

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

JOHN MICHAEL MALVEIRA GORAYSKI

**AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO MUNICÍPIO DE CLARO DOS POÇÕES - MG**

CAÇAPAVA DO SUL - RS

2021

JOHN MICHAEL MALVEIRA GORAYSKI

**AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO MUNICÍPIO DE CLARO DOS POÇÕES - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia

Orientador: Marco Antônio Fontoura
Hansen

Co-orientador: Maciel Jorge de Souza

CAÇAPAVA DO SUL - RS

2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

G621a Gorayski, John Michael Malveira
AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DO MUNICÍPIO DE CLARO DOS POÇÕES - MG / John
Michael Malveira Gorayski.
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2021.
"Orientação: Marco Antonio Fontoura Hansen".

1. Vulnerabilidades das águas subterrâneas . I. Título.

JOHN MICHAEL MALVEIRA GORAYSKI

**AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO MUNICÍPIO DE CLARO DOS POÇÕES - MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de setembro de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marco Antônio Fontoura Hansen
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. José Pedro Rebés Lima
(UNIPAMPA)

Geofísico Msc. Lenon Ilha.



Assinado eletronicamente por **LENON MELO ILHA, Técnico de Laboratório Área**, em 07/10/2021, às 18:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **MARCO ANTONIO FONTOURA HANSEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/10/2021, às 14:27, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as



normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JOSE PEDRO REBES LIMA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/10/2021, às 14:42, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0634227** e o código CRC **350F001C**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Dedico este trabalho a minha família, em especial à minha mãe Maria do Perpetuo Socorro Malveira que sempre está comigo, em todos os momentos da minha vida, seja de conquistas ou batalhas.

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo. Devemos promover a coragem onde há medo, promover o acordo onde existe conflito e inspirar esperança onde há desespero”.

Nelson Mandela

RESUMO

Nos últimos anos o uso dos recursos hídricos tornou-se tema de muitos debates. O rápido desenvolvimento dos setores urbanos, agropecuários, industriais e mineração geraram um desequilíbrio entre a oferta e demanda de água em todo o mundo. Por esse motivo vários estudos tem levantado a necessidade de projetos, alternativas e práticas de reuso e reaproveitamento dos ecossistemas naturais. De toda a água potável disponível no planeta, uma grande maioria encontra-se na camada subterrânea, alojadas nos aquíferos. Essas águas subterrâneas são um recurso natural muitas vezes negligenciado e que precisa de um olhar cuidadoso, uma vez que pode estar suscetível à vulnerabilidade e contaminação por diversos fatores. Assim, este estudo tem por objetivo avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação no município de Claro dos Poções – MG. Para tal, foi aplicada a metodologia GOD (G = Grau de confinamento, O = Ocorrência de estratos geológicos e D = Distância do nível da água). Após a coleta e tratamento dos dados referentes às águas subterrâneas da região, os mesmos foram interpolados utilizando -se o software QGIS (3.16.5) para a geração de mapa de vulnerabilidade que refletiam a situação da área estudada. Com base nos resultados da análise, foi indicado quatro classes de vulnerabilidade, sendo elas: baixa, média, alta e extrema. Os resultados da análise podem ser usados para recomendações para a gestão das águas dos aquíferos na área de estudo.

Palavras-Chave: Método GOD, Vulnerabilidade da água subterrânea, Aquíferos, Geologia.

ABSTRACT

In the last years, the use of water resources has become the subject of many debates. The rapid development of urban, agricultural, industrial and mining sectors has created an imbalance between the supply and demand of water around the world. For this reason, several studies have raised the need for projects, alternatives and practices for the reuse of natural ecosystems. From all potable water available on the planet, the majority is found in the underground layer, housed in aquifers. These groundwaters are a natural resource that is often neglected and needs a careful look, as it may be susceptible to vulnerability and contamination by several factors. Thus, this study aims to assess the vulnerability of groundwater to contamination in the municipality of Claro dos Poções - MG. To this end, the GOD methodology was applied (G = Groundwater occurrence or aquifer type, O = Overall lithology of aquifer and, D = Depth of groundwater). After the collection and treatment of data referring to groundwater in the region, they were interpolated using the QGis software (3.16.5) to generate a vulnerability map that reflected the situation of the studied area. Based on the results of the analysis, four classes of vulnerability were indicated, namely: low, medium, high and extreme. The analysis results can be used for recommendations for the management of aquifer waters in the study area.

Keywords: GOD method, Groundwater vulnerability, Aquifers, Geology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do ciclo hidrológico	18
Figura 2 - Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo.....	19
Figura 3 - Tipos de aquíferos quanto à porosidade.....	22
Figura 4 - Exemplo de Aquífero Cárstico	23
Figura 5 - Tipos de Aquíferos quanto aos critérios de pressão da água	24
Figura 6 - Causas para a contaminação das águas subterrâneas	26
Figura 7 - O método de vulnerabilidade GOD	30
Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo.....	32
Figura 9 - Esboço do mapa geológico da Bacia e do Cráton do São Francisco.....	33
Figura 10 - Seções sísmicas compostas ao longo do sul da Bacia de São Francisco	35
Figura 11 - Mapa geológico do município de Claro dos Poções	37
Figura 12 - Coluna estratigráfica das rochas aflorantes no município de Claro dos Poções	39
Figura 13 - Mapa de Sistemas Aquíferos do município de Claro dos Poções.....	43
Figura 14 - Banco de dados contendo informações acerca dos poços do município de Claro dos Poções	47
Figura 15 - Modelo de relatório disponibilizado pela plataforma SIAGAS	47
Figura 16 - Ilustração da interpolação de um ponto estimado com base em sua distância dos valores de pontos conhecidos	48
Figura 17 - Uso da água subterrânea e situação dos poços do município de Claro dos Poções	50
Figura 18 - Localização dos poços tubulares e seus respectivos usos para o abastecimento	51
Figura 19 - Resumo estatístico nível estático. a) Histograma da profundidade pela frequência relativa; e b) Gráfico da profundidade pela frequência acumulada.....	52
Figura 20 - Mapa de profundidade e predominância de aquíferos.....	52
Figura 21 - Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas do município de Claro dos Poções após aplicação do método GOD.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da vulnerabilidade de acordo com o método GOD	31
Tabela 2 - Litoestratigrafia da Bacia de São Francisco	34
Tabela 3 - Divisão e características litoestratigráficas do Grupo Bambuí	37
Tabela 4 - Índices de Vulnerabilidade de aquíferos do município de Claro dos Poções	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	- Agência Nacional de Águas
ALOS	- <i>Advanced Land Observing Satellite</i>
ASF	- <i>Alaska Satellite <u>Facility</u></i>
ABAS	- Associação Brasileira de Águas Subterrâneas
CPRM	- Serviço Geológico do Brasil
DSG	- Diretoria de Serviço Geográfico
EPA	- <i>Environmental Protection Agency</i>
GOD	- G: <i>groundwater hydraulic confinement</i> ; O: <i>overlying</i> ; D: <i>depth to groundwater table</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IQD	- Inverso do Quadrado da Distância
MDE	- Modelo Digital de Elevação
UNESCO	- Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura
OMS	- Organização Mundial da Saúde
ONGs	- Organizações não Governamentais
PALSAR	- <i>Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar</i>
SIAGAS	- Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	- Sistemas de Informações Geográficas
UNIPAMPA	- Universidade Federal do Pampa
WWDR	- <i>World Water Development Report</i>

