



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS**

**ARNON LUIZ DA COSTA E SILVA**

**VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO**  
**BARREIRAS NO MUNICÍPIO DE COLARES (PA): subsídios**  
**para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos**

**BELÉM-PA**

**2025**

**ARNON LUIZ DA COSTA E SILVA**

**VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO  
BARREIRAS NO MUNICÍPIO DE COLARES (PA): subsídios  
para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Área do conhecimento: Hidrogeologia

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato do Espírito Santo dos Santos

BELÉM-PA

2025

**ARNON LUIZ DA COSTA E SILVA**

**VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO  
BARREIRAS NO MUNICÍPIO DE COLARES (PA): subsídios  
para a gestão dos recursos hídricos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Linha de Pesquisa: Hidrogeologia

Banca Examinadora: \_\_\_\_\_

**Prof. Raimundo Nonato do Espírito Santo dos Santos – Orientador**

Doutor em Geociências

Universidade Federal do Pará

\_\_\_\_\_  
**Prof. João Carlos Ribeiro Cruz – Membro interno**

Doutor em Geofísica

Universidade Federal do Pará

\_\_\_\_\_  
**Prof. Estanislau Luczynsk – Membro Interno**

Doutor em Energia

Universidade Federal do Pará

*Dedico este trabalho à minha mãe, mulher guerreira e de virtude, que nunca poupou esforços para me oferecer o que há de mais importante neste mundo, amor, conhecimento e fé. Que me guiou nos momentos mais difíceis, iluminando meus passos e minhas decisões.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus em primeiro lugar, por ter me proporcionado o dom da vida, e poder desfrutar deste mundo maravilhoso.*

*Aos meus amigos, que apesar das adversidades da vida sempre estão presentes, me proporcionando momentos mágicos.*

*Ao Prof. MSc. Marcelo Moreno da Universidade Federal Rural da Amazônia, pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.*

*Ao meu orientador Prof. Dr. Raimundo Nonato do Espírito Santo dos Santos, por se mostrar incansável no aperfeiçoamento deste trabalho, pela paciência e dedicação as minhas ideias.*

*Aos demais professores do programa, que através de seus ensinamentos me tornaram um profissional melhor, e levarei comigo para sempre cada ensinamento.*

*Ao meu amigo Paulo Eduardo, pelo apoio técnico que foi essencial para a elaboração deste trabalho, por não ter poupado esforços para me auxiliar no processamento das informações levantadas para o trabalho.*

*Aos meus familiares que de forma direta ou indiretamente foram essenciais nesta jornada, em especial ao meu tio Raimundo Carreira e minha tia Eliana Carreira por sempre me incentivarem a continuar nesta jornada, por mais adversa que ela poderia ser.*

*Por fim, no entanto, não menos importante, a minha querida mãe, Ana Laura, que me incentivou durante todo esse tempo para que este trabalho fosse finalizado, que me orientou nos momentos difíceis.*

## RESUMO

A vulnerabilidade de um aquífero está relacionada com a suscetibilidade do mesmo em ser atingido por uma carga contaminante, interagindo com os seus aspectos físicos, químicos e biológicos. É neste sentido de suscetibilidade à contaminação, que os aquíferos subterrâneos, associados a busca crescente por água de qualidade para atender as necessidades humanas, que se torna vital a importância da identificação das possíveis áreas de vulnerabilidade de aquíferos, seja para planejamento de uso e ocupação do solo, quanto para a busca por melhores condições de qualidade e disponibilidade de água subterrânea. Este estudo teve por objetivo avaliar a vulnerabilidade natural através do método Groundwater occurrence-GOD; Overall lithology of the unsaturated zone; and Depth of the water table) e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Município de Colares – PA, para subsidiar tomadas de decisões públicas. Sendo assim, o trabalho foi realizado no município de Colares, que é uma ilha com cerca de 250 km<sup>2</sup>. A sede deste Município localiza-se à margem da Baía do Marajó, distando 93,9 km da capital do Estado do Pará, com acesso pelas rodovias BR-316, PA-140 e PA-238. A metodologia contemplou a execução de três etapas: levantamento de dados primários, campo e laboratório, na primeira etapa foram obtidos dados e informações necessárias para o planejamento e execução das demais etapas, na etapa de campo foram desenvolvidas as atividades de rastreamento da localização dos poços; medição de nível estático dos poços usados para identificar o índice de vulnerabilidade através do método GOD; a localização geográfica com a utilização de Global Positioning System-GPS, de potenciais poluidores; o registro fotográfico dos poços; a análise físico-química da água dos poços. Enquanto na etapa laboratório, foi realizado a análise dos dados obtidos em campo, a elaboração dos mapas e a organização dos dados. Os resultados das análises dos parâmetros físico-químico revelaram que estão em conformidade com a Portaria GM/MS n.º 888/2021 que define a potabilidade da água e a Resolução CONAMA n.º 396/2008. Por fim, conclui-se que a elaboração do mapa de vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero pode contribuir no diagnóstico da qualidade das águas subterrâneas e para auxiliar no manejo e conservação da água.

**Palavras-chave:** águas subterrâneas; método god; direção de fluxo; impacto ambiental.

## ABSTRACT

The vulnerability of an aquifer is related to its susceptibility to being hit by a contaminant load, interacting with its physical, chemical and biological aspects. It is in this sense of susceptibility to contamination, that the underground aquifers, associated with the growing search for quality water to meet human needs, that becomes vital the importance of identifying the possible areas of vulnerability of aquifers, whether for planning land use and occupation, or for the search for better conditions of quality and availability of groundwater. This study aimed to evaluate natural vulnerability through the Groundwater occurrence-GOWN method; Overall lithology of the unsaturated zone; and Depth of the water table) and the management of groundwater resources in the Municipality of Colares – PA, to support public decision-making. Thus, the work was carried out in the municipality of Colares, which is an island with about 250 km<sup>2</sup>. The seat of this municipality is located on the shore of Marajó Bay, 93.9 km from the capital of the State of Pará, with access by highways BR-316, PA-140 and PA-238. The methodology contemplated the execution of three stages: survey of primary data, field and laboratory, in the first stage were obtained data and information necessary for the planning and execution of the other stages, in the field stage, the activities of tracking the location of the wells were developed; static level measurement of the wells used to identify the vulnerability index through the GOD method; the geographical location with the use of Global Positioning System-GPS, of potential polluters; the photographic record of the wells; the physico-chemical analysis of well water. While in the laboratory stage, the analysis of the data obtained in the field, the elaboration of the maps and the organization of the data were performed. The results of the analysis of the physicochemical parameters revealed that they are following Ordinance GM/MS no. 888/2021 that defines the potability of water and CONAMA Resolution no. 396/2008. Finally, it is concluded that the elaboration of the map of natural vulnerability to aquifer contamination can contribute to the diagnosis of groundwater quality and to assist in water management and conservation.

**Keywords:** groundwater; god method; flow direction; environmental impact.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fatores hidrogeológicos – método DRASTIC.....	24
Figura 2 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação. ....	29
Figura 3 - Mapa de localização das principais comunidades do município de Colares. ....	37
Figura 4 - Mapa de localização da área de estudo. ....	38
Figura 5 - Solos predominantes na Ilha de Colares. ....	39
Figura 6 - Caracterização da vegetação na Ilha de Colares. ....	40
Figura 7 - Caracterização do clima da região. ....	41
Figura 8 - Topografia da Ilha de Colares.....	42
Figura 9 - Geologia da Ilha de Colares.....	43
Figura 10 - Hidrografia da Ilha de Colares.....	44
Figura 11 - Vista geral do perfil litológico encontrado na praia .....	45
Figura 12 - Formação Massa d'água da Ilha de Colares.....	46
Figura 13 - Mapa de localização da área de estudo.....	47
Figura 14 - Mapa de vulnerabilidade do município de Colares. ....	48
Figura 15– A: Medidor de nível usado para a etapa de campo; B: GPS Garmin modelo Etrex 30s; Medidor Multiparâmetros HANNA HI 9828.multiparâmetro.....	49
Figura 16 - Mapa de localização dos poços cadastrados no SIEGAS na Ilha de Colares-PA..	51
Figura 17– Distribuição dos poços utilizados para caracterização da vulnerabilidade e perfis topográficos. ....	52
Figura 18– Poço para abastecimento da cidade de Colares.....	56
Figura 19– Poço para abastecimento do loteamento minha casa minha vida. ....	57
Figura 20– Poço para abastecimento da comunidade Jancolândia.....	58
Figura 21– Poço para abastecimento da comunidade Fazenda. ....	59
Figura 22– Poço para abastecimento da comunidade Guajará. ....	60
Figura 23– Poço para abastecimento da comunidade Candeúba.....	61
Figura 24– Poço para abastecimento da comunidade Maracajó.....	62
Figura 25– Poço para abastecimento da comunidade Ariri. ....	63
Figura 26– Poço para abastecimento da comunidade Genipaúba da Laura. ....	64
Figura 27– Poço para abastecimento da comunidade Genipaúba da Laura. ....	64
Figura 28 - Mapa de vulnerabilidade do município de Colares. ....	68
Quadro 1 - Listagem (check-list) das atividades, aspectos ambientais e os impactos negativos. .....	69
Figura 29 - Entrada do lixão da cidade.....	72
Figura 30 - Cemitério da Área Urbana. ....	72

Figura 31 - Mapa de localização dos potenciais poluidores.....	73
Figura 32 - Mapa de fluxo subterrâneo associado ao grau de vulnerabilidade. ....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Porcentagem do total de água doce mundial. ....	17
Tabela 2 - Características das classes do método AVI. ....	25
Tabela 3 - Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero à contaminação. ....	27
Tabela 4 - Legislações Estaduais referente a Recursos Hídricos. ....	35
Tabela 5 - Poços utilizados para a construção do mapa de Vulnerabilidade. ....	50
Tabela 6 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço do centro. ....	56
Tabela 7 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço do loteamento minha casa minha vida. ....	57
Tabela 8 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço do Jancolândia. ....	58
Tabela 9 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço do Fazenda. ....	59
Tabela 10 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço do Fazenda. ....	60
Tabela 11 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço da comunidade Candeúba. ....	61
Tabela 12 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço da comunidade Maracajó. ....	62
Tabela 13 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço da comunidade Ariri. ....	63
Tabela 14 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço da comunidade Genipaúba da Laura. ....	65
Tabela 15 - Informações dos poços cadastrados no SIAGAS utilizados neste estudo e com seus respectivos índices de vulnerabilidade. ....	66
Tabela 16 - Parâmetros físico-químico analisados. ....	77

## LISTA DE SIGLAS

<b>COSANPA</b>	COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARÁ
<b>CE</b>	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
<b>CPRM</b>	COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS
<b>CONAMA</b>	CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE
<b>DNPM</b>	DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL
<b>GOD</b>	GROUNDWATER OVERALL DEPTH
<b>NBR</b>	NORMAS BRASILEIRAS
<b>ORP</b>	POTENCIAL DE OXI-REDUÇÃO
<b>OD</b>	OXIGÊNIO DISSOLVIDO
<b>SEMAS</b>	SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE DO PARÁ
<b>STD</b>	SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS
<b>SIAGAS</b>	SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	16
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	16
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
<b>3.1 A importância das águas subterrâneas</b> .....	17
<b>3.2 Fontes potenciais de contaminação de águas subterrâneas</b> .....	19
<b>3.3 Vulnerabilidade dos aquíferos</b> .....	21
<b>3.4 Metodologias para identificar a vulnerabilidade de sistemas aquíferos</b> .....	23
3.4.1 Método DRASCTIC .....	23
3.4.2 Método AVI (Aquifer Vulnerability Index) .....	25
3.4.3 Método GOD (Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table).....	26
<b>4 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS</b> .....	30
<b>4.1 Aspecto Legal</b> .....	30
<b>4.2 Marcos legais das bases da evolução da gestão dos recursos hídricos do Estado do Pará</b> .....	35
<b>5.1 Localização</b> .....	38
<b>5.3 Vegetação</b> .....	39
<b>5.4 Clima</b> .....	40
<b>5.5 Topografia</b> .....	41
5.5.1 Plano .....	41
5.5.2 Suave ondulado.....	42
<b>5.6 Geologia</b> .....	42
5.6.1 Quaternário Cretáceo/Terciário .....	43
5.6.2 Quaternário .....	44
<b>5.7 Hidrografia</b> .....	44
<b>5.8 Hidrogeologia</b> .....	45
<b>6 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	47
<b>6.1 Levantamento de dados primários</b> .....	47
<b>6.2 Campo</b> .....	48
<b>6.3 Laboratório</b> .....	49
<b>7 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	55

<b>7.2 Vulnerabilidade .....</b>	<b>65</b>
<b>7.3 Potenciais Contaminantes .....</b>	<b>69</b>
<b>7.4 Análise da Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos.....</b>	<b>74</b>
<b>7.5 Qualidade da Água .....</b>	<b>77</b>
<b>8 CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), as fontes de águas subterrâneas exercem um relevante papel para atender as demandas dos vários usos da água no Brasil, como abastecimento público de água, dessedentação animal, irrigação, geração de energia, indústria, entre outros. Também, pelo fato de ter alta capacidade de armazenamento e resiliência em períodos prolongados de seca, ocasionados pelas mudanças climáticas fazem dos mananciais subterrâneos uma importante opção estratégica no período de escassez de água (ANA, 2017; Crispim *et al.*, 2017).

A vida no planeta Terra só é possível graças a presença de alguns elementos, entre eles estão o oxigênio, alimentos e água. Este último, é o constituinte inorgânico mais abundante na matéria viva, está presente em todos os processos bioquímicos do corpo humano e representa mais de 60% do seu peso, tornando a água um elemento definitivo na manutenção da vida neste planeta (Sperling, 2004).

Sendo assim, a água tem diversos usos em diferentes processos no cotidiano humano, como na indústria, na agropecuária, na piscicultura, no abastecimento humano, no transporte e na produção de energia elétrica. Para utilização de todos esses processos, a qualidade da água sofre alterações, seja química, física ou bacteriológica, pois essas alterações nem sempre são benéficas para o homem ou para o ecossistema na totalidade. Geralmente, o problema não é o seu uso, mas sim as características de quando é liberada de volta ao seu ciclo natural, ou seja, os usos dos quais necessitam alterar qualquer recurso hídrico de maneira que fique impróprio para consumo ou prejudicial para a vida aquática, necessita de um tratamento específico antes que este recurso volte ao seu processo de origem (ANA, 2019).

No Brasil, o uso da água de fonte subterrânea apresenta um crescimento, visto que em janeiro de 2008, foram cadastradas cerca de 145 mil fontes de abastecimento de mananciais subterrâneos, dos quais em sua maioria representados por poços tubulares. No entanto, até outubro de 2016, a quantidade de poços cadastrados foram aproximadamente 278 mil. Logo, este crescimento significativo no número de poços perfurados foi influenciado pelos problemas ocasionados pela escassez de água enfrentado em vários locais do país. Em geral, as águas subterrâneas no país apresentam boa qualidade, com propriedades físico-químicas e bacteriológicas apropriadas a vários usos, incluindo o consumo de águas minerais (Hirata *et al.*, 2019; ANA, 2017).

Neste sentido, quando relacionadas aos mananciais superficiais, possuem várias vantagens como melhor qualidade da água, reservas com grandes volumes de água, pouca perda

de água por evaporação, pequeno custo com infraestrutura, impactos ambientais menores, entre outros. Embora as fontes de águas subterrâneas sejam mais protegidas que as fontes superficiais, não estão completamente livres de contaminação. Na zona urbana, as águas subterrâneas estão sujeitas a diversas fontes de poluição, como a destinação ambientalmente inadequada dos resíduos sólidos, fossas rudimentares (fossas negras), postos combustíveis, cemitérios, lançamento de esgoto ao ar livre, entre outros, colocam em risco a qualidade natural dos mananciais subterrâneos (Albuquerque Filho *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2014; Crispim *et al.*, 2017).

De acordo com Borba *et al.*, (2014), a contaminação dos aquíferos subterrâneos tem sido um grave problema na gestão das águas subterrâneas, porque são apontados como fontes estratégicas para a sociedade. Logo, para amenizar este problema são utilizadas, em diversos lugares do planeta, em especial nos países mais industrializados, ações preventivas, visto que uma vez o aquífero contaminado, a sua recuperação é bastante onerosa e complicada.

Ressalta-se, que um dos principais mecanismos para preservar os mananciais subterrâneos, baseia-se em identificar a vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero, que mostra sua susceptibilidade a ser adversamente prejudicado por uma carga contaminante. Logo, estudos sobre a vulnerabilidade da água subterrânea por mapeamento são realizadas no estado do Pará para proporcionar uma estratégia para evitar a contaminação da água subterrânea (Carvalho *et al.*, 2020; De Matos; Mendes, 2012).

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi analisar e mapear a vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero da Ilha de Colares – PA, por meio de dados disponibilizados pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais/CPRM, através do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), empregando o método GOD (G - groundwater occurrence, O - overall litology of aquifer e D - depth of water) sugerido por Foster (1987). Além disto, também foi realizado um levantamento e identificação de fontes potenciais de contaminação na área de estudo com a finalidade de gerar informações para apoiar ações preventivas de controle de uso e qualidade das fontes de água subterrânea.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

- Avaliar a vulnerabilidade natural do aquífero Barreiras, por meio do método GOD (*Groundwater occurrence; Overall lithology of the unsaturated zone; and Depth of the water table*) e promover a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos do município de Colares - PA.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Analisar a qualidade da água de poços localizados no centro da cidade de Colares-PA, por meio da avaliação de parâmetros físico-químicos;
- Identificar os aspectos ambientais e os impactos negativos na área estudada;
- Disponibilizar informações que ajudem na tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos subterrâneos do município.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A importância das águas subterrâneas

A quantidade total de água doce no planeta é de aproximadamente  $3,5 \times 10^7$  km<sup>3</sup>. Em termos de disponibilidade de água doce, calcula-se que apenas 2,5% da quantidade total de água do mundo sejam água doce, e, destes, quase 70% estão atualmente presentes nas geleiras. Na Tabela 1, pode ser visto as reservas mundiais de água doce. Uma grande porcentagem da água doce do mundo está disponível como recurso de água subterrânea, muito do qual tem um período de renovação de mais de mil anos. Toda essa informação mostra que muito pouco do total da água doce que se encontra disponível na superfície (lagos, rios), ou na subterrânea recarregada em período curto (Whitman *et al.*, 2012).

Tabela 1 - Porcentagem do total de água doce mundial.

<b>LOCAL</b>	<b>PORCENTAGEM (%) DA ÁGUA DOCE MUNDIAL</b>
<b>Geleiras e cobertura permanente de água</b>	68,7
<b>Água subterrânea</b>	30,1
<b>Lagos</b>	0,26
<b>Umidade do solo</b>	0,05
<b>Atmosfera</b>	0,04
<b>Brejos e pântanos</b>	0,03
<b>Água biológica</b>	0,003
<b>Rios</b>	0,006

Fonte: Dados da Unesco – Wwap (2003).

O aquecimento terrestre e a escassez de água doce são considerados os problemas ambientais mais graves e complexos, neste caso o uso de água cresce continuamente em todo mundo, em particular na agricultura irrigada e no Brasil a ideia de abundância reforçou a cultura do desperdício (Uicn; Pnuma; WWF, 1991; Rebouças, 1999).

A maneira como os recursos hídricos são utilizados e a degradação desses recursos vem provocando uma crise de grandes proporções em muitos países, especialmente nos grandes centros urbanos. Esses problemas poderão se intensificar com a mudança climática decorrente do aumento da concentração de gases de efeito estufa. Particularmente nas regiões áridas e semiáridas, o aumento da temperatura do planeta entre 1 °C e 2 °C, combinado com uma redução de 10% no índice pluviométrico, poderá reduzir o escoamento anual em até 70% (Uicn; Pnuma; WWF, 1991, p.149).

Segundo Eckhardt *et al.* (2009), as águas subterrâneas vêm assumindo uma importância cada vez mais relevante como fonte de abastecimento, devido a uma série de fatores que restringem a utilização das águas superficiais. Além disso, estima-se que cerca de 76,85 milhões de habitantes domiciliados na área urbana são abastecidas por fonte de água subterrânea, e 3,87 milhões de estabelecimentos agropecuários no ano de 2017, faziam o uso de águas subterrâneas para atender suas demandas, sendo que 1,01 milhões de estabelecimentos tinham como fonte os poços tubulares (Hirata *et al.*, 2019; Aly Jr, 2019).

Bear e Verruijt (1987) definem o ato de gerenciar um sistema qualquer como sendo o de tomar decisões, dando às variáveis desta decisão valores numéricos com o fim de se atingir a transformação do estado de um dado sistema. Ou seja, trata-se da escolha da melhor forma, ou política, para se alcançar uma determinada meta ou objetivo. O gerenciamento de recursos hídricos é, portanto, o estabelecimento da política e das ações que objetiva a garantia do abastecimento às populações, na qualidade e quantidade exigidas, a qualquer tempo e em qualquer local.

Em se tratando de gestão de recursos hídricos subterrâneos, normalmente se avalia o potencial de um determinado aquífero por meios que viabilizem sua exploração, onde, da mesma forma, atendam uma determinada demanda, atual e/ou futura (Vidal, 2003). Para que este gerenciamento seja sustentável, deve objetivar o uso racional, o aproveitamento, a recuperação, a conservação e a proteção das águas subterrâneas, visando assegurar o atendimento das demandas tanto no presente como no futuro. Porquanto, esse gerenciamento requer o planejamento e o desenvolvimento de ações que busquem atender as demandas das diversas atividades humanas, considerando, como já dito, aspectos de qualidade e quantidade.

Luiz (2006), complementa que toda extração de água subterrânea acaba por provocar descensos nos níveis freáticos e piezométricos dos aquíferos, resultando em alguma interferência entre poços ou mananciais próximos. Dessa forma, gerir este recurso significa propor políticas que mantenham estas interferências e descensos em níveis toleráveis e que previnam uma redução nos rendimentos individuais dos poços ou mesmo rebaixamentos regionais, garantindo que o aquífero seja uma fonte segura e confiável de fornecimento de água, com otimização de investimentos.

Conforme definição presente na Resolução nº. 15 do CNRH de 11 de janeiro de 2001, as águas subterrâneas são aquelas armazenadas em subsuperfície, sob condições naturais ou artificiais. Em seu estado natural (preservado), é o resultado da interação de suas características físicas, químicas e biológicas com o meio geológico por onde circula. Por ocorrer na forma de

depósitos subterrâneos, possuem naturalmente maior proteção aos efeitos da poluição e contaminação que as águas superficiais. Esta proteção natural está relacionada à zona não saturada que, na prática, é quem oferece a barreira mais eficaz contra os efeitos da contaminação.

