

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA EM AQUÍFEROS COSTEIROS PELO MÉTODO GALDIT: FRANJA COSTEIRA DE SÃO LUÍS (MA) – BRASIL

Renata Maria Sousa Castro

Universidade Estadual do Maranhão – UEMA
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço
renata-maria-castro@hotmail.com

Ediléa Dutra Pereira

Universidade Federal do Maranhão – UFMA
Departamento de Geociências
edilea.dp@ufma.br

Manuel Mendes de Oliveira

Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC – Portugal
Departamento de Hidráulica e Ambiente
moliveira@lneq.pt

RESUMO

A cidade de São Luís é altamente influenciada pelas marés, condicionando a formação de uma cunha salina no interior dos rios presentes na área, caracterizados pela presença dos mangues na planície fluviomarinha. A grande exploração de água subterrânea aliada às características físicas da área de estudo aumentam o risco do avanço da cunha salina nos aquíferos. Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação da vulnerabilidade à intrusão marinha do aquífero costeiro de São Luís utilizando o método GALDIT. As análises das características litológicas e hidrodinâmicas dos poços tubulares permitiram identificar a ocorrência de dois aquíferos: o Itapecuru que apresenta comportamento de semiconfinado, e o aquífero livre de níveis arenosos do aquífero Barreiras. Através do mapeamento de vulnerabilidade à intrusão salina, foi observado que as áreas com maior número de poços tubulares ou maior densidade populacional apresentaram média e elevada vulnerabilidade, principalmente quando mais próximas à faixa costeira. Os parâmetros que mais influenciaram o índice foram o parâmetro L (nível piezométrico) e o parâmetro D (distância da linha de costa). Esses resultados indicaram a necessidade de um monitoramento dos poços tubulares e a aplicação urgente de uma gestão eficaz na exploração das águas subterrâneas para a manutenção e conservação da água doce na Ilha do Maranhão.

Palavras-chave: Estudo Hidrogeológico. Disponibilidade Hídrica. Gestão De Exploração. Água Subterrânea.

VULNERABILITY ASSESSMENT OF SEAWATER IN COASTAL AQUIFERS USING GALDIT METHOD: COASTAL STRIP OF SÃO LUÍS – MA - BRAZIL

ABSTRACT

The city of São Luís is influenced by the tides, which leads to the formation of a saline wedge within the rivers characterized by the presence of mangroves in the fluvial-marine plain. The large exploitation of groundwater combined with these physical characteristics increases the risk of salinization reaching aquifers. This work has as main objective to assess São Luís coastal aquifer potential vulnerability to marine intrusion using the GALDIT method. After analysis of the lithological and hydrodynamic characteristics of tubular wells, two main aquifers were identified: Itapecuru, which presents semi-confined behavior, and Barreiras phreatic aquifer. Through vulnerability mapping it was observed that areas with either the largest number of tubular wells or the highest population density showed medium and high vulnerability, especially when closer to the coastal strip. The parameters that most influenced the index were parameter L (piezometric level) and parameter D (distance from the coastline). These results indicate the need of monitoring tubular wells and the urgent application of effective management in the exploitation of groundwater for the maintenance and conservation of fresh water in Maranhão Island.

Keywords:Hydrogeological Study. Groundwater Availability. Exploitation Management. Groundwater.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a Ilha do Maranhão desenvolveu um forte processo de urbanização, caracterizado, principalmente, pela inserção de grandes projetos industriais, tais como Companhia Vale, MPX-Termoelétrica e Consórcio de Alumínio do Maranhão (ALUMAR), o que propiciou um acentuado crescimento no número de habitantes na cidade. Essa dinâmica fez com que, a população da ilha, que contava com 50 mil habitantes no ano de 1940, aumentasse em 80 anos para 1.348.789 habitantes em 2020 (IBGE, 2020), indicando um aumento expressivo da urbanização, passando a ilha para um *status* de metrópole.

Assim como em outros municípios brasileiros, os municípios da Ilha do Maranhão tiveram o processo de urbanização de forma acelerada, e o estilo de vida urbano cobiçado pela maioria da população, juntamente com o crescimento da economia industrial, criou uma densa rede urbana, muitas vezes sem planejamento. Conforme Pereira e Alcântara Júnior(2017, p.992), o plano de expansão para o desenvolvimento de São Luís de 1958 criou um desenho urbano na área compreendida entre o rio Anil e o mar, definindo zonas que eram destinadas aos usos social, administrativo, comercial e residencial. A orla marítima passa a ser ocupada por uma classe com poder econômico mais elevado, enquanto as partes Sul e Sudoeste se configuram por assentamentos de origem informal, iniciados por trabalhadores com baixo poder aquisitivo e que não possuem acesso a uma moradia de qualidade, e que também não era ofertada pelo Estado (BARBOSA, 2012).

Nos anos de 1970, a capital maranhense viveu uma nova expansão urbana, agora em direção ao Norte da ilha e com a construção da ponte do São Francisco, ligando o centro à orla marítima. Essa intervenção foi complementada pela construção da Avenida Maestro João Nunes, que ligou os bairros do São Francisco e Ponta d'Areia criando uma laguna, com um espelho d'água de 3,5 km², resultado do represamento das águas da maré pelo aterro sobre o Igarapé da Jansen. A criação de um novo padrão comportamental fez com que a classe com alto poder aquisitivo ocupasse áreas que possuíam características exclusivas locais e até mesmo de paisagens naturais, como a orla marítima com vista para o mar, a margem do rio Anil e a Laguna, hoje conhecida como Lagoa da Jansen. Isso resultou na valorização do solo urbano de determinados setores em relação a outros, fomentando o processo de diferenciação do valor do solo urbano (PEREIRA e ALCÂNTARA JÚNIOR, 2017, p.992).

O crescimento urbano na franja costeira de São Luís, a partir da expansão imobiliária com as novas construções de condomínios e outros empreendimentos, provocou alguns impactos ambientais que diminuem as áreas de recarga do aquífero livre Barreiras e do semiconfinado Itapecuru, e a Companhia de Saneamento Ambiental do Estado do Maranhão (CAEMA) perdeu alguns de seus sistemas produtores como São Raimundo, Maracanã e Olho d'Água que foram desativados através dos anos pelas impermeabilizações das áreas de recargas e nas áreas de descarga pela contaminação por esgoto *in natura* nas águas superficiais dos rios Bacanga, Anil, e Paciência. Associadas têm-se as perdas de poços tubulares isolados causados pela intrusão da cunha salina como os poços tubulares da CAEMA da área do bairro Sá Viana em decorrência da Construção da Barragem do Bacanga e poços tubulares de particulares na área Itaqui-Bacanga.

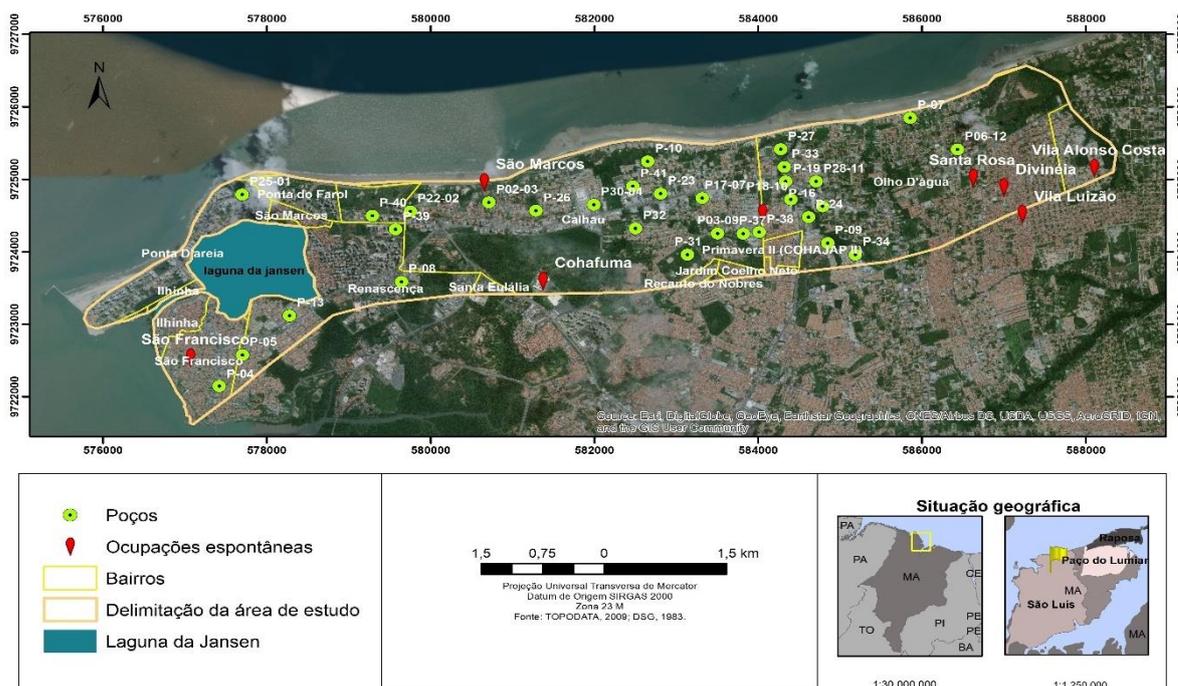
Esta pesquisa, através da análise da vulnerabilidade à intrusão marinha do aquífero costeiro de São Luís, utilizando o método GALDIT, avaliou a vulnerabilidade à intrusão marinha na franja costeira da cidade de São Luís, Maranhão, Brasil, classificando as áreas de elevada, moderada e baixa vulnerabilidade à intrusão marinha, expressando as preocupações na utilização de águas superficiais e subterrâneas nas áreas costeiras, sem prévio conhecimento de suas potencialidades e vulnerabilidades.

