



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOLOGIA**

---

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**DIAGNÓSTICO E COMPARAÇÃO CARTOGRÁFICA DE  
VULNERABILIDADE NATURAL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS  
URBANAS DO DISTRITO INDUSTRIAL DE ICOARACI - BELÉM**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:**

**GABRIEL RIPARDO FURTADO**

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima (UFPA)**

---

**BELÉM – PARÁ  
2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOLOGIA**

---

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**DIAGNÓSTICO E COMPARAÇÃO CARTOGRÁFICA DE  
VULNERABILIDADE NATURAL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS  
URBANAS DO DISTRITO INDUSTRIAL DE ICOARACI - BELÉM**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:**

**GABRIEL RIPARDO FURTADO**

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima (UFPA)**

---

**BELÉM – PARÁ  
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema  
de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

F992d Furtado, Gabriel Ripardo.  
Diagnóstico e comparação cartográfica de  
vulnerabilidade natural de água subterrâneas urbanas do  
distrito industrial de Icoaraci - Belém / Gabriel Ripardo  
Furtado. — 2024.  
xiii, 60 f. Color.

Orientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Dra. Aline Maria Meiguins de  
Lima Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -  
Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências,  
Faculdade de Geologia, Belém, 2023.

1. Hidrogeologia . 2. GIS. 3. Águas subterrâneas. 4. Poços.  
5. Vulnerabilidade. I. Título.

CDD 551.49098115

---



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**FACULDADE DE GEOLOGIA**

---

**DIAGNÓSTICO E COMPARAÇÃO CARTOGRÁFICA DE  
VULNERABILIDADE NATURAL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS  
URBANAS DO DISTRITO INDUSTRIAL DE ICOARACI - BELÉM**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado por:**

**GABRIEL RIPARDO FURTADO**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em Geologia, Área  
de concentração: Hidrogeologia e Linha de pesquisa: Recursos hídricos e  
Geologia ambiental**

Data da aprovação: 22/12/2023

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ALINE MARIA MEIGUINS DE LIMA  
Data: 28/02/2024 14:29:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima- Orientadora**  
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RAIMUNDO NONATO DO ESPIRITO SANTO DOS  
Data: 29/02/2024 10:11:58-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Prof. Dr. Raimundo Nonato do Espírito Santo dos Santos- Membro Interno**  
Universidade Federal do Pará

---

**Ms. Fhábio Glayson Reis Pinheiro- Membro Externo**  
Serviço Geológico do Brasil

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por minha vida e por ter me abençoado com a melhor família que eu poderia ter e terem me apoiado em todas as empreitadas e aventuras que tive. Mesmo que eu pudesse escolher dentre milhares, ainda seria eles.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), por apoiar a ciência e ser uma excepcional instituição de ensino pública e de qualidade. A todos da Faculdade de Geologia, incluindo professores com Fábio Domingos, Estanislau Luczynski, Camila Nascimento, Carlos Marcello, Vizeu, Joel, entre tantos outros que ajudaram em direcionamento e conversas.

A Prof<sup>ª</sup>. Dra. Aline Meiguins, por toda a dedicação e paciência em me orientar durante o processo de construção deste trabalho, compreendendo até meus sumiços. E quando decidia retornar ao trabalho, estava sempre a disposição para me apoiar de onde quer que estivesse.

Agradeço ao acolhimento de todas as empresas que já estagiei, como a Inside arqueologia e consultoria, a Hidrosam saneamento e meio ambiente a que me cedeu dados para complementar este trabalho e Norte geo consultoria. Conviver com todas, cada uma com seu ambiente específico, e me proporcionaram grandes mentores, estes me ajudaram a amadurecer meus pensamentos e atitudes, assim me preparando para essa minha futura jornada de trabalho.

Agradeço aos amigos que essa jornada na geologia me deu, tanto da minha primeira turma geo 15, quando ao que abraçaram de coração Geo 16. Um abraço e consideração a todos os outros que também me aturaram nessa caminhada.

*Que deus nos conceda serenidade para aceitar as coisas que não podemos mudar, mas que também nos de coragem para mudar aquilo que podemos e sempre sabedoria para reconhecer a diferença entre as duas.*

*Joel Jota*

## RESUMO

O complexo Industrial localizado na porção leste a área administrativa de Icoaraci, limitado pelos bairros Maracaruera, Águas Negras e Campina de Icoaraci, foi implantado para fomentar a capacidade industrial do município e facilitar o escoamento de produtos madeireiros, agroindustriais e serviços como estaleiros e logísticas de produtos por via terrestre e via fluvial. Adicionando ao contexto há uma crescente demanda de organização urbana para construção de moradias e adequações aos terrenos instalados de forma inadequada e que não possuem mecanismos de abastecimento e saneamento de qualidade assim apresenta-se grande potencial de poluição de águas subterrâneas. Logo o atual trabalho foi elaborado para a construção de modelos de vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas para a porção norte do município de Belém, onde abrange a região do distrito e regiões adjacentes, utilizando o índice GOD e DRASTIC, a fim de mapear áreas propícias possível captação de água de qualidade, comparar a veracidade de cada método e qual melhor se aplica na região, bem como criar um instrumento subsidiário para gerar um planejamento espacial que integre os recursos hídricos subterrâneos. Para tanto, foram utilizados dados de poços perfurados registrados no banco de dados nacional SIAGAS e dados de acompanhamento de perfurações locais totalizando 60 poços. Foram levantados dados como capacidade de recarga de aquífero, profundidade de nível estático, material do aquífero, topografia, tipos de solo e condutividade tende mais ênfase nos dados dos poços com captação de aquíferos mais rasos da formação barreiras. No estudo, o resultado da modelagem realizada pela superposição desses índices em álgebra de mapas em ambiente SIG apresentou índices cumulativos variando de 0,2 a 0,7, significando que o aquífero possui vulnerabilidade média e alta e 96,37 a 165,96 significando que há áreas de muito baixa a extrema vulnerabilidade, em comparação ambos delimitaram resultados satisfatórios porém o método GOD se demonstrou mais restritivo em áreas, nas regiões mais populosas e próximas da área industrial, mas o método DRASTIC, apresenta mais detalhamento no aspecto de observar a capacidade de infiltração no solo. Espera-se que esta pesquisa seja útil na gestão ambiental sustentável, apoiando políticas de conservação dos recursos hídricos subterrâneos, conforme previsto na legislação nacional.

**Palavras-chave:** hidrogeologia; GIS; vulnerabilidade natural; água subterrânea; poços de captação.

## ABSTRACT

The Industrial complex located in the eastern portion of the administrative area of Icoaraci, limited by the Maracaruera, Águas Negras and Campina de Icoaraci neighborhoods, was implemented to promote the municipality's industrial capacity and facilitate the flow of timber, agro-industrial products and services such as shipyards and logistics. products by land and river. Adding to the context, there is a growing demand for urban organization to build housing and adapt to inadequately installed land that does not have quality supply and sanitation mechanisms, thus presenting a great potential for groundwater pollution. Therefore, the current work was designed to build models of vulnerability to groundwater contamination for the northern region of the municipality of Belém, which covers the region of the district and adjacent regions, using the GOD and DRASTIC index, in order to map suitable areas possible capture of quality water, compare the veracity of each method and which one best applies in the region, as well as creating a subsidiary instrument to generate spatial planning that integrates underground water resources. To this end, data from drilled wells registered in the national database SIAGAS and monitoring data from local drillings totaling 60 wells were used. Data such as aquifer recharge capacity, static level depth, aquifer material, topography, soil types and conductivity were collected, with more emphasis on data from wells capturing shallower aquifers from the barrier formation. In the study, the result of the modeling carried out by superimposing these indices in map algebra in a GIS environment presented cumulative indices ranging from 0.2 to 0.7, meaning that the aquifer has medium and high vulnerability and 96.37 to 165.96 meaning that there are areas of very low to extreme vulnerability, in comparison both delimited satisfactory results, however the GOD method proved to be more restrictive in areas, in the most populated regions and close to the industrial area, but the DRASTIC method, presents more detail in the aspect of observing the infiltration capacity into the soil. It is expected that this research will be useful in sustainable environmental management, supporting conservation policies for underground water resources, as provided for in national legislation.

**Keywords:** hydrogeology; GIS; natural vulnerability; subterranean water; collection wells.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Áreas representativas de aglomerados sub normais e demais unidades do município de Belém. ....	4
Figura 2- Evolução da ocupação e sua relação com as formas de cobertura na área administrativa DAICO .....	5
Quadro 1- Principais processos do ciclo hidrológico.....	9
Figura 3- Relação integrada entre as águas superficiais e subterrâneas e ciclo hidrológico.....	10
Quadro 2- Danos de alto grau a aquíferos superficiais.....	11
Figura 4- Relação integrada entre as águas subterrâneas. ....	12
Quadro 3 - Parâmetros físicos de avaliação de qualidade de água.....	14
Quadro 4 - Revisão de métodos de análise de vulnerabilidade de águas subterrâneas.....	16
Figura 5- Parâmetros de avaliação do método GOD. ....	17
Figura 6- Parâmetros componentes do DRASTIC. ....	18
Figura 7- Fluxograma descritivo das principais etapas do trabalho. ....	19
Figura 8- Produção simplificada do mapa de acordo com o método GOD.....	21
Figura 9- Ilustração da composição do sistema de abastecimento de Belém .....	24
Figura 10- Composição do sistema de abastecimento na DAICO.....	25
Figura 11- Mapa com as unidades geológicas, indicando a distribuição destas na área de estudo. ....	26
Quadro 5 - Resumo dos aspectos hidrogeológicos do DAICO.....	27
Figura 12- Distribuição dos poços na área avaliada. ....	28
Figura 13- Profundidade dos poços.....	29
Figura 14- Nível estático dos poços avaliados. ....	29
Figura 15- Vazão de estabilização dos poços avaliados.....	30
Figura 16- Distribuição segundo o parâmetro G. ....	31
Figura 17- Distribuição segundo o parâmetro O. ....	32
Figura 18- Distribuição segundo o parâmetro D. ....	33
Figura 19- Distribuição percentual segundo a vulnerabilidade natural avaliada.....	34
Figura 20- Vulnerabilidade natural avaliada. ....	34
Figura 21- Distribuição segundo o índice D.....	35
Figura 22- Resultado da distribuição do balanço hídrico.....	37
Figura 23- Distribuição segundo o Parâmetro S.....	39
Figura 24- Distribuição segundo o Parâmetro T. ....	40

Figura 25- Ilustração descrevendo os perfis associados.....	41
Figura 26- Resultado final obtido segundo o DRASTIC. ....	45
Figura 27- (a) Método GOD (1 - Desprezível, 2 - Baixa, 3 - Média, 4 - Alta, 5 - Extrema). (b) Método DRASTIC (1 - Baixa, 2 - Intermediária C, 3 - Intermediária B, 4 - Intermediária A, 5 - Alta). Distribuição % das Classes.....	47

**LISTA DE TABELAS**

Tabela1- Valores associados ao método DRASTIC.....	23
Tabela 2- Balanço hídrico para região de Belém, partindo dos dados de precipitação e temperatura no período de 1961 a1990.....	36
Tabela 3- Valores de condutividade hidráulica.....	42
Tabela 4 - Poços de referência identificados.....	43
Tabela 5 -Valores classificados segundo o DRASTIC.....	43

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iv
<b>EPÍGRAFE</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	x
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 <b>Objetivo Geral</b> .....	3
1.2.2 <b>Objetivos Específicos</b> .....	3
1.3 <b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	3
1.3.1 <b>Características do território</b> .....	3
1.3.2 <b>Relação socioeconômica com usos das águas subterrâneas</b> .....	6
<b>2 REVISÃO TEÓRICA</b> .....	8
2.1 A BACIA HIDROGRÁFICA NO CONTEXTO DO CICLO HIDROLÓGICO.....	8
2.2 <b>ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - CARACTERÍSTICAS E VULNERABILIDADES</b> .	10
2.2.1 <b>Parâmetros físico-químicos</b> .....	13
2.2.2 <b>Vulnerabilidade de aquíferos</b> .....	15
2.2.2.1 Metodologia GOD .....	27
2.2.2.2 Metodologia DRASTIC .....	27
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	19
3.1 BASE DE DADOS SECUNDÁRIOS.....	19
3.2 INVENTÁRIO DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS ELABORADOS .....	20
3.2.1 <b>Características geológicas</b> .....	20
3.2.2 <b>Caracterização hidrogeológica</b> .....	20
3.2.3 <b>Vulnerabilidade segundo o método GOD</b> .....	21
3.2.4 <b>Vulnerabilidade segundo o método DRASTIC</b> .....	22
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	24
4.1 DETALHAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS .....	25
4.2 CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE SEGUNDO O GOD .....	30

4.3	CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE SEGUNDO O DRASTIC.....	35
4.3.1	Índice D – Nível de lençol freático .....	35
4.3.2	Índice R – Parâmetro de recarga .....	36
4.3.3	Índice A – Parâmetros de componentes camada aquífero saturada .....	38
4.3.4	Índice S – Parâmetros de tipos de solo .....	38
4.3.5	Índice T – Parâmetros de topografia local .....	40
4.3.6	Índice I – Parâmetros de capacidade de camadas não saturadas .....	41
4.3.7	Índice C – Parâmetros de condutividade hidráulica.....	42
4.3.8	Classes de vulnerabilidades do DRASTIC .....	43
4.4	DISCUSSÃO E ANÁLISE COMPARADA.....	46
5	CONCLUSÕES .....	50
	REFERÊNCIAS .....	52
	APÊNDICE A.....	57
	APÊNDICE B .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das principais visões de planejamento de sustentabilidade e desenvolvimento vigentes ao redor do mundo é a Agenda 2030, projeto idealizado pela Organização das Nações Unidas (ONU), difundido em todos os países adeptos. Este possui 17 eixos de ação para boas práticas e objetivos de desenvolvimento sustentável, a 6<sup>o</sup> possui a diretriz relacionada a gestão sustentável de água.

No que diz respeito a esta diretriz, a meta é assegurar a disponibilidade e gestão sustentável de água e saneamento para todos. Esse é um contexto muito favorável ao Brasil, devido a disponibilidade de água doce, correspondente a aproximadamente 13,8% do total do cenário mundial. Apesar destes dados favoráveis, grande parte desses recursos não atendem à demanda, que se reflete de forma desigual em todo território nacional, principalmente nas regiões mais distantes dos centros urbanos, com ênfase na região norte e nordeste (Cornejo *et al.* 2005).

A visão de preservação dos recursos hídricos na região norte é pouco desenvolvida de forma prática, existindo o senso comum pela população e pelos órgãos gestores de abundância de água doce, essa visão dificulta o desenvolvimento de uma cultura de monitoramento ambiental e de saneamento.

Os recursos hídricos no estado do Pará são disciplinados por meio da Lei Federal n<sup>o</sup> 9.433 de 1997, que dispõe sobre a Política Nacional de Recursos Hídricos, que no seu escopo explana a necessidade de integração de gestão dos recursos hídricos, ambiental, e uso de solos. E pelo órgão gestor da política hídrica no estado representado pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (Semas), segundo a Lei Estadual n<sup>o</sup>6.381, de julho de 2001, resoluções do Conselho Estadual de Recursos Hídricos.

Um sistema de aquíferos é definido por formações geológicas que possuem capacidade de armazenamento, transmissão e produção significativa de água. Os sistemas aquíferos são agrupados em duas categorias principais de unidades hidroestratigráficas distintas por sua origem de tipologia litológica e terreno: podem ser aquíferos cristalinos, permeáveis por fraturamento; e aquíferos sedimentares, permeáveis por porosidade intergranular (Ana 2005).

Os atributos de hidrogeologia que comumente são pesquisados e abordados devido a dispersão e maiores riscos de contaminação nesse contexto são: contaminações oriundas de metais pesados, compostos clorados e hidrocarbonetos; no geral são os que maior acarretam

riscos ambientais (Feitosa *et al.* 2008, Mma, 2007). Portanto, grande parte das linhas de

pesquisa e dos trabalhos já realizados são voltados para modelamentos matemáticos e cartográficos visando identificação, classificação de fontes poluidoras e mapeamento de áreas de maior perigo de contaminação (Franz 2022, Silva *et al.* 2020, Carvalho *et al.* 2020, Figueiredo *et al.* 2004, Pinheiro *et al.* 2015, Moura 2014, Soares 2018, Melo Junior 2002).

No Pará, poucos órgãos governamentais tem como foco o monitoramento hidrogeológico ou de saneamento mais robusto, porém na última década houve uma evolução das ferramentas de acompanhamento de uso e ocupação humana no meio ambiente, com isso órgãos ambientais como Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (Semas), diretorias da Agencia Nacional de Águas e Saneamento (Ana) em conjunto com Serviço Geológico Brasileiro (Sbg), concessionárias como a Companhia de Saneamento do Pará (Cosanpa), criaram muitos modelos digitais, banco de dados e protocolos de estudos de acordo com a evolução de projetos e ocupação humana na Amazônia.

O trabalho realizado visa apresentar um exemplo de aplicação, por meio de uma comparação mais específica de vulnerabilidade baseada em descrição litologia e outros conjuntos de informações, existentes de bancos de dados de poços da Região Metropolitana de Belém (R.m.b.), mais especificamente nos que refletem o contexto de evolução urbana no Distrito Industrial de Icoaraci.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Em função das características geoambientais, promover estratégias de prevenção a contaminação e conhecimento de aquíferos supeciais é de plena importância para o desenvolvimnto local e expansão adequada tanto do espaço urbano, quanto espaço industrial.

As metodologias utilizadas neste trabalho tem o intuito de fornecer mais um instrumento útil ao planejamento e construção de novos poços além de refinar o processo da metodologia proposta anteriormente, já que é claramente observado a expansão da cidade e dos bairro adjacentes e com isso aumento da demanda de águas subterrânea.

Devido ao aumento de consumo de água e perceptiva falta de adequação de demandas das companhias de saneamento é estimulada a perfuração de poços para suprir a necessidade local e estudos como o realizado ajudam a expor as características locais de aquífero e mostra a importancia de construção de acordo com as normas vigentes da ABNT BR, para não transforma-los em pontos de contaminação.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Realizar o mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero livre localizado na área de influência do Distrito Industrial e dos bairros de Maracacuera, Aguas Negra, Parque Guajará, Tenoné, Agulha e Capina de Icoaraci, incluídos nas sub-bacias de Outeiro, Ananin e Paracuri.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os riscos que a disposição dos resíduos podem oferecer para os recursos hídricos da área adjacentes aos distrito industrial.
- Comparar os métodos GOD (Foster & Hirata 2006) e DRASTIC (Aller *et al.* 1987), indicando similaridades e divergências.

## 1.3 ÁREA DE ESTUDO

### 1.3.1 Características do território

A área selecionada para pesquisa do estudo foi a região leste do distrito administrativo de Icoaraci por apresentar um contexto de desenvolvimento de ocupação industrial e residencial mais atual de crescimento da cidade de Belém, e abrange os bairros Cruzeiro, Ponta Grossa, Maracacuera, Agulha, Campina de Icoaraci, águas negras, Parque Guajará, Paracuri e Tenoné (Figura 1).

Os distritos administrativos passaram por mudanças estruturais partindo da década de 60, após a desativação do Ramal do Pinheiro da estrada de ferro de Bragança e da construção da rodovia Augusto Montenegro. Houve uma mudança na lógica ocupacional da região, que anteriormente era um pequeno núcleo urbano (Vila Pinheiro) e balneário frequentado pelas elites locais. Nos anos subsequentes, durante a década de 70, e após a mudança logística, foi implementado o projeto de desenvolvimento local, de distrito industrial de visava sustentar o desenvolvimento de atividades econômicas ligadas ao comércio de produtos químicos, água mineral, madeiras, pescados, bebidas, horti-fruti e serrarias (Luz *et al.* 2012, Belfort 2023).

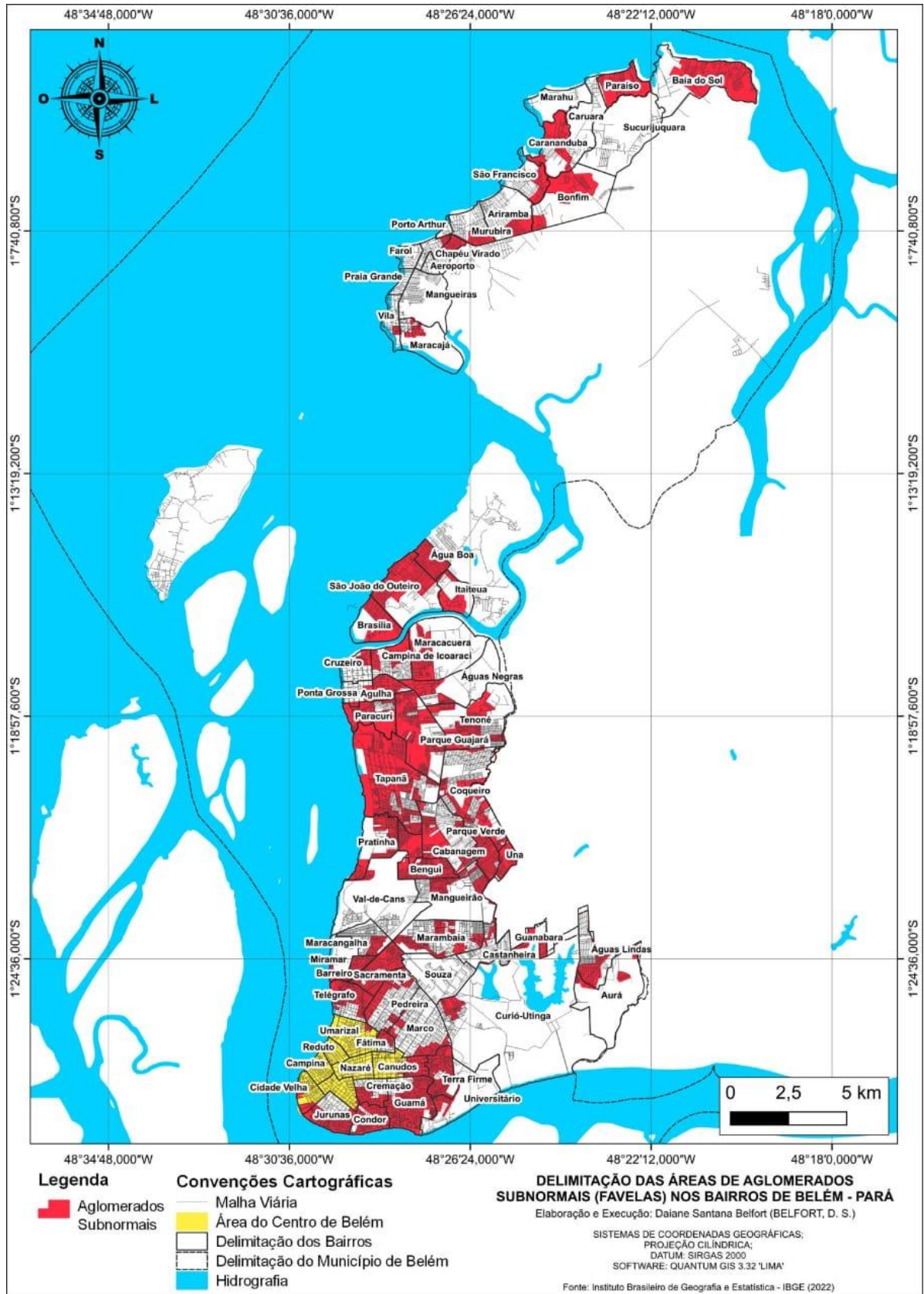


Figura 1- Áreas representativas de aglomerados sub normais e demais unidades do município de Belém.