### **3.2 Fontes potenciais de contaminação de águas subterrâneas**

A proteção dos mananciais requer o conhecimento detalhado do perigo de contaminação associado à área, que, segundo Foster (1987), é uma função da interação entre a vulnerabilidade do aquífero à contaminação e a carga contaminante.

O processo de poluição da água pode ser entendido como o resultado da alteração de sua qualidade em decorrência de atividades de natureza antrópica, resultando em mudanças nas suas características preponderantes de uso. Entretanto, quando essa degradação possui potencial de prejudicar a saúde humana, é mais apropriadamente descrita como uma contaminação (Coelho, 2000).

Destaca-se, que as águas subterrâneas, são também, susceptíveis à contaminação. Para Foster *et al.* (2006), no mundo inteiro, os aquíferos estão sob perigo cada vez maior de contaminação em decorrência da urbanização, como consequência do desenvolvimento industrial, das atividades agrícolas e de mineração. Pois os custos para realizar a descontaminação de aquíferos são elevados, tornando o processo, quase sempre, inviável, assim é muito mais sensato preservar este recurso natural e renovável, do desenvolvimento industrial, das atividades agrícolas e de mineração.

Diante disso, a ocorrência dessas fontes de poluição pode atingir dimensões variáveis, dependendo de seu potencial poluidor, das características do resíduo e da natureza hidrogeológica da área atingida. A presença de uma “contaminação” de pequena escala (alta concentração) e de fácil identificação, é classificada como uma fonte de poluição pontual. Ao contrário, quando se trata de algo que se encontra disperso (concentração difusa), de difícil localização, podendo ter origem relacionada a fontes menores, classifica-se como sendo uma fonte de poluição difusa, uma terceira modalidade de poluição pode ser observada, denominada fonte de poluição linear, sendo caracterizada pela ação contaminante ao longo de rios e canais (Hypolito, 2004).

Estas fontes de poluição podem ser ainda classificadas em relação a sua evolução temporal como permanentes e intermitentes. A identificação da primeira situação está relacionada a grandes concentrações de poluentes, dispostos de maneira estratificada no

aquífero. Ao passo que a presença de uma estratificação menos densa (regionalizada), ocasionando uma mistura poluída ou não no aquífero, sugere uma fonte de poluição de caráter intermitente (Coelho, *op. cit.*).

Neste sentido, a contaminação das águas subterrâneas tem sido responsável pelo abandono de muitos poços e até a perda de porções importantes dos mananciais. Sua descontaminação ou limpeza normalmente envolve altos custos, além de ser um procedimento demorado e ainda com várias restrições técnicas (Ferreira *et al.*, 2009). Dessa forma, o procedimento mais eficiente no combate a esta degradação é a adoção de medidas preferencialmente protetoras que visem regular, ordenar e proibir algumas atividades nos domínios de certas áreas e que possam restringir o desenvolvimento de determinadas práticas ou atividades, potencialmente nocivas, através do emprego de dispositivos de segurança (Custódio, 1996).

Conforme Lobler e Silva (2015), as fontes potenciais de poluição de aquíferos são, também, os cemitérios, os quais liberam um líquido escuro de composição química potencialmente contaminante denominado necrochorume. Este líquido pode migrar no subsolo em diferentes escalas e com distintas composições físico-químicas e bacteriológicas. Também, os postos de combustíveis, que no país operam com óleo Diesel, gasolina e álcool, podem liberar os BTEX (Benzeno, Tolueno, Etileno e Xileno), além dos hidrocarbonetos totais do petróleo.

Ressalta-se, que as lavagens e os lava-a-jato de veículos automotores são potencialmente contaminantes do meio ambiente subterrâneo, necessitando de monitoramento constante em poços construídos para esse fim, buscando identificar e evitar vazamentos de distintos produtos químicos como os resíduos de óleos e graxas (Kemerich *et al.*, 2011).

Apresenta-se, as principais fontes com potencial de contaminação das águas subterrâneas, sendo: os lixões; aterros sanitários mal operados; acidentes com substâncias tóxicas em seu ambiente de produção e no transporte; atividades inadequadas de armazenamento, manuseio e descarte de matérias-primas, produtos, efluentes e resíduos em atividades industriais, como indústrias químicas, petroquímicas, metalúrgicas, eletroeletrônicas, alimentícias, galvanoplastias, curtume, etc.; atividades minerárias que expõem o aquífero; sistemas de saneamento *in situ*; vazamento das redes coletoras de esgoto; o uso incorreto de agrotóxicos e fertilizantes; bem como a irrigação (fertirrigação) que pode provocar problemas de salinização ou aumentar a lixiviação de contaminantes para a água subterrânea; e outras fontes dispersas de poluição.

Um indicador de poluição difusa de água subterrânea é o nitrato; sua origem está relacionada a atividades agrícolas e esgotos sanitários. Sendo o nitrato uma forma estável de nitrogênio em condições anaeróbias, esta substância pode ser considerada persistente e sua remoção da água para atender ao padrão de potabilidade que é de 10 mg/L, é onerosa e, por vezes, tecnicamente inviável, prejudicando o abastecimento público e privado (CETESB, 2019).

Outra forma de poluição das águas subterrâneas ocorre quando poluentes são lançados diretamente no aquífero, por meio de poços absorventes, ou seja, sem passar pelas camadas de solo. Além disso, poços mal construídos ou mal operados, tornam-se, caminhos preferenciais para que os poluentes atinjam diretamente as águas subterrâneas. O Potencial de poluição da água subterrânea depende:

- Das características, da quantidade e da forma de lançamento do poluente no solo.

Quanto maior a persistência ou menor capacidade de degradação e maior sua mobilidade no meio solo e água subterrânea, maior o potencial de poluição. Aliado a isso, uma pequena quantidade de poluentes em regiões muito chuvosas, pode transportar rapidamente as substâncias para as águas subterrâneas, mesmo considerando a capacidade do solo em atenuar os efeitos.

- Da vulnerabilidade intrínseca do aquífero.

Deste modo, a vulnerabilidade de um aquífero pode ser entendida como o conjunto de características que determinam o quanto ele poderá ser afetado pela carga de poluentes. São considerados aspectos fundamentais da vulnerabilidade: o tipo de aquífero (livre a confinado), a profundidade do nível d'água, e as características dos estratos acima da zona saturada, em termos de grau de consolidação e litologia (argila a cascalho).

Uma vez poluídas ou contaminadas, as águas subterrâneas demandam um elevado dispêndio de recursos financeiros e humanos para sua remediação, o que de modo geral é atingido ao final de vários anos. Desta forma, devem ser tomadas medidas preventivas para sua proteção, associadas ao controle de poluição na totalidade.

### **3.3 Vulnerabilidade dos aquíferos**

No que concerne a suscetibilidade, apresentada por um aquífero frente aos riscos oferecidos por atividades que possam comprometer ou deteriorar a qualidade de suas águas tem recebido várias interpretações. As inúmeras variáveis envolvidas e a própria abrangência do

termo “vulnerabilidade” talvez justifiquem esta dificuldade. Sua introdução à literatura hidrogeológica foi realizada por Margat (1960, *apud* Marcelino, 1999) para sintetizar as características naturais dos aquíferos relacionadas com os processos que regem a contaminação da água subterrânea.

A partir daí, várias outras definições foram cunhadas por diferentes autores. Duarte (1980) observa que a “noção de vulnerabilidade dos aquíferos à poluição integra diferentes fatores físicos e estáveis, determinando a situação em que se encontra o aquífero em suas condições naturais, mais ou menos expostos à poluição a partir da superfície do solo”. Para Foster e Hirata (1991), a vulnerabilidade natural de um aquífero é o reflexo de suas características intrínsecas, como, exemplo, a heterogeneidade e a anisotropia do meio. Rebouças (1994) observa que vulnerabilidade é uma função das características de porosidade/permeabilidade, tempo de trânsito e capacidade de atenuação físico-bioquímica do meio aquífero. Por outro lado, conforme o relatório do Instituto Geológico (IG)/Cetesb/DAEE, do ano 1997, intitulado *Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo*, a vulnerabilidade de um aquífero corresponde à sua maior ou menor suscetibilidade de ser afetado por uma carga poluidora.

Pois o conceito de análise de vulnerabilidade pode, ser formalizado como o conjunto de características intrínsecas dos estratos entre a zona saturada e a superfície do solo, o que determina sua suscetibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante que é, será ou pode ser aplicada na região acima do nível freático (Foster, 1987). Nesse sentido, faz-se, importante se atentar para o tipo de carga contaminante, distinguindo os conceitos de vulnerabilidade integrada e vulnerabilidade específica. Esses conceitos diferem pelo tratamento geral (integrado), considerando um contaminante universal em condições típicas de poluição ou o tratamento separadamente (específico) para cada contaminante, grupos de contaminantes (nutrientes, patógenos, microrganismos, metais pesados etc.) ou atividades contaminantes (Tavares *et al.*, 2009).

Como síntese destas várias interpretações e a qual foi tomada como referência para o presente estudo, a vulnerabilidade significa a maior suscetibilidade de um aquífero de ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta a ele, é razoável dizer que o maior ou menor grau de vulnerabilidade apresentado por um aquífero, diante de uma fonte potencialmente poluidora ou contaminante, irá depender de fatores intrínsecos ao próprio aquífero como a heterogeneidade e anisotropia do meio.

Pois que, os atuais programas de proteção da qualidade das águas subterrâneas, adotados em vários países, envolvem duas condutas básicas: uma voltada ao sistema de captação, estabelecendo-se ao redor do mesmo uma área de proteção ou perímetros de proteção (PPPs), e outra voltada para o aquífero, portanto, mais abrangente, onde são estabelecidas restrições de uso da terra frente à vulnerabilidade do manancial.

Portanto, a estratégia baseada em PPPs seria mais indicada para aquíferos relativamente homogêneos e de porosidade primária, adaptando-se relativamente bem às regiões pouco povoadas, onde não existam conflitos de interesses. Ao passo que a estratégia de mapeamento da vulnerabilidade, por ser mais ampla, protege o aquífero em sua totalidade, sendo mais adequada ao planejamento de uso e ocupação do solo ou a programas de proteção de recursos hídricos subterrâneos quando da necessidade do estabelecimento de áreas críticas ou de atividades potencialmente poluidoras (Hirata, 1994).

### **3.4 Metodologias para identificar a vulnerabilidade de sistemas aquíferos**

A seguir serão descritas três metodologias para se definir a vulnerabilidade de sistemas aquíferos: (1) DRASTIC, desenvolvida pela agência ambiental norte-americana EPA, (2) AVI (*Aquifer Vulnerability Index*) (Van Stempvoort *et al.* 1992) foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisa Hidrológica do Canadá (NHRI), uma maneira mais simplificada, na qual são considerados valores estimados do potencial de recarga do aquífero e a distância entre a superfície topográfica e o lençol freático e (3) GOD, a metodologia que considera o tipo de aquífero considerado, a litologia e a profundidade do lençol freático.

#### **3.4.1 Método Drasctic**

Segundo Guiguer e Kohnke (2002), DRASTIC foi desenvolvido pela EPA para ser um sistema padronizado de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos frente a eventos de poluição. O principal objetivo da metodologia é de auxiliar na alocação de recursos e na priorização das diversas atividades relacionadas às águas subterrâneas. Utilizando-se mapas de vulnerabilidade, pode-se, por exemplo, definir quais áreas deverão ser monitoradas de maneira mais intensiva num estudo de monitoramento. DRASTIC também pode ser utilizado para definir quais áreas devem ser protegidas para garantir a integridade do aquífero em termos de poluição. O modelo segue as seguintes premissas:

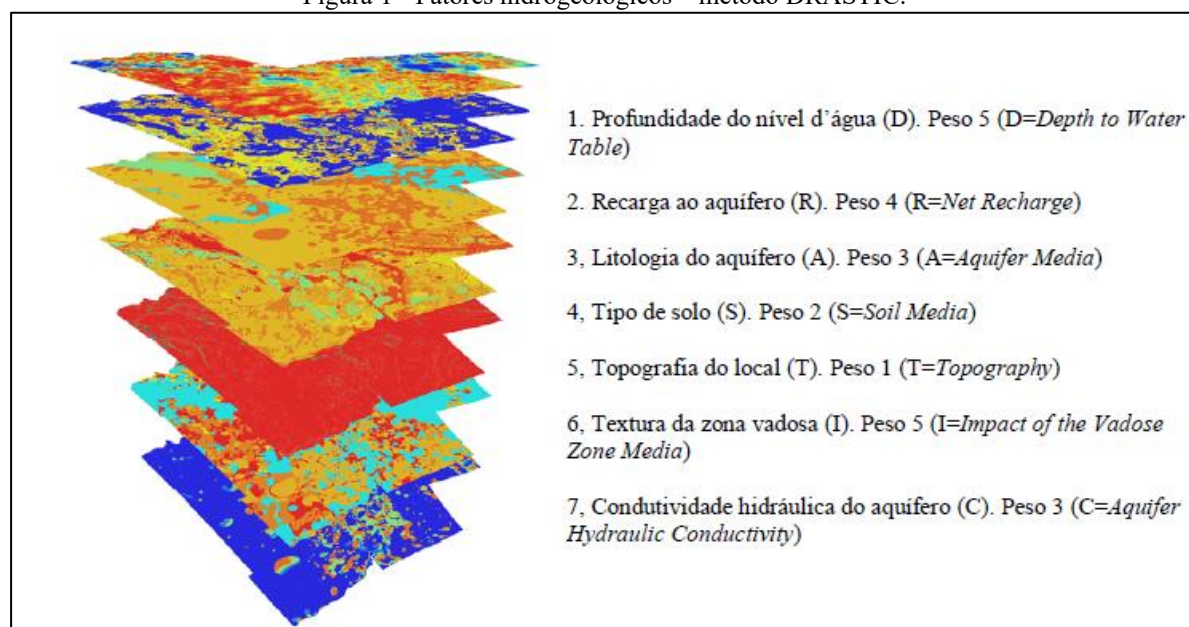
- O contaminante é inserido na superfície.
- O contaminante atinge a água subterrânea através da precipitação.

- O contaminante possui a mobilidade da água.
- A área a ser avaliada precisa ter uma dimensão de no mínimo 40 hectares.

DRASTIC não foi desenvolvido para acessar casos em que o poluente é introduzido em profundidade no aquífero, como, exemplo, no caso de vazamentos em tanques enterrados, lagoas de resíduo ou poços de injeção. Esta metodologia não substitui trabalhos de investigação em áreas contaminadas, não permitindo, por exemplo, determinar se um dado local é apropriado para servir de aterro a resíduos industriais. (Guigue; Kohnke, 2002). No entanto, pode-se utilizar as informações fornecidas pela metodologia na tomada de decisões para áreas contaminadas.

A metodologia considera sete fatores hidrogeológicos aos quais são atribuídos números  $r$  de 1 a 10 dependendo da faixa de valores. Estes são multiplicados por pesos  $w$  que variam de 1 a 5, sendo que o fator mais significativo recebe o peso 5 e o menos significativo 1 (figura 1) (Guigue; Kohnke, 2002). São eles:

Figura 1 - Fatores hidrogeológicos – método DRASTIC.



Fonte: Guiguer e Kohnke (2002).

Deste modo, o índice DRASTIC é calculado pela seguinte fórmula:

$$\text{Índice DRASTIC} = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw$$

O menor valor possível é 23, no caso em que os números atribuídos às faixas de valores são todos 1, e o maior valor é 230.

Os índices calculados podem ser utilizados para avaliar, de uma maneira relativa, a vulnerabilidade do sistema aquífero à poluição. Quanto maior o índice DRASTIC, tanto maior

a vulnerabilidade do aquífero à contaminação. No entanto, um valor baixo do índice não significa que não possa ocorrer contaminação, apenas que ela será menos provável e menor que em outras áreas (Abbey *et al.*, 2001).

### 3.4.2 Método AVI (Aquifer Vulnerability Index)

Nesta metodologia são utilizados para o cálculo do índice de vulnerabilidade os fatores Hidrogeológico: potencial de recarga ao aquífero (que considera a condutividade hidráulica do meio, o gradiente hidráulico e a porosidade) e a profundidade do nível d'água. Fatores como a capacidade de atenuação natural do solo não são considerados. Nesta metodologia divide-se a profundidade do nível d'água pelo potencial de recarga, obtendo-se como resultado o tempo de percurso vertical. Este é um valor estimado de quanto tempo um contaminante dissolvido levará para atingir o aquífero. Estes tempos de percurso são divididos em 5 classes. A Tabela 2 mostra as características das classes.

Tabela 2 - Características das classes do método AVI.

<b>Vulnerabilidade Intrínseca</b>	<b>Tempo de percurso vertical</b>	<b>Características da Vulnerabilidade do Aquífero</b>
<b>Classe 1</b>	< 5 anos	A água chega muito rápido ao aquífero através de material de alta condutividade hidráulica (areia/cascalho).
<b>Classe 2</b>	5 - 10 anos	A água chega rápido ao aquífero, sendo que ambos, o material e a distância ao aquífero, controlam a taxa de recarga.
<b>Classe 3</b>	10 - 100 anos	A água chega devagar ao aquífero sendo que ambos, o material e a distância ao aquífero, controlam a taxa de recarga.
<b>Classe 4</b>	> 100 anos	A água chega muito devagar ao aquífero através de material de baixa condutividade hidráulica (silte/argila).
<b>Classe 5</b>	Não ocorre fluxo descendente	A mais baixa vulnerabilidade, com fluxo ascendente ou gradiente próximo a zero.

Fonte: Foster *et al.* (2002).

Para se determinar as áreas que merecem uma atenção especial das autoridades responsáveis pelos recursos hídricos, pode se sobrepor perímetros de proteção de poços aos mapas de vulnerabilidade de aquíferos, traçando polígonos de intersecção.

### 3.4.3 Método GOD (Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table)

Estas duas metodologias descritas anteriormente requerem uma abundância de dados (dados sobre geologia, profundidade do lençol freático, condutividade hidráulica, porosidade, recarga, uso do solo entre outros), que muitas vezes não se encontram disponíveis, principalmente em países em desenvolvimento. A metodologia GOD (Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table) desenvolvida pela Organização Mundial de Saúde atende justamente a este requisito, o de utilizar informações comumente disponíveis em países em desenvolvimento. As informações utilizadas nesta metodologia são:

1. Ocorrência do lençol freático (livre, confinado, semiconfinado)
2. Litologia da zona vadosa e camadas confinantes
3. Profundidade do lençol freático (espessura da zona vadosa)

Nesta metodologia um índice é atribuído a cada um destes tipos de informação, sendo que o valor 1 é atribuído no caso de a vulnerabilidade ser a maior. Estes índices são multiplicados entre si para produzir a classificação final, que é então transformada em vulnerabilidade de aquíferos, variando entre extrema (por exemplo: aquíferos livres, rasos e de litologia grossa) a desprezível (aquíferos confinados ou aquíferos livres profundos com solos impermeáveis).

O método GOD de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação foi amplamente testado na América Latina e no Caribe durante a década de 1990 e, graças a sua simplicidade conceitual e de aplicação. Para determinar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, são considerados dois fatores básicos:

- O nível de inacessibilidade hidráulica da zona saturada do aquífero
- A capacidade de atenuação dos estratos de cobertura da porção saturada do aquífero.

Esses fatores, no entanto, não podem ser medidos diretamente e dependem, por sua vez, da combinação de outros parâmetros (Tabela 3). Uma vez que geralmente não se dispõe de dados sobre muitos desses parâmetros, a simplificação da lista é uma medida inevitável se o objetivo é desenvolver um esquema de mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

Com base em tais considerações, o índice de vulnerabilidade GOD (Foster, 1987; Foster; Hirata, 1988) caracteriza a vulnerabilidade do aquífero à contaminação tendo em conta os seguintes parâmetros (geralmente disponíveis ou facilmente determinados):

- O confinamento hidráulico da água subterrânea no aquífero em questão;
- Os estratos de cobertura (zona vadosa ou camada confinante), em termos da característica hidrogeológica e do grau de consolidação que determinam sua capacidade de atenuação do contaminante;
- A profundidade até o lençol freático ou até o teto do aquífero confinado.

Tabela 3 - Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

COMPONENTE DE VULNERABILIDADE	DADOS HIDROGEOLÓGICOS	
	Idealmente Necessários	Normalmente Disponíveis
Inaccessibilidade Hidráulica	grau de confinamento do aquífero	tipo de confinamento da água subterrânea
	profundidade até o lençol freático ou a posição da água subterrânea	profundidade até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado
	condutividade hidráulica vertical e teor de umidade da zona não saturada (zona vadosa) ou camada confinante	
Capacidade de Atenuação	distribuição granulométrica dos sedimentos e fissuras na zona vadosa ou camada confinante	grau de consolidação/fissuração desses estratos
	mineralogia dos estratos na zona vadosa ou camada confinante	característica litológica desses estratos

Fonte: Foster *et al.* (2002).

Esses parâmetros abrangem, ainda que apenas no sentido qualitativo, a maioria dos que constam na Tabela 3.