O avanço da cunha salina provoca diversos impactos ambientais principalmente na área de mistura - interface água subterrânea (doce) e água marinha - que somente são percebidos paulatinamente pelos moradores, através das modificações da qualidade da água tornando-a salobra; pela variabilidade da profundidade do nível de água subterrânea, e por modificação da fauna e flora local nas adjacências. Dessa forma, o presente artigo tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos à intrusão salina no ambiente costeiro utilizando uma análise sistêmica integrando a sociedade com a natureza.

Destaca-se como recorte espacial para estudo a área da franja costeira ao Norte da cidade de São Luís (MA), que vai da foz do rio Anil até ao limite do município de São Luís, compreendendo uma área de aproximadamente 25km². A área de análise está localizada ao Norte da Ilha do Maranhão, no litoral

ocidental, banhado pela Baía de São Marcos (Figura 1). O acesso pode ser realizado pelas vias terrestres BR-135, MA-201, Avenida dos Holandeses e via marítima através de pequenos portos ao longo da desembocadura da foz do rio Anil. O litoral ocidental da Ilha do Maranhão está localizado ao Norte do estado do Maranhão, região Nordeste do Brasil, constituindo uma área de aproximadamente 100km², composta pelos municípios de São Luís (do qual ocupa a maior parte do litoral ocidental), São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa.

Figura 1 - Franja costeira de São Luís (MA): Carta de localização da área de estudo.



Elab. - Autores, 2019.

METODOLOGIA

Os parâmetros do Método GALDIT analisados considerando os dados hidrodinâmicos dos poços tubulares foram ocorrência de aquífero, condutividade hidráulica, nível piezométrico, impacto da intrusão marinha e espessura do aquífero, conforme Chachadi e Lobo Ferreira (2001).

O método empregado na pesquisa foi o GALDIT do seu acrônimo em inglês *Ground water occurrence* (tipo de aquífero); *Aquifer hydraulic conductivity* (condutividade hidráulica do aquífero); *Level above the sea* (nível piezométrico); *Distance from the shore* (Distância à linha de costa); *Impact of existing status of sea water intrusion in the area* (Impacto do estado atual da intrusão marinha na região); e *Thickness of the aquifer* (espessura do aquífero) (CHACHADI e LOBO FERREIRA, 2001).

O método GALDIT foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade à intrusão marinha das regiões costeiras de clima tropical da Índia, no âmbito do projeto *COASTIN* (CHACHADI e LOBO FERREIRA, 2001). Embora tenha sido criado considerando condições particulares do litoral indiano, uma vez que incorpora aspectos universais do funcionamento dos aquíferos costeiros, a sua aplicação é possível em qualquer região costeira (LOBO FERREIRA et al., 2011). Posteriormente, o método foi modificado pelos autores, sendo utilizada neste trabalho a versão descrita em Chachadi e Lobo Ferreira (2007).

As caracterizações espaciais de cada um dos parâmetros e a sua combinação conjunta permitem obter um índice ponderado que representa a vulnerabilidade à intrusão marinha do sistema aquífero costeiro em estudo. O peso de cada parâmetro no índice GALDIT varia entre 1 e 4, valores a que são associados os pesos, relacionado à maior ou menor influência do parâmetro na vulnerabilidade (Quadro 1).

Quadro 1 - Parâmetros GALDIT.

PARÂMETRO GALDIT	VALOR DO COEFICIENTE DE PONDERAÇÃO
G – Ocorrência de Aquíferos	1
A – Condutividade Hidráulica	3
L – Nível piezométrico (acima do nível do mar)	4
D – Distância à linha de costa	4
I – Impacto do estado atual da intrusão	1
T – Espessura do aquífero	2

Conhecido o valor de cada parâmetro, o índice GALDIT é calculado utilizando todos os parâmetros, através da Equação (CHACHADI e LOBO FERREIRA, 2007):

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

As classes de vulnerabilidade GALDIT são definidas em função do índice calculado (Quadro 2).

Quadro 2 - Classes de vulnerabilidade.

CLASSES DE VULNERABILIDADE	ÍNDICE GALDIT
Vulnerabilidade elevada	$\geq 7,5$
Vulnerabilidade moderada	5 – 7,5
Vulnerabilidade baixa	≤ 5

Os valores dos parâmetros GALDIT variam entre 2,5 e 10 e são atribuídos a partir de tabelas que fazem a correspondência entre as características hidrogeológicas locais dos parâmetros observados ao valor do coeficiente de ponderação. Esses índices serão descritos conforme Chachadi e Lobo Ferreira (2007), sendo apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros GALDIT.

G – Ocorrência de Aquíferos			A – Condutividade hidráulica (m/dia)		
(peso: 1)		Valor do índice	(peso: 3)		Valor do índice
Aquífero confinado		10	Elevada	>40	10
Aquífero livre		7,5	Média	10-40	7,5
Aquífero semiconfinado		5	Baixa	5-10	5
Aquífero limitado (recarga e/ou barreira impermeável alinhada paralelamente à linha de costa)		2,5	Muito baixa	<5	2,5
L – Nível piezométrico (acima do nível do mar) (m)			D – Distância à linha de costa (m)		
(peso: 4)		Valor do índice	(peso: 4)		Valor do índice
Elevado	<1,0	10	Muito perto	<500	10
Médio	1.0-1.5	7,5	Perto	500-750	7,5
Baixo	1.5-2.0	5	Meia distância	750-1000	5
Muito baixo	>2,0	2,5	Longe	>1000	2,5
I – Impacto do estado atual da intrusão marinha na região – relação $Cl^- / [HCO_3^- + CO_3^{2-}]$ (valores em epm)			T – Espessura do aquífero (m)		
(peso: 1)		Valor do índice	(peso: 2)		Valor do índice
Elevado	>2,0	10	Grande	>10	10
Médio	1,5-2.0	7,5	Média	7,5-10	7,5
Baixo	1,0-1,5	5	Pequena	5-7,5	5
Muito baixo	<1,0	2,5	Muito pequena	<5	2,5

Fonte - Adaptado de Chachadi e Lobo Ferreira (2007).

As informações para caracterização dos parâmetros foram obtidas a partir dos dados dos poços tubulares da franja costeira de São Luís disponíveis nos Termos de Outorga disponibilizados pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Estado do Maranhão (SEMA). Foram elaborados três perfis do substrato geológico através da análise dos dados estratigráficos de 32 poços tubulares para as caracterizações litológicas e hidrodinâmicas.

Realizaram-se também as coletas das amostras de água de 14 poços tubulares na área de estudo e posteriormente foram encaminhadas ao Laboratório de Alimentos e Água – PCQA / CAMPUS – Universidade Federal do Maranhão (UFMA), onde foram analisados os teores de cloretos e carbonatos, que indicaram teores nas águas subterrâneas proporcionando um maior esclarecimento sobre o

comportamento do fenômeno de penetração da cunha marinha e o comportamento do aquífero frente à amplitude de maré juntamente com os demais compostos inorgânicos presentes na rocha e na água subterrânea.

Os 14 poços tubulares foram escolhidos devido as suas posições geográficas a fim de melhor espacialização na área de estudos. As coletas foram realizadas em poços tubulares particulares, a maioria em condomínios e apartamentos, previamente selecionados através dos Termos de Outorgas disponibilizados pela SEMA. Foram coletadas amostras somente nos lugares onde recebemos autorização de entrada.

A coleta das amostras seguiu os procedimentos técnicos conforme Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de 1986, com adaptações:

- 1-Utilizaram-se luvas antes da coleta;
- 2- As coletas foram realizadas em uma torneira próxima da saída do poço e nas entradas dos reservatórios. Abriu-se a torneira e deixou-se a água subterrânea escoar durante aproximadamente 3 minutos, tempo suficiente para eliminar a água estagnada na tubulação;
- 3- Coletaram-se as águas subterrâneas nos frascos previamente higienizados pelo laboratório responsável pela análise;
- 4- Os frascos foram etiquetados com a identificação dos poços tubulares;
- 5- As amostras de águas subterrâneas foram armazenadas em uma caixa térmica com gelo e imediatamente levadas para o Laboratório do Departamento de Tecnologia Química – Programa de Qualidade de Alimento e Água da Universidade Federal do Maranhão para realização das análises das águas subterrâneas dos poços tubulares.