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 JUSTIFICATIVA	17
4 REVISÃO DE LITERATURA	18
4.1 Águas subterrâneas: Um recurso que precisa ser reconhecido	18
4.1.1 Distribuição vertical da água no subsolo	19
4.2 Aquíferos	20
4.2.1 Tipos de aquífero	21
4.2.1.1 Aquífero poroso, sedimentar ou granular	22
4.2.1.2 Aquífero fraturado ou fissural	22
4.2.1.4 Aquífero livre ou freático	24
4.2.1.5 Aquífero confinado ou artesiano	25
4.3 Fontes de contaminação	25
4.4 Vulnerabilidade de águas subterrâneas	28
4.5 Método GOD para avaliação da vulnerabilidade à contaminação de um aquífero	29
5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	32
5.1 Delimitação e acesso	32
5.2 Geologia.....	33
5.2.1 Geologia regional.....	33
5.2.1.1 O grupo Bambuí.....	35
5.3 Geologia local.....	37
5.3.1 Estratigrafia	39
5.3.2 Grupo Bambuí	40
5.3.2.1 Formação Jequitai	40
5.3.2.2 Formação Serra de Santa Helena	40
5.3.2.3 Formação Lagoa do Jacaré.....	40
5.3.2.4 Formação Serra da Saudade:.....	40
5.3.2.5 Grupo Urucuia:.....	41
5.3.2.6 Depósitos colúvio – eluviais:.....	41
5.3.2.7 Depósitos dentrítico-lateríticos	41

5.3.2.8 Depósitos aluvionares.....	41
5.4 Geologia estrutural e metamorfismo.....	42
5.5 Características hidrogeológicas da área de estudo	42
6 MATERIAIS E MÉTODOS	46
6.1 Consulta bibliográfica	46
6.2 Aquisição de material cartográfico e hidrogeológico.....	46
6.3 Banco de dados	46
6.3.1 Aquisição e tratamento do banco de dados.....	46
6.4 Metodologia GOD para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas	49
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
7.1 Uso da água subterrânea e Situação dos poços do município de Claro dos Poções.....	50
7.2 Características do nível estático do município de Claro dos Poções.....	51
7.3 Vulnerabilidade do aquífero do município de Claro dos Poções	53
8 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS.....	60

1.INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação com o uso sustentável dos recursos hídricos vem se tornando cada vez maior. A rápida expansão de atividades mineradoras, agrícolas, industriais e aquelas relacionadas à ocupação urbana e rural é um fator crucial para a incompatibilidade entre oferta e demanda desses recursos (TERRA *et al.*, 2016).

Segundo a ANA (2018), dos 2,5% de toda a água potável disponível no mundo, a maior parte (cerca de 69%) é de difícil acesso, pois está concentrada nas geleiras, os outros 30% são águas subterrâneas (armazenadas em aquíferos) e apenas 1% estão nos rios e lagos (águas superficiais), ou seja, disponíveis para o uso .

Alcoforado (2015) afirma que, mais de 90% dessa água disponível para uso é destinada para atividades agrícolas e industriais e apenas 8% é destinada ao uso doméstico. Anualmente 3,5 milhões de pessoas morrem ao redor do mundo por problemas relacionados ao fornecimento inadequado de água, falta de saneamento básico e falta de políticas públicas relacionadas à higiene (LETRA, 2015).

O Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021 (WWDR, 2021) destaca que 10% das doenças registradas poderiam ser evitadas se os governos investissem mais em acesso à água, medidas de higiene e saneamento básico.

“Os dados que o relatório apresenta são alarmantes. O mundo deve enfrentar um déficit hídrico de 40% até 2030, caso medidas concretas não sejam tomadas. A solução deve ser guiada por ações conjuntas e integradas entre governos, iniciativa privada, sociedade e ONGs, sobretudo com caráter preventivo e corretivo. O caminho são investimentos em pesquisas e coleta de dados para garantir a eficácia da utilização responsável e o reuso da água; em alternativas para o armazenamento e o fornecimento; no combate ao desperdício; e na preservação dos ecossistemas naturais” (PERDIGÃO, 2021, p. Artigo Eletrônico).

Tendo em vista a grande necessidade por alternativas de aproveitamento e preservação dos ecossistemas, a água subterrânea é um recurso de extrema valia tanto para os meios urbano quanto rural. Sua origem se dá a partir do excesso de chuva que se infiltra nas superfícies terrestres e se aloca em aquíferos no subsolo (TERRA *et al.*, 2016).

Quando comparado às águas superficiais, as águas subterrâneas são naturalmente filtradas e purificadas pelo solo, possuem uma qualidade superior, uma vez que não ocupam grandes espaços na superfície, favorecendo assim, a sua captação já no local de uso (FREDDO FILHO, 2018). Segundo Medeiros *et al.* (2011), devido a sua localização, estas águas estão menos sujeitas à poluição, bem como operações necessárias para atingir a potabilidade, menos suscetíveis à seca e outras variações relacionadas ao clima.

No Brasil, 14% dos municípios são abastecidos por um regime misto (águas subterrâneas e superficiais), enquanto 39% utilizam exclusivamente águas subterrâneas como suprimento hídrico (HIRATA *et al.*, 2019). Entretanto, as águas subterrâneas são suscetíveis a diversas fontes de contaminação, relacionadas à difícil localização e visualização direta do contaminante, o que acaba impedindo intervenções e monitoramentos diretos e ágeis (MEDEIROS *et al.*, 2011).