A metodologia empírica proposta para estimar-se a vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster; Hirata, 1988) envolve alguns estágios distintos:

- primeiro, identificação do tipo de confinamento de água subterrânea, com a posterior indexação desse parâmetro na escala de 0,0 – 1,0;
- segundo especificação dos estratos de cobertura da zona saturada do aquífero em termos de (a) grau de consolidação (e, portanto, provável presença ou ausência de permeabilidade por fissuras) e (b) tipo de litologia (e, portanto, porosidade indiretamente

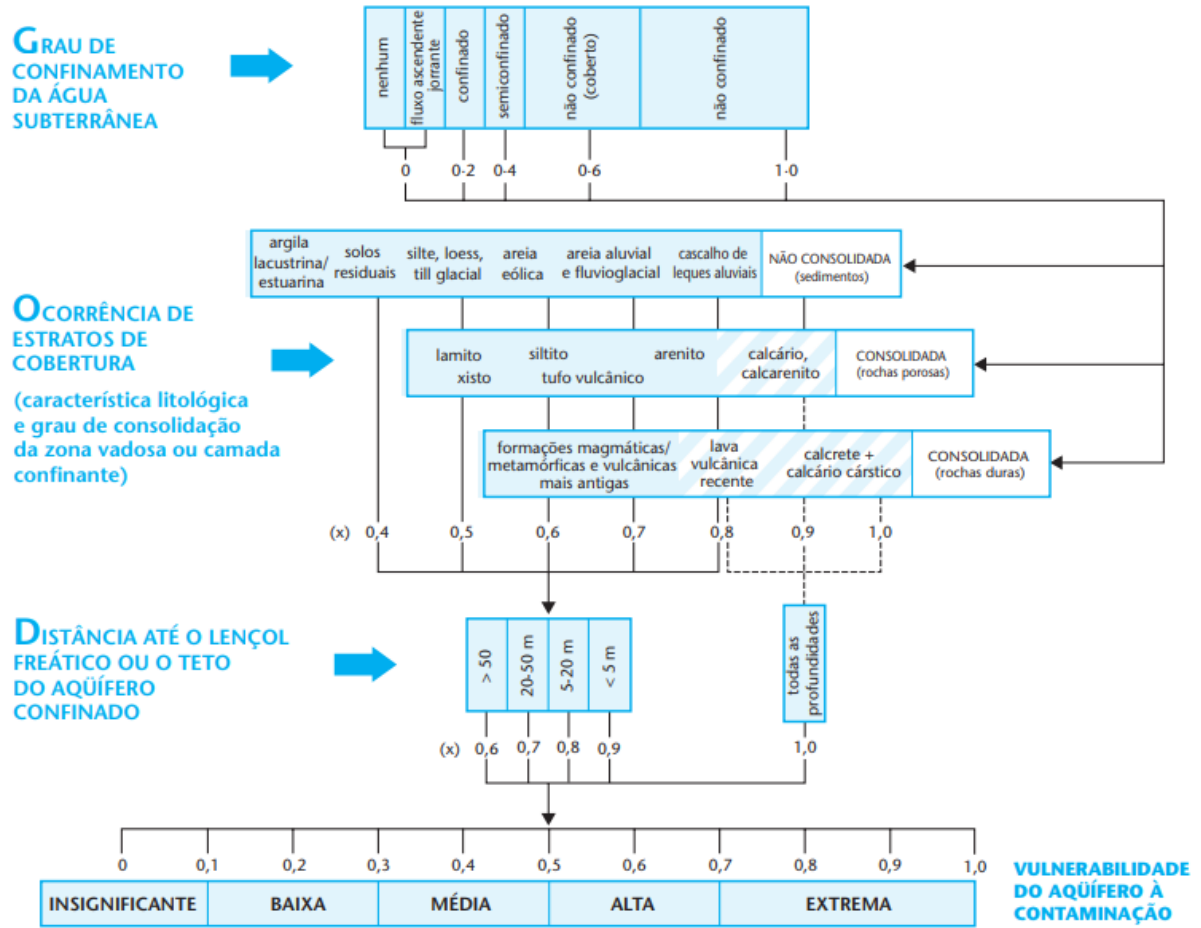
dinâmico-efetiva, permeabilidade da matriz e teor de umidade da zona não saturada ou retenção específica); isto leva a uma segunda pontuação, numa escala de 0,4 – 1,0;

- Terceiro, estimativa da profundidade até o lençol freático (de aquíferos não confinados) ou da profundidade do primeiro nível principal de água subterrânea (para aquíferos confinados), com posterior classificação na escala de 0,6 – 1,0.

O índice final integral de vulnerabilidade do aquífero é o produto dos três índices desses parâmetros (Figura 2). Note-se que a figura apresenta algumas modificações em relação à versão original (Foster; Hirata, 1988), como reflexo dos resultados obtidos com as experiências de aplicação desse método durante a década de 1990. As modificações incluem:

- Uma pequena redução nos índices do parâmetro “distância até a água subterrânea”;
- Uma simplificação na caracterização geológica da “ocorrência de estratos de cobertura para “rochas potencialmente fraturadas de vulnerabilidade intrínseca intermediária”;
- Elucidação do fator “grau de confinamento da água subterrânea”, com respeito aos aquíferos semiconfinados.

Figura 2 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.



Fonte: Adaptado de Foster *et al.* (2006).

Nota-se, que nos lugares com uma sequência variável de depósitos, para a especificação da ocorrência de estratos de cobertura deve-se selecionar a litologia predominante ou limitante, em termos de sua permeabilidade.

## 4 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

### 4.1 Aspecto Legal

O primeiro instrumento legal que dispôs sobre águas no Brasil foi o Decreto-lei n.º 22.643 de 10 de julho de 1934, denominado “Código das Águas”, este instrumento jurídico foi um marco no gerenciamento de recursos hídricos do país, disciplinando a classificação e utilização da água, do ponto de vista econômico e dominial, isto é, seu domínio poderia ser tanto público como privado.

Diante disso, a Constituição Federal de 1988 inovou este conceito ao definir que as águas são um bem público, ou seja, todos têm direito ao seu uso, diante dessa nova visão, foram instituídos dois domínios: aquele que reúne as águas que atravessam mais de um estado ou fronteira do país, além daquelas decorrentes de obras do poder federal, passou a ser da união, ao passo que aos estados coube o domínio das que ocorrem dentro de seus territórios. Os municípios são responsáveis pelo uso e ocupação do solo e poderão regulamentar, concorrentemente com os estados, medidas de combate à poluição incluindo a proteção das águas. Neste sentido, a Lei 9.605 (12/02/1998), de âmbito nacional, dispõe sobre o crime de poluição hídrica e o tipifica através de seu artigo 54, prevendo sanções penais e administrativas em sede ambiental.

A água constitui um dos elementos fundamentais para existência do homem, pois o corpo humano pode ser considerado uma máquina hidráulica, contendo em média 60% d’água em sua composição, a espécie humana pode resistir sem alimentos por um período de cerca de um mês, mas não pode ficar sem beber água por mais de quarenta e oito horas, neste caso, grande parte das atividades humanas cotidianas também depende de água, como cozinhar, tomar banho, lavar alimentos, roupas, quintais, entre outros. O homem tem extrema dependência de água doce, e como o volume desse recurso no ambiente é relativamente pequeno, ele é considerado um fator limitante para a sua vida.

Embora a água cubra aproximadamente  $\frac{3}{4}$  da superfície da Terra, cerca de 97,2% do total corresponde à água salgada dos oceanos, necessitando de tratamentos caros para a maioria dos usos. Subtraindo-se a água em forma de gelo e o vapor d’água na atmosfera, ficarão apenas cerca de 6% do total de água doce disponível para ser utilizada pelo homem, excluindo-se as geleiras.

Apesar do Brasil possuir em seu território 8% de toda reserva de água doce do mundo, aproximadamente 80% dessa água encontram-se na região Amazônica, ficando os restantes 20% distribuídos irregularmente nas outras regiões onde se concentram 95% da população. Por

isso, mesmo com grande potencial hídrico, a água é objeto de conflito em várias regiões do país.

Conforme Leal (1999), a partir da década de 1950, foi atribuído aos reservatórios subterrâneos um papel de destaque no equacionamento do problema de água. Praticamente todos os países do mundo, desenvolvidos ou não, utilizam água subterrânea para suprir suas necessidades, o início dessa utilização se perdeu com o tempo e, sobretudo, esse crescimento tem acompanhado o desenvolvimento do homem na Terra.

Pois a necessidade de alimentar uma população que cresce constantemente, fomentou o crescimento do setor agrícola diante do suporte das novas tecnologias, elevando expressivamente essa produtividade. Isso tem sido obtido, no entanto, às custas do uso e do consumo elevados de água, além de muitas atividades industriais requererem enormes quantidades de água.

Há registros cada vez mais crescentes na utilização das águas subterrâneas e, conseqüentemente, de problemas decorrentes da má utilização dos aquíferos em várias partes do planeta, problemas esses com tendência de expansão, caso não sejam implantadas políticas consistentes de uso e conservação dos recursos.

Ressalta-se, que o mau uso se caracteriza tanto pelo uso excessivo, quanto inadequado e inescrupuloso, que leva à degradação dos recursos, essa situação pode acarretar a diminuição do volume ou, o esgotamento dos aquíferos subterrâneos, e mesmo dos estoques de água existentes na superfície, em lagos e rios. A questão da água subterrânea é crucial, pois grande parte da população mundial depende dessa fonte para seu abastecimento, além da ameaça a seus estoques, os aquíferos também têm sido contaminados por diversos poluentes, de origem industrial, agrícola e doméstica.

Dessa forma, a água é um bem de domínio público, um recurso natural finito e vulnerável, tendo valor econômico em todos os seus usos competitivos. No passado, o não reconhecimento do valor econômico da água conduziu a sérios danos ambientais, além de se caracterizar como gestão de um bem econômico é uma importante forma de atingir eficiência e equidade no seu uso e de promover sua conservação.

A Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, estabeleceu, como objetivo da Política Nacional do Meio Ambiente, a imposição, ao poluidor e ao predador, da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados e, ao usuário, da contribuição pela utilização dos recursos ambientais com fins econômicos. Sendo a água um recurso ambiental, por força do disposto na própria lei mencionada, sua utilização será cobrada.

Já o princípio 4, da Declaração de Dublin, em janeiro de 1992, estabeleceu que os recursos hídricos de um país são um bem de valor, mas são limitados e vulneráveis. O não reconhecimento desse princípio-chave tem contribuído substancialmente para o desperdício e a utilização prejudicial do meio ambiente. Além disso, a Agenda 21, resultado da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em junho de 1992, recomenda que o recurso hídrico seja cobrado, levando-se em conta o seu custo marginal.

Essa cobrança pelo uso da água é um instrumento recente no mundo, cuja questão corrobora para a gestão que tem necessita de maior atenção no processo brasileiro de regulamentação da Política Nacional de Recursos Hídricos. Entretanto, verifica-se que a discussão sobre a cobrança pelo uso da água está mais concentrada na cobrança das águas superficiais, por isso que há necessidade de se estender tais discussões para o caso das águas subterrâneas que podem ser compreendidas como as de maior valor econômico em função das dificuldades de recuperação, uma vez degradadas.

Para Motta (1998), devido à ausência de critérios econômicos objetivos nas legislações de Recursos Hídricos, a regulamentação da cobrança torna-se, assim, outra fase de negociação política. Todavia, a ausência desses critérios significa que, embora se reconheça o valor econômico da água, não se identificam as implicações desse reconhecimento.

Em 10 de julho de 1934, às vésperas da promulgação da Constituição Federal, ocorrida em 16 de julho de 1934, foi instituído pelo Decreto 24.643/34 o primeiro Código Brasileiro de Águas. O referido código assegurou o uso gratuito de qualquer corrente ou nascente de água para as primeiras necessidades da vida e permite a todos usar de quaisquer águas públicas, conformando-se com os regulamentos administrativos, pois impede a derivação das águas públicas para aplicação na agricultura, indústria e higiene, sem a existência de concessão, no caso de utilidade pública, e de autorização nos outros casos; em qualquer hipótese, dá preferência à derivação para abastecimento das populações.

O Código de Águas estabeleceu que a concessão ou autorização deve ser feita sem prejuízo da navegação, salvo nos casos de uso para as primeiras necessidades da vida ou previstos em lei especial; estabelece, também, que a ninguém é lícito conspurcar ou contaminar as águas que não consome, com prejuízo de terceiros; e, ainda, que os trabalhos para a salubridade das águas serão realizados à custa dos infratores que, além da responsabilidade criminal, se houver, responderão pelas perdas e danos que causarem, e por multas que lhes forem impostas pelos regulamentos administrativos. Também esse dispositivo é visto como

precursor do princípio usuário-pagador, no que diz respeito ao uso para assimilação e transporte de poluentes.

Segundo Granziera (1993), não há dúvida de que o Código de Águas representa um marco na legislação brasileira e, se hoje, é considerado obsoleto em alguns aspectos, como, exemplo, a proteção das águas, ele estava adequado aos interesses e necessidades da época. Foi no decorrer dos anos que as condições econômicas, tecnológicas e hidrológicas vigentes na elaboração do Código se alteraram, e a norma existente deixou de se adequar à realidade.

Apresenta-se, um capítulo único sobre águas subterrâneas (do artigo 96 ao 101). No artigo 96, dispõe que “o dono de qualquer terreno poderá apropriar-se por meio de poços, galerias, etc., das águas que existam debaixo da superfície de seu prédio, contanto que não prejudique aproveitamentos existentes nem derive ou desvie de seu curso natural águas públicas dominicais, públicas de uso comum ou particulares”. Se isso ocorrer, a administração competente poderá suspender as ditas obras ou aproveitamentos.

Para Rebouças (1998), tanto as normas anteriores ao Código de Águas de 1934, como suas disposições, seguiam modelos adotados pelos países de clima úmido e são aplicáveis, basicamente, às águas de superfície para geração de energia elétrica. Pois as normativas do Código relativa às águas subterrâneas e às regiões periodicamente assoladas pelas secas deixou de receber a complementação e regulamentação necessárias, por ele previstas, o que resultou no quadro caótico atual do uso das águas subterrâneas em nosso país.

A Constituição Federal de 1988, em vigência, muito pouco modificou o texto do Código de Águas, uma das poucas alterações feitas foi a extinção do domínio privado da água, previsto em alguns casos naquele antigo diploma legal. Todos os corpos d’água, a partir de outubro de 1988, passaram a ser de domínio público. No artigo 20, III, determina como bens da União os lagos, os rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais. Ela estabelece, em seu artigo 26, I, que “Incluem-se entre os bens dos Estados as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União”.

A gestão dos recursos hídricos no Brasil ganhou um grande impulso com a aprovação da Lei Federal n.º 9.433, de 08 de janeiro de 1997 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. O seu texto

proclama, com muita clareza, os princípios básicos praticados hoje em todos os países que avançaram na gestão de seus recursos hídricos. São esses:

- a) A adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento;
- b) O dos usos múltiplos, ou seja, todos os usuários têm igual acesso ao uso dos recursos hídricos, quebrando-se a indesejável hegemonia de um setor usuário sobre os demais;
- c) O reconhecimento da água como um bem finito e vulnerável;
- d) O reconhecimento do valor econômico da água, indutor do uso racional desse recurso natural, dado que serve de base à instituição da cobrança pela utilização de recursos hídricos;
- e) O da gestão descentralizada e participativa. Descentralizada porque tudo que pode ser decidido em níveis hierárquicos mais baixos de governos não será resolvido pelos níveis mais altos dessa hierarquia. E participativa porque permite que os usuários, a sociedade civil organizada, as ONGS e outros organismos possam influenciar no processo de tomada de decisão.

Foram definidos cinco instrumentos essenciais à boa gestão do uso da água:

- a) O Plano Nacional de Recursos Hídricos;
- b) A Outorga de Direito de Uso dos Recursos Hídricos;
- c) A cobrança pelo uso da água;
- d) O enquadramento dos corpos d'água em classes de uso;
- e) O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.

Por fim, a nova lei estabeleceu um arranjo Institucional claro, baseado em novos tipos de organização para a gestão compartilhada do uso da água. São os seguintes:

- a) O Conselho Nacional de Recursos Hídricos
- b) Os Comitês de bacias hidrográficas;
- c) As Agências da Água;
- d) As organizações civis de recursos hídricos.

Portanto, a Lei Federal nº 9.433/97 contempla as águas subterrâneas em alguns dos seus artigos. O artigo 12, por exemplo, afirma que “estão sujeitos à outorga pelo Poder Público os

direitos dos seguintes usos de recursos hídricos: II- extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo”. Como os usos sujeitos à outorga serão cobrados (artigo 20), as águas subterrâneas são passíveis de cobrança.

Por isso, que são poucos os Estados com a legislação específica para as águas subterrâneas. Entretanto, alguns Estados brasileiros despertaram para a necessidade de criar mecanismos de gerenciamento das águas, de modo geral. Nesse movimento, o Estado do Pará dispões da Lei n.º 6.381 de 25 de julho de 2001 que *dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências*.

#### 4.2 Marcos legais das bases da evolução da gestão dos recursos hídricos do Estado do Pará.

Tabela 4 - Legislações Estaduais referente a Recursos Hídricos.

(continua)

Legislação Estadual	Caracterização
<b>Lei n° 5.630 de 20/12/1990</b>	Estabelece normas para a preservação de áreas dos corpos aquáticos, principalmente as nascentes, inclusive os "olhos d'água".
<b>Lei n° 5.793 de 04/01/1994</b>	Define a política Mineraria e Hídrica do Estado do Pará, seus objetivos, diretrizes e instrumentos, e dá outras providências.
<b>Lei n° 5.807 de 24/01/1994</b>	Cria o Conselho Consultivo da Política Mineraria e Hídrica do Estado do Pará.
<b>Lei n° 5.887 de 09/05/1995</b>	Dispõe sobre a Política Estadual do Meio Ambiente e dá outras providências.
<b>Lei n° 6.105 de 14/01/1998</b>	Dispõe sobre a conservação e proteção dos depósitos de águas subterrâneas no Estado do Pará e dá outras providências.
<b>Lei n° 6.381 de 25/07/2001</b>	Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências.
<b>Lei n° 6.381 de 25/07/2001</b>	Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências.
<b>Lei n° 6.710 de 14/01/2005</b>	Dispõe sobre a competência do Estado do Pará para acompanhar e fiscalizar a exploração de recursos hídricos e minerais e as receitas não-tributárias geradas.

(conclusão)

<b>Legislação Estadual</b>	<b>Caracterização</b>
<b>Decreto nº 5.565 de 11/10/2002</b>	Define o órgão gestor da Política Estadual de Recursos Hídricos e da Política Estadual de Florestas e demais Formas de Vegetação.
<b>Decreto nº 2.070 de 20/02/2006</b>	Regulamenta o Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CERH.
<b>Decreto nº 1.367 de 29/10/2008</b>	Dispõe sobre o Processo Administrativo para apuração das infrações às normas de utilização dos recursos hídricos superficiais, meteóricos e subterrâneos, emergentes ou em depósito.
<b>Decreto nº 276 de 02/12/2011</b>	Regulamenta o Conselho Estadual de Recursos Hídricos, substituindo o Decreto nº 2.070, de 20 de fevereiro de 2006.

Fonte: Autor.

Ressalta-se, que a gestão de águas subterrâneas é designada aos Estados, segundo a Legislação Federal, cujo instrumento de outorga de uso dos recursos hídricos, é realizado por uma gestão mais completa, diante do controle de saída de água de um determinado aquífero.

#### **4.3 Marco legal da gestão de recursos hídricos no Município de Colares**

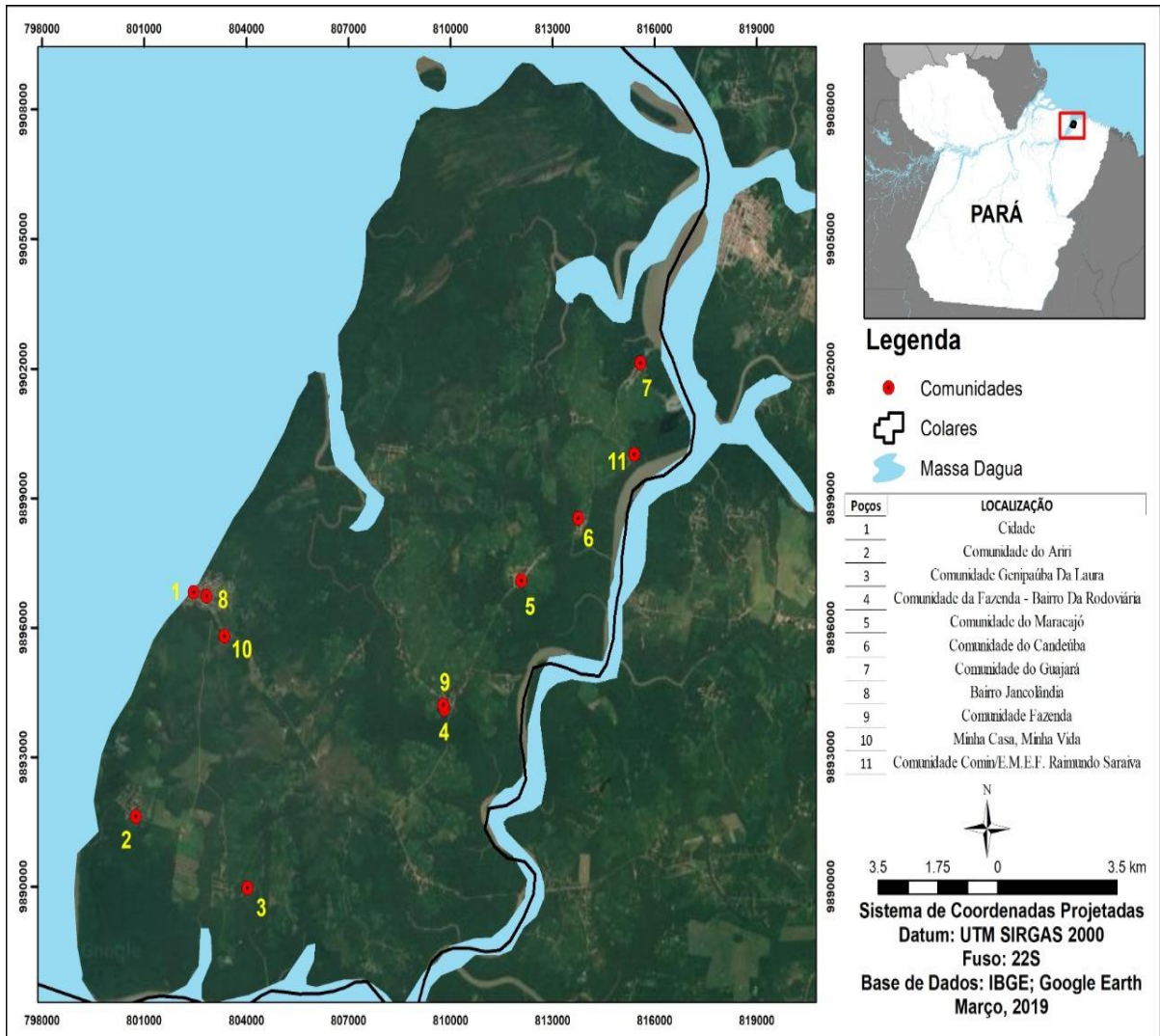
O município de Colares tem sua gestão ambiental pautada na Lei nº 133 de 03 de julho de 2018, que dispõe sobre a criação da política de Meio Ambiente no município de Colares – Estado do Pará e dá outras providências. Não há normativas nas diretrizes em âmbito municipal para proteção do meio ambiente, em relação aos recursos hídricos subterrâneos, mesmo a gestão dos recursos hídricos subterrâneos contemple a competência Estadual, o município, por sua vez, faz uso destes recursos para o abastecimento de sua população, cuja falha, se fundamenta em não determinar ações rigorosas para proteger este bem essencial para a sobrevivência.

Nesse sentido, a gestão municipal dos recursos hídricos subterrâneos corresponde apenas ao processo de captação, armazenagem e distribuição de água, desde o centro da cidade até as comunidades rurais presentes na ilha. Em quase sua maioria, os sistemas autônomos de captação e distribuição de água estão mal dimensionados, ou em sua capacidade de armazenamento, ou em seu ritmo de bombeamento, ou ainda, em ambos, podendo causar um estresse hídrico na região e, conseqüentemente a falta de água para população.