Fonte: Belfort (2023).

O Distrito Industrial de Icoaraci possui 48 empresas, em uma área de 205 hectares, envolvendo a indústria naval, extrativismo vegetal, metalurgia, beneficiamento de madeira, logística e distribuição; este é gerido pela Companhia de Desenvolvimento Econômico do Pará (Codec 2022, Otobo 2015), e faz parte do programa de expansão de produção de base e que contempla outros 5 distritos industriais do estado. Durante a década de 80, a grande implantação de conjuntos habitacionais populares e ocupação espontâneas (invasões), tornou o distrito com a maior área de expansão urbana, grandes condomínios paralelos as grandes vias construídas (Luz *et al.* 2012). Exemplificado pelo histórico de ocupação dos bairros Tenoné, Tapanã e Maracacuera (Figura 2).

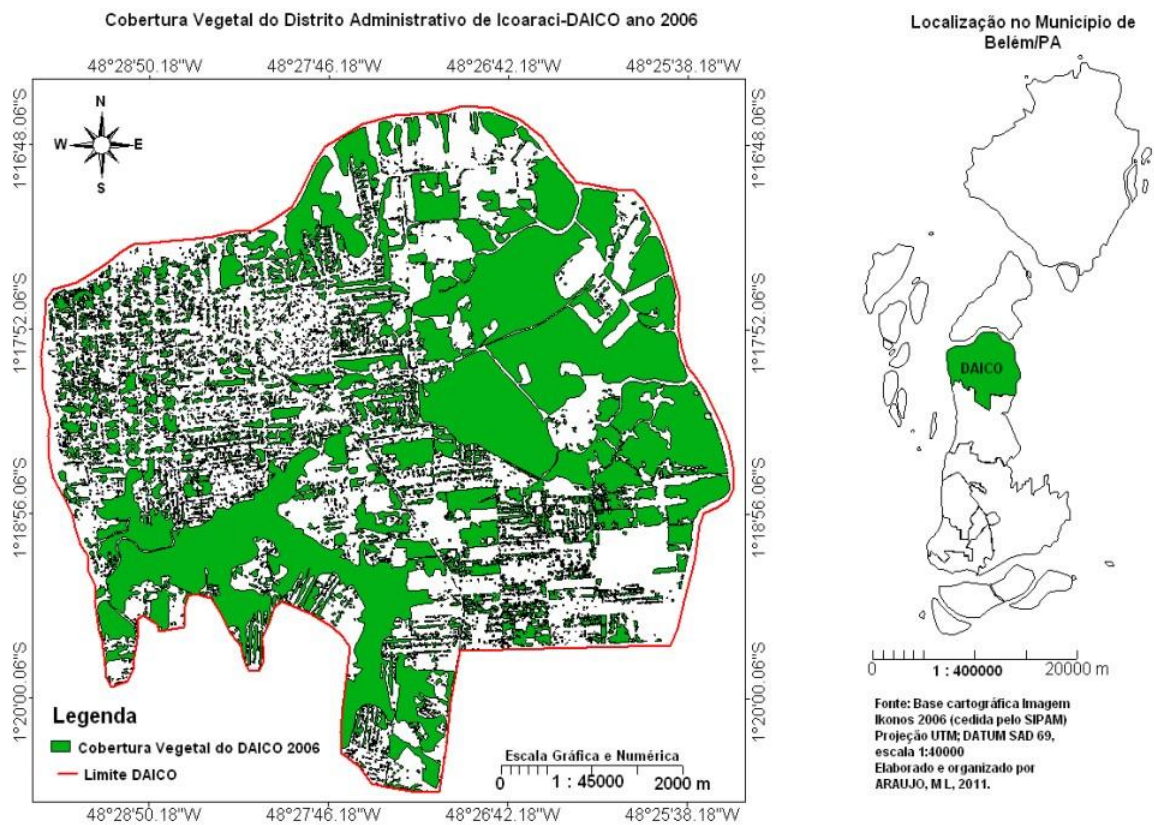


Figura 2- Evolução da ocupação e sua relação com as formas de cobertura na área administrativa DAICO, Fonte: Luz *et al.* (2012).

### 1.3.2 Relação socioeconômica com usos das águas subterrâneas

Na Região Metropolitana de Belém encontram-se dois distritos industriais do estado do Pará: o localizado no distrito de Icoaraci; e outro no município de Ananindeua (Codec 2022). A elevada concentração de indústrias na região de Belém, torna necessária a avaliação da demanda de água superficial e subterrânea para esse setor e de água para outros usuários, tais como, lojas e/ou comércio, postos de combustíveis, hospitais, lava-jato, lavanderia, balneários e clubes, instituições de ensino, entre outros usuários que se utilizam de fontes próprias de água para seu abastecimento. Em relação às indústrias, conforme o cadastro de outorgas do Siagas apresentado na pesquisa Ana 2018, demonstrando que na região de Belém existem 301 processos de outorga vigentes, sendo 300 referentes a captação subterrânea e um apenas referente à captação superficial.

O parque industrial da região de Belém é diversificado com a maior parte das indústrias enquadradas nas seguintes tipologias: indústria de beneficiamento de madeira (marcenaria/moveleira) e indústria alimentícia e bebidas (refrigerantes e alcoólicas). Destaca-se o potencial poluidor dessas tipologias industriais, principalmente pelo nível de produção de efluentes líquidos.

Os poços tubulares rasos são os principais vetores de contaminação dos aquíferos por não possuírem uma construção adequada e com características sanitárias básicas, as vezes não seguindo padrões de construção normalizados. Estes são em geral mais comuns de serem operados por conta de seu custo reduzido, porém são os mais negligenciados quanto a manutenções preventivas ou descomissionamento, é comum serem apenas abandonados com bocas abertas, aumentando risco de contaminação de aquíferos mais inferiores esse abandono de uso ocorre por obstrução de filtros, queda de bomba d'água no sistema, má qualidade de água, principalmente por quantidade de ferro ou bombeamento de areia.

Dados do relatório hidrogeológico de RBM (Cprm - Oliveira, J. R. D. 2002), levantam cadastros de cerca de 2.263 pontos de captação, estimando um total de 10.000 pontos, se considerar os usos residenciais sem cadastro, existindo uma predominância de perfurações de 25 metros em média. Deste levantamento apenas 69 são poços tubulares com profundidade entre 230 m e 300 m. Abastecimento da região metropolitana é realizado pelo complexo Utinga que é composto pelo sistema adutor de captação de águas superficial e decantação das águas nos lagos Bolonha e Água Preta que abastecem o sítio urbano de Belém. Nos bairros mais afastados e a nas cidades adjacentes, a maior parte do sistema de abastecimento é realizado por meio de captação de águas subterrâneas (Cosanpa 2014).

A ocorrência de um polo industrial, requer por lei, principalmente pela ferramenta de licenciamento ambiental, boas práticas orientadas para planejamento e prevenção de possíveis acidentes ambientais. Com essa compreensão o presente trabalho faz uma abordagem da vulnerabilidade natural dos aquíferos mais explorados mais próximos a superfície no local, com ênfase nos aquíferos Barreiras e Pirabas, usando como base de dados o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (Siagas) gerido pelo SBG (Serviço Geológico Brasileiro) e dados construtivos cedidos pela empresa perfuradora de poços reginiais Hidro Engenharia Sanitária e Ambiental (Hidrosam).

## 2 REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 A BACIA HIDROGRÁFICA NO CONTEXTO DO CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico é o fenômeno de movimento contínuo e global de circulação fechada da água entre a atmosfera e a superfície terrestre. Toda essa circulação é impulsionada pelas energias gravitacional e solar, as quais possuem mecanismos que possibilitam a movimentação da água tanto na superfície terrestre, quanto na atmosfera, em todos os seus estados físicos, sendo os principais: a evapotranspiração, a precipitação, escoamento superficial e a infiltração (Von Sperling 1996).

Desta forma, o ciclo hidrológico se constitui basicamente em um processo contínuo de transporte de massas d'água de mananciais (lagos, rios, oceanos) para a atmosfera e desta, por meio de precipitações, escoamento (superficial e subterrâneo) novamente para os mananciais. O ciclo hidrológico tem nos fenômenos de evaporação e precipitação, os seus principais elementos responsáveis pela contínua circulação de água no global (Tucci & Mendes 2006)

Por explicar a dinâmica, não há um ponto estático de início e fim; porém, de forma geral é possível admitir a precipitação como meio inicial do processo. O Quadro 1 ilustra as principais fases do ciclo.

O ciclo hidrológico é refletido principalmente no contexto da bacia hidrográfica, na qual é definida como uma área de captação natural da água de precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório (fz), dessa forma é composta por um conjunto de superfícies vertentes em uma rede de drenagem formada por diversos cursos d'água que convergem a formar um único leito (Oliveira 2021).

Processo	Característica
Precipitação	Consiste no vapor de água de água condensado que cai sobre a superfície terrestre.
Escoamento superficial	Movimento das águas na superfície terrestre em razão da gravidade.
Evaporação	Processo de transformação da água em seu estado líquido de transformação da água em seu estado líquido para o gasoso.
Transpiração	Forma como a água existe nos vegetais e animais e se transforma em estado gasoso.
Evapotranspiração	Processo conjunto pelo qual a água precipita sobre a superfície volta a atmosfera através da transpiração dos vegetais ou pela evapotranspiração, evaporação direta (quando não absorvida).
Condensação	Corresponde a mudança de estados da água do gasoso para o líquido, ocorre por conta da perda de temperatura e pressão.
Infiltração	Corresponde a água que atinge e infiltra nos lençóis freáticos.
Escoamento superficial	Escoamento da água sobre o terreno, em superfície, formando correios, lagos e rios, eventualmente chegando ao mar.

Quadro 1- Principais processos do ciclo hidrológico. Fonte: Adaptado dos conceitos de Tucci & Mendes (2006).

Deste modo a composição é basicamente formada por um conjunto de superfície vertentes e de rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até um único leito, relacionando ao escoamento, o escoamento subterrâneo e superficial pode apresentar diferenças de carga de água, entretanto conforme a diferença de escala diminui, a diferença entre ambas também diminui (Tucci & Mendes 2006). Com foco do estudo voltado para o contexto hidrogeológico, o conceito de bacia hidrográfica engloba a relação com as águas subterrâneas (Figura 3), uma vez que esta interliga-se a partir das componentes escoamento superficial e infiltração, admitindo assim uma troca de contribuições durante os períodos de maior e menor volume de chuvas (Lima 2008).

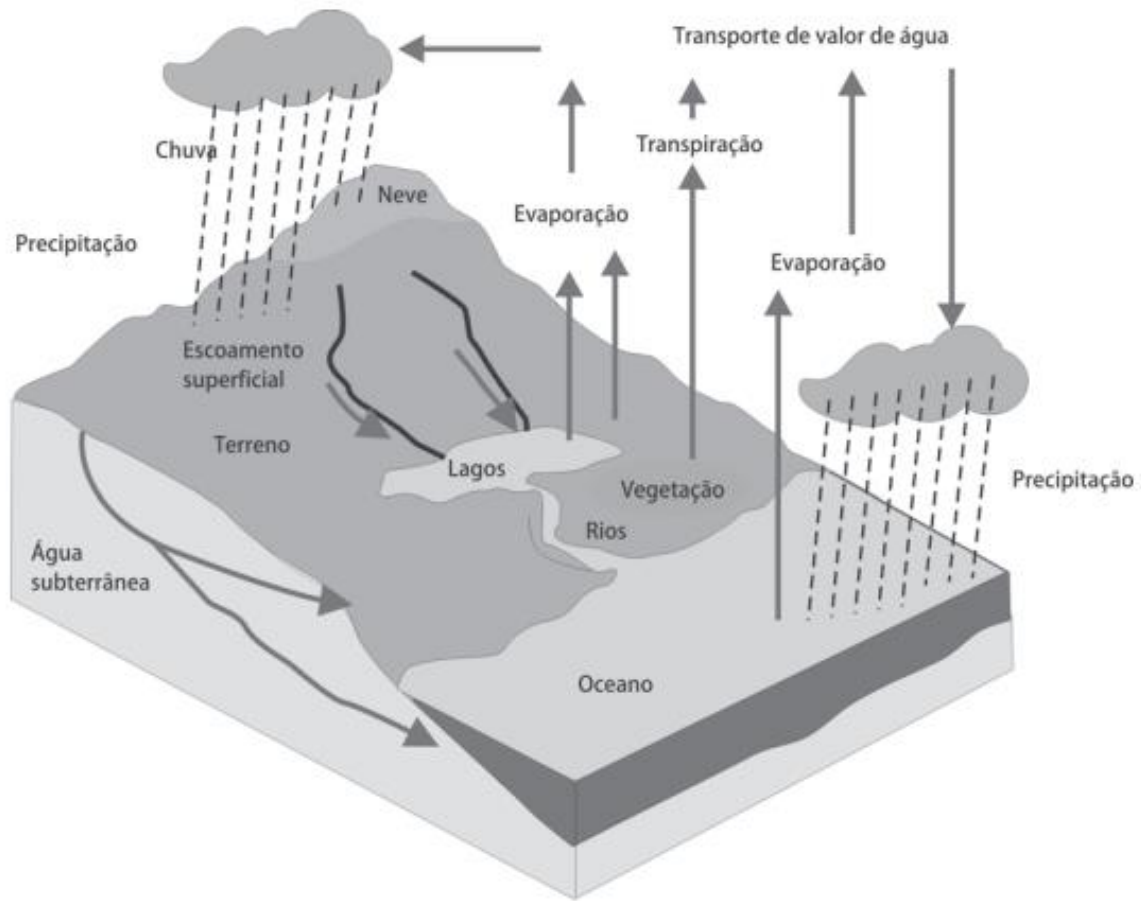


Figura 3- Relação integrada entre as águas superficiais e subterrâneas no ciclo hidrológico. Fonte: Lima (2008).

## 2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - CARACTERÍSTICAS E VULNERABILIDADES

No Brasil, segundo (Ana 2023), 56% dos 5.570 municípios brasileiros, o que correspondem a 105,6 milhões de habitantes, são abastecidos total (36%) ou parcialmente (16%) por águas subterrâneas. Este recurso é a opção exclusiva para 48% dos municípios com população menor que 10 mil habitantes e para 30% daqueles com 10 a 50 mil habitantes. Além de atender diretamente à população, esses recursos são utilizados na indústria, agricultura (irrigação), lazer, etc. Em função dessa crescente demanda, as águas subterrâneas estão sob forte pressão.

O Quadro 2 apresenta os principais problemas que favorecem em longo prazo, alto dano devido as diversas atividade relacionadas ao uso de águas subterrâneas.

<b>Problemas</b>	<b>Características principais</b>
Super exploração	A extração de água ultrapassa o volume filtrado podendo afetar o escoamento básicos dos rios, inviabilizar nascentes, influenciar os níveis mínimos de reservatórios, até mesmo provocando subsidência de terrenos próximos.
Poluição	O conceito de água poluída depende do ponto de vista dos usos fim dessa água. Poluição pode ser definida como uma alteração artificial de qualidade físico-química da água, suficientes para superar os limites padrões pré-estabelecidos para um certo fim.
Deposição de resíduos	Oriundos de resíduos advindos de atividades industriais, comerciais ou domésticas em depósitos a céu aberto, conhecidos como lixões. Nessas áreas, a água proveniente das atividades de degradação natural dos resíduos orgânicos (chorume), tende a se infiltrar no solo, transportando por suspensão substâncias potencialmente poluidoras.
Esgotos e fossas	O lançamento de esgoto diretamente sobre o solo ou na água, vazamentos de coletores de esgoto e a utilização de fossas construídas de formas inadequadas constituem grandes possibilidades de contaminação.
Atividades agrícolas	Fertilizantes e Agrotóxicos usados na agricultura podem ser contaminantes devido a presença em sua composição de compostos orgânicos, nitratos sais e metais pesados. A contaminação pode ser facilitada. Por erros de manejo e aplicação com quantidades errada de água.
Cemitérios	São potenciais áreas de contaminação principalmente por microrganismos, a movimentação em solo pode desencadear duas formas principais de contaminação: Filtragem vertical descendente é um processo de poluição de aquíferos profundos por meio de infiltração de aquíferos superior, usualmente já contaminado por estar mais exposto a processos de subsuperfície. Contaminação natural, provocada pela dissolução minerais, ação antrópica, e processos de desequilíbrio ambiental, como exemplo salinização, concentrações acentuadas de ferro, manganês, carbonatos e outros minerais associados a formação litológicas de cada região.
Poços mal construídos	Poços construídos sem critérios técnicos, possuindo revestimentos corroídos, inadequados quebrados, sem manutenções ou tampados de formas inadequadas, podem se configura como via de contaminação subterrânea.

Quadro 2- Danos de alto grau a aquíferos superficiais. Fonte: Adaptados conceitos de Ana, 2023 e Feitosa *et al.* 2008 - CPRM

Com o comportamento natural de fluido, quando não há grande quantidade de infiltração no solo, a água acaba escoando pela superfície, adquirindo velocidade em áreas de acentuados declives, buscando as áreas mais baixas de relevo (Figura 4). Os processos resultantes são observáveis e incluem: redução de volume de água em aquífero, erosão dos solos, movimentos de massa, enchentes e assoreamentos dos cursos superiores de água.

A poluição provocada pelas atividades humanas, o aumento da população mundial, o consumo excessivo e o alto grau de desperdícios são fatores que colocam em risco a disponibilidade de água doce (Oliveira 2021).

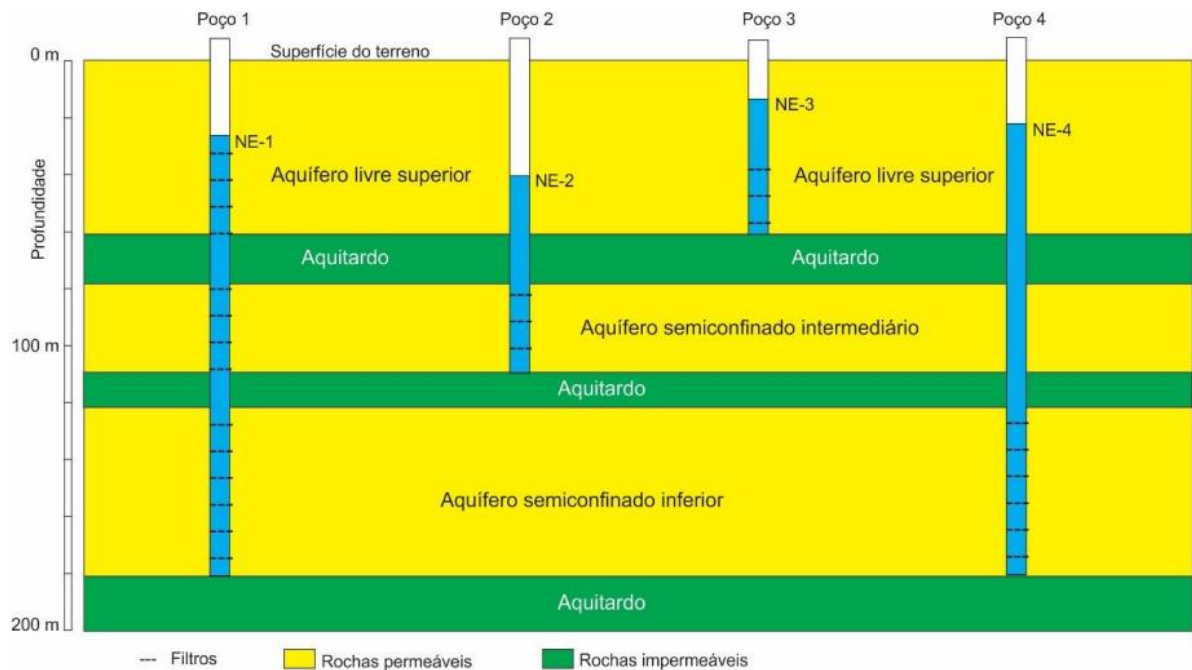


Figura 4- Relação integrada entre as águas subterrâneas. Fonte: Ana (2018).

Segundo (Ana 2018) as características naturais de aquífero são configuradas por características hidráulicas de suas camadas limitantes de topo e base, pela pressão efetiva da água nos poros das rochas e pelo arranjo interno e frequência de camadas permeáveis e impermeáveis da litologia em estudo. O arcabouço litológico de Belém é constituído pelos sistemas aquíferos Barreiras, Pirabas superior e Pirabas inferior, apresentando entre os mesmos camadas aquíferas com espessuras variáveis confinadas por camadas impermeáveis e semiconfinadas por aquípardos, classificados então com um sistema multicamada, cobertos por aquíferos livres e rasos.

O sistema aquífero Barreiras é composto por camadas menos espessas se intercalaram a camadas impermeáveis a semipermeáveis. Estes possuem uma frequência de composição arenosa e variável, e em determinados locais se configuram sobre os aquípardos e em outras se localiza abaixo. Quando localizado acima há presença de aquíferos livres rasos que descarregam sua água em redes hidrográficas da área.

O sistema Pirabas é caracterizado por camadas espessas aquíferas e isoladas por camadas permeáveis e semiconfinadas. Os dados de perfuração geofísica modulados (Ana 2018) indicam sucessões de camadas argilosas e arenosas, também sobrepostas a aquípardos, porém de níveis muito mais profundos com menores camadas argilosas.

Como observado na Figura 4, os poços 2 e 3 representam as características de poços de captação superficial intermediária e livre superior, o poço 4 representando aquíferos

semiconfinados inferiores, mais similar as características construtivas de poços de captação profunda para aquífero Pirabas.

### **2.2.1 Parâmetros físico-químicos**

Apesar de 2/3 do nosso planeta se coberto por água, apenas uma pequena porção é (2,5%) da água presente é doce. As calotas polares, geleiras e neves eternas presentes no microclima de picos de montanhas, representam 68,9%, 0,9% correspondem a umidade do solo e pântanos, 0,3% aos rios e lagos e os 29,9 restantes são correspondentes a águas subterrâneas (Mma 2007).

As características físico-químicas das águas subterrâneas refletem o meio físico de seus aquíferos. A qualidade da água é muito relacionada com os processos físico, químico e biológico que determinam os padrões de substâncias químicas presentes na água. Os parâmetros analisados para caracterização físico-química são referentes a avaliação de qualidade hidro ambiental de aquíferos são (Barbosa 2015): Temperatura, pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, fluoreto, nitrato, sulfato, fosfato e cloretos. Estes parâmetros serão descritos no Quadro 3.

Na Rmb é comum encontrar em sistemas de captação subterrânea, danificados e com suas tubulações internas percoladas e danificadas por ferrugem. As fontes de ferro podem ser minerais escuros (máficos) portadores de Fe: magnetita, goethita, biotita, pirita, piroxênios e anfíbios. No estado ferroso ( $Fe^{+2}$ ) forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes o  $Fe^{+2}$  passa a  $Fe^{+3}$  dando origem ao hidróxido férrico, que é insolúvel e se precipita, tingindo fortemente a água (Freire 2022).

Estas concentrações elevadas de ferro podem estar relacionadas ao alto teor de ferro encontrado na Formação e sistema aquífero Barreiras, apresentando concentrações de ferro que chegam a 12 mg/L, com águas de coloração típica do ferro.

