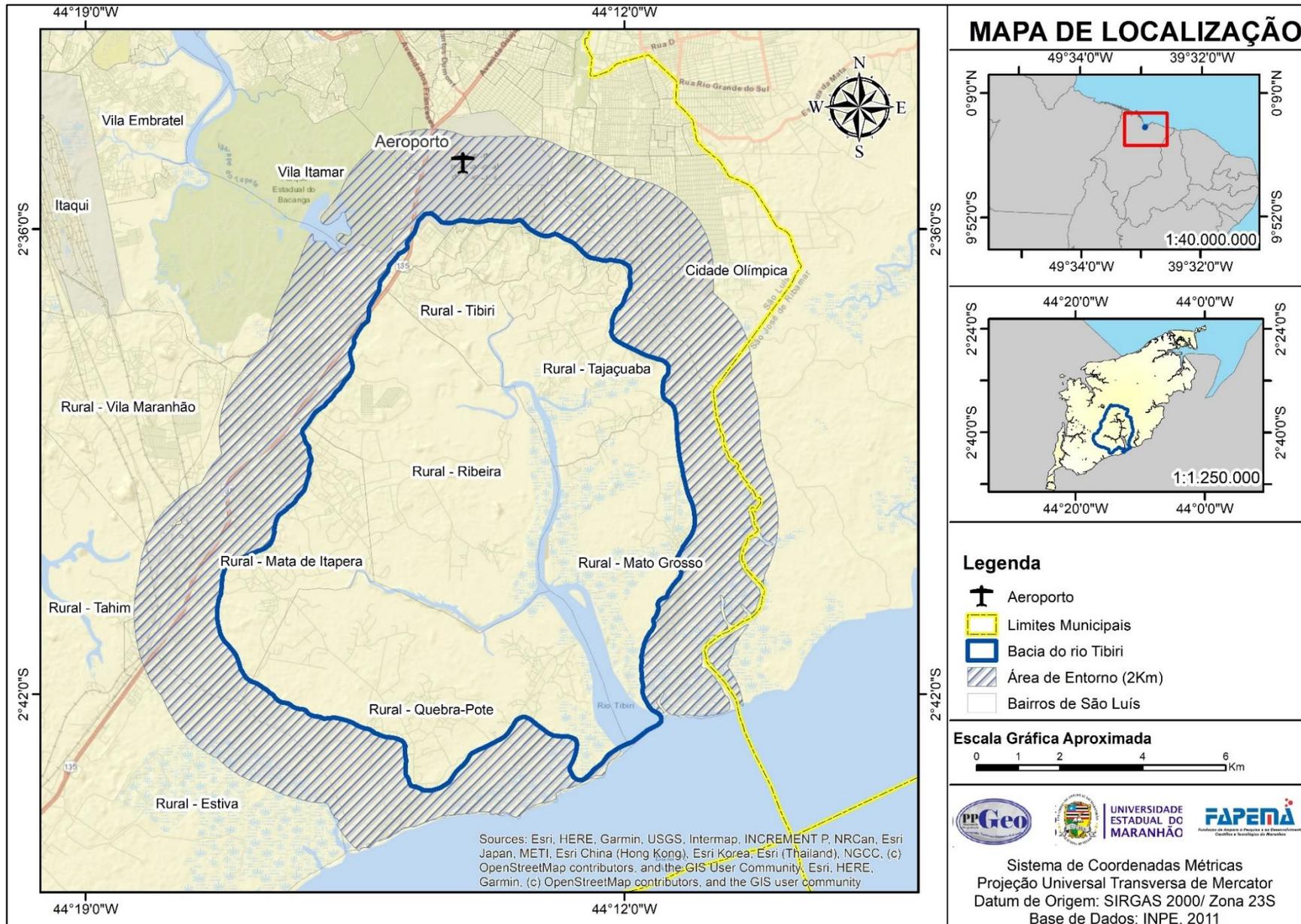
O recorte espacial da área de estudo é a bacia do rio Tibiri, com uma área de 106,18 km², está localizada na porção sul-sudoeste do município de São Luís. A bacia situa-se entre as coordenadas 2°35'54,23''S e 2°42'46,16''S e 44°11'57,18'' e 44°17'13,72''O. O rio Tibiri deságua na Baía do Arraial no Golfão Maranhense (Figura 2).

O acesso rodoviário principal se faz pela rodovia federal BR – 135. Na bacia do rio Tibiri, a hidrodinâmica é influenciada pela entrada do prisma de marés que chega a 7,2 metros (REIS, 2005).

A presença de vegetação de mangue indica a ocorrência de águas salobras e ambiente estuarino presentes em todas as bacias costeiras da ilha ludovicense como Tibiri, Anil, Paciência, Bacanga, Rio dos Cachorros, Santo Antônio, Igarauá e outras.

Quanto aos bairros apresentados no Mapa de Localização (Figura 2), destaca-se que São Luís não possui uma Lei de Bairros, logo, não há uma delimitação oficial, entretanto, de acordo com informações do Instituto da Cidade, Pesquisa e Planejamento Urbano e Rural – INCID, os dados do Cadastro Técnico Municipal da Secretaria Municipal de Fazenda - SEMFAZ, atualmente, correspondem à delimitação que mais se aproxima da realidade.

Figura 2 - Localização da bacia do rio Tibiri em São Luís – MA.

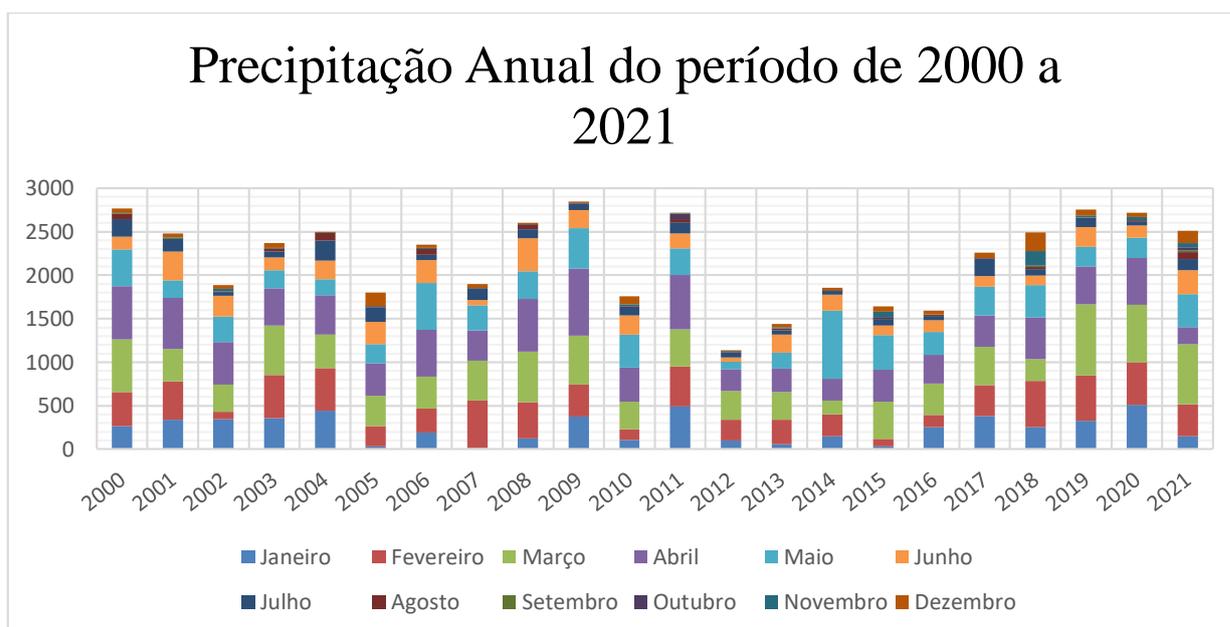


2.2. Clima

A cidade de São Luís está localizada em uma zona de transição entre o tropical úmido amazônico ao oeste e o semiárido nordestino ao leste. Apresenta um comportamento climático quente e úmido com duas estações bem características: uma seca durante o inverno e outra chuvosa durante o verão, considerando a classificação de Köppen (1900), o clima da área de estudo está inserido no tipo Aw' com estação seca de inverno.

As chuvas na cidade de São Luís são mais intensas durante os meses de janeiro a junho, enquanto os meses de julho a dezembro correspondem ao período de estiagem. A análise da série temporal dos dados climatológicos do período 2000-2021, da Estação Meteorológica do tipo convencional, de São Luís – MA. Os registros indicaram altas precipitações nos anos de 2009, 2000 e 2019 de 2847,8; 2765,2 e 2758,2mm respectivamente. Os registros de precipitações mais baixas, por sua vez, foram nos anos de 2012 com precipitação acumulada de 1131mm, 2013 com 1442,5mm e 2016 com 1591,9mm (Figura 3).

Figura 3 - Precipitação Anual Registrada pela Estação Pluviométrica de São Luís – MA.



Fonte: INMET (2022).

Os dados apresentados na Figura 03 são referentes aos dados registrados pela estação pluviométrica São Luís, de código 0024006, disponível na plataforma do Hidroweb, as informações relativas à estação estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Especificações da Estação Pluviométrica consultada

Código	00244006
Nome da Estação	São Luís
Bacia	3 – Atlântico, trecho Norte/Nordeste
SubBacia	33 – Rios Mearim, Itapecuru e Outros
Estado	Maranhão
Município	São Luís
Responsável	INMET
Operadora	INMET
Latitude	-2.8833
Longitude	-44.35
Altitude (m)	50.86

Fonte: HidroWeb, 2021.

2.3. Geomorfologia

A geomorfologia, geologia e pedologia assumem um papel crucial na realização de diagnósticos ambientais uma vez que, basicamente todas as atividades humanas são desenvolvidas sobre determinado tipo de relevo ou solo, trazendo consigo os seus impactos. Guerra e Marçal (2015) defendem a aplicação do conhecimento geomorfológico como abordagem dos sistemas físicos que podem, inclusive, auxiliar na avaliação da vulnerabilidade dos ambientes.

O relevo da ilha de São Luís se caracteriza por apresentar altitudes de 40 a 60 metros, onde se tem a presença de tabuleiros; nas altitudes de 20 a 30 metros são encontradas suaves colinas dissecadas e nas altitudes mais baixas, de 0 a 5 metros de altitude, observam-se as planícies fluviomarinhas (PEREIRA, 2006).

Os domínios morfoestruturais compreendem o primeiro nível da classificação do relevo. Os domínios são organizados segundo o arcabouço geológico distinguido pela natureza das rochas e pela tectônica atuante sobre elas. As diversas feições mantêm, entre si, relações comuns com a estrutura geológica a partir da qual se formaram.

O domínio morfoestrutural da Bacia Costeira de São Luís caracteriza-se por apresentar rochas do Cretáceo ao Quaternário exibindo as formas de tabuleiros, colinas e morros intensamente dissecados com encostas íngremes a suaves. As áreas próximas dos rios e do mar

exibem as planícies e terraços de baixa declividade, depressões modeladas sobre depósitos de sedimentos quaternários em ambientes fluviais, marinhos, fluviomarinhos na zona costeira ou no interior do continente (Figura 4).

Figura 4 - Depósitos sedimentares em ambiente fluviomarinho às margens do rio Tibiri, no bairro Quebra-Pote, zona rural de São Luís – MA.



Fonte: Dados da Pesquisa, 2022.

As unidades geomorfológicas correspondem ao terceiro nível taxonômico da classificação do relevo, a sua classificação se dá com base nos arranjos de formas altimétricas e fisionomicamente semelhantes.

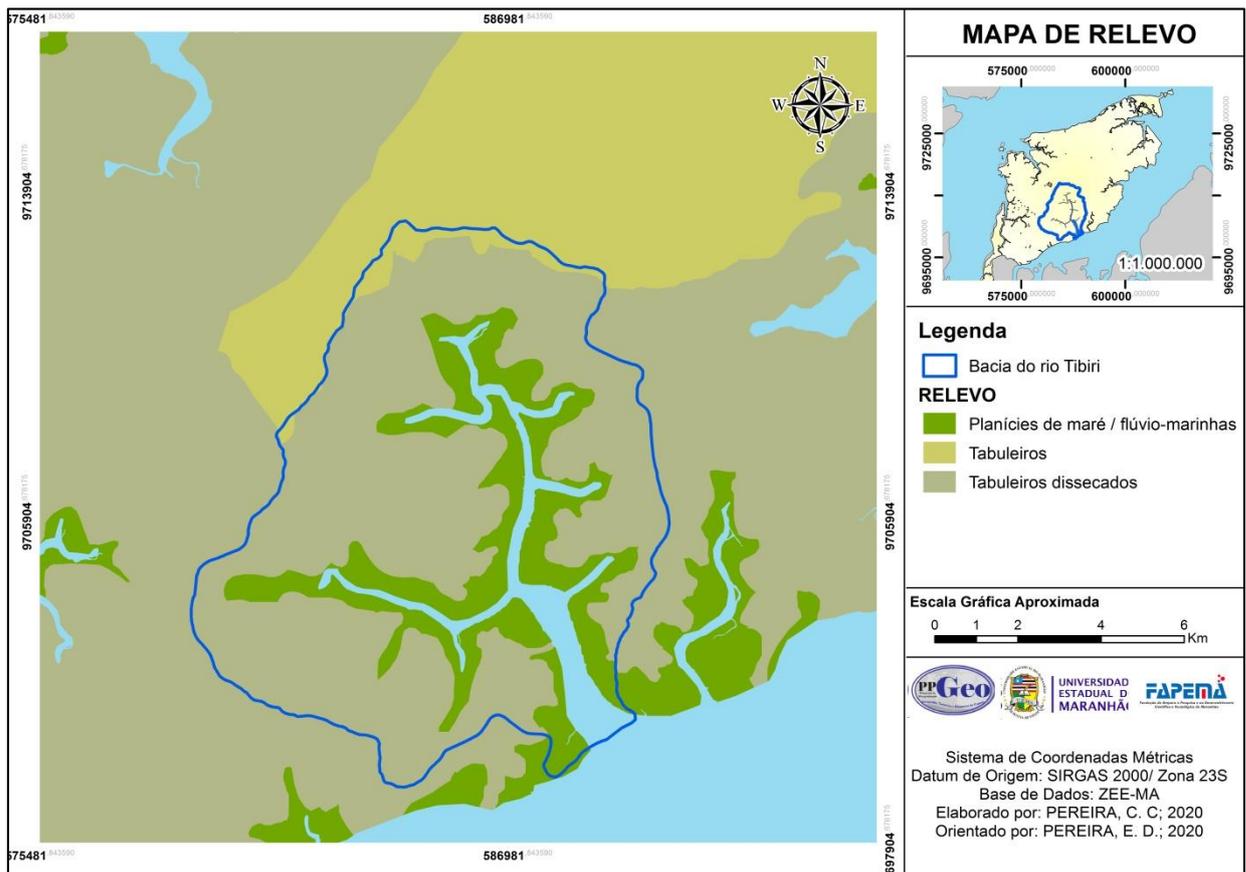
Em relação à sua unidade geomorfológica, a ilha de São Luís está situada na porção central do Golfão Maranhense. O golfão maranhense se caracteriza por ser um complexo sistema estuarino com baías, estuários e várias ilhas (BARROS e BANDEIRA, 2020).

Na área da bacia hidrográfica do rio Tibiri foram identificadas unidades geomorfológicas como Tabuleiros, tabuleiros dissecados e planície de maré/fluviomarinha (Quadro 2, Figura 5) (ZEEMA, 2019).

Quadro 2 - Compartimentação do relevo da bacia do rio Tibiri – MA.

DOMÍNIO MORFOESTRUTURAL	UNIDADE GEOMORFOLÓGICA	SUBUNIDADES LOCAIS DO RELEVO
Bacia Costeira de São Luís.	Golfão Maranhense	Tabuleiros e colinas/morros dissecados, planícies fluviais e fluviomarinhas.

Fonte: Dados da pesquisa, 2021.

Figura 5 - Mapa de relevo da Bacia do rio Tibiri, São Luís – MA.

Tabuleiros

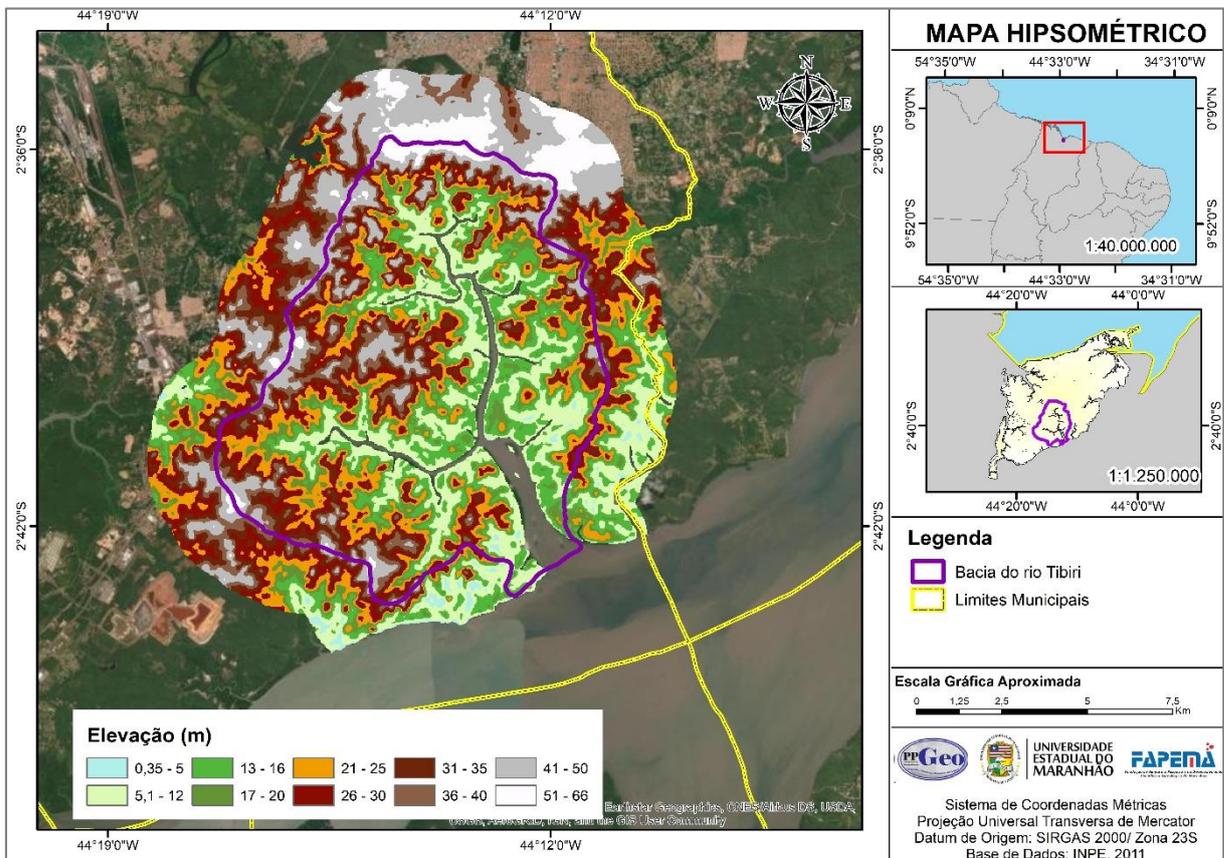
O relevo de tabuleiros e tabuleiros dissecados estão associados à unidade geológica Pós-Barreiras, com alternância irregular entre camadas de sedimentos de composição diversa (BARROS e BANDEIRA, 2020).

O relevo de tabuleiro encontrado nas proximidades do Aeroporto Marechal Cunha Machado, Jardim Santa Bárbara e Vila Vitória, apresenta altitudes em torno de 35m a 64,4m na área da bacia do rio Tibiri.

Na cidade de São Luís, os tabuleiros ocorrem principalmente na porção central e centro-nordeste; em outras áreas, os tabuleiros ocorrem de forma dispersa no sentido radial (BARROS e BANDEIRA, 2020).

O que diferencia os tabuleiros dissecados do conjunto dos tabuleiros é a condição de uma ação maior da erosão somado à dissecação fluvial causada por uma rede de canais de média a alta densidade de drenagem (ANA, 2017). Na área de estudo, os tabuleiros dissecados apresentam altitudes máximas de 64,4 metros considerando apenas a bacia do Tibiri e altitude máxima em torno de 66 metros ao incluir a área de entorno em um raio de 2Km. A Figura 6 abaixo exhibe o perfil da área de estudo em relação à elevação do terreno. As áreas mais elevadas estão localizadas próximas ao aeroporto Cunha Machado e ao longo da BR-135.

Figura 6 - Mapa Hipsométrico da área de estudo, São Luís - MA.



Relevo de Planícies de maré/fluviomarinhas

O relevo de planície fluviomarinha, presente em ambiente marinho costeiro, está associado à unidade geológica dos depósitos de mangue, depósitos de pântanos salinos,

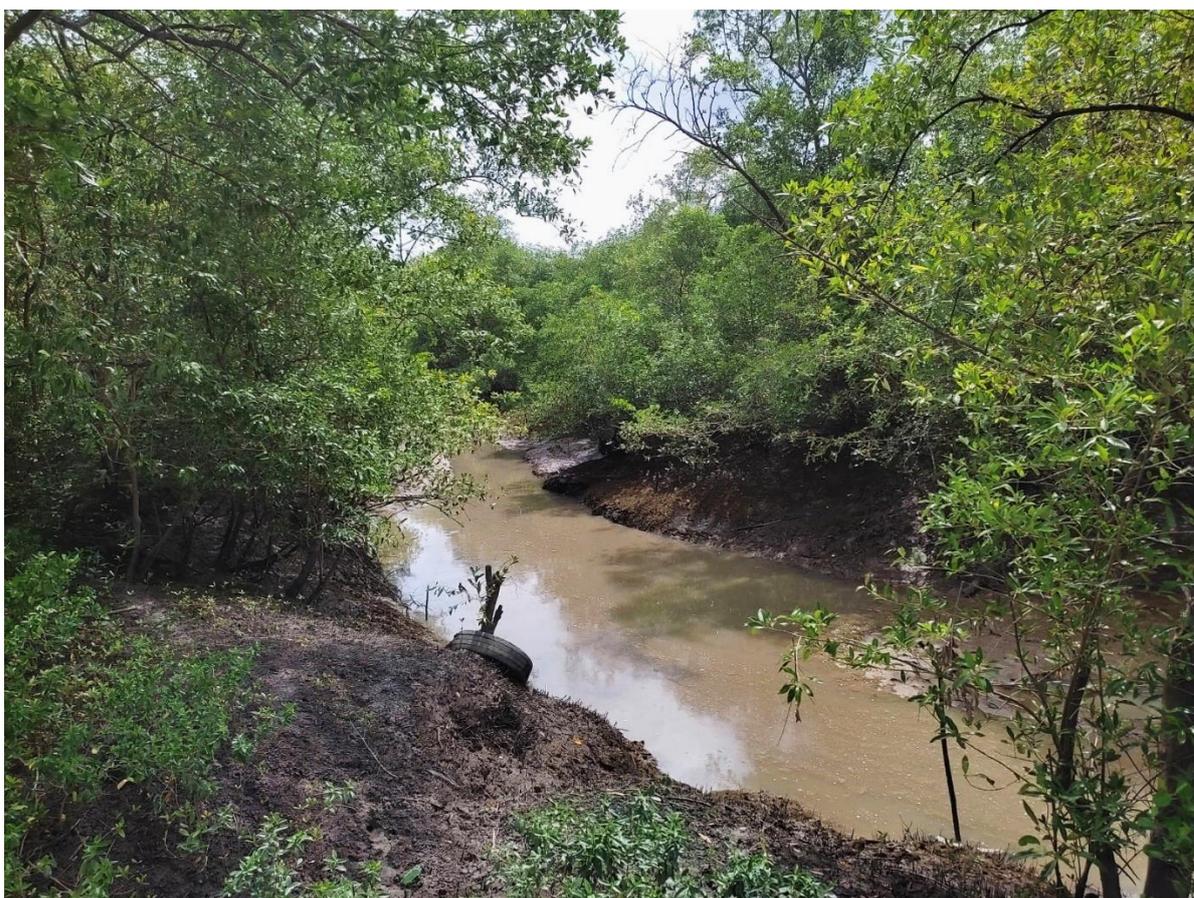
depósitos de planície lamosa. A planície fluviomarinha da área de estudo engloba as planícies de maré, associadas aos mangues (BARROS e BANDEIRA, 2020).

No Golfão Maranhense, as planícies de maré ocorrem em costas planas a suavemente inclinadas, de baixa energia, em áreas de macromarés com ação morfodinâmica superior à influência das ondas. Este ambiente caracteriza quase toda a costa da cidade de São Luís (BARROS e BANDEIRA, 2020). Nessas planícies tem-se a colonização de mangues, presentes em ambientes com forte interação entre os sistemas fluviais e costeiros.

O estado do Maranhão abriga uma extensa porção das áreas de mangue existentes no Brasil, nota-se no estado, maior ocorrência dos mangues vermelhos (*Rhizophora Mangle*) e seriba (*Avicennia Schaueriana*) (SILVA, 2001).

A Figura 7 apresenta a presença de mangue na porção do curso superior do rio Tibiri, o que indica a influência da maré, sob as coordenadas geográficas 2°37'17,88"S e 44°14'4,30"O, no bairro São Raimundo.

Figura 7 - Rio Tibiri na porção superior da bacia hidrográfica do rio Tibiri, no bairro São Raimundo, São Luís – MA.



Fonte: Registro de Campo, 2021.

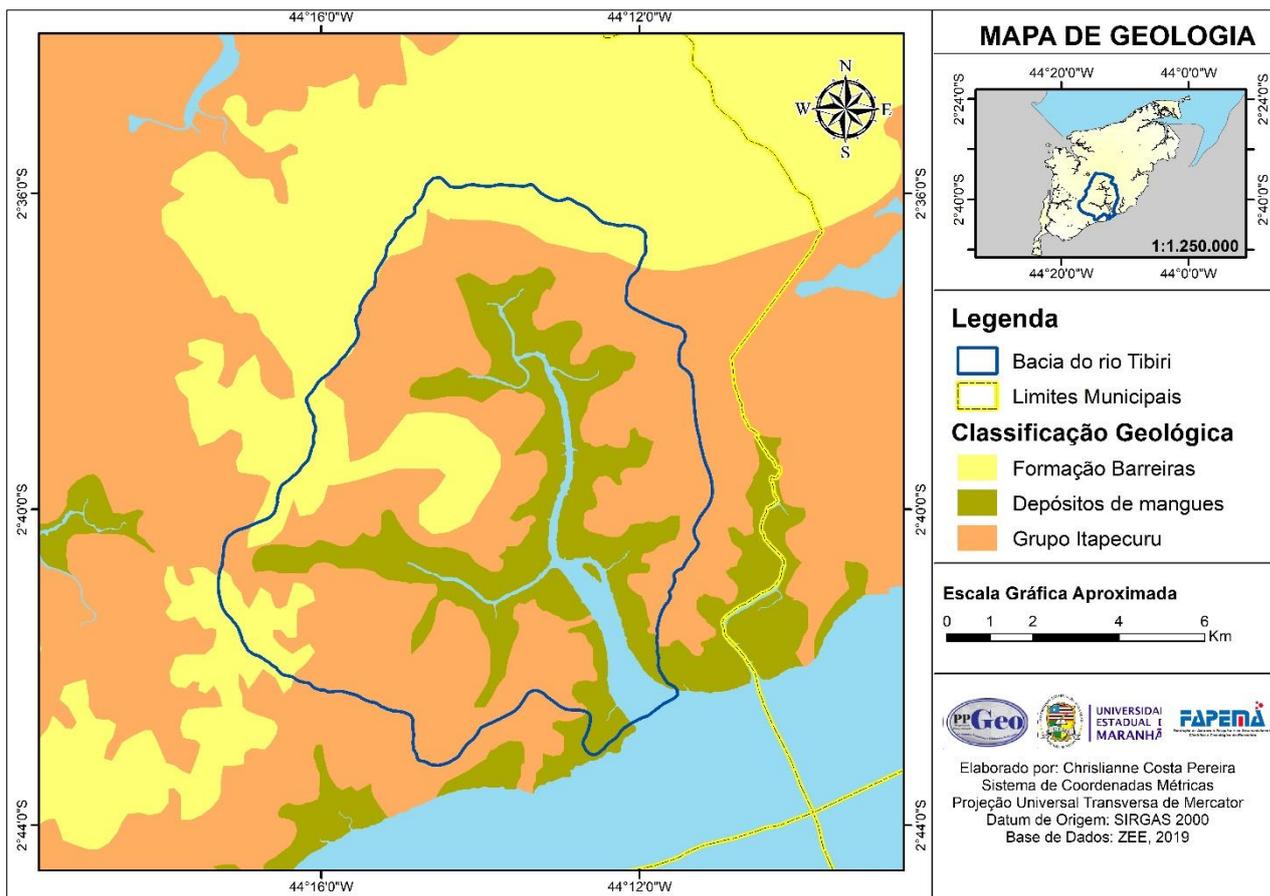
2.4. Geologia

A Ilha de São Luís do Maranhão está inserida nas bacias de *rift* abortado de São Luís e Ilha Nova, com origem associada a um sistema de grabens desenvolvidos sobre o Fragmento Cratônico São Luís, durante a abertura do Oceano Atlântico, no Eocretáceo (BARROS e BANDEIRA, 2020). A bacia costeira de São Luís limita-se ao norte pela plataforma continental, a oeste pelo Arco de Tocantins, a leste pelo Horst de Rosário e ao sul pelos Altos Estruturais Arco Ferrer - Urbano Santos (PEREIRA, 2006) e apresenta uma estrutura alongada de direção NW-SE, com falhas tectonicamente ativas do período Cretáceo até o recente (ROSSETTI, 2006).