Além da imperícia no dimensionamento do sistema de captação, armazenagem e distribuição de água, a falta de políticas locais que visem o cumprimento das políticas federais

e estaduais para proteção dos recursos hídricos subterrâneos, expõem este recurso a uma suscetibilidade à contaminação, o que poderá gerar um surto de doenças de veiculação hídrica. Na Figura 3 é possível observar a distribuição das principais comunidades, que são atendidas através de sistemas autônomos de captação e distribuição de água.

Figura 3 - Mapa de localização das principais comunidades do município de Colares.



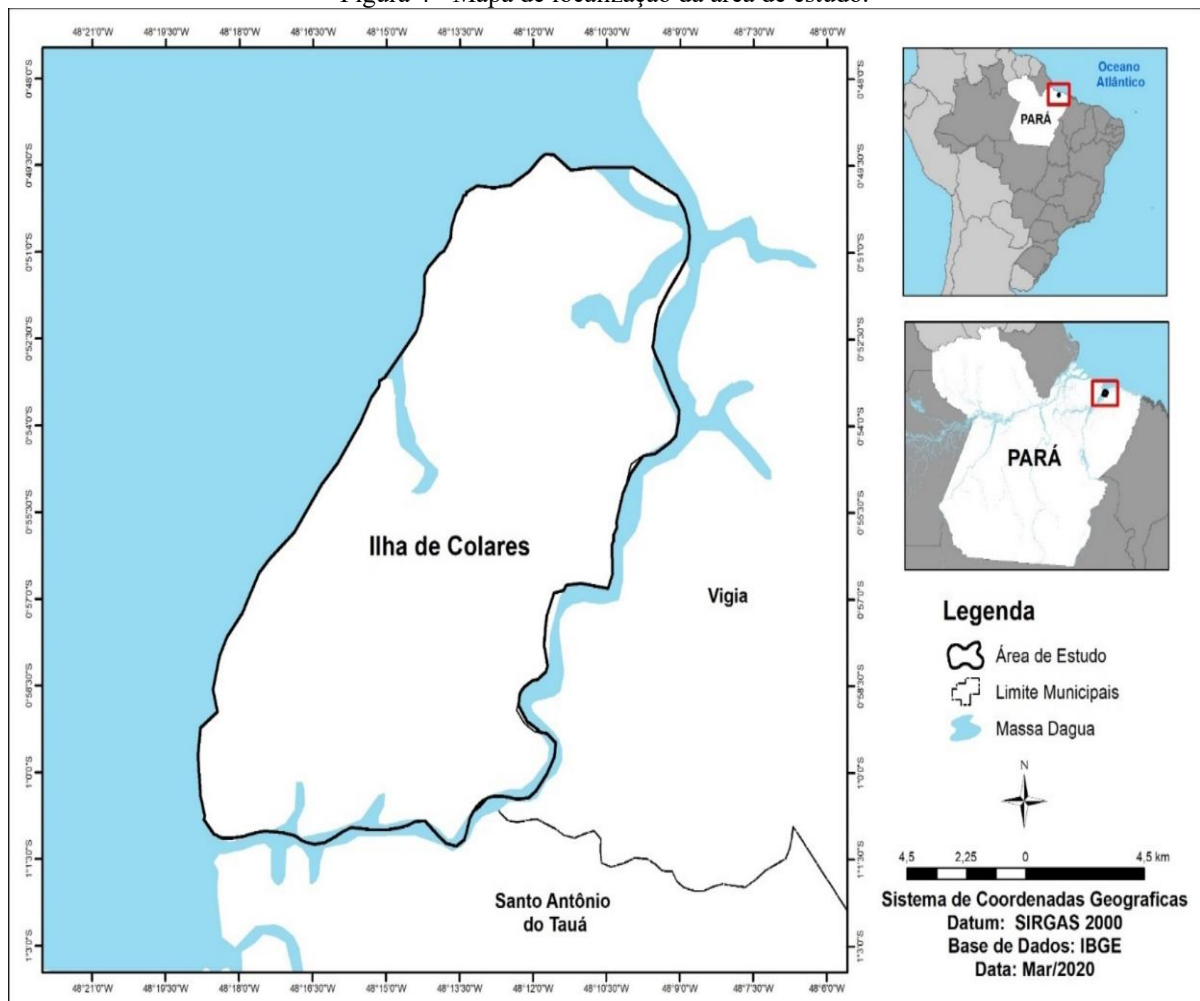
Fonte: Autor.

## 5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 5.1 Localização

O Município de Colares é uma ilha com cerca de 250 km<sup>2</sup>, separada do continente pelo Furo da Laura. A sede deste Município localiza-se à margem da Baía do Marajó, distando 93,9 km da capital do Estado do Pará, com acesso pelas rodovias BR-316, PA-140 e PA-238, onde, na localidade de Penha-Longa, a travessia é feita por meio de balsa. Limita-se ao norte com a Baía de Marajó, ao sul com o Município de Santo Antônio do Tauá, a Leste com o Município de Vigia e a oeste com a Baía do Sol. O mapa de localização (Fig. 4) permite que possamos identificar a posição deste Município em relação ao Estado e os municípios que confrontam com Colares.

Figura 4 - Mapa de localização da área de estudo.

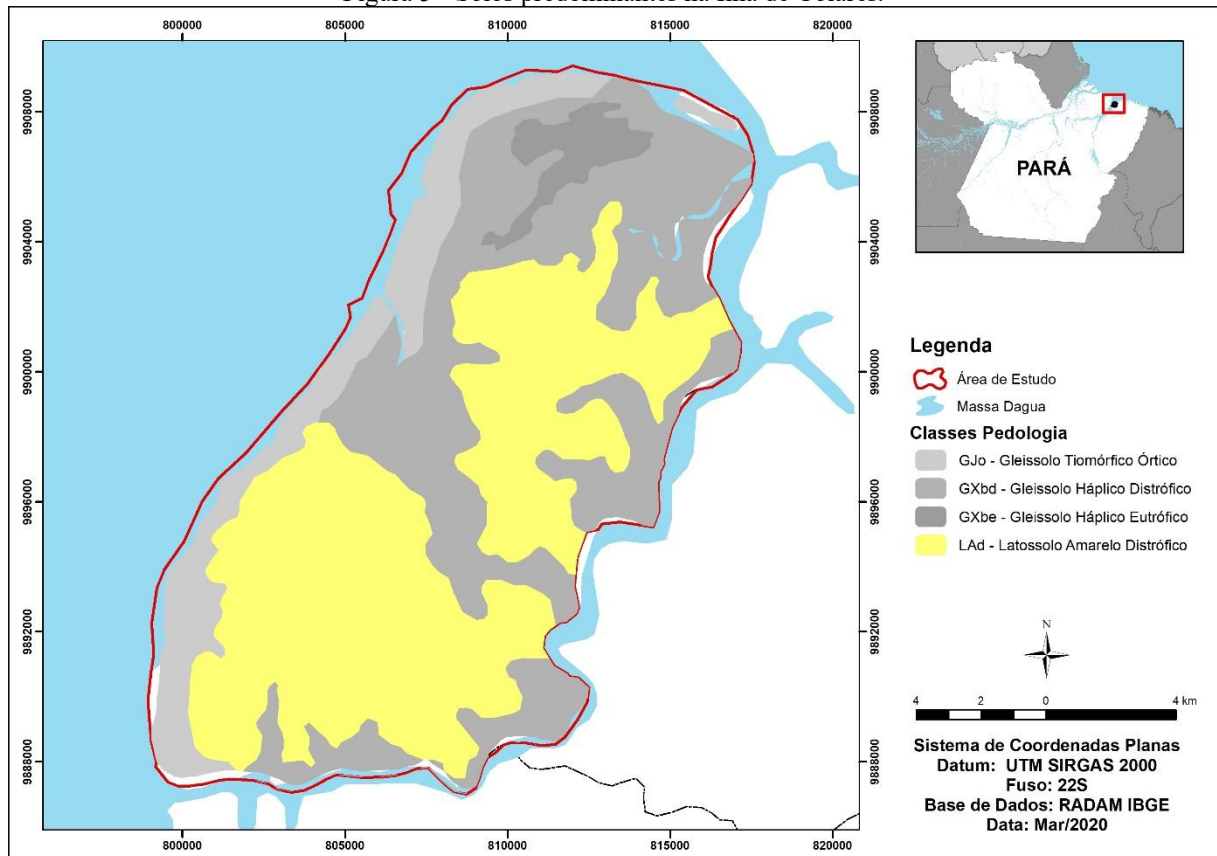


Fonte: Autor.

## 5.2 Solos

Predominam o latossolo amarelo distrófico, textura indiscriminada; areias quartzosas distróficas; plintossolo distrófico, textura indiscriminada; gley pouco húmido; solos aluviais eutróficos e distróficos, textura indiscriminada, como é possível observar na figura 5 do mapa abaixo:

Figura 5 - Solos predominantes na Ilha de Colares.

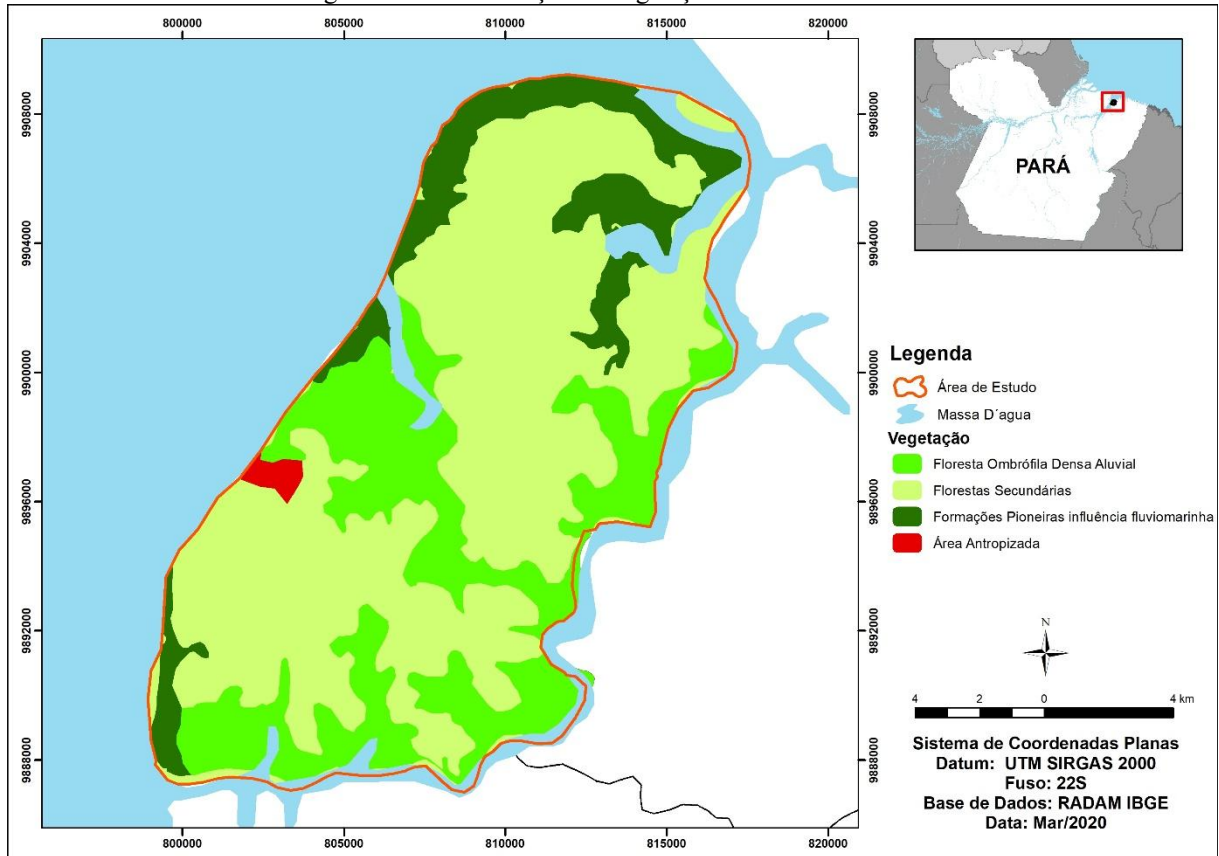


Fonte: Autor.

## 5.3 Vegetação

No município de Colares há presença de mata secundária, de porte mais ou menos elevado, capoeiras e algumas reminiscências da vegetação do cerrado. Atualmente, o tipo predominante da cobertura vegetal do município é de Florestas Secundárias, consequência dos desmatamentos ocorridos com grande intensidade e extensão, cujo objetivo foi o cultivo de espécies agrícolas de ciclo curto. Com isso, praticamente pouco restou da floresta primitiva que era do subtipo Floresta Densa dos baixos platôs. No Município, é importante, também, a floresta de mangue, predominante na Ilha de Colares, que é representada no mapa abaixo como Formações Pioneiras de influência fluviomarinha (figura 6).

Figura 6 - Caracterização da vegetação na Ilha de Colares.

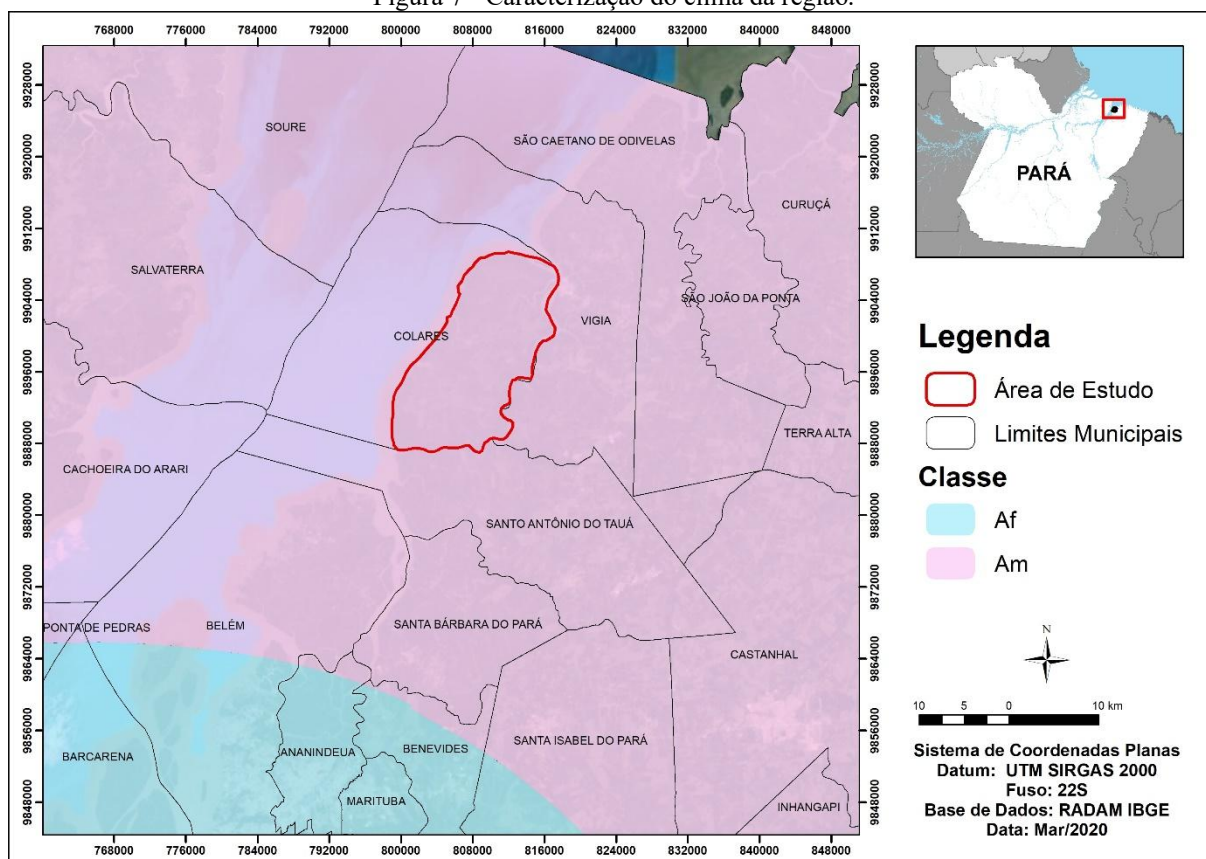


Fonte: Autor.

## 5.4 Clima

A região na qual se situa o município de Colares apresenta clima equatorial amazônico tipo Am (figura7), segundo a classificação de Köpper, com temperaturas relativamente elevadas, com média de 26° C. Entretanto, sua condição de ilha é responsável pela suavização do clima. Quanto às precipitações abundantes, os seis primeiros meses do ano apresentam cifras elevadas, ultrapassando os 2.500 mm. Nos primeiros seis meses, também, é acentuada a disponibilidade hídrica, enquanto os demais meses revelam carência de água no solo, principalmente no mês de setembro.

Figura 7 - Caracterização do clima da região.



Fonte: Autor.

## 5.5 Topografia

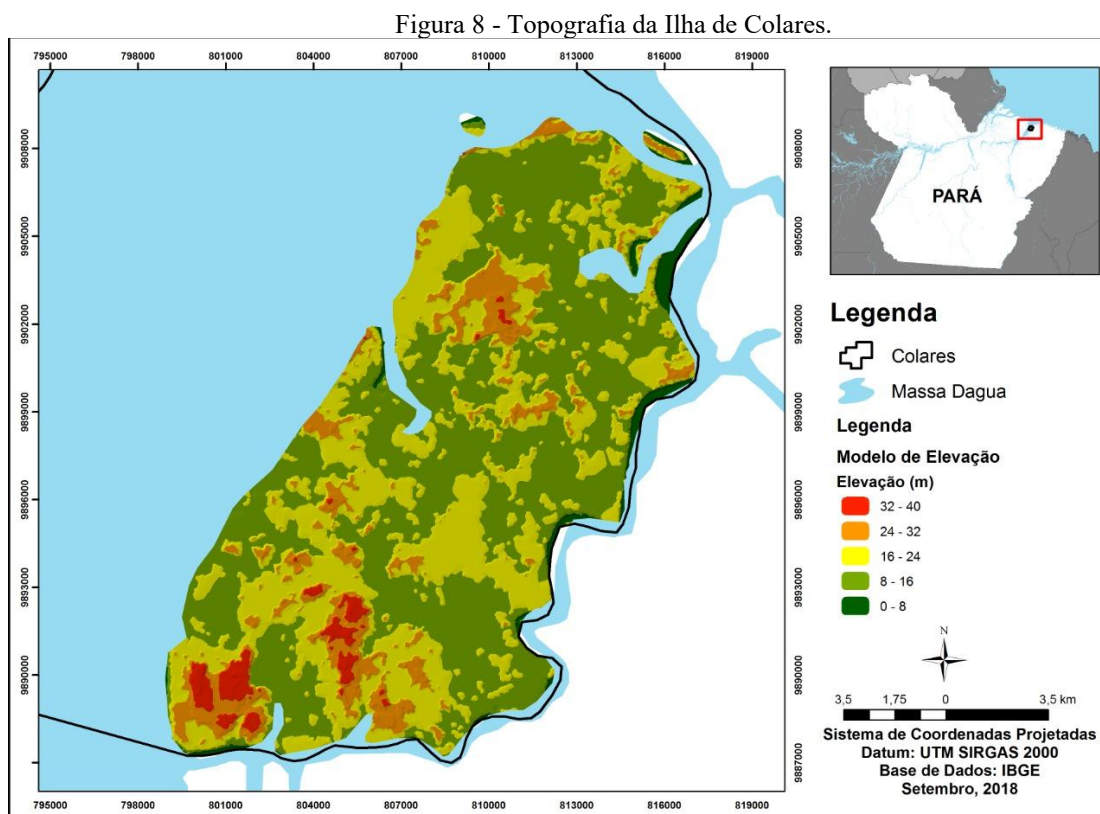
De topografia plana, o Município não tem expressão altimétrica, sendo quase imperceptível a presença de níveis diferenciados à semelhança de ilhas que lhe são congêneres: Caratateua e Mosqueiro. É possível constatar a presença de duas formas de relevo bem perceptíveis: o plano e o suave ondulado.

### 5.5.1 Plano

Está presente nas áreas das planícies aluviais, regiões permanentemente inundadas, representadas pelas várzeas que acompanham o Furo da Laura e o litoral banhado pela Baía do Marajó, assim como nas várzeas dos igarapés com nascente na parte central da ilha. Nesses locais, encontram-se os solos hidromórficos, de origem sedimentar pertencentes ao período Quaternário. Nas áreas de terra firme, nas extensões superfícies aplainadas dos divisores de água, dominam os Latossolos Amarelos, desenvolvidos a partir de sedimentos pré-edaforizados da Formação Barreiras (Silva, 1989).

### 5.5.2 Suave ondulado

Esta formação topográfica é pouco expressiva no Município, sendo encontrada somente nas áreas próximas aos cursos d'água, ou seja, onde começa a dissecação para as drenagens. Nessas feições topográficas são encontrados os Latossolos Amarelos sob cobertura de vegetação secundária da Floresta Equatorial Subperenifólia., conforme expõe a imagem (figura 8) abaixo:



Fonte: Autor.