Parâmetros físicos	Características
Condutividade elétrica	A condutividade é relacionada a concentração de íons dissolvidos atribuído a facilidade de conduzir corrente elétrica, é importante indicador de lançamentos de efluentes, em geral íons como ( $Mg^{+2}$ ), ( $Na^{+2}$ ), ( $NO^{3-}$ ), ( $Fe^{3+}$ ), ( $CO_3^{2+}$ ).
Cor	A configuração de Cor, mostrará a existência de sólidos em suspensão, em casos principalmente quanto a materiais orgânicos coloidais ou presença de ferro ou outros compostos clorados dissolvidos.
Turbidez	É a avaliação, por meio de dispersão de feixes de luz, virtude de fragmentos suspensos, sejam argilominerais, sejam eles sulfatos, óleos emulsificantes, fragmentos suspensos ou efluentes industriais. A portaria nº 518 do ministério da saúde, estabelece o valor máximo de 5 UT para o abastecimento humano.
Temperatura	A temperatura exerce uma função de manutenção do meio aquático, pode variaram entre 0 e 30°C, isso alteram sua viscosidade, constante de ionização e calor latente. Os organismos aquáticos possuem limites específicos para vida e crescimento.
Potencial hidrogeniônico (pH)	É uma medida de concentração hidrogeniônica da água ou solução, sendo controlado pelas reações químicas e pelo equilíbrio entre os íons presentes. O pH é essencialmente uma função do gás carbônico dissolvido e da alcalinidade da água. É um valor delimitado por uma escala antilogaritmica e para temperaturas de 25°C são atribuídos valores de 1 a 14, os valores inferiores a 7 são determinados como ácidos e os superiores como básicos (ou alcalinos), 7 é o valor mais neutro de uma solução.
Nitrogênio	No meio aquático o nitrogênio pode ser encontrado nas seguintes formas: nitrogênio molecular, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal (amônia), nitrato e nitrito. O nitrogênio serve como nutriente para processos biológicos caracterizando-se como macro nutriente, visto que, depois do carbono, é o composto em maior quantidade nas células vivas, A espécie prevalecente do nitrogênio em um corpo hídrico poderá indicar sobre o estágio da poluição sendo que poluição recente está ligada ao nitrogênio na forma orgânica ou de amônia, enquanto uma poluição mais antiga está relacionada ao nitrogênio na forma de nitrato $NO_3^-$ estado mais oxidado possível para o nitrogênio. O nitrato em águas subterrâneas origina-se principalmente de quatro fontes: aplicação de fertilizantes com nitrogênio, bem como inorgânicos e de esterco animal, em plantações; cultivo do solo; esgoto humano depositado em sistemas sépticos e deposição atmosférica.
Fósforo	O fósforo pode ser encontrado na forma orgânica e inorgânica e sendo os fosfatos solúveis, a ocorrência mais comum deste parâmetro, e são classificados em ortofosfatos, fosfatos orgânicos e fosfatos condensados. O fosfato pode ocorrer naturalmente em águas subterrâneas, pois está relacionado a processos naturais como a dissolução de rochas, decomposição de matéria orgânica e carreamento dos solos. Contudo, pode também estar relacionado a processos antrópicos como lançamentos de esgotos sanitários, fertilizantes, detergentes, sendo principal verto de eutrofização para aumento exacerbado da flora aquática.
Cloretos	O cloreto é um dos principais ânions inorgânicos e está presente em todas as águas naturais, sendo proveniente de lixiviação de minerais ferro-magnesianos de rocha ígneas e sais evaporitos. Em linhas gerais possui valores situados entre 10 e 250 mg/L nas águas doces e valores entre 18.000 e 21.000 mg/L em águas marinhas. Em águas subterrâneas esta variável apresenta teores inferiores a 100 mg/L.
Oxigênio dissolvido	O oxigênio dissolvido atua como importante agente oxidante em águas naturais. O OD é necessário para a respiração de microrganismos aeróbicos, assim como para outras formas aeróbicas de vida, para subsistência dos peixes, por exemplo, as concentrações mínimas de oxigênio dissolvidos devem estar entre 10% e 60% de saturação.
Sulfatos	O sulfato pode ocorrer naturalmente em águas subterrâneas, pois é encontrado sob a forma de enxofre, nas plantas, no solo e em águas pluviais. As descargas diretas ou indiretas de águas residuais contendo sulfato, em aquíferos, podem prejudicar a qualidade das águas e interferir no ciclo natural do enxofre. Dessa forma, o mais conhecido ácido do íon sulfato é o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), sendo também utilizada a denominação de óxido sulfúrico para os sulfatos. Os sulfatos podem ser dissolvidos dos minerais gipsita ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), anidrita ( $CaSO_4$ ), barita ( $BaSO_4$ ), entre outros.

Quadro 3- Parâmetros físicos de avaliação de qualidade de água e caracterização simplificada. Fonte: Conceitos adaptados de Barbosa (2015).

O alto teor de ferro nas águas subterrâneas pode ser um fator preocupante, uma vez que este causa danos à saúde humana e confere à água sabor amargo e coloração amarela a turva, fazendo assim, ser necessário em sistema de captação a instalação ademais causando manchas em instalações sanitárias e roupas, coroe tubulações (infiltrações nos filtros dos poços e obstruções nas canalizações) e restringe essa água para uso industrial. De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o ferro é de até 0,3 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano (Freddo Filho 2018).

## **2.2.2 Vulnerabilidade de aquíferos**

As águas subterrâneas naturais, como consequência de sua composição química, bem como das condições do meio onde se encontram, apresentam uma série de propriedades ou características físicas e químicas, que variam de acordo com o espaço e no tempo (Gómez Rave 2009). A mobilidade geoquímica dos elementos dissolvidos na água está relacionada com a capacidade de trânsito no sistema litosfera-biosfera-hidrosfera-atmosfera, e está sujeita a fatores como a capacidade do elemento participar de processo de suas ligações com a litosfera e biosfera e da solubilidade, que depende do potencial iônico de cada um dos íons dentre outros fatores geoquímicos (Ramage 2005).

A vulnerabilidade de aquíferos tem seu conceito caracterizado como a maior ou menor capacidade de atenuação das camadas superiores (mais próximas a superfície), a passagem de poluentes, estando naturalmente atrelado a características físicas do aquífero. Existe uma diferença entre os tipos de vulnerabilidade (Oliveira & Lobo-Ferreira 2004): a intrínseca aborda a capacidade de ocorrer contaminações sem levar em consideração o contaminante (o qual foi aplicado a este trabalho); e a específica está relacionada a vulnerabilidade do meio a um potencial de carga contaminante isolado.

De acordo com Moura (2014) os primeiros estudos de vulnerabilidade de aquíferos, foram aplicados na década de 60 por Le Grand nos Estados Unidos e por pesquisadores de meio ambientes franceses. Dando prosseguimento a novas metodologias para avaliação da vulnerabilidade. Dentro disso, as ferramentas para balizar os indicadores passam a ser os meios físicos encontrados, tais como já descritos por Schwambach 2022, profundidade de aquífero, características físicas e litologia da zona vadosa e fatores geoambientais.

<b>Método</b>	<b>Avaliação de</b>	<b>Características principais</b>	<b>Referência</b>
Le Grand/Brown	Aterros sanitários novos e em operação	- Distância entre aterros e os poços; - Profundidade das águas; - Gradiente do aquífero.	Le Grand (1964)
Site Ranking System	Disposição de produtos químicos, em sítios novos e em operação	-Solo, Características hídricas, sorção e tamponamentos químico; - Hidro química do aquífero; - Ar e poluição próximos.	Hagerty <i>et al.</i> (1973)
Poluição dos lençóis Aquífero	Vulnerabilidade geral	- Geologia (litologia e estruturas).	Taltasse (1972)
Mapa de vulnerabilidade e	Vulnerabilidade universal	- Características litológicas; - Áreas de recarga e descarga.	Duarte (1980)
DRASTIC	Vulnerabilidade geral	-Profundidade do nível de águas; - Recarga; - Meio aquífero; - Solo; - Topografia; - Impacto de zona vadosa; - Condutividade Hidráulica.	Aller <i>et al.</i> (1987)
GOD	Vulnerabilidade geral, Análise e classificação de carga contaminante.	- Tipos de aquífero; - Litologia da zona vadosa; - Profundidade do nível d'água.	Foster & Hirata (1988)
SINTAC	Vulnerabilidade geral	- Baseado no método DRASTIC, com pesos diferentes de entrada e saída de dados.	Civita <i>et al.</i> (1992)
EPPNA	Vulnerabilidade geral	- Características litológicas associadas; - Áreas e tipo de aquífero.	Plano Nacional da Água (1998); Artuso <i>et al.</i> (2004)
AVI	Vulnerabilidade aquífero área restrita	Baseados em parâmetros físico: - Espessura das camadas acima da freática; -Condutividade hidráulica de cada camada.	Van Stempvoort (1993)
EKv	Vulnerabilidade aquífero livres	- Avaliado por profundidade da superfície freática; - Condutividade vertical da zona não saturada.	Auge (2004)

Quadro 4- Revisão de métodos de análise de vulnerabilidade de águas subterrâneas. Fonte: Adaptado de Moura (2014) e Schwambach (2022).

### 2.2.2.1 Metodologia GOD

A metodologia GOD (*Ground water occurrence, overral lithology of the unsaturated zone, Depth to the watertable*) (Foster *et al.* 2002) é usada principalmente quando não há muitos dados específicos coletados, dentre as principais ferramentas para indicar áreas mais adequadas para o desenvolvimento de atividades potencialmente poluidoras. A Figura 5 ilustra os principais componentes do método.

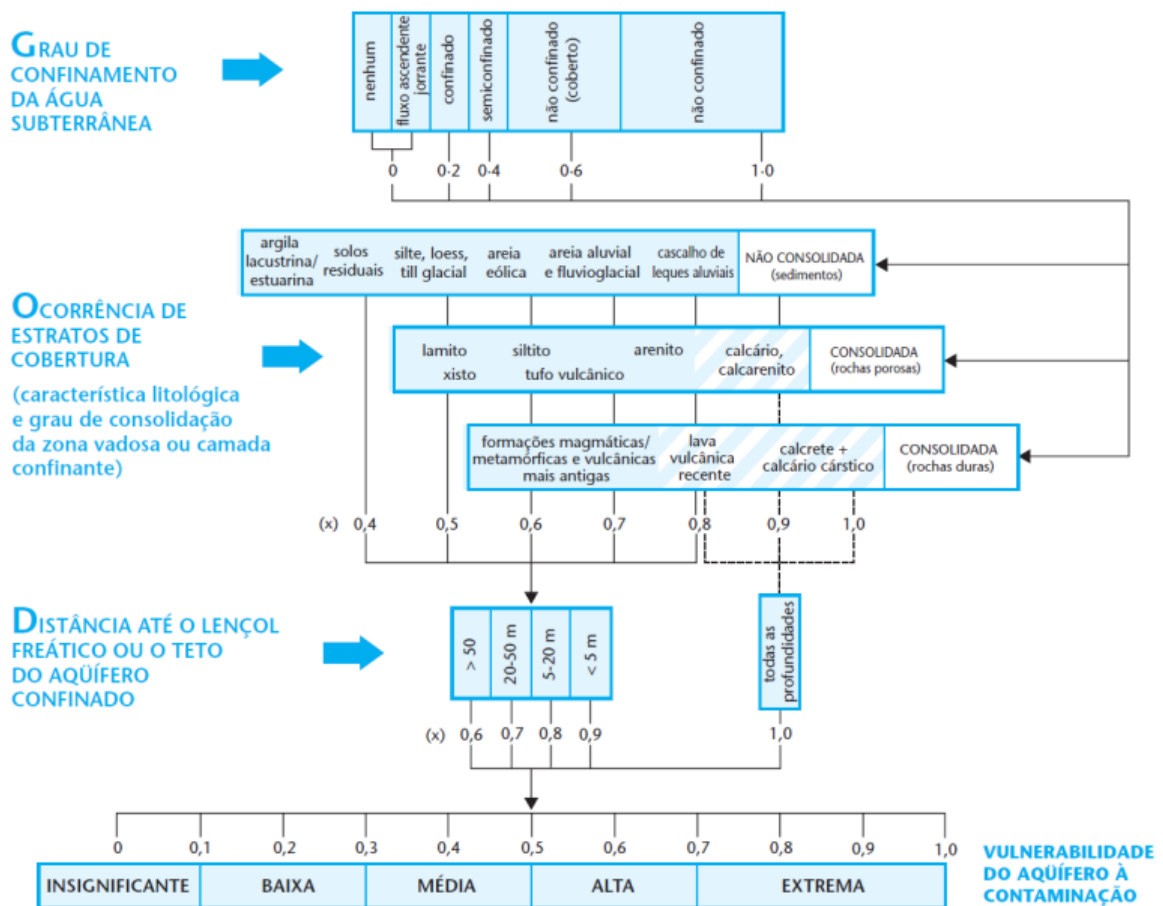


Figura 5- Parâmetros de avaliação do método GOD. Fonte: Foster *et al.* (2002).

### 2.2.2.2 Metodologia DRASTIC

A metodologia DRASTIC começou a ser difundida pelo grupo de pesquisa da Universidade do Estado de Ohio (EUA) para avaliação da poluição de áreas e do potencial de vulnerabilidade intrínseca a contaminação das águas subterrâneas (Aller *et al.* 1987). Esta é utilizada pela Agência de Proteção Ambiental do EUA (USEPA), sendo aplicada a partir de sete parâmetros, cuja as iniciais formam o acrônimo DRASTIC:

1. (D) *Depth* - Profundidade do topo do aquífero
2. (R) *Recharge* - Recarga do aquífero
3. (A) *Aquifer* - Material do Aquífero
4. (S) *Soil* - Tipo de solo
5. (T) *Topography* - Topografia
6. (I) *Impact* - Impacto sobre zona vadosa
7. (C) *Conductivity* - Condutividade hidráulica.

O método é baseado em parâmetros que descrevam os principais fatores de influência no movimento da água subterrânea em uma área e considera que todos os fluidos possuem a mobilidade física da água (Oliveira & Lobo-Ferreira 2002) (Figura 6).

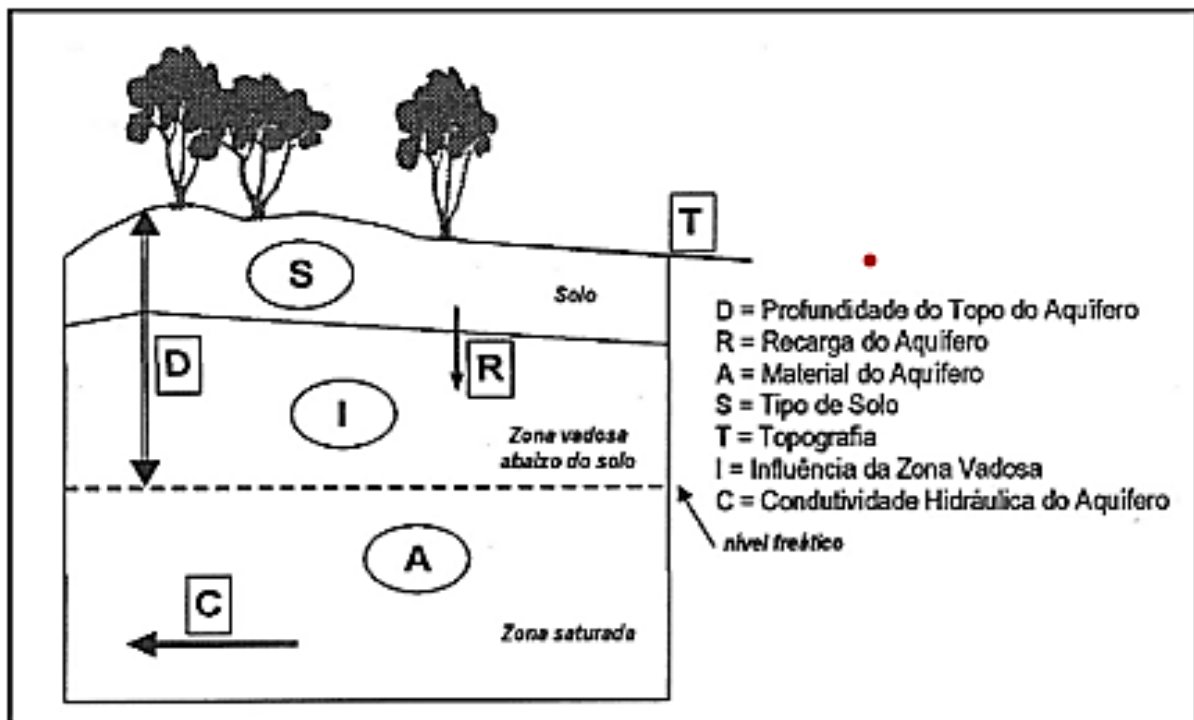


Figura 6- Parâmetros componentes do DRASTIC. Fonte: Oliveira & Lobo-Ferreira (2002).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 BASE DE DADOS SECUNDÁRIOS

Para a realização do presente trabalho, foi realizado um importante levantamento bibliográfico com base nos estudos de Dos Santos *et al.* (2013) e Moura (2014). Nessa etapa foram coletadas a sobre as informações existentes sobre características históricas e geologia e aspectos de meio físico e dados hidrogeológicos.

Posteriormente foram levantados junto com aplicabilidade da metodologia em outras áreas com o mesmo propósito, pois serviram como base para a compreensão e construção do entendimento científico teórico do tema.

O trabalho proposto necessitou de diferentes processos metodológicos e adaptações para tratamento de dados importantes em cada etapa. As etapas de métodos e a tendência de atividades usadas podem ser observadas seguindo o fluxograma da Figura 7.

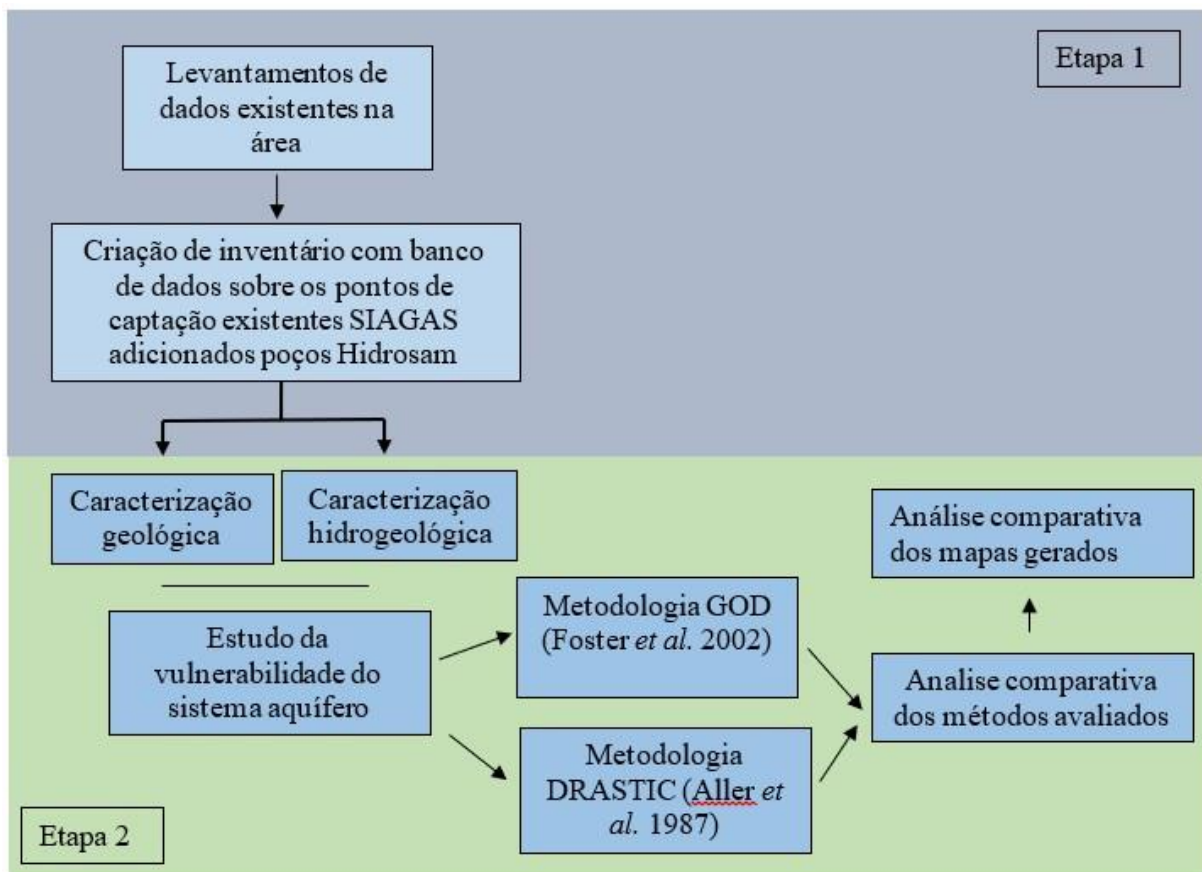


Figura 7- Fluxograma descritivo das principais etapas do trabalho

## 3.2 INVENTÁRIO DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS ELABORADOS

Nesta etapa da pesquisa foram coletadas informações a respeito da geologia local, características históricas, características hidrogeológica, definições geomorfológicas em mapas e descrições litológicas prévias. Foi baseada na identificação e caracterização de poços tubulares pertencentes a região do estudo, concentrado principalmente na porção nordeste do município de Belém, no distrito industrial de Icoaraci localizado no bairro de Maracacuera, e bairros adjacentes, águas negras, campina de Icoaraci e ilha de Itaiteua.

Estes levantamentos levaram em consideração a consulta de bancos de dados SIAGAS – Sistema de informação de Águas Subterrâneas, COSANPA – Companhia de Saneamento do Pará e empresa de perfuração e manutenção de poços Hidrosam.

O inventário constou de tabelas com a organização das informações importantes para o estudo, como por exemplo: dados de localização geográfica (cotas e coordenadas geográficas), características construtivas (profundidade e tipos construtivos de poços), geológicas (detalhe de qual formação e litologias presentes), hidrogeológicas (inventário de nível estático) e hidrodinâmica (vazão específica) dos poços do aquíferos superficiais do sistema Barreiras na região do estudo.

### 3.2.1 Características geológicas

A etapa de caracterização geológica foi realizada com apoio de avaliação e análises do mapa geológico do Estado do Pará (Vasques *et al.* 2008). De forma complementar foram caracterizados os fatores que favorecem o processo de recarga de água subsuperficial, podendo ter real influencia para com aquíferos superficiais. Para tanto foram utilizados os mapeamentos bibliográficos já existentes do local modelados por autores da área (Ana 2018 e Oliveira 2002).

### 3.2.2 Caracterização hidrogeológica

Nesta etapa realizou-se a caracterização hidrogeológica da região em estudo com inventário e cadastramento dos pontos de captação. A caracterização regional da área de estudo foi realizada com base nos mapas hidrogeológicos da folha de Belém e outros estudos já realizados nas regiões próximas tanto de artigos e dissertações (Ana 2018, Oliveria 2002, Carvalho *et al.* 2020, Melo Junior 2002 e Soares 2018).

### 3.2.3 Vulnerabilidade segundo o método GOD

O parâmetro G foi avaliado considerando o aquífero Barreiras como não confinado e com diferentes graus de cobertura. Para a avaliação da espessura foram estudados, com base nas informações disponíveis, os perfis construtivos e litológicos disponíveis.

O parâmetro O foi definido com base no tipo de litologia encontrada e nos tipos de solos. Na caracterização dos tipos de solos e suas resistências a impactos ambientais adotou-se o trabalho de FEPAM (2001). Para com solos com espessura média mais baixas, por exemplo o neosolo e Cambisol, adota-se o valor de 0,7. Já para solos com espessuras média, como o caso de argiloso e litosolo, adota-se o valor de 0,6.

O parâmetro D foi definido com base na profundidade de nível estático e nos valores definidos pela metodologia GOD. Para poços que não foi possível obter valores de nível estático foram adotados valores médios de mais representativos obtidos nas das características da área de estudo.