A bacia do rio Tibiri é constituída pelas rochas do Cretáceo do Grupo Itapecuru (Formações Alcântara e Cajupe) e pelas Coberturas Superficiais Cenozoicas representadas pela Formação Barreiras e Depósitos de Mangue (Figura 8).

Os processos de intemperismo sobre as formações Alcântara e Cajupe na Ilha do Maranhão geraram áreas com perfis lateríticos imaturos (BARROS e BANDEIRA, 2020). Na bacia do rio Tibiri há predomínio das formações superficiais de depósitos de mangues e perfil intempérico imaturo truncado (Figura 8). O perfil intempérico imaturo truncado configura-se por camadas arenosas e argilo-arenosas com intercalações de argila e silte de cores diversas, bastante alteradas (BARROS e BANDEIRA, 2020).

Figura 8 - Mapa de geologia da Bacia do rio Tibiri, São Luís – MA.



2.4.1. Grupo Itapecuru

Na idade Albiana (época Cretácea Inferior) depositou-se uma sequência *rift* representada por arenitos, siltitos, conglomerados e folhelhos de ambiente costeiro, associados a um sistema fluvial, deltaico com ingressões marinhas do Grupo Itapecuru (LIMA; ARANHA; FEIJÓ, 1994). Segundo Almeida (2000 *apud* Silva, 2001) as rochas do Grupo Itapecuru apresentam um perfil pouco desenvolvido. Esta sequência sedimentar divide-se em três Formações: Unidade Indiferenciada (Albiano); Formação Alcântara (Albiano-Cenomaniano); e Formação Cujupe (Cretáceo Superior-Paleógeno) (ROSSETTI; TRUCKENBRODT, 1997; ROSSETTI, 2001). Dentre as formações deste pacote sedimentar, apenas as formações Cujupe e Alcântara afloram na Ilha (ROSSETTI; TRUCKENBRODT, 1997; ROSSETTI, 1998).

O Grupo Itapecuru na Ilha do Maranhão predomina na porção oeste no município de São Luís, e ao longo das falésias da praia de São Francisco, praia do Boqueirão, praia da Guia, praia do Araçagi, na bacia do rio Bacanga e do rio Tibiri.

2.4.1.1. Formação Cujupe

A Formação Cujupe corresponde à porção superior do Grupo Itapecuru (ROSSETTI, 2001). Os seus depósitos são de 25 a 40 metros de arenitos caulíníficos, a sua granulometria varia de fina a muito fina, coloração branca ou rósea a amarelada, intercalando com argilitos brancos ou de coloração cinza a violácea e conglomerados intraformacionais, com clastos de argila e matriz arenosa (ROSSETTI, 2001). Segundo Rossetti (1998), os depósitos da Formação Cujupe são oriundos de canais de maré e delta de maré, em ambiente estuarino de vale inciso. Afora em abrangência regional e em subsuperfície com espessura de aproximadamente 1500m (ROSSETTI, 2003). Tem como área-tipo a estrada que liga a rodovia Pinheiro-Alcântara (MA-106) ao Porto de Cujupe.

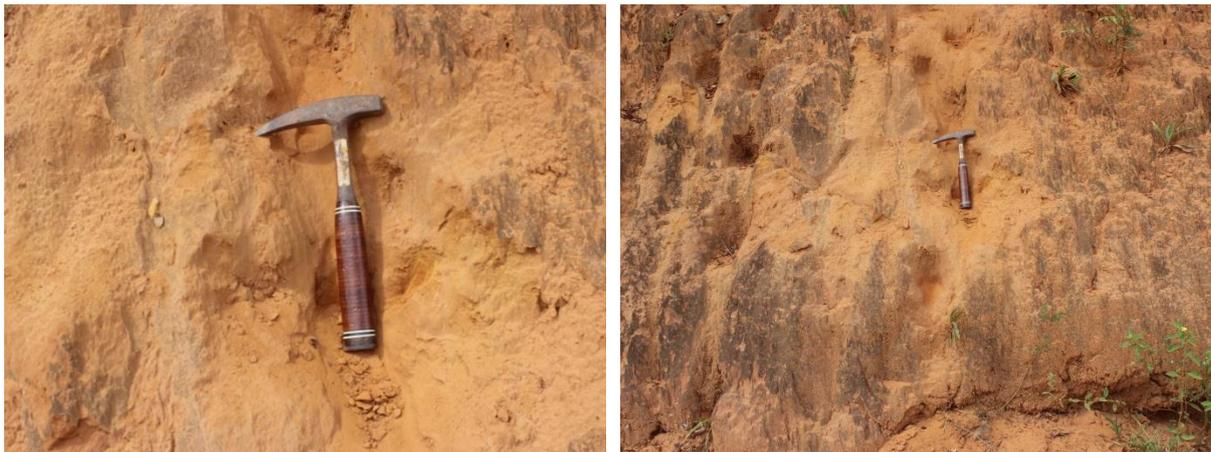
Na bacia do rio Tibiri a Formação Cujupe é representada pelos siltitos avermelhados maciços com intercalações de argilas, estratificação plano paralelas e cruzadas acanaladas (Figuras 9 e 10).

Figura 9 - Siltitos avermelhados da Formação Cujupe, Grupo Itapecuru, na bacia do rio Tibiri, em São Luís – MA.



Fonte: Registros de Campo, 2021

Figura 10 - Siltitos maciços avermelhados da Formação Cujupe, Grupo Itapecuru, na bacia do rio Tibiri, em São Luís – MA.



Fonte: Registros de Campo, 2021.

2.4.1.2. Formação Alcântara

A Formação Alcântara apresenta um pacote sedimentar de colorações marrom a cinza esverdeada, com 30 a 35m de espessura, o qual se constitui de arenitos, pelitos, calcários e conglomerados (ROSSETTI e TRUCKENBRODT, 1997; ROSSETTI, 2001). A granulometria dos arenitos é fina e média, bem litificada e usualmente cimentada por calcita. As estratificações são do tipo cruzada e plano-paralela. As colorações das camadas de calcários são brancas e cinzas (ROSSETTI e TRUCKENBRODT, 1997).

Estima-se que esses depósitos eram sistemas conectados a um estuário (ROSSETTI, 1997). A Formação Alcântara possui significativo conteúdo fóssil, especialmente no afloramento Laje do Coringa, localizado na Ilha do Cajual, Baía de São Marcos.

2.4.1.3. Unidade Indiferenciada

Os depósitos da Unidade Indiferenciada representam cerca de 60-70% do preenchimento sedimentar da Bacia de São Luís-Grajaú (ROSSETTI, 2003). Estes depósitos consistem em intercalações de argilitos vermelhos-chocolate, esverdeados, cinza escuros e violáceos, laminados e maciços, além de calcários esbranquiçados e acinzentados. Os arenitos apresentam granulometria fina a média, bem selecionada; esses depósitos não afloram na bacia do rio Tibiri.

2.4.2 Formação Barreiras e Pós-Barreiras

Estudos observaram a ocorrência de depósitos arenosos finos a médios e, em geral, maciços, sobrejacente à Formação Barreiras em várias localidades da costa brasileira. Esses estratos têm sido considerados como resultantes de espesso manto resultante da alteração intempérica da Formação Barreiras (MABESOONE *et al.*, 1972; MABESOONE, 1984).

Após o detalhamento sedimentológico e estratigráfico no nordeste do Pará e litoral maranhense foi avaliado que esses estratos correspondem a depósitos sedimentares (ROSSETTI *et al.*, 1989; ROSSETTI, 2004), os autores utilizaram o termo Sedimentos Pós-Barreiras para se referirem a esses estratos que foram separados da Formação Barreiras subjacente. A formação apresenta influência de processos marinhos em reentrâncias costeiras.

Os sedimentos Pós-Barreiras foram divididos em duas unidades estratigráficas: Pós-Barreiras 1 como unidade inferior e o Pós-Barreiras 2 como unidade superior

Os sedimentos Pós-Barreiras 1 caracterizam-se por suas areias de granulometrias em geral finas a médias, cores vermelho-clara a alaranjada, maciças, localmente bioturbadas de forma intensa, de seleção moderada a boa, podendo ser localmente grossas a conglomeráticas (ROSSETTI, ROCCA e TATUMI, 2013).

Os sedimentos Pós-Barreiras 2 apresentam areias de granulometria fina a muito fina e bem selecionadas, eventuais fragmentos de cerâmica e fragmentos de carvão que ocorrem de forma dispersa. A coloração varia de amarelo-clara a amarelo-dourada, laranja-acinzentada, marrom-amarelada e amarelo-amarronzada (ROSSETTI, ROCCA e TATUMI, 2013).

2.4.3 Depósitos de Mangue

Os depósitos de mangues são encontrados em toda zona costeira de São Luís, desenvolvendo um ambiente estuarino, sujeitos a inundações periódicas pelas macromarés e por águas doces provenientes dos rios onde se encontram as águas salobras, conforme ilustra a Figura 11. Constituem-se por sedimentos lodosos (silte e argilas), escuros a esverdeados, ricos em matéria orgânicas e nutrientes, são mal drenados (PEREIRA, 2006).

Figura 11 - Depósitos de mangue em ambiente estuarino no porto do Quebra Pote, bacia do rio Tibiri, São Luís - MA

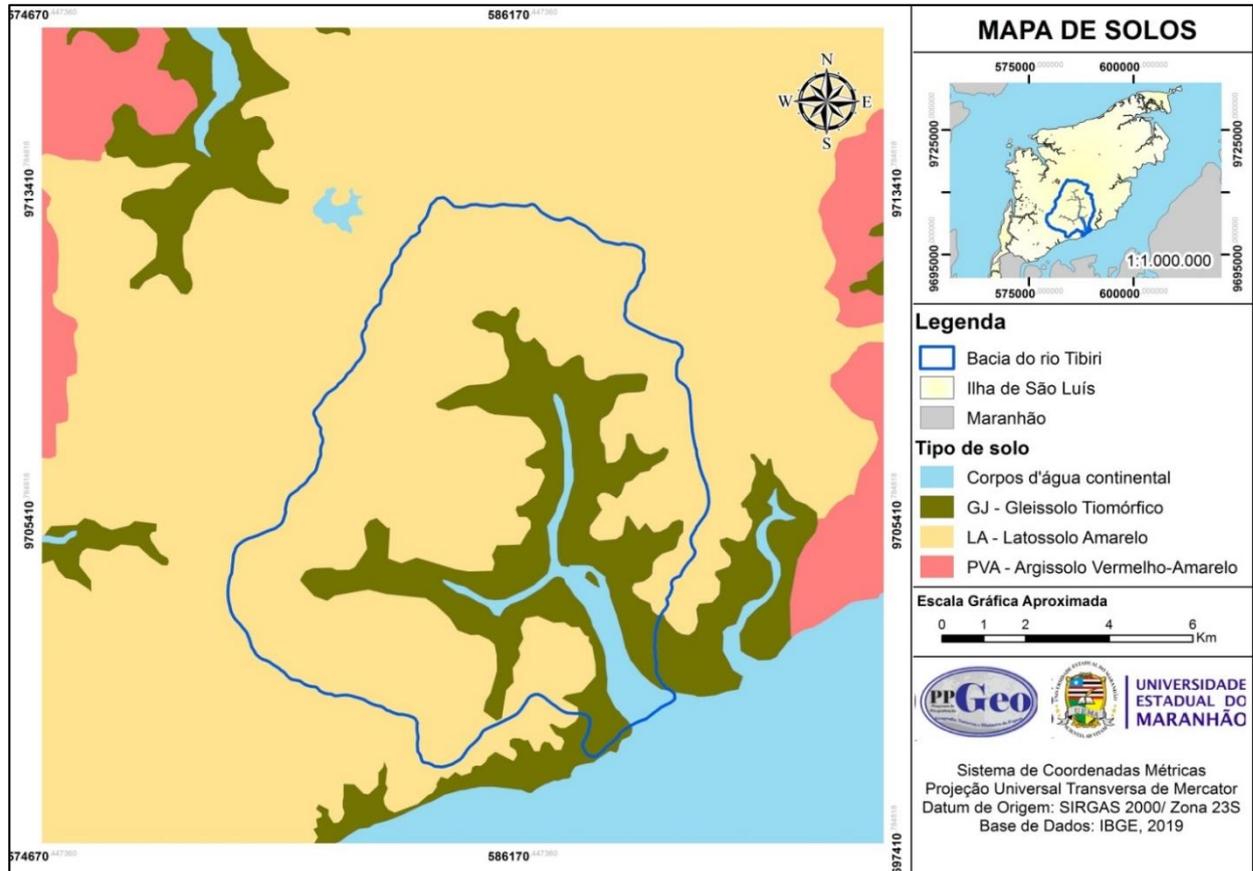


Fonte: Registro de Campo, 2022.

2.5. Solo

O solo presente na bacia do rio Tibiri foram os Latossolos Amarelos Distróficos – Lad e Gleissolo Tiomórfico Órtico – GTo (Figura 12), segundo a base de dados do IMESC (2019) e IBGE (2019).

Figura 12 - Mapa de solos da bacia do rio Tibiri em São Luís – MA.



2.5.1. Latossolos

Com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), os Latossolos caracterizam-se por apresentarem um avançado estágio de intemperização, são solos muito evoluídos, com boa drenagem, resultantes de intensas transformações. Ao longo do seu profundo perfil, apresentam homogeneidade em termos de cor, textura e estrutura, tornando difícil a diferenciação entre os seus horizontes ou camadas; no geral, apresentam baixa fertilidade natural. Esta classe de solos se caracteriza por apresentarem boa permeabilidade, porém, a profundidade do solo oferece condições de enraizamento limitadas e, quando secos, a elevada coesão dos agregados torna o solo de muito a extremamente duro (EMBRAPA, 2007).

Os Latossolos são argilosos ou areno-argilosos com baixa capacidade de troca de cátions (inferior a 17cmolc Kg-1 de argila), uma vez que, quanto mais intemperizado, menor será a capacidade de troca de catiônica do solo (EMBRAPA, 2013).

Os Latossolos estão amplamente distribuídos pelo Brasil, sendo possível encontrá-los em, praticamente, todas as regiões do território nacional. A depender da coloração e dos teores

de óxidos de ferro, podem ser classificados dentre quatro classes distintas (subordem) segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (IBGE, 2015).

Os Latossolos Amarelos da região litorânea brasileira são constituídos a partir de materiais sedimentares do Grupo Barreiras. Devido à elevada coesão entre os horizontes A e B dos Latossolos Amarelos, estes solos eram classificados como Latossolo Vermelho Amarelo coeso (JACOMINE, 1996).

Os Latossolos ocupam a maior parte da área da bacia do rio Tibiri e ocorrem nos topos dos tabuleiros e colinas intensamente dissecadas.

2.5.2. Gleissolos

Os Gleissolos ocorrem tipicamente em áreas sujeitas a alagamento, como, por exemplo, em margens de rios, planícies e ilhas (IBGE, 2015).

Os Gleissolos Tiomórficos são solos compostos por materiais originários dos sedimentos depositados pela água salobra ricos em sulfeto de ferro. Por apresentar um pH muito baixo, este ambiente torna-se potencialmente ácido e desfavorável para a agricultura (ARAÚJO *et al.*, 1973 *apud* BATISTELLA *et al.*, 2013). A saturação hídrica do solo por períodos prolongados desenvolve a coloração com padrões acinzentados, azulados ou esverdeados característicos (IBGE, 2015 e LEPSCH, 2011).

Na bacia do rio Tibiri, estão localizados nas regiões de mangue, sob influência das oscilações de maré.

2.6. Hidrografia

A bacia hidrográfica do rio Tibiri com área de 106,18Km² se insere na região hidrográfica da Bacia do Atlântico Nordeste Ocidental, que abrange quase todo o território maranhense. As nascentes do rio Tibiri ocorrem no tabuleiro, nas proximidades do Aeroporto Marechal Cunha Machado, nos bairros do São Cristóvão e São Raimundo, próximo às coordenadas 2°36'26,21''S e 44°14'36,19''O. Os registros fotográficos das Figuras 13 a 15 foram realizados nas proximidades da nascente do rio Tibiri, sob as coordenadas 2°36'35,9"S 44°14'15,2"W, a cerca de 900 metros de distância do Aeroporto Marechal Cunha Machado.

Figura 13 - Porção superior da bacia do rio Tibiri, próximo à nascente do rio Tibiri, no bairro São Raimundo, em São Luís - MA



Fonte: Registro de Campo, 2022.

Figura 14 - Vegetação ciliar do trecho do rio Tibiri próximo à nascente, em São Luís - MA



Fonte: Registro de Campo, 2022.

Figura 15 - Porção superior da bacia do rio Tibiri, no bairro Tibiri, em São Luís - MA



Fonte: Registro de Campo, 2022.

O registro da Figura 14 foi realizado próximo às coordenadas geográficas de latitude $2^{\circ}36'41.62''\text{S}$ e longitude $44^{\circ}14'32.88''\text{O}$, na porção superior da bacia hidrográfica do rio Tibiri. Observa-se que nesta porção não há presença de mangues que indiquem influência da maré.

A rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Tibiri apresenta padrão dendrítico, e retangular, indicando controle estrutural. O curso do rio percorre a direção NW-SE segundo os sistemas de lineamentos presentes na área (Figuras 16 e 17).

Figura 16 - Mapa de drenagem da bacia do rio Tibiri de São Luís - MA

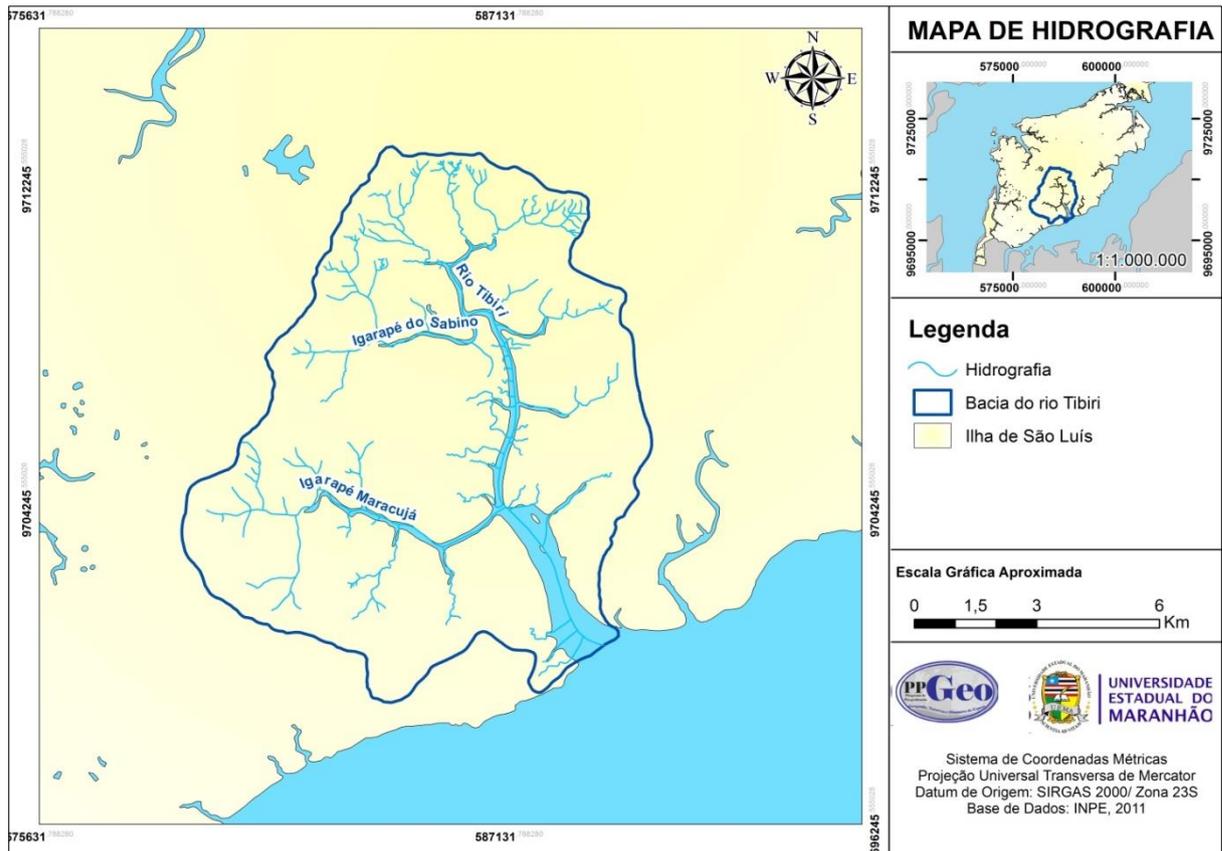
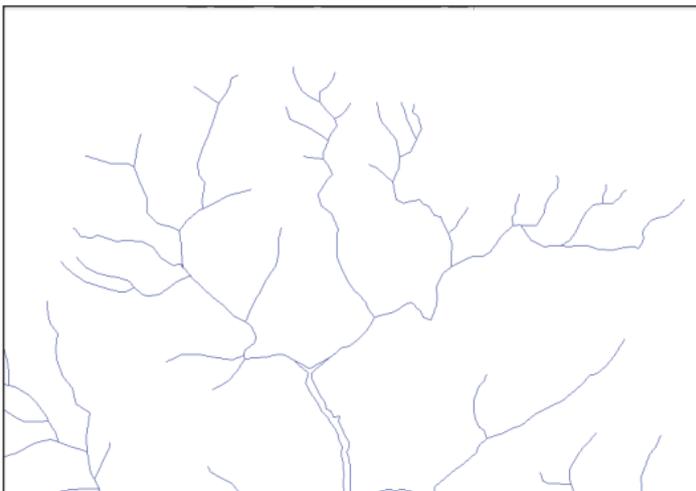


Figura 17 - Drenagem dendrítica no alto curso da bacia do rio Tibiri, em São Luís – MA.



Fonte: Silva (2012).

Em relação à análise morfométrica da bacia hidrográfica, a densidade de drenagem (Dd) pode ser calculada através da equação apresentada, proposta por Christofolletti (1980):

$$Dd = \frac{L_t}{A}$$

Onde:

L_t = Comprimento total dos canais e

A = área da bacia.

Para classificar a bacia segundo a densidade de drenagem calculada, foram consideradas as classes e intervalos apresentados (Tabela 1).

Tabela 1: Classes de densidade de drenagem.

Densidade de drenagem (km/km ²)	Classificação
0,59 - 0,98	Muito Baixa
0,99 - 1,36	Baixa
1,37 - 1,75	Média
1,76 - 2,14	Alta
2,15 - 2,53	Muito Alta

Fonte: Adaptado de Florenzano (1975).

Com base na classificação apresentada na Tabela 1, foi identificada uma **densidade de drenagem de 1,22 Km/Km² indicando baixa densidade de drenagem na área de estudo.**

Para o cálculo do índice de sinuosidade (I_s) foi utilizada a equação de Antoneli e Thomaz (2007):

$$I_s = \frac{L_v}{L_r}$$

Onde:

L_v = comprimento verdadeiro do canal principal (Km)

L_r = comprimento em linha reta do canal principal (Km).

O índice de sinuosidade é adimensional, seu valor permite classificar os canais da bacia hidrográfica como meandranes (quando $I_s \geq 1,5$) ou como retos (quando $I_s \leq 1,5$), de acordo com a proposta de classificação de Dury (1966), citado por Christofolletti (1980). Dessa forma, foi calculado um índice de sinuosidade de **1,28, o que enquadra os canais como do tipo reto, indicando controle estrutural.**

O índice de circularidade (I_c) indica a forma de uma bacia. Quanto mais próximo da unidade (1) for o I_c , mais circular será a bacia de drenagem e, portanto, maior será a sua suscetibilidade a enchentes. O parâmetro I_c é adimensional e pode ser calculado a partir da fórmula abaixo, conforme proposto pelos autores Müller (1953) e Schumm (1956).

$$I_c = \frac{12,57 \times A}{P^2}$$

Onde:

A = área e

P = Perímetro.

A Tabela 2 apresenta as possíveis classificações da forma de uma bacia de acordo com o índice de circularidade calculado.

Tabela 2: Classificações segundo o índice de circularidade – I_c .

Índice de Circularidade	Classificação da Forma
0,36 – 0,5	alongada
0,51 – 0,75	intermediária
0,76 a 1	circular

Fonte: Adaptado de Antoneli e Thomaz (2007).

Obteve-se **um índice de circularidade de 0,64 para a bacia, logo, a forma da bacia é classificada como intermediária**, indicando média susceptibilidade a enchentes.

A bacia do rio Tibiri apresenta um padrão de escoamento exorréico (com fluxo das águas em direção ao mar), este ambiente possui características estuarinas devido à entrada de macromarés (Figura 18) semidiurnas (duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar), com amplitude máxima de cerca de 7,2m e média de 6,6m, porém, na maioria do tempo (75%) as amplitudes de marés são inferiores a 5,5 m (PORTOBRÁS, 1988 *apud* SFADU, 2009), o que favorece a entrada da cunha salina no continente.

Figura 18 - Desembocadura do rio Tibiri em área com entradas periódicas de maré, São Luís – MA.



Fonte: Google Earth, 2021.

2.7. Uso e Ocupação da Bacia do rio Tibiri

No período compreendido entre a década de 1970 e 1980, a cidade de São Luís apresentou um processo de industrialização tardio, marcado pela criação do Distrito Industrial (1980) e inserção de grandes empresas como a Companhia Vale do Rio Doce – CVRD (atualmente Vale S.A.) que começou a operar em São Luís no ano de 1985, o Consórcio de Alumínio do Maranhão - ALUMAR que iniciou suas operações em 1984 e a construção do Porto do Itaqui.

A disposição de infraestrutura tornou o local atrativo à instalação de outras empresas como a Usina Termoeletrica Porto do Itaqui operada pela ENEVA (antiga MPX Energia S.A) (PEREIRA, 2010). Apesar de o processo de industrialização fomentar a geração de empregos, impactos sociais negativos recaíram sobre os moradores tradicionalmente estabelecidos na área rural, pois, após a instalação da usina, houve uma pressão para que os ocupantes dessas áreas aceitassem propostas de deslocamento para áreas distantes (CARVALHO; CIDADE, 2014).