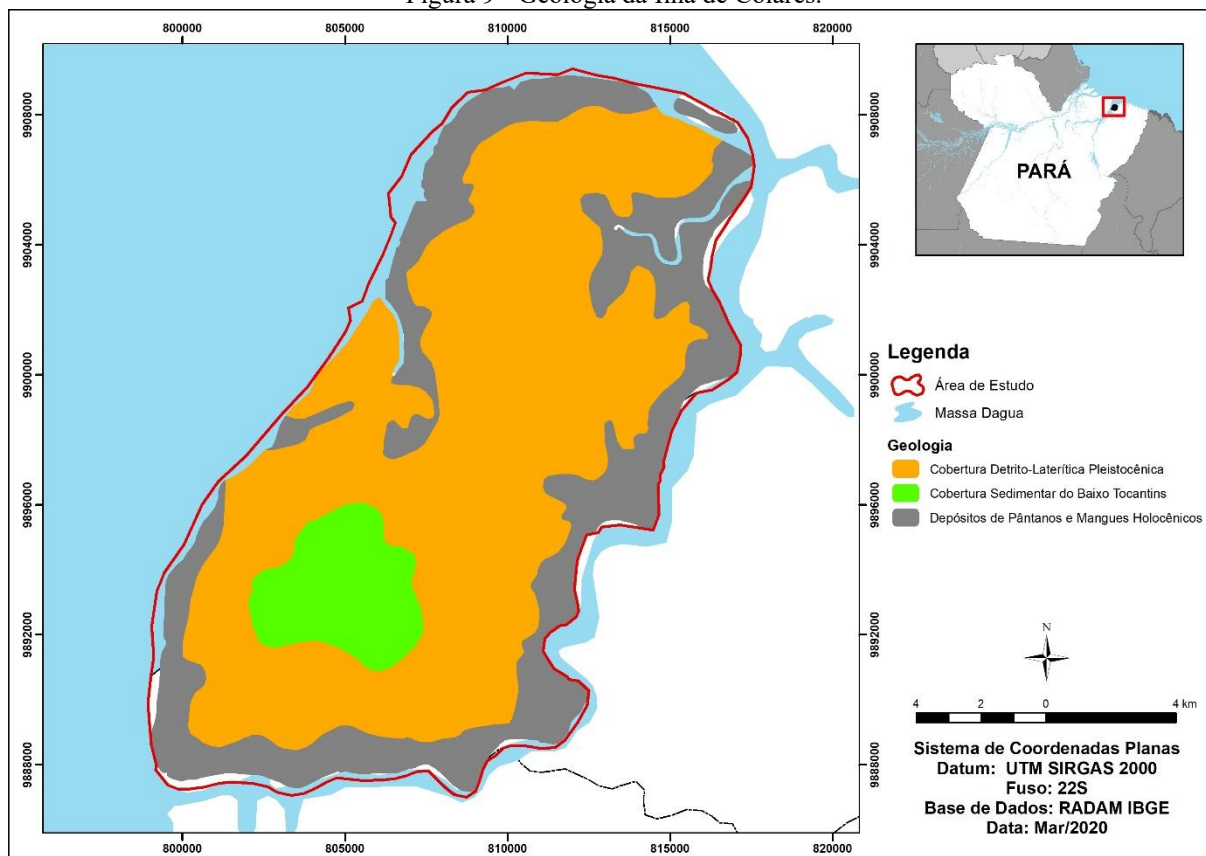
### 5.6 Geologia

Edificado sobre sedimentos Terciários da Formação Barreiras e Quaternárias Recentes e Antigos, o Município de Colares não foge ao contexto da geologia da região Bragantina, apenas com influência maior das Microrregiões do Salgado, nas suas baixadas. Por isso, seu relevo apresenta a singeleza de formas do leste paraense com áreas de tabuleiros aplainados, algumas dissecações nos topos levemente colinosos e presença de baixadas litorâneas inundáveis ao lado dos terraços e várzeas nas margens dos rios. Insere-se na unidade morfoestrutural do Planalto Rebaixado do Baixo Amazonas (Pimentel *et al.*, 2012).

No Município de Colares, foi possível identificar rochas formadas em dois períodos geológicos bem distintos, representados pelo Quaternário e pelo Cretáceo/Terciário, conforme

descrição a seguir, evidenciando esses períodos com sua distribuição na área (Brasil, 1973). Conforme apresenta a imagem da Geologia da Ilha de Colares (figura 9) abaixo:

Figura 9 - Geologia da Ilha de Colares.



Fonte: Autor.

### 5.6.1 Quaternário Cretáceo/Terciário

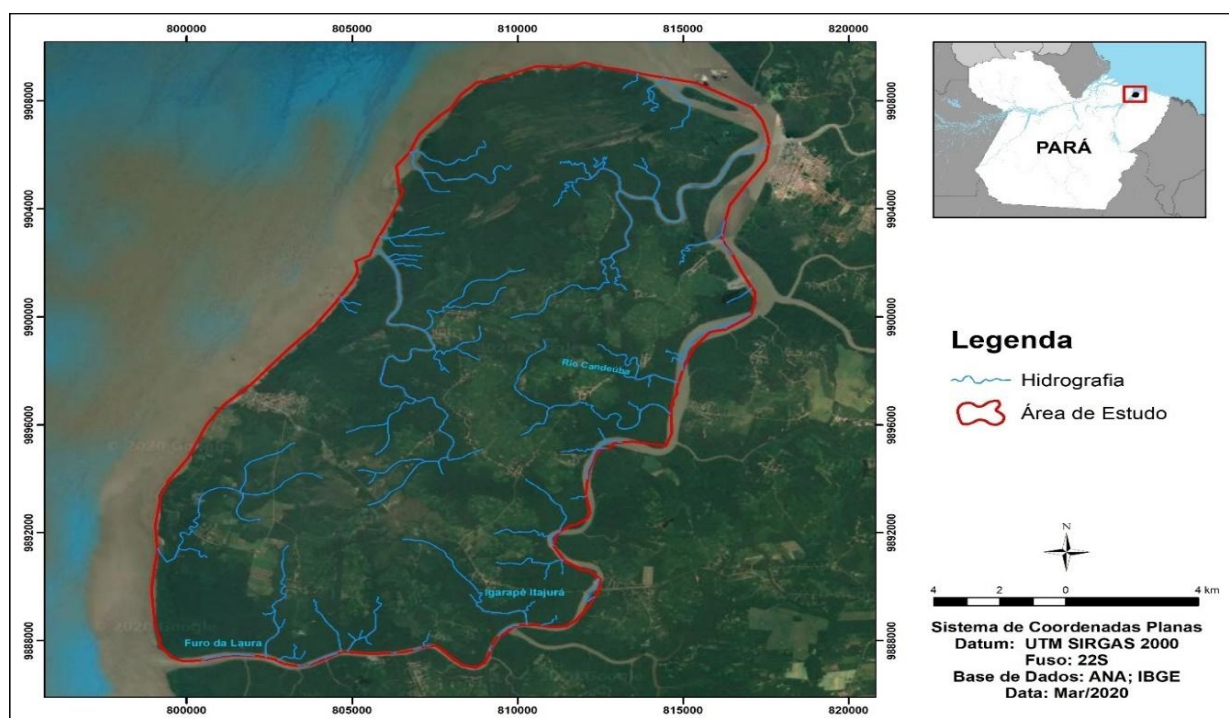
Está representado pela Formação Barreiras, que é constituída por sedimentos clásticos, mal selecionados, variando de siltitos a conglomerados. As cores predominantes são o amarelo e o vermelho, porém variam muito de local para local. Os arenitos, em geral, são caulínicos, com lentes de folhelhos. Na região, os sedimentos Barreiras formam um relevo bem suave, indo de plano a suavemente ondulado. Em determinadas áreas, como em frente à cidade de Colares, podem configurar falésias, voltadas para a Baía de Marajó, seguindo em direção sul do litoral até o furo Boca Larga. Esta formação geológica ocupa, aproximadamente, 50% da área e compõe os materiais formadores dos Latossolos Amarelos sob cobertura da Floresta Equatorial Subperenifólia, que representa os solos dominantes do Município.

### 5.6.2 Quaternário

Representado por depósitos aluvionares recentes, constituídos por areias, siltes e argilas inconsolidadas. Ocorrem como faixa estreita e, às vezes, descontínuas, ao longo dos rios mais importantes, tais como o Curupará, Tauapará, Tupinambá e Furo Boca-Larga, onde estão presentes os solos aluviais e gleis. Ocorrem também em todo o litoral da área, constituindo as praias e várzeas. Nesses locais, desenvolvem-se os solos aluviais e gleis com fertilidade natural mais alta, sob cobertura de Floresta Subperenifólia higrófila de Várzea com relevo plano.

## 5.7 Hidrografia

Figura 10 - Hidrografia da Ilha de Colares.



Fonte: Autor.

Esse furo, além de ser uma das vias de maior importância do Município, no que se refere ao deslocamento, permite, durante todo o ano, a navegação de pequenas e médias embarcações, contribuindo nesse sentido, para o transporte dos produtos regionalmente produzidos e destinados aos grandes centros consumidores.

A Baía do Marajó, servindo como ponto de partida à toda Região Norte, possui um papel de extrema relevância em determinados locais da ilha, haja vista, a formação de praias com paisagens litorâneas bastante pitorescas, fato que vem estimulando a implantação de grandes projetos turísticos, melhorando, em consequência disso, a qualidade de vida da população local.

Fazendo parte da rede hidrográfica, encontram-se cursos d'água de menor volume, todavia, de muita importância, no que diz respeito à pecuária e à agricultura do Município, abastecendo açudes para a dessedentação de animais e de onde se capta água para irrigação de culturas. É o caso dos igarapés: Iraqueçauá e Tauandeuá, ao Norte; Maracajá, Mirititeua, Piquiateua e Jenipaúba, ao Sul; Marajó, Tiririteua, e Itajurá, a Leste; e Cajueiro, Chacara, Lourenço, Iriri e Boca Larga, a oeste.

## 5.8 Hidrogeologia

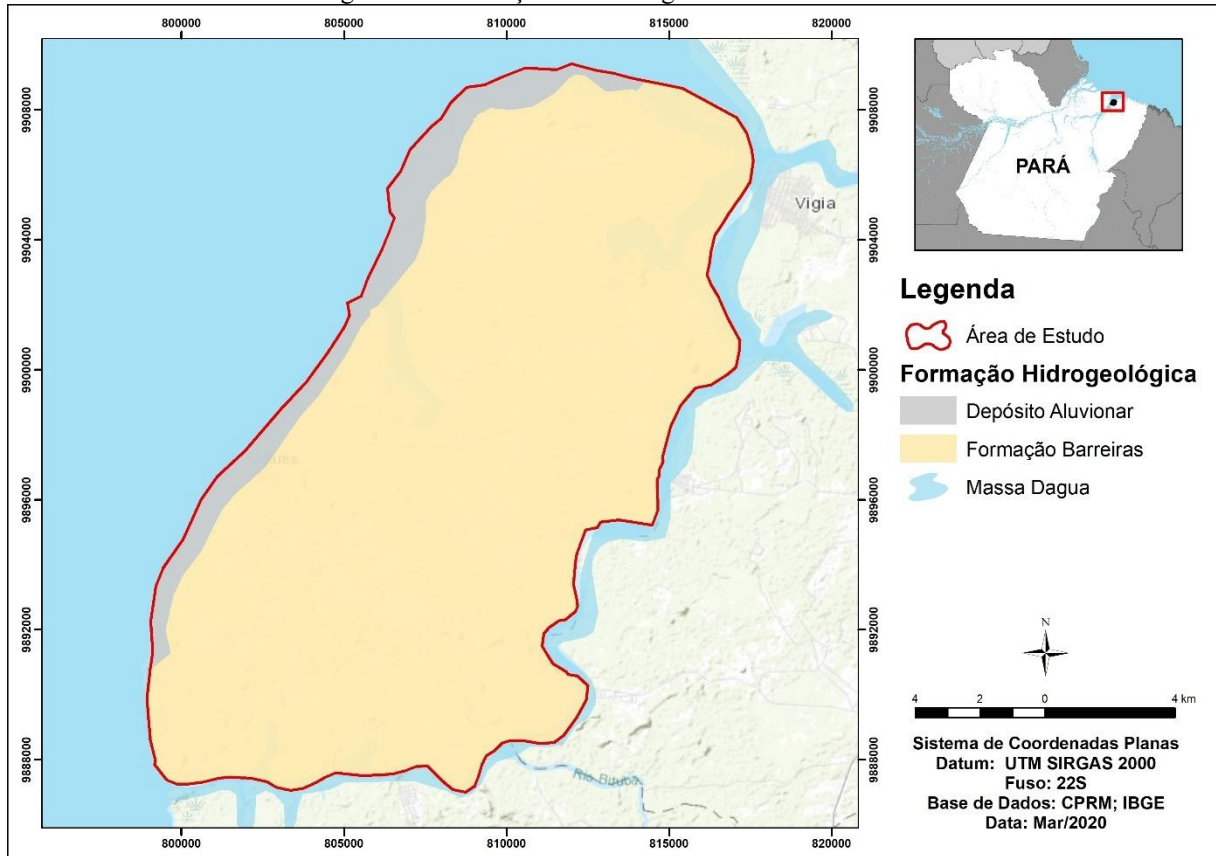
Os sedimentos depositados em ambientes costeiros flúvio-lacustres ou marítimos litorâneos, com espessuras que podem alcançar dezenas de metros e larguras de até centenas de metros constituem os sistemas hidrogeológico rasos mais importantes da região. Litologicamente estão representados por areias, cascalhos, siltes e argilas intercaladas e não sequenciados. A possibilidade de água nestes depósitos é muito variável em decorrência da grande heterogeneidade e anisotropia dos aquíferos. A qualidade da água é geralmente boa, podendo, contudo, ser influenciada pela proximidade do ambiente marinho e dos evaporitos presentes nos sedimentos, podendo apresentar salinidade elevada. (CPRM, 2001).

Figura 11 - Vista geral do perfil litológico encontrado na praia



Fonte: Autor.

Figura 12 - Formação Massa d'água da Ilha de Colares.



Fonte: Autor.

## 6 MATERIAL E MÉTODOS

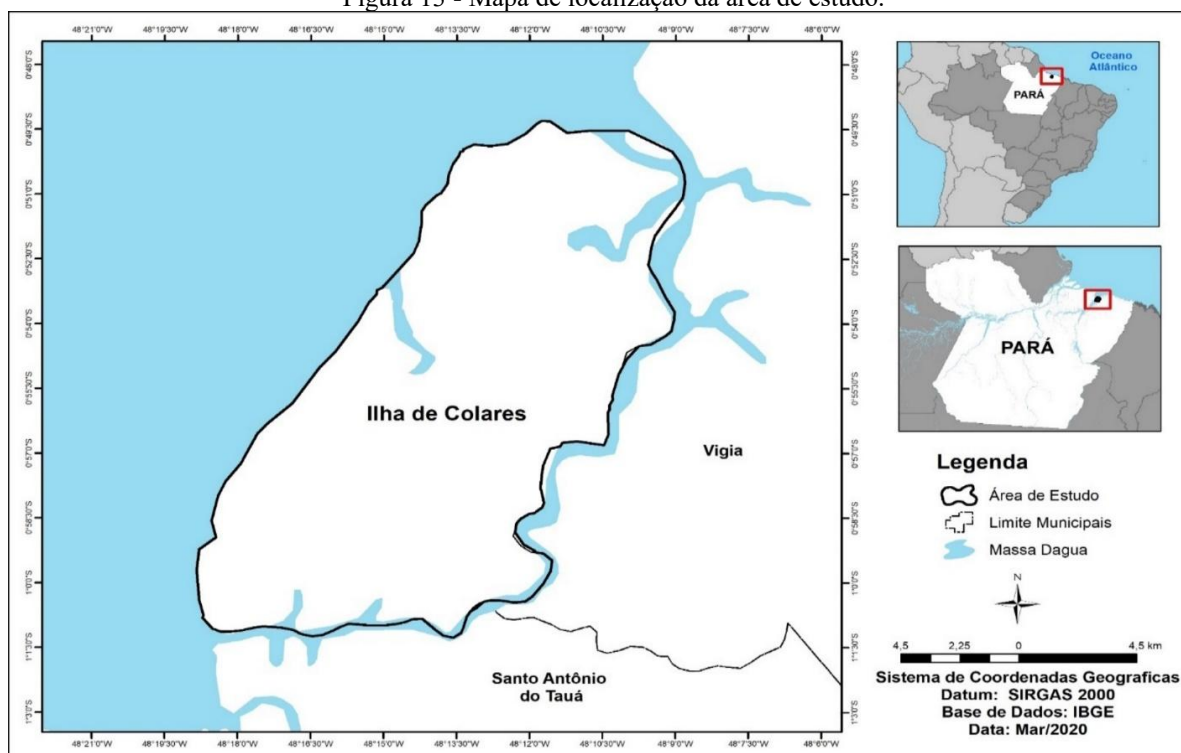
As ações deste trabalho compreenderam três etapas: levantamento de dados primários, campo e laboratório, onde cada etapa teve ações, métodos e materiais específicos, como segue abaixo:

### 6.1 Levantamento de dados primários

Nesta fase foi onde se deu a escolha da área de estudo, a utilização do melhor método para avaliação da vulnerabilidade local, de acordo com os dados disponíveis e que fosse possível ser desenvolvido em tempo hábil.

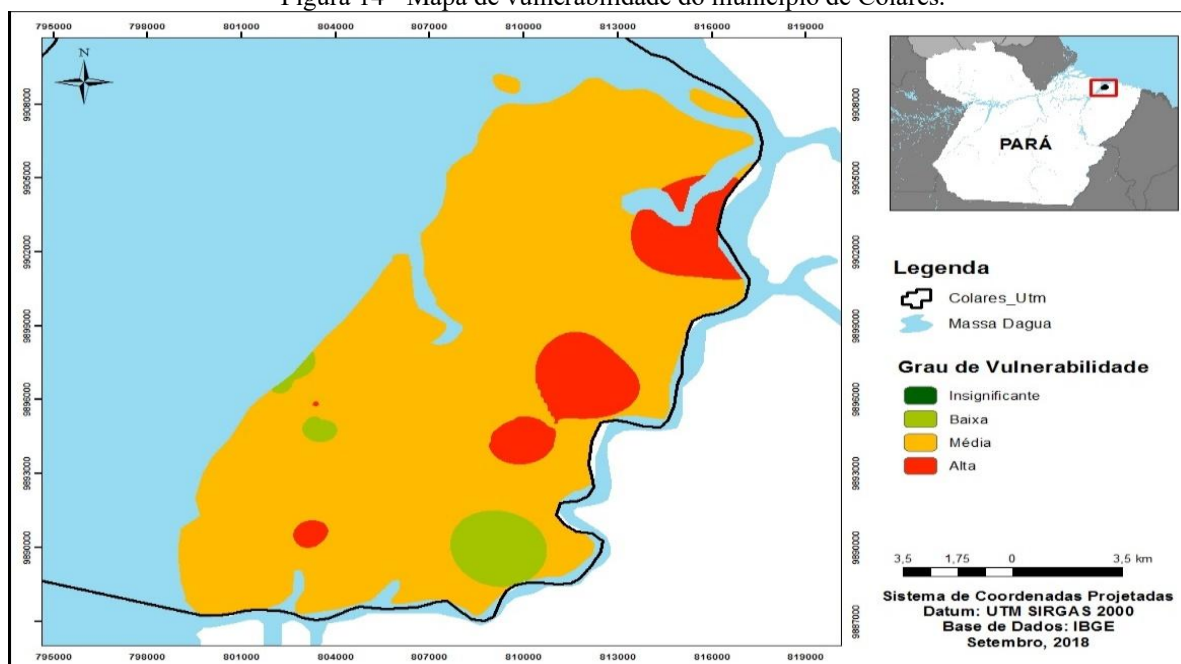
Devido à falta de dados, como a litologia encontrada na perfuração do poço, o grau de confinamento, a localização entre outros dados necessários para a caracterização da vulnerabilidade, foram usados apenas 20 poços dos 37 cadastrados no SIAGAS, distribuídos como consta na Figura 4. A litologia e perfis construtivos dos poços utilizados podem ser observadas nas Figuras 4 a 26, onde através destas é possível compreender a hidrogeologia local.

Figura 13 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autor.

Figura 14 - Mapa de vulnerabilidade do município de Colares.



Fonte: Autor.

Toda a logística necessária para as fases de campo e de laboratório foi tratada nesta fase, como datas, transporte, locais de hospedagens e solicitação de equipamentos ao LGAA/UFRA etc.

## 6.2 Campo

A pesquisa de campo ocorreu entre os dias 28 e 29 de junho de 2018, caracterizado como o período menos chuvoso na região. Apesar de a qualidade da água sofrer efeitos com a sazonalidade da precipitação, o período de amostragem teve como objetivo fazer uma avaliação preliminar da situação qualitativa da água por meio de parâmetros físico-químicos e microbiológicos. Logo, para avaliação qualitativa da água foi utilizado um Medidor Multiparâmetros (modelo HANNA HI 9828). Todos os procedimentos de preparo dos recipientes, coleta, acondicionamento das amostras e transporte seguiram as recomendações do Manual Prático de Análise de Água (Brasil, 2006).

A avaliação da qualidade da água foi realizada nos poços cadastrados, por uma sonda multiparâmetro (medidor de nível ECP 50). que possibilitou as medições dos seguintes parâmetros: Potencial de Oxi-Redução (ORP), Oxigênio Dissolvido (OD), Condutividade Elétrica (CE), Sólidos Totais Dissolvidos, Ph e Salinidade de poços em áreas de vulnerabilidade (Figura 13).

Figura 15– A: Medidor de nível usado para a etapa de campo; B: GPS Garmin modelo Etrex 30s; Medidor Multiparâmetros HANNA HI 9828.multiparâmetro.



Fonte: Autor.