Finalizada a classificação para cada componente os fatores foram multiplicados, conforme o método. Os valores finais foram interpolados, utilizando o método de ponderação do inverso da distância (IDW), com a geração do mapa de vulnerabilidade (Figura 8).

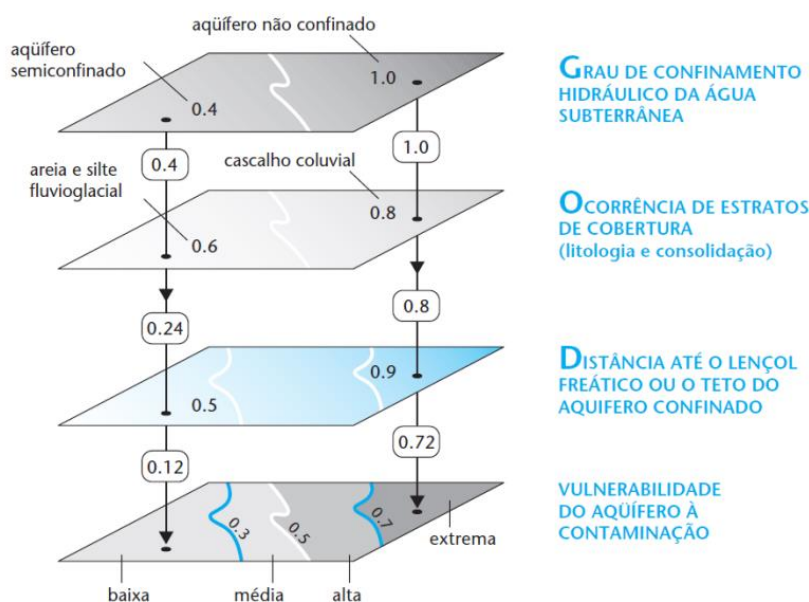


Figura 8- Produção simplificada do mapa de acordo com o método GOD. Fonte: Foster *et al.* (2002).

### 3.2.4 Vulnerabilidade segundo o método DRASTIC

Os parâmetros considerados no método DRASTIC são incorporados a um esquema de ponderação aritmética, sendo assim a somatória ponderada é representada pela equação 1, onde  $r$  = peso por parâmetro; e  $w$  = índice de cada parâmetro.

$$DRASTIC = (Dr \times wD) + (Rr \times wR) + (Ar \times wA) + (Sr \times wS) + (Rr \times wT) \\ + (Ir \times wI) + (Cr \times wC)$$

Eq. 01

A cada parâmetro apresentado são atribuídos valores ( $r$ ) variando de 1 a 10, sendo  $r$  multiplicado pelo valor de  $w$  que corresponde ao peso atribuído em função da sua importância, e que varia de 1 a 5 Aller *et al.* (1987). Os poços cadastrados foram construídos com objetivo de captação de água, em muitos casos apresentam baixas qualidades de descrições de litologia e gerando uma “mistura” de classificação entre as formações Barreiras e Pós-Barreiras (Tabela 1).

Os fatores finais foram multiplicados conforme a equação 1 e interpolados para geração da distribuição espacial por meio de krigagem (Hengl 2007).

Tabela 1- Valores associados ao método DRASTIC. Fonte: Adaptado de Aller *et al.* (1987), Mello (2002), Paixão (2005), Gonçalves & Libardi (2013), Santo (2013), Hidrosam (2021).

Parâmetros		Índice de ponderação (w)	Descrição
(D) Depth	Profundidade do topo do aquífero	5	A profundidade de nível estático representa a distância a qual um possível contaminante deve atravessar para atingir a zona de aquífero. A atenuação tende a ser maior com um aumento da profundidade, pois o tempo de percurso seria maior. Nos casos de avaliação de aquíferos livres, o nível d'água representa a elevação superior do lençol freático e nos aquíferos confinados a profundidade deve ser redefinida como topo do aquífero.
(R) Recharge	Recarga do aquífero	4	Recarga é definida como a quantidade total de água que atinge a área avaliada e infiltra-se no solo até atingir o aquífero, representa a unidade de área do terreno, que penetra na superfície do solo e atinge a camada de aquífero saturado. Quanto maior o índice de recarga de uma região, maior será o potencial de contaminação da água subterrânea, até que o volume de água da recarga, seja grande o suficiente para causar a diluição do elemento contaminante.
(A) Aquifer	Material do Aquífero	3	Este parâmetro apoia-se nas descrições dos sedimentos e rochas consolidadas ou inconsolidadas que constituem o aquífero. Neste trabalho, o aquífero foi caracterizado por comparações indiretas de poços avaliados e perfurações realizadas pela empresa Hidrosam (2021).
(S) Soil	Tipo de solo	2	Foram usadas informações bibliográficas e de mapas já construídos para atribuir dos valores de tipos de solos.
(T) Topography	Topografia	1	Reflete a altimetria local e o potencial de infiltração, áreas mais planas geralmente detém maior capacidade de percolação de fluídos.
(I) Impact	Impacto sobre zona vadosa	5	Corresponde a porção superficial do material geológico, situado entre a superfície do terreno e o topo do aquífero. Caracteriza-se por ser um meio pelo cujo os poros estão ocupados apenas parcialmente pela água nas fases líquidas e gasosas. Foi classificada pela identificação e comparação das litologias descritas nos perfis geológicos do SIAGAS e por Gonçalves e Libardi (2013).
(C) Conductivity	Condutividade hidráulica	3	Expressa a facilidade com que a água se movimenta por meio do solo, sendo este dado de muita importância para a produção de culturas agrícolas e preservação do solo.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os recursos hídricos subterrâneos do município de Belém são utilizados em diversas aplicações desde abastecimentos residenciais a abastecimento industrial. São 8 distritos administrativos delimitados divididos em Distrito Administrativo de Mosqueiro (DAMOS); Distrito Administrativo do Benguí (DABEN); Distrito Administrativo do Entroncamento (DAENT); Distrito Administrativo da Sacramenta (DASAC); Distrito Administrativo de Belém (DABEL); Distrito Administrativo do Guamá (DAGUA); Distrito Administrativo de Outeiro (DAOUT); Distrito Administrativo de Icoaraci (DAICO).

Por estimativas do instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE2022) a população da cidade de Belém chegou a 1.303.389 pessoas e possui uma área territorial de 1.059,46 Km<sup>2</sup> possuindo um índice de atendimento de abastecimento de rede geral de aproximadamente 75,5% segundo dados do plano municipal de Saneamento, prestado pela companhia. A COSANPA administra as zonas de espaço de serviços nos distritos administrativos ao norte do município (DAIOT- Outeiro, DAIMOS - Mosqueiro e DAICO - Icoaraci). (Figuras 9 e 10)

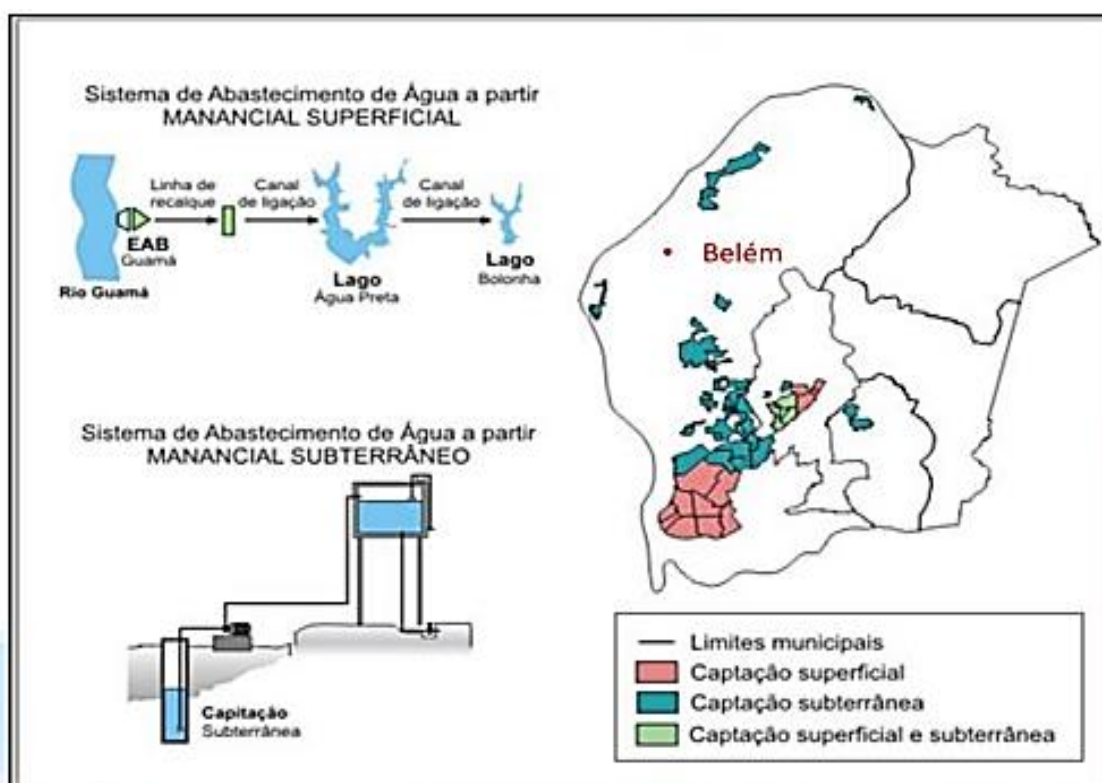


Figura 9- Ilustração da composição do sistema de abastecimento de Belém. Fonte: Cosanpa (2014).

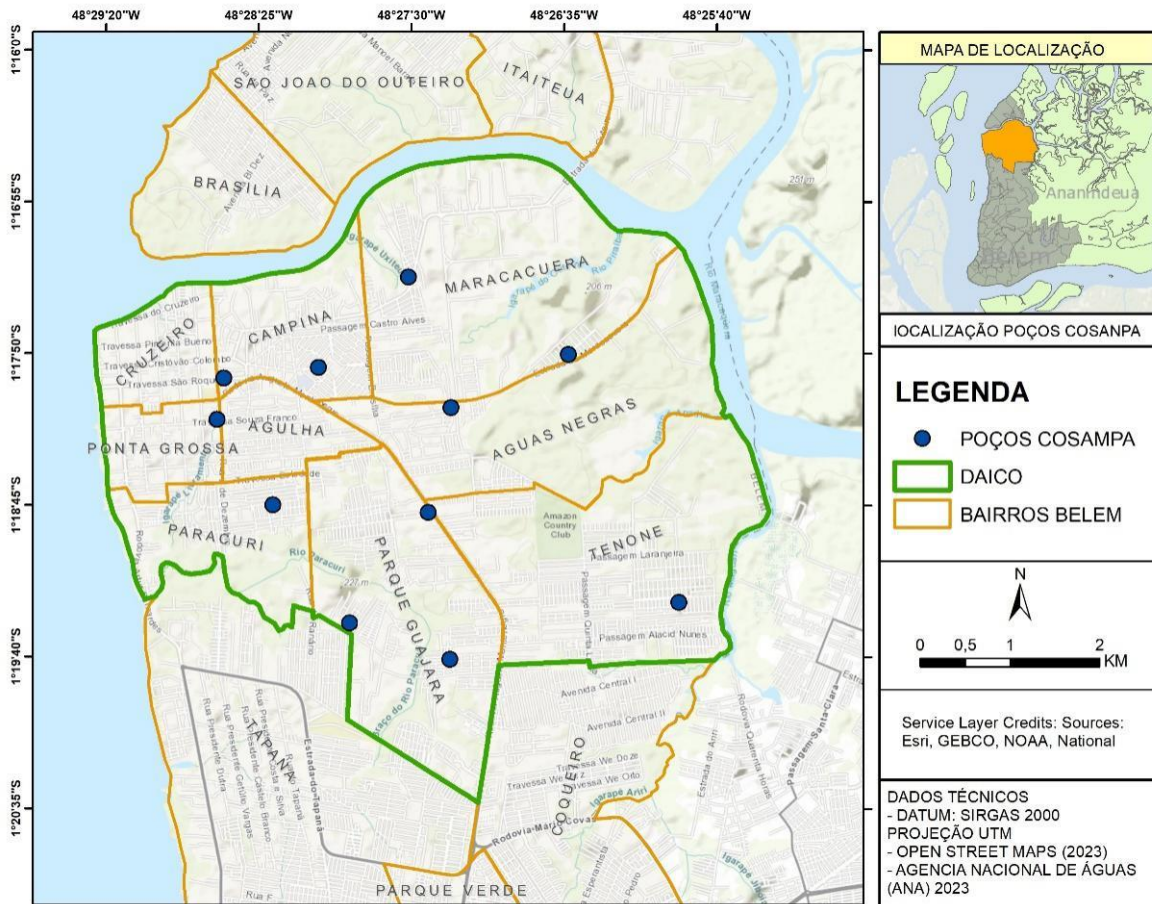


Figura 10- Composição do sistema de abastecimento na DAICO. Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1 DETALHAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

A hidrogeologia local é marcada por dois sistemas aquíferos principais: o sistema aquífero Barreiras e o Pirabas. O domínio hidroestratigráfico do aquífero Barreiras é mais superficial e neste são aglutinadas as unidades do Barreiras e Pós-Barreiras (Oliveira 2002). (Figura 11)

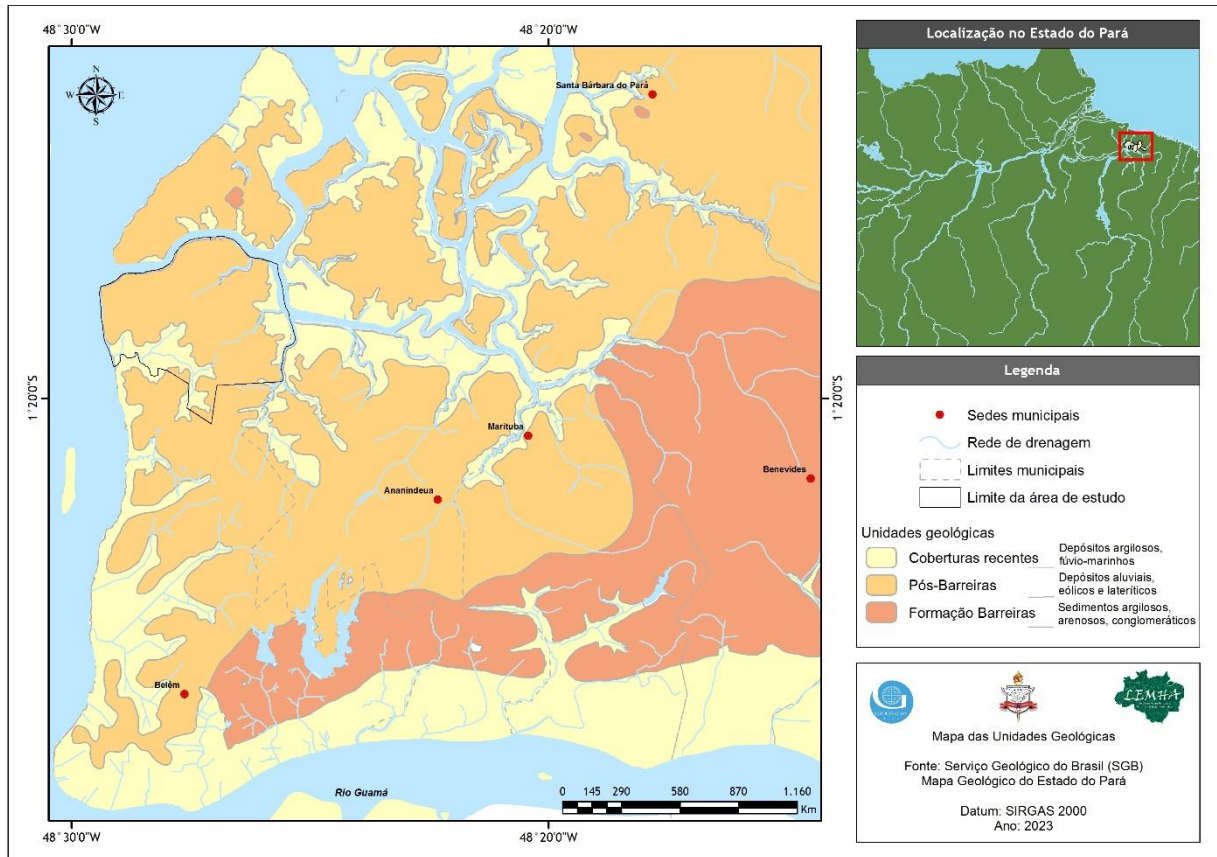


Figura 11- Mapa com as unidades geológicas, indicando a distribuição destas na área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema aquífero Pirabas, é subdividido entre porção inferior e superior, a porção inferior é atribuída por possuir as melhores características hidráulicas e hidroquímicas, porém estratigraficamente é uma unidade com baixa densidade de distribuição.

Considerando os trabalhos de Sauma Filho (1996), Matta (2002) e Cabral (2004), o Quadro 5 resume os principais aspectos observados.

<b>Unidades</b>	<b>Descrição</b>
<b>Sedimentos recentes</b>	Representados por sedimentos constituídos por cascalhos, areias, argilas e siltes inconsolidados, que formam as planícies aluviais que margeiam os cursos d'água.
<b>Aluviões</b>	Constituem-se de domínios de forma permoporosa apresentando boa capacidade de armazenamento de água. Dentro da região Metropolitana de Belém possuem uma espessura de 10 m, não sendo tão significativa quanto ao armazenamento hídrico. A principal fonte de recarga dos aquíferos formados nestes domínios é a precipitação pluviométrica. Apresentam uma vazão de 10 m <sup>3</sup> /h.
<b>Sistema Aquífero Pós-Barreiras</b>	É constituído por níveis argilo-arenosos inconsolidados, com granulometria variando de fina até conglomerática existentes em um espaçamento de 25 metros a partir da superfície. Há a presença de um horizonte laterítico com uma espessura de até 3 metros, com os sedimentos possuindo uma matriz argilo-arenosa envolvendo nódulos ferruginosos e/ou aluminosos. A vazão neste sistema aquífero é em torno de 5 m <sup>3</sup> /h, apresentando um potencial hidrológico fraco, porém com uma água de boa qualidade. Em alguns casos há necessidade de tratamento desta água devido à concentração de Fe nela presente. Estes aquíferos são de forma livre e confinada sendo a precipitação pluviométrica sua principal fonte de recarga. A vulnerabilidade destes reservatórios é alta devido à profundidade de ocorrência deles, que é inferior a 25 m, ficando suscetíveis à interação com fossas sépticas, postos de combustíveis, cemitérios, áreas de construção de poços para captação de água, entre outros.
<b>Sistema Aquífero Barreiras</b>	São aquíferos com expressões litológicas bastante heterogêneas constituídos basicamente por areia e arenitos, com granulometria que varia de fina a grossa, e cascalhos. Verifica-se também a presença de níveis lateríticos e níveis argilosos caulinizados. Possuem profundidade variando de 25 a 90 m e espessura média de 70 m. A vazão nestes reservatórios varia de 10 a 70 m <sup>3</sup> /h. O alto teor de Fe (0,3 mg/l) é um importante entrave no processo de captação da água, pois está fora do padrão recomendado pelo Ministério da Saúde. A recarga é feita por meio da contribuição das camadas sobrepostas e pela chuva em unidade de afloramento dessa unidade.
<b>Sistema Aquífero Pirabas</b>	Definida como uma unidade composta pelos sedimentos marinhos, fossilíferos da Formação Pirabas. Os níveis desse aquífero ocorrem em intervalos de 70 até 259 metros, sendo subdividido em Pirabas Superior e Inferior. O primeiro subsistema é composto por aquíferos com camadas de argilas calcíferas de cor cinza-esverdeada e leitos de calcário de colorações cinza esbranquiçada, que se alternam sucessivamente com camadas de arenito calcífero. Geralmente aparecem em intervalos de 70 a 180 m, possuindo espessuras em torno de 50 m e vazões entre 100 a 180 m <sup>3</sup> /h, principalmente quando estão associados aos sedimentos de granulação mais grossa. São de natureza confinada e apresentam uma boa continuidade lateral. Já o segundo é composto predominantemente por sedimentos arenosos de cor cinza esbranquiçada, com granulação fina a média, níveis conglomeráticos e intercalações mais espessas de argilas e siltitos avermelhados. Os aquíferos deste subsistema ocorrem nos intervalos de 180-193 m, 197-211 m, 229-240 m e 251-259 m. Possuem vazões de até 600 m <sup>3</sup> /h, além do qual são aquíferos de notável qualidade, com pH próximo à neutralidade, com dureza moderada, classificada como cálcicomagnesianas-bicarbonatadas.

Quadro 5- Resumo dos aspectos hidrogeológicos do DAICO. Fonte: Adaptado de Sauma Filho (1996), Matta (2002), Cabral (2004) e Oliveira (2002).

Os dados primários levantados da região, correspondem a 85 poços cadastrados no SIAGAS, mas apenas 60 poços foram utilizados na fase final. Esta delimitação ocorreu devido a algumas inconsistências e falta de dados de alguns perfis complementares importantes para a metodologia usada na pesquisa (Figura 12).

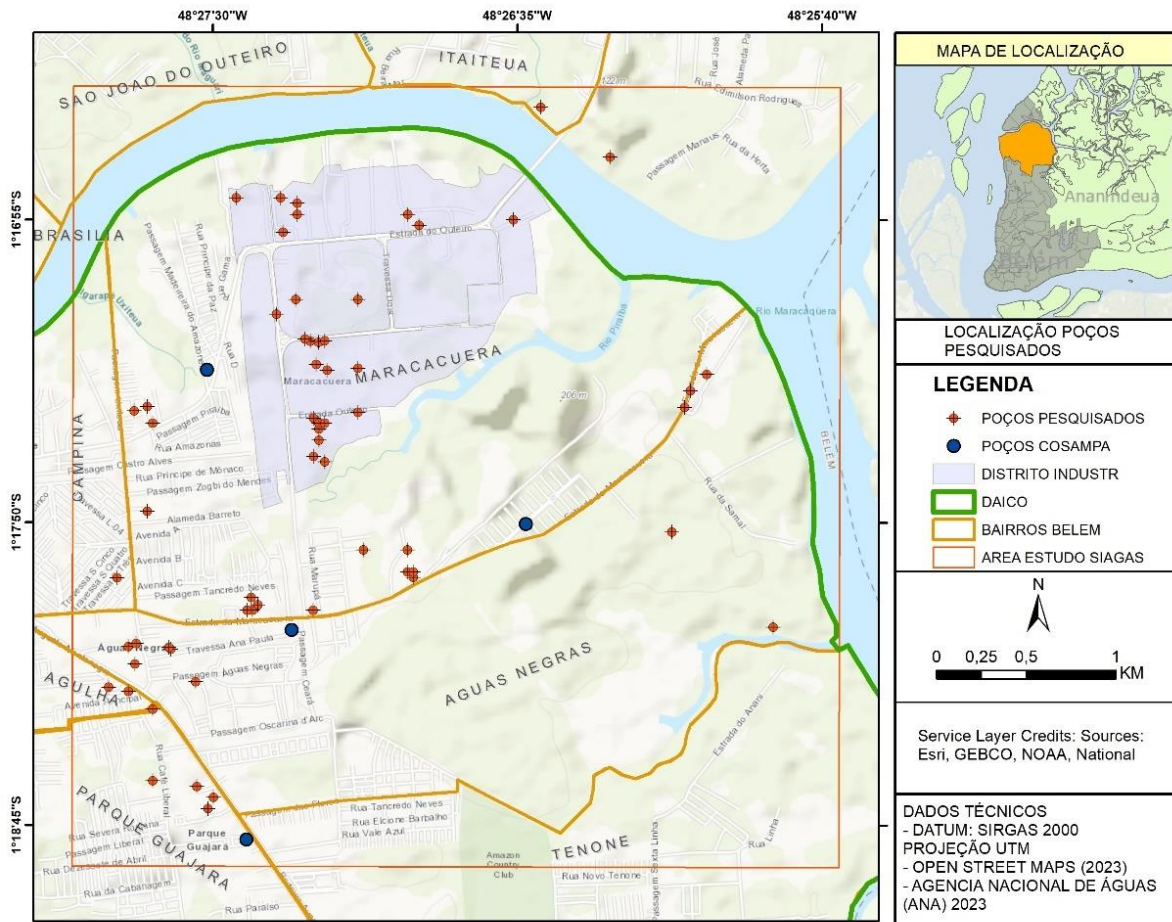


Figura 12- Distribuição dos poços na área avaliada. Fonte: Elaborado pelo autor

As características de descrevem os poços avaliados indicam:

- O aquífero Barreiras, que é condicionado por porosidade efetiva dos solos e camadas sedimentares subjacentes, segundo os poços de captação de água e comparação de dados secundários descritos em 60 poços.
- Os poços levantados no estudo, são classificadas como poços tubulares e que possuem diferentes características hidrodinâmicas.
- As profundidades variam entre 15 m a 145 m, com uma média de 40 m.
- A Figura 13 apresenta um domínio entre 10 a 42 m, com 77,96%, seguido pela distribuição de 12,77% de poços entre 42 a 84 m.