Este processo de industrialização foi acompanhado pelo adensamento populacional oriundo de fluxos migratórios para a capital e trouxe como consequência uma forte mudança na dinâmica demográfica na área da bacia do rio Tibiri e adjacências. Conforme Lopes (2008)

discorre sobre o surgimento de conjuntos habitacionais durante o *boom* populacional em São Luís:

De 1971 a 1999 foram construídos 55 conjuntos habitacionais, entre os quais o Angelim, Vinhais, Maiobão, Cidade Operária, São Raimundo, Jardim América I e II, e os conjuntos IPASE, COHAMA, COHAJAP, COHATRAC, COHAPAM e Cohab-Anil I, II, III e IV, configurando uma mancha urbana descontínua (LOPES, 2008, p. 38).

A infraestrutura dos novos conjuntos habitacionais incentivou uma rápida ocupação nas adjacências desses conjuntos, surgindo assim vilas limítrofes como, por exemplo, a Cidade Olímpica (LOPES *apud* CORREA, 2013, p. 70).

Na bacia do rio Tibiri estão inseridos o Distrito Industrial de São Luís, o antigo Aterro da Ribeira, comunidades agrícolas, bairros da zona urbana e bairros, majoritariamente, da zona rural (Figuras 19 e 20). Dentre os bairros da zona urbana tem-se: Vila Vitória, Santa Bárbara, Jardim São Raimundo, Vila Airton Senna, São Raimundo, Tirirical; enquanto os bairros da zona rural são: Ribeira, Mata de Itaperá, Quebra-Pote, Mato Grosso e Tajaçuaba.

Figura 19 - Plantio de feijão no bairro Coquilho, área rural da bacia do rio Tibiri, em São Luís – MA.



Fonte: Registro de Campo, 2021.

Figura 20 - Uso do solo para atividades agrícolas, área rural da bacia do rio Tibiri, em São Luís – MA.

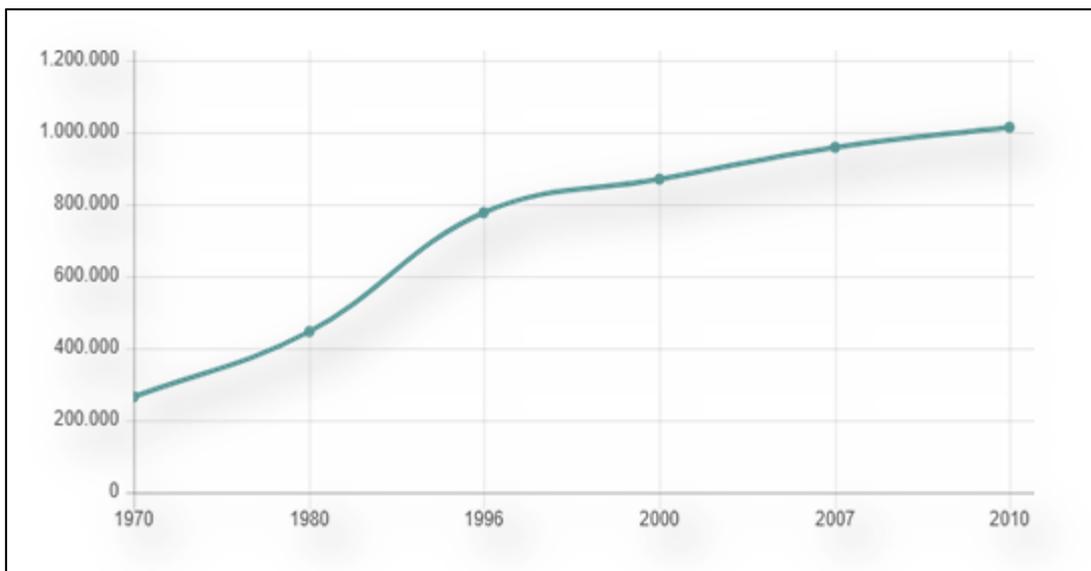


Fonte: Registro de Campo, 2021.

Ao leste da bacia do rio Tibiri, encontra-se a bacia do rio Tijupá e a bacia do rio Jeniparama, na direção oeste é onde está situado o Distrito Industrial de São Luís. O Aeroporto Marechal Cunha Machado está localizado ao norte da bacia, assim como o Parque de Exposição Agropecuária (Expoema).

Com base nos dados do IBGE, o impacto demográfico do processo de industrialização pode ser notado ao comparamos a população 265.486 mil habitantes em 1970 e 1.014.837 habitantes em 2010, registrando um aumento absoluto de 3,8 vezes (Figura 21).

Figura 21 - Crescimento demográfico na cidade de São Luís de 1970 a 2010 - MA.



Fonte: IBGE.

A bacia hidrográfica do Tibiri abriga o Distrito Industrial da cidade de São Luís e o antigo Aterro da Ribeira, que trazem potenciais impactos ambientais negativos à bacia.

Sobre a geração de impactos por parte das atividades industriais, Sousa (2000) relata que:

Um número crescente de indústrias e atividades, tais como cervejarias, oficinas metalmeccânicas, curtume, tanques de combustível, complexo industrial de alumínio, com frequência tendem a localizar-se mais ou menos ao longo do divisor topográfico do rio Tibiri e riacho dos Cachorros, próximas à rodovia BR-135. A maioria dessas atividades industriais gera efluentes líquidos, tais como óleos e solventes, além de resíduos sólidos (SOUSA, 2000, p. 13).

O antigo aterro controlado da Ribeira (Figuras 22 e 23) foi utilizado como destino final dos resíduos urbanos de São Luís desde o início dos anos 1990 até julho de 2015 (ROBSON, 2014). Durante a sua operação foram identificadas problemáticas como: a exposição da população próxima a vetores de doenças e riscos de saúde; contaminação do riacho Sabino pelo chorume oriundo do aterro; proximidade ao aeroporto e os riscos colisão entre aeronaves e os urubus atraídos pelo aterro (IMESC, 2011).

Figura 22 - Registro do Aterro da Ribeira atualmente desativado, em São Luís – MA.



Fonte: Registro de Campo, 2022.

Figura 23 - Registro do Aterro da Ribeira atualmente desativado, em São Luís – MA.



Fonte: Registro de Campo, 2022.

Nas margens do rio Tibiri encontra-se o predomínio de manguezais e igarapés contíguos (REIS, 2005). Nas áreas rurais, apesar da ausência de infraestrutura apropriada, verificou-se o desenvolvimento da atividade de pesca ao longo do rio Tibiri como atividade de

grande relevância para a comunidade local. A Figura 24 apresenta o cais do bairro Quebra Pote, localizado na zona rural de São Luís – MA e, na Figura 25, o porto do bairro Tajaçuaba, à margem esquerda do rio Tibiri.

Figura 24 - Cais do bairro Quebra-Pote, zona rural de São Luís – MA.



Fonte: Registro de Campo, 2022.

Figura 25 - Vegetação de mangue às margens do rio Tibiri, no bairro da zona rural Tajaçuaba, em São Luís – MA.



Fonte: Registro de Campo, 2021.

A ocupação próxima às margens se deu a partir de uma expansão desordenada, como agravante adicional à qualidade ambiental da área (Figura 26).

A expansão da ocupação na área da bacia trouxe prejuízos decorrentes das atividades humanas como a disposição inadequada de resíduos sólidos (Figura 27).

Figura 26 - Área de ocupação em expansão no bairro da zona rural Itapera do Quebra Pote, em São Luís - MA.



Fonte: Registro de Campo, 2021.

Figura 27 - Área de solo exposto com disposição de resíduos próximo ao Residencial Ribeira, na zona rural de São Luís - MA.



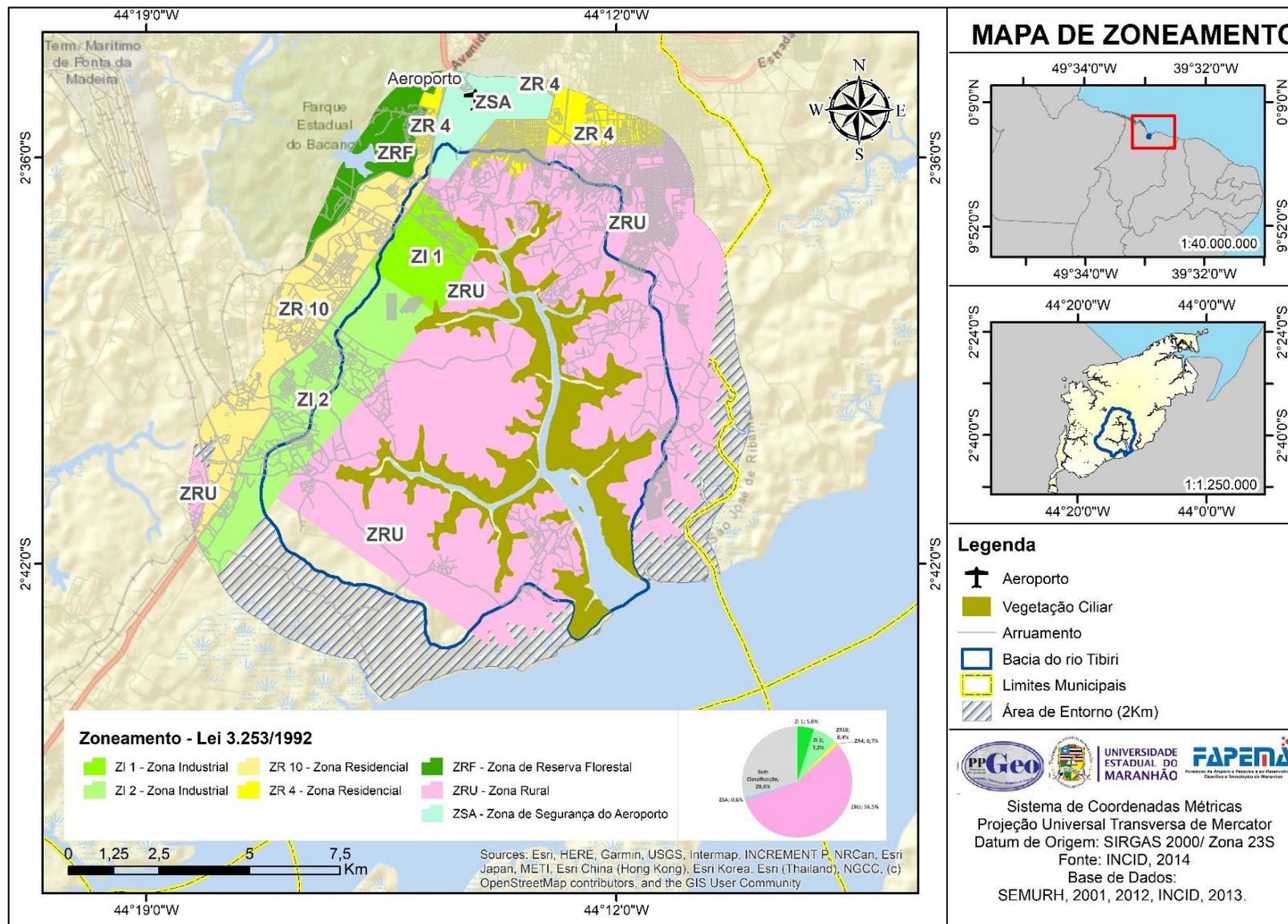
Fonte: Registro de Campo, 2021.

2.8. Zoneamento da área de estudo

Na Lei Municipal Nº 3.252 de 29 de dezembro de 1992, que dispõe sobre o Zoneamento, parcelamento, uso e ocupação do solo urbano (PREFEITURA DE SÃO LUÍS, 1992) se observa que a bacia do rio Tibiri abrange 6 (seis) zonas, sendo elas: ZRU – Zona Rural; ZSA – Zona de Segurança do Aeroporto; ZI1 – Zona Industrial 1; ZI2 – Zona Industrial 2; ZRF – Zona de Reserva Florestal (Sacavém) e ZR 4 e 10 – Zonas Residenciais. A Figura 28 demonstra a distribuição das zonas sobre a área de estudo.

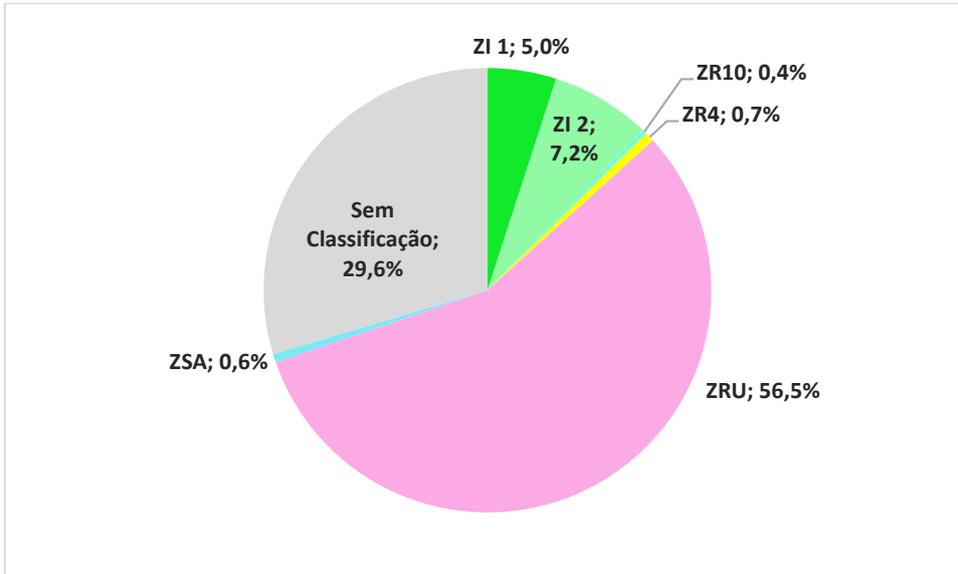
A bacia do rio Tibiri é predominantemente rural visto que 56,5% da sua área encontra-se sobre a Zona Rural (ZRU), 12,2% sobre a Zona Industrial da cidade (ZI 1 e ZI 2); 1,1% sobre Zonas Residenciais (ZR 4 e ZR 10) e 0,6% na Zona de Segurança do Aeroporto (ZSA). Na bacia hidrográfica do rio Tibiri, a área sem classificação coincide, majoritariamente, com a área de vegetação ciliar do rio Tibiri.

Figura 28 - Classes de zoneamento na bacia do rio Tibiri, conforme a Lei Municipal N° 3.253/1992.



Para melhor observação, a Figura 29 apresenta um gráfico com a relação de zonas e seus respectivos percentuais sobre na bacia hidrográfica. Os valores apresentados não incluem a área de entorno.

Figura 29 - Divisão da bacia do rio Tibiri conforme a Lei de Zoneamento Municipal de São Luís - MA.



Fonte: Dados da Pesquisa (2022).

As demais áreas não computadas no *chart* da Figura 29 correspondem às áreas de vegetação ciliar, conforme apresenta o mapa da Figura 28 e outras áreas sem classificação prevista no Plano Diretor da Cidade de São Luís.

3 CAPÍTULO. BASE CONCEITUAL

3.1 O Conceito de Vulnerabilidade

Durante os anos de 1980 e 1990, o termo vulnerabilidade foi amplamente utilizado em diversas publicações, o que trouxe múltiplas interpretações para a sua conceituação (FRANCISCO, 2018). O termo vulnerabilidade é comumente empregado como sinônimo de fragilidade, sensibilidade ou suscetibilidade a alguma situação adversa.

A vulnerabilidade se reflete em um conjunto de características do aquífero que determina o quanto ele poderá ser afetado pela ação de determinado poluente (SILVA, 2004). A vulnerabilidade é aplicada para representar a caracterização intrínseca que determina a sensibilidade de uma parte do aquífero a ser adversamente afetada por uma carga poluente imposta. A carga poluente pode ser controlada ou modificada, mas não a vulnerabilidade do aquífero (FOSTER *et al.*, 2002).

No âmbito da pesquisa científica, o conceito de vulnerabilidade pode ser associado a outros termos, a depender do foco do estudo, como por exemplo: vulnerabilidade social, vulnerabilidade ambiental e por fim, a vulnerabilidade natural, que será o conceito aplicado neste trabalho.

Sob a premissa de que todo aquífero apresenta um maior ou menor grau de vulnerabilidade, diferentes metodologias buscam estimar o índice vulnerabilidade através de caminhos matemáticos, apesar de não existir um modelo ideal, capaz de informar a vulnerabilidade com exatidão, o objetivo da avaliação da vulnerabilidade é identificar as diferentes zonas de dada área de estudo com seus correspondentes graus de vulnerabilidade (DALY *et al.*, 2002).

3.1.1 Vulnerabilidade social

Vulnerabilidade social tem sido um conceito utilizado para indicar grupos sociais que sofrem maiores transtornos diante de um estresse de origem ambiental. (CONFALONIERI, 2015). Os autores Pelling e Uitto (2001) relacionam a vulnerabilidade social com a capacidade humana de se preparar ou recuperar de impactos negativos ocasionados por desastres.

Oliveira (1995) questiona quais são as condições específicas que caracterizam um grupo como vulnerável socialmente e acredita que a resolução ou atenuação dessas condições se encontra primordialmente no âmbito econômico.

Conforme Santos (2015, p. 76) nos remete à importância de buscar uma relação harmônica na ocupação de espaços naturais ao declarar que:

É justamente nesse complexo jogo de relações entre sociedade e natureza que surge a premente necessidade de ocupar os espaços naturais e, ao mesmo, tempo assegurar a funcionalidade sistêmica dos ambientes, visando a redução dos riscos (SANTOS, 2015).

Dessa forma, admite-se que as políticas públicas de combate à vulnerabilidade social devem contemplar estratégias que busquem interpretar condições ambientais que configurem riscos a uma dada população vulnerável.

3.1.2 Vulnerabilidade natural

Com base na concepção de Foster *et al.* (1998), o termo vulnerabilidade natural pode ser entendido como a susceptibilidade que um sistema apresenta à degradação por meio de um contaminante. Toma-se o conceito de contaminante proposto pela Academia de Ciências do Estado de São Paulo (ACIESP) como composto ou substância que desencadeia efeitos negativos ao ecossistema. Segundo Foster *et al.* (1998), a vulnerabilidade pode ser classificada em específica ou intrínseca.

A **vulnerabilidade específica** relaciona-se com o conceito de risco sempre que traz como enfoque o perigo de uma substância poluente específica como fator de deterioração (AUGE, 2007).

Para Foster e Hirata (1988), a **vulnerabilidade intrínseca** está relacionada aos aspectos hidrogeológicas da área, enquanto a **vulnerabilidade específica** indica a susceptibilidade de um aquífero à contaminação levando em conta não só os aspectos físicos da área, mas também as características do contaminante.

Conforme Meaulo (2004), por sua vez, atenta para a importância de diferenciar os termos “vulnerabilidade à poluição” e “risco à poluição”; que apesar de sugerirem uma ideia similar, na avaliação do risco à poluição é necessário considerar diversas variáveis como, por exemplo, a existência e exposição a um determinado contaminante, características da carga poluente e uso do solo. Portanto, a vulnerabilidade natural de um aquífero é apenas um dos procedimentos a serem adotados na avaliação do risco à poluição.

A definição de vulnerabilidade natural conforme Grigio (2008) como a predisposição de um ambiente à contaminação considerando fatores físicos como a geomorfologia e geologia

local e estabilidade em relação à morfogênese. Cada característica físico-natural de um aquífero contribui, de alguma forma, para a estabilidade ou vulnerabilidade do ambiente (MESQUITA *et al.*, 2011). A concepção mais frequente sobre vulnerabilidade é a que se refere às características intrínsecas de um aquífero, que são características mais estáticas e geralmente além do controle humano (CHACHADI *et al.*, 2002).

No ano de 1987 houve uma conferência internacional nos Países Baixos, onde foi sugerido que a vulnerabilidade natural de aquíferos fosse definida levando em consideração apenas as suas características intrínsecas, enquanto as características e comportamento de contaminantes específicos são desconsiderados. Em concordância com as recomendações da conferência internacional "*Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*", Lobo-Ferreira e Cabral (1991) propuseram um conceito de vulnerabilidade particular aos aquíferos costeiros. Dessa forma, a vulnerabilidade de aquíferos à intrusão salina foi definida como a sensibilidade que a qualidade da água subterrânea apresenta diante do bombeamento de água ou aumento do nível do mar na faixa costeira, com base nas características intrínsecas do aquífero. Nesta pesquisa, será investigada a vulnerabilidade dos aquíferos costeiros da bacia do rio Tibiri utilizando o método GALDIT, assim, adota-se o conceito de vulnerabilidade natural visto que os parâmetros do método adotado dependem das características intrínsecas do aquífero na avaliação da vulnerabilidade do aquífero.

3.1.3 Vulnerabilidade ambiental

Tagliani (2003) apresenta o conceito de vulnerabilidade ambiental como a suscetibilidade que um ambiente apresenta frente a um impacto potencial decorrido por um uso antrópico qualquer. Para estudo da vulnerabilidade ambiental, é necessário avaliar a relação da vulnerabilidade natural junto ao uso da terra e vegetação local (GRIGIO, 2003; GRIGIO, 2008; LOUREIRO, 2011; KLAIS *et al.*, 2012).

O uso de recursos naturais em desacordo com as áreas mais vulneráveis gera diversos impactos, quando o fator é avaliado junto às características intrínsecas do ambiente, a vulnerabilidade natural passa a ser vulnerabilidade ambiental (FURTADO, 2016).

3.2 Métodos para avaliação da vulnerabilidade

A literatura aponta diversas metodologias voltadas à análise da vulnerabilidade natural de aquíferos, uma dessas metodologias é a GOD (FOSTER *et al.*, 2002) a qual trabalha com

três parâmetros: ocorrência da água subterrânea, consolidação da zona vadosa e profundidade da água no aquífero. Esta metodologia utiliza de informações comumente disponíveis para acessar a vulnerabilidade de sistemas de aquíferos (GUINGUER, 2002). Após caracterizar o grau de confinamento, os estratos geológicos e a profundidade da água subterrânea, atribui-se um valor para cada um destes parâmetros. Os valores numéricos atribuídos a cada um dos três parâmetros são multiplicados entre si; o índice de vulnerabilidade corresponde ao produto desta multiplicação.

Outro método existente para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos é o DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987). Para identificar o índice DRASTIC é necessário calcular a média ponderada dos sete indicadores hidrogeológicos exigidos na metodologia e, para cada indicador, atribui-se um peso pré-determinado. Os parâmetros utilizados no método são: D- Profundidade do lençol freático ou nível da água; R- Recarga do aquífero; A - Característica do aquífero; S - Solos; T- Topografia; I- Impacto na zona não saturada e C- Condutividade hidráulica. O índice calculado será utilizado para verificar a classe de vulnerabilidade do aquífero.

Além dos métodos apresentados, a literatura dispõe de outros métodos destinados à avaliação da vulnerabilidade natural e perigo de contaminação de aquífero, temos como exemplo os métodos apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Métodos destinados à avaliação da vulnerabilidade natural de um aquífero.

Método	Autores	Descrição	Parâmetros
AVI	(VAN STEMPVOORT; EWERT; WASSENAAR, 1992).	Vulnerabilidade aquífera	Profundidade da zona subsaturada; espessura da camada sedimentar; condutividade hidráulica.
SINTACS	(CIVITA; DE MAIO, 1997).	Vulnerabilidade aquífera	Profundidade da água subterrânea; tipo de solo; infiltração; aquífero; litologia da zona subsaturada; condutividade; topografia.
EPIK	(DOERFLIGER; ZWAHLEN, 1997)	Vulnerabilidade aquífera em meios cársticos	Cobertura protetora; condições de infiltração; desenvolvimento da rede do ambiente cárstico e recarga.
GALDIT	(LOBO FERREIRA; CHACHADI, 2001).	Vulnerabilidade de Aquíferos costeiros quanto à intrusão salina	Tipo de aquífero; condutividade hidráulica do aquífero; peso da água subterrânea sobre a água do mar; Distância para a costa; impacto existente da intrusão salina; espessura do aquífero mapeado.
GOD	FOSTER e HIRATA (1988)	Vulnerabilidade aquífera	Tipo de aquífero; litologia da zona vadosa; profundidade da zona subsaturada.
DRASTIC	ALLER (1987)	Vulnerabilidade aquífera	Profundidade da zona subsaturada; recarga; meio aquífero; topografia; impacto da zona vadosa; condutividade hidráulica.

Diante dos métodos disponíveis, optou-se por utilizar o método GALDIT que é aplicado, especificamente, para a averiguação da intrusão salina no aquífero em ambientes

costeiros, nesse sentido, será o método aplicado neste estudo. Seguindo os conceitos básicos apresentados por Lobo-Ferreira e Cabral (1991) acredita-se que a concepção de vulnerabilidade de aquíferos à intrusão marinha está intimamente relacionada às características intrínsecas do aquífero, dessa forma, o método propõe investigar os parâmetros específicos do aquífero.

3.3 Casos de aplicação do método GALDIT

O método GALDIT tem sido amplamente utilizado em diversos países no intuito de avaliar a extensão da contaminação de aquíferos costeiros devido à intrusão salina. A princípio, o método foi aplicado para a costa norte de Goa, no litoral indiano. O estudo demonstrou que o uso excessivo da água subterrânea ao longo de partes do cinturão costeiro da Índia, afetou a qualidade e quantidade das águas subterrâneas especialmente em partes de Andhra Pradesh, Gujarat, Orissa, Tamil Nadu e West Bengal (CHACHADI *et al.*, 2002).

Um segundo emprego do método GALDIT foi desenvolvido para avaliar os efeitos da subida do nível do mar no Algarve, região sul de Portugal (LOBO-FERREIRA *et al.*, 2005). Desde então, o método GALDIT tem sido continuamente aplicado em diferentes países, por ser considerado o método mais representativo para a avaliação da intrusão salina e confiável para pesquisas contínuas.

Algumas pesquisas utilizam uma metodologia modificada do GALDIT, aplicando em regiões com variadas propriedades hidrogeológicas, a exemplo disto, no Sul da Coreia foi desenvolvido um para avaliar a vulnerabilidade SWI (*Seawater Intrusion*) para a sazonalidade média com base no método GALDIT original, considerando os parâmetros “L, I e T” como variantes mensais e os parâmetros “G, A e D” são os que pouco variam ao longo do tempo (KIM, CHUNG e CHANG, 2021).

Outros estudos apontam que é possível controlar a intrusão salina em zonas costeiras utilizando a Gestão da Recarga de Aquíferos (MAR). Para promover a recarga de aquíferos, é indicado que o local de recarga apresente boas taxas de infiltração e capacidade para o armazenamento de água no subsolo. Nesses casos, a aplicação do método GALDIT, em paralelo à MAR, auxilia na eficiência da gestão de recarga de aquíferos ao identificar as zonas mais vulneráveis à intrusão marinha (LOBO-FERREIRA, 2019).

Na cidade de São Luís, capital do Maranhão, o método GALDIT já foi aplicado com a finalidade de avaliar a intrusão salina na franja costeira da cidade (CASTRO, 2019) e no curso inferior da bacia hidrográfica do rio Bacanga (MARTINS *et al.*, 2019).

A pesquisa desenvolvida por Martins *et al.* (2019) demonstrou uma alta vulnerabilidade à intrusão salina na área próxima à foz do rio Bacanga devido à infiltração lateral da cunha salina. Em relação à área do Parque Estadual do Bacanga, onde existe uma bateria de poços destinados ao abastecimento público, houve a indicação de moderada vulnerabilidade (MARTINS *et al.*, 2019).