Tendo em vista a relevância do uso deste recurso para abastecimento humano, surge o estudo de vulnerabilidade de águas subterrâneas. A ideia principal deste estudo é avaliar, com base em componentes socioeconômicos, hidrológicos, fontes potenciais de poluição da água, características biofísicas e meio ambiente, os níveis de suscetibilidade da área em estudo à contaminação para que as devidas medidas preventivas ou curativas possam ser adotadas (CUTRIM; CAMPOS, 2010; MELO; ROMANEL, 2017) .

Desse modo, o presente estudo avaliou a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação no município de Claro dos Poções – MG, com vistas a fornecer subsídios para órgãos públicos, quanto ao licenciamento ambiental de atividades com potencial poluidor e preservação das fontes naturais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Avaliar a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos presentes no município de Claro dos Poções-MG utilizando a metodologia GOD.

2.2 Objetivos específicos

- Coletar e armazenar dados referentes às fontes de águas subterrâneas localizados no município de Claro dos Poções;
- À partir dos dados coletados, identificar as condições de ocorrência das águas subterrâneas no substrato litológico, da profundidade do nível freático e do nível estático;
- Elaborar mapas de índice de vulnerabilidade das águas subterrâneas, para visualização e identificação de áreas com índice de vulnerabilidade elevado, áreas em condições naturais e áreas com potencial de contaminação constatada; e
- Oferecer subsídios para auxiliar a tomada de decisão dos órgãos públicos, quanto ao licenciamento ambiental de atividades com potencial poluidor.

3 JUSTIFICATIVA

A intensificação da agricultura, urbanização e indústria são considerados entre os problemas que afetam a disponibilidade e qualidade da água em todo o mundo (DOS SANTOS, 2017).

Em uma escala global a água subterrânea é um recurso vital para atender às necessidades de abastecimento populacional, a irrigação de safras, a pecuária e uso industrial. Entretanto é importante salientar que devido a sua localização, essas águas também estão vulneráveis à contaminação e por isso é essencial a preservação e o monitoramento.

Práticas de gerenciamento, através de métodos que auxiliem na avaliação e detecção de áreas com potencial de contaminação, podem e muito contribuir na adoção de medidas de preservação e na tomada de decisão nos processos de licenciamento.

O estudo da vulnerabilidade do aquífero Bambuí é fundamental para o município de Claro dos Poções, uma vez que por ser uma cidade de pequeno porte, a maioria dos empreendimentos urbanos e rurais geralmente foram implantados sem a devida observância das normas ambientais.

Dessa forma, o presente estudo se justifica pela relevância e possibilidades de preservação ao meio ambiente e aos recursos naturais a fim de desenvolver indicadores de vulnerabilidade de aquíferos, gerir e preservar a qualidade das águas subterrâneas da região.

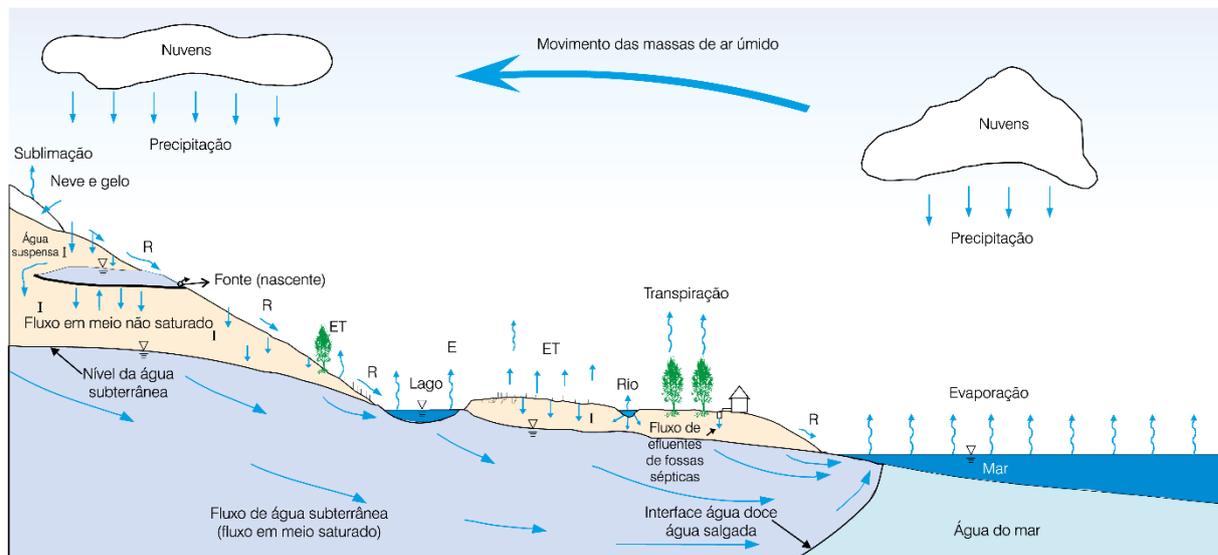
4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Águas subterrâneas: Um recurso que precisa ser reconhecido

São qualificadas como águas subterrâneas aquelas que se encontram sob a superfície da Terra preenchendo espaços disponíveis seja nas rochas sedimentares, nas fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas do solo e se combinam para formar uma camada de solo chamada de aquífero (ABAS, 2021; MAIA, 2011).

Dentro do ciclo hidrológico, dois processos são de extrema importância para o melhor entendimento das águas subterrâneas (figura 1). O primeiro deles, chamado precipitação, se resume ao movimento do vapor d'água gerado na atmosfera sendo depositado na superfície terrestre na forma de chuva, granizo, neblina, orvalho ou geadas (ABAS, 2021).

Figura 1 - Representação esquemática do ciclo hidrológico



*** E = evaporação; ET = evapotranspiração; I = infiltração; R = escoamento superficial (deflúvio)

Fonte: Adaptado de (FEITOSA *et al.* 2008)

O segundo processo que falaremos será abordado aqui é o de que a Infiltração, compreende os movimentos dessa água dentro do solo. Assim que ela penetra na superfície terrestre, seu valor é elevado, diminuindo conforme o tempo e a saturação do solo, até que se torne constante (SOBRINHO *et al.*, 2003).

Segundo CIRINO e GUERRA (1994), ao levar em consideração os processos de infiltração, precisamos lembrar que as características do solo são uma determinante para o volume de escoamento, sua distribuição e percentil de descargas.