### 6.3 Laboratório

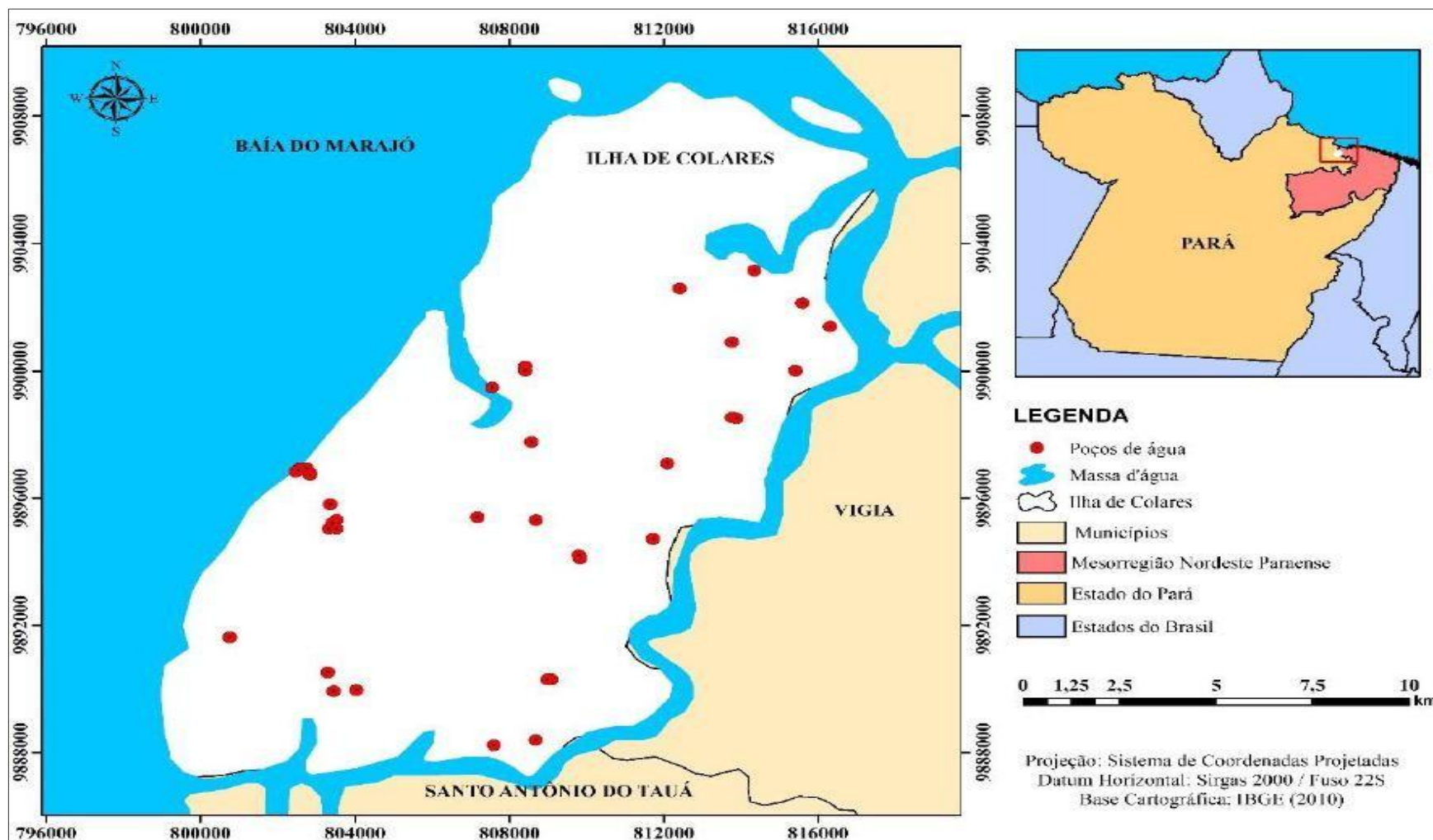
Nesta etapa foi realizada a pesquisa bibliográfica, onde através dela é possível embasar técnica e cientificamente o presente trabalho, bem como o tratamento dos dados coletados em campo. Os dados foram obtidos de 20 poços cadastrados no SIAGAS que possuíam informações necessárias para o estudo, como podemos observar na Figura 3 Apesar de existir 37 poços cadastrados do município de Colares no SIAGAS, foram utilizados apenas 20 destes, devido à falta de informações necessárias para a definição da vulnerabilidade desses poços através do método GOD, como mostrado na Tabela 5, e anexo a este trabalho, é possível visualizar o perfil construtivo e a litologia dos poços utilizados.

Tabela 5 - Poços utilizados para a construção do mapa de Vulnerabilidade.

Poços	CÓDIGO	LOCALIZAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE
P 01	1500001333		803329,0	9895030,4
P 02	1500001334		803514,9	9895306,9
P 03	1500001335		803422,1	9895214,8
P 04	1500001336		803514,7	9895030,2
P 05	1500002639	RUA PRINCIPAL/VILA CENTENÁRIO	802464,1	9896813,8
P 06	1500002638	CAPTAÇÃO DA PREFEITURA	801938,3	9897060,2
P 07	1500002641	NSE	802742,6	9896936,7
P 08	1500002642		809080,3	9890292,1
P 09	1500007141	ADE DO ARIRI	800758,2	9891620,6
P 10	1500007142	ADE DO GENIPAÚBA DA LAURA 1	803294,4	9890512,0
P 11	1500007144	ADE GENIPAÚBA DA LAURA	804036,6	9889958,1
P 12	1500007147	ADE DA FAZENDA - BAIRRO DA RODOVIÁRIA	809826,0	9894103,1
P 13	1500007149	ADE DO MARACAJÓ	812087,2	9897082,9
P 14	1500007150	ADE DO CANDEÚBA	813759,3	9898526,5
P 15	1500007151	ADE DO GUAJARÁ	815587,8	9902121,7
P 16	1500007157	RUA 15 DE NOVEMBRO/RUA DA REPÚBLICA	801907,3	9896998,7
P 17	1500007158	ADE DO JANCOLÂNDIA	802835,2	9896721,4
P 18	1500007161	ADE FAZENDA/BAIRRO RODOVIÁRIA	809795,1	9894195,3
P 19	1500007162	MINHA CASA, MINHA VIDA	803360,6	9895798,8
P 20	1500007164	ADE COMIN/E.M.E.F. RAIMUNDO SARAIVA	815400,4	9900000,7

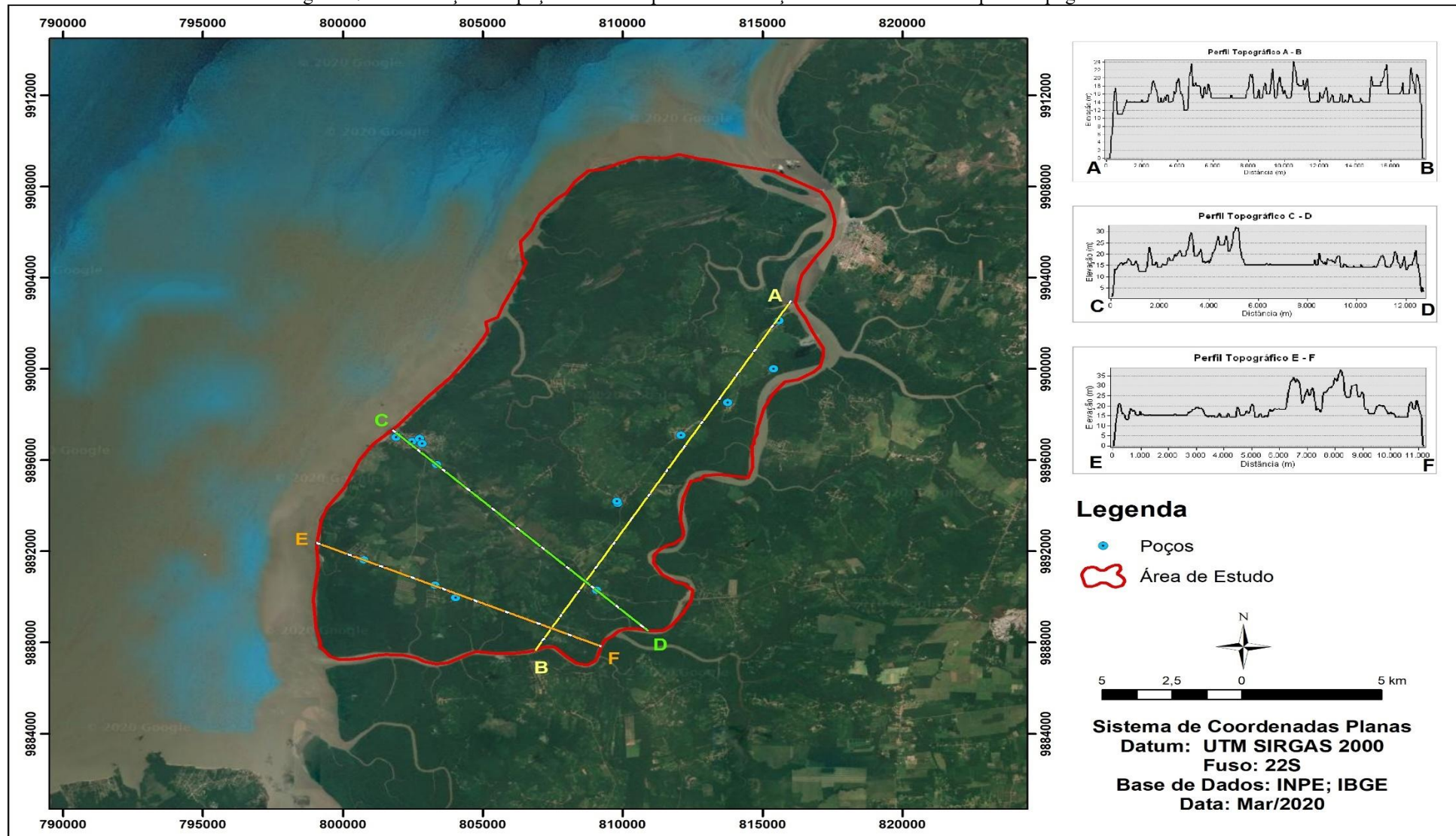
Fonte: Siagas (2022).

Figura 16 - Mapa de localização dos poços cadastrados no SIAGAS na Ilha de Colares-PA.



Fonte: Autor.

Figura 17– Distribuição dos poços utilizados para caracterização da vulnerabilidade e perfis topográficos.



Fonte: Autor.

#### 6.4 Análise do nível de vulnerabilidade do método GOD

Para determinar o nível de vulnerabilidade dos 20 poços estudados e melhorar a análise do método GOD, foi utilizado uma planilha de cálculo do programa (Excel 2013) para realizar a modelagem matemática recomendada por Borba *et al.* (2014). Este procedimento tem com finalidade analisar as escalas de pontuação para vulnerabilidade das águas subterrâneas determinada pelo método GOD. Em contrapartida, a litologia, profundidade do aquífero e seu grau de confinamento foram analisados com os dados das características do local pesquisado (Kapelinski *et al.*, 2018).

As informações requeridas para a determinação dos índices foram obtidas por meio de investigações de campo e em bases de dados disponíveis em instituições públicas e órgãos de pesquisa, ligados à hidrogeologia, a citar: Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS), Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM).

Pois, a elaboração dos mapas referentes a cada índice foi através da utilização do software de propriedade da ERIS, o ArcGIS versão 10.5 que possibilita a interpolação de valores, produzindo, como resultado, mapas em formato GRID, que representam a organização da informação espacial por conjuntos de células, visualizadas através de um gradiente de cores.

O método de interpolação utilizado foi Inverso Ponderado da Distância (Inverse Distance Weighted - IDW) que estima um valor para um local específico não medido, utilizando os valores medidos ao redor do local de previsão. Deste modo, os valores próximos do local de estimativa terão mais influência no valor estimado daquelas mais distantes (Vargas *et al.*, 2019). Assim, o IDW considera que cada ponto estimado possui uma influência de posição que diminui com a distância. Logo, os valores são calculados de acordo com a seguinte equação:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(X_i) \frac{1}{d_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}}} \quad (1)$$

Em que:

Z = valores previstos;

X = número de amostras;

X<sub>i</sub> = valores conhecidos;

d<sub>i</sub> = distância entre os valores conhecidos e previstos.

### 6.5 Levantamento e Identificação de Fontes Potenciais de Contaminação

Procede-se a multiplicação dos valores de G, O e D, obtendo, como resultado, o mapa de vulnerabilidade igualmente em formato GRID. O mapa de vulnerabilidade contou ainda com a influência de potenciais poluidores nos arredores dos poços analisados, onde foi estabelecido áreas de alta vulnerabilidade ou áreas de baixa vulnerabilidade, de acordo com as características intrínsecas aos poços. Os potenciais poluidores encontrados na cidade foram: um lixão, um cemitério e um posto de gasolina, onde a maioria está concentrada mais próximo ao centro da cidade.

Os arquivos de pedologia, geologia e vegetação foram retiradas do projeto RADAM (2004) na escala de 1:250.000 do IBGE. Os dados de Hidrografia foram adquiridos no site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), enquanto as informações de hidrogeologia estão disponíveis no sistema online do CPRM.

### 6.6 Fluxos das Águas Subterrâneas

Para a elaboração do mapa de fluxo subterrâneo, utilizou-se dados de 20 poços cadastrados no site do SIAGAS, disponível pelo CPRM, utilizando dados de cotas altimétricas e do nível estático do poço. Primeiramente, para a extração das cotas altimétricas dos poços, foi utilizada uma imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) disponível no projeto TOPODATA pelo INPE, com resolução espacial de 30 metros. Posteriormente, esses dados foram tabulados no software Excel 2013. As imagens SRTM também foram utilizadas para a elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) e do perfil topográfico da área de estudo.

Quanto ao cálculo da superfície potenciométrica foi realizado a diferença da cota altimétrica e o nível estático de cada poço para estimar a tendência do fluxo das águas subterrâneas (Barros *et al.*, 2016). Para a interpolação dos dados foi utilizado o método de Krigagem no software *Surfer 13*. A krigagem é um método geoestatístico que se baseia em várias técnicas de análise de regressão para estimar valores em qualquer posição da área de estudo, sendo considerado um excelente estimador para este tipo de análise (Mello; Oliveira, 2016).

Os dados foram exportados para um ambiente SIG para a confecção dos mapas. O tratamento dos dados e a elaboração dos mapas foram realizados no *software* ArcGis 10.5 utilizando-se projeção sirgas 2000 UTM 22S.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As visitas de campo na ilha de Colares – PA possibilitaram formar uma ideia do contexto ambiental da área, onde foram identificadas preliminarmente fontes potenciais de contaminação que podem causar degradação ambiental.

Martins *et al.* (1991) descreve que alguns indicadores têm sido propostos para a avaliação da qualidade das águas, é o caso dos parâmetros físico-químicos pH, condutividade, oxidabilidade, DBO, entre outros, e alguns íons como cloretos, sulfatos, fosfatos, sódio, potássio e cálcio, na medida em que podem indicar uma possível contaminação. Parâmetros esses, que devem ser analisados constantemente, para que em tempo hábil seja realizada a mitigação de uma determinada contaminação.

### 7.1 Resultados dos Parâmetros alcançados pela medição direta

Neste tópico, serão apresentados os resultados acerca da medição direta de poços, sendo uma técnica utilizada para avaliar as características dos aquíferos subterrâneos, tais como a profundidade do lençol freático, a vazão da água, a pressão hidráulica, entre outros parâmetros importantes para o monitoramento e gerenciamento dos recursos hídricos (Ellis; Singer, 2008). Contudo, no presente estudo, a mediação da água será analisada a partir da OD, condutividade, salinidade, STD e temperatura.

Sendo assim, essa mediação é importante para estabelecer o perfil de poço é a prática de efetuar um registro detalhado das formações geológicas atravessadas por uma perfuração. O perfil pode ter descrições baseadas em inspeção visual de amostras levadas para a superfície ou medições de grandezas geofísicas, feitas com instrumentos, para formar um perfil do poço (Costa, 2008).

Ressalta-se, que a Resolução CONAMA n° 396, de 03 de abril de 2008 dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Pois, os resultados obtidos a partir desse processo medição direta de poços podem variar significativamente de acordo com as características locais do aquífero, como a permeabilidade do solo, a topografia da área e a precipitação pluviométrica (Rosa *et al.*, 2010).

Por isso, é importante que as medições sejam realizadas de forma sistemática e padronizada, para que os resultados possam ser comparados e interpretados adequadamente

(Ellis; Singer, 2008). Ao iniciar pela tabela 6, apresentam-se os resultados com sonda multiparâmetro da água do ponto do centro.

Tabela 6 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço do centro.

**POÇO CENTRO  
(ANÁLISE DA ÁGUA)**

PARÂMENTROS		
OD	61.5 %	4.80 ppm
CONDUTIVIDADE	54 $\mu\text{S}/\text{cm}$	18650 $\Omega \cdot \text{cm}$
SALINIDADE	0.02	
STD	27 ppm	
TEMPERATURA	30.18 °C	
pH	5.89	

Fonte: Autor.

Figura 18– Poço para abastecimento da cidade de Colares.



Fonte: Autor.

## POÇO LOTEAMENTO MINHA CASA MINHA VIDA

Tabela 7 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço do loteamento minha casa minha vida.

POÇO LOTEAMENTO MINHA CASA MINHA VIDA (ANÁLISE DA ÁGUA)		
PARÂMETROS		
OD	49.2 %	3.75 ppm
CONDUTIVIDADE	26 $\mu\text{S}/\text{cm}$	38700 $\Omega \cdot \text{cm}$
SALINIDADE	0.01	
STD	13 ppm	
TEMPERATURA	28.38 $^{\circ}\text{C}$	
pH	4.28	

Fonte: Autor.

Figura 19– Poço para abastecimento do loteamento minha casa minha vida.



Fonte: Autor.

## POÇO JANCOLÂNDIA

Tabela 8 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço do Jancolândia.

### **POÇO JANCOLÂNDIA (ANÁLISE DA ÁGUA)**

PARÂMENTROS		
OD	67.8 %	14.12 mg/L
CONDUTIVIDADE	79 $\mu$ S/cm	12710 $\Omega$ ·cm
SALINIDADE	0.04	
STD	39 ppm	
TEMPERATURA	27.08 °C	
pH	4.44	

Fonte: Autor.

Figura 20– Poço para abastecimento da comunidade Jancolândia.



Fonte: Autor.

POÇO FAZENDA

Figura 21– Poço para abastecimento da comunidade Fazenda.



Fonte: Autor.

Tabela 9 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço do Fazenda.

**POÇO FAZENDA**

PARÂMENTROS		
OD	59.2 %	4.52 ppm
CONDUTIVIDADE	27 $\mu\text{S}/\text{cm}$	37500 $\Omega \cdot \text{cm}$
SALINIDADE	0.01	
STD	13 ppm	
TEMPERATURA	27.23 $^{\circ}\text{C}$	
pH	4.35	

Fonte: Autor.

POÇO GUAJARÁ

Figura 22– Poço para abastecimento da comunidade Guajará.



Fonte: Autor.

Tabela 10 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço do Fazenda.

**POÇO GUAJARÁ**  
**(ANÁLISE DE ÁGUA)**

PARÂMENTROS		
OD	122.9 %	9.56 mg/L
CONDUTIVIDADE	28 $\mu$ S/cm	36100 $\Omega$ ·cm
SALINIDADE	0.01	
STD	14 ppm	
TEMPERATURA	28.11 °C	

Fonte: Autor.

## POÇO CANDEÚBA

Figura 23– Poço para abastecimento da comunidade Candeúba.



Fonte: Autor.

Tabela 11 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço da comunidade Candeúba.

### **POÇO CANDEÚBA (ANÁLISE DE ÁGUA)**

PARÂMENTROS		
OD	175.1 %	13.53 mg/L
CONDUTIVIDADE	62 $\mu\text{S}/\text{cm}$	16060 $\Omega \cdot \text{cm}$
SALINIDADE	0.03	
STD	31 ppm	
TEMPERATURA	28.48 °C	

Fonte: Autor.

## POÇO MARACAJÓ

Tabela 12 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço da comunidade Maracajó.

### **POÇO MARACAJÓ (ANÁLISE DE ÁGUA)**

PARÂMENTROS		
OD	67.0 %	5.18 ppm
CONDUTIVIDADE	157 $\mu\text{S/cm}$	6389 $\Omega\cdot\text{cm}$
SALINIDADE	0.07	
STD	78 ppm	
TEMPERATURA	31.25 °C	
pH	4.50	

Fonte: Autor.

Figura 24– Poço para abastecimento da comunidade Maracajó.



Fonte: Autor.

POÇO ARIRI

Tabela 13 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço da comunidade Ariri.

**POÇO ARIRI  
(ANÁLISE DE ÁGUA)**

PARÂMENTROS		
OD	64.0 %	4.94 ppm
CONDUTIVIDADE	24 $\mu\text{S}/\text{cm}$	42500 $\Omega \cdot \text{cm}$
SALINIDADE	0.01	
STD	12 ppm	
TEMPERATURA	28.74 °C	
pH	4.33	

Fonte: Autor.

Figura 25– Poço para abastecimento da comunidade Ariri.



Fonte: Autor.

## POÇO GENIPAÚBA DA LAURA

Figura 26– Poço para abastecimento da comunidade Genipaúba da Laura.



Fonte: Autor.

Figura 27– Poço para abastecimento da comunidade Genipaúba da Laura.



Fonte: Autor.

Tabela 14 - Parâmetros analisados com a sonda multiparâmetro da água do poço da comunidade Genipaúba da Laura.

<b>POÇO GENIPAÚBA DA LAURA</b>		
<b>PARÂMETROS</b>		
OD	67.1 %	5.26 ppm
CONDUTIVIDADE	20 $\mu\text{S}/\text{cm}$	51000 $\Omega \cdot \text{cm}$
SALINIDADE	0.01	
STD	10 ppm	
TEMPERATURA	28.95 °C	
pH	4.35	

Fonte: Autor.

Os exemplos descritos anteriormente, representam 45% das amostras utilizadas para construir o mapa de vulnerabilidade do município de Colares, as demais amostras continham informações suficientes no SIAGAS para serem usadas na análise da vulnerabilidade, por tanto, não foram visitadas.

## 7.2 Vulnerabilidade

Com os dados de perfil dos poços tubulares da área de estudo, obtidos no SIAGAS, e de acordo com Maia (2010), foi possível caracterizar o sistema aquífero que abrange a área como sendo livre com porosidade intergranular, compreendidos pelos sedimentos arenosos da Formação Barreiras.

O método GOD atribui índice de 0,6 a 1,0 para aquíferos livres, onde 0,6 é atribuído para aquíferos livres que apresentam cobertura, e 1,0 para aquíferos sem cobertura. Nesse trabalho, atribui-se índice 0,6 para pontos que apresentaram, na seção superior, camadas de sedimentos argilosos, já os locais que apresentaram cobertura por sedimentos arenosos, o índice empregado para tal parâmetro foi igual a 1,0.

Pois o índice de vulnerabilidade à contaminação do aquífero foi obtido pela multiplicação dos três parâmetros GOD, conforme descrito por Foster *et al.* (2006). Como resultado dos cálculos para os poços analisados neste estudo, tem-se a tabela abaixo.

Tabela 15 - Informações dos poços cadastrados no SIAGAS utilizados neste estudo e com seus respectivos índices de vulnerabilidade.

Poços	CADASTRO SIAGAS	NÍVEL ESTÁTICO (METROS)	USO DA ÁGUA	GOD	Vulnerabilidade
P 01	1500001333	2	URBANO	0,49875	Média
P 02	1500001334	3	URBANO	0,430923913	Média
P 03	1500001335	2	URBANO	0,222	Baixa
P 04	1500001336	2	URBANO	0,2085	Baixa
P 05	1500002639	12	URBANO	0,18665	Baixa
P 06	1500002638	14,9	URBANO	0,17	Baixa
P 07	1500002641	7,7	URBANO	0,184	Baixa
P 08	1500002642	5,9	URBANO	0,18592	Baixa
P 09	1500007141	6,4	URBANO	0,481142857	Média
P 10	1500007142	3,7	URBANO	0,519230769	Alta
P 11	1500007144	6,3	URBANO	0,453333333	Média
P 12	1500007147	5,7	URBANO	0,481333333	Média
P 13	1500007149	0,8	URBANO	0,54	Alta
P 14	1500007150	5,4	URBANO	0,46	Média
P 15	1500007151	4,55	URBANO	0,531	Alta
P 16	1500007157	10	URBANO	0,45	Média
P 17	1500007158	6,7	URBANO	0,448	Média
P 18	1500007161	3,8	URBANO	0,531397059	Alta
P 19	1500007162	3,6	URBANO	0,5146875	Alta
P 20	1500007164	5	URBANO	0,466666667	Média

Fonte: Autor.