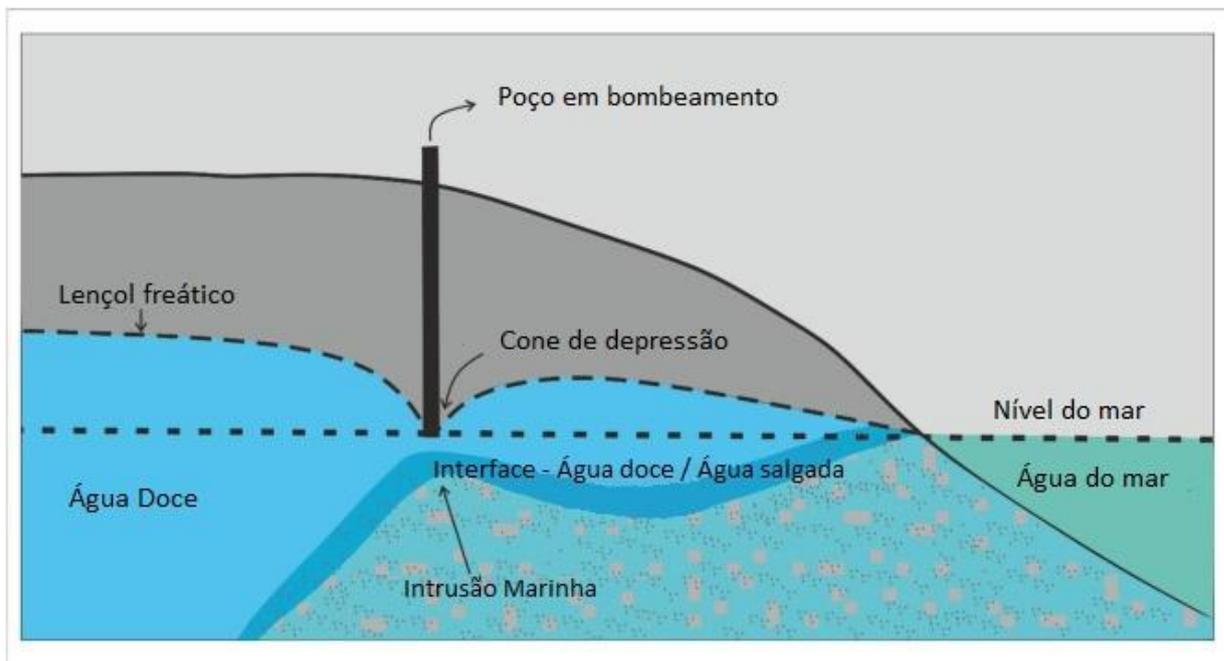
O método GALDIT aplicado por Castro (2019) foi direcionado à franja costeira de São Luís. Após gerar a carta de vulnerabilidade, notou-se que as áreas com maior densidade de poços e mais próximos à linha de costa apresentaram média e elevada vulnerabilidade à intrusão salina, devido à proximidade ao mar e elevada exploração de água dos poços tubulares. Nas áreas mais internas da cidade, a intrusão da água marinha é conduzida através dos movimentos de maré para o interior da cidade por meio das calhas de rios e córregos (CASTRO, 2019).

Nesta pesquisa foi desenvolvida a aplicação do método GALDIT na bacia hidrográfica do rio Tibiri, área majoritariamente rural, mas que abrange, também, o Distrito Industrial da cidade de São Luís, onde diversas empresas utilizam poços tubulares para atender suas demandas hídricas.

3.4 O Fenômeno da Cunha Salina

A salinização de aquíferos em zonas costeiras apresenta uma tendência crescente à medida que mais pessoas habitam essas áreas, aumentando conseqüentemente a demanda hídrica populacional e o bombeamento de água dos aquíferos costeiros; entretanto, a exploração desenfreada da água subterrânea pode acarretar no avanço da cunha salina, o que nos atenta à importância do devido gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000). Antes de ser iniciado o bombeamento da água de um poço, a cunha salina é mantida em equilíbrio, porém, o seu avanço ocorre quando o bombeamento da água subterrânea provoca uma diferença de gradientes hidráulicos que permite a entrada da água marinha em direção ao continente misturando-se com as águas doces subterrâneas na chamada zona de mescla (CRUZ *et al.*, 2003). A figura 30 retrata como se dá o fenômeno da cunha salina.

Figura 30 - Esquema da intrusão salina em um aquífero costeiro.



Fonte: Adaptado de Prusty e Farooq, (2020).

3.5 Dados Hidrodinâmicos

No campo da hidrologia subterrânea, a caracterização hidrodinâmica dos aquíferos é uma das informações primordiais para estudos de vulnerabilidade de aquíferos. O teste de bombeamento de poço tubular é uma técnica que possibilita a obtenção de parâmetros hidráulicos do poço e permite, também, avaliar o quanto de água é possível extrair do aquífero. Dentre os parâmetros hidrodinâmicos determinados através do teste de bombeamento, temos:

- Vazão: É a medida do volume de água por unidade de tempo extraída do poço através de um equipamento de bombeamento.
- Nível Estático: É a profundidade do nível da água em relação à superfície do terreno quando o poço não está em bombeamento, medido em metro.
- Nível Dinâmico: É a profundidade do nível da água em relação à superfície do terreno quando o poço está em bombeamento, medido em metro.
- Rebaixamento: Corresponde à diferença entre o nível estático e o nível dinâmico, ou seja, o quanto o nível da água rebaixou dentro do poço, durante o bombeamento.

- Profundidade: Extensão em que houve a perfuração de uma rocha até atingir o aquífero fornecedor de água subterrânea, medido em metro.

A área da dinâmica dos fluidos e hidrogeologia traz o conceito de permeabilidade como a capacidade de um corpo em permitir o escoamento de água através dos seus poros em maior ou menor grau. No caso dos solos, é possível determinar a permeabilidade verificando a velocidade de percolação da água em uma determinada amostra.

Para verificar o movimento da água no solo, em 1856, o engenheiro Henry Darcy trabalhou com colunas de areia saturada com água e observou que a vazão era proporcional à diferença de pressão ao longo do fluxo (Δh), à área da seção do conduto (A) e a uma constante característica do meio poroso e do fluido (K), além de inversamente proporcional ao comprimento do conduto (L), com base na seguinte formulação:

$$Q = k \times \frac{\Delta h}{L} \times A$$

Onde:

Q = vazão (m³/s)

k = coeficiente de permeabilidade do solo (m/s)

h = carga hidráulica dissipada na percolação (m)

L = distância na qual a carga é dissipada (m)

A = área transversal à amostra de solo (m²)

Pode-se reescrever a Lei de Darcy com a utilização do conceito de gradiente hidráulico ou perda de carga por espaço percorrido (i) da seguinte forma:

$$Q = k \times i \times A$$

Onde:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

A partir da equação de Darcy é possível o estudo de outros parâmetros correlacionados ao estudo de aquíferos: Condutividade Hidráulica (K), Transmissividade (T) e Coeficiente de Armazenamento (S), conforme exhibe as informações do Quadro 4.

Quadro 4 - Parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos.

Parâmetro	Descrição	Fórmula	Unidade
Condutividade Hidráulica (K)	<p>O valor da condutividade hidráulica dependerá das propriedades do fluido que escoar (viscosidade e massa específica) e das características intrínsecas do aquífero, como: porosidade, forma e arranjo, distribuição, tamanho das partículas.</p> <p>A condutividade hidráulica pode ser estimada a partir de softwares, fórmulas, métodos de laboratório ou ensaios de campo.</p>	$K = \frac{T}{b}$ <p>Onde: K: Condutividade Hidráulica; T: Transmissividade; b: Espessura do Aquífero</p>	É usualmente expressa em m/dia, m/min, m/s ou cm/s.
Transmissividade (T)	A Transmissividade é o parâmetro que indica a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente pela espessura saturada do aquífero.	$T = K \times b$ <p>Onde: T: Transmissividade; K: Condutividade Hidráulica; b: Espessura do Aquífero</p>	É expressa em m ² /s
Coefficiente de Armazenamento (S)	O coeficiente de armazenamento corresponde à capacidade do aquífero em armazenar e transmitir água.		Adimensional

Fonte: Adaptado Rodrigues *et al.* (1994)

De acordo com pesquisas de Struckmeier e Margat (1995) e Diniz *et al* (2012), a produtividade dos aquíferos é classificada de acordo com os dados de vazão, transmissividade e condutividade elétrica, conforme o Quadro 5.

Quadro 5 - Classes de produtividade dos aquíferos.

Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	Vazão (m ³ /h)	Produtividade
$\geq 4,0$	$\geq 10^{-2}$	$>10^{-4}$	≥ 100	Muito Alta: Fornecimento de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destacam em âmbito nacional.
$2,0 \leq Q/s < 4,0$	$10^{-3} < T < 10^{-2}$	$10^{-5} < K < 10^{-4}$	$50 \leq Q < 100$	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo, situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.
$1,0 \leq Q/s < 2,0$	$10^{-4} < T < 10^{-3}$	$10^{-6} \leq K < 10^{-5}$	$25 \leq Q < 50$	Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas.
$0,4 \leq Q/s < 1,0$	$10^{-5} < T < 10^{-4}$	$10^{-7} \leq K < 10^{-6}$	$10 \leq Q < 25$	Geralmente baixa porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.
$0,4 \leq Q/s < 0,4$	$10^{-6} < T < 10^{-5}$	$10^{-8} < K < 10^{-7}$	$1 \leq Q < 10$	Geralmente baixa, porém localmente muito baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.
$< 0,04$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-8}$	$< 1,0$	Pouco produtiva ou Não Aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais.

Fonte: Diniz *et al* (2012).

3.6 Método de interpolação

Existem diversos métodos de interpolação disponíveis, que se diferenciam pela forma em que os pesos amostrais são atribuídos. Na interpolação linear simples, os pesos das amostras são todos iguais a $1/N$ (N = número de amostras); na interpolação IDW – *Inverse Distance Weighting*, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. No método Krigagem, a interpolação assemelha-se à por média móvel ponderada, oferecendo estimativas não tendenciosas e com variância mínima.

Na krigagem existe uma relação de dependência espacial entre as amostras adjacentes expressa em um semivariograma capaz de estimar valores em qualquer localização dentro da área de estudo, sem gerar tendência além de apresentar variância mínima (LOURENÇO; LANDIM, 2004). Dentre esses métodos, existem a krigagem ordinária e universal.

Na krigagem ordinária é considerada uma média constante (LOURENÇO; LANDIM, 2004), enquanto na Krigagem Universal é aplicada em casos de regionalização com dados amostrais não estacionários e apresentam uma tendência (OLIVEIRA; GREGO, BRANDÃO, 2015). Nesta pesquisa, a etapa de interpolação de dados para obtenção do índice de vulnerabilidade através do método GALDIT, empregou a Krigagem Universal.

4 CAPÍTULO. ETAPAS DE TRABALHO

4.1 Levantamento bibliográfico

O levantamento bibliográfico teve como base a consulta a artigos científicos, monografias, dissertações, teses e periódicos *online*, fontes oficiais como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos – IMESC, Laboratório de Estudos de Bacias – LEBAC/UFMA, além das informações levantadas em campo, fornecidas pela Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão - CAEMA e a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais – SEMA- MA.

4.2 Reconhecimento de campo

Nesta etapa foi realizado o reconhecimento da área de estudo com a análise das características de ocupação do solo, ocorrência e tipologia da cobertura vegetal, levantamento e georreferenciamento de poços tubulares em campo, conforme apresentado nas Figuras 31 a 34. Posteriormente, as atividades em campo consistiram na escolha de pontos bem distribuídos para a coleta de amostras de água subterrânea, a fim de analisar os parâmetros físico-químicos que indiquem o nível de salinização das águas subterrâneas com base nos teores de cloreto e bicarbonato.

As informações de campo foram registradas através fotografias, anotações e por dados georreferenciados com o uso de aparelho GPS (*Global Positioning System*).

Figura 31 - Poço da CAEMA mapeado no bairro Santa Helena, área rural de São Luís - MA.



Fonte: Registro da pesquisa, 2021.

Figura 32 - Poço que atende o Residencial Ribeira, em São Luís - MA



Fonte: Registro da pesquisa, 2021.

Figura 33 - Poço localizado na Zona Residencial do bairro São Raimundo, em São Luís - MA.



Fonte: Registro da pesquisa, 2021.

Figura 34 - Poço da CAEMA localizado no bairro São Raimundo, em São Luís - MA.



Fonte: Registro da pesquisa, 2021.

4.3 Elaboração da base cartográfica

A base cartográfica está em elaboração com o auxílio de *softwares* SIG - Sistema de Informação Geográfica.

A delimitação da bacia hidrográfica do rio Tibiri foi realizada a partir das curvas de nível da carta Topodata 02S45. A base dos *shapefiles* utilizados foram obtidas através dos sites do IBGE (2019), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2011), Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2015) e do Zoneamento Ecológico-Econômico do Maranhão – ZEE-MA (IMESC, 2019).

4.4 Determinação dos dados hidrodinâmicos

Os estudos hidrogeológicos de poços tubulares apresentam os seus respectivos testes de bombeamento que foram utilizados para a interpretação dos dados hidrodinâmicos do aquífero com o auxílio do *software* *Aquifer Win32*.

Os dados hidrodinâmicos dos poços tubulares e amazonas são: nível estático, nível dinâmico, profundidade, condutividade hidráulica, transmissibilidade e armazenamento. Além dos dados obtidos através dos estudos hidrogeológicos, foram utilizadas as informações oriundas do levantamento em campo e referências bibliográficas consultadas.

4.5 Aplicação do método GALDIT

A investigação da vulnerabilidade de aquíferos costeiros apresenta circunstâncias muito específicas, devido à exposição dos aquíferos à influência marinha que pode ocorrer tanto horizontalmente por percolação da água marinha em direção ao aquífero quanto verticalmente, por meio das camadas superiores como manguezais e estuários que caracterizam por serem ambientes tipicamente salinizados (SOBRINHO *et al.*, 2015).

Dito isto, assume-se que o estudo de aquíferos costeiros requer uma metodologia adaptada, capaz de relacionar as características hidrogeológicas do aquífero com a distribuição espacial das explorações das águas subterrâneas em áreas próximas às áreas litorâneas.

Como alternativa a essa problemática, Chachadi e Lobo Ferreira (2001) apresentaram ao projeto EU-INDIA INCO-DEV COASTIN o índice GALDIT como proposta metodológica de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos costeiros indianos em relação à intrusão salina. Após isto, o método foi aplicado na região de Algarve, sul de Portugal, a fim de avaliar os impactos gerados com a subida do nível do mar como consequência das mudanças climáticas (CHACHADI; LOBO-FERREIRA, 2005).

Ainda que o método GALDIT tenha sido criado para atender as condições do litoral indiano, sua utilização é aplicável em outras regiões costeiras visto que os parâmetros do GALDIT são universais ao funcionamento de qualquer aquífero costeiro (TERCEIRO *et al.*, 2009).

O nome GALDIT é um acrônimo em língua inglesa formado pela inicial de cada um dos parâmetros que compõem o cálculo do seu índice (Tabela 3).

Tabela 3 - Parâmetros utilizados no GALDIT.

Parâmetro GALDIT	Valor de ponderação
G – <i>Groundwater Occurrence</i> (ocorrência de águas subterrâneas),	1
A – <i>Aquifer</i> (condutividade hidráulica do aquífero) (m/dia);	3
L – <i>Height of groundwater Level above sea level</i> (altura do nível do lençol freático acima do nível do mar) (m);	4
D – <i>Distance from the shore</i> (distância do ponto em relação à linha de costa);	4
I – <i>Impact of existing status of seawater intrusion</i> (estado atual da intrusão salina no aquífero);	1
T – <i>Thickness of aquifer being mapped</i> (espessura do aquífero mapeado).	2

Fonte: Chachadi e Ferreira (2001).

Após caracterizar cada parâmetro e atribuir o seu valor correspondente, aplica-se a fórmula abaixo para calcular o índice GALDIT:

$$GALDIT = \frac{(1 \times G + 3 \times A + 4 \times L + 4 \times D + 1 \times I + 2 \times T)}{15}$$

A partir do índice GALDIT calculado, tem-se a classificação de vulnerabilidade de acordo com a Tabela 4 abaixo:

Tabela 4- Classes de vulnerabilidade pelo método GALDIT.

CLASSE DE VULNERABILIDADE	ÍNDICE GALDIT
Vulnerabilidade elevada	> 7,5
Vulnerabilidade moderada	5 – 7,5
Vulnerabilidade baixa	< 5

Fonte: Chachadi e Ferreira (2001).

A caracterização dos parâmetros como profundidade, nível estático, nível dinâmico, condutividade hidráulica, entre outros, tem como base os estudos hidrogeológicos dos poços tubulares outorgados pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Naturais – SEMA, dados de poços georreferenciados ao longo das visitas de campo, informações obtidas pela CAEMA, além dos dados disponíveis no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS em uma plataforma *online* gerida pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

A avaliação qualitativa da água do aquífero fundamenta-se em análise laboratorial das amostras de água coletadas *in loco*. As análises das amostras de água permitem que seja estimada a salinidade da água captada em poços outorgados. Esta análise é feita com base na proporção de bicarbonato (HCO_3) e cloretos (Cl^-) presentes na água. Para Custódio e Llamas (1983), sem sofrer intrusão salina, a água subterrânea apresenta teores de cloretos inferiores a 100mg/L em formações costeiras.

Após aplicar o cálculo proposto pelo método GALDIT com o uso do modelo de interpolação Krigagem Universal através de programa SIG, torna-se possível realizar a classificação da área de estudo em categorias de vulnerabilidade à intrusão da água do mar, gerando o produto final deste trabalho.

Parâmetro G

A inicial do acrônimo GALDIT indica o parâmetro “*Groundwater Occurrence*” ou, em livre tradução, “ocorrência da água subterrânea”. A depender da forma em que a água subterrânea está disponível, o aquífero pode ser classificado como livre, semiconfinado, confinado ou limitado por uma ou mais fronteiras (recarga e/ou limite impermeável alinhado paralelamente à costa).

O aquífero do tipo **livre**, também denominado como freático ou não confinado, encontra-se na primeira camada porosa do perfil geológico, sem o confinamento por camadas

impermeáveis; esta disposição do aquífero resulta em uma superfície de saturação sob a pressão atmosférica (SILVA JÚNIOR, CAETANO, 2010). No método GALDIT, o aquífero livre apresenta um valor de índice igual a 7,5. Nos aquíferos confinados existem camadas limítrofes que fazem a pressão da água na superfície de saturação ser maior que a pressão atmosférica, por este motivo, também são chamados de aquíferos sob pressão.

Considerando a proteção natural do aquífero, os confinados apresentam a proteção de uma carga hidráulica superior à pressão atmosférica, o que a princípio proporciona vantagens em relação aos aquíferos livres, entretanto, no momento em que ocorre a exploração de água do aquífero confinado, a descarga instantânea de água e o cone de rebaixamento formado é maior, quando comparado aos demais aquíferos, por esta razão, o aquífero confinado classificado como o mais vulnerável na escala GALDIT (CHACHADI; LOBO-FERREIRA, 2005). Os poços perfurados nos aquíferos confinados não drenantes também são denominados poços jorrantes ou artesianos.

Os aquíferos do tipo semiconfinados apresentam pelo menos uma camada limítrofe semipermeável, o que permite a entrada ou a saída de fluxos dos aquíferos circundantes. Além disso, a carga hidráulica dos aquíferos semiconfinados é superior à carga de um aquífero livre; essas características os tornam menos suscetíveis à intrusão salina quando comparados aos aquíferos livres ou confinados, por isso, recebem um valor de índice igual a 5 no método GALDIT (CHACHADI; LOBO-FERREIRA, 2005).

Por fim, considerando o parâmetro “G”, temos os aquíferos limitados como os mais protegidos da intrusão marinha uma vez que estes se encontram separados do mar por uma barreira impermeável (NOVO; 2007). Caso a área de estudo seja um sistema múltiplo de aquífero, ou seja, apresente mais de um tipo de aquífero, então, o índice de maior valor deve ser aplicado para o cálculo de vulnerabilidade pelo método GALDIT (CHACHADI; LOBO-FERREIRA, 2005).

Nesta pesquisa, o tipo do aquífero foi identificado a partir do teste de bombeamento e perfil litológico do poço com auxílio do software *AquiferWin32*.

Na Tabela 5 abaixo, são apresentados os pesos atribuídos a cada classe do aquífero segundo o método GALDIT.

Tabela 5- Parâmetro G - Ocorrência do Aquífero

G – Ocorrência do Aquífero	Valor do índice
Aquífero Confinado	10
Aquífero Livre	7,5
Aquífero Semiconfinado	5
Aquífero Limitado	2,5

Fonte: Chachadi e Ferreira (2001).

Parâmetro A

Aquifer Hydraulic Conductivity (Condutividade Hidráulica do Aquífero)

A condutividade hidráulica pode ser estimada a partir de softwares, fórmulas, métodos de laboratório ou ensaios de campo, nesta pesquisa, para simular o comportamento do nível da água durante os testes de bombeamento foi utilizado o software *Aquifer Win32* (*Environmental Simulations, Inc., 2003*). Os valores das propriedades hidrogeológicas do modelo foram obtidos dos resultados dos testes de bombeamento contidos nos estudos hidrogeológicos dos poços e distribuídos pelas camadas do modelo.

Modelo utilizado para a curva base do aquífero foi proposto por Theis (1963). Para obter os dados de Transmissividade e Capacidade de Armazenamento é necessário, além do teste de bombeamento, alguns dados construtivos do poço, tais como:

1. Vazão de bombeamento (*Pumping Rate*);
2. Diâmetro de perfuração (*Diameter of Drilled Hole*);
3. Diâmetro de revestimento (*Casing Inner Diameter*),
4. Comprimento dos filtros (*Screen Length*),
5. Profundidade do primeiro filtro (*Screen Top Depth*)
6. Distância radial do poço piezométrico (*Radial Distance*).

Estes dados devem ser preenchidos na seção de informações do teste de aquífero e a distância radial do poço piezométrico não deve ser igual a zero, conforme demonstrado na Figura 35.

Figura 35 - Tela do programa AquiferWin onde as informações do teste de bombeamento são preenchidas

The screenshot shows the 'Aquifer Test Information' dialog box with the 'Pumping' tab selected. The 'Pumping Well' section includes: Well Name (P2), Pumping Rate (20), Casing Inner Diameter (0.203), Diameter of Drilled Hole (0.457), Screen Length (34), and Screen Top Depth (36). The 'Monitoring Well' section includes: Well Name (P2), Radial Distance (0.203), Casing Inner Diameter (0.203), Diameter of Drilled Hole (0.457), Screen Length (34), and Screen Top Depth (6). A 'Variable Pumping Rate' checkbox is present but unchecked. Buttons for 'OK', 'Cancelar', 'Aplicar', and 'Ajuda' are at the bottom.

Devido à reduzida disponibilidade de dados completos, o número de poços utilizados na simulação do *software* foi limitado a 07 poços. Neste estudo foram analisados 07 (sete) poços tubulares, os quais dispunham de informações referentes aos dados construtivos e teste de bombeamento, gerando assim os resultados expostos nas Figuras 37 a 43 e Tabelas 11 a 18.

Na Tabela 6, são apresentados os pesos atribuídos no método GALDIT a cada classe do aquífero segundo a sua condutividade hidráulica.

Tabela 6: Parâmetro A – Condutividade Hidráulica do Aquífero

A – Condutividade Hidráulica (m/dia)	Valor do índice
Elevada > 40	10
Média 10 - 40	7,5
Baixa 5 - 10	5
Muito Baixa < 5	2,5

Fonte: Chachadi e Ferreira (2001).

Parâmetro L

Height of Groundwater Level above Sea Level (Nível Piezométrico)

O nível piezométrico se refere ao nível de água subterrânea medida em relação ao nível do mar. É um parâmetro importante, uma vez que permite determinar a carga hidráulica que faz recuar o avanço da cunha salina. O nível piezométrico corresponde à diferença entre o nível altimétrico e o nível estático do poço.

Na Tabela 7, são apresentados os pesos atribuídos no método GALDIT a cada classe do aquífero segundo o nível piezométrico.

Tabela 7: Parâmetro L – Nível Piezométrico

L – Nível Piezométrico (m)	Valor do índice
Elevado < 1	10
Média 1-1,5	7,5
Baixa 1,5 - 2	5
Muito Baixa > 2	2,5

Fonte: Chachadi e Ferreira (2001).

Parâmetro D

Distance from the Shore (Distância da Linha de Costa)

A distância da linha de costa se refere à distância em metros, em linha reta, do poço tubular em relação ao nível do mar. É um parâmetro que permite determinar e avaliar a maior ou menor influência da maré em relação aos poços tubulares estudados (Tabela 8).

Tabela 8: Parâmetro D – Distância à linha da costa

D – Distância da linha de costa (m)	Valor do índice
Muito perto < 500	10
Perto 500 - 750	7,5
Meia distância 750 - 1000	5
Longe > 1000	2,5

Fonte: Chachadi e Ferreira (2001).

Parâmetro I

Impact of existing status of seawater intrusion in the area (Impacto do estado atual da intrusão marinha).

O parâmetro mais utilizado para qualificar a água de abastecimento quanto à salinização é o índice de cloretos. A Portaria de Consolidação GM/MS nº 888 do Ministério da Saúde de 04 de maio de 2021, a qual dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, estabelece como padrão de aceitação para consumo o valor máximo de 250 mg/L de cloreto na água potável (BRASIL, 2021).

Para Custódio e Llamas (1983) a água subterrânea, sem sofrer intrusão salina, possui teores de cloretos inferiores a 100 mg/L em formações costeiras. Segundo Custódio (1987), um percentual de 3% de água do mar em água doce já restringe seu uso e um percentual de 5% torna a água inutilizável, salvo quando há tratamentos de dessalinização, que são de alto custo.

Além do índice de Cloretos, outros índices são considerados pela comunidade científica para a identificação de contaminação pela água do mar, alguns deles são: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , K^+ , Condutividade Elétrica e Sólidos Totais Dissolvidos, assim como também algumas razões iônicas.

Cloreto (Cl⁻)

O cloreto, ânion Cl^- , é encontrado naturalmente nas águas subterrâneas devido à percolação da água através de solos e rochas. Em geral, efluentes industriais apresentam altos níveis de cloretos, como a indústria do petróleo, algumas indústrias farmacêuticas, curtumes e etc. A intrusão da cunha salina em áreas costeiras, também, provoca altas concentrações de cloreto; no entanto, apenas apresenta risco ao ser humano em caso de deficiência no metabolismo do cloreto de sódio, que é o caso da insuficiência cardíaca congestiva (CETESB, 2015).

As águas subterrâneas, em geral, apresentam teores de cloretos inferiores a 100 mg/L, porém as águas dos mares apresentam teores entre 18.000 e 21.000 mg/L (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983).

O cloreto causa prejuízos em estruturas hidráulicas, assim como também interfere na determinação de DQO (Demanda Química de Oxigênio) e nitratos, além de influenciar nas

características dos ecossistemas aquáticos naturais, pois provocam alterações na pressão osmótica nas células dos microrganismos (CETESB, 2015).

Razão entre Cloreto e Bicarbonato

Esta razão é muito útil na caracterização da intrusão salina. As águas continentais possuem valores aproximadamente entre 0,1 e 5, porém na água do mar os valores variam entre 20 e 50. Caso o aumento de cloretos seja causado pela concentração de sais nas zonas de recarga, o valor desta razão cresce muito menos para igual aumento de cloretos quando ocorre uma intrusão marinha (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983; HEM, 1985).

Na Tabela 9, são apresentados os pesos atribuídos no método GALDIT a cada classe do aquífero segundo o impacto da intrusão marinha observado a partir dos laudos de análises d'água.

Tabela 9- Parâmetro I – Impacto da intrusão marinha

I – Impacto do estado atual da intrusão marinha	Valor do índice
Alta > 2	10
Média 1,5 - 2	7,5
Baixa 1 – 1,5	5
Muito Baixa < 1	2,5

Fonte: Chachadi e Ferreira (2001).

Parâmetro T

Thickness of the aquifer, which is being mapped (Espessura do aquífero).

As características litológicas e espessura dos aquíferos Barreiras e Itapecuru foram analisadas a partir dos dados de perfis litológicos e profundidade dos poços.

Na Tabela 10, são apresentados os pesos atribuídos no método GALDIT a cada classe do aquífero segundo a sua espessura.

Tabela 10- Parâmetro T – Espessura do Aquífero.

T – Espessura do Aquífero (m)	Valor do índice
Grande > 10	10
Média 7,5 - 10	7,5
Pequena 5 – 7,5	5
Muito Pequena < 5	2,5

Fonte: Chachadi e Ferreira (2001).