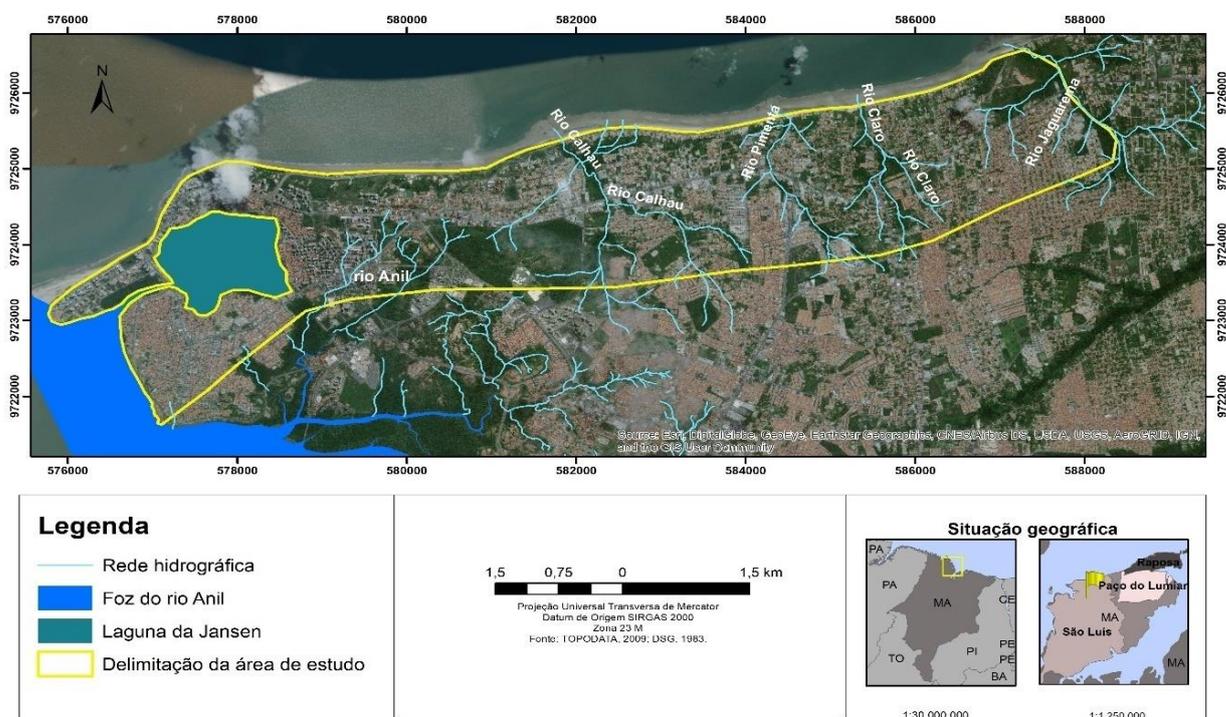
Neste trabalho, foram utilizados Sistema de Informação Geográfica (SIG), Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo e cartas planialtimétricas da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) das Folhas 6 a 15 (DSG, 1983) na escala 1:10.000 da cidade de São Luís disponibilizadas no *site* do Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) do Maranhão para mapeamento de todo os parâmetros do índice GALDIT no *software ArcGis.10* (ESRI, 2011).O levantamento da rede de drenagem foi efetuado através da interpretação da imagem de satélite, considerando todos os canais de drenagens existentes, a fim de hierarquizá-los com o emprego da metodologia sugerida por Strahler (1964) com o auxílio de uma imagem *Pleiade* (ONU Habitat, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Hidrografia

Na franja costeira da área de estudo ao Norte do município de São Luís encontram-se os rios Anil, Calhau, Pimenta, Claro, Jaguarema e pequenas bacias Litorâneas, que são influenciados por fatores oceanográficos e continentais (Figura 2).

Figura 2 - São Luís (MA): Rede hidrográfica da área de estudo, 2019.



Elab. - Autores, 2019.

O conhecimento do comportamento hidrológico é um importante passo que deve preceder o planejamento do uso e ocupação. Embora seja controlada principalmente pelas forças climáticas, pedológicas e geomorfológicas, a dinâmica hidrológica pode sofrer significativas alterações resultantes da ação antrópica, uma vez que, ao intervir no meio natural, o homem acaba interferindo nos processos do ciclo hidrológico (TONELLO, 2005).

A bacia do rio Anil está localizada no quadrante NW da Ilha do Maranhão, tendo como rio principal o Anil com aproximadamente 13,8 km de extensão e estando totalmente inserido nos limites da cidade de São Luís. As suas nascentes estão localizadas no Bairro Aurora, descendo ao nível do mar aproximadamente 9,5 km em linha reta (Figura 2), com eixo direcional orientado de SE para NW a partir da nascente, a sua calha caracteriza-se por apresentar um perfil meândrico, cortando a porção NE do centro urbano da cidade de São Luís, no trajeto em direção à desembocadura.

Outro rio que está presente na área de estudo é o rio Calhau (Figura 2), que tem 2,2 km de extensão, desagua na praia do Calhau na baía de São Marcos, é alimentado por córregos e igarapés cujas nascentes estão localizadas no Sítio Rangedor, sendo este habitado por muitas famílias. Esse rio é pouco conhecido, pois é um rio canalizado que se encontra por baixo da Avenida dos Holandeses e desemboca na litorânea. É um rio poluído e isso ocorre devido ao acúmulo de lançamentos de esgoto *in natura*. O rio Calhau corta o bairro Planalto Vinhais, Park La Ravardière, Olho D'Água e Alto do Calhau. A área da bacia do Rio Calhau localiza-se na porção Norte da Ilha do Maranhão, ocupando parte do topo da bacia sedimentar de São Luís, onde afloram rochas do Grupo Itapecuru e do Grupo Barreiras.

O rio Pimenta também é um rio presente na área de estudo e está localizado entre as bacias dos rios Calhau e Claro, é alimentado por córregos e igarapés cujas nascentes estão localizadas próximas ao bairro Vila Vicente Fialho, que se encontra intensamente urbanizado e tem sua foz localizada próxima ao final da Avenida Litorânea (Figura 2). O rio Claro (Figura 2), situado na franja costeira do município de São Luís, possui sua nascente no bairro Turu, tem aproximadamente 12,6 km de extensão e

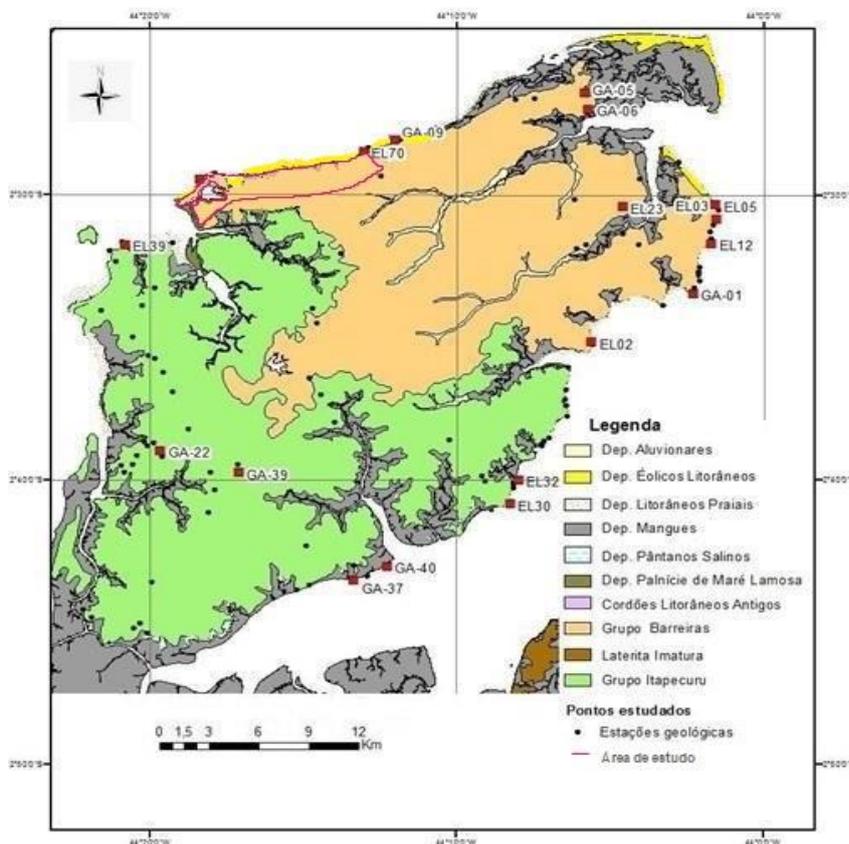
deságua na praia do Olho d'Água. E o rio Jaguarema (Figura 2) tem suas principais nascentes no município de São José de Ribamar, Maranhão, onde tem suas cabeceiras nos limites urbanos da cidade, e desagua no oceano entre as praias do Meio e Olho d'água no município de São Luís, dentro da área de pesquisa. Encontra-se intensamente degradado em suas nascentes e tem ao longo do seu curso impactos ambientais como o desmatamento e a ocupação desordenada. A bacia hidrográfica do rio Jaguarema apresenta um conjunto de danos ambientais decorrentes principalmente do uso irregular do solo observados na remoção da cobertura vegetal, descaracterização das nascentes, descarte de resíduos sólidos nas encostas, lançamento de efluentes domésticos *in natura*, assoreamento das margens e canalizações (GONÇALVES et al., 2010).