Com a multiplicação dos parâmetros GOD obteve-se o índice de vulnerabilidade à contaminação do aquífero. Foram identificadas 3 classes de vulnerabilidade (Figura 28), sendo elas: baixa, média e alta. A vulnerabilidade predominante foi média, cobrindo 86,12% da região, seguida de vulnerabilidade alta com 9,78% de área e por último, a vulnerabilidade baixa, correspondendo a 4,1% da área.

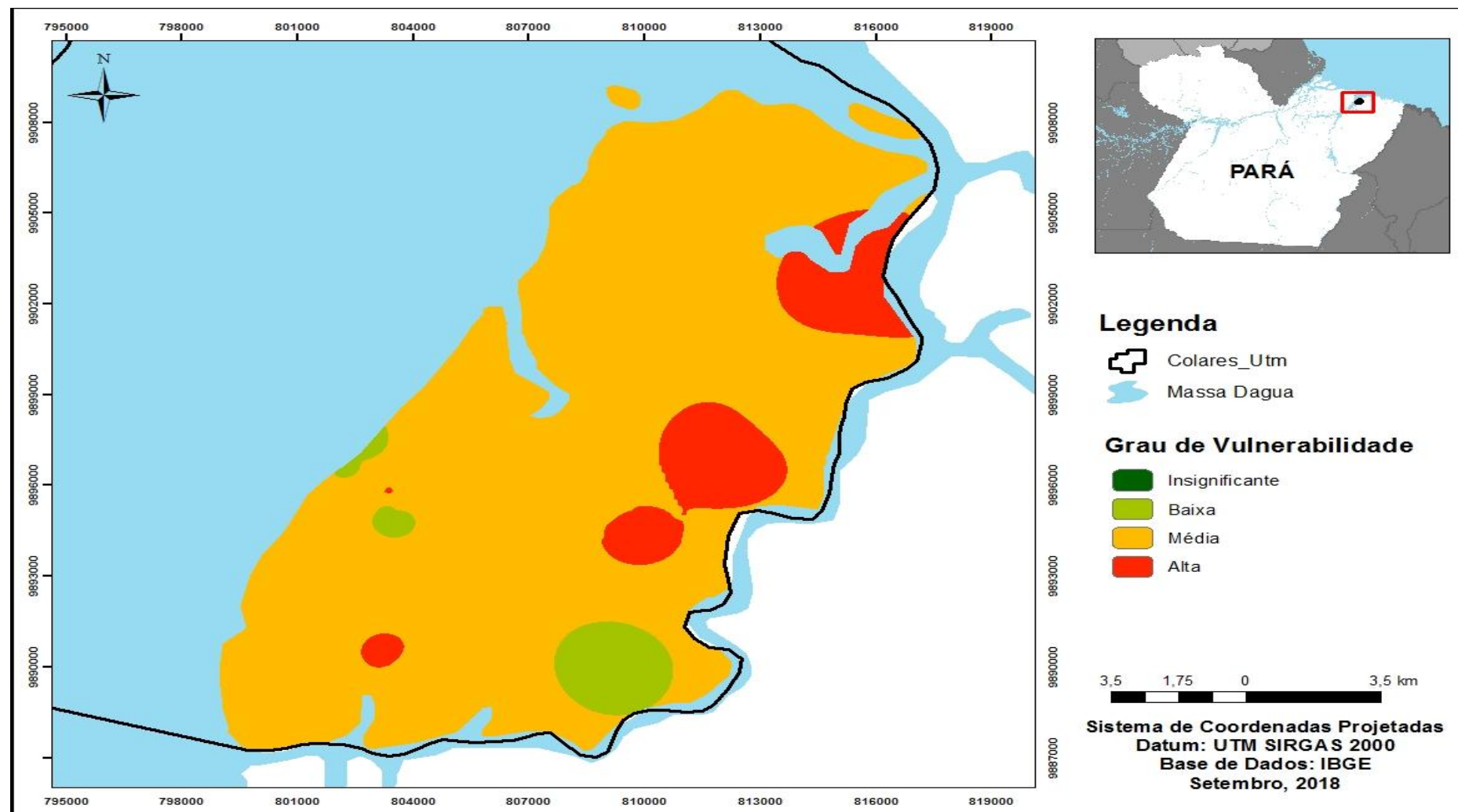
Neste sentido, a predominância da média vulnerabilidade observada em 86,12% da área de estudo (Figura 28) deve-se a ocorrência em predominância da camada superficial arenosa. Essas camadas constituídas predominantemente por areia não servem como proteção natural ao aquífero, agregando maiores índices de vulnerabilidade pelo método empregado.

A somatória da vulnerabilidade média e alta apresenta-se em 95,9% da área de estudo, o que é explicado pelo fato de se tratar de um aquífero livre, com nível estático pouco profundo, juntamente com a camada vadosa constituída por sedimentos arenosos. Essas áreas apresentam

um maior potencial à contaminação, pois a acessibilidade hidráulica é maior em função das características geológicas e hidrogeológicas do local.

Destaca-se, que em torno de 30% dos poços utilizados para abastecimento estão no centro da cidade, onde apresenta uma vulnerabilidade média predominante e uma pequena área com uma vulnerabilidade alta. Associado a isto, está a predominância do sentido do fluxo nessa área, pois caso ocorra alguma contaminação iminente do aquífero utilizado nesta área, pode se tornar preocupante a qualidade da água e conseqüentemente doenças de veiculação hídrica, outro fator agravante são os potenciais poluidores em posições desfavoráveis quanto ao fluxo subterrâneo. Diante disso, é de suma importância o planejamento de uso e ocupação do solo do município de Colares pelos gestores, assim como análises mais específicas das avaliações e proteção das zonas de captação de água subterrânea.

Figura 28 - Mapa de vulnerabilidade do município de Colares.



Fonte: Autor.

### 7.3 Potenciais Contaminantes

Inúmeras atividades humanas podem gerar carga contaminante significativa, ainda que, de maneira geral, somente alguns tipos de atividade sejam responsáveis pela maioria dos casos graves de contaminação da água subterrânea. Os resultados alcançados referentes à identificação das atividades, aspectos ambientais e impactos ambientais negativos, resultantes dos postos de combustíveis, cemitérios e lixão na Ilha de Colares-PA, foram apresentados em forma de listagem (check-list), conforme observado no Quadro 1:

Quadro 1 - Listagem (check-list) das atividades, aspectos ambientais e os impactos negativos.

Atividade	Aspecto Ambiental	Impactos Negativos	Fonte
Postos de combustíveis	Vazamento na bomba de combustíveis	Contaminação da água da rede drenagem pluvial	Moraes e Oliva (2019)Souto e Penner (2020)
		Poluição e/ou Contaminação do Solo	
		Risco a saúde pública	
	Presenças de óleos e graxas na água do Lava-Jato	Poluição e/ou Contaminação do Solo	
		Poluição e/ou Contaminação da Água	
		Contaminação da água da rede de drenagem pluvial	
	Derramamento de óleo no momento da troca	Poluição e/ou Contaminação do Solo	
		Contaminação humana	
		Contaminação do Lençol Freático	
	Vazamentos no reservatório de Combustível	Riscos à saúde pública	
		Contaminação do solo e das águas subterrâneas	
	Água utilizada na limpeza do posto	Riscos à saúde pública	
		Contaminação do solo	
Contaminação das águas subterrâneas			
Redução da disponibilidade hídrica			
Riscos à saúde pública			
Cemitérios	Presença de microrganismos na decomposição dos corpos	Contaminação da água subterrânea	Feitosa <i>et al.</i> (2020) Nascimento <i>et al.</i> (2018)
		Contaminação do solo	
		Riscos à saúde pública	
	Extravasamento de necrochorume	Risco à saúde humana	
		Contaminação microbiológica do lençol freático por vírus e bactérias	
		Contaminação do solo	
	Danificação dos túmulos devido às raízes das árvores	Alteração da qualidade da água	
Lixão	Queima e fumaça	Contaminação do lençol freático pela infiltração do necrochorume	Ferreira (2017) Crispim <i>et al.</i> (2016)
		Emissão de gases atmosféricos como metano e dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> )	
	Lixiviados e chorume	Surgimento de doenças respiratórias	
		Poluição e/ou Contaminação do Solo	
		Poluição e/ou Contaminação da água	
	Presença de óleos, solventes, gorduras, metais pesados e ácidos, entre outros resíduos contaminantes	Risco a saúde pública	
		Poluição e/ou Contaminação do Solo	
	Proliferação de micro e macrovetores	Poluição e/ou Contaminação da água	
Risco a saúde pública			
Dispersão dos resíduos sólidos	Risco a saúde pública		
Contaminação dos catadores sem equipamentos de proteção individual	Poluição visual		
	Risco a saúde pública		

Fonte: Autor.

Foram identificados alguns potenciais poluidores, entre eles: um lixão, cemitérios e um posto de combustível (Figura 29).

Logo, nesta fase de identificação preliminar, foram observadas as seguintes fontes pontuais de contaminação: 3 cemitérios, 1 posto de combustível e 1 lixão (Figura 16). De posse dos dados obtidos, foi elaborado um mapa especializando suas localizações no território da Ilha, com a finalidade de auxiliar a construção de políticas públicas apropriadas ao aproveitamento sustentável das fontes de águas subterrâneas.

Os três cemitérios identificados na fase de campo, são cemitérios antigos e não apresentam nenhuma característica de controle ambiental, mostrando fortes indícios de serem uma fonte real de contaminação. De acordo com Nascimento *et al.* (2018), quando os cemitérios não são planejados podem representar um problema socioambiental significativo. No país, os cemitérios na maior parte, apresentam grandes riscos à saúde da população e afetam a qualidade do meio ambiente (Cerqueira; De Albuquerque, 2021). Outro problema recorrente consiste na implantação de cemitérios que tem sido realizada em áreas com baixo valor imobiliário ou em condições geológicas, hidrológicas, hidrogeológicas e geotécnicas que não são legalmente adequadas (Cerqueira; Albuquerque, 2021; Nascimento *et al.*, 2018).

No que tange a questão do lixão, consiste em uma forma de destinação inapropriada, em que é depositado diretamente no solo e a céu aberto, sem considerar nenhuma norma de controle. Para Crispim *et al.* (2016) o manejo e a destinação inapropriada dos resíduos sólidos ligados com carência de políticas públicas voltadas a sua gestão, representa um problema significativo nos municípios do país, causando graves problemas ao meio ambiente, a saúde pública e afetando o bem-estar e a qualidade de vida da população. Logo, este problema necessita de uma atenção especial por parte dos tomadores de decisão e da sociedade civil.

Para Moraes e Oliva (2019), os postos de gasolina são empreendimentos que representam um alto potencial de contaminação do subsolo e das águas subterrâneas em razão de vazamentos dos tanques de armazenamento (substâncias orgânicas voláteis), derramamento e/ou transbordamento de combustível situados nestes estabelecimentos, apontadas como um risco à saúde humana e com impacto ambiental negativo ao meio ambiente. Ressalta-se, que apesar de a região Norte ter vários rios efêmeros, existe uma preferência da população pela água subterrânea para o abastecimento humano.

Os lixões ao ar livre, como a cidade de Colares, além da poluição atmosférica, poluição visual, aumento da quantidade de vetores de doenças, pode contaminar o aquífero local, como não se tem controle dos compostos descartados nesse tipo de estrutura, o potencial poluidor se

torna significativo, mesmo que em pequenas quantidades, um determinado contaminante, como o caso de alguns solventes, pode causar a contaminação de boa parte de um aquífero, inviabilizando a exploração de água para consumo.

A infiltração e percolação das águas pluviais através dos túmulos e solo provoca a lixiviação de uma série de compostos químicos orgânicos e inorgânicos através da zona não saturada, podendo alguns destes compostos atingirem a zona saturada e, portanto, poluir o aquífero. Devido a isto, o monitoramento das águas subterrâneas na vizinhança dos cemitérios é de grande importância nos estudos ambientais. Os três cemitérios identificados na fase de campo, são cemitérios antigos e sem características de qualquer controle ambiental, podendo qualquer um deles, ser não só um potencial poluidor, mas uma fonte real de contaminação.

Pois, o corpo humano em fase de decomposição começa a se transformar, e passa a ser um ecossistema de populações, formado por artrópodes, bactérias, microrganismos patogênicos destruidores de matéria orgânica e outros, podendo pôr em risco o meio ambiente e a saúde pública. O corpo humano sofre então a putrefação, que é a destruição dos tecidos do corpo por ação das bactérias e enzimas, resultando na dissolução gradual dos tecidos em gases, líquidos e sais. Os gases produzidos são H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Já o odor é causado por alguns desses gases e por pequena quantidade de mercaptana – substância que contém sulfeto de hidrogênio ligado a carbono saturado. A decomposição pode durar alguns meses ou até vários anos, dependendo da ação do ambiente (Macedo, 2009). E neste processo de decomposição há o processo de produção de um líquido chamado necrochorume.

No meio natural o necrochorume decompõe-se e é reduzido a substâncias mais simples e inofensivas, ao longo de determinado tempo. Em determinadas condições geológicas, o necrochorume atinge o lençol freático praticamente íntegro, com suas cargas químicas e microbiológicas, desencadeando a sua contaminação e poluição. Os vetores assim introduzidos no âmbito do lençol freático, graças ao seu escoamento, podem ser disseminados nos entornos imediato e mediato dos cemitérios, podendo atingir grandes distâncias, caso as condições hidrogeológicas assim o permitam.

Somente um posto de combustível foi encontrado na área de estudo, utilizando tanques enterrados como forma de armazenamento dos combustíveis, que são: gasolina, álcool e diesel.

Os principais contaminantes capazes de impactar o meio ambiente em casos de derramamentos de combustíveis são os hidrocarbonetos mono aromáticos (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos - os BTEX) e os policíclicos aromáticos, como naftaleno e benzopireno. O benzeno é sabidamente carcinogênico, sendo os outros, tolueno, etilbenzeno e os xilenos,

considerados tóxicos (Forte, 2007). Normalmente, um vazamento de combustível em um tanque de abastecimento promove diferentes fases de contaminação: livre (ou móvel), adsorvida, dissolvida, vaporizada e condensada.

Figura 29 - Entrada do lixão da cidade.



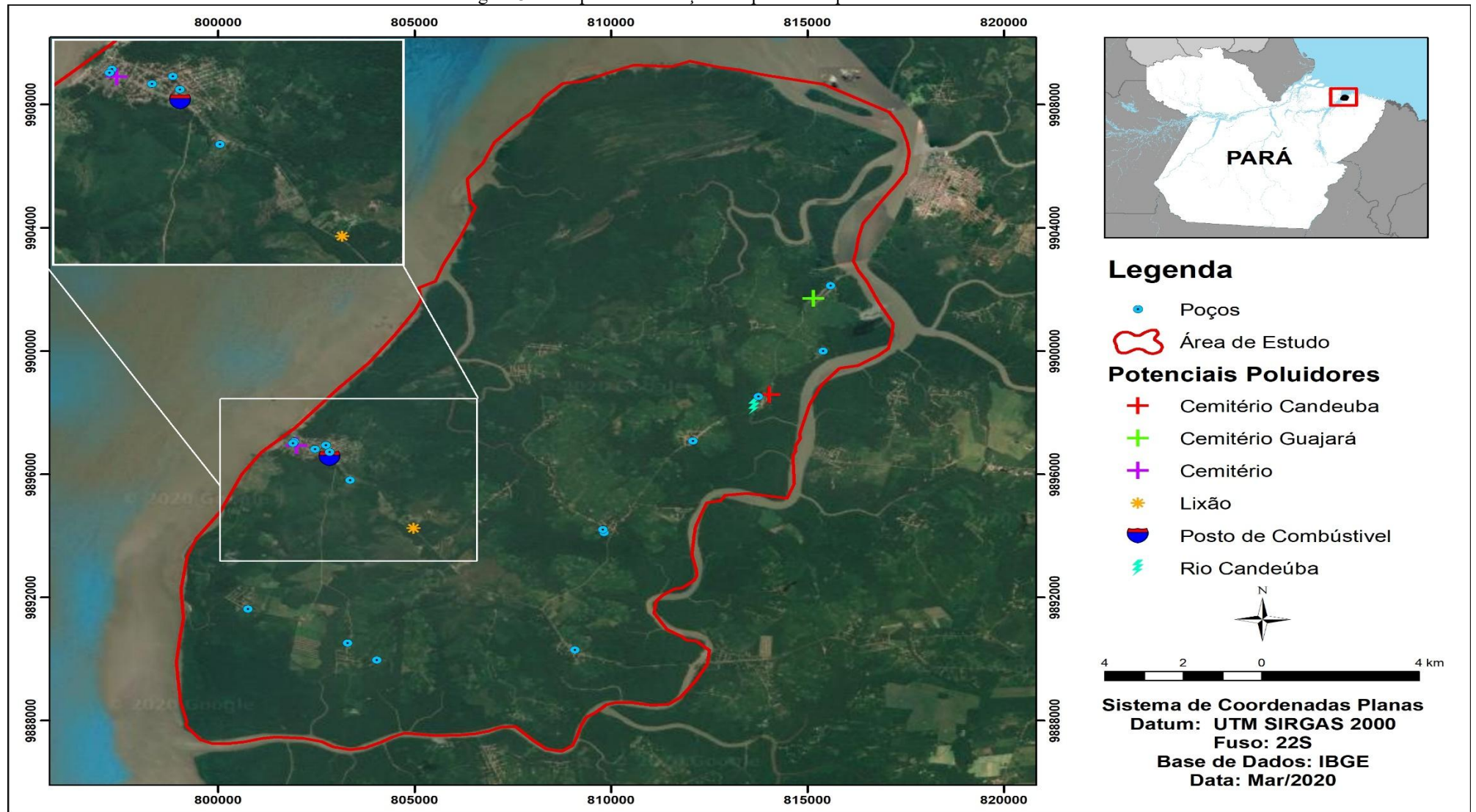
Fonte: Autor.

Figura 30 - Cemitério da Área Urbana.



Fonte: Autor.

Figura 31 - Mapa de localização dos potenciais poluidores.



Fonte: Autor.

#### **7.4 Análise da Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos**

Destaca-se, que o município de Colares tem sua gestão ambiental pautada na Lei nº 133 de 03 de julho de 2018, que dispõe sobre a criação da política de meio Ambiente no município de Colares – Estado do Pará e dá outras providências.

Sendo através desta, que determina as diretrizes em âmbito municipal para proteção do meio ambiente. Em relação aos recursos hídricos subterrâneos, não há qualquer menção específica. Mesmo, que a gestão dos recursos hídricos subterrâneos seja de competência Estadual, o município como utilizador de recursos hídricos subterrâneos para abastecimento de sua população, falha em não determinar ações rigorosas para proteger este bem tão valioso para o mundo e principalmente para os habitantes de Colares.

Neste caso, a gestão municipal dos recursos hídricos subterrâneos corresponde apenas ao processo de captação, armazenagem e distribuição de água, desde o centro da cidade até as comunidades rurais presentes na ilha. Em quase sua maioria, os sistemas autônomos de captação e distribuição de água estão mal dimensionados, ou em sua capacidade de armazenamento, ou em seu ritmo de bombeamento, ou ainda, em ambos, podendo causar um estresse hídrico na região, e conseqüentemente a falta de água para população. Além da imperícia no dimensionamento do sistema de captação, armazenamento e distribuição de água, a falta de políticas locais que visem o cumprimento das políticas federais e estaduais para proteção dos recursos hídricos subterrâneos, expõem este recurso a uma suscetibilidade à contaminação, o que poderá gerar um surto de doenças de veiculação hídrica.

Pois o referido município, não conta com o sistema de distribuição de água da COSANPA, a distribuição de água para a população se dá por sistemas autônomos mediante captação subterrânea, gerenciados pelo município. No centro da cidade há pelo menos dois poços principais equipados com reservatório elevado.

Diante disso, os poços visitados durante a pesquisa de campo, apresentaram inconformidades com o que diz as normas e legislações pertinentes a uso dos recursos hídricos subterrâneos e captação de água subterrânea, a exemplo a Lei 6.381 de 25 de julho de 2001 e as normas NBR 12212 e NBR 12244.

Os reservatórios existentes nas localidades urbanas e rurais do município, não são suficientes para atender de maneira satisfatória a população, contém volumes pouco expressivos, não armazenando uma quantidade de água significativa para diminuir o regime de bombeamento. Em alguns casos em que o bombeamento é quase que ininterrupto, há problemas com a bomba submersa dos poços, devido ao exacerbado uso dela. Em outros casos o poço não

foi dimensionado adequadamente a sua demanda, gerando assim um bombeamento contínuo para garantir o abastecimento público.

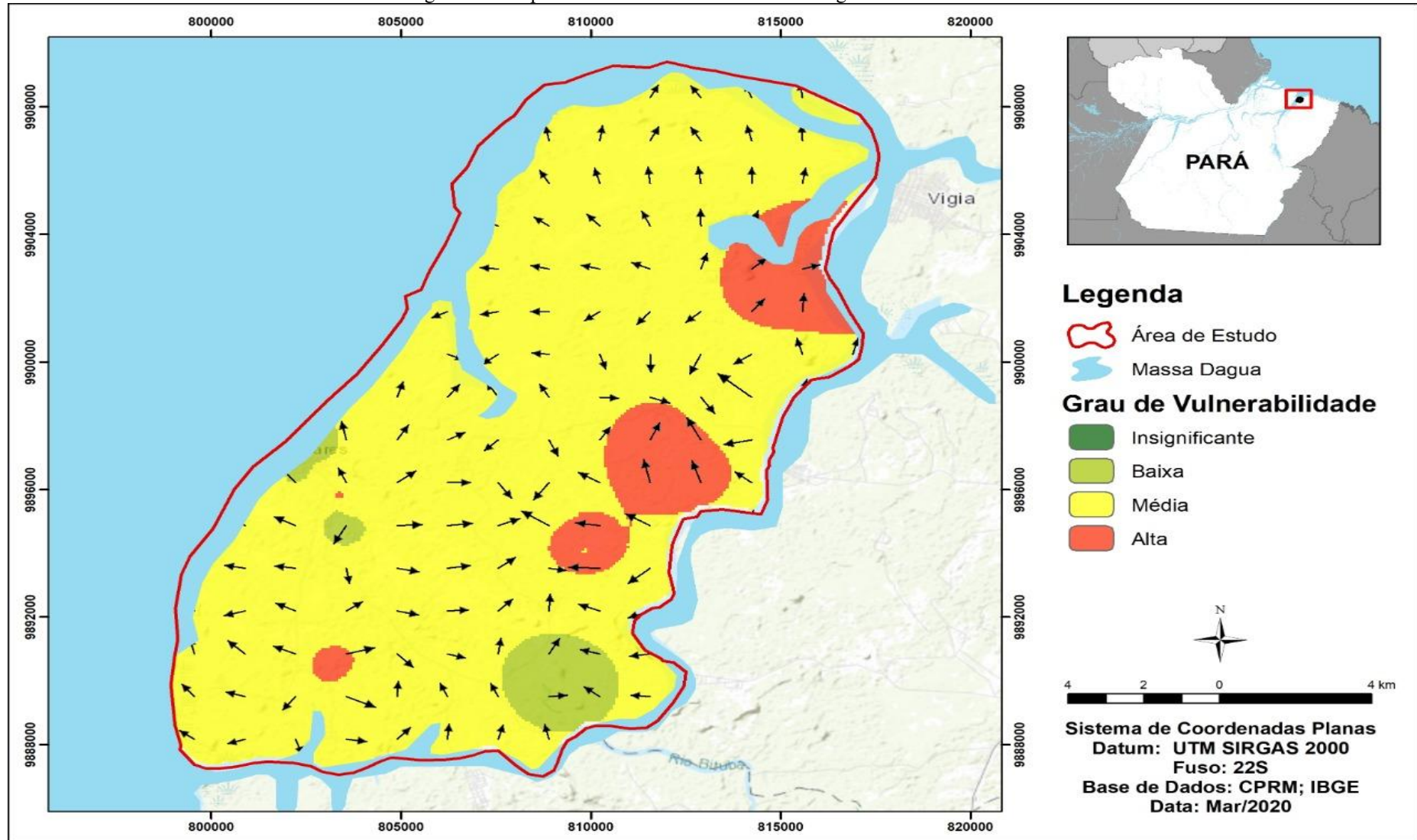
Não há em Colares um instrumento para monitoramento e/ou proteção das áreas de captação de água subterrânea, em alguns casos ocorrendo até em situações bem precárias, em termos de técnicas e locação apropriadas.