5 CAPÍTULO. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Distribuição dos poços tubulares e cacimba na área de estudo

As informações sobre os poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências em um raio de 2 (dois) quilômetros foram obtidas a partir da base de dados da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Naturais – SEMA, do sistema Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS da CPRM e a partir de visitas de campo.

Com base no georreferenciamento dos poços tubulares e nas informações dos dados hidrodinâmicos foram identificados, ao todo, 92 (noventa e dois) poços dentro da área de interesse, porém, nem todos os poços dispunham de dados suficientes para o uso nesta pesquisa, sendo realizado apenas o georreferenciamento.

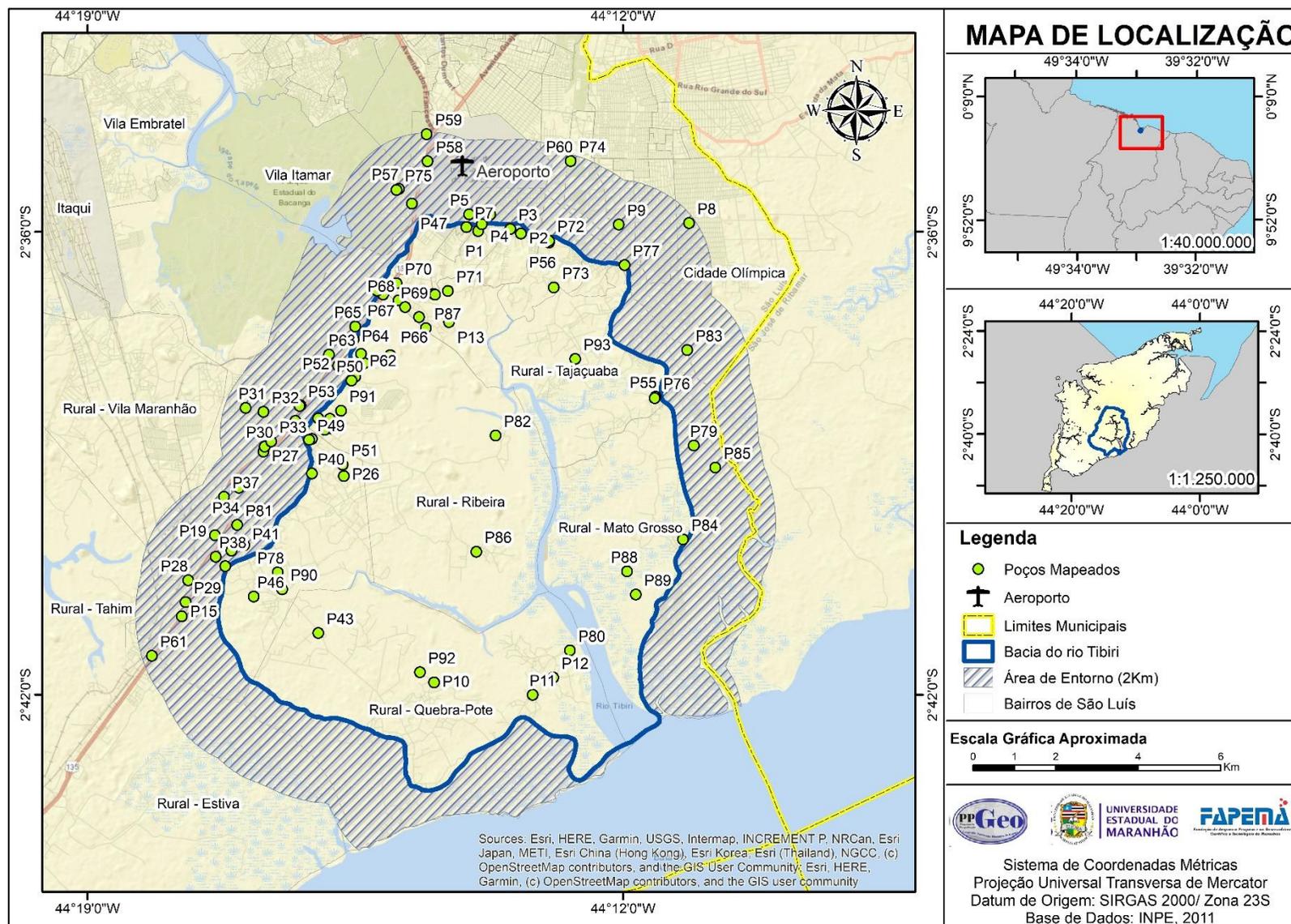
A SEMA concedeu estudos hidrogeológicos de 23 (vinte e três) poços que foram utilizados nesta pesquisa. Em relação ao banco de dados SIAGAS coordenado pela CPRM, foram identificados 41 (quarenta e um) poços tubulares na área de estudo.

Foi realizado, também, um levantamento dos registros documentais de poços administrados pela CAEMA contabilizando, ao todo, 18 (dezoito) poços tubulares dentro da área de estudo; posteriormente, foi realizada a visita em campo a fim de obter as coordenadas geográficas desses poços e a amostra de água para alguns desses poços.

Após visita em campo, foram mapeados, ainda, 10 (dez) poços tubulares que foram utilizados na geração de dados para a pesquisa.

Somando o levantamento de poços tubulares realizado com base em fontes da SEMA, CAEMA, CPRM e visitas de campo na área de estudo. Durante a pesquisa, foi realizado o levantamento de 92 (noventa e dois) poços tubulares georreferenciados (Figura 36). Destaca-se que nem todos os poços georreferenciados dispõem de dados hidrodinâmicos e perfil litológico.

Figura 36 - Localização dos poços identificados na área da Bacia do rio Tibiri, São Luís – MA.



Devido à maior disponibilidade de dados concedidos pela SEMA, nota-se um adensamento de poços tubulares mapeados na porção oeste da bacia, coincidindo com a localização de empresas do Distrito Industrial.

Além da localização geográfica dos poços tubulares, foram catalogadas o máximo de informações hidrogeológicas disponíveis, conforme a metodologia proposta, entretanto, nem todos os poços identificados dispõem de todos os dados hidrodinâmicos necessários, tais como: Profundidade (Prof.), Nível Estático (N.E.), Nível Dinâmico (N.D.), Vazão (m^3/h). As informações de Cota Altimétrica (Alt.), necessárias para a determinação do Nível Piezométrico (L), foram obtidas com base nos dados de altimetria da carta Topodata 02S45.

5.2 Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos através do programa *Aquifer Win 32*

Os dados de vazão de bombeamento, tempo, nível dinâmico e características dos poços tubulares são inseridos como dados de entrada no programa que permitem a análise dos testes de bombeamento para cada poço. Os parâmetros primários incluem dados como o comprimento do filtro, profundidade ao topo do filtro, espessura do aquífero, diâmetro de perfuração, diâmetro de revestimento.

O programa *Aquifer Win32*® se difere da maioria dos outros programas destinados à verificação da resposta do poço ao teste de bombeamento, uma vez que exibe múltiplos tipos de curvas tanto para comparações realizadas de forma manual ou automáticas. Foram analisados 7 (sete) testes de bombeamento de poços tubulares para análise dos parâmetros hidrodinâmicos (Figuras 37 a 43 e Tabelas 11 a 18). A pesquisa limitou-se a aplicar o programa *AquiferWin32*® apenas para os poços que dispunham das informações de teste de bombeamento e os parâmetros primários necessários como dados de entrada no programa.

Segue abaixo a relação dos parâmetros hidráulicos obtidos com o auxílio do programa *Aquifer Win 32*®. O valor da condutividade hidráulica é obtido aplicando a equação apresentada no Quadro 4.

Figura 37 - Curva base do poço tubular P-48, porção noroeste da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

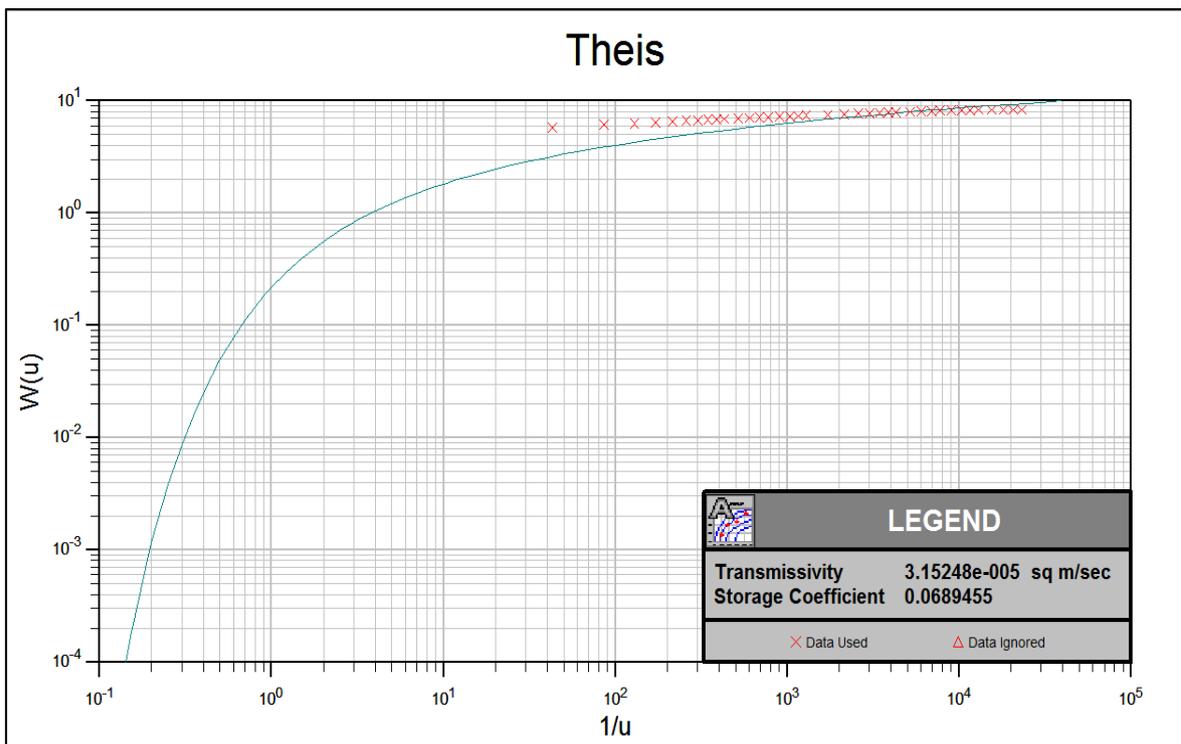


Tabela 11- Parâmetros hidráulicos do Poço P48 da porção do curso superior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

Parâmetro Hidráulico	Valor
Transmissividade (T) em m²/s	3,1524 x 10 ⁻⁵
Transmissividade (T) em m²/dia	2,723
Condutividade Hidráulica (K) em m/s	5,2541 x 10 ⁻⁷
Condutividade Hidráulica (K) em m/dia	0,04539
Coefficiente de Armazenamento (S)	0,06894
Espessura do Aquífero (b) em m	60
Vazão (m³/h)	5
Vazão específica (m³/h/m)	0,476

Fonte: Dados da Pesquisa (2021).

Considerando o Quadro 5 que apresenta as classes de produtividade dos aquíferos, o poço P-48 apresentou produtividade entre **geralmente baixa, porém localmente moderada** (fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado) e **Geralmente baixa, porém localmente muito baixa.**

O perfil litológico é intercalado entre arenito síltico argiloso acinzentado, argilito silteoso amarronzado, argilito silteoso cinza, arenito muito fino, síltico acinzentado e argilito marrom.

Figura 38 - Curva base do poço tubular P-38, porção noroeste da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

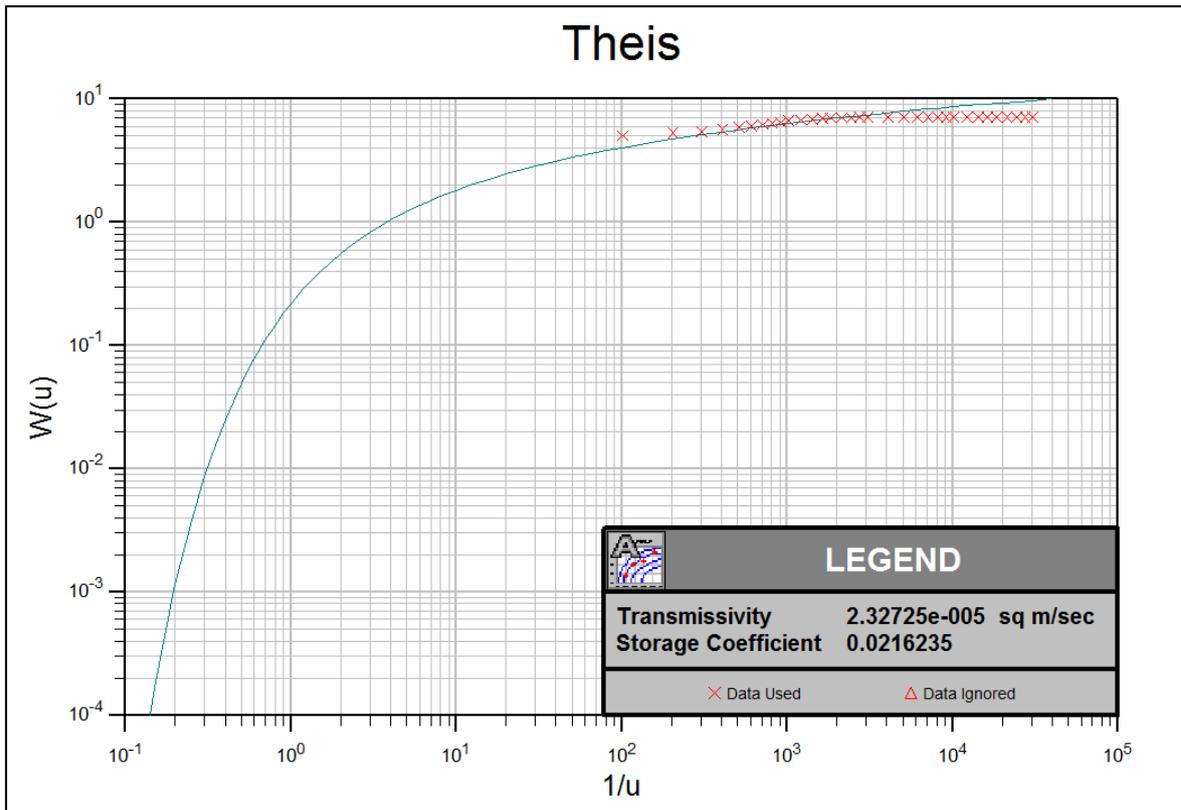


Tabela 12- Parâmetros Hidráulicos do poço P-38 da porção do curso superior da bacia do rio Tibiri, São Luís – MA.

Parâmetro Hidráulico	Valor
Transmissividade (T) em m ² /s	2,3272 x 10 ⁻⁵
Transmissividade (T) em m ² /dia	2,0107
Condutividade Hidráulica (K) em m/s	4,0125 x 10 ⁻⁷
Condutividade Hidráulica (K) em m/dia	0,03466
Coefficiente de Armazenamento (S)	0,0216235
Espessura do Aquífero (b) em m	58
Vazão (m ³ /h)	5,4
Vazão específica (m ³ /h/m)	0,45

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

Considerando os parâmetros hidráulicos transmissividade e condutividade hidráulica do poço P-38, a produtividade pode ser classificada como **geralmente baixa, porém localmente moderada** (fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo

privado). Segundo os parâmetros de vazão e vazão específica, o poço teve produtividade **geralmente baixa, porém localmente muito baixa.**

O perfil litológico é intercalado entre arenito fino esbranquiçado, arenito fino de coloração creme esbranquiçado, arenito fino/médio, creme amarronzado.

Figura 39 - Curva base do poço tubular P-37, na porção noroeste da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

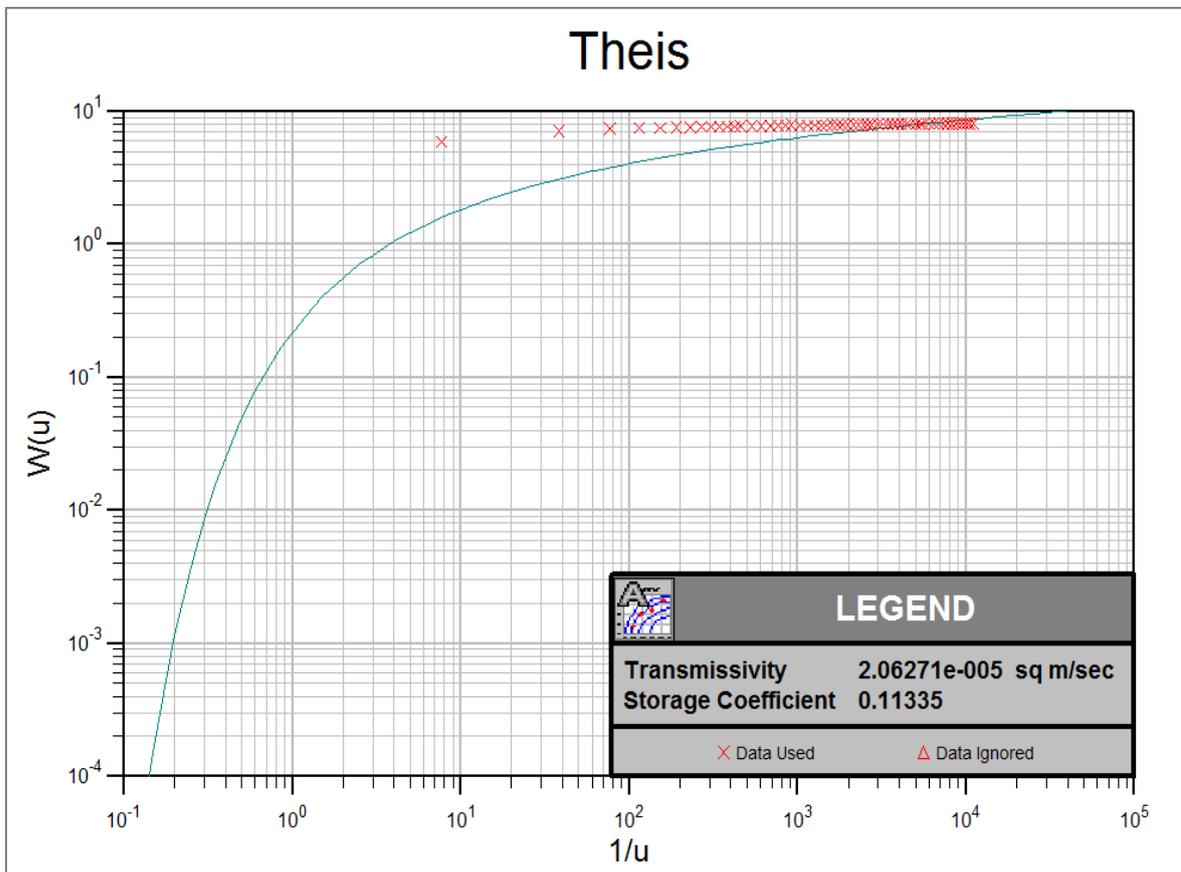


Tabela 13- Parâmetros Hidráulicos do poço P-37 da porção do curso superior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

Parâmetro Hidráulico	Valor
Transmissividade (T) em m²/s	2,06271 x 10 ⁻⁵
Transmissividade (T) em m²/dia	1,782173
Condutividade Hidráulica (K) em m/s	4,48413 x 10 ⁻⁷
Condutividade Hidráulica (K) em m/dia	0,038743
Coefficiente de Armazenamento (S)	0,11335
Espessura do Aquífero (b) em metros	46
Vazão (m³/h)	4,8
Vazão específica (m³/h/m)	0,435

Fonte: Dados da Pesquisa (2021).

Os parâmetros hidráulicos transmissividade, condutividade hidráulica e vazão específica observados permitiram classificar a produtividade do poço como **geralmente baixa, porém localmente moderada** (fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado).

O perfil litológico é intercalado entre arenito de granulação média pouco consolidado, com finas lentes de siltito de cor amarela amarronzada; arenito de granulação grossa e cor amarela; siltito pouco arenoso com textura rugosa de cores cinza e esbranquiçada; siltito arenoso subanguloso de cor marrom; arenito médio a grosso, pouco consolidado, friável de cor esbranquiçada; argilito siltoso de textura rugosa e cor esverdeada.

Figura 40 - Curva base do poço tubular P-42, na porção noroeste da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

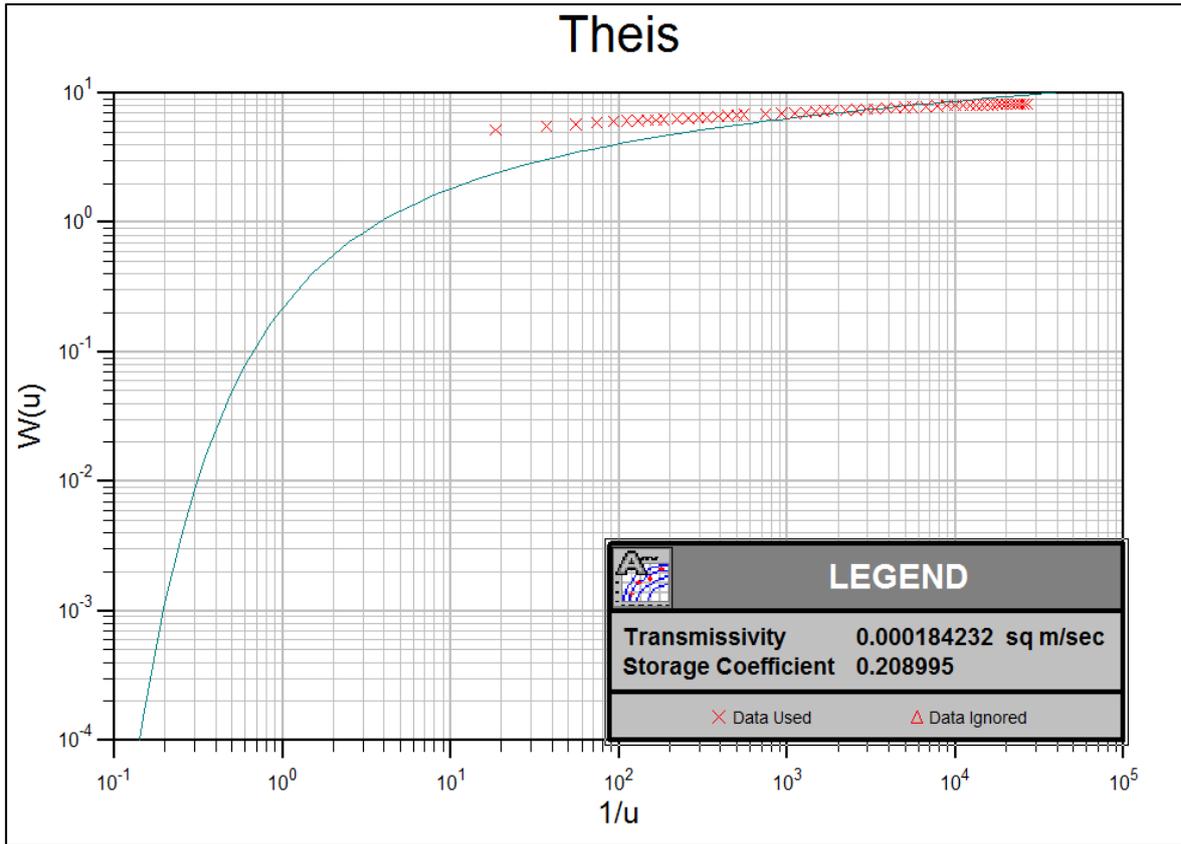


Tabela 14: Parâmetros Hidráulicos do poço P-42 da porção do curso superior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

Parâmetro Hidráulico	Valor
Transmissividade (T) em m^2/s	$1,84232 \times 10^{-4}$
Transmissividade (T) em m^2/dia	15,91764
Condutividade Hidráulica (K) em m/s	$4,48413 \times 10^{-7}$
Condutividade Hidráulica (K) em m/dia	0,1326
Coefficiente de Armazenamento (S)	0,208995
Espessura do Aquífero (b) em metros	46
Vazão (m^3/h)	120
Vazão específica ($m^3/h/m$)	1,7655

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

Os parâmetros hidráulicos do poço P-42 indicaram uma classe de produtividade Moderada (fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas).

O perfil litológico é intercalado entre arenito fino/médio; arenito argiloso de coloração creme amarronzada; argila plástica compacta, arenito fino médio friável, arenito siltico, pouco argiloso, argila plástica pouco arenosa, argilito pouco arenoso.

Figura 41 - Curva base do poço tubular P-63, na porção noroeste da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

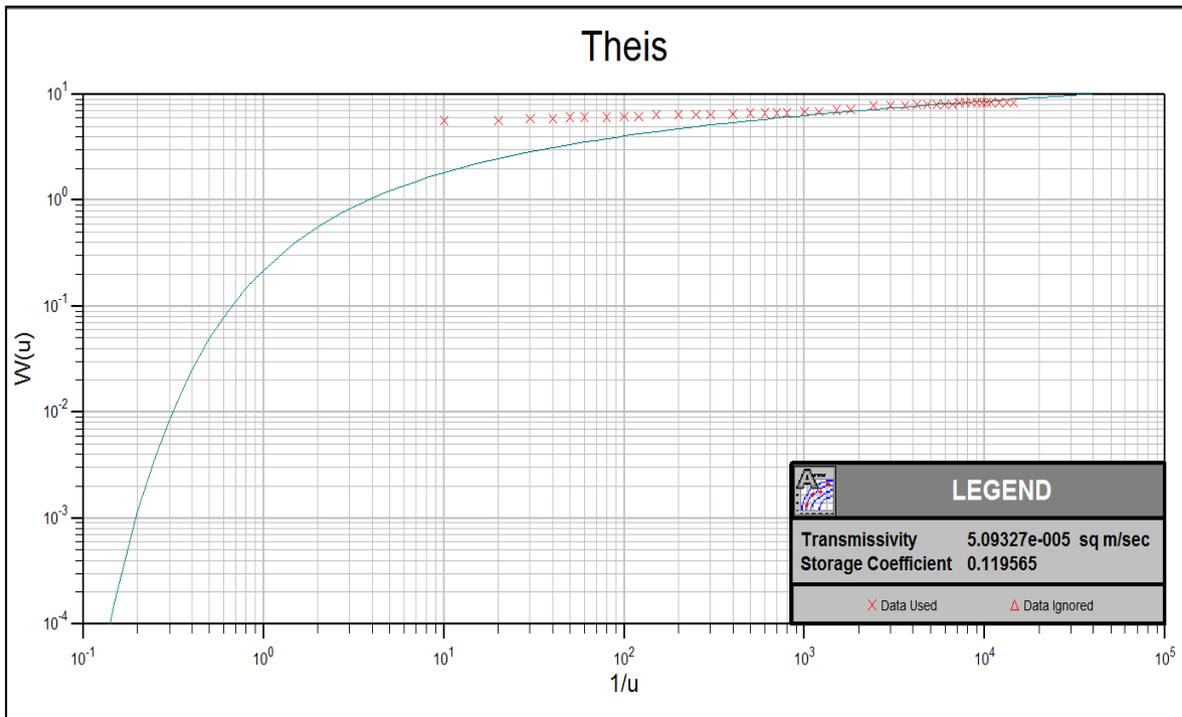


Tabela 15: Parâmetros Hidráulicos do poço P-63 da porção do curso superior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

Parâmetro Hidráulico	Valor
Transmissividade (T) em m ² /s	5,0932 x 10 ⁻⁵
Transmissividade (T) em m ² /dia	4,400585
Condutividade Hidráulica (K) em m/s	6,3665 x 10 ⁻⁷
Condutividade Hidráulica (K) em m/dia	0,055007
Coefficiente de Armazenamento (S)	0,119565
Espessura do Aquífero (b) em m	80

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

Os parâmetros hidráulicos de transmissividade e condutividade hidráulica do poço P-63 indicaram uma classe de produtividade geralmente baixa, porém localmente moderada (fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado).