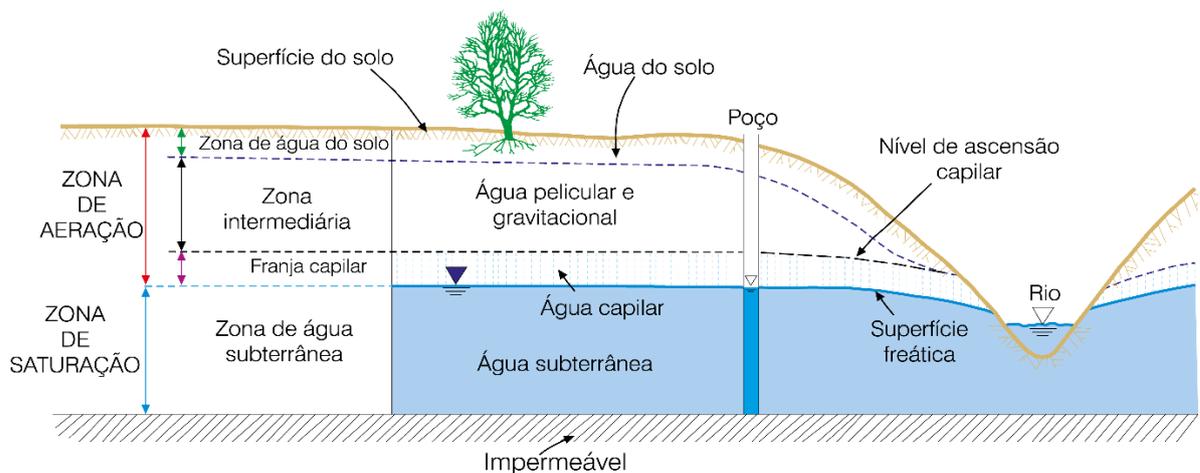
São características e fatores importantes ao processo de infiltração:

- A) **Porosidade:** A presença de argila no solo não permite grandes volumes de infiltração, uma vez que a sua presença diminui a permeabilidade da superfície;
- B) **Cobertura orgânica ou vegetal:** A presença de vegetação no solo aumenta a sua permeabilidade, quando comparado a um solo desmatado; e
- C) **Disposição do terreno:** Áreas com declives acentuados, permitem, pela ação da gravidade, o rápido fluxo de água, diminuindo assim as possibilidades de infiltração.

4.1.1 Distribuição vertical da água no subsolo

À medida que o processo de infiltração ocorre, a água existente no solo e formações geológicas é distribuída verticalmente em duas regiões consideradas não saturadas (ou aeradas) e saturadas (figura 2) (FEITOSA FILHO, 2000).

Figura 2 - Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo



Fonte: Adaptado de (FEITOSA *et al.*, 2008) .

As zonas não saturadas, também chamadas de zona de aeração, concentram a água que acaba ficando retida nas regiões mais superficiais do solo, acima do nível freático. Nessas regiões, os vazios ou poros do solo estão parcialmente preenchidos por vapor d'água e ar (FEITOSA *et al.*, 2008).

Segundo FEITOSA FILHO (2000), a zona não saturada pode ser dividida em três partes:

A) Zona Capilar: Localiza-se na extensão da superfície até o limite de ascensão capilar da água. Sua densidade varia de acordo com a dimensão e distribuição dos poros, além da homogeneidade do terreno. Normalmente, nas regiões adjacentes ao lençol freático, os poros encontram-se praticamente saturados.

Enquanto isso na parte superior do lençol, somente os poros menores estão cheios de água, de modo que o limite superior desta zona tem forma irregular. Como conceito de franja capilar, adota-se um limite abaixo do qual o solo é considerado praticamente saturado (>75%).

B) Zona Intermediária: Esta zona é localizada entre o limite de ascensão capilar da água e as raízes das plantas. A umidade encontrada nesta zona é consequente do isolamento das águas capilares

C) Zona de Água do Solo e Evapotranspiração: Localizada entre os limites radiculares da vegetação e a superfície do terreno. A presença de cobertura vegetal pode alterar a espessura desta zona. As plantas localizadas nesta área, utilizam as águas capilares (isoladas ou suspensas) armazenadas ali, para executar funções essenciais como transpiração e nutrição.

Enquanto isso, a Zona Saturada (ou zona de saturação), é aquela que fica situada abaixo do nível freático, onde os poros e vazios existentes no terreno estão preenchidos com água (saturados) (FEITOSA *et al.*, 2008; HIRATA *et al.*, 2019).

Nesta zona, o excedente de água da região não saturada, que se move em velocidades lentas, forma um manancial. Em seguida, uma parcela dessa água irá desaguar na superfície, formando assim as fontes e olhos d'água. Enquanto isso, a outra parcela desse fluxo desagua em rios, lagos e oceanos (ABAS, 2021) .

4.2 Aquíferos

Define-se por aquífero o grupo de formações geológicas do subsolo, constituído por rochas permeáveis, que contêm material saturado o suficiente e permite que quantidades significativas deste material se movimentam em seu interior em condições naturais. Abastecendo assim: poços, fontes e mananciais (BLONDES *et al.*, 2016) .

Além de manter o curso das águas superficiais estável, os aquíferos também ajudam a evitar o extravasamento de águas, absorvendo o excesso proveniente de chuva intensa (ABAS, 2021) .

Dentre as principais funções dos aquíferos, o MMA (2007) elenca:

- A) Abastecimento de lagos e rios em período de estiagem, a partir do estoque de água da chuva;
- B) Atuação como filtro natural para a água que vem por meio de infiltração, oferecendo alta qualidade de água com baixo custo de manutenção e tratamento;
- C) Atuação como fonte de energia termal ou elétrica, minimizando o uso de combustíveis fósseis; e
- D) Favorecer a manutenção dos ecossistemas e biodiversidade do local em que está inserido.