Apesar do abastecimento de pequenos núcleos rurais está dispensado da outorga de uso de recursos hídricos, é necessário que a proteção deste recurso seja realizada, visto que a água captada é para abastecimento humano.

Logo, os poços para abastecimento da cidade, deveriam atender aos requisitos mínimos de proteção sanitária, que segundo a NBR 12212 o poço deve contar com uma laje de proteção sanitária de dimensões mínimas de 1 m<sup>2</sup>, com espessura mínima de 15 cm, deve ser construída de modo que haja uma declividade do centro para as bordas e a coluna do tubo deve ficar saliente pelo menos 50 cm sobre a laje.

Com os devidos potenciais poluidores identificados e com os índices de vulnerabilidade especializados é possível através da análise do fluxo subterrâneo, identificar áreas a serem monitoradas e protegidas de determinadas atividades, assim como é possível identificar melhores áreas a serem utilizadas para captação de água para abastecimento, essas áreas podem ser visualizadas na Figura 32.

Figura 32 - Mapa de fluxo subterrâneo associado ao grau de vulnerabilidade.



Fonte: Autor.

## 7.5 Qualidade da Água

A análise físico-química da água, realizada durante a campanha de campo, contou com poucos parâmetros. Foram analisados Oxigênio Dissolvido, Condutividade, Sólidos Totais dissolvidos, Salinidade e Temperatura. Para a interpretação dos resultados obtidos foram considerados os limites preconizados na Portaria GM/MS n.º 888/2021 que define a potabilidade da água (BRASIL, 2021) e a Resolução CONAMA n.º 396, de 03 de abril de 2008, de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros físico-químico analisados.

POÇO	PARÂMETROS				
	OD	CONDUTIVIDADE	SALINIDADE	STD	TEMPERATURA
<b>CENTRO</b>	11.57 mg/L	54 µS/cm	0.02	27 ppm	30.18 °C
<b>MINHA CASA MINHA VIDA</b>	16.19 mg/L	26 µS/cm	0.01	13 ppm	28.38 °C
<b>JANCOLÂNDIA</b>	14.12 mg/L	79 µS/cm	0.04	39 ppm	27.08 °C
<b>FAZENDA</b>	9.35 mg/L	27 µS/cm	0.01	13 ppm	27.23 °C
<b>GUAJARÁ</b>	9.56 mg/L	28 µS/cm	0.01	14 ppm	28.11 °C
<b>CANDEÚBA</b>	13.53 mg/L	62 µS/cm	0.03	31 ppm	28.48 °C
<b>MARACAJO</b>	11.88 mg/L	157 µS/cm	0.07	78 ppm	31.25 °C
<b>ARIRI</b>	7.73 mg/L	24 µS/cm	0.01	12 ppm	28.74 °C
<b>GENIPAÚBA DA LAURA</b>	10.00 mg/L	20 µS/cm	0.01	10 ppm	28.95 °C

Fonte: Autor.

O oxigênio dissolvido medido no momento da coleta teve variações de 7,73 mg/L a 16,19 mg/L, e segundo a legislação, as amostras não podem ter oxigênio dissolvido menor que 6mg/L, logo todas as amostras coletas se enquadram na Classe 1, segundo o parâmetro do oxigênio dissolvido.

Quanto à condutividade não há referências de máximo ou mínimo permitido na portaria. Conforme Lima e Garcia (2008), a condutividade pode ser utilizada na contribuição para reconhecer impactos ambientais que possam ocorrer na água devido a lançamentos de esgotos e resíduos industriais.

Os sólidos totais das nove amostras ficaram muito abaixo do valor máximo permitido pela legislação, em que é estabelecido pela Portaria de Consolidação n.º 5 de 28 de setembro de 2017 o máximo de 1000 mg/L.

A temperatura e salinidade analisadas, isoladamente não indicam alterações na qualidade da água, a mesma, indicam temperaturas próximas à atmosférica, o que reforça a afirmação da captação de água de aquíferos mais próximos da superfície, onde estão mais suscetíveis a contaminação. Pois a salinidade pode indicar que não há problemas com a interferência de água salgada que circunda a ilha de Colares, não havendo a formação da cunha salina.

## 8 CONCLUSÕES

Considerando as análises das informações obtidas durante o levantamento de campo e de laboratório, onde foi possível descrever a vulnerabilidade, dentre outras características dos aquíferos da área de estudo, foi possível observar a suscetibilidade do aquífero utilizado para o abastecimento humano à contaminação, a vulnerabilidade média se estende por mais de 80% do território da ilha, o que torna um fato preocupante, visto a ausência de políticas locais para proteção deste recurso.

Há muitas medidas a serem tomadas para a devida proteção dos recursos hídricos subterrâneos, os sistemas de abastecimento de água da cidade precisam se adequar para atender o que regulamenta a Resolução CNRH n.º 92, de 5 de novembro de 2008, que estabelece critérios e procedimentos gerais para a proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro; para auxiliar tanto no diagnóstico da utilização dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais quanto para o planejamento do uso e ocupação da Ilha de Colares.

É preciso uma atenção melhor para os potenciais poluidores existentes e novos que possam vir a surgir. Será necessário um monitoramento do uso e ocupação do solo no município, que poderá servir como base para a implantação de um plano e Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) do diretor da cidade, para que novos empreendimentos não corram o risco de contaminar o recurso hídrico subterrâneo. Principalmente no que diz respeito a contaminantes específicos, que mesmo em quantidades pequenas, podem gerar grandes problemas para o aquífero.

Quanto a utilização da água dos poços para o abastecimento humano deve observar os valores máximo permitido dos parâmetros conforme preconizado pela resolução CONAMA n.º 396/08 e a Portaria GM/MS n.º 888, de 4 de maio de 2021, para proteção sanitária deles, pois o poço tubular para captação de água subterrânea se trata de uma obra de engenharia, onde se deve seguir normas pertinentes a este tipo de serviço, para evitar o máximo possível a contaminação dos aquíferos.

Diante da situação de vulnerabilidade a contaminação do aquífero que abastece o município, é necessário criar áreas de proteção, para que em áreas de alta vulnerabilidade ou em áreas estratégicas quanto ao fluxo, sejam protegidas e que tenham um uso mais restrito sobre sua superfície.

Os reservatórios e até mesmo os poços que abastecem as comunidades e o centro da cidade devem ser reavaliados para que seja determinado a eficiência do sistema ao qual foram

instalados para atender, para que o sistema se torne mais eficiente quanto ao armazenamento e bombeamento de água, reduzindo os custos ao município a longo prazo.

A vulnerabilidade calculada para a cidade de Colares, não significa um aquífero contaminado, está mais relacionado com as características geológicas e hidrogeológicas da região, é necessário um estudo mais detalhado quanto as características físico-química e bacteriológicas da água consumida pela população local para verificar a potabilidade e caso necessário dimensionar possíveis tratamento de água.

A vulnerabilidade analisada, trata-se de um método empírico, sendo necessário uma série de outras informações para chegar a uma vulnerabilidade real, mesmo que esta seja quase que impossível, pois para cada componente químico, físico ou bacteriológico a resposta da formação hidrogeológica será distinta, podendo ser mais vulnerável a um determinado solvente, no entanto ser altamente impermeável para outro composto.

É importante que futuros poços de captação subterrânea para atender a demanda da população de colares sejam executados por profissionais habilitados, para evitar possíveis vícios construtivos nos poços, que venham a diminuir o desempenho deles ou até mesmo ocasionar uma possível contaminação de aquífero. Além disto, é necessário que os futuros projetos de abastecimento público de água ou melhorias nos sistemas já existentes, sejam elaborados de forma participativa, envolvendo comunidade e prefeitura, para que não haja uma sobrecarga para nenhum dos envolvidos.

Os dados gerados por este estudo podem servir como base para delimitação de áreas de proteção, para o planejamento do uso e ocupação do solo do município, identificação de poços que necessitam certa atenção pelos responsáveis, para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos subterrâneos, bem como contribuir na difusão do conhecimento dos sistemas aquíferos da região.

## REFERÊNCIAS

ABBEY, D.; MARTIN, P.J.; BANKS, W.D.; STRATTON, B. Aquifer vulnerability assessment: the first step in developing an aquifer management strategy for the city of Ottawa. *In: CANADIAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, 54th & JOINT CGS-IAH GROUNDWATER SPECIALTY CONFERENCE JOINT CGS-IAH GROUNDWATER SPECIALTY CONFERENCE, 2nd, 2001, Calgary, Canada.*

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**. 2017, 169 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Usos da água**. Ministério do Meio ambiente e Mudanças de Climas, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; BARBOSA, M. C.; AZEVEDO, S. D.; CARVALHO, A. D. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista de Recursos Hídricos**, v. 32. n.2, p. 53-61, 2011.

ALY JUNIOR, O. **Segurança hídrica no semiárido, recursos hídricos na agropecuária e adaptação às mudanças do clima**: serviços ecossistêmicos das águas subterrâneas e aquíferos no Brasil. Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata. 2019. xiv, 181f. Tese (Doutorado em Hidrogeologia e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. doi:10.11606/T.44. 2020.tde13022020-103509. Acesso em: 08 jan. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12212:1992**. Projeto de poço para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12244:2006**. Poço tubular - construção de poço tubular para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 2006.

BARROS, C. G. D.; ROSA, A. L. D. da; SILVA, J. L. S. da; OLIVEIRA, G. A.; TEIXEIRA, L. G.; SAMPAIO, R. B. da Silva. Superfície potenciométrica e possíveis fontes de contaminação do aquífero parecis no município de Vilhena-RO, BR. **Revista Monografias Ambientais**, v15, n.1, p., 74-84, 2016.

BORBA, W. F., CUNHA KEMERICH, P. D. da, VICATO FILHO, L. L. D., PRETTO, P. R. P., FLORES, C. E. B., FRANÇA, J. R., HINTEHOLZ, D. Vulnerabilidade do aquífero à contaminação no município de Seberí/RS. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 1, p. 2960-2966, 2014.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual prático de análise de água**. 2a ed. Brasília, DF: Fundação Nacional de Saúde, 2006, 146 p.

BRASIL. República Federativa do. Ministério do Meio Ambiente. **Passo a passo da Agenda 21** Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Políticas para o Desenvolvimento Sustentável, 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - Conama. **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasília, 2011. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 25 nov. 2018.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução - Conama **Resolução nº 396**. 03 de abril de 2008.

BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAM. **Folha AS – 23 São Luiz e parte da folha AS. 24 – Fortaleza**: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso atual da terra. Rio de Janeiro, 1973. Paginação irregular (Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais, 3).

BRASIL. **Lei no 6.938**, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.

BRASIL. **Lei no 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de **Consolidação Nº 5**, de 28 de setembro de 2017. Disponível em: <http://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida---o-n---5--de-28-de-setembro-de-2017.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde/Gabinete do Ministro. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>.

CABRAL, N. M. T.; LIMA L. M. Qualidade da água do aquífero barreiras em bairros de Belém/PA. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 2, p. 37-53, 2005.

CAMPONOGARA, I. **Vulnerabilidade natural no sistema Aquífero Guarani e análise de parâmetros físico-químico das águas subterrâneas em Guaraí, BR e Artigas, UV**. Orientador Prof. Dr. José Luiz Silvério da Silva. 2006. 109f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Pós-Graduação em Geografia e Geociências, Santa Maria, RS, 2006.

CARVALHO, A. C. L.; VINAGRE, M. V. A.; MENDES, R. L. R.; LOPES, D. F.; LOPES, M. S. B. **Estudo da vulnerabilidade da água subterrânea no distrito industrial de Icoaraci (Belém-PA) (Estudo de caso)**. Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-023>.

CERQUEIRA, J. D. S., ALBUQUERQUE, H. N. de. Impactos ambientais de um cemitério não sustentável na Paraíba. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 2, n. 3, p. 49-49, 2021.

CHAVES, A. D. C. G. Análise físico-química das águas de três poços amazonas no centro da cidade de Pombal-PB. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 21, n. 2, p. 155-163, 2017.

COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS (Brasil). Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológico do Brasil. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas\\_publicacoes/Mapa\\_Dominios\\_Subdominios1.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/Mapa_Dominios_Subdominios1.pdf). Acesso em: 20 nov. 2018.

COSTA, Guilherme Castro Martins. **Modelagem de eletrofácies no intervalo cretáceo superior de um poço na bacia de Santos**. Orientador: Leonardo Fonseca Borghi de Almeida. 2008. 27f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

CRISPIM, D. L., COELHO, L., OLIVEIRA, A. M. B. M. de, ANDRADE, S. O. de, MATOS, D. M. de, MENDES, R. L. R. **Mapeamento da vulnerabilidade natural de aquífero a partir do método eletrorresistividade no campus da universidade federal do oeste do Pará – UFOPA**. Águas Subterrâneas, 2012. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27748>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

CRISPIM, D. L., RODRIGUES, R. S. S., ABREU VIEIRA, A. S. de, OLIVEIRA SILVEIRA, R. N. P. de, FERNANDES, L. L. Espacialização da cobertura do serviço de saneamento básico e do índice de desenvolvimento humano dos municípios do Marajó, Pará. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, 2016, v. 11, n. 4, p. 112-122.

ECKHARDT, R. R.; DIEDRICH, V. L.; FERREIRA, E. R.; STROHSCHOEN, E.; DEMAMAN, L. C. Mapeamento e avaliação da potabilidade da água subterrânea do Município de Lajeado, RS, Brasil. **Revista Ambiente & Água, Taubaté**, v. 4, n. 1, p. 58-80, 2009.

ELLIS DV; SINGER JM. **Well Logging for Earth Scientists**. Springer, The Netherlands, 2 ed., 2008, 692 p.

ESCADA, D. C. dos S. **Mapeamento da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação das Águas Subterrâneas do Município de Cajamar – SP**. Orientadora: Sueli Yoshinaga Pereira. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

FERNANDES, A.J.; ODA, G.H.; IRATANI, M.A. **Mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos fraturados Pré-Cambrianos da Região Metropolitana de Campinas**. São Paulo, 2002. Volume I: Relatório Técnico Final. Instituto Geológico – IG, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo.

FERREIRA, C. S.; HERDER, I.; COSTA, M. L.; FERREIRA, A. D. **Monitorização da qualidade da água subterrânea na Escola Superior Agrária de Coimbra**. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, p. 1-13, 2009.

FORTE, E. J.; AZEVEDO, M. S.; OLIVEIRA, R. C. de; ALMEIDA, R. de. Contaminação de aquífero por hidrocarbonetos: estudo de caso na Vila Tupi, Porto Velho - Rondônia. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 30, n. 7, p. 1539-1544, 2007.

FOSTER, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, 38, 1987, NOORDWIJK. **Proceedings and Information of the International Conference held in the Netherlands**. Noordwijk: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 69-86.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: Pan American center for sanitary engineering and environmental sciences (CEPIS), 1988. 88 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. São Paulo: Servemar, 2006.

GUIGUER, N.; KOHNKE, M. W. Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. **Waterloo Hydrogeologic**, Inc. 101-460 Phillip Street – Waterloo, ON – Canada N2T 2L5 t 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22314>. Acesso em: 01 de maio de 2023.

HIRATA, R. **Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto Geológico, CETESB, 2º v. 1997.

HIRATA, R., SUHOGUSOFF, A. V., MARCELLINI, S. S., VILLAR, P. C., MARCELLINI, L. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento**. São Paulo: Trata Brasil, 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **RADAM BRASIL**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas\\_e\\_mapas/bases\\_cartograficas\\_continuas/bcim/](ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bcim/). Acesso em: 26 Fev. 2020.

KEMERICH, P. D. C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; VOLPATO, F.; SAUCEDO, E. M. **Determinação da vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea no Bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro em Santa Maria-RS**. Engenharia Ambiental, v. 1, p. 85-98, 2011.

LEAL, A. de S. **As Águas Subterrâneas no Brasil**. O Estado das Águas no Brasil – Perspectivas de Gestão e Informação de Recursos Hídricos, Brasília-DF: ANEEL, SIH; MMA, SRH; MME, p. 139-164. 1999.

LIMA, W. S.; GARCIA, C. A. B. Qualidade da água em Ribeirópolis-SE: o açude do cajueiro e a barragem do João Ferreira. **Scientia Plena**, Sergipe, v. 4, n. 12, p.1-24, dez. 2008.

LÖBLER, C. A.; SILVA, J. L. S. da. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Nova Palma, Rio Grande do Sul, Brasil. **Rev. Ambiente & Água** [online]. 2015, vol.10, n.1, pp.141-152. ISSN 1980-993X. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1390>.

MACÊDO, J. A. B. **Águas e Águas**. Belo Horizonte. CRQ-MG, 977p. 2009.

MATOS, D.; MENDES, R. Mapeamento da vulnerabilidade natural de aquífero a partir do método eletroresistividade no campus da Universidade Federal do Oeste Do Pará – UFOPA. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2012. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27748>. Acesso em: 7 out. 2024.

MELLO, Yara Rúbia de; OLIVEIRA, Therezinha Maria Novais de. Análise estatística e geoestatística da precipitação média para o município de Joinville (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 229-239, 2016.

MENEGOL, L. R. **Paralelização de método de interpolação de dados: krigagem**. Orientador: Marcelo Trindade Rebonatto. 2004. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências da Computação) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2004.

MORAES, Y. G., OLIVA, P. C. Estudo integrado para identificação por hidrocarbonetos na subsuperfície de postos de combustíveis no município de Baião (Pará, Brasil). **Brazilian Journal of Development**, v.5, n.12, p. 30252-30271, 2019.

MOTTA, R. **Utilização de critérios econômicos para a valorização da água no Brasil**. Rio de Janeiro: IPEA, 1998.

NASCIMENTO, F. L., SENHORAS, E. M., FALCÃO, M. T. Necrópoles e os impactos ambientais: cemitério público municipal, Boa Vista-RR. **Revista Baru- Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos**, v. 4, n. 2, p. 236-256, 2018.

PIMENTEL, A. R. C.; PACHECO, J. J.; PALHETA, M. V. O.; COSTA JÚNIOR, R. N. da F.; RIBEIRO, S. de O.; TOSTES, W. S. **Estatística municipal**. Colares, 2012.

PINHEIRO, A.V.R. **Uso de ferramentas multidisciplinares na avaliação de vulnerabilidade e risco a subsidência no meio cárstico na cidade de Castanhal, Nordeste do Pará - Brasil**. 2009. 211 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências, Belém, 2009.

REBOUÇAS, A. C. Estratégias para se beber água limpa. *In*: FUNDAÇÃO PREFEITO FARIA LIMA. **O município no século XXI: cenários e perspectivas**. São Paulo: FPFL/Cepam, 1999. p.199-215.

ROSA, T. L. S. **Identificação de litologias em perfis de poço por inferência fuzzy**. Orientador: André José Neves Andrade. 2010. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

SGB - SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - SIAGAS. Brasília: SGB, 2018. Disponível em: <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>. Acesso em: 29 de ago. 2018. Base de dados.

SILVA, D. D. D., MIGLIORINI, R. B., SILVA, E. D. C., LIMA, Z. M. D., MOURA, I. B. D. Falta de saneamento básico e as águas subterrâneas em aquífero freático: região do Bairro Pedra Noventa, Cuiabá (MT). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 43-52, 2014.

SILVA, J.M.L. da. **Caracterização e classificação de solos do terciário no Nordeste do Estado do Pará.** Itaguaí, RJ, 1989, 198p.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. de; COSTA, C. T. F. da; SILVEIRA, J. das G. P. da; JÚNIOR, F. J. B. de A. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. **Rev. Esc. Minas.** vol.62 no.2. Ouro Preto, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672009000200015>.

UNIÃO INTERNACIONAL PARA A CONSERVAÇÃO DA NATUREZA (UICN); Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA; Fundo Mundial para a Natureza - WWF. **Cuidando do planeta Terra** - uma estratégia para o futuro da vida. São Paulo: UICN/Pnuma/WWF, 1991.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC, AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO) and World Water Assessment Programme (WWAP). 2003. **Water For People, Water For Life: The United Nations World Water Development Report.** New York: UNESCO / Berghahn Books.

VARGAS, T. de, GOMES, M. G.; BELLADONA, R.; ADAMI, M. V. D. **Aplicação do interpolador IDW para elaboração de mapas hidrogeológicos paramétricos na região da Serra Gaúcha.** *Scientia cum industria*, v.6. n.3, p.38-43, 2019. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br>. Acesso em: 20nov. 2018.

WHITMAN, B. E.; MIHELICIC, J. R.; MAYER, A. S. **Engenharia Ambiental: fundamentos, sustentabilidade e projeto.** Editora Grupo Editorial Nacional. Tradução Ramira Maria Siqueira da Silva Pires – Rio de Janeiro: LTC, 2012. ISBN 978-85-216-1909-3.

**ANEXOS A**