Geologia da área

A Ilha do Maranhão ocupa a parte setentrional do Golfão Maranhense, parte integrante da Bacia Costeira de São Luís, formada por rifteamento durante o Cretáceo (Eocretáceo-Albiano). Limita-se ao Norte pela plataforma continental, ao Sul pelos Altos Estruturais Arco Férrer-Urbano Santos, disposto aproximadamente E-W, a Leste pelo Horst de Rosário e a Oeste pelo Arco de Tocantins. Os sistemas de lineamentos indicam direção preferencial NE-SW e NW-SE nos terrenos cretáceos e neógenos da Bacia de São Luís (RODRIGUES et al., 1994).

A sedimentação na Bacia de São Luís iniciou-se com a deposição das rochas no Cretáceo representado na área de estudo pelo Grupo Itapecuru, tendo continuado no Neógeno com os arenitos, siltitos e argilitos do Grupo Barreiras e, finalmente, recobertos pelos Depósitos Quaternários como os aluvionares de mangues e eólicos litorâneos (ROSSETTI; GÓES; SOUZA, 2001; PEREIRA, 2006; SOUSA et al., 2012;) (Figuras 3 e 4).

Figura 3 - Ilha do Maranhão: Carta geológica.



Fonte - Correia Filho (2017); Martins (2019) com adaptações dos autores.

Figura 4 - São Luís (MA) – Vista parcial do afloramento dos Grupos Barreiras e Itapecuru, 2018.



Fonte - Dados da pesquisa, 2019.

Grupo Itapecuru

O Grupo Itapecuru é composto litologicamente por arenitos finos a médio, bem selecionados, intercalados a argilitos e, subordinadamente, conglomerados. São reconhecidas estruturas sedimentares oriundas da ação de correntes de maré, como estratificação cruzada, acamamento maciço ou deformado, laminação plano-paralelas e microlaminação cruzada (ROSSETTI e TRUCKENBRODT, 1997) (Figura 5).

Figura 5 - Farol de São Marcos, São Luís (MA): Formação do Grupo Itapecuru, 2018.



Fonte - Dados da pesquisa, 2019.

A exposição desse Grupo é muito restrita. Geralmente, encontra-se nas falésias de Alcântara (MA), com espessura de 20 metros, onde se encontra sua seção-tipo. Em São Luís ocorre na falésia da Praia do Boqueirão, ao lado do Porto de Itaqui e na praia de São Francisco na cidade de São Luís.

Com base em descrição detalhada de depósitos de idade Cretácea-Paleogena localizados na região de Alcântara (MA), Bacia de São Luís, Rossetti e Truckenbrodt (1997), elevaram a Formação Itapecuru à categoria de Grupo, sendo este composto da base para o topo pela Formação Alcântara e Formação Cujupe.

A Formação Alcântara é composta por um pacote de aproximadamente 30m de espessura, é constituída por arenito, pelitos e subordinadamente por calcário e conglomerados. Aflora principalmente nas falésias costeiras, como na área de estudo em São Luís (ROSSETTI e TRUCKENBRODT, 1997) (Figura 6).

Figura 6 - Praia Ponta D'Areia, São Luís (MA): Vista parcial do afloramento da Formação Alcântara, 2018.



Fonte - Dados da pesquisa, 2019.

As rochas da Formação Alcântara foram originadas por processos de tempestade e, subordinadamente, correntes de maré, em ambientes de shoreface/foreshore, canal de maré e laguna/washover que caracterizam sistemas de ilhas barreira, associados a vales incisos (ROSSETTI, 2001, 2005).

A Formação Cujupe é composta litologicamente por arenitos intercalados a argilitos e, subordinadamente, por conglomerados. Corresponde à unidade S3f de Rossetti (2001). Os arenitos são cauliniticos, com granulometria fina a muito fina, bem selecionados, de coloração branca ou rósea a amarelada. Os argilitos possuem coloração branca, cinza a violácea e os conglomerados são do tipo intraformacional, com clastos de argila e matriz arenosa.

Grupo Barreiras

Os sedimentos da Formação Barreiras são areno-argilosos de coloração róseo-avermelhada, siltitos maciços de cores amarela a ocre, ferruginizados e, ocasionalmente, conglomeráticos, desorganizados. Apresentam um perfil imaturo, com sedimentos inconsolidados, argilosos, com areias disseminadas, amarelados a avermelhados, com nódulos e blocos de concreções ferruginosas (RODRIGUES et al., 1994). Esses sedimentos foram individualizados em três unidades de fácies: conglomerática, arenosa e pelítica, típicas de ambiente continental e que estão intensamente afetadas pelo processo de laterização (Figura 7). A fácies conglomerática forma o pacote que protege a superfície dos tabuleiros.

Conforme Klein e Sousa (2012), os sedimentos da Formação Barreiras passam para a categoria de Grupo Barreiras. Os sedimentos desse grupo afloram, predominantemente, na Ilha do Maranhão, nas falésias, colinas, encostas e topos dos tabuleiros. A espessura não excede 30 metros. Esta Formação sobrepõe-se discordantemente a unidades mais antigas do Pré-Cambriano ao Cretáceo.

Figura 7 - Praia Ponta D'Areia, São Luís (MA): Vista parcial do afloramento do Grupo Barreiras, 2018.



Fonte - Dados da pesquisa, 2019.

Depósitos Quaternários

As coberturas quaternárias holocênicas, na área trabalhada, englobam os depósitos diferenciados em: depósitos de mangues (QHm), depósitos fluviomarinhos (QHfm), depósitos aluvionares e coluvionares (KLEIN e SOUSA, 2012). Esses depósitos estão localizados próximos ao litoral, geralmente submetidos à ação das marés e estão associados aos depósitos de cordões litorâneos. São constituídos por lamias arenosas, plásticas, não adensadas, maciças e bioturbadas, areias finas, quartzosas. São originados por processos de tração/suspensão subaquosa, pela ação das marés; representando fácies de intermaré/submaré rasa e pela migração de dunas de acreção lateral; constituem fácies de canal e barras de canal (VEIGA JUNIOR, 2000). Os manguezais são típicos e extensos nessas áreas (Figura 8).

Figura 8 - São Luís (MA): Vista parcial dos sedimentos de mangue dos Depósitos Quaternários, 2019.



Fonte - Dados da pesquisa (2020).

Avaliação dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Método GALDIT

Os parâmetros do Método GALDIT são classificados conforme Chachadi e Lobo Ferreira (2007), considerando os dados hidrodinâmicos dos poços tubulares como ocorrência de aquífero,

condutividade hidráulica, nível piezométrico, impacto da intrusão marinha e espessura do aquífero(Quadro 3).

Parâmetro “G” - Ocorrência do Aquífero

Na área de estudo há dois aquíferos, o aquífero Barreiras e o aquífero Itapecuru. O aquífero Barreiras é livre com sedimentos arenosos parcialmente consolidados constituídos por areia fina a média com intercalações de silte e argila. Sotoposta tem-se o aquífero semiconfinado Itapecuru pertencentes às rochas da Formação Cujupe e Alcântara, caracterizado por argilitos e folhelhos intensamente mosqueados.

O aquífero Barreiras aflora, predominantemente, na Ilha do Maranhão, nas falésias, colinas, encostas e topos dos tabuleiros. A espessura não excede 35 metros. O aquífero Itapecuru é semiconfinado segundo os resultados dos testes de bombeamento aplicados ao modelo proposto por Theis (1963).

Na área de estudo há ocorrência do aquífero livre e semiconfinado em todos os poços tubulares, com seções filtrantes em ambos os aquíferos, com exceção dos poços P25-01, P6-12 e P07 que estão apenas em aquífero livre. Logo, foi considerado o aquífero Barreiras para a avaliação da vulnerabilidade devido à formação estar abaixo da cota do nível do mar em todos os poços tubulares.

Desta forma, tomando por base os critérios utilizados pelo método GALDIT, segundo Chachadi e Lobo Ferreira (2001), o valor para parâmetro G (Ocorrência do aquífero) será 7,5, correspondente ao índice para aquíferos livres.

Parâmetro “A” - Condutividade Hidráulica

Os dados de condutividade hidráulica foram obtidos dos ensaios de bombeamento realizados nos poços presentes em todos os 32 Termos de Outorga dos poços tubulares disponibilizados. Foram interpolados os valores de condutividade hidráulica e posteriormente reclassificou-se com os valores dos índices do parâmetro A. Para toda a área de estudo foi atribuído o valor de 2,5 devido à condutividade hidráulica ser <5 m/d em todos os poços tubulares, indicando uma baixa condutividade.