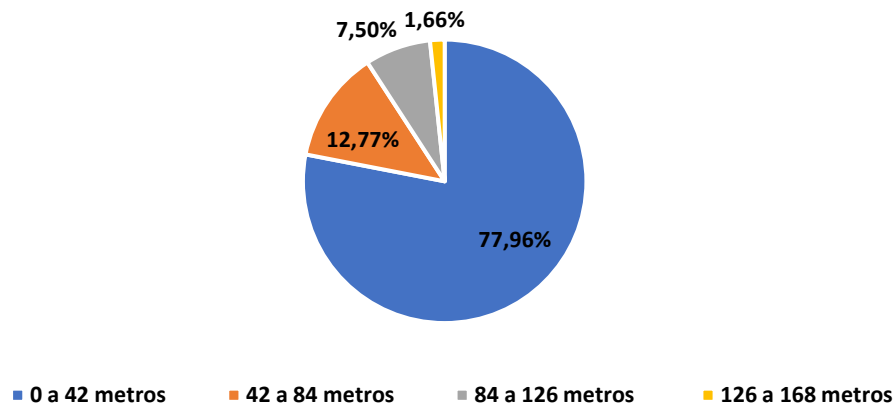


Figura 13- Profundidade dos poços.

- Os níveis estáticos dos poços (NE) indicaram uma variação entre 1,80 a 23,05 m de profundidade, com uma média de 7 m. Na Figura 14 é possível avaliar um grande domínio dos poços com nível estáticos entre 0 e 10 m com 83% de representação. Em seguida os poços com NE entre 42 a 84 m, estes com uma frequência de 12,77%.

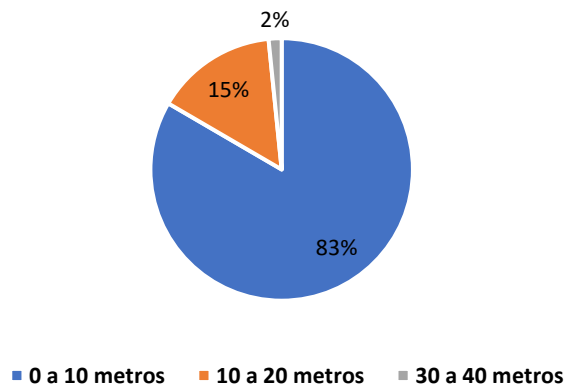


Figura 14- Nível estático dos poços avaliados.

- Os dados de vazão obtidos por banco de dados SIAGAS indicam uma variância entre 1 a 90 m<sup>3</sup>/h de vazão de estabilização, vale ressaltar que houve faltas de dados completos para arcabouço completo de visualização, aproximadamente 12% dos dados, os demais permitiram modular média de 10,20 m<sup>3</sup>/h, analisando por fim as frequências com domínio de valores entre 0 a 11 m<sup>3</sup>/h resultando em 65% dos poços, seguindo a fração representativa de 15% entre 11 a 22m<sup>3</sup>/h (Figura 15).

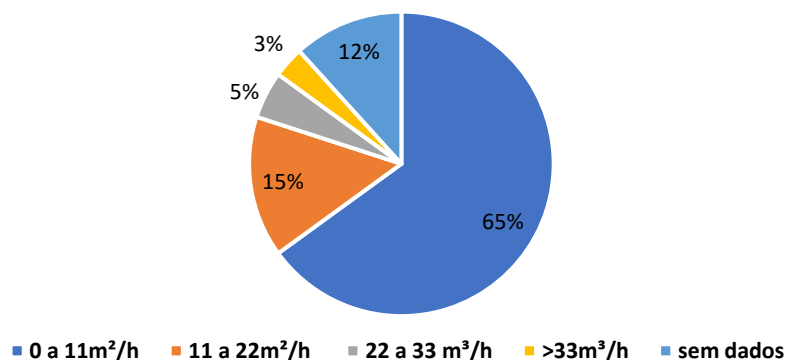


Figura 15- Vazão de estabilização dos poços avaliados.

#### 4.2 CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE SEGUNDO O GOD

O parâmetro G foi avaliado considerando o aquífero Barreira como não confinado e com diferentes graus de cobertura. Sendo assim os parâmetros aqui associados ficaram definidos entre 0,2 e 1,0 (valores definidos para a nossa área de estudo), tendo como base a média de espessura do solo na região. Para a avaliação da espessura foram estudados, com base nas informações disponíveis via descrições dos perfis construtivos e litológicos disponíveis.

Para determinar o valor, foi levada em consideração o solo presente acima de cada poço, sendo que na região de ocorrência de latossolo amarelo distrófico, com espessuras médias mais altas, adotando assim valores mais baixos (0,2 - 0,7) e para os gleissolos halípticos distróficos, estes apresentando características similares aos neossolos, com a diferença de estarem periodicamente percolados por água, e com espessuras médias mais baixas, adotando assim valores mais altos (0,8 - 1,0). (Figura 16)

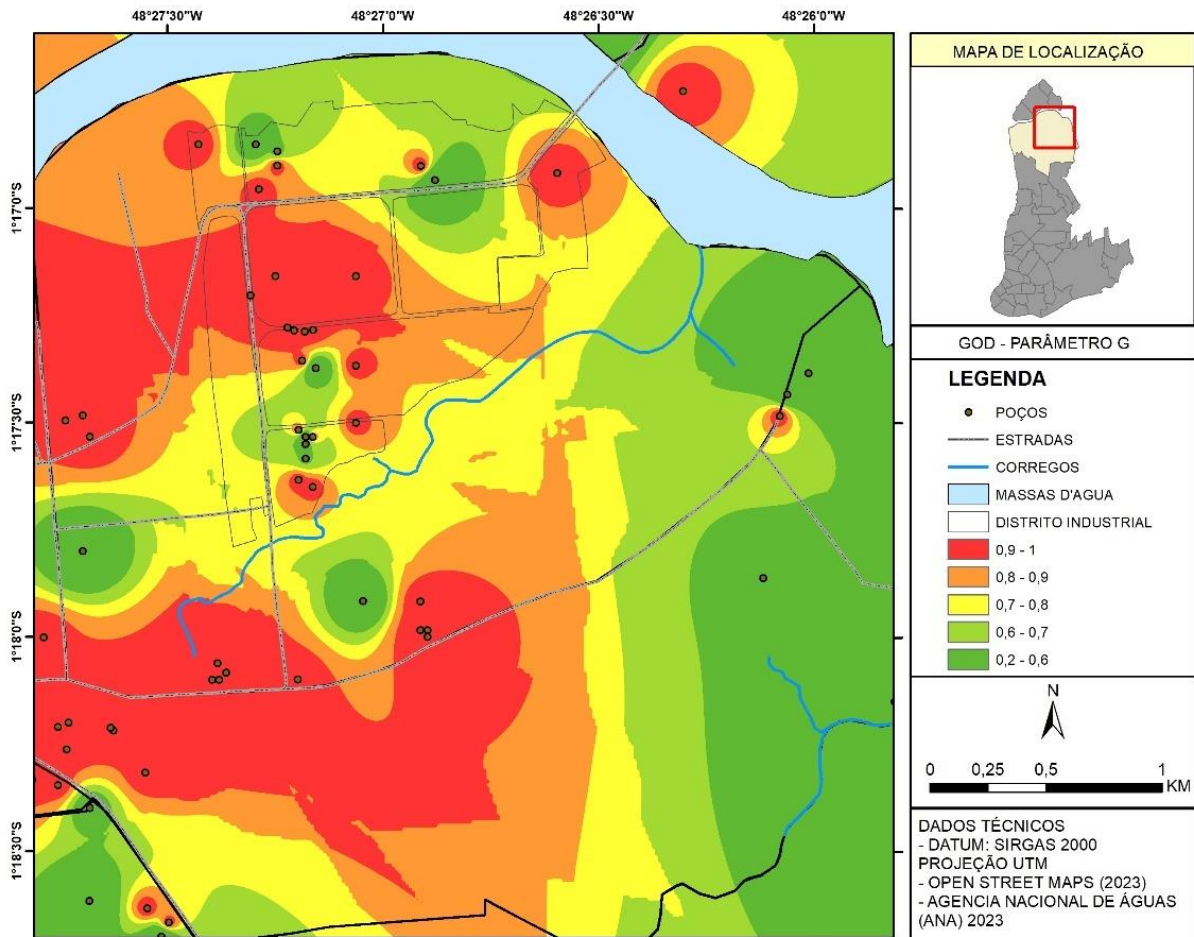


Figura 16- Distribuição segundo o parâmetro G. Fonte: Elaborado pelo autor

O parâmetro O corresponde aos estratos de coberturas, solos superficiais e a capacidade de atenuação de contaminantes que estão em superfície. Para avaliação local é preciso considerar o material geológico que ocorre acima do nível estático de água, sendo que estes materiais na área de estudo, são advindos de sedimentos recentes, prioritariamente mais arenosilto e areno-silto-argiloso. Adotou-se a opção de analisar individualmente o perfil descritivo dos poços estudados, e assim de acordo com a espessura e descrição específicas como “argilas arenosas” e “areias argilosas”. (Figura 17)

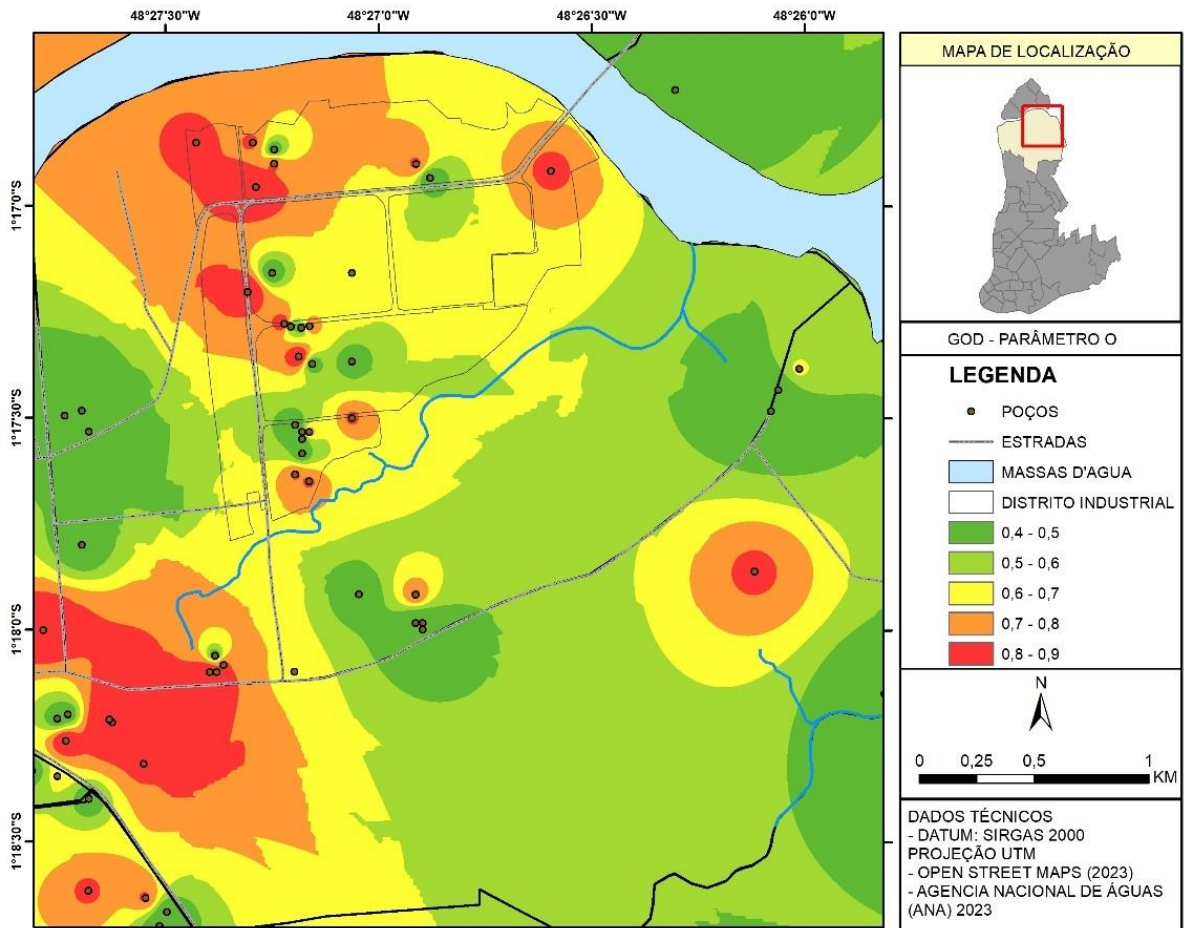


Figura 17- Distribuição segundo o parâmetro O. Fonte: Elaborado pelo autor.

O parâmetro D corresponde a profundidade das águas, relacionando-o diretamente ao grau de penetração de possíveis contaminantes ao sistema aquífero. Para diagnosticar os valores desses parâmetros, foi observado os valores de nível estático contemplados no banco de dados de amostragem dos poços. Os valores deste parâmetro variam entre 0,8 e 0,9, indicando assim uma observação de níveis estáticos de água relativamente superficiais, de até o máximo de 20 m de profundidade (Figura 18).

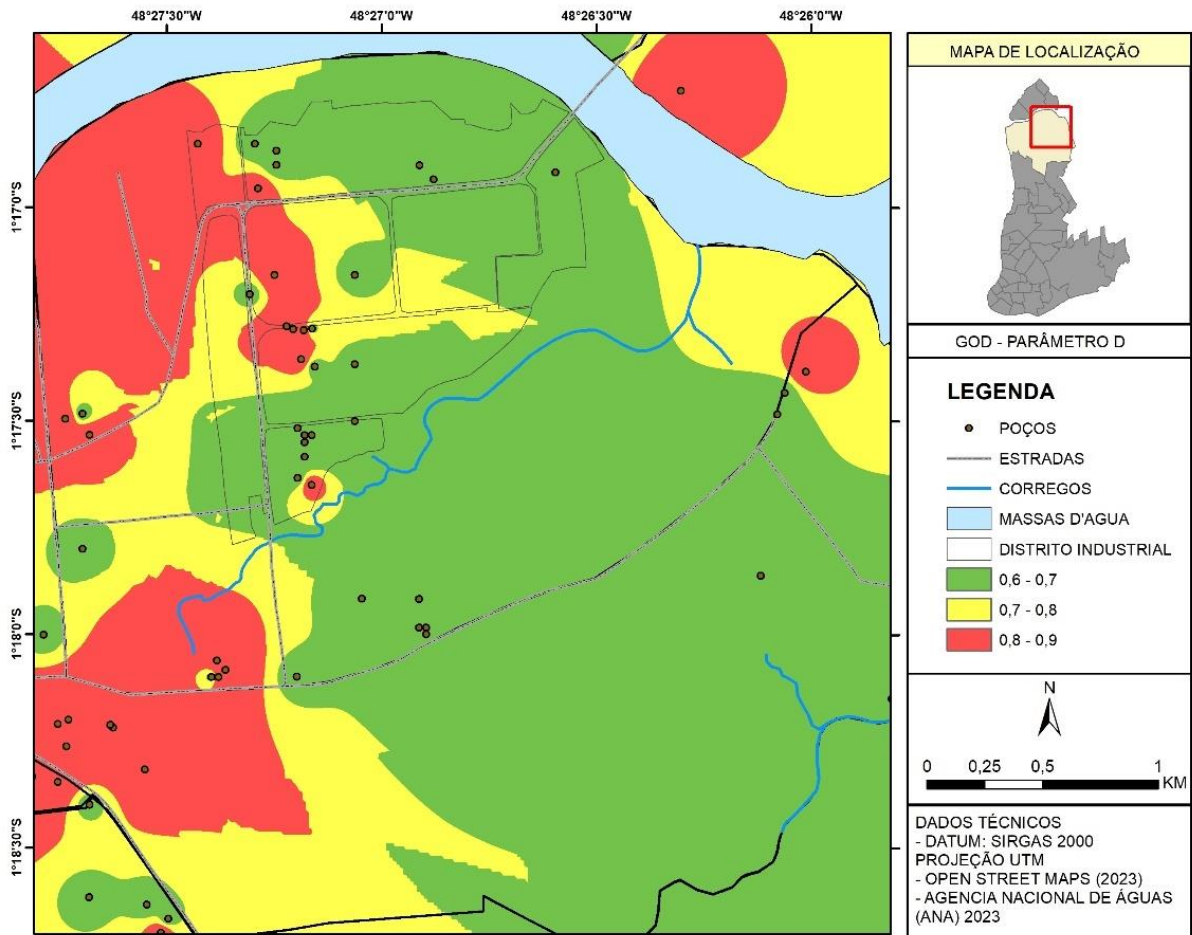


Figura 18- Distribuição segundo o parâmetro D. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados nas Figuras 19 e 20, resultantes da análise integrada, indicam um predomínio muito grande da variação do índice de média e baixa, com aproximadamente 5,8 km<sup>2</sup> e 4,1 Km<sup>2</sup> cobertas por essas classificações. Há outras porções com menores abrangências, estes são as coberturas de média a alta respostas aos valores dos índices, sendo 2,48 km<sup>2</sup> e 0,9 km<sup>2</sup> respectivamente. Com 67% das áreas classificadas como de Média a Baixa Vulnerabilidade e 23% de alta a extrema.

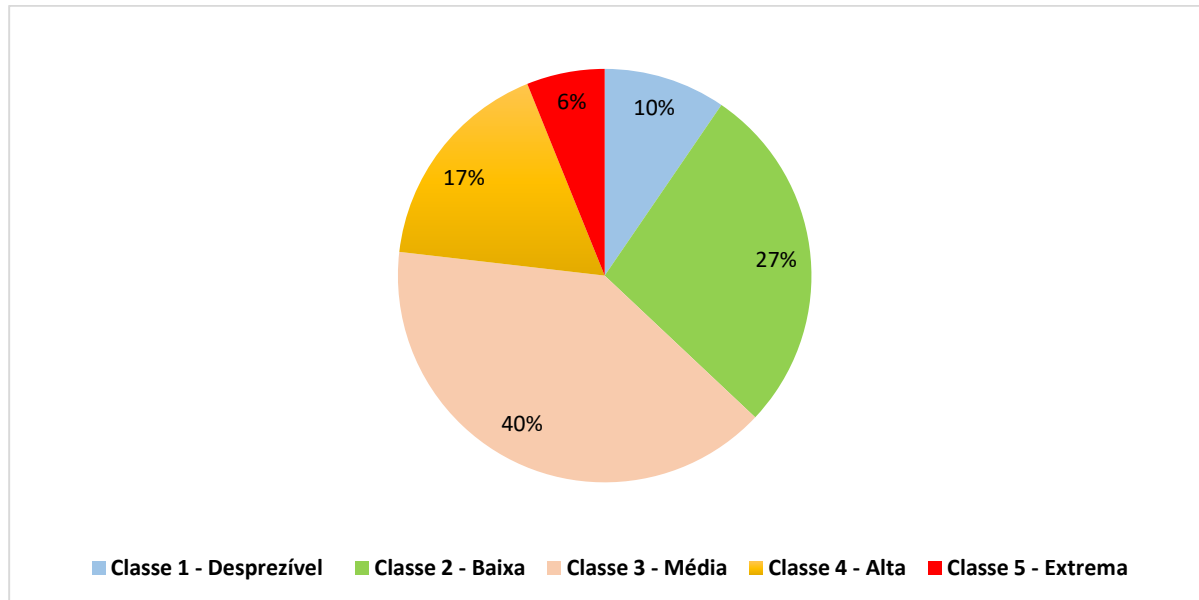


Figura 19- Distribuição percentual segundo a vulnerabilidade natural avaliada.

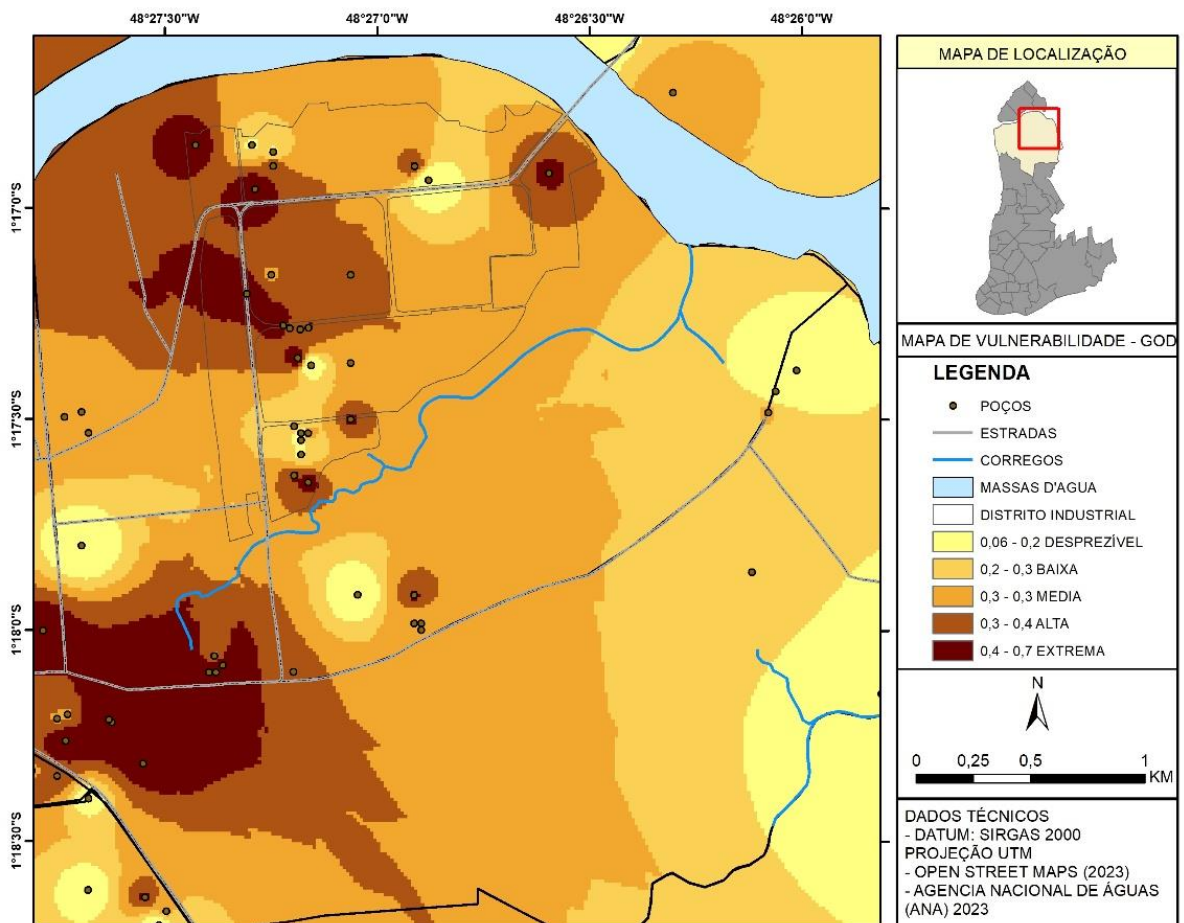


Figura 20- Vulnerabilidade natural avaliada. Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3 CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE SEGUNDO O DRASTIC

#### 4.3.1 Índice D – Nível de lençol freático

Dentro da disposição da área de pesquisa do distrito industrial e porções adjacentes, o levantamento de dados de profundidade do nível estático (Índice D), foi realizado por meio de coleta de informação do banco de dados a gerados na catalogação geral dos poços locais, e por meio de captação de dado construtivos dos poços perfurados (Figura 21).