O perfil litológico é intercalado entre arenito argiloso micáceo; arenito fino com argila compacta; argila amarela consolidada com lentes caulínicas, arenito fino amarelado, argila compacta caulinizada, arenito médio esbranquiçado e argila compacta ferruginosa.

Figura 42 - Curva base do poço tubular P-31, na porção inferior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

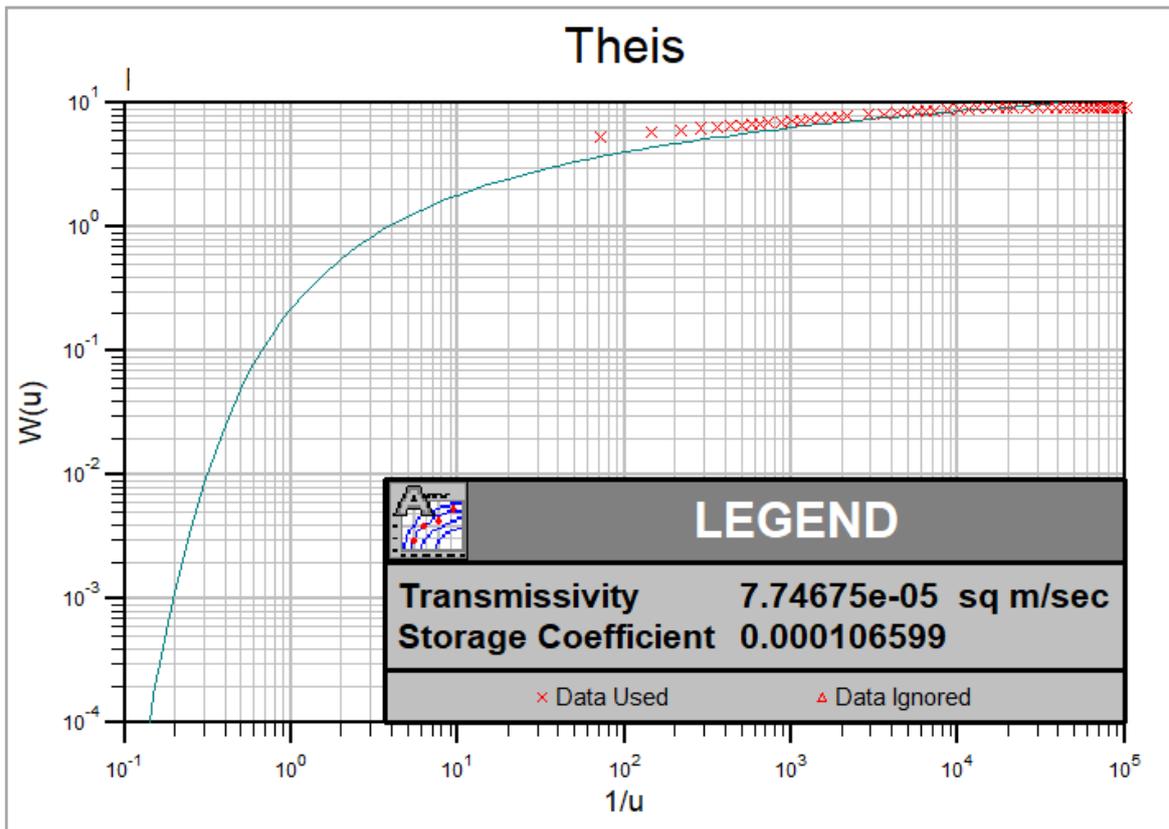


Tabela 16: Parâmetros Hidráulicos do poço P-31 da porção do curso inferior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

Parâmetro Hidráulico	Valor
Transmissividade (T) em m²/s	7,74675 x 10 ⁻⁵
Transmissividade (T) em m²/dia	6,693192
Condutividade Hidráulica (K) em m/s	5,3797 x 10 ⁻⁷
Condutividade Hidráulica (K) em m/dia	0,046481
Coefficiente de Armazenamento (S)	1,065 x 10 ⁻⁴
Espessura do Aquífero (b) em m	144

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

Os parâmetros hidráulicos de transmissividade e condutividade hidráulica do poço P-31 indicaram uma classe de produtividade geralmente baixa, porém localmente moderada (fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado).

O perfil litológico é intercalado entre arenito muito fino, síltico, marrom-avermelhado; argilite marrom, arenito síltico-argiloso acinzentado; argilite cinza-escuro, argilite siltoso cinza e argilite cinza.

Figura 43 - Curva base do poço tubular P-29, na porção inferior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

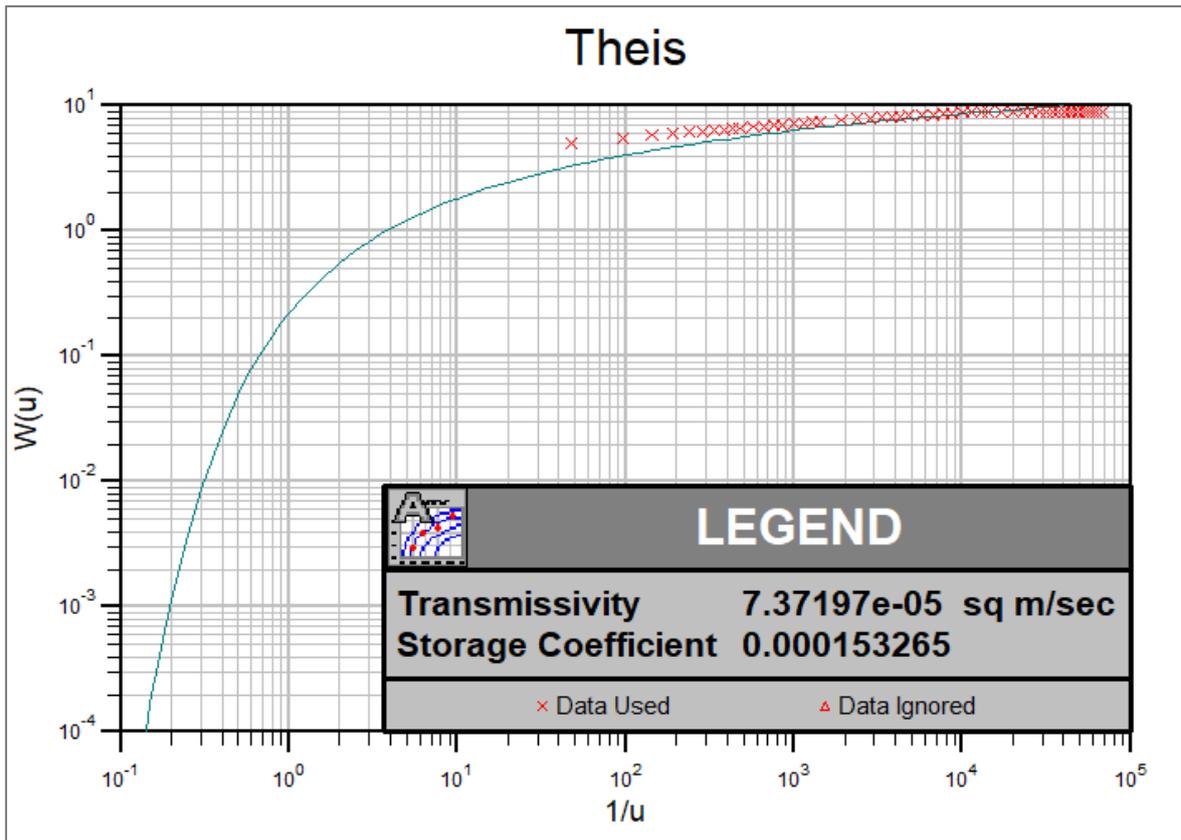


Tabela 17- Parâmetros Hidráulicos do poço P-29 da porção inferior da bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

Parâmetro Hidráulico	Valor
Transmissividade (T) em m²/s	7,37197 x 10 ⁻⁵
Transmissividade (T) em m²/dia	6,36938208
Condutividade Hidráulica (K) em m/s	6,14331 x 10 ⁻⁷
Condutividade Hidráulica (K) em m/dia	0,05307
Coefficiente de Armazenamento (S)	1,53 x 10 ⁻⁴
Espessura do Aquífero (b) em m	120

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

Os parâmetros hidráulicos de transmissividade e condutividade hidráulica do poço P-29 indicaram uma classe de produtividade geralmente baixa, porém localmente moderada (fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado).

O perfil litológico é intercalado entre arenito muito fino/fino, síltico, marrom-avermelhado; argilito marrom, arenito muito fino, síltico-argiloso acinzentado; arenito muito

fino/fino, cinza; argilito cinza-escuro; arenito muito fino, siltico-argiloso cinza; argilito siltooso cinza e argilito cinza.

A Tabela 18 exibe um resumo dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos a partir do programa *AquiferWin32* que em geral indicaram uma classe de produtividade geralmente baixa a moderada, porém localmente moderada (fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou privado).

Tabela 18 - Parâmetros Hidrodinâmicos dos poços tubulares da bacia do rio Tibiri, São Luís – MA, apresentados nas Figuras 37 a 43.

Poço	T ⁽¹⁾ (m ² /s)	T ⁽¹⁾ (m ² /dia)	K ⁽²⁾ (m/s)	K ⁽²⁾ (m/dia)	S ⁽³⁾	B ⁽⁴⁾ (m)
P-48	3,1524 x 10 ⁻⁵	2,723	5,2541 x 10 ⁻⁷	0,0454	0,0689	60
P-38	2,3272 x 10 ⁻⁵	2,011	4,0125 x 10 ⁻⁷	0,0347	0,0216	58
P-37	2,06271 x 10 ⁻⁵	1,782	4,48413 x 10 ⁻⁷	0,0387	0,1134	46
P-42	1,84232 x 10 ⁻⁴	15,918	4,48413 x 10 ⁻⁷	0,1326	0,2090	46
P-63	5,0932 x 10 ⁻⁵	4,401	6,3665 x 10 ⁻⁷	0,0550	0,1196	80
P-31	7,7467 x 10 ⁻⁵	6,693	5,3797 x 10 ⁻⁷	0,0465	1,065 x 10 ⁻⁴	144
P-29	7,3719 x 10 ⁻⁵	6,369	6,14331 x 10 ⁻⁷	0,0531	1,53 x 10 ⁻⁴	120

⁽¹⁾ Transmissividade. ⁽²⁾ Condutividade Hidráulica. ⁽³⁾ Coeficiente de Armazenamento. ⁽⁴⁾ Espessura do Aquífero.

Fonte: Dados da Pesquisa (2021).

5.2.1 Perfis Litológicos da Área de Estudo

Os aquíferos Barreiras e Itapecuru foram analisados com base nos perfis litológicos disponíveis de poços identificados na área da bacia do rio Tibiri e adjacências em um raio de 2 Km. Ressalta-se que nem todos os poços identificados na área de estudo dispunham de dados litoestratigráficos referentes aos seus respectivos perfis.

Foram traçadas 5 (cinco) seções transversais na área de estudo a fim de avaliar e caracterizar o perfil litológico dos poços tubulares encontrados em cada seção transversal e a ocorrência dos aquíferos Barreiras e Itapecuru (Figura 44). As 5 (cinco) seções traçadas interceptaram, ao todo, 23 (vinte e três) poços tubulares.

O aquífero Barreiras, na bacia do rio Tibiri, é representado por arenitos finos, de coloração rósea, creme e amarelada, friável, bem selecionados intercalando com arenitos médio a grosso, seleção regular, quartzosos de cor creme/amarelado, avermelhado e cinza.

A maior espessura identificada do aquífero Barreiras foi a do poço tubular P-6, com 76 metros de espessura, localizados no Conjunto São Raimundo, nas imediações do tabuleiro do Tirirical diminuindo em direção à zona rural da Mata de Itapera. A espessura média do aquífero Barreiras foi de aproximadamente 50 metros (Figuras 45 – 49).

O aquífero Itapecuru, na bacia do rio Tibiri, apresenta arenitos finos a médios, intercalado com folhelhos de cor amarela, cinza esverdeado e marrom; argila marrom, cinza e esverdeada com intercalações de lentes de calcário. O contato com o Grupo Itapecuru ocorre

de forma brusca à gradativa, geralmente passando de arenitos para arenitos argilosos, calcário ou folhelhos.

Na área de estudo, a maior espessura do aquífero Itapecuru foi identificada no poço tubular P-02, localizado no bairro São Raimundo, com 106 m de espessura; este, também, é o poço mais profundo identificado na área de estudo, com 198 metros de profundidade. A espessura média do aquífero Itapecuru foi de aproximadamente 42 metros, considerando a profundidade do poço tubular, continuando no substrato geológico da área.

Figura 44 - Mapa dos perfis litológicos na bacia do rio Tibiri, São Luís - MA.

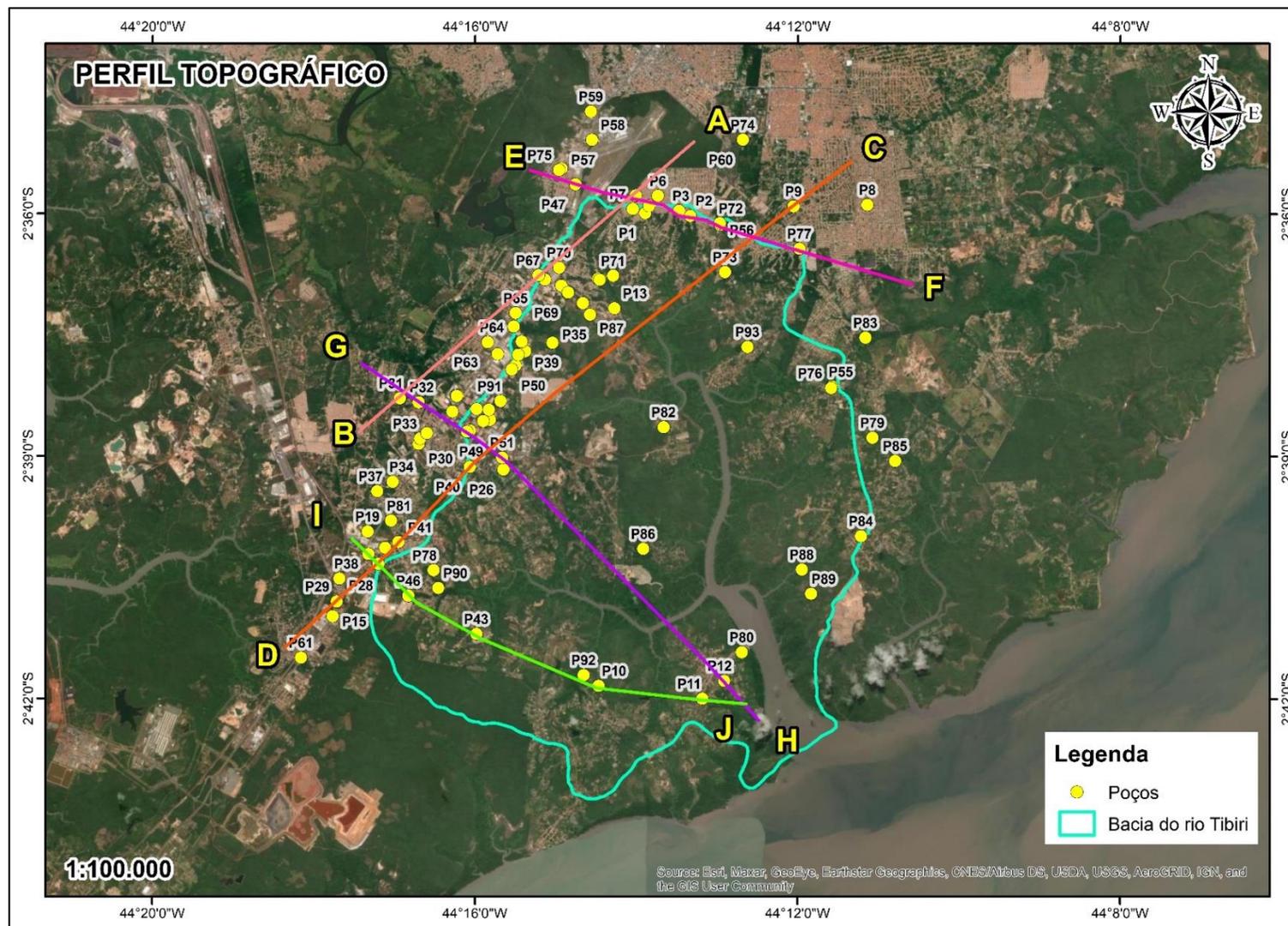


Figura 45 - Perfil litológico do traçado A-B dos poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências, em São Luís.

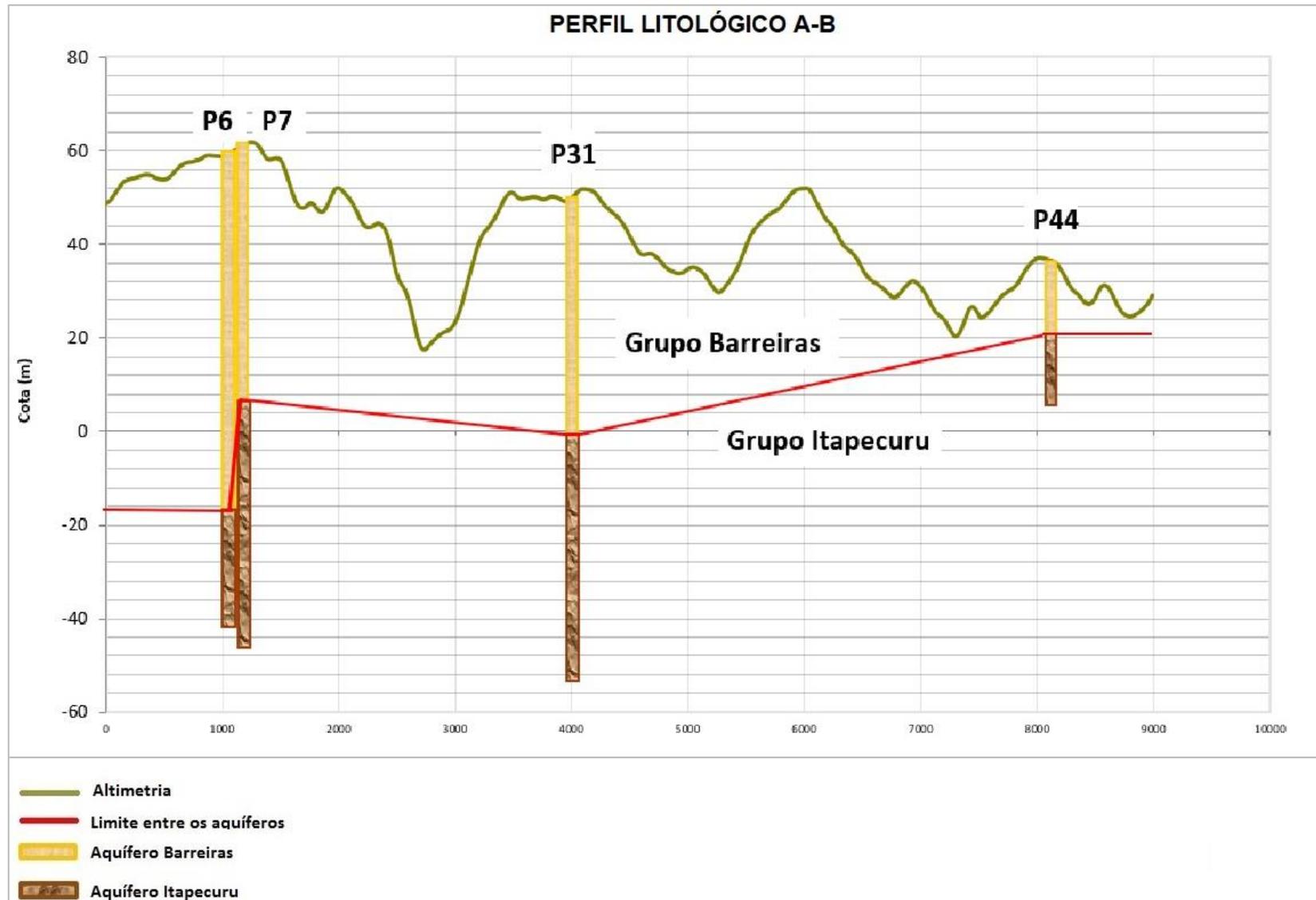


Figura 46 - Perfil litológico do traçado C-D dos poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências, em São Luís – MA.

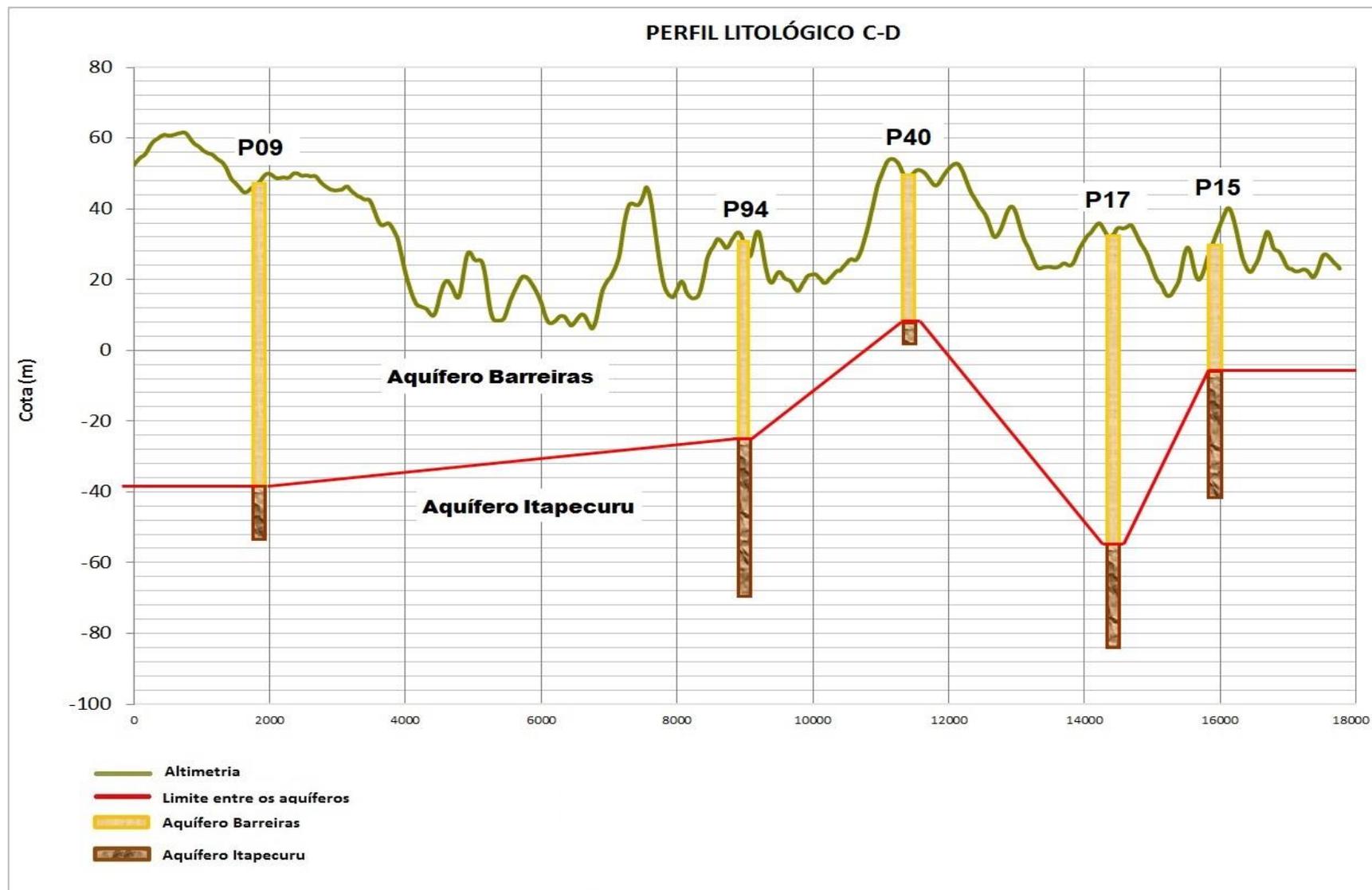


Figura 47 - Perfil litológico do traçado E-F dos poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências, em São Luís – MA.

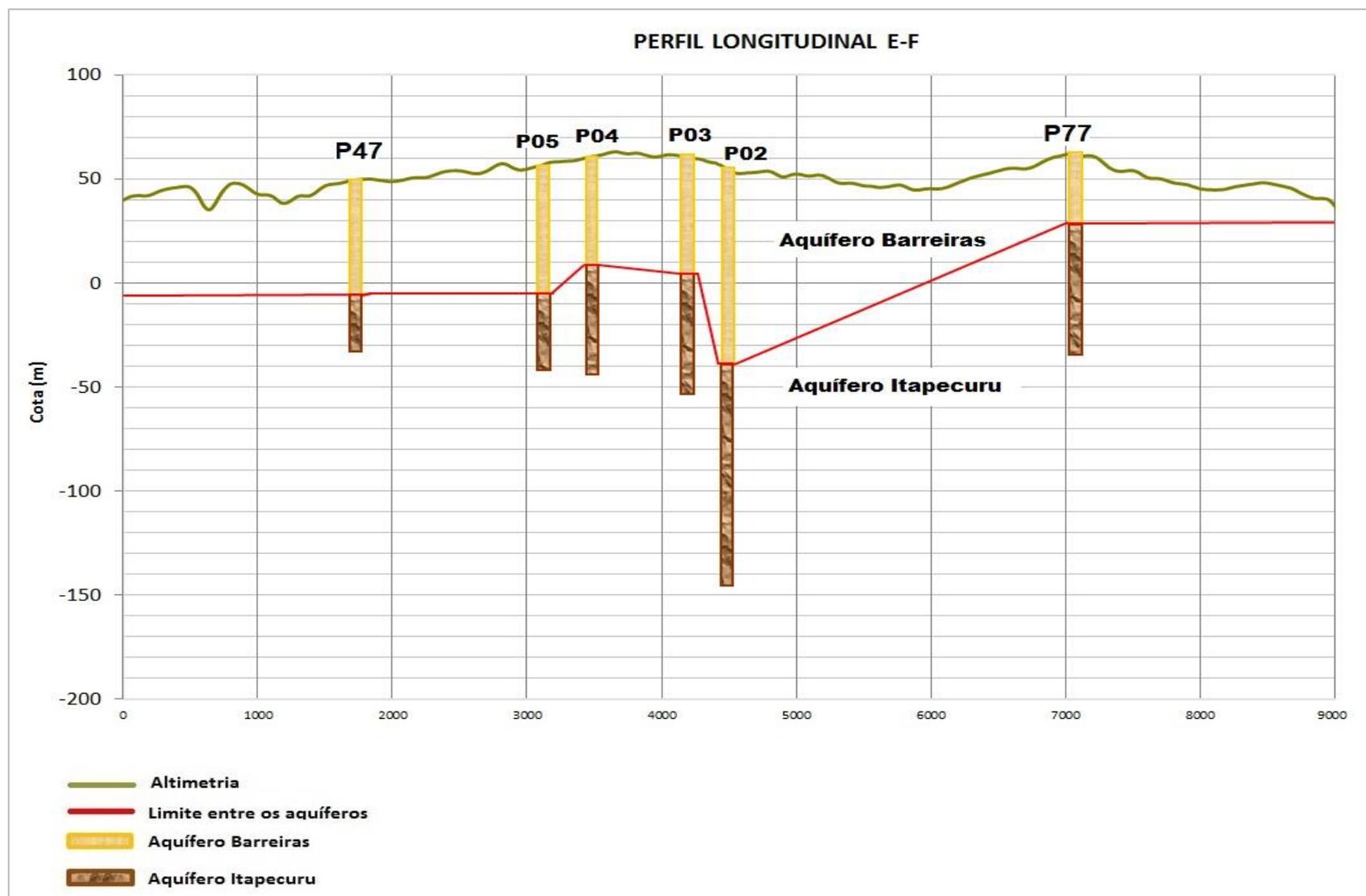


Figura 48 - Perfil litológico do traçado G-H dos poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências, em São Luís – MA.