Parâmetro “L” - Nível do Piezômetro

O nível piezométrico se refere à cota de nível de água subterrânea medida em relação ao nível do mar. Esse parâmetro permite determinar a carga hidráulica que pode fazer recuar o avanço da cunha marinha. O nível piezométrico foi calculado fazendo a diferença entre a cota do terreno e a profundidade medida ao nível estático. A cota do terreno foi determinada a partir da sobreposição dos pontos dos poços no mapa de altimetria da área de estudo, o que se reflete numa menor precisão no cálculo da carga hidráulica.

Foram interpolados os valores reais das cotas dos níveis piezométricos e posteriormente reclassificou-se o *raster* com os valores dos índices do parâmetro L. Na área a variação do Nível Piezométrico (NP) ocorre de 26m a -7m indicando os índices de 2,5 a 10 do parâmetro L, conforme (CHACHADI e LOBO FERREIRA, 2001). Atribuiu-se o nível piezométrico igual = 0 (zero) metros na linha de costa, nas margens da laguna da Jansen e foz do rio Anil.

Parâmetro “D” - Distância da Linha de Costa (metros)

A distância da linha de costa se refere à distância em metros em relação ao mar. É um parâmetro que permite avaliar a maior ou menor influência da maré em relação aos poços estudados.

Foram traçados intervalos de <500, 500-750, 750-1000, >1000, para a atribuição dos índices correspondentes a cada intervalo do parâmetro D (10, 7,5, 5 e 2,5), a partir da linha costeira do aquífero e da foz do rio Anil. A água de superfície da saída do Rio Anil é salobra, a vulnerabilidade à intrusão de água para essas áreas tem os mesmos efeitos práticos negativos que os da franja costeira.

Parâmetro “I” - Impacto do Estado Atual da Intrusão Marinha - razão $Cl / [HCO_3^- + CO_3^{2-}]$

As águas naturais possuem um conjunto de sais em solução, sendo sua concentração maior nas águas subterrâneas em comparação às águas superficiais. Nestas primeiras ocorrem por possuírem uma

capacidade de incorporar grande quantidade de materiais solúveis presentes no solo e nas rochas, sobre as quais circulam. Entretanto, estas quantidades variam também em função dos comportamentos geoquímicos dos compostos químicos envolvidos.

O parâmetro I reflete o desequilíbrio que pode existir entre a água do mar e a água doce, por alteração do equilíbrio hidráulico em condições naturais. Para analisar o estado atual da intrusão marinha na franja costeira de São Luís, o método GALDIT recomenda a utilização da razão $Cl^- / [HCO_3^- + CO_3^{2-}]$ para a caracterização do parâmetro I. Entretanto, optou-se por calcular a relação $[Cl^- / HCO_3^-]$ ignorando-se a concentração de CO_3^{2-} considerando que todas as amostras utilizadas no cálculo desta relação possuem pH inferior a 9. Conforme Domenico e Schwartz (1997) entre o pH 7 e pH 9 o Bicarbonato é a espécie mais abundante, apresentando o Carbonato concentrações muito baixas. Apenas a partir do pH 10, raro na natureza, é que o Carbonato se torna a espécie dominante e não se deve considerar como desprezável.

Para a avaliação do parâmetro I, foram utilizados os dados dos parâmetros físico-químicos presentes em 14 coletas de poços tubulares, coletados em campo, os quais foram previamente escolhidos de acordo com sua posição geográfica, visando, desta forma, a avaliar os quantitativos de cloretos e bicarbonatos presentes em cada amostra, e obter uma espacialização de melhor confiabilidade e menor tendência espacial das informações geradas. Essas amostras indicaram um pH médio de 5,89, fracamente ácido, teores médios de 33,14mg/l de cloreto e 2,94mg/l de HCO_3^- .

Para fim de melhor espacialização do parâmetro I, também foram adicionados pontos à linha de costa com valor igual a 2,5 para terem valor no parâmetro igual a 10, pressupondo que a água do mar possui valores de Cl^- / HCO_3^- elevados.

Os poços tubulares que apresentaram maior concentração da relação Cl^- / HCO_3^- foram os poços P25-01, P13, P32, P3, P03-09, P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07, P08, P09 e P 10, com valores reais variando de 2,59 a 5,7 (Tabela1). A partir da interpolação dos valores reais por *Triangular Irregular Network* (TIN) no *software* ArcGis.10 (ESRI, 2011), as amostras de pontos foram interpoladas de acordo como a influência de um ponto relativo a outro, depois foram reclassificados os valores de acordo com os índices do parâmetro I (Tabela 1). Foi testado também o interpolador *Inverse Distance Weighting* (IDW). Porém, o TIN foi melhor para criação de uma superfície a partir de pontos espaçados irregularmente, resultando numa distribuição mais uniforme da variável no mapa.

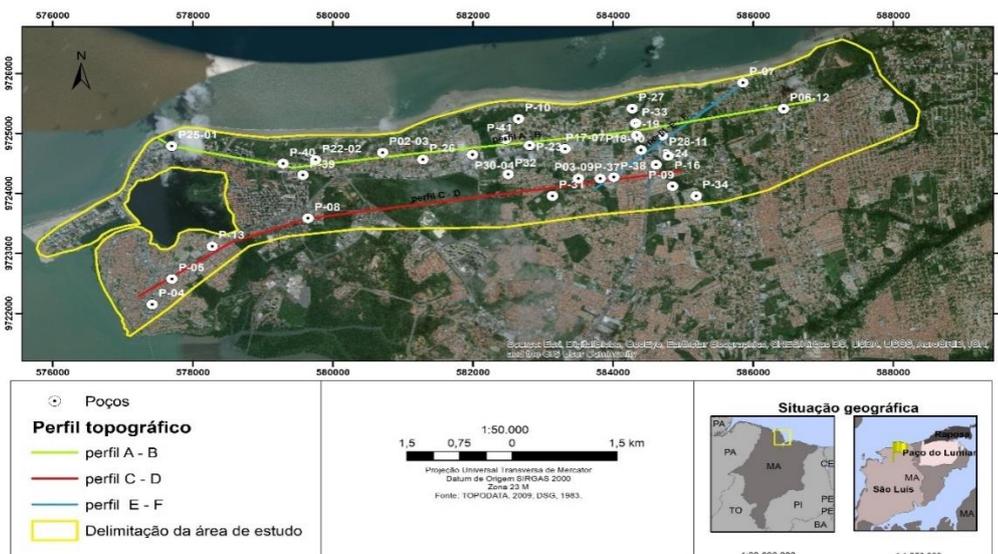
Tabela 1 - Dados dos parâmetros físico-químicos das águas dos poços tubulares na franja costeira de São Luís – MA.

POÇO TUBULAR	Cl ⁻ mEq/l	HCO ₃ ⁻ mEq/l	Cl ⁻ / HCO ₃ ⁻	Índice I
P25	1,1	0,19	,7	10
P40	4,8	1,27	3,7	10
P39	0,81	0,19	4,2	10
P02-03	1,05	1,34	0,78	2,5
P30-04	1,05	1,34	0,78	2,5
P03-09	0,90	0,20	4,5	10
P17	1,42	0,4	3,55	10
P18-10	1,06	0,25	4,24	10
P06-12	1	1,35	0,74	2,5
P31	0,62	0,13	4,7	10
P09	0,64	0,52	1,2	2,5
P07	0,64	0,52	1,2	5
P13	0,91	0,52	1,75	7,5
P26	0,80	0,59	1,35	5

Parâmetro - “T” - Espessura do Aquífero

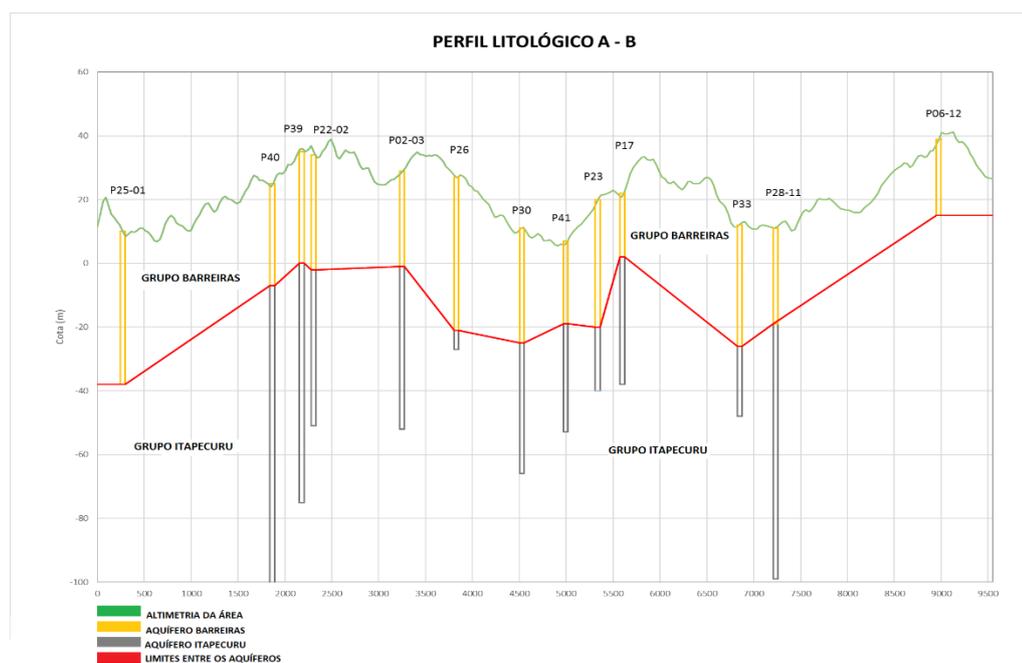
Foram elaborados três perfis litológicos (perfil A-B, C-D e E-F), cuja localização se pode ver na Figura 9 para descrever o comportamento dos aquíferos da área de estudo, utilizando-se um total de 26 poços tubulares para essa etapa, que constataram que o contato com o Grupo Itapecuru ocorre de forma brusca a gradacional geralmente passando da litologia arenosa para a argilosa e areno-argilosa. Nas Figuras 9, 10, 11 e 12 é possível visualizar a variação da espessura dos aquíferos da Formação Barreiras e Itapecuru na área de estudo.