Não há um acompanhamento histórico de níveis freáticos, que refletiriam em dados específicos em períodos chuvosos ou secos pela forma de avaliação cartográfica pontual e dificuldades para cumprimento de logística. Os valores obtidos variam entre 1,8 e 23,05 m, a partir desses valores foram atribuídos pesos entre 25 a 45.

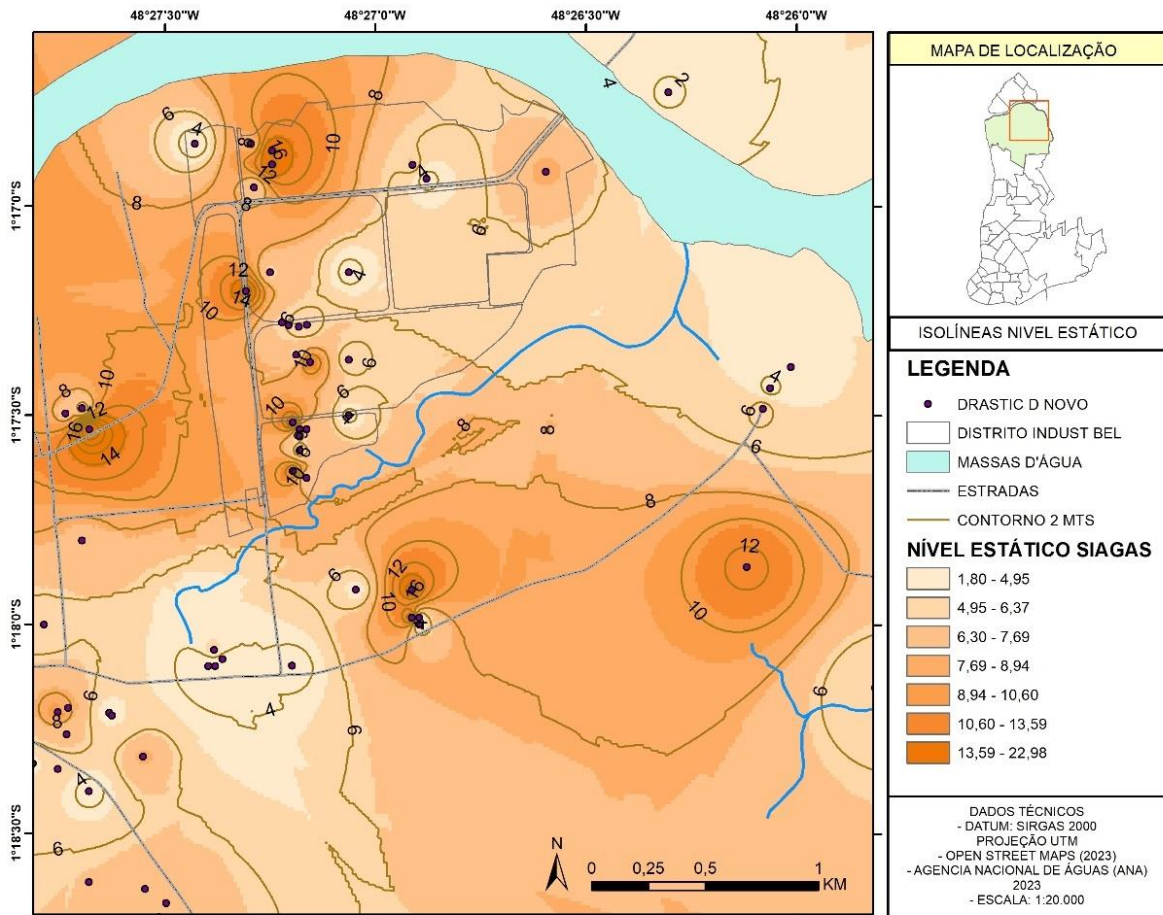


Figura 21- Distribuição segundo o índice D. Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3.2 Índice R – Parâmetro de recarga

Na avaliação dos dados de recarga no local, foram realizados levantamentos bibliográficos para estipular a faixa de recarga aplicada no método. Não havendo estação meteorológica específica no local, foi optado por fazer uma correlação direta com estudos já realizados dentro da RMB, pois são próximos e dentro do aspecto climático regional (Hanna 2017, Ana 2018).

Para o cálculo do balanço hídrico elaborado por Hanna (2017), para a RMB foi utilizada a metodologia de Thornthwaite & Mather (1955), para o período de 1961 a 1990. Os dados de precipitação e temperatura foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (Estação meteorológica localizada em 1°26'09,43" S, 48°26'14,03" O) (Inmet, 2013).

Para a capacidade de água disponível (CAD) utilizou-se o valor de 100 mm, e a evapotranspiração potencial (ETP) foi calculada pelo método de Thornthwaite & Mather (1955). Como resultado do balanço hídrico, temos a evapotranspiração real (ETR), a deficiência hídrica (DEF), o excedente hídrico (EXC) e o armazenamento de água no solo (ARM) para cada mês do ano (Tabela 2, Figura 22).

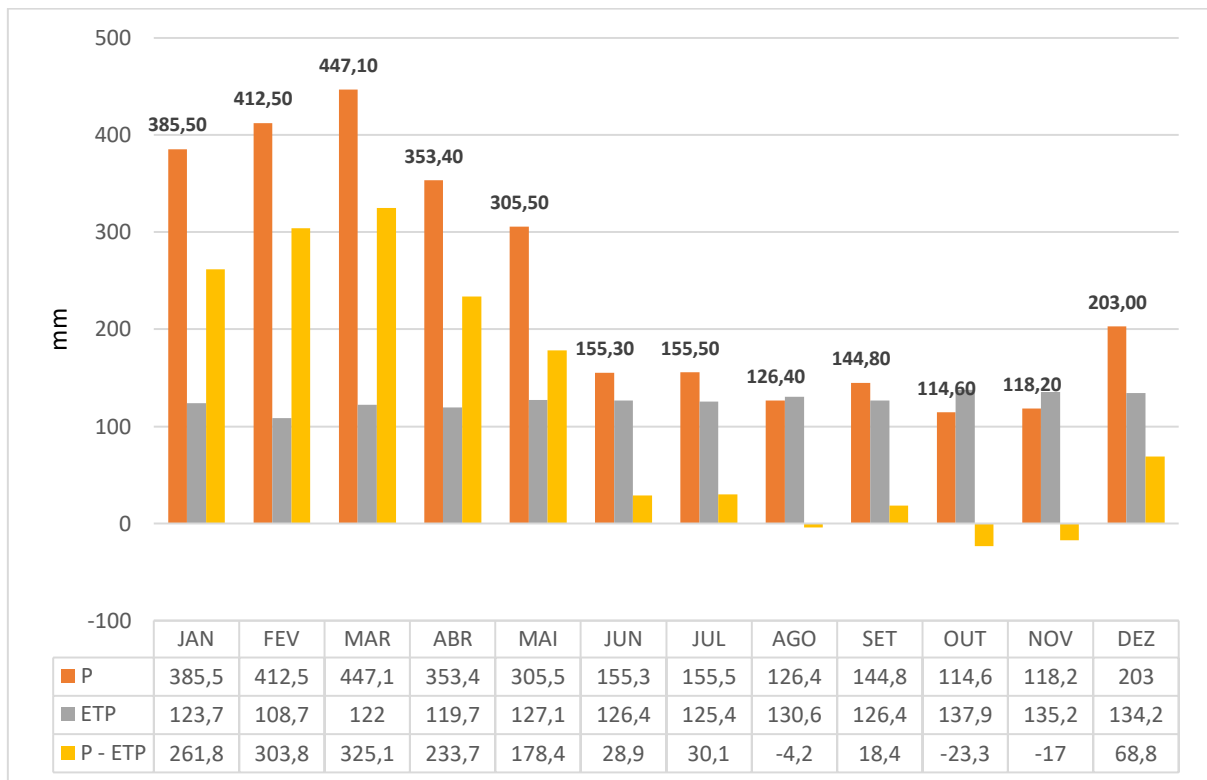
Tabela 2- Balanço hídrico para região de Belém, partindo dos dados de precipitação e temperatura no período de 1961 a 1990.

MÊS	T	P	ETP	P - ETP	NEG-AC	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC
JAN	25,60	385,50	123,70	261,8	0,0	100,0	0,00	123,7	0	261,8
FEV	25,40	412,50	108,70	303,8	0,0	100,0	0,00	108,7	0	303,8
MAR	25,50	447,10	122,00	325,1	0,0	100,0	0,00	122	0	325,1
ABR	25,60	353,40	119,70	233,7	0,0	100,0	0,00	119,7	0	233,7
MAI	25,80	305,50	127,10	178,4	0,0	100,0	0,00	127,1	0	178,4
JUN	26,00	155,30	126,40	28,9	0,0	100,0	0,00	126,4	0	28,9
JUL	25,70	155,50	125,40	30,1	0,0	100,0	0,00	125,4	0	30,1
AGO	26,00	126,40	130,60	-4,2	-4,2	95,8	-4,20	130,6	0,1	0
SET	26,00	144,80	126,40	18,4	0,0	100,0	4,20	126,4	0	14,2
OUT	26,40	114,60	137,90	-23,3	-23,3	79,2	-20,80	135,4	2,5	0
NOV	26,50	118,20	135,20	-17	-40,3	66,8	-12,40	130,6	4,6	0
DEZ	26,20	203,00	134,20	68,8	0,0	100,0	33,20	134,2	0	35,6
ANO	25,90	2921,8	1517,30	1404,5	--	--	0,00	1510,2	7,2	1411,6

T (C°) Temperatura, P = precipitação (mm), ETP = Evapotranspiração potencial (mm), NEG-AC = Negativo Acumulado (mm), ARM = Armazenamento de água disponível (mm), ALT = Alteração, ETR = Evapotranspiração Real (mm), DEF = Déficit Hídrico (mm), EXC = Excedente Hídrico (mm).

Fonte: Modulado por Thornthwaite e Mather (1955) e INMET (2013)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>.



Por meio de valores da precipitação (P) e da evapotranspiração real (ETR), foi levantado o índice de infiltração.

Temperatura	26° C	Taxa de infiltração representa a recarga do aquífero livre estudado. Logo: $I = P - ER$ $I = 2921,8 - 1320$ $I = 1601,8$ (mm anual) $I = 133,48$ (mm mensal)
Evapotranspiração potencial (ETP)	1517,30	
Precipitação	2921,8	
P - ETP	1404,5	
Evapotranspiração real (ETR)	1320	
Excedente hídrico (EXC)	1411,60	

Figura 22- Resultado da distribuição do balanço hídrico.

### 4.3.3 Índice A – Parâmetros de componentes camada aquífero saturada

O parâmetro A é obtido por meio de observação dos tipos de sedimentos que propriamente compõem o meio aquífero local. O material coletado é analisado por meio de acompanhamento de construção de poços de captação, dados de perfil construtivos e associação comparativa dos perfis encontrado no Siagas.

Esses sedimentos são essencialmente, areias finas a muito finas, com cascalhos esparsos e com pontuais lentes ricas em silte. Destacando duas maneiras principais de descrição: arenito maciço, identificado por perfis descritivos de poços pré-existentes, com grande continuidade vertical; e arenitos finos predominantes, estes estão de acordo como o perfil médio padrão descrito no estudo de Oliveira, J. (2002) – Cprm, no intervalo de 38 a 51 m, como arenitos de coloração esbranquiçada, friáveis, heterogêneos de granulação fina a média e matriz levemente calcífera. Outra forma de apresentação da unidade é como “arenito acamadado”; este é relacionado a camadas ricas em argilas róseas, vermelho-amareladas a esbranquiçadas com frequentes intercalações de lateritas e nódulos de quartzos, possuindo em média uma profundidade máxima de 37 m.

### 4.3.4 Índice S – Parâmetros de tipos de solo

O parâmetro S, está relacionado ao tipo de solo subordinados e sua susceptibilidade a contaminação, justamente por estar diretamente exposto a possíveis áreas de risco, a exposição de solos na sub-bacia Macacuera e composição das áreas de inundação perene, são compostos predominantemente por Latossolo Amarelo e Gleissolohalítico distróficos (Figura 23). Os Latossolos são os principais tipos de solo que ocorrem por toda extensão da área do nordeste paraense, exceto em planícies de inundação (Santos *et al.* 2018).

Os Gleissolos localizam-se nas regiões de contato dos municípios da região do nordeste paraense, são definidos por um ambiente de planície fluvio-marinha, em conjunto de deposição de sedimentos com intensos dinamismos morfogênicos configurando-os como sedimentos recentes sob forte influência do lençol freático pelas ações fluviais e de maré; suas texturas são predominantemente franco silto-argilosos evidenciadas pela cores acinzentadas e mosqueadas, devido ao fator de oxidação e redução dos compostos de ferro existentes em meio anaeróbio (Embrapa 2011).

Os Neosolos, segundo Valente (2013), são solos poucos desenvolvidos do ponto de vista pedogênicos, rasos e não apresentam qualquer tipo de horizonte B observado, são classificados como neosolos flúvicos e os neossolos quartizenicos. Na análise da pesquisa não foram

atribuídos pesos aos Neossolos superficiais pois há pouca expressividade na área de estudo e na acurácia do mapa usado para plotar os pontos.

Os latossolos tem como características serem profundos e bem drenados, que apresentam como principal característica o horizonte diagnóstico subsuperficial “B”, este apresentando elevado estágio de intemperismo com alteração completa dos minerais primários, sendo assim são compostos por quantidades variáveis de óxidos de ferro e alumínio, minerais de argila 1:1 (caulinita), quartzos e outros minerais resistentes ao intemperismo, apresenta uma textura franco arenosa ou mais fina e teores menos concentrados de silte (Embrapa 2011).

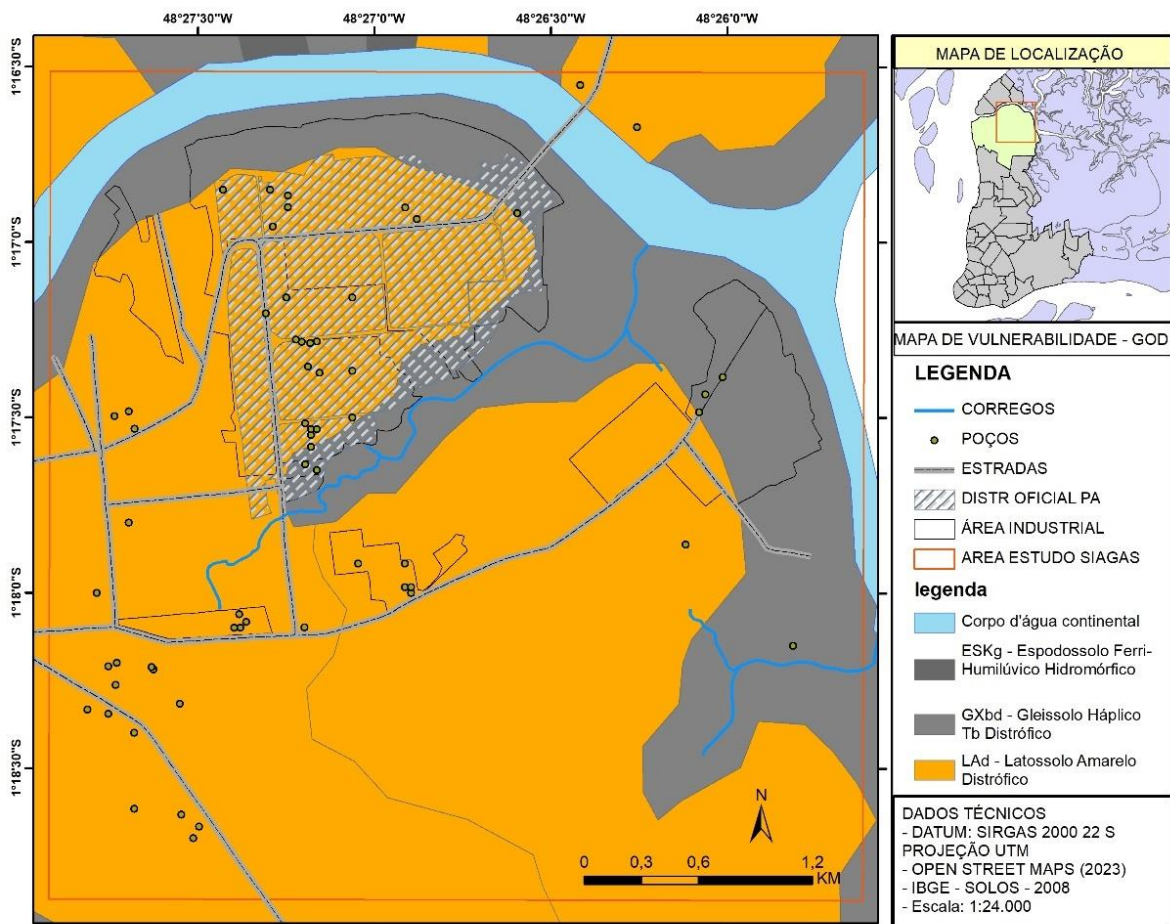


Figura 23- Distribuição segundo o Parâmetro S. Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.3.5 Índice T – Parâmetros de topografia local

O parâmetro T é avaliado como topografia do terreno estudado (Figura 24). Esse parâmetro é importante tendo em vista a relação entre o escoamento superficial e infiltração. Em locais de maior declividade, o escoamento superficial é favorecido, diminuindo a infiltração efetiva e conseqüentemente o transporte de possível contaminante até o aquífero. Na geração da carta foram utilizadas imagens SRTM reclassificadas conforme a metodologia do Projeto Topodata<sup>2</sup>, Observou-se uma variação por cotas entre 1,30 a 17,50 m.

As classes de declividade foram definidas por procedimento matemático analítico, interno ao programa ArcGis (ferramenta *slope*), com a obtenção da distribuição em percentual; esta caracterizou áreas planas, com valores predominantes inferiores a 10%.

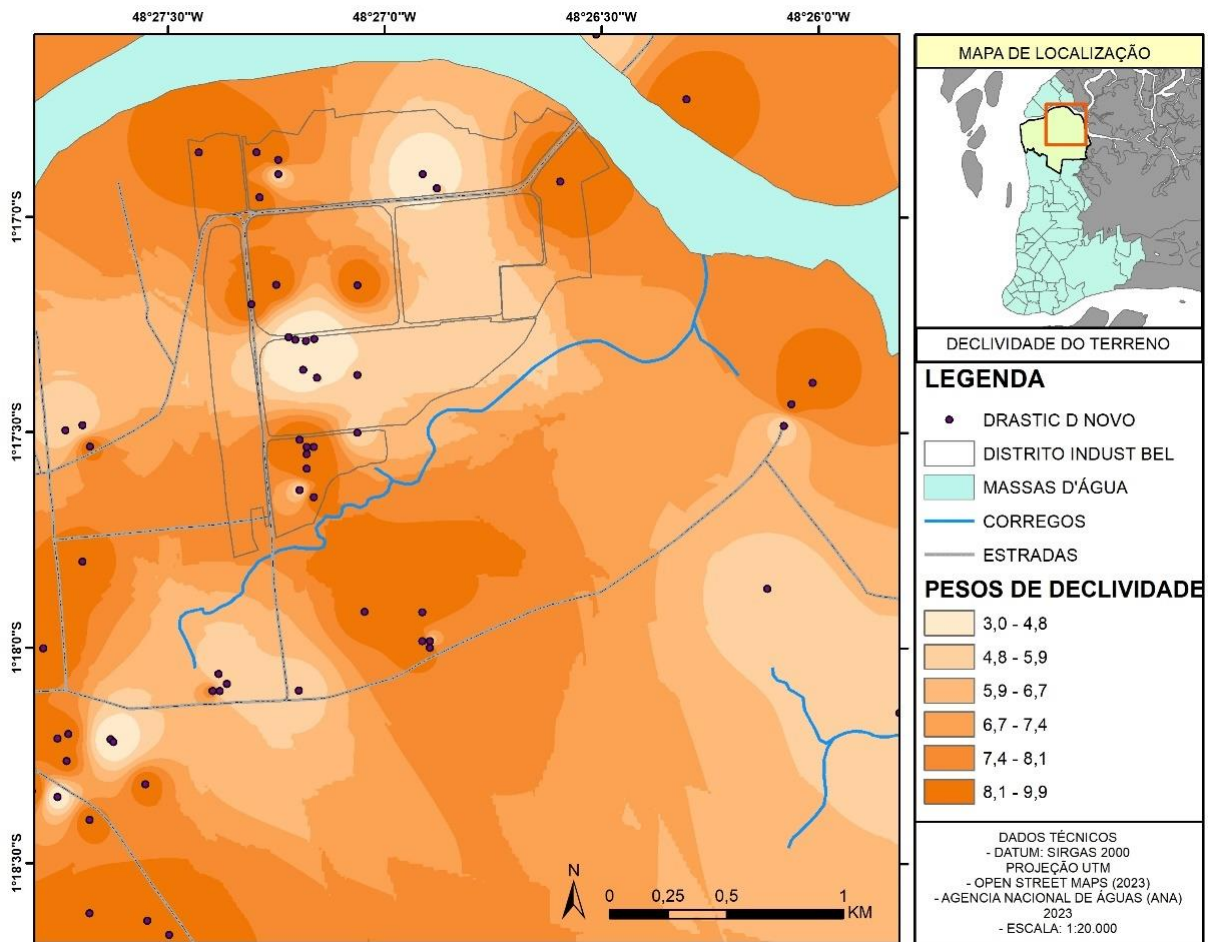


Figura 24- Distribuição segundo o Parâmetro T. Fonte: Elaborado pelo autor

<sup>2</sup> Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>

#### 4.3.6 Índice I – Parâmetros de capacidade de camadas não saturadas

Este parâmetro descreve sedimentos que constituem as camadas não saturadas em água (zona vadosa); sendo identificados da mesma maneira que o Índice A. São configurados como areias finas silto-argilosas (arenito) e areia médias a grossas esparsadas por pontuais nódulos lateríticos concrecionados (areia e cascalhos com lentes de silte e argila) e argilas e lentes siltosas. Estas configurações estratigráficas são comumente presentes em descrições faciológicas da formação e Barreiras e Pós-Barreiras que compõem a subsuperfícies da RMB.