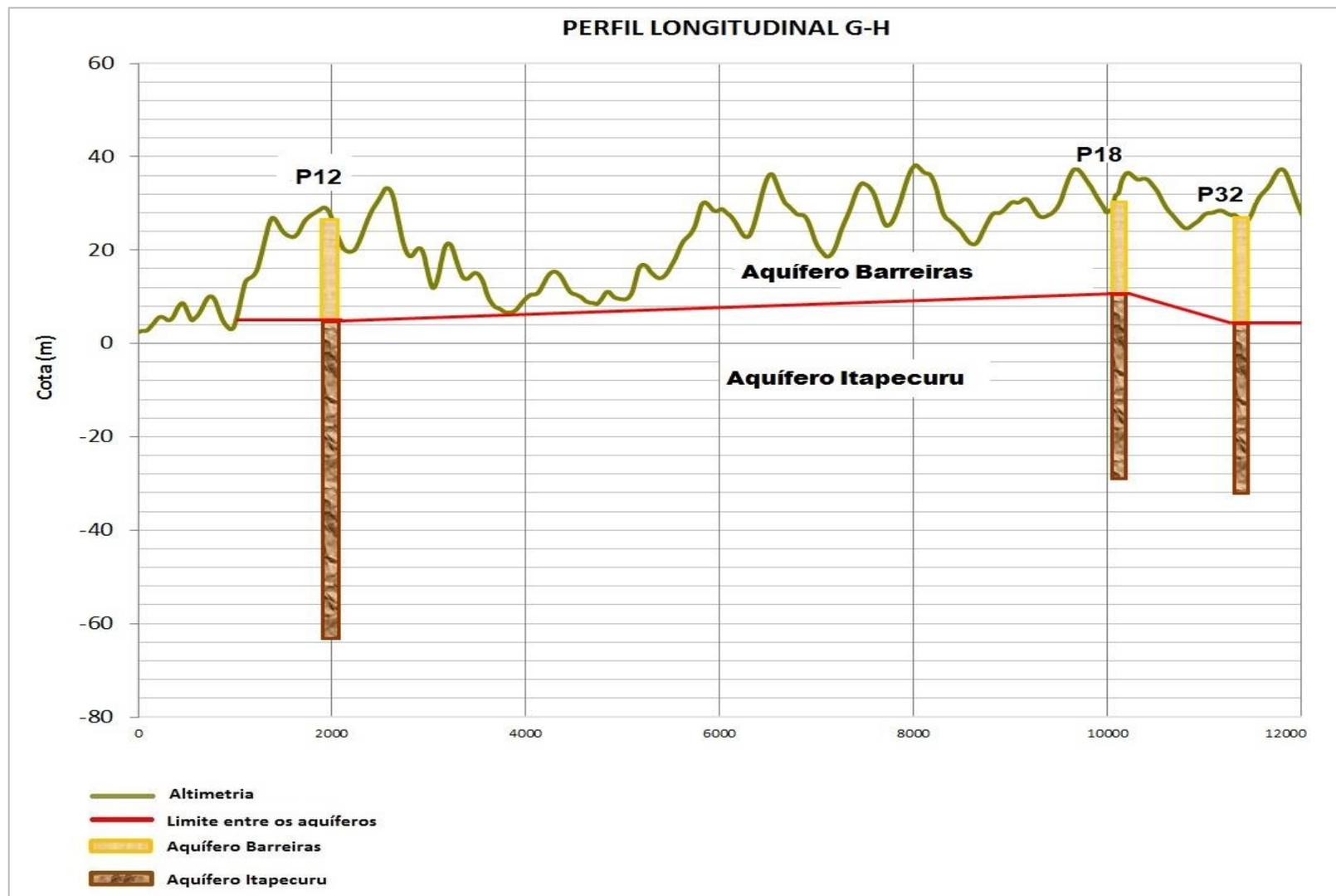
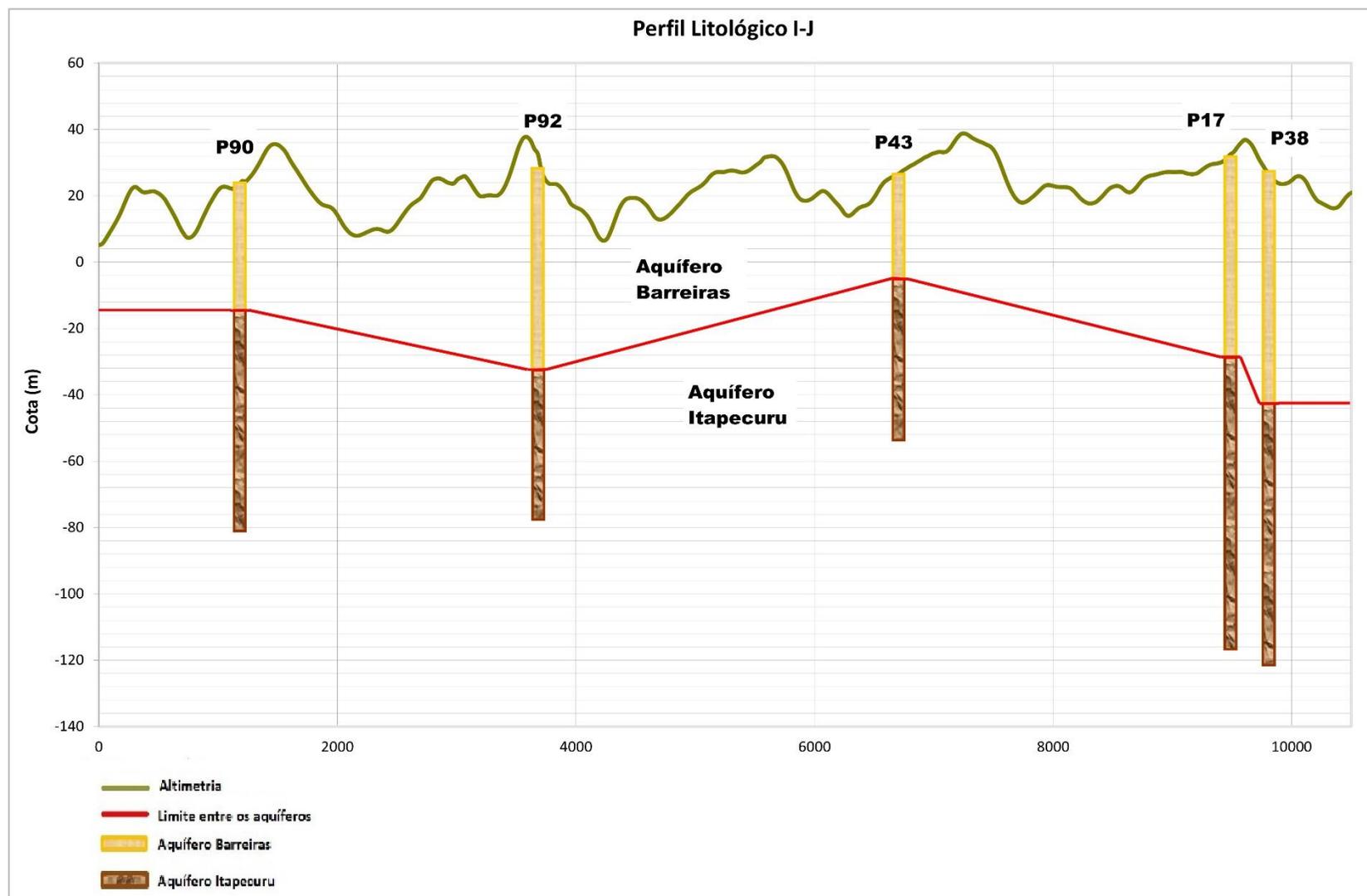


Figura 49 - Perfil litológico do traçado I-J dos poços tubulares localizados na bacia do rio Tibiri e adjacências, em São Luís – MA.



Dos cinco perfis longitudinais traçados, o segmento A-B é o que está sobre as áreas com maior elevação altimétrica da área de estudo, conforme podemos verificar no mapa de hipsometria da Figura 06. Nesta seção A-B, o aquífero Barreiras apresentou uma espessura média de 48,75 metros, enquanto o aquífero Itapecuru apresentou de 35,75 metros; já na seção C-D, o aquífero Barreiras apresentou uma espessura média de 60,4 metros, o aquífero Itapecuru, por sua vez, apresentou espessura, média de 26,2 metros, considerando a profundidade do poço tubular, continuando no substrato geológico da área.

No traçado E-F, o aquífero Barreiras apresentou uma espessura média de 56,75 metros, enquanto o Itapecuru apresentou espessura de 56,83 metros, por sua vez, no perfil longitudinal G-H, o aquífero Barreiras apresentou uma espessura média de 21 metros, enquanto o Itapecuru apresentou espessura de 48 metros, considerando a profundidade do poço tubular, continuando no substrato geológico da área.

Por fim, a seção transversal I-J, o aquífero Barreiras apresentou uma espessura média de 52 metros, enquanto o Itapecuru apresentou espessura de 36,6 metros. No geral, com base nos perfis litológicos analisados, o aquífero Barreiras apresentou espessura média de 50,45 metros, enquanto o aquífero Itapecuru apresentou espessura média de 42,22 metros, considerando a profundidade do poço tubular, continuando no substrato geológico da área da bacia do rio Tibiri.

5.3 Avaliação dos dados hidrodinâmicos do método GALDIT

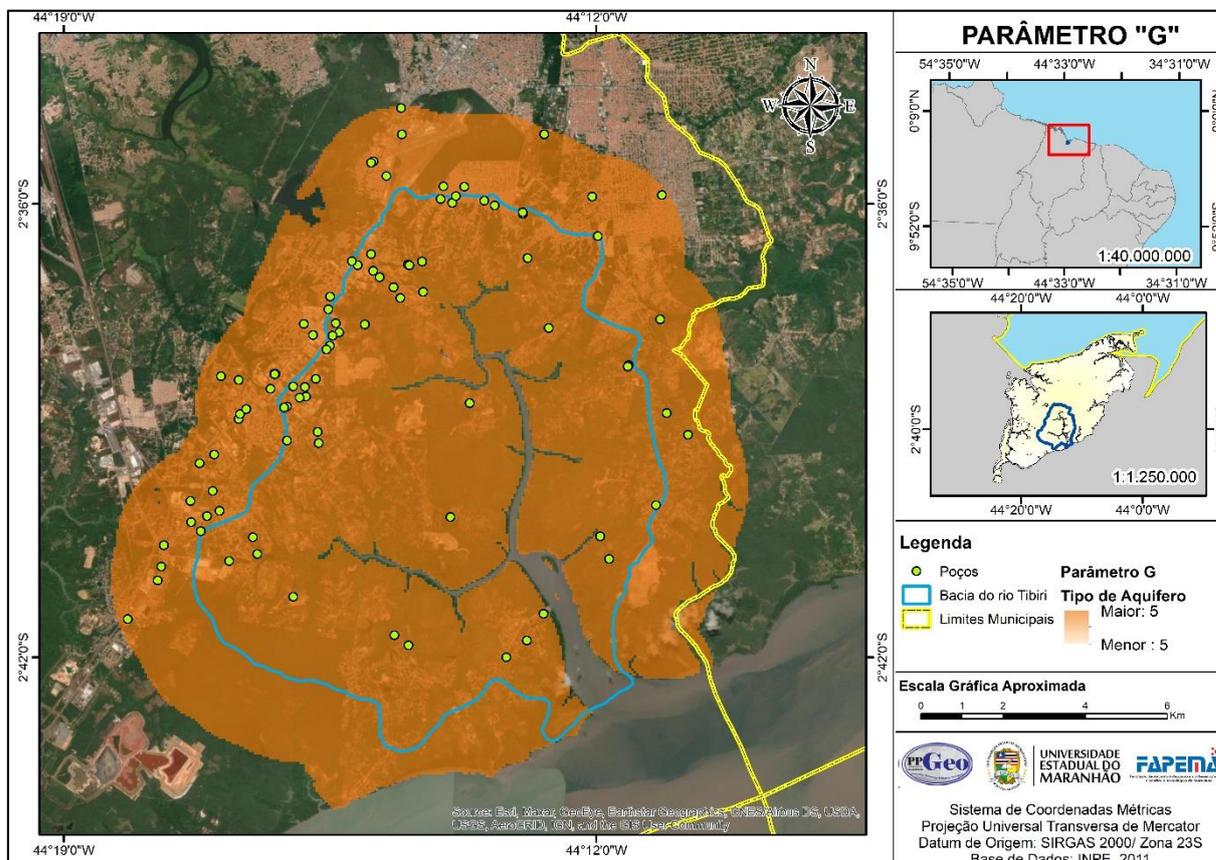
Neste capítulo, foram caracterizados os parâmetros do Método GALDIT, conforme Chachadi e Lobo Ferreira (2001), considerando os dados hidrodinâmicos dos poços tubulares, obtidos para área propõe, portanto, a argumentação sistêmica e adoção dos devidos valores com suas respectivas classes.

5.3.1 Parâmetro G – Ocorrência do Aquífero

Para a avaliação do tipo de aquífero foram consideradas as informações de perfil litológico e, também, a condutividade hidráulica calculada através do *software Aquifer Win32*, foram identificados parâmetros que indicaram a ocorrência de aquífero do tipo semiconfinado, por isso, conforme propõe o modelo GALDIT, o valor atribuído ao parâmetro G foi 5, que corresponde a aquíferos do tipo semiconfinados. O parâmetro G do método GALDIT apresenta

valor de ponderação igual a 1. Segue na Figura 50 a representação do parâmetro G na extensão da área de estudo.

Figura 50 - Mapa referente à espacialização do Parâmetro G, indicando o tipo de aquífero.



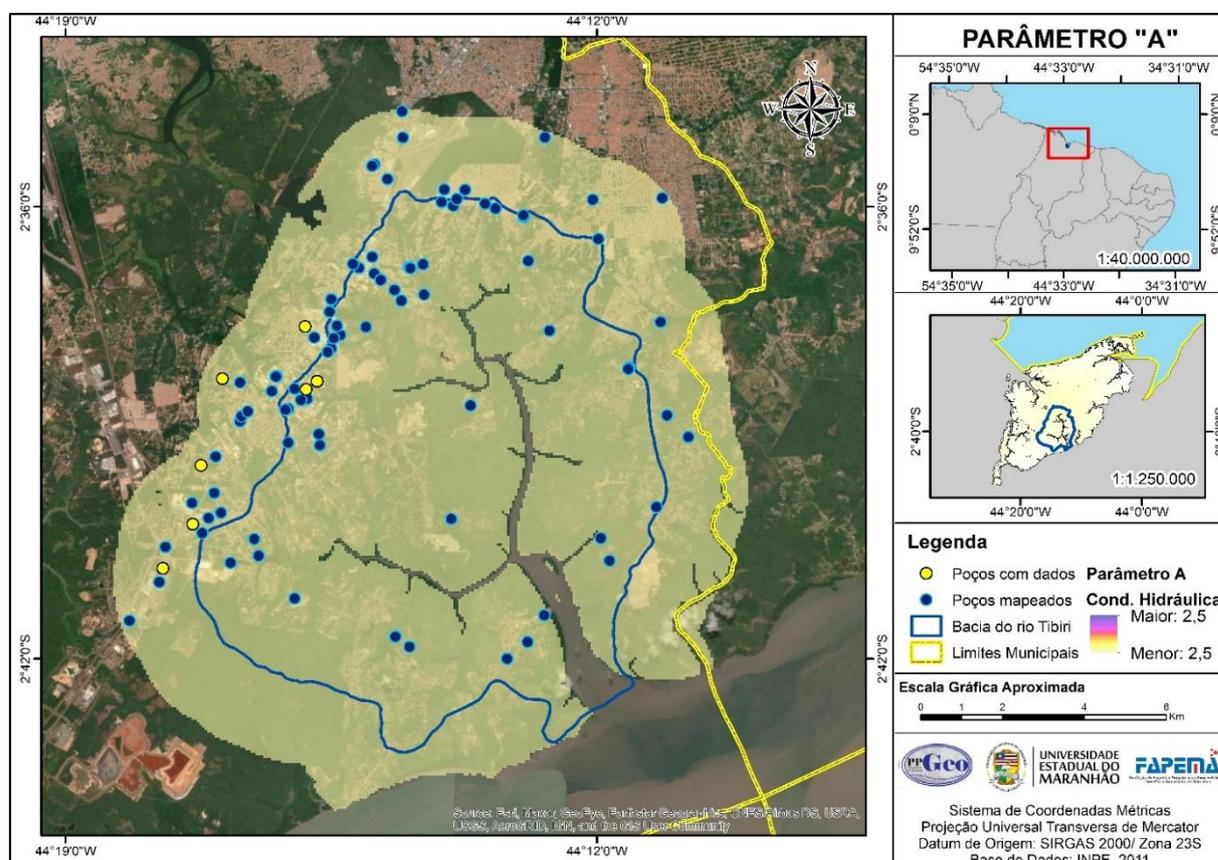
5.3.2 Parâmetro A – Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica foi estimada através do software *Aquifer Win32*, onde foram informados os dados construtivos dos poços e seus respectivos testes de bombeamento. Devido à reduzida disponibilidade de dados completos sobre os poços, o número de poços utilizados na simulação do *software* foi limitado a 07 (sete) poços tubulares.

A partir dos dados obtidos, obteve-se uma condutividade hidráulica que variou de $6,36 \times 10^{-7}$ m/s a $4,012 \times 10^{-6}$ m/s, ou ainda, 0,035m/dia a 0,133m/dia para os aquíferos Barreiras e Itapecuru, o que indica uma produtividade geralmente baixa, porém, localmente moderada, adequada para o fornecimento de água para suprir demandas locais ou consumo privado, conforme descrito no Quadro 5. Para fins de classificação segundo o método GALDIT, a condutividade hidráulica encontrada para os aquíferos é considerada muito baixa (<5 m/dia), conforme a Tabela 6.

Sabendo que a condutividade hidráulica obtida se apresentou valores de condutividade hidráulica inferiores à 5 m/dia, devemos considerar um valor de índice igual a 2,5, referente à classe de condutividade hidráulica muito baixa. Para o parâmetro “A”, o fator de ponderação é 3. Na Figura 51, a ausência de um gradiente de cores após a aplicação do método de interpolação indica a uniformidade espacial do parâmetro A na extensão da bacia do rio Tibiri.

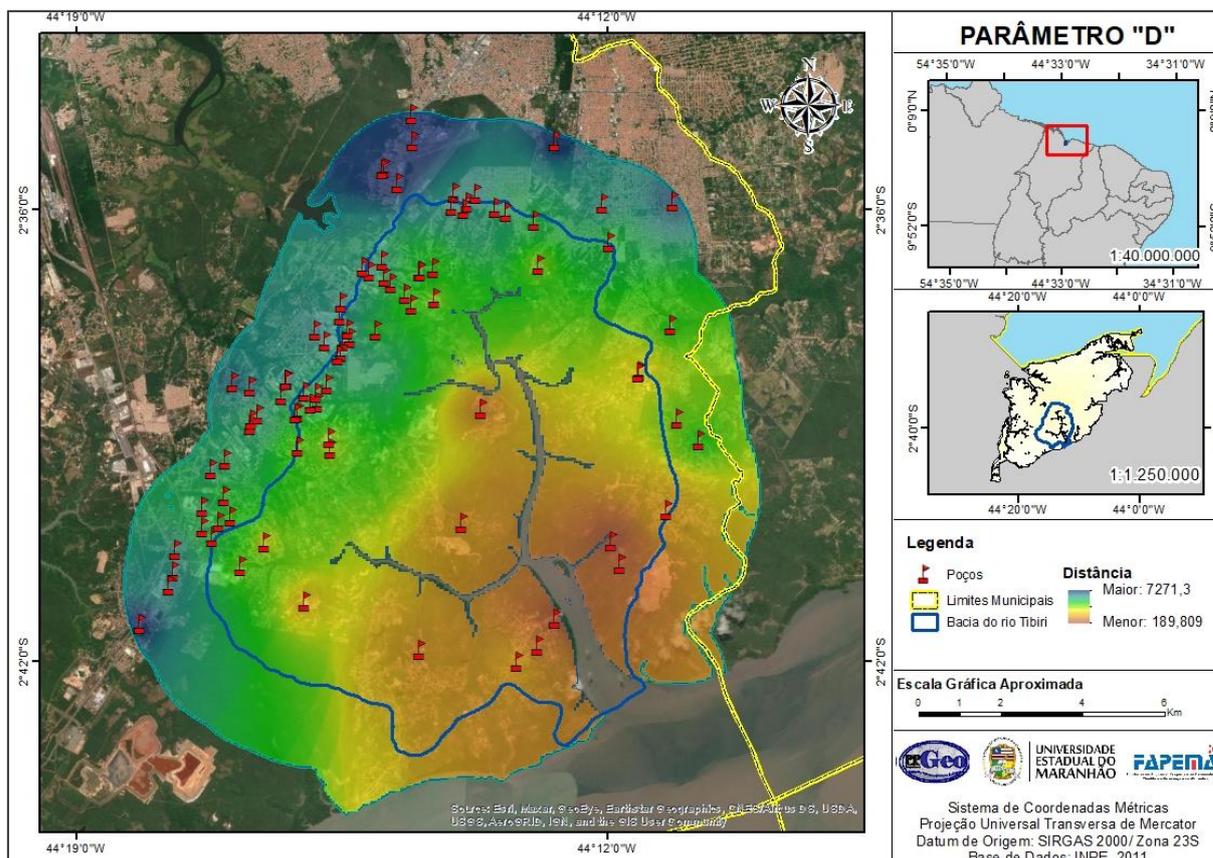
Figura 51 - Mapa referente à espacialização do Parâmetro A, indicando a condutividade elétrica



5.3.3 Parâmetro L – Nível Piezométrico

O nível piezométrico é o parâmetro que se refere à carga hidráulica que faz a cunha salina recuar. Na área de estudo, a variação do nível piezométrico ocorreu de 42,02 metros a -19,92 metros, portanto, para o parâmetro “L” foram obtidos os índices 2,5; 7,5 e 10 conforme Chachadi e Lobo Ferreira (2001). A Figura 52 representa a interpolação espacial das classes de nível piezométrico, variando de muito baixo, médio e elevado. Quanto mais clara a coloração, mais elevado foi o peso atribuído ao fator nível piezométrico.

Figura 53 - Mapa da espacialização do Parâmetro D, indicando a distância dos poços em relação à influência marítima – Bacia do rio Tibiri – Ma.



5.3.5 Parâmetro I – Impacto da Intrusão Salina

Para a avaliação deste parâmetro, foi realizada a coleta de água de 11 (onze) poços tubulares, tentando obter a melhor distribuição possível das amostras, a fim de evitar uma tendência espacial das informações geradas. As amostras de água subterrânea foram coletadas diretamente dos poços tubulares, sem tratamento ou interferências da rede de distribuição, conforme observa-se na Figura 54.

Figura 54 - Abertura de poço da CAEMA para coleta direta da água do poço, em Itapera do Quebra Pote, São Luís – MA.



Fonte: Registro de Campo, 2022.

Os resultados obtidos a partir das análises de água realizadas encontram-se discriminados nos laudos apresentados no apêndice deste estudo, assim como o método de análise utilizado pelo laboratório. A Tabela 19 abaixo apresenta os resultados referentes à presença de Cloreto e Bicarbonato presentes nas amostras de água subterrâneas analisadas.

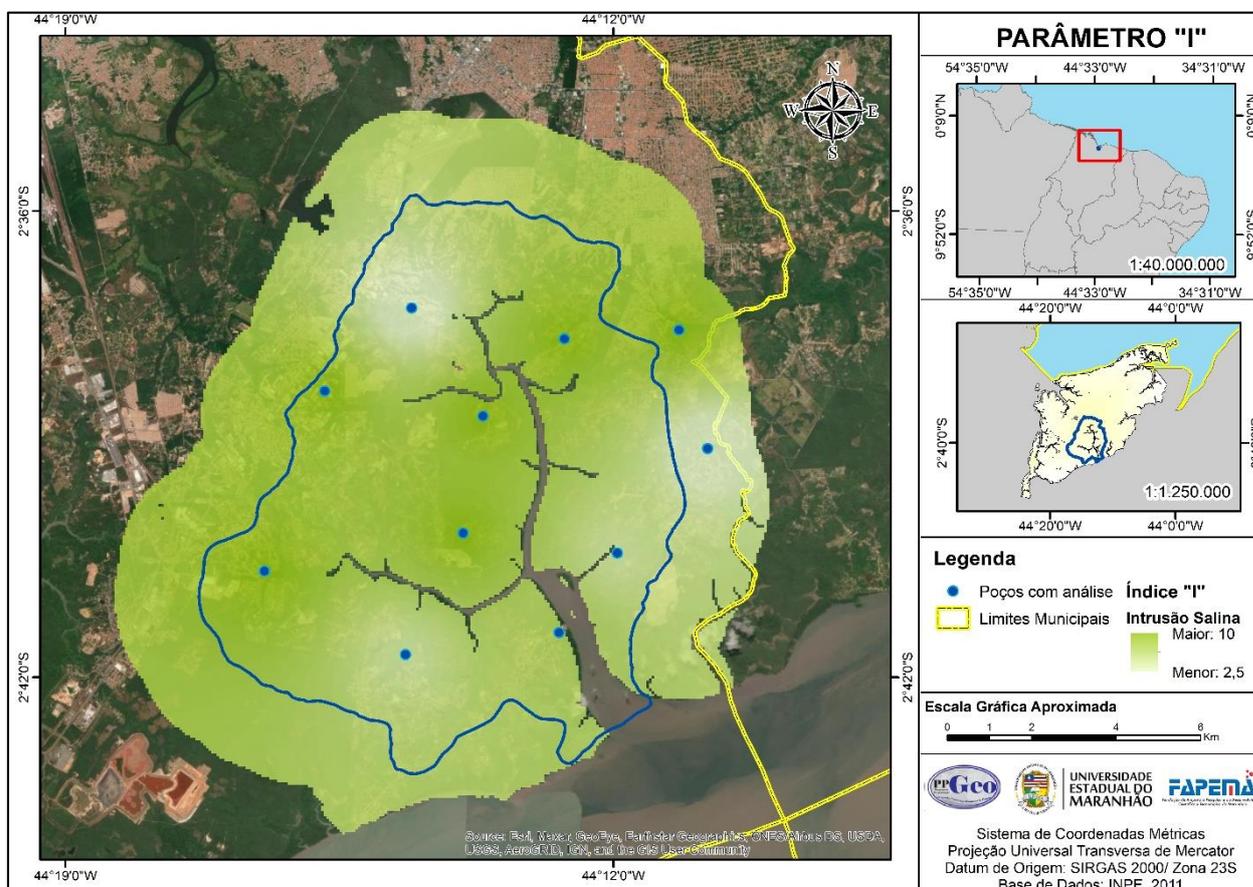
Tabela 19- Dados resultantes das análises de água coletadas a partir de poços tubulares da bacia do rio Tibiri, São Luís – MA.

Poço	Latitude	Longitude	Cl (mg/L)	Cl (mEq/L)	HCO ₃ (mg/L)	HCO ₃ (mEq/L)	Cl/HCO ₃ (mEq/L)	Classificação da Intrusão Salina
P88	-2,67336	-44,1992	11,76	0,331707	16,74	0,2744	1,208844	Baixa
P80	-2,69042	-44,2116	31,5	0,8885	30	0,4917	1,806997	Média
P87	-2,6208	-44,243	16,9	0,476687	70	1,1473	0,415486	Muito Baixa
P86	-2,6691	-44,232	13,74	0,387555	7,54	0,123581	3,136053	Alta
P90	-2,67721	-44,2743	11,76	0,331707	9,56	0,156688	2,116984	Alta
P83	-2,62553	-44,186	17,64	0,49756	2,51	0,041139	12,09464	Alta
P82	-2,64401	-44,2277	72,74	2,05173	7,54	0,123581	16,60237	Alta
P85	-2,65094	-44,1799	3,92	0,110569	9,56	0,156688	0,705661	Muito Baixa
P08	-2,6004	-44,2223	21,56	0,608129	16,75	0,274533	2,215144	Alta
P92	-2,69514	-44,2442	10,78	0,304065	16,77	0,27486	1,106251	Baixa
P93	-2,62744	-44,2104	23,52	0,663414	11,96	0,196	3,384763	Alta

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

Com base nas informações apresentadas na Tabela 19, foi gerado o mapa da Figura 55, correspondente ao parâmetro “I”, que indica o impacto da intrusão salina na área de estudo.