Figura 9 - Franja costeira de São Luís (MA): Carta de localização dos perfis litológicos.



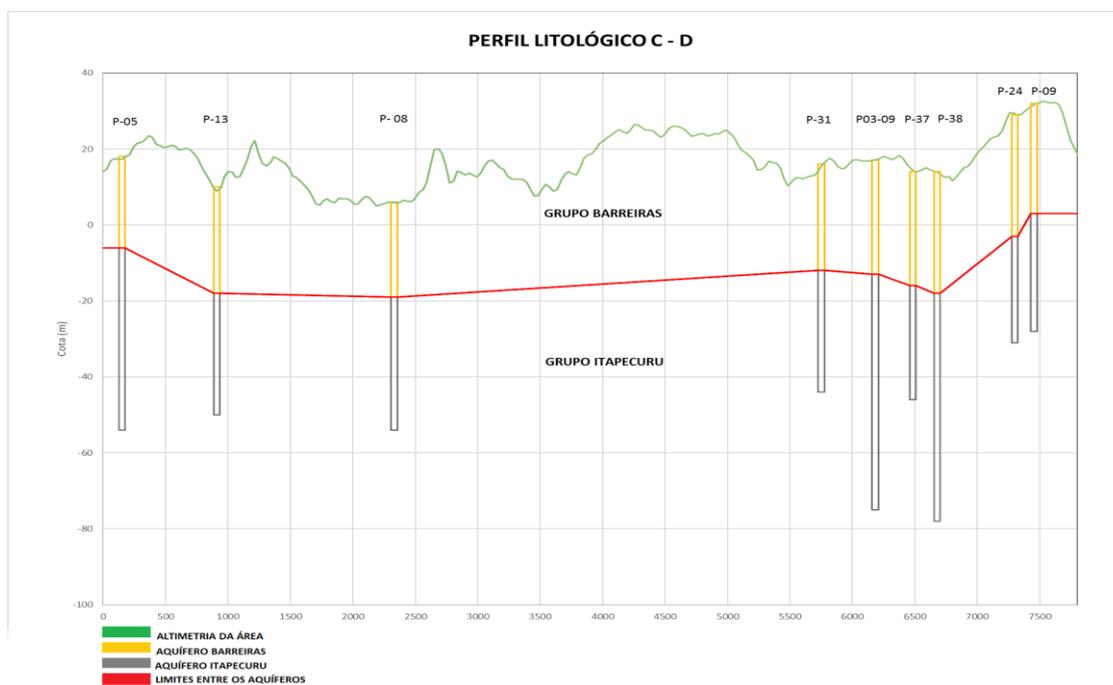
Elab. - Autores, 2019.

Figura 10 - Franja costeira de São Luís (MA): Perfil litológico A - B dos poços tubulares.



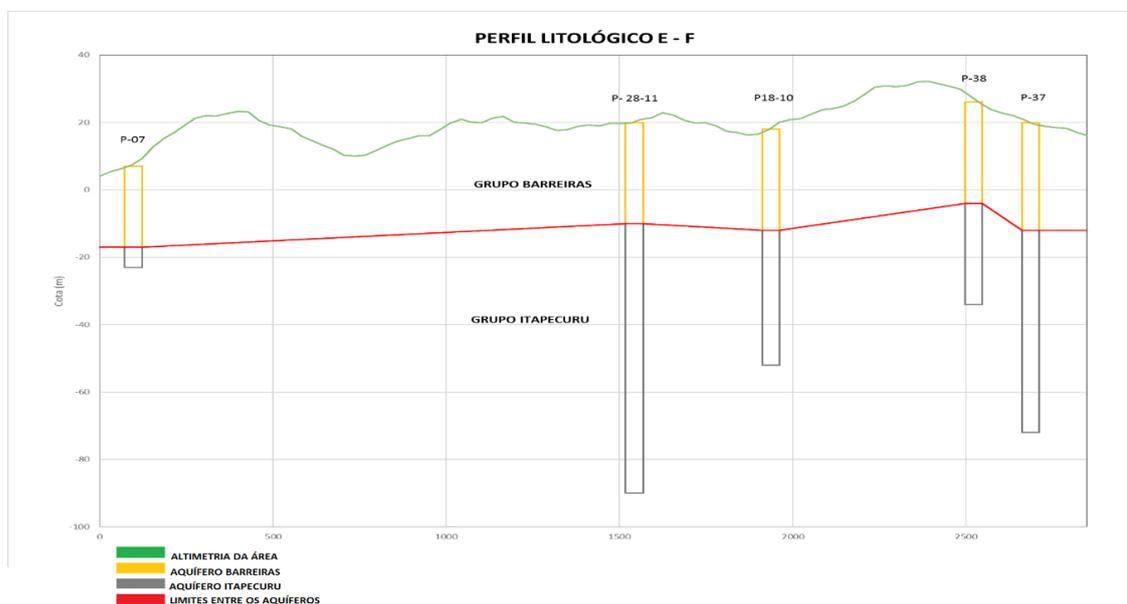
Fonte - Dados da pesquisa (2019).

Figura 11 - Franja costeira de São Luís (MA): Perfil litológico C - D dos poços tubulares.



Fonte - Dados da pesquisa (2019).

Figura 12 – Franja costeira de São Luís (MA): Perfil litológico E - F dos poços tubulares.



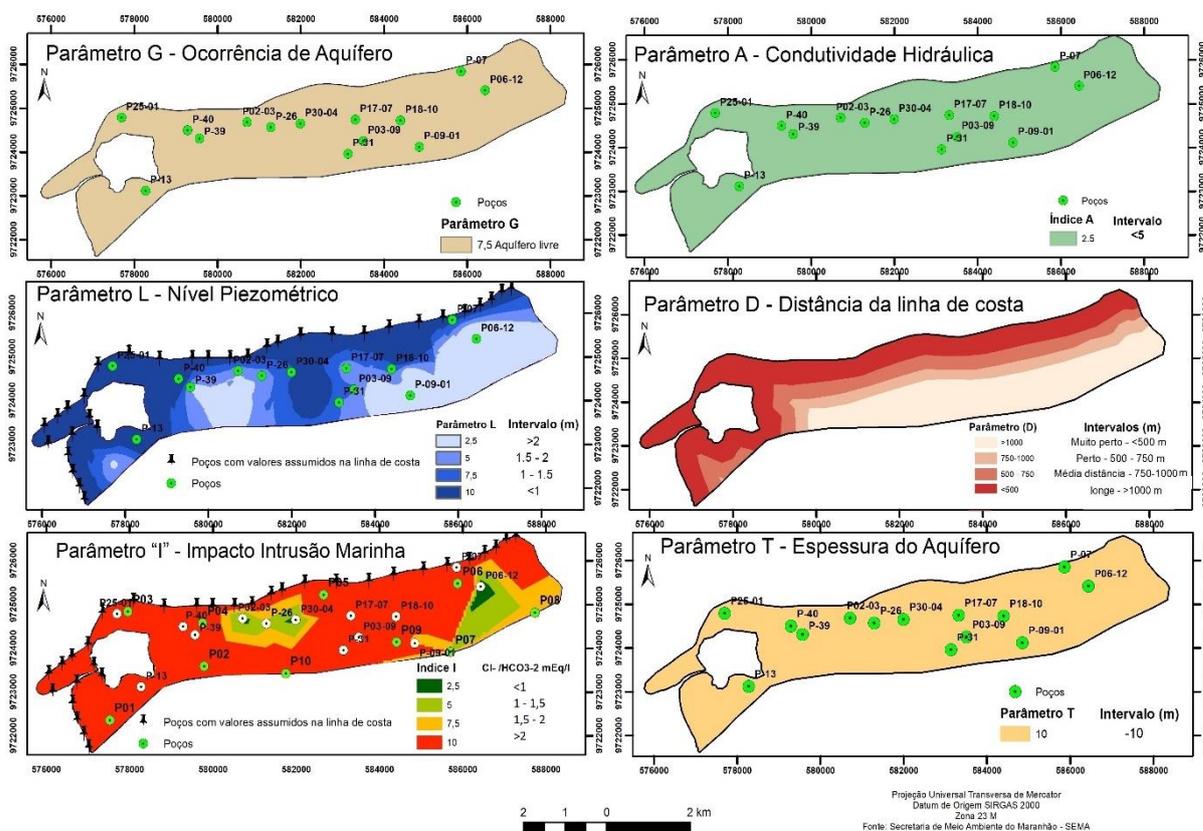
Fonte - Dados da pesquisa (2019).