As descrições são baseadas principalmente nas descrições de campo durante a amostragem de calha em perfurações rotorpercussivas de e posteriormente descritos em relatórios técnicos para solicitação de outorga de captação perante aos órgãos de fiscalização (Figura 25).

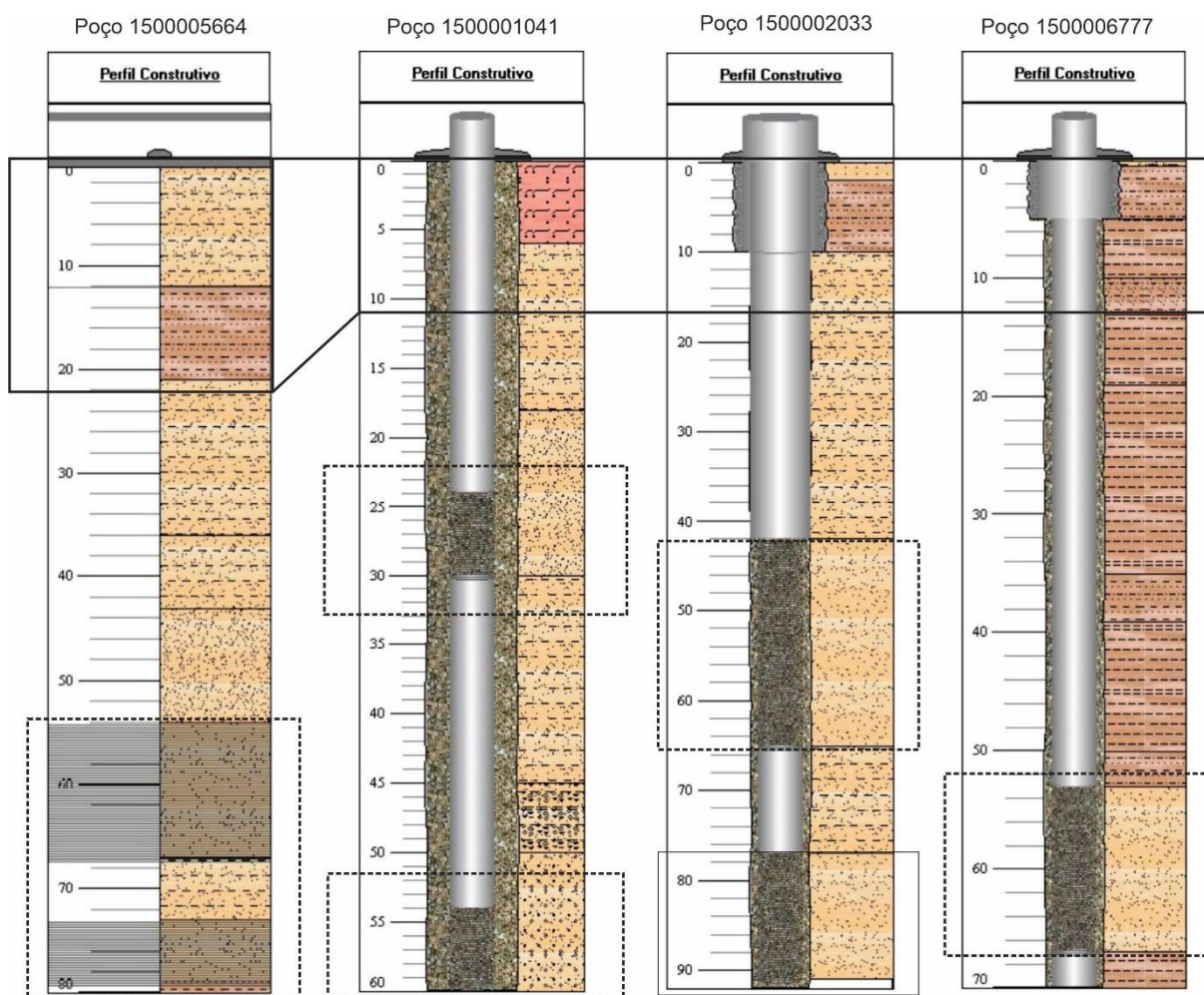


Figura 25- Ilustração descrevendo os perfis associados. As porções superiores dos poços foram relacionadas acima do nível estático (não saturadas) e em tracejadas as descrições de composições dos aquíferos, zonas saturadas.

### 4.3.7 Índice C – Parâmetros de condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica é a propriedade do aquífero que reflete a facilidade com que a água se movimenta nele, não especificando se é um movimento de fluido lateral ou vertical. Os valores ideais seriam decorrentes de testes de bombeamento ou infiltração em camadas saturadas e camadas não saturadas de água (Fiori *et al.* 2010).

Porém, dada a falta da informação de testes de bombeamento para todos os poços avaliados, foram adotados os valores de condutividade estimados a partir da metodologia desenvolvida em Ana 2018 (Tabela 3). O método denomina-se *Open and Hole*, e consiste em um ensaio religado em furo de sondagem, sendo lateralmente isolado e aberto apenas no fundo para poder-se quantificar a percolação de água em subsuperfície. Após a etapa de perfuração de instalação dos tubos, tomam-se as medidas finais de medidas de rebaixamento até sua estabilização enquanto havia a infiltração. O cálculo de condutividade hidráulica vertical ( $K_v$ ) relaciona (equação 2): o Raio do tubo ( $R$ ); a Coluna d'água inicial ( $h_0$ ); a Coluna d'água final ( $h_1$ , estabilização do rebaixamento); e o Tempo decorrido ( $\Delta t$ ) para o rebaixamento dentro  $h_0$  e  $h_1$ .

$$k_v = 2,303 * \left( \frac{R}{4\Delta t} \right) * \log \frac{h_0}{h_1} \quad \text{Eq. 2}$$

Estes foram comparados aos valores apresentados em Fetter (2001), para diversos materiais geológicos, para fins de comparação e classificação.

Tabela 3- Valores de condutividade hidráulica.

<b>Material</b>	<b>K (cm/s)</b>
Cascalho bem selecionado	1 a $10^{-2}$
Areia bem selecionada	$10^{-1}$ a $10^{-3}$
Silte arenoso, areia fina	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
Silte, areia siltica, argila arenosa	$10^{-4}$ a $10^{-6}$

Fonte: Adaptado de ANA (2018).

No estudo realizado por Ana 2018 – nos relatórios temáticos de infiltração. Os poços apresentados na Tabela 4 são os mais próximos da área de estudo adjacentes a região do distrito industrial, sendo correlacionados horizontalmente. Os valores são correspondentes a faixa dos materiais silte, areia siltica, argila arenosa, sendo a capacidade mínima de condutividade hidráulica.

Tabela 4- Poços de referência identificados.

Pontos	Kv Med (m/dia)	Kv Med (cm/seg)
17 – SAAEB/COSANPA Conj. Eduardo Angelim	0,41	$4,75 \cdot 10^{-4}$
19 – SAAEB/COSANPA Souza Franco	0,83	$9,68 \cdot 10^{-4}$
20 – SAAEB/COSANPA Outeiro	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
36 – Poço PAAR 5 - Ananindeua	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$

#### 4.3.8 Classes de vulnerabilidades do DRASTIC

A Tabela 5 resume os valores atribuídos por classe, para posterior reclassificação segundo os pesos ( $R_w$ ) definidos pelo seu grau de influência segundo o método. E a Figura 27 apresenta o resultado final gerado após associação dos parâmetros.

Tabela 5- Valores classificados segundo o DRASTIC.

(continua)

Profundidade (m)		Valor atribuído	Peso ( $R_w$ )
< 1,5		10	5
1,5 – 4,5		9	
4,5 – 9,0		7	
9,0 – 15,0		5	
15,0 – 22,5		3	
22,5 – 30,0		2	
> 30,0		1	
Taxa de infiltração (Pol/ano)	Taxa de infiltração (mm/ano)	Valor atribuído	Peso ( $R_w$ )
< 2	< 51	1	4
2 – 4	51 – 102	3	
4 – 7	102 – 178	6	
7 – 10	178 – 254	8	
> 30	> 254	9	
Litologia de composição do aquífero		Valor atribuído	Peso ( $R_w$ )
Folhelhos maciços		2	3
Ígneas/metamórficas		3	
Ígneas e metamórficas intemperizadas		4	
Till glacial		5	
Arenito acamado, calcário e folhelho sequencial		6	
Arenito maciço		6	
Calcário maciço		6	
Areia e cascalho		8	
Basalto		9	
Calcário cárstico		10	

(conclusão)		
Tipos de solo	Valor atribuído	Peso (Rw)
Fino ou ausente	10	2
Cascalho	10	
Arenoso	9	
Tufoso	8	
Argila agregada ou contraída	7	
Marga arenosa	6	
Marga	5	
Silte margoso	4	
Argila margosa	3	
Lixo/Esterco	2	
Argila desagregada e não expansível	1	
Inclinação e relevo (%)	Valor atribuído	Peso (Rw)
< 1	10	1
1 – 6	9	
6 – 12	5	
12 – 18	3	
> 18	1	
Zona Vadosa	Valor atribuído	Peso (Rw)
Camada Confinante	1	5
Silte/Argila	3	
Folhelho	3	
Calcário	6	
Arenito	6	
Calcário acamadado, arenito, folhelho	6	
Areia e cascalho com significantes % de silte e argilas	6	
Ígneas e metamórficas	4	
Areia e cascalho	8	
Basalto	9	
Calcário cárstico	10	
Condutividade hidráulica (m/dia)	Valor atribuído	Peso (Rw)
0 - 4,1	1	3
4,1 - 12,2	2	
12,2 - 28,5	4	
28,5 - 40,7	6	
40,7 - 81,5	8	
> 81,5	10	

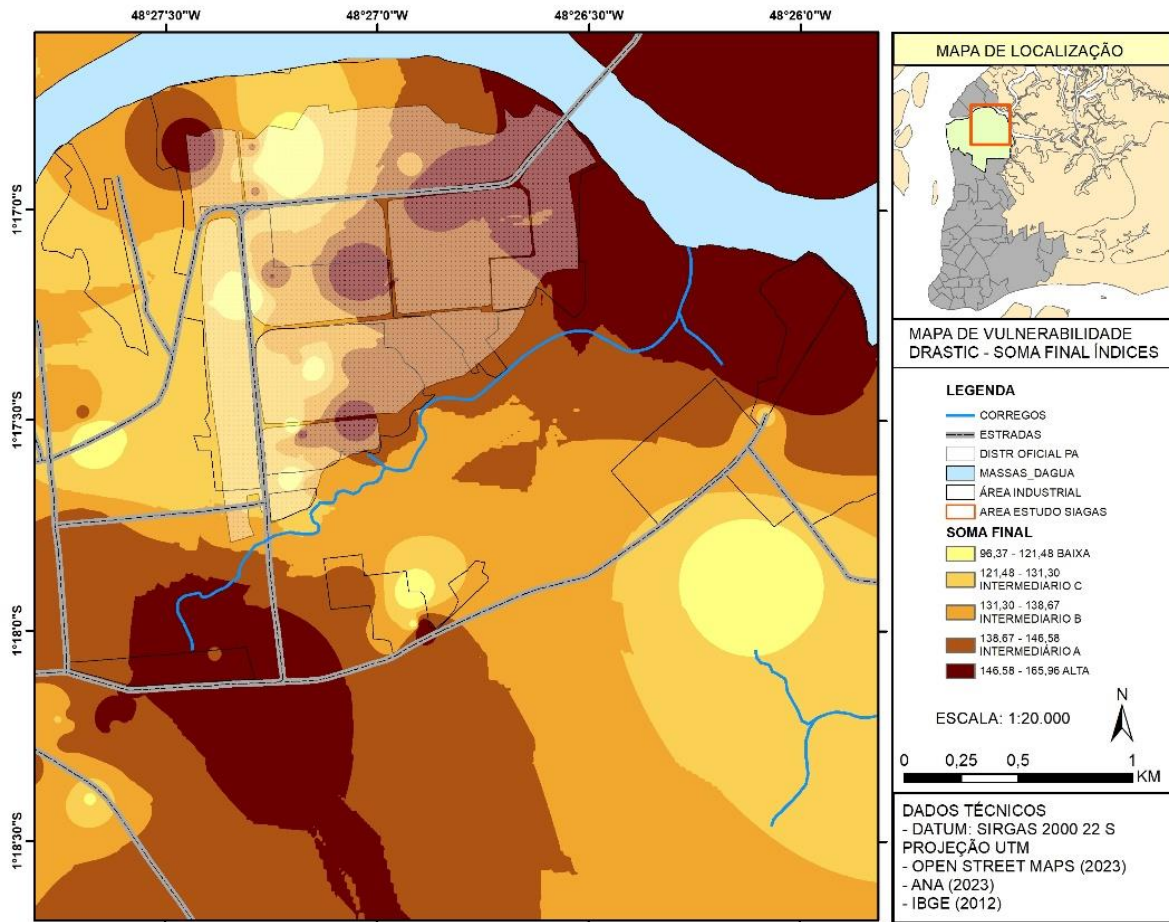


Figura 26- Resultado final obtido segundo o DRASTIC. Fonte: Elaborado pelo autor

O DRASTIC identificou 05 categorias distintas de vulnerabilidade, concentradas na porção leste e porção norte próxima a margem do rio Maguari, mas ainda dentro da zona industrial. A Figura 26 indica um predomínio muito grande da variação do índices intermediários aqui descritos em escala de A a C, com aproximadamente 2,81 km<sup>2</sup>, 3,87 Km<sup>2</sup> e 3,85 Km<sup>2</sup>, configurando 72% da área total cobertas por essas classificações. Há outras porções com menores abrangências, estes são as coberturas de alta respostas aos valores dos índices, sendo 3,62 km<sup>2</sup> e com 3,41% das áreas classificadas como Baixa Vulnerabilidade .

A ocorrência da classe de vulnerabilidade intermediária (média) é a mais abrangente, sendo concentrada nas porções centro-noroeste e centro-sudeste. Esta é caracterizada pela homogeneidade da descrição de camadas não saturadas (vadosa), mesma faixa classificatória de nível estático e por parâmetros de cobertura de solos associados aos latossolos regionais mais espessos. Foi adaptado para este trabalho a divisão da categoria intermediaria para melhor destacar a composição em mapa, a intermediaria C (19,18%) mais próxima da categoria baixa e a intermediária A (26,27) mais próxima a alta vulnerabilidade.

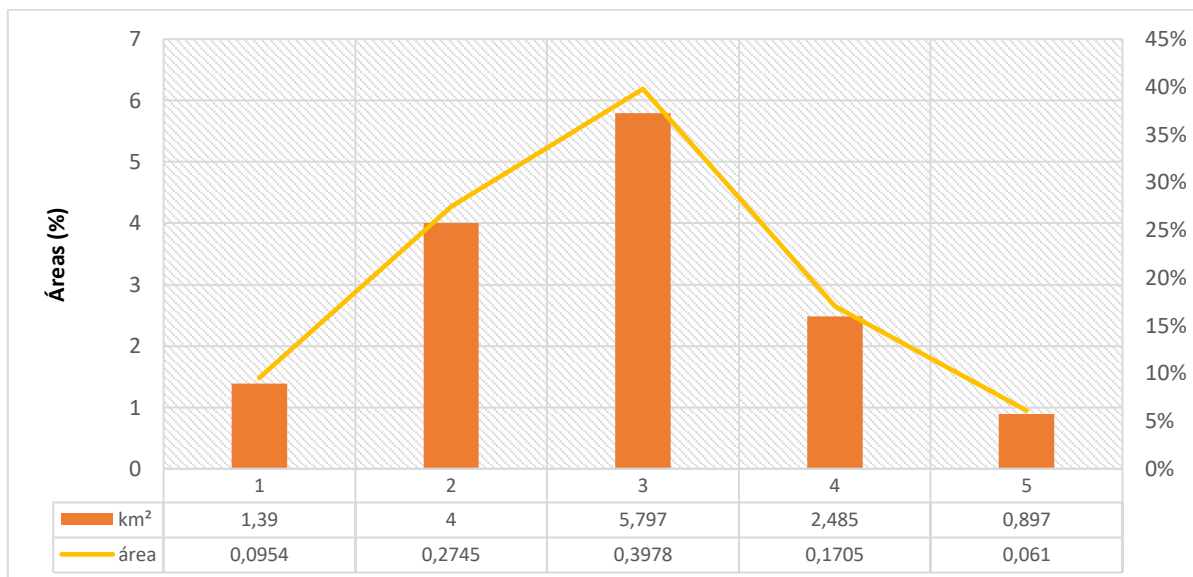
A delimitação de zonas de vulnerabilidade alta (24,7%), é atribuída as regiões sudeste da área, sendo associada aos perímetros habitacionais mais antigos, localizados nos pontos de contatos dos bairros de Águas Negras, Campina de Icoaraci e Maracauera. São distritos urbanos mais densamente povoados e também onde encontra-se uma empresa de envasilhamento de água potável amplamente consumida pela população. Na região nordeste e leste da área industrial de Icoaraci, estão localizadas empresas exportadoras de madeira, estaleiro de manutenção e construção naval e empresas de logística de grão, todas às margens do rio Maguari e próximas à foz da micro bacia de Outeiro.

#### 4.4 DISCUSSÃO E ANÁLISE COMPARADA

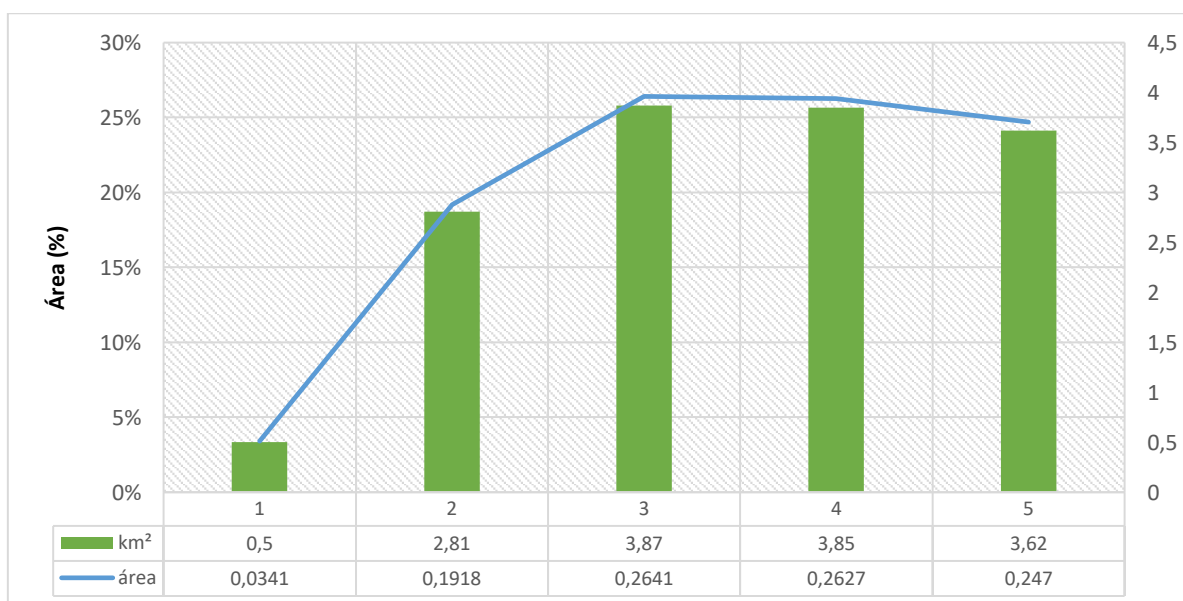
Os valores relacionados aos dois métodos, apresentam resultados esperados dentro dos parâmetros estabelecidos e modulados. Na metodologia GOD a vulnerabilidade variando entre 0,06 (desprezível) a 0,7 (extrema) e em DRASTIC, na faixa entre 97,37 (baixa) até 165 (alta). Porém, na distribuição percentual das classes, as mesmas aproximadamente proporcionais, com o comportamento intermediário dominante (Figura 27), com a exceção da classe de maior vulnerabilidade, que foi mais percebida pelo DRASTIC.

A interpretação geológica, não apresentou discrepâncias de variação, pois a área de estudo é bem estratificada e sem mudanças marcantes na vertical ou de contato geológico. Portanto, todas as observações de tipo de solo indicavam a composição de latossolos amarelos representativos de sedimentos inconsolidados e consolidados pertencentes às formações Barriras e Pós-Barreiras típicas da região.

A aplicação do Método GOD mostrou-se mais simples e objetiva, em função dos poucos fatores a serem relacionados na equação, e muito mais aplicada a descrições mais generalistas de classificação de zona não saturada. A predominância da vulnerabilidade baixa a intermediária está vinculada especialmente à presença de argila nos perfis (especialmente areno argilosa), elementos frequentes na formação Barreiras da região (Rosetti 2006, Rosetti *et al.* 1989), mesmo que não configure confinamento, tem grande importância na proteção das águas subterrâneas.



(a)



(b)

Figura 27- (a) Método GOD (1 - Desprezível, 2 - Baixa, 3 - Média, 4 - Alta, 5 - Extrema). (b) Método DRASTIC (1 - Baixa, 2 - Intermediária C, 3 - Intermediária B, 4 - Intermediária A, 5 - Alta). Distribuição % das Classes.

Pelo método GOD pode-se identificar cinco categorias de vulnerabilidades distintas: os valores de baixa e vulnerabilidade (27,45%) ou desprezíveis (9,54%), se concentram na porção centro-leste da micro-bacia do Outeiro, abrangendo principalmente uma zona urbana em expansão e futuras instalações de condomínios. Os valores médios (39%), altos (17,05%) e extremos (6,1%), abrangem principalmente as zona centro-oeste e centro norte, também é característica do local a real localização da área do distrito industrial e das áreas de perímetro urbano, onde estão localizadas as manchas de extrema vulnerabilidade.

Os métodos avaliados tem a limitação das variações de nível estático e da influência de maré ao longo do tempo, já que a área é próxima a linha de costa. O GOD se apresenta mais apropriado para estudos com pouca disponibilidade de dados primários e o DRASTIC a uma melhor oferta da informação.

Trabalhos anteriores indicam compatibilidade de dados e resultados. Carvalho *et al.* (2020) definiram também a vulnerabilidade intrínseca da água subterrânea do Distrito Industrial de Icoaraci (Belém-PA), indicando cerca de 75% da área tem vulnerabilidade baixa e cerca de 23% apresenta vulnerabilidade média.

A metodologia DRASTIC (Aller *et al.* 1987) mostrou-se mais complexa e que requer mais dados de parâmetros e descrições detalhadas entre intervalos; este fato implica nas fontes e formas de levantamentos de dados necessários. No caso deste trabalho, fez-se necessário adequação e adaptação de dados como condutividade hidráulica superficial e observações de solos em homogeneidade, pois os pontos de dados coletados de forma efetiva são apenas 2 poços e o restante por levantamento secundário.

Com os resultados cartográficos do método DRASTIC, é possível observar, áreas com alta vulnerabilidade localizados no perímetro industrial da região, o que é um indicativo grave casos haja eventos de contaminação persistentes como nitratos e hidrocarbonetos, como descrito em Hirata & Fernandes (2008).

A análise de nível de lençol freático da área de estudo, revelou profundidades entre 1,8 e 23,05 metros, sendo verificado que, de maneira geral o aumento de profundidade do nível freático de porções a montante com fluxo subterrâneo para jusante, no sentido para as margens do rio maguari. Ao considerar o possível tempo de infiltração de contaminantes, quanto mais profundo o lençol freático, menos vulnerável ele fica, o inverso se aplica também. No método GOD foram classificadas 3 classes e no DRASTIC delimitadas 5 classes.