4.2.1 Tipos de aquífero

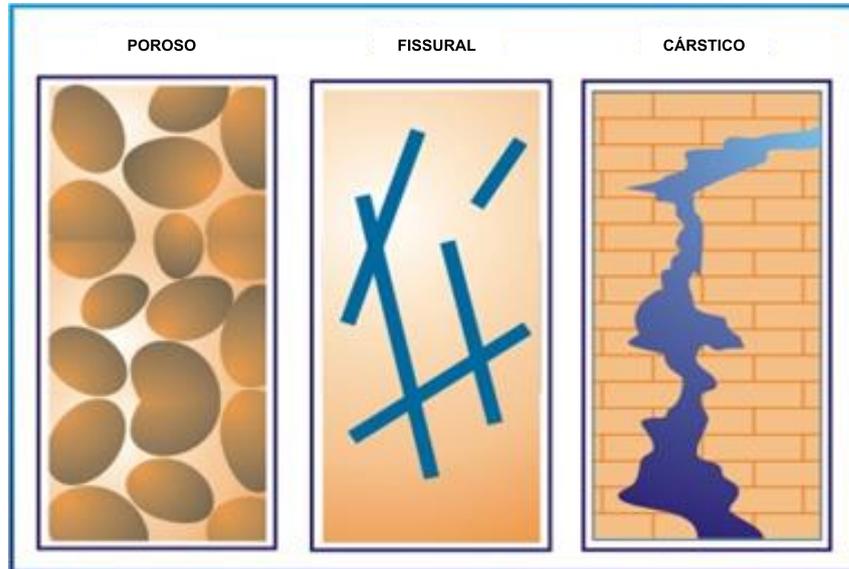
A classificação ou litologia de um aquífero geralmente é feita a partir das características geológicas. A posição geológica do aquífero e a porosidade das rochas ou depósitos sedimentares poderão determinar a velocidade da água em seu meio, a qualidade da mesma e a viabilidade do aquífero como reservatório (OLIVEIRA, 2013).

A origem geológica de um aquífero pode ser encontrada a partir do tipo predominante de rocha que ocorre. As rochas sedimentares estão relacionadas a aquíferos de origem (fluvial, eólica, lacustre, glacial e aluvial), as rochas fraturadas são presentes em aquíferos de origem vulcânica, e por fim, os mármores são encontrados em aquíferos de origem metamórfica (BOSCARDIN *et al.*, 2004).

A classificação dos aquíferos pode ser estabelecida por pela porosidade da

rocha (figura 3) ou pelas características hidráulicas:

Figura 3 - Tipos de aquíferos quanto à porosidade



Fonte: Extraído de (BOSCARDIN *et al.*, 2004) .

4.2.1.1 Aquífero poroso, sedimentar ou granular

Aquífero formado por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos. Nele a circulação de água ocorre nos poros formados entre os grãos de argila, silte e areia de granulação variada.

Em decorrência dos grandes volumes de água que armazenam e elevada quantidade de áreas em que estão instaladas, são considerados os mais importantes aquíferos. Sua ocorrência geralmente se dá em bacias sedimentares e várzeas em que há acúmulo de sedimentos arenosos (MIDÕES *et al.*, 2001)

Um detalhe importante acerca deste tipo de aquífero, é a distribuição homogênea da porosidade, que permite a fluidez da água subterrânea em qualquer direção, em função dos diferenciais de pressão hidrostática ali existentes (propriedade conhecida como isotropia)

4.2.1.2 Aquífero fraturado ou fissural

A ocorrência dos aquíferos fissurais se dá em formações geológicas que apresentam fraturas, fendas e falhas abertas devido ao movimento tectônico. Dentre as rochas ígneas e metamórficas que fazem parte de sua composição encontramos encontra-se basalto, granitos, filões de quartzo, entre outros (FERREIRA *et al.*, 2007; SOBRINHO *et al.*, 2003) .

Nestes aquíferos, a infiltração e fluxo da água dependem diretamente da presença de fissuras. A porosidade e permeabilidade das rochas ali presentes está relacionada com a quantidade das fissuras e intercomunicação entre si. Por esse motivo, são discriminados como aquíferos anisotrópicos (RABELO *et al.*, 2004).

Um exemplo de aquífero fissural são derrames de rochas ígneas vulcânicas de composição basálticas, das grandes bacias sedimentares brasileiras. Estas rochas, apesar de ígneas, são capazes de fornecer volumes de água até por vezes maiores do que a maioria das rochas ígneas e metamórficas (RABELO *et al.*, 2004).

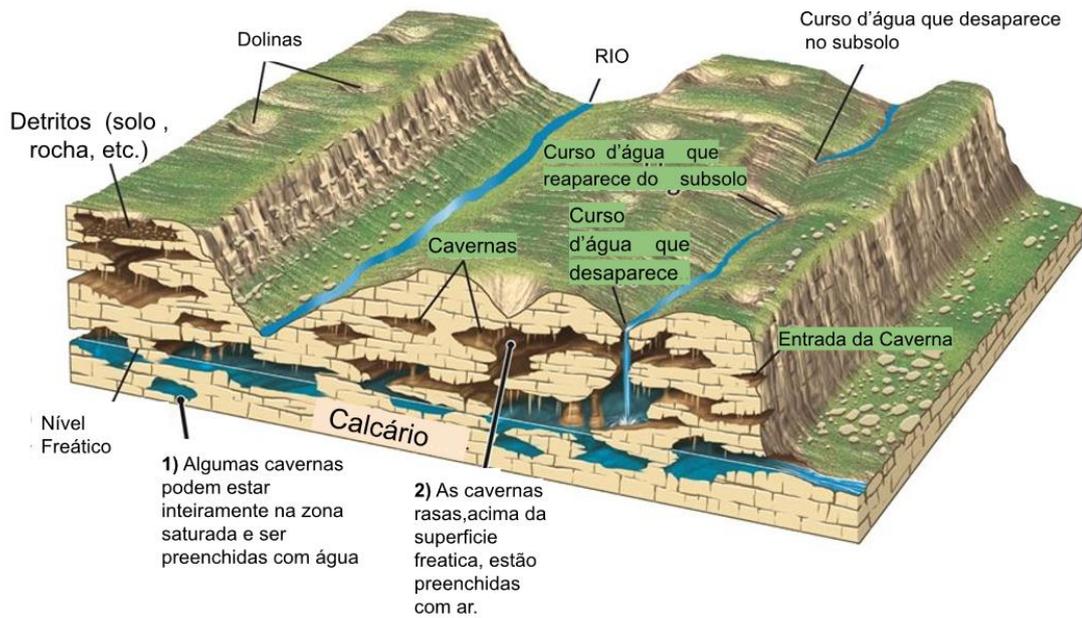
4.2.1.3 Aquífero Cárstico

Formado por rochas calcáreas ou carbonáticas, os aquíferos cársticos são heterogêneos, descontínuos e possuem águas duras, cuja circulação se dá nas fraturas e diáclases ocasionadas pela dissolução do carbonato da rocha (ABAS, 2021; DUARTE *et al.*, 2014).