A maior espessura para a Formação Barreiras é de 40 metros no poço P25-01, e a espessura média desta formação é de 25 metros, tendo o poço P06-12 de menor espessura com 10 metros. Dessa forma, adota-se o valor 10 do parâmetro T(CHACHADI e LOBO FERREIRA, 2001).

Vulnerabilidade à Intrusão Marinha na Franja Costeira de São Luís (MA)

Com cada um dos Índices GALDIT mapeados em arquivo raster e polígono em um aplicativo SIG, foi possível fazer a classificação da área costeira em categorias de vulnerabilidade à intrusão da água do mar. Dessa forma, as caracterizações espaciais de cada um dos fatores do método GALDIT e a sua combinação conjunta como vistas na Figura 13 permitem obter um índice ponderado que representa a vulnerabilidade à intrusão marinha do sistema aquífero costeiro em estudo.

Figura 13 - Franja costeira de São Luís (MA): Carta dos parâmetros de vulnerabilidade à intrusão salina – método GALDIT.



Elab. - Autores, 2019.

O método GALDIT leva em conta as águas vindas do mar ou de corpos d'água superficiais salinizados. No caso da franja costeira de São Luís, além do mar, temos os estuários de alguns rios como Anil, Calhau, Pimentas, Claro e Jaguarema; e, para a espacialização do método GALDIT, foram considerados os limites da linha de praia e os limites da laguna da Jansen devido ao alto índice de salinidade da água nessas áreas.

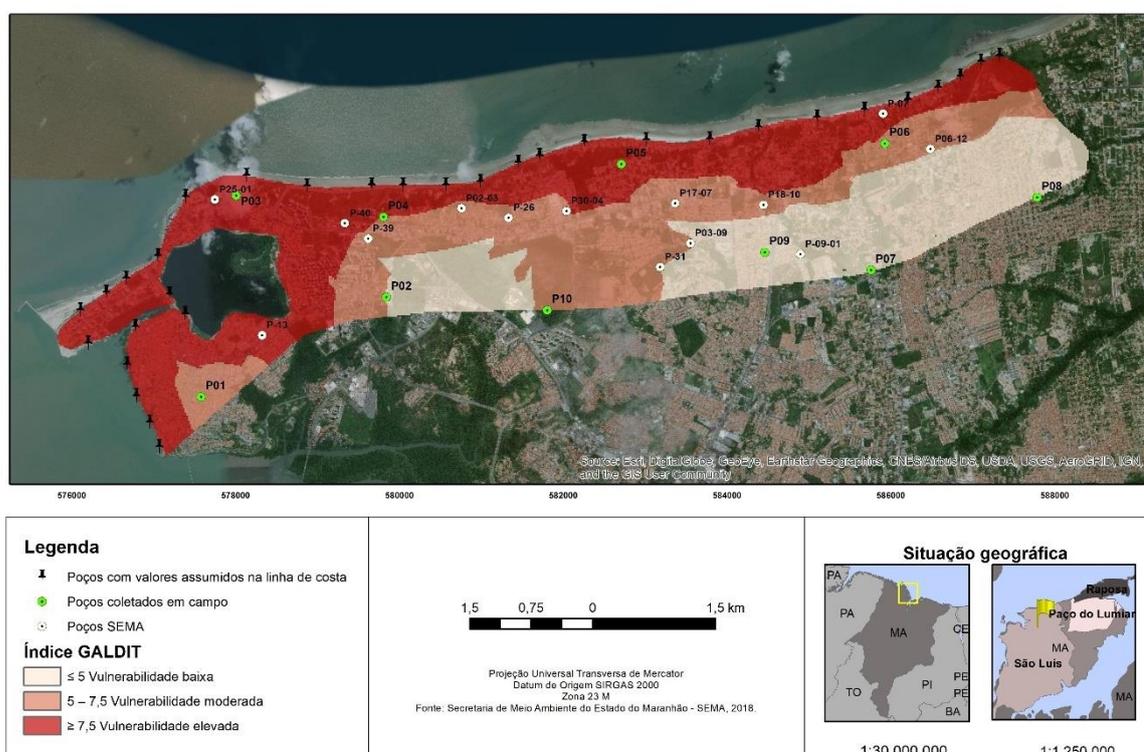
Os valores dos parâmetros variam entre 2,5 e 10 que correspondem, respectivamente, a uma vulnerabilidade à intrusão marinha baixa e alta. Os coeficientes de ponderação variam entre 1 (um) e 4 (quatro), valores que são associados, respectivamente, aos parâmetros com menor e maior influência na vulnerabilidade (Figuras 13 e 14).

Na franja costeira de São Luís o método GALDIT (Figura 14) indicou uma vulnerabilidade elevada ($\geq 7,5$) à intrusão marinha na porção Leste, na área da planície fluviomarinha do Rio Anil, no poço P-01, P-13 nas proximidades do bairro São Francisco, Ilhina e nos pontos P25-01 e P03 entre a Ponta do

Farol e Ponta D'areia. Detectada, também, nas desembocaduras dos rios Calhau, Pimenta, Claro e Jaguarema e nas áreas mais próximas à linha de praia nos poços localizados nos bairros São Marcos e Olho D'água nos poços tubulares P-40, P04, P05.

Houve a indicação de moderada vulnerabilidade nos poços P39, P02-03, P01, P26, P17-07, P06, P06-12, P31, P03-09 e seguindo até o bairro Cohafuma no poço tubular P10 próximo ao Sítio do Rangedor nas áreas mais urbanizadas presentes nos topos de tabuleiros com altitudes que variam de 20 a 58 metros. As áreas com menor vulnerabilidade foram encontradas a Oeste da área de estudo entre os poços tubulares P09, P09-21, P07 e P08, apresentando uma diminuição do índice de vulnerabilidade em direção ao continente como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Franja costeira de São Luís (MA): Carta de Vulnerabilidade à Intrusão Marinha – Método GALDIT.



Elab. - Autores, 2019.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A Ilha do Maranhão possui um ecossistema estuarino tendo uma altura de maré chegando a atingir 7 metros, com duas preamares e duas baixamares. São Luís é altamente influenciado pelas marés, condicionando a formação de uma cunha de água marinha no interior dos rios presentes na área, caracterizado pela presença dos mangues na planície fluviomarinha.

A cidade de São Luís apresenta grandes trechos de mangue e de estuários de rios. Tanto os mangues como os estuários apresentam salinidade elevada, principalmente nos períodos de estiagem, durante a preamar, o que aumenta o risco da salinização dos aquíferos. E, por meio dos mangues estuarinos e a Laguna da Jansen, as águas marinhas podem alcançar o aquífero livre Barreiras, e por percolação, podem também atingir o aquífero semiconfinado Itapecuru.

Após a aplicação da Metodologia GALDIT, observa-se que as áreas mais propensas à salinização são as próximas à linha de costa. Porém, a salinidade pode ser conduzida pelas calhas dos rios Anil,

Calhau, Pimenta e córregos que, por influência dos movimentos de maré, conduzem as águas marinhas para o interior da cidade de São Luís, como observado nos poços tubulares P30-04, P32, P19 e P18-10.

O mapeamento dos parâmetros do GALDIT considera que as áreas com maior densidade de poços tubulares e com poços tubulares mais próximos à faixa costeira apresentam média e elevada vulnerabilidade à intrusão marinha, o que pode estar associado à proximidade com o mar e à alta exploração de água subterrânea facilitando o avanço da cunha marinha. Essa proximidade de poços próximos à faixa costeira é um problema grave, pois influencia diretamente no avanço da cunha salina.

Observou-se também que os parâmetros que mais influenciaram o índice GALDIT foram o parâmetro L (nível piezométrico) e o parâmetro D (distância da linha de costa), demonstrando que o peso atribuído a estes dois parâmetros tem grande influência na geração da carta de vulnerabilidade. E isto ocorre devido estes dois parâmetros terem os pesos 4 (quatro) mais elevados.

Dessa forma, recomenda-se a adoção de gestão e planejamento territorial, em consonância com as propriedades geológico-geotécnicas da Ilha do Maranhão. Faz-se necessária também a gestão das áreas de tabuleiros, pois são áreas de recarga dos aquíferos, indispensáveis para manutenção das reservas hídricas da Ilha do Maranhão, pois, representam áreas altas e planas, onde a especulação imobiliária é muito forte e desenfreada. Essas áreas devem ser protegidas por lei municipal para manutenção das reservas hídricas genuinamente ludovicenses.