A recarga pluviométrica intermediária proporciona uma capacidade média de transporte, esta apresenta valores de 133,8 mm mensais, os dados fornecidos por INMET (2023), permitiram apenas a catalogação na faixa e 100 mm e 178 mm, delimitando em apenas uma classe.

O material constituinte do aquífero influencia diretamente na lixiviação de um contaminante ao longo de camada não confinante, assim é comum relacionar essa capacidade a avaliação de porosidade específica com a capacidade de velocidade de fluxo, portanto quanto menor for a disponibilidade de solos porosos melhor. Na área de estudo foram levantados, os dados indicam dois tipos de materiais por camadas arenitos maciços com pouco silte e arenitos

acamadados intercalados com silte, ambos associados a diferentes fácies de composição estratigráfica, mas sempre compondo a Formação Barreiras.

O tipo de perfil colabora com a percolação contaminante de maneira efetiva, pois seria a primeira barreira ou vetor de transporte devido a infiltração. Lemos (2013) aponta características similares para ambientes estuarinos, devido aos processos de influência de composição estuarina e continental, estes posicionados em ambiente transicional influenciado por maré influxos continentais, durante o Plio-Pleistoceno (5 Ma. a 0.7 Ma.), onde os processos de erosão e acomodação decorrentes do recuo da linha de costa determinaram a formação Barreiras e Plataforma Bragantina.

As observações de perfil litológico de zona não saturada permitem avaliar a capacidade de confinamento de aquífero, neste estudo foi levada em consideração a mesma metodologia de estudo como a composição do material constituinte do aquífero, com base em poços estudados em campo e nos descritos pelo Siagas.

## 5 CONCLUSÕES

Importância desse tipo de estudo é evidenciada quando se percebe a clara necessidade de acompanhamento e gerenciamento de uso dos recursos hídricos para o melhor abastecimento de água pelas comunidades e para as atividades comerciais instaladas na região, visando proteger o meio físico e a qualidade de água, que influenciam todo o meio biótico. Esse dilema faz parte de um grande gargalo para as questões de desenvolvimento das cidades na Amazônia que envolvem econômico e urbano, como a proteção dos recursos naturais. O mapeamento de vulnerabilidade aplicado as metodologias GOD e DRASTIC tem caráter somatório diante da evolução nos estudos de hidrogeologia e riscos geológicos.

De modo geral o zoneamento da vulnerabilidade a partir do método GOD, demonstrou uma maior restrição em comparação ao método DRASTIC. Ao considerar a observação de zona de uso nas regiões de ocupação urbana, o método GOD aplicado delimitou perímetro de vulnerabiliza extrema em áreas densamente povoadas, como na porção urbana da fronteira de bairros Maracacuera, Águas Negras, nas nascentes do rio Outeiro e nas porções ao noroeste próximo a estrada velha do Outeiro. As vulnerabilidades mais baixas são localizadas a leste, com pouca intervenção humana e preservação de vegetação.

Na aplicação do método DRASTIC predominam locais de moderadas vulnerabilidades, estes se localizam nas porções nordeste as margens do rio Outeiro e furo do Maguari, onde estão localizados as maiorias de empresas de transporte por balsas, estaleiro e exportação de madeira locais.

A aplicação dos métodos GOD e DRASTIC, demonstraram resultados distintos entre si, o que decorre de avaliações de classes e relevância de cálculos diferenciados no método DRASTIC. Este coloca a profundidade de lençol freático e o impacto de zona saturada e não saturada como principais fatores controladores, já o método GOD, apesar de não restringir pesos ponderados em seu cálculo, leva em consideração características importantes de zona não saturada constituinte (vadosa) e nível estático, porém descarta o uso de condutividade hidráulica e das informações de saturada constituinte do aquífero.

Vale observar também, que este estudo acaba por ser limitado a alguns fatores como: a disponibilidade de dados, tendo como exemplo a falta de informações a respeito de nível estático *in situ*; vazão e entradas de água, sendo o conhecimento específico de filtros importante para observação; limitações dos métodos aplicados; e a defasagem de alguns dados em relação ao ano atual. O produtos deste trabalho podem ser melhorados conforme a disponibilidade dos fatores citados, mas já se mostrou coerente com outros trabalhos já realizados com a mesma

metodologia.

Por fim, este estudo demonstra um panorama geral sobre exploração dos recursos hídricos subterrâneos, e mostra que nesses a extrema necessidade de um planejamento por parte do município para que o controle da gestão dos recursos hídricos, do uso e ocupação do solo e do saneamento básico sejam realizados de maneira adequada com a finalidade de garantir a proteção desses recursos hídricos. Assim, espera-se que os produtos gerados sirvam como ferramenta de auxílio para os órgãos gestores do município de Belém e Distrito Administrativo de Icoaraci.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas - ANA. 2005. *Caderno de recursos hídricos*. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. Brasília, DF, Ministério do Meio Ambiente, 74p.
- Agência Nacional de Águas - ANA. 2018 *Estudos hidrogeológicos para a gestão das águas subterrâneas da região de Belém/PA*. Brasília, DF, ANA. (Relatórios Temáticos, Testes de infiltração Elaboração e Execução; Profill Engenharia e Ambiente S.A.).
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. 2023. *Conjuntura dos recursos hídricos do Brasil 2023*, Brasília, DF, Ministério do Meio Ambiente, 118p.
- Aller L., Bennet T., Lehr J. H., Petty R. J. 1987. *Drastic*: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hidrogeologic settings. US. EPA Report 600/2-85/018.
- Baird C. & Cann M. 2011. *Química ambiental*. ed. Ed. Bookman, Porto Alegre. 844p.
- Barbosa I.S. 2015. *Análise dos parâmetros físico-químicos e metais presentes nas nascentes do Rio Meia Ponte*. MS Dissertation, Programa de mestrado em Ecologia e Produção Sustentável, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 72 p.
- Belfort D. S. 2023. *Mapa de delimitação das áreas de aglomerados subnormais (favelas) nos bairros de Belém – Pará. Escala 1:40000*. Disponível em: <https://twitter.com/daianhie/status/1723064568048484730/photo/>.
- Cabral N. M. T. 2004. *Impacto da urbanização na qualidade das águas subterrâneas nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal-Belém/PA*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, centro de geociências, Belém. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. 278 f. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8275>
- Carvalho A. C. L., Vinagre M. V. A., Mendes R. L. R., Lopes D. F., Lopes M. D. S. B., Pereira M. S. da. 2020. *Estudo da vulnerabilidade da água subterrânea no distrito industrial de Icoaraci (Belém-PA), (Estudo de caso)*. Brazilian Journal of Development, **6**(2), 5649-5661.
- Conejo J. G. L., Costa, M. P. da, Teixeira A. 2005. *Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil*. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. 179p.
- Companhia de desenvolvimento econômico do estado do Pará - CODEC. 2022. *Relatório Integrado da Administração*. Disponível em: <https://www.codec.pa.gov.br/relatorios/>. Acesso em: 10 out. 2023.
- de Figueiredo, A. B., Dias, É. R. F., de Almeida, F. M., & da Silva Matta, M. A. (2004). *Estudos hidrogeológicos da bacia hidrográfica do Tucunduba, região metropolitana de Belém/PA. Águas Subterrâneas*. 13º Congresso Brasileiro de águas subterrâneas, Cuiabá. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23472>. Acesso em: 16 mai. 2023.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de solos. 2006. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2º ed. Rio de Janeiro, RJ. 306 p.
- Feitosa A. C., Manoel Filho J. M., Feitosa E. C., Demetrio J. G. 2008. *Hidrogeologia conceitos e aplicações*. 3ª ed. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Fetter C. W. 2001. *Applied hydrogeology*. 4ª ed. USA, Prentice-Hall, Inc., 598 p.

Foster S. S. D., Hirata R. C. A., Gomes D. C., D'Ellia M., Paris M. 2006. *Proteção da qualidade de água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais*. São Paulo, Banco Mundial/SERVMAR.

Foster S., Smedley P., Candela L. 2002. Groundwater quality in the humid tropics: an overview. *In: Hydrology and water management in the humid tropics, Programme and meeting document*. Panama, Republic of Panama, p.443. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000126658> Acesso em 12 nov de 2023.

Foster S., Hirata R., Gomes D., D'Ellia M., Paris M. 2002. *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. Washington, Groundwater management advisory Gw. Mate Wb. 114p.

Franz H. S. 2022. *Diagnóstico e monitoramento de águas subterrâneas urbanas para gestão de recursos hídrico do município de Canguçu, Rio Grande do Sul, Brasil*. Universidade Federal de Pelotas. Dissertação (Mestrado), Curso de Pós-Graduação em Recursos hídricos, centro de desenvolvimento tecnológico - Universidade Federal de Pelotas. 278 p. Disponível em: <https://guaiaca.ufpel.edu.br/bitstream/handle/prefix/8373>

Freddo Filho Valmor José Ferredo. 2018. *Qualidade das águas subterrâneas rasas do aquífero Barreiras: Estudo de caso em Benevides – Pa*. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PPRH), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 113p.

Freire L. V., Santos Júnior O. F. dos, Ingunza M. D. P. D., Chaves L. F. M., Freitas Neto O. de. 2022. *Caracterização química, mineralógica e geotécnica de sedimentos da formação barreiras e pós-barreiras-litoral sul do Rio Grande do Norte, Brasil*. Revista de Geociências do Nordeste, **8**(2):, 76-90.

Fiori J. P. O. 2010. *Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados*. MS Dissertation, Curso de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, DF. 107 p.

Gonçalves A. D. M. D. A. & Libardi P. L. 2013. *Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, **37**: 1174-1184.

Gómez Rave J. 2009. *Geología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: acuífero costero municipio de turbo*.

Hanna Leila Maria Miranda. 2017. *Qualidade das águas subterrâneas rasas na Ilha de Cotijuba – Belém / PA*. Orientador: Paulo Pontes Araújo. MS Dissertation, Recursos Hídricos, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 129p. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/10748>. Acesso em: 10 out. 2023

Hengl T. 2007. *A practical guide to geostatistical mapping of Enviromental variables*. Eur 22904 EN. Luxembourg. Office for Official Publications of the European Communities; JRC38153 Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC38153>. Acesso em: 20 jun. 2023.

Hirata. R.C.A.; Fernandes, A.J. 2008. *Vulnerabilidade a poluição de aquíferos*. In: Feitosa F.A.C., Manoel Filho J. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3º ed. Rio de Janeiro, CPRM, LABHID, 812p.

Hidrosam Estudo Hidogeológico. 2021. *Caracterização hidrogeológicas nas áreas adjacentes a COMPAR – Companhia Paraense de Refrigerantes*, Relatórios internos. Belém-Pa.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2010. *Censo*. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em ago, 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2007. *Manual técnico de pedologia*. 2.ed. Rio de Janeiro, IBGE. Manuais Técnicos em Geociências, 4. 320p.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). 2013. *Estações automáticas*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>. Acesso em: 21 de outubro de 2023.

Kämp N., Giasso, E., Ida Junior A. V., Nascimento P. C. do, Mastrascusa A. L., Ferraro W., Binotto R. B., Druck J. R. 2008. *Metodologia para classificação de solos quanto à resistência a impactos ambientais decorrentes da disposição final de resíduos*. FEPAM em Revista, **2** (1): 11-17.

Lemos D. O. 2013. *Análise de fácies da Formação Barreiras, nas regiões de Apeú-Castanhal e Outeiro-Belém (PA)*. Trabalho de Conclusão de Curso, Meteorologia, Instituto de Geociências, Belém, Pa, 86p.

Lima W.P. 2008. *Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas*. 2 ed. Piracicaba-SP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 253p.

Luz L. M.da, Araújo M. L.de, Rodrigues J. E. C. 2012. *Estudo das áreas verdes e índices de cobertura vegetal do distrito administrativo de Icoaraci-DAICO, Belém-PA*. Revista Geonorte, **3**(5): 1454-1463

Matta M. A. S. 2002. *Fundamentos hidrogeológicos para gestão integrada de recurso hídrico da região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil*. PhD Thesis, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 292p.

Maraschin A. J. & Ramos A. S. 2015. *Breve abordagem históricas o potencial energético dos folhelhos da Formação Irati (Bacia do Paraná) no estado do Rio Grande do Sul*. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, **25**:174–183.

Ministério do Meio Ambiente - MMA; Secretaria dos Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. 2007. *Águas subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido*. Brasília, DF.

Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. 1997. *Lei n. 9.433: Política Nacional de Recursos Hídricos*. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 72p.

Melo Junior H. R. D. 2002. *Mapeamento da vulnerabilidade e análise de risco de contaminação como instrumentos de proteção das águas subterrâneas em áreas industriais: caso ALBRAS, Barcarena-PA*.

Moura P. 2014. *Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na porção norte do complexo industrial e portuário do Pecém, Estado do Ceará*. Dissertação (mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza.

Oliveira M. M. & Ferreira J. P. C.L. 2002. *Cartografia da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas do Concelho de Montemor-o-Novo utilizando o método DRASTIC*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

- Oliveira, Yasmin di P. T. 2021. *Efeitos do manejo do solo em bacias hidrográficas: uma revisão de casos na amazônia oriental*. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia de Pesca - Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém. 47p.
- Oliveira J. R. D. 2002. *Projeto estudos hidrogeológicos da região metropolitana de Belém e adjacências*. [S.l.], CPRM. Belém, Pará.
- Organização da Nações Unidas (ONU). *Transformando nosso mundo: agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 13 out. 2023.
- Oliveira M. & Lobo-Ferreira J. 2004. *Cartografia da vulnerabilidade à poluição das águas do Conselho de Montemor-o-Novo utilizando o método Drastic*. In: Cabral, J. J. S. et al. *Água subterrânea: aquíferos costeiros, aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento*. *Revista Geonorte*, **3**(5): 1454-1463. Recife. UFPE.
- Otobo A. O. 2015. *Distrito industrial de Icoaraci e desenvolvimento regional: prática de responsabilidade socioambiental de empresas e a percepção dos moradores sobre a condição socioambiental local*. MS Dissertation, Universidade de Tras-os-Montes e Alto Douro (Portugal). Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/ba76b29789752e559a74a562595d8604/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em 25, out 2023.
- Paixão, M. S. G. 2005. *Análise da acurácia das estimativas de posicionamento do nível freático e dos teores de humidade do solo com emprego de métodos de sísmica de refração rasa e georadar a partir de um estudo no campus da USP, São Paulo*. MS Dissertation, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 110p. doi:10.11606/D.14.2005
- Pinheiro R. J., Rauber A. C. C., Nummer A. V., Silva J. D. 2015. *Aplicação dos Métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria-RS*. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, **12**(2): 61-79.
- Ramage L. 2005. *Hidrogeoquímica do sistema aquífero granular cenozóico do município de Porto Alegre, RS*. MS Dissertation, Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, viii, 111p.
- Rossetti, D. 2006. *Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão*. *Geologia USP. Série Científica*, **6**(2), 7-18.
- Rossetti I. D.F., Truckenbrodt W., Góes A.M. 1989. *Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região bragantina, nordeste do Pará*. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi (Série Ciências da Terra)*, **1**, p. 25-74.
- Santos, H.G. dos; Carvalho, W. de; Dart, R. de O.; Aglio, M.L.D.; Sousa, J.S. de; Pares, J.G.; Fontana, A.; Martins, A.L. da S.; Oliveira, A.P. de. *O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67p.
- Santos J. Tatiane S. dos, Nunes Hildo G. G.Caldas, Pontes A. K. dos Santos, Sousa A. M. Leão de. 2018. *O Modelo SWAT como Ferramenta para a Gestão de Recursos Hídricos: um exemplo aplicado no rio Apeú, Castanhal/PA*. *Rega*, Porto Alegre, **15**. Disponível em: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1062>. Acesso em: 22 de setembro de 2023.

Santos P. R. P. dos & Oliveira I. B. 2013. *Estudo da vulnerabilidade á poluição do aquífero Marizal na região de influência do polo industrial de Camaçari (PIC)-BAHIA. Águas Subterrâneas*, **27**(1). Doi: <https://doi.org/10.14295/ras.v27i1.24829>.

Santos R. A. 2011. *Hidrogeoquímica das águas subterrâneas do município de Iraquara, Bahia*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 118p.

Sauma Filho M. 1996. *As águas subterrâneas de Belém e adjacências: Influência da Formação Pirabas e parâmetros físico-químicos para medidas de qualidade*. MS Dissertation, Programa de pós-graduação em geologia e geoquímica, Universidade Federal do Pará, xi, 128p.

Siagas. *Sistema de Informações de água subterrâneas*. Pesquisa geral. Disponível em: [http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa\\_omplexa.php](http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_omplexa.php). Acesso em: 05 abr. 2021.

Soares Á. K. M. 2018. *Mapeamento geotécnico aplicado à seleção de áreas preferenciais para instalação de aterros sanitários e cemitérios na região metropolitana de Belém (PA)*. Trabalho de Graduação em Geologia, Universidade Federal do Pará.

Schwambach R. 2022. *Análise da vulnerabilidade e do risco potencial de contaminação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Flores da Cunha*. Trabalho de Graduação em Engenharia Hídrica, Universidade federal do Rio Grande do Sul.

Silva J. M., Melo J. G. de, Diniz Filho J. B. 2020. *Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Barreiras na Bacia no Rio Pirangi/RN utilizando os Métodos GOD, DRASTIC e IS*. *Águas Subterrâneas*, **34**(1). Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29786>.

Thorntwaite C.W. & Mather J.R. 1955. *The water balance*. Centerton, NJ., Laboratory of Climatology Publ. 8.

Tucci C. E. M. & Mendes C. A. *Curso de avaliação ambiental integrada de bacia*. Porto Alegre, Ministério do Meio Ambiente Secretaria de Qualidade Ambiental; Rhama Consultoria Ambiental, 2006. 319 p.

Vasquez M. L. & Rosa-Costa L. T. D. 2008. *Geologia e recursos minerais do estado do Pará*. Belém, CPRM.

Valente M. A., Silva L. G. T., Oliveira R. D., Pimentel, G. M., Nascimento D. D. 2011. *Mapeamento de solos das áreas de duas mesobacias hidrográficas no Nordeste Paraense*. In XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Uberlândia, MG.

Von Sperling M. 1996. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2ª ed. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 243 p

## APÊNDICE A



Figura A) Instalações finais da coluna construtiva do poço “Hidro A” em 2021, localizada na empresa EBATA localizada no distrito industrial de Icoaraci. B) Instalação de tubulação edutora final e bomba operacional. C) Condições finais de poço em operação.



Figura A) Canteiro principal de atividade de perfuração realizada no conjunto Viver Maracacuera. Onde é delimitado como poço “HIDRO 2”. B) Perfuratriz em funcionamento e detalhe de operação construtiva do poço. C) Perfil construtivo final, poço de 142 metros de profundidade.

## APÊNDICE B

Tabela de dados relacionados a avaliação de parâmetro GOD.

PARÂMETROS GOD							
POÇO	LESTE	NORTE	PROFUNDIDADE NE	(G) ÍNDICE PROFUNDIDADE	(O) GRAU DE CONFINAMENTO LITOTIPO	(D) DISTANCIA ATÉ O LENÇOL FREATICO	ÍNDICE DE VULNERABILIDADE
1500000922	782368	9855530	5,20	1	0,5	0,9	0,45
1500000978	783056	9856055	6	1	0,4	0,9	0,36
1500001015	783400	9855985	3,20	1	0,5	0,8	0,4
1500001019	782401	9857098	7	1	0,4	0,9	0,36
1500001023	782307	9856166	5	1	0,7	0,8	0,56
1500001026	783197	9857638	17	1	0,7	0,8	0,56
1500001031	782606	9855765	5	1	0,8	0,9	0,72
1500001032	782595	9855777	4	1	0,7	0,9	0,63
1500001036	783233	9858095	5,90	1	0,7	0,9	0,63
1500001037	783385	9857487	5,90	1	0,4	0,9	0,36
1500001038	783431	9857481	5,30	1	0,4	0,9	0,36
1500001039	783419	9857357	5,90	1	0,7	0,9	0,63
1500001040	783356	9857499	6,20	1	0,7	0,9	0,63
1500001041	783304	9857721	6	1	0,4	0,9	0,36
1500001112	782368	9855780	10	1	0,4	0,9	0,36
1500001120	782406	9855683	6,70	1	0,7	0,9	0,63
1500002033	783062	9855983	2,40	1	0,6	0,9	0,54
1500002110	785060	9858515	1,80	1	0,4	0,9	0,36
1500003078	782744	9855584	8	1	0,6	0,9	0,54
1500004028	782413	9855799	8	1	0,4	0,9	0,36
1500004753	782258	9855554	4,67	1	0,4	0,9	0,36
1500005664	782506	9857029	23,05	1	0,4	0,9	0,36
1500005665	782475	9857121	5,00	1	0,4	0,8	0,32
1500005703	783312	9858196	16,45	1	0,6	0,8	0,48
1500005714	783929	9856197	17,50	1	0,4	0,8	0,32
1500005715	783960	9856167	3,13	1	0,4	0,8	0,32
1500005716	783960	9856197	3,07	1	0,4	0,8	0,32
1500005717	783929	9856320	17,12	1	0,6	0,8	0,48
1500005719	782972	9858288	2,84	1	0,6	0,9	0,54
1500005765	784519	9858164	7,86	1	0,6	0,8	0,48
1500006237	783651	9857335	5,20	1	0,4	0,8	0,32
1500006431	783219	9858288	7,60	0,4	0,6	0,8	0,192
1500006461	785508	9857210	3,54	0,4	0,4	0,8	0,128
1500006465	782752	9855000	7,25	1	0,6	0,8	0,48
1500006466	782845	9854938	7,80	1	0,4	0,8	0,32
1500006476	783031	9855983	2,44	1	0,7	0,8	0,56

1500006477	783093	9856014	3,54	1	0,6	0,9	0,54
1500006538	783466	9857489	5	1	0,6	0,8	0,48
1500006539	783404	9857058	18,20	1	0,4	0,8	0,32
1500006540	783434	9856997	5,70	0,6	0,4	0,8	0,192
1500006541	783434	9856935	4,82	0,6	0,4	0,8	0,192
1500006659	782505	9855431	3	0,4	0,4	0,8	0,128
1500006777	785476	9857118	6,50	1	0,4	0,8	0,32
1500006793	783931	9858195	6,50	1	0,6	0,8	0,48
1500006925	782475	9856537	7,50	0,2	0,4	0,8	0,064
1500007059	782814	9854877	6,40	0,2	0,4	0,9	0,072
1500007085	785600	9857302	4,40	0,4	0,5	0,9	0,18
1500007173	783651	9857720	3,40	1	0,5	0,8	0,4
1500007256	783682	9856321	4,41	0,2	0,4	0,8	0,064
1500007319	783651	9857089	3,44	1	0,6	0,8	0,48
1500007417	782504	9855031	6,40	0,2	0,6	0,8	0,096
1500007636	783312	9858257	16,53	0,6	0,4	0,8	0,192
1500007798	783434	9857028	4	0,2	0,4	0,8	0,064
1500007799	783465	9857028	7	1	0,6	0,7	0,42
1500007951	783465	9856813	6	1	0,6	0,9	0,54
1500007952	783404	9856843	14	1	0,6	0,8	0,48
1500007957	783992	9858134	3,40	0,2	0,4	0,8	0,064
1500008233	785970	9855888	5,05	0,2	0,4	0,8	0,064
1500008460	784673	9858794	3,73	0,2	0,4	0,8	0,064
HIDRO A	783479	9857324	12,60	0,2	0,4	0,8	0,064
HIDRO B	785405	9856420	12,50	0,6	0,6	0,8	0,288