Nestes aquíferos as águas ácidas (formadas pela água proveniente de chuvas e de rios) juntamente com o gás carbônico (advindo da atmosfera e solo), entram em contato com as rochas carbonáticas (ex. calcário, dolomitos, mármore e entre outras rochas) e por meio de ações mecânicas e químicas, causam a dissolução do carbonato presente nas mesmas. Formando assim cavidades de dissolução com galerias, rios subterrâneos e cavernas.

Quando há conexão hidráulica entre as cavidades formadas, podem ser encontrados verdadeiros cursos de água subterrânea, que permitem a rápida circulação de água (figura 4).

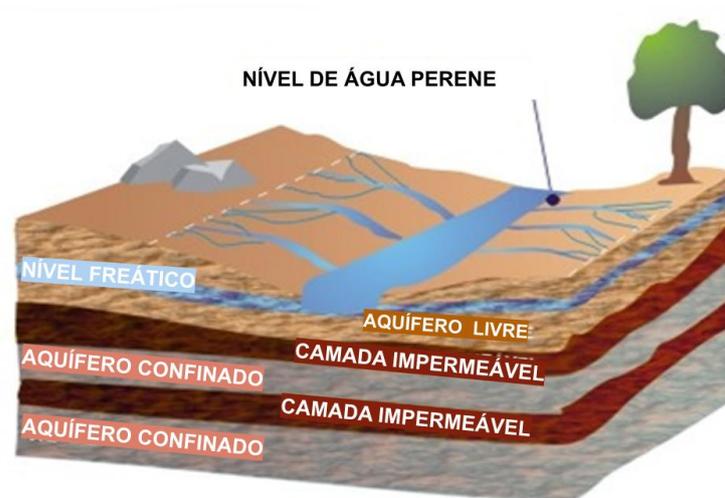
Figura 4 - Exemplo de Aquífero Cárstico



Fonte: Adaptado de (MIDÕES *et al.*, 2001).

Midões *et al.* (2001) afirmam que estes aquíferos são extremamente vulneráveis à contaminação, podendo proporcionar grandes volumes de água, de forma irregular, no espaço e no tempo. Quanto à superfície superior (segundo a pressão da água), os aquíferos podem ser de dois tipos (figura 5):

Figura 5 - Tipos de Aquíferos quanto aos critérios de pressão da água



Fonte: Adaptado de (BOSCARDIN *et al.*, 2004).

4.2.1.4 Aquífero livre ou freático

É aquele constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável.

A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. Os aquíferos livres têm a chamada recarga direta.

Em aquíferos livres o nível da água varia segundo a quantidade de chuva. São os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação (FEITOSA *et al.*, 2008; HIRATA *et al.*, 2019).

4.2.1.5 Aquífero confinado ou artesiano

Constitui-se como aquífero confinado, aquele constituído por uma formação geológica permeável, confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto.

O seu reabastecimento ou recarga através das chuvas, dá-se preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície. Nestes, o nível da água encontra-se sob pressão, podendo causar artesianismo nos poços que captam suas águas. Os aquíferos confinados têm a chamada recarga indireta e quase sempre estão em locais onde ocorrem rochas sedimentares profundas (bacias sedimentares) (MIDÕES *et al.*, 2001).

4.3 Fontes de contaminação

Ainda que o solo e a zona não saturada atuem como excelentes mecanismos de filtragem, as águas subterrâneas ainda estão sujeitas a elevados índices de contaminação. Os mecanismos de filtragem natural conseguem reter inúmeros patógenos da água, entretanto, ainda existem substâncias que dificilmente serão filtradas (MIDÕES *et al.*, 2001) .

Um fator de suma importância para o processo de contaminação destas águas é a dificuldade no monitoramento das mesmas, uma vez que, pela sua localização, é inviável visualizar a olho nu a contaminação ou possíveis focos. A deterioração da

qualidade da água, geralmente, pode ser provocada (de maneira direta ou indireta) por atividades humanas no meio ambiente (ABAS, 2021; FEITOSA *et al.*, 2008)

Algumas atividades podem liberar compostos químicos ou resíduos no meio ambiente, de forma acidental ou não. Estes contaminantes movem-se de acordo com a declividade em superfície e quando atingem o nível freático, seguem o fluxo das águas subterrâneas (figura 6) (EPA, 2015).

Figura 6 - Causas para a contaminação das águas subterrâneas



Fonte: Extraído de (MIDÕES *et al.*, 2001)

Os contaminantes infiltram-se rapidamente no solo, através das fraturas e fissuras das rochas, pelos poros do solo, pelas raízes dos vegetais e por poços abandonados ou sem a devida vedação (FEITOSA; MANOEL FILHO; FEITOSA; DEMETRIO, 2008).

Os autores ainda apontam diversas ações antrópicas que podem contaminar o solo, a seguir:

A) Contaminação proveniente de atividades urbanas e domiciliares

Pode ser provocada pela disposição de resíduos domésticos, ou comerciais em ambientes inadequados, à céu aberto (depositados em redes fluviais, lixões, fossas sépticas). Em períodos de chuva, a água entra em contato com os resíduos provenientes da degradação orgânica do lixo, formando o lixiviado (chorume e água precipitada da chuva).

Estes por sua vez, são altamente redutores e enriquecidos em amônia, ferro ferroso, manganês e zinco. Além de apresentarem valores elevados do total de sólidos dissolvidos e da concentração de cloreto, sulfato, bicarbonato, sódio, potássio, cálcio e magnésio. Estas substâncias ao se infiltrar no solo, originam um aumento da mineralização, elevação da temperatura, aparecimento de cor, sabor e odor desagradáveis.

B) Contaminação proveniente de atividades industriais

Esta contaminação está relacionada com a eliminação de resíduos de produção através da atmosfera, do solo, das águas superficiais e subterrâneas e de derrames durante o seu armazenamento e transporte.

Dentre as atividades com maiores teores de poluentes estão as indústrias alimentícias, metalúrgicas, petroquímicas, nucleares, mineiras, farmacêuticas, eletroquímicas, de fabricação de pesticidas e inseticidas etc. (ABAS, 2021; GABAS; LASTORIA, 2017).

C) Contaminação proveniente de atividades agrícolas

Este tipo de poluição, segundo MIDÕES; FERNANDES e COSTA (2001) é uma das mais generalizadas e agressivas na deterioração das águas subterrâneas. Além de ser uma das atividades que mais consomem os recursos hídricos no mundo todo.