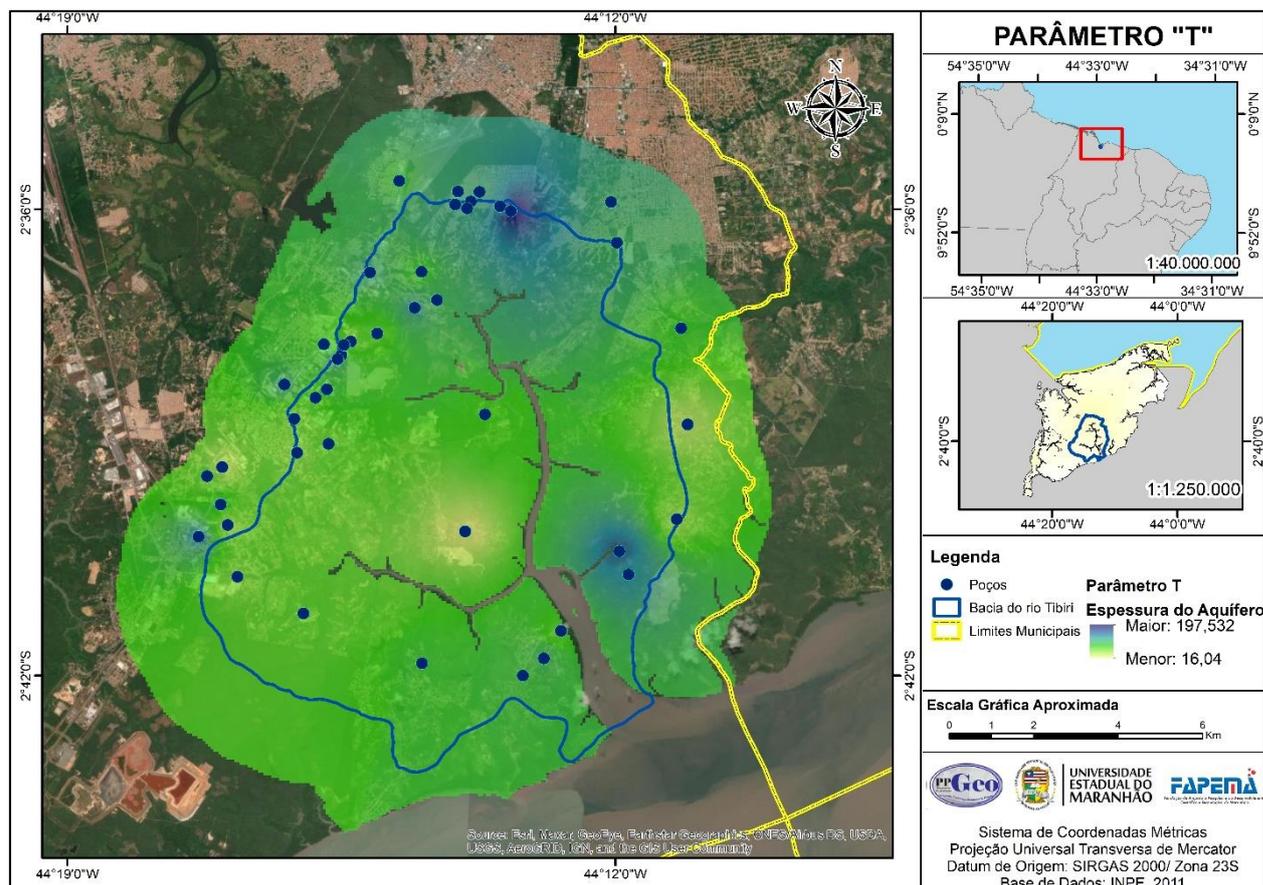
Figura 55 - Mapa da espacialização do Parâmetro I, indicando o índice de intrusão salina – Bacia do rio Tibiri – MA.



5.3.6 Parâmetro T – Espessura do Aquífero

Para a avaliação deste parâmetro e geração do mapa de interpolação, foram considerados os dados de 44 (quarenta e quatro) poços tubulares, uma vez que nem todos os poços mapeados dispunham da informação de espessura do aquífero ou perfil litoestratigráfico. O poço tubular de maior profundidade apresenta 198 metros, e está localizado no trecho da bacia com cotas altimétricas mais elevadas, no bairro do São Raimundo e proximidades do Aeroporto Internacional Cunha Machado. A figura 56 apresenta a interpolação de dados desse parâmetro.

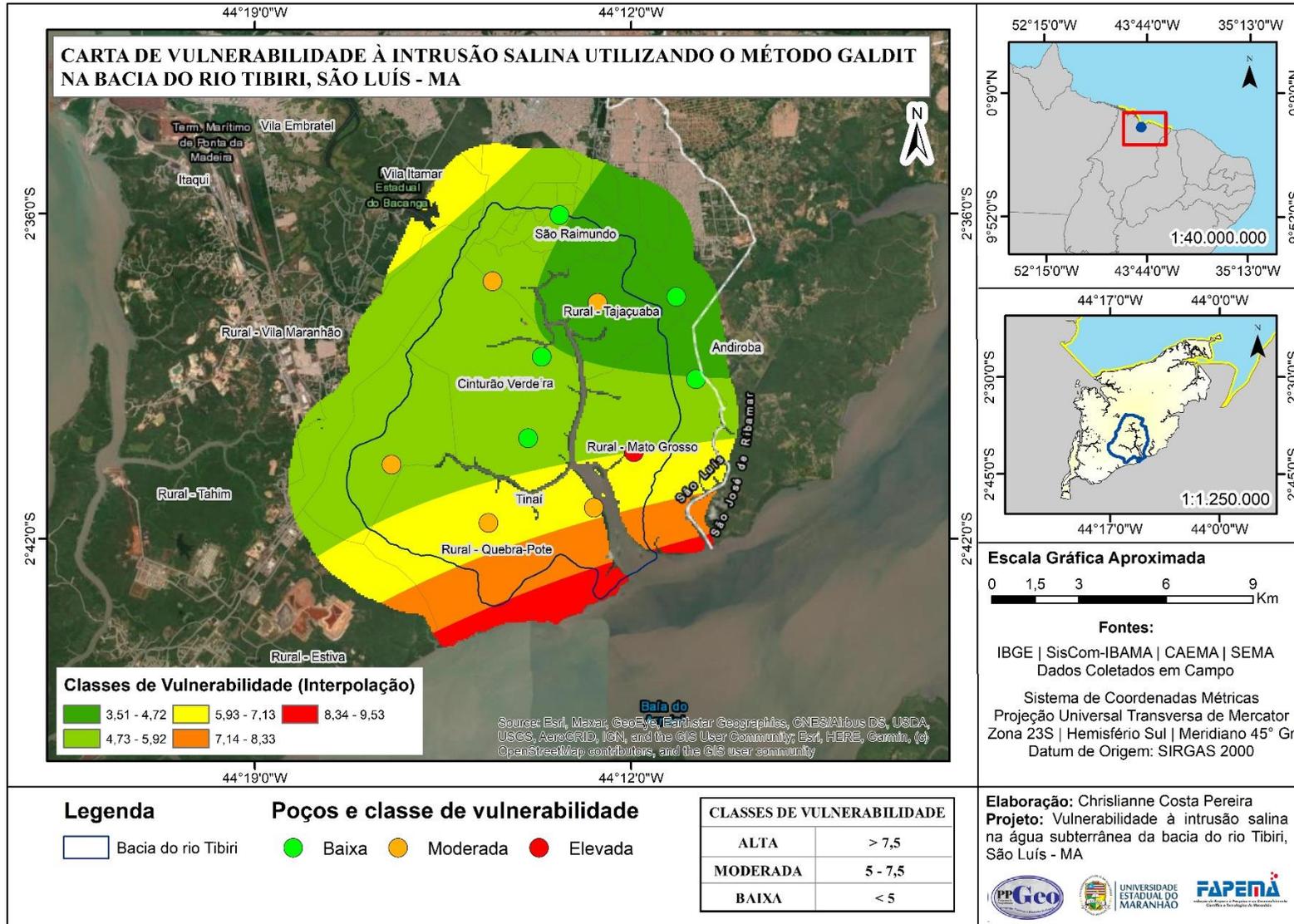
Figura 56 - Mapa da espacialização do Parâmetro T, indicando a espessura do aquífero dos poços– Bacia do rio Tibiri – MA.



5.3.7 Espacialização do método GALDIT

O índice GALDIT classifica-se em três faixas, sendo Alta Vulnerabilidade os valores $> 7,5$; Moderada Vulnerabilidade valores entre 5,0 a 7,5 e Baixa Vulnerabilidade Valores < 5 . Assim, após realizar o cálculo exigido pelo método para espacialização do índice GALDIT através do modelo de interpolação Krigagem Universal.

Figura 57 - Carta de vulnerabilidade à intrusão salina na bacia hidrográfica do rio Tibiri, em São Luís – MA.



Com base na carta de vulnerabilidade gerada a partir da interpolação de dados, observa-se que a faixa costeira da bacia (em vermelho) foi a área que apresentou um índice de vulnerabilidade mais elevado, sendo classificado como alta vulnerabilidade (8,34 – 9,53) devido ao contato mais imediato com a salinidade marinha. Os poços que indicaram vulnerabilidade moderada (poços indicados na coloração laranja) podem apresentar a intrusão salina atribuída à dinâmica da maré na área estuarina e a distância relativamente próxima às áreas de mangue.

As amostras coletadas na área que se estende do bairro do Quebra-Pote até a Mata Rural de Itapera, apesar da baixa pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos nesses núcleos populacionais rurais, a vulnerabilidade à intrusão salina se enquadra em um índice moderado (5-7,5) devido à sua localização na porção mais próxima à foz do rio Tibiri, região que sofre maiores influências da entrada de maré. Nos resultados de análise de água, o poço localizado na área rural Tajaçuaba apresentou dados de intrusão salina com vulnerabilidade moderada (5-7,5), visto que este trecho ainda apresenta influência da maré evidenciada pela presença da vegetação de mangue, considerando os demais parâmetros do método GALDIT, entretanto, o bairro Tajaçuaba encontra-se em uma área com índice de vulnerabilidade na faixa de 3,51 a 4,72, índice classificado como baixa vulnerabilidade. O poço tubular que abastece a comunidade do bairro Tibirizinho também indicou um nível moderado de vulnerabilidade à intrusão salina. Enquanto o bairro do São Raimundo, que apresenta maior densidade populacional, encontrou-se na faixa de baixa vulnerabilidade da carta (com índice de 3,51 a 4,72). Vale mencionar que o bairro do São Raimundo começa a apresentar cotas altimétricas mais elevadas, e, portanto, as cotas de nível piezométrico (cota da coluna d'água acima do mar) tendem a ser maiores, o que pode ser um fator contribuinte neste cenário de baixa vulnerabilidade.

Foi estimado um baixo índice de vulnerabilidade à intrusão salina, também, nas imediações do bairro rural Andiroba, adjacente ao bairro residencial São Raimundo. Apesar da proximidade à área de influência da maré, o índice de intrusão salina verificado a partir da água coletada nas comunidades Cinturão Verde e Tinaí indicaram baixo índice de vulnerabilidade à intrusão salina, o que poderia ser atribuído à sua localização em uma área rural, com ampla presença de vegetação, onde o solo não sofre com pressões de uso e impermeabilização facilitando, portanto, a recarga dos aquíferos. A faixa do índice GALDIT obtido a partir da interpolação Krigagem nestas áreas foi de 4,73 a 5,92.

Houve dificuldades para obtenção da análise de água por parte de empresas localizadas no Distrito Industrial, onde não foi autorizado o repasse das informações solicitadas devido à política interna de algumas das empresas contactadas ou outros motivos não informados.

6 CAPÍTULO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do método GALDIT permitiu observar que as áreas mais propensas à salinização são as áreas próximas à foz, entretanto, a salinidade também é conduzida pela influência da maré, nas áreas de mangue.

Destaca-se que a vulnerabilidade alta à intrusão salina está restrita à área da porção inferior da bacia do rio Tibiri, na região rural do Mato Grosso, e vulnerabilidade moderada as regiões Quebra Pote, Mata de Itapera e Tajaçuaba, possivelmente influenciada pelo prisma das macromarés, na porção média da bacia. Na região da Ribeira predomina a vulnerabilidade baixa, aumentando para moderada na porção superior da bacia nas regiões de Tibiri, onde se encontram as maiores concentrações de explorações de águas subterrâneas oriundas do Distrito Industrial de São Luís. A vulnerabilidade a cunha salina na área da bacia do rio Tibiri é notória pela presença de mangue na porção superior e nas suas adjacências.

Reunindo as condições naturais do meio e a alta exploração de água subterrânea tem-se condições que interfere de forma significativa a com o avanço da cunha marinha, por isso, recomenda-se o monitoramento qualitativo das águas subterrâneas aliado à gestão e planejamento territorial, contudo, deve-se considerar as dificuldades existentes para o levantamento de dados de campo na bacia do rio Tibiri, como: a dificuldade de acesso a algumas áreas devido a sua periculosidade e carência de infraestrutura apropriada para acesso; inexistência de documentações informando características construtivas dos poços tubulares (profundidade, teste de bombeamento, perfil litológico, Nível Estático, Nível Dinâmico etc.), a ausência de documentação foi recorrente especialmente nos poços tubulares pertencentes às propriedades privadas da área rural.

Diante disto, assume-se que o estímulo a pesquisas, regularização e registro de poços tubulares contribuem com a gestão hídrica dos recursos subterrâneos. Sugere-se, portanto, um alinhamento entre o órgão ambiental gestor de recursos hídricos e os grupos de pesquisas de universidades de modo a disponibilizar, regularmente, informações contidas nos estudos ambientais e laudos de monitoramento da água, criando, assim, um banco de dados sobre o comportamento sazonal e avanço da cunha salina.

Como estratégia para evitar a problemática da cunha salina, faz-se necessária também a gestão das áreas de tabuleiros a fim de evitar a impermeabilização dessas áreas, uma vez que

estas são zonas de recarga de aquíferos, indispensáveis para manutenção das reservas hídricas de São Luís, pois, representam áreas elevadas e planas. Essas áreas devem ser protegidas por lei municipal para manutenção das reservas hídricas ludovicenses.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, E. H. **Mudanças climáticas, incertezas hidrológicas e Vazão fluvial: o caso do estuário do Rio Anil**. Caminhos de Geografia 2004, 8, 158.
- ALLER, L.; T. BENNET; J.H. LEHR e R.J. PETTY - **DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**, U.S. EPA Report 600/2-85/018, 1987.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil); SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Estudos hidrogeológicos da região metropolitana de São Luís – MA: subsídios para uso sustentável dos recursos hídricos: relatório parcial 04 (RP 04): relatório de geomorfologia, solos e uso do solo**. São Luís - MA, 2017.
- AUGE, M. **Vulnerabilidad de acuíferos: conceptos y métodos**. Servicio Geológico Minero Argentino – SEGEMAR. Serie Contribuciones Técnicas Ordenamiento Territorial n°7. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires, 2007.
- BANDEIRA, I. C. N.: **Geodiversidade do estado do Maranhão**. Organização Iris Celeste Nascimento. – Teresina: CPRM, 2013.
- BARROS, J. S.; BANDEIRA, I. C. N. **Geodiversidade da ilha do Maranhão**. Teresina; CPRM, 2020.
- BATISTELLA, M., BOLFE, E. L., VICENTE, L. E., VICTORIA, D. D. C., & de ARAUJO, L. S. **Relatório do diagnóstico do macrozoneamento ecológico-econômico do Estado do Maranhão**. Embrapa Territorial-Outras publicações técnicas (INFOTECA-E). 2013.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria de Consolidação N° 888**, de 04 de Maio de 2021. Brasília: Ministério da Saúde, 2021.
- CASTRO, R. M. S. **Avaliação da Vulnerabilidade à Intrusão Marinha na Franja Costeira de São Luís Utilizando o Método GALDIT**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, Maranhão, 2019.
- CHACHADI, A.G. LOBO-FERREIRA, J.P. **Sea Water Intrusion Vulnerability Mapping of Aquifers Using GALDIT Method**. Proceedings of the Workshop on Modelling in Hydrogeology, Anna University, Chennai, 143-156, 2001.
- CHACHADI, A. G., LOBO FERREIRA, J. P.; NORONHA, L. and CHOUDRI, B. S. **Assessing the impact of sea-level rise on salt water intrusion in coastal aquifers using GALDIT model**. Coastin—A Coastal Policy Res Newsl 7 (2002): 27-32.
- CHACHADI, A.G; LOBO-FERREIRA, J.P. **Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 2— GALDIT Indicators Description**, Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrogeology and Management of Water Resources, Portugal, 11–14, July 2005.

- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Hucitec., 1980.
- CIVITA, M.; DE MAIO, M. **SINTACS: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento**. Metodologia e automazione. Bologna: Pitagora.191 p. 1997.
- CONFALONIERI, U.E. **Variabilidade climática, vulnerabilidade social e saúde no Brasil**. Terra livre, 1(20), pp.193-204. 2015.
- CRUZ, A., DA SILVA JÚNIOR, G.C., PIZANI, T.C. and LOWSBY, M.G. **Monitoramento da Cunha Salina nos Aquíferos Costeiros de Piratininga, Niterói-RJ**. Águas Subterrâneas. 2003.
- DALY, D.; DASSARGUES, A.; DREW, D.; DUNNE, S.; GOLDSCHIEDER, N.; NEALE, S.; POPESCU, I. C.; ZWAHLEN, F. **Main concepts of the “European approach” to karst-groundwater vulnerability assessment and mapping**. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 2, p. 340-345, 2002.
- DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. **EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment**. In: GUNAY, G.; JONSHON, A. I. (Ed.). On Karst Water and Enviromental Impacts. Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam. p. 117- 223. 1997.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Avaliação do risco de poluição das águas subterrâneas: uma metodologia baseada em dados existentes**. Organização Mundial de Saúde, Organização Pan-americana de Saúde, Centro Pan-americano de Engenharia Sanitária e Ciências Ambientais. Lima, 78 p.1988.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Edição brasileira: SERVIMAR – Serviços Técnicos Ambientais Ltda., Banco Mundial. 104 p. 2006.
- FRANCISCO, R. F. **Contribuição metodológica à estimativa da vulnerabilidade natural e perigo de contaminação de aquíferos livres granulares**. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro. 175f. 2018.
- FUNDAÇÃO SOUSÂNDRADE DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - FADU. **Estudo de Impacto Ambiental Refinaria Premium I**. Bacabeira:UFMA. Convênio UFMA/Petrobras, Vol. II, P.440. 2009.
- FURTADO, L. M. **Vulnerabilidade natural e ambiental do município de São Gonçalo do Amarante, Ceará**. 2016.
- GOGU, R. C.; DASSARGUES, A. **Current and future trends in groundwater vulnerability assessment**. Environmental Geology, v.3, n. 6, p. 549-559, 2000.
- GRIGIO, A. M. **Aplicação de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do município de Guamaré (RN): simulação de risco às atividades da indústria petrolífera**. 2003. 222 p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

GRIGIO, A. M. **Evolução da paisagem do baixo custo do Rio Piranhas-Assu (1988-2024): Uso de autômatos celulares em modelo dinâmico espacial para simulação de cenários futuros**. 205f. Tese (Doutorado em Geodinâmica) - Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

GUIGUER, N.; KOHNKE, M. W. **Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos**. Águas Subterrâneas, 2002.

IMESC – Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos. **Situação ambiental da Ilha do Maranhão**. São Luís: IMESC, 2011.

JACOMINE, P.T.K. **Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros**. In: Reunião técnica sobre solos coesos dos tabuleiros costeiros; Pesquisa e desenvolvimento para os tabuleiros costeiros. Cruz das Almas, 1996. Anais. Aracaju, EMBRAPA - CPATC/EMBRAPA - CNPMF/EAUFBA/IGUFBA. 1996. p.13-26

JAPIASSU H. DANILO, M. **Dicionário Básico de Filosofia**. 3ª. Edição, revista e ampliada. 2001.

KIM, I. H., CHUNG, I. M., & CHANG, S. W. **Development of Seawater Intrusion Vulnerability Assessment for Averaged Seasonality of Using Modified GALDIT Method**. Water, 13(13), 1820. 2021.

KLAIS, T.B.A., DALMAS, F.B., MORAIS, R.P., ATIQUE, G., LASTORIA, G. and PARANHOS FILHO, A.C., 2012. **Vulnerabilidade natural e ambiental do município de Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil**. Revista Ambiente & Água, 7(2), pp.277-290.

LEGRAND H.E. **System for Evaluating the Contamination Potential of Some Waste Sites**. J Amer Water Works Assoc 56:959– 974. 1964.

LESPCH; I. F. **O Sistema Brasileiro de Classificação de solos (SiBCS)**. In: LESPCH; I. F. 19 Lições de Pedologia. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil – **Cartografia da Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas do concelho de Montemor-o-Novo utilizando o método DRASTIC**. LNEC, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas, Lisboa, Proc.607/1/14252, Março 2002.

LOBO-FERREIRA, J.P.; CABRAL, M. **Proposal for an Operational Definition of Vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources**, in Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group Brussels,.Feb. 1991.

LOBO-FERREIRA, J. P., CHACHADI, A. G., DIAMANTINO, C., HENRIQUES, M. J. **Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT Method. Part 1: application to the Portuguese aquifer of Monte Gordo**. 2005.

LOBO FERREIRA, J. P. C.; CHACHADI, A. G. **Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method**. Coastin – a coastal policy research newsletter, n. 4, 12 p, 2001.

LOPES, J. A. V. (Org.). **São Luís Ilha do Maranhão e Alcântara: Guia de arquitetura e paisagem**. Sevilha: Editora Bilingue, 2008.

LOUREIRO, C. V. **A vulnerabilidade como indicador de qualidade ambiental em área do baixo curso dos rios Maranguapinho e Ceará/CE: subsídios para o zoneamento ambiental**. 2011.

LOURENÇO, Roberto Wagner; LANDIM, Paulo Milton Barbosa. **Estudo da variabilidade do " índice de vegetação por diferença normalizada/NDVI" utilizando krigagem indicativa**. *Holos environment*, v. 4, n. 1, p. 38-55, 2004.

MARTINS, B.; FERREIRA, J. P. L.; PEREIRA, E. D.; PEREIRA, R. M. S. **Trabalhando as Variáveis do Método GALDIT de Vulnerabilidade a Intrusão Salina no Curso Inferior do Rio Bacanga**, Maranhão, Brasil, 2019.

MEAULO, F. J. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP)**. 108f. Diss. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente)-Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

MESQUITA, C., DE ASSIS, A. Q. S., & DE SOUZA, R. M. **Vulnerabilidade natural à perda de solos da bacia hidrográfica do Rio Sagrado–Morretes/PR**. *Revista de Geografia (Recife)*, 27(2. Esp), 251-264. 2011.

MOREIRA, R. **Para onde vai o pensamento geográfico? Por uma epistemologia crítica**. São Paulo: Contexto, 2011.

NOVO, M.E. **Alterações climáticas e seus impactos nos recursos hídricos subterrâneos em ilhas de pequena dimensão (caso de estudo: Açores - Ilha Terceira)**. Universidade dos Açores, Doutorado em Engenharia do Ambiente. 2007.

NUNES, J. O. R. **Práxis geográfica e suas conjunções**. 150 p. Tese (Livre docência em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2014.

OLIVEIRA, Ronaldo Pereira de; GREGO, Célia Regina; BRANDÃO, Ziany Neiva. **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. 2015.

ONOFRE, C. R. de E.; CELINO J. J.; NANO R. M. W.; QUEIROZ, A. F. de S. **Biodisponibilidade de metais traços nos sedimentos de manguezais da porção norte da Baía de Todos os Santos, Bahia, Brasil**. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*. v.7, n. 2, 2007.

PELLING, M.; UITTO, J. I. **Small Island Developing States: Natural Disaster Vulnerability and Global Change**. *Global Environ. Change, Part B, Environmental Hazards*, v. 3, n. 2, p. 49-62, 2001.

PEREIRA, E. D.; CAVALCANTI JUNIOR, F. A.; COSTA, H. O. S.; CASTRO, M. D. F. **Reservatório Batatã: importância hídrica e conflitos de uso e ocupação no município de São Luís, Maranhão / Brasil**. *Revista Geográfica de América Central*, 2011, 2, 1.

PEREIRA, P. M. N. **Projetos de desenvolvimento e conflitos socioambientais em São Luís-MA: O caso da instalação de uma usina termelétrica**. São Luís: Curso de Serviço Social da Universidade Federal do Maranhão, 2010. Monografia de Graduação.

PRUSTY, P., FAROOQ, S. H.. **Seawater intrusion in the coastal aquifers of India-A review.** HydroResearch 3 61-74. 2020.

REIS, R. D. J. D. **Costa Sudeste do Município de São Luís - MA: Análise e Proposta para Gestão Ambiental** (Doctoral dissertation, UFPE). 2005.

ROBSON, A. C. **Distribuição e Fracionamento de Metais em Solos do Distrito Industrial de São Luís do Maranhão.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão, Programa de Pós-Graduação em Química, 2014.

RODRIGUES, T. D. N. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: São Luís - Folha SA. 23-ZA; Cururupu-Folha SA. 23-XC; Estado do Maranhão.** CPRM. 1994.

ROSSETTI, D. F. Arquitetura deposicional da Bacia de São Luís-Grajaú. In: ROSSETTI, Dilce de Fátima; GÓES, Ana Maria; TRUCKENBRODT, Werner (ed.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís - Grajaú. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 31-46.** (Coleção Friedrich Katzer).

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. **Caracterização paleoambiental de depósitos albianos na borda sul da Bacia de São Luís-Grajaú: modelo de delta fluvial influenciado por tempestade.** Revista Brasileira de Geociências, v. 33, n. 3, p. 299-312, 2003.

SANTOS, J. D. O. **Relações entre fragilidade ambiental e vulnerabilidade social na susceptibilidade aos riscos.** Mercator (Fortaleza), 14(2), 75-90. 2015.

SÃO LUÍS. **Lei 3.252** de 29 de dezembro de 1992. Dispõe sobre a instituição do Plano Diretor do município de São Luís, e dá outras providências. São Luís, 1992.

SILVA, Q. D. da. **Proposta de zoneamento geoambiental da bacia hidrográfica do Tibiri, São Luís – MA.** Dissertação – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

SOUSA, S. B. D. **Sistema aquífero da Ilha do Maranhão (MA)***(Aquifer system of the Maranhão Island, Maranhão, Brazil). In: Anais do 1st Joint World Congress on Groundwater. Fortaleza. p. 1-17, 2000.

SOUZA, M. L. de. **O que é a Geografia Ambiental?** AMBIENTES: Revista de Geografia e Economia Política. Volume 1, Número 1, pp. 14-37. ISSN: 2674-6816. 2019.

SPOSITO, E. S. **Geografia e filosofia: contribuição para o ensino do pensamento geográfico.** São Paulo: Ed. UNESP, 2004.

SUERTEGARAY, D. M. **Espaço geográfico uno e múltiplo.** Scripta Nova. Revista electrónica de Geografía y ciencias sociales, 5 (79-104). 2001.

TAGLIANI, C. R. A. **Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informação.** In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., Belo Horizonte. Anais. São José dos Campos: INPE. p. 1657-1664. 2003.

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo. **Apostila de ArcGIS – Geodatabases.** 2017.

VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. AVI: a method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canada. 23 p.1992.

VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologist. Verlag Heinz Heise, v 16. 131 pp; 1994.

ANEXOS