É importante também a preservação da área do Parque Estadual do Sítio do Rangedor, que apesar de possuir média vulnerabilidade de contaminação dentro dos seus limites, a sua área de entorno possui elevada vulnerabilidade. Sendo assim, faz-se necessária a implementação de políticas públicas voltadas para a preservação e conservação do Parque, uma vez que ele representa um bolsão verde junto ao centro urbano e área de grande importância para preservação dos recursos hidrogeológicos.

Fazem-se necessários e como medida imediata o monitoramento e fiscalização por parte dos órgãos competentes, referentes aos poços tubulares que apresentaram elevada vulnerabilidade, principalmente os poços com fins de exploração de água para comércio como os poços tubulares P33 e P07 e que estão inseridos próximos às áreas de entrada da cunha marinha. A vulnerabilidade do aquífero e o intenso uso e ocupação na franja costeira de São Luís indicaram a necessidade da realização de monitoramento dos poços tubulares e a aplicação urgente de gestão na exploração das águas subterrâneas considerando sua capacidade de vazão e seu o tempo de bombeamento diário.

É necessário implementar metodologias que preservem o aquífero, recuperem seus níveis de pressão, e reponham gradualmente os volumes retirados nos últimos anos. Uma alternativa que vem sendo adotada em áreas com escassez de água, como o Oeste dos EUA e Israel, é o aproveitamento de águas servidas, de rios ou de chuvas para a recarga artificial (PYNE, 1994). A recarga artificial do aquífero utilizando águas de chuva também tende a aliviar problemas de drenagem urbana. Chuvas de alta intensidade, como as que ocorrem em São Luís, tendem a gerar alagamentos, sendo gradualmente escoadas para o oceano.

Segundo Barbosa e Mattos (2008, p.2), esta modalidade de recarga de aquíferos é direcionada para os seguintes objetivos:

- proporcionar tratamento adicional de efluentes;
- aumentar a disponibilidade de água em aquíferos potáveis ou não potáveis;
- proporcionar reservatórios de água para uso futuro;
- prevenir subsidência do solo;
- prevenir a intrusão de cunha marinha, em aquíferos costeiros.

Portanto, as políticas de planejamento público e metodologias de recuperação de aquífero podem ser viabilizadas por meio de projetos de educação ambiental a serem oferecidos por instituições públicas de ensino ou Organizações Não Governamentais (ONGs), além da adoção de medidas mais eficazes na área da franja costeira do município de São Luís, e em outras áreas litorâneas pelos órgãos competentes.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) e ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em Lisboa, Portugal.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, C. M. de S.; MATTOS, A. Conceitos e Diretrizes para Recarga Artificial de Aquíferos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15ª, 2008, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: Revista Águas Subterrânea, 2008, p. 1-12.
- BARBOSA, A.C.L. **Espaço Urbano e Percepção do Ambiente**: o caso da “Avenida Litorânea” em São Luís do Maranhão – São Luís-MA – 2012. p.116. Dissertação (Mestrado em Cultura e Sociedade) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2012, p.50-58.
- BRASIL. **Resolução CONAMA nº 20**, de 18 de junho de 1986. Estabelece a classificação de águas doces, salobras e salinas. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília. 1986, p. 16.
- _____.DSG - Diretoria de Serviço Geográfico. **Zoneamento ecológico econômico do Maranhão**: Carta Topográfica São Luís, MA, 1983. Escala 1:10.000. Disponível em:<http://www.zee.ma.gov.br/subsidio/html/cart2.html>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- CHACHADI, A.G; LOBO FERREIRA, J.P. **Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method**. COASTIN – a coastal policy research newsletter, nº4, 2001, p. 7-9.
- _____.Sea water intrusion vulnerability using GALDIT method: Part 2 – GALDIT indicators description. In:Lobo Ferreira, J.P; Vieira, J. (eds).**Water in Celtic Countries**: Quantity, Quality and Climate Variability, IAHS Red Books, London, IAHS Publication 310, ISBN 978-1-901502-88-6, 2007, p. 172-180.
- CORREIA FILHO, F. L.**Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de São Luís**. Relatório Parcial 05 (RP05). CPRM, 2017.
- DOMENICO, P.A.;SCHWARTZ, F. W.**Physical and Chemical Hidrogeology**. 2 edition, Wiley and Sons, EUA, 1997. p. 505.
- ESRI – Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS Desktop**. Release 10. Redlands, CA: Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais, 2011. Disponível em:<https://www.esri.com/pt-br/home> Acesso em: 17 mar. 2017.
- GONÇALVES, C.S; CONCEIÇÃO, A. O.; SANTOS, J. N.; SANTOS, L. C. Estudo do quadro socioambiental da bacia hidrográfica do rio Jaguaré – São Luís (MA). In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 62ª, 2010, Natal. Editorial Científica. **Anais ...** Natal: 2010, p. 324.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**:São Luís. 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/sao-luis/panorama>. Acesso em: 17 mar. 2020.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: **Topodata**. 1983. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 06 out. 2018.
- KLEIN, E.L.; SOUSA, C.S. (org.) **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão**: Sistema de Informações Geográficas – SIG, Escala 1:750.000. Belém: CPRM, 2012.
- LOBO FERREIRA, J. P.; TERCEIRO, P.; OLIVEIRA, L. G. S.; BALDÉ, I. Avaliação da Vulnerabilidade à Intrusão Marinha da Zona de Influência de Maré da Guiné-Bissau. In: 8 SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8., 2011, Lisboa. **Anais ...**, 2011.Disponível em:https://www.aprh.pt/images/stories/pdf/as2011_lferreira2.pdf. Acesso em 26 out. 2018.
- MARTINS, B. N. **Avaliação da Vulnerabilidade à Intrusão Salina no Curso Inferior do Rio Bacanga Através do Método Galdit**. 2018. 103 p. Dissertação (Mestrado em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço) - Departamento de História e Geografia, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019, p.60.

ONU - Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos: Habitat. **Projeto Indicadores Socioeconômicos dos Municípios do Entorno da Refinaria Premium I**. Bacabeira, Imagem Pleiades 8 bits, WGS 84/UTM ZONE 23S, ERDAS Banda 3, 52477X,75464Y, Tamanho 0,5-0,5 pixel, convênio Petrobras/ Fundação Soudred. Universidade Federal do Maranhão, 2014.

PEREIRA, M. R. da S.; ALCÂNTARA JÚNIOR, J. A mobilidade e a expansão territorial na cidade de São Luís, MA: Um novo paradigma social na ocupação do espaço urbano. **Revista Caderno Metropolitano**, São Paulo, v. 19, n. 40, 2017, p. 977-998. <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2017-4012>

PEREIRA, E. D. **Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero do reservatório Batatã - São Luís (MA)**. 141 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006, p. 50-70.

PYNE, R. D. G. **Groundwater Recharge and Wells: a guide to aquifer storage and recovery**. Lewis Publishers, Florida, 1994, p. 376.

RODRIGUES, T. L. N. et al. (Org.) **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: São Luís**, Folha SA-23-2-A, Cururupu Folha SA-23-X-C, escala 1: 250.000, Brasília: CPRM. 1994, p. 185.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W. Classificação estratigráfica para o Albiano-Terciário Inferior na Bacia de São Luís, MA. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Série Ciências da Terra**, v.9, 1997, p.31-43.

ROSSETTI, D. F. Arquitetura Depositional da Bacia de São Luís-Grajaú. In: ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W. (Coords.). **O Cretáceo na Bacia de São-Luís Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 31-46. (Coleção Friedrich Katzer).

ROSSETTI, D. F. **Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão**. São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em:<<http://www.revistas.usp.br/guspsc/article/viewFile/27420/29192>>. Acesso em: 13 jul. de 2017.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; SOUZA, L.S.B. Estratigrafia da sucessão Pós-Barreiras com base em radar de penetração no solo. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v.19, n.2, 2001, p.113-130. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2001000200001>

SOUZA, C. S.; KLEIN, E. L.; VASQUEZ, M. L.; LOPES, E. C. S.; TEIXEIRA, S. G.; OLIVEIRA, J. K. M.; MOURA, E. M.; LEÃO M. H. B. Mapa Geológico e Recursos Minerais do Estado do Maranhão. In: Klein, E.L.; Sousa, C.S. (Org.) **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão: Sistema de Informações Geográficas – SIG**, Escala 1:750.000. Belém: CPRM, 2012.

STRAHLER, A.N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. New Haven: Transactions: American Geophysical Union, v.38, 1964, p. 913-920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

THEIS, C.V. Estimating the transmissivity of a watertable aquifer from the specific capacity of a well. **US Geological Survey Water supply Paper**.1963, p 332–336.

TONELLO, K.C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas**, Guanhães, MG. 2005. 69p. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005, p.35.

VEIGA JÚNIOR, J.P. **São Luís NE/SE, folhas SA-23-X e SA-23-Z**: Estados do Maranhão e Piauí. Brasília, DF, 2000.Escala 1:500.000. CPRM, 2000. p. 5-23. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.

Recebido em: 09/04/2022

Aceito para publicação em: 04/08/2021