As atividades agrícolas podem ser responsáveis pela poluição a partir da superfície de áreas extensas. Os produtos com alto potencial de contaminação, geralmente são:

1. Utilização inadequada de fertilizantes nitrogenados e fosforados em zonas de irrigação, com solos altamente permeáveis e aquíferos livres, gerando altos níveis de nitrato nas águas subterrâneas;

2. Utilização incorreta ou exagerada de pesticidas organoclorados (altamente tóxicos) em solos com alta permeabilidade; e
3. Reuso frequente e desordenado de águas em regiões de irrigação.

D) Contaminação induzida por bombeamento

Poços mal construídos e ou abandonados, sem as devidas medidas de vedação e revestimento, podem funcionar como uma porta de entrada direta de contaminantes que facilmente alcançam os níveis freáticos.

4.4 Vulnerabilidade de águas subterrâneas

De acordo com HIRATA e FERREIRA (2001), o conceito de vulnerabilidade de águas que começou a ser difundido nos anos 70, tem sido utilizado para demonstrar os fatores intrínsecos que determinam a sensibilidade de um aquífero a ser afetado por uma carga contaminante

Segundo KALAOUM (2016), a vulnerabilidade de um aquífero depende tanto das suas características geológicas (litologia, porosidade), da área (uso do solo, topografia), do contaminante (mobilidade, densidade) além da presença ou não, de ações antrópicas. Assim, o mapeamento das vulnerabilidades da água subterrânea é uma chave importante para melhorar o planejamento e processos de tomada de decisão a fim de prevenir a contaminação dessas águas (TERRA *et al.*, 2016).

A vulnerabilidade pode ser classificada em intrínseca (ou natural) e específica. A vulnerabilidade intrínseca também chamada de natural, pode ser definida como a facilidade com que um contaminante introduzido na superfície do solo, pode atingir e se difundir nas águas subterrâneas. Os principais parâmetros considerados na análise de vulnerabilidade intrínseca envolvem o grau de confinamento (confinado ou não confinado), a profundidade do lençol freático e a litologia e nível de consolidação dos estratos acima da zona saturada (MOCELLIN; FERREIRA, 2009; ZANETTI, 2012).

Enquanto isso, a vulnerabilidade específica é usada para definir a sensibilidade das águas subterrâneas a contaminantes específicos (levando em conta a carga de contaminação). No momento, ainda existem muitas divergências entre definições, qualificações e metodologias que avaliem a vulnerabilidade destas águas, uma vez que fatores como (profundidade, reabastecimento e zonas de descarga,

comportamento e cargas contaminantes) precisam ser levados em conta (GUIGUER; KOHNKE, 2002).

4.5 Método GOD para avaliação da vulnerabilidade à contaminação de um aquífero

Diferentes métodos foram introduzidos para estimar a vulnerabilidade das águas subterrâneas. Esses métodos podem ser divididos em quatro categorias gerais: processos, modelos de simulação, métodos estatísticos e sobreposição e métodos de índice (TERRA *et al.*, 2016) .

O avanço das tecnologias e o surgimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), tornaram os métodos de avaliação da vulnerabilidade (especialmente os métodos de sobreposição) bem mais fáceis de implementar (ROSENBERGER *et al.*, 2013)

Dentre os métodos utilizados para avaliação da vulnerabilidade geral, surge o método GOD, proposto por FOSTER; HIRATA e ROCHA (1988). Segundo FEITOSA; MANOEL FILHO; FEITOSA e DEMETRIO (2008), tal método tem sido amplamente utilizado nas últimas décadas, especialmente na América Latina e Caribe.

Os autores ainda afirmam que sua ampla utilização se deve à simplicidade de conceitos e fácil aplicação. Os dados necessários para a aplicação deste método são facilmente coletados em estudos básicos de hidrogeologia regional (FEITOSA; MANOEL FILHO; FEITOSA; DEMETRIO, 2008)

A nomenclatura desse método representa um acrônimo de três fatores, em inglês:

G = Grau de confinamento da água subterrânea. Estes graus podem ser classificados em confinado não drenante, confinado drenante ou livre;

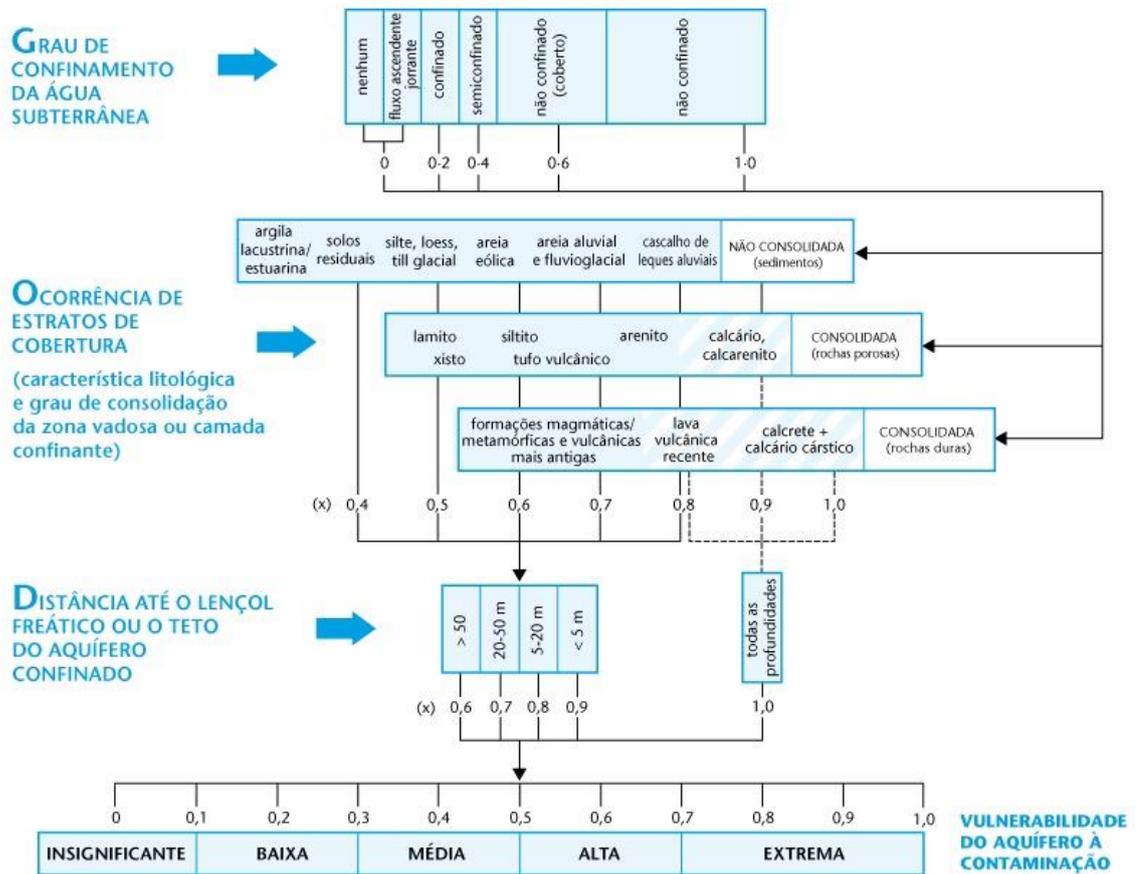
O = Ocorrência dos estratos. composição da zona não saturada e seus graus de fraturamento; e

D = Distância até o lençol freático, ou teto do aquífero confinado.

Cada parâmetro possui um peso específico. Sua gradação pode variar de 0 a 1,0, os quais, após serem multiplicados entre si, indicam o grau de vulnerabilidade do

aquífero (figura 7) (FEITOSA; MANOEL FILHO; FEITOSA; DEMETRIO, 2008; REGINATO; AHLERT, 2013).

Figura 7 - O método de vulnerabilidade GOD



Fonte: Extraído de (FEITOSA; MANOEL FILHO; FEITOSA; DEMETRIO, 2008).

Após a definição dos valores de cada parâmetro, realiza-se a multiplicação entre estes. Sendo definida a vulnerabilidade do aquífero, de acordo com o resultado da pontuação. As classes de vulnerabilidade de aquífero variam de insignificante à extrema, conforme apresentado na tabela 1:

Tabela 1 - Classificação da vulnerabilidade de acordo com o método GOD

Valores	Índice de vulnerabilidade	Definição
0,0 - 0,1	Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo
0,1 - 0,3	Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados
0,3 - 0,5	Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lixiviados ou lançados
0,5 - 0,7	Alta	Vulnerável a muitos contaminantes em muitas condições de contaminação (com exceção dos que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados)
0,7 - 1,0	Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação

Fonte: Adaptado de (FEITOSA; MANOEL FILHO; FEITOSA; DEMETRIO, 2008)

As informações utilizadas para aplicação do método GOD normalmente são extraídas do Serviço Geológico do Brasil, no Sistema de Águas Subterrâneas (SIAGAS) (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>). A partir da aplicação do método e resultados obtidos, é possível classificar e definir as ações necessárias para melhor gestão dos aquíferos.

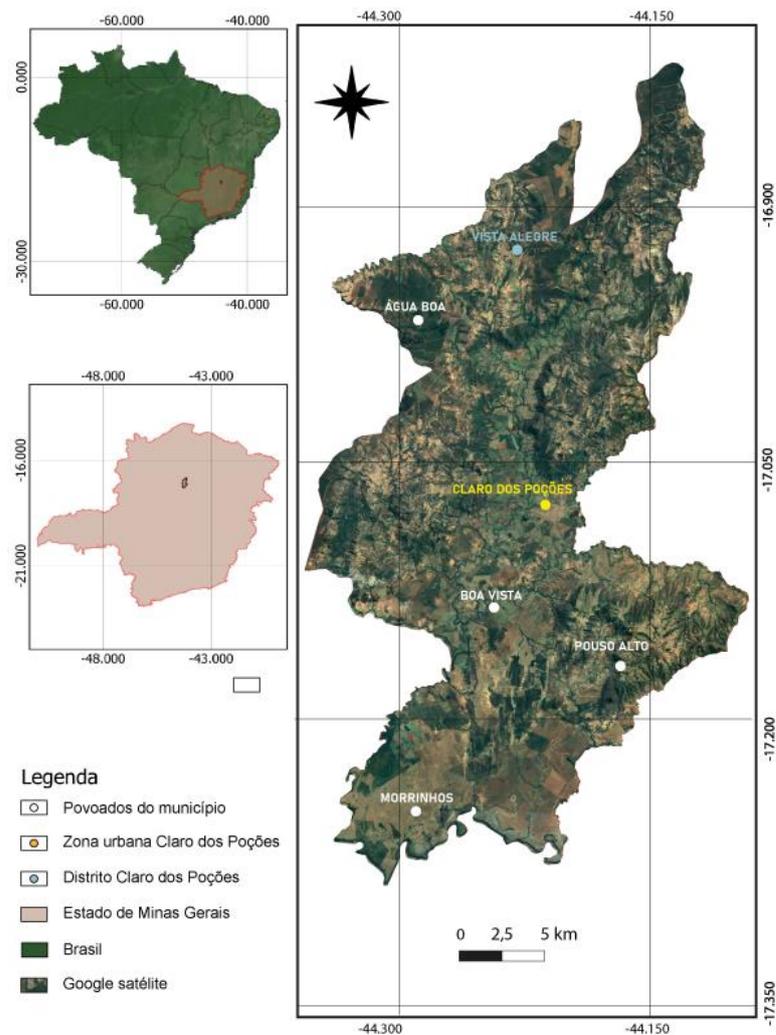
LIMA (2011) ressalta que um aquífero tem diferentes condições hidrogeológicas. Portanto, o nível de vulnerabilidade de uma região certamente será diferente de outras regiões. As condições hidrogeológicas usadas como parâmetros são geralmente propriedades físicas, mas existem também propriedades químicas que devem ser analisadas.

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

5.1 Delimitação e acesso

A área de estudo se localiza no município de Claro dos Poções, situado na Região Centro-Norte do estado de Minas Gerais, na latitude -16.9734° e longitude -44.2672° (figura 8). Sua área é de aproximadamente $720,42 \text{ km}^2$ e sua população é cerca de 7.775 habitantes total, sendo que 2.524 habitantes vivem na zona rural e 5.251 vivem na zona urbana (IBGE, 2010). Possui fronteiras com os municípios Jequitaiá ao Oeste, Francisco Dumont ao Sul, Montes Claros a Sudeste e São João da Lagoa a Sudoeste.

Figura 8 - Mapa de localização da área de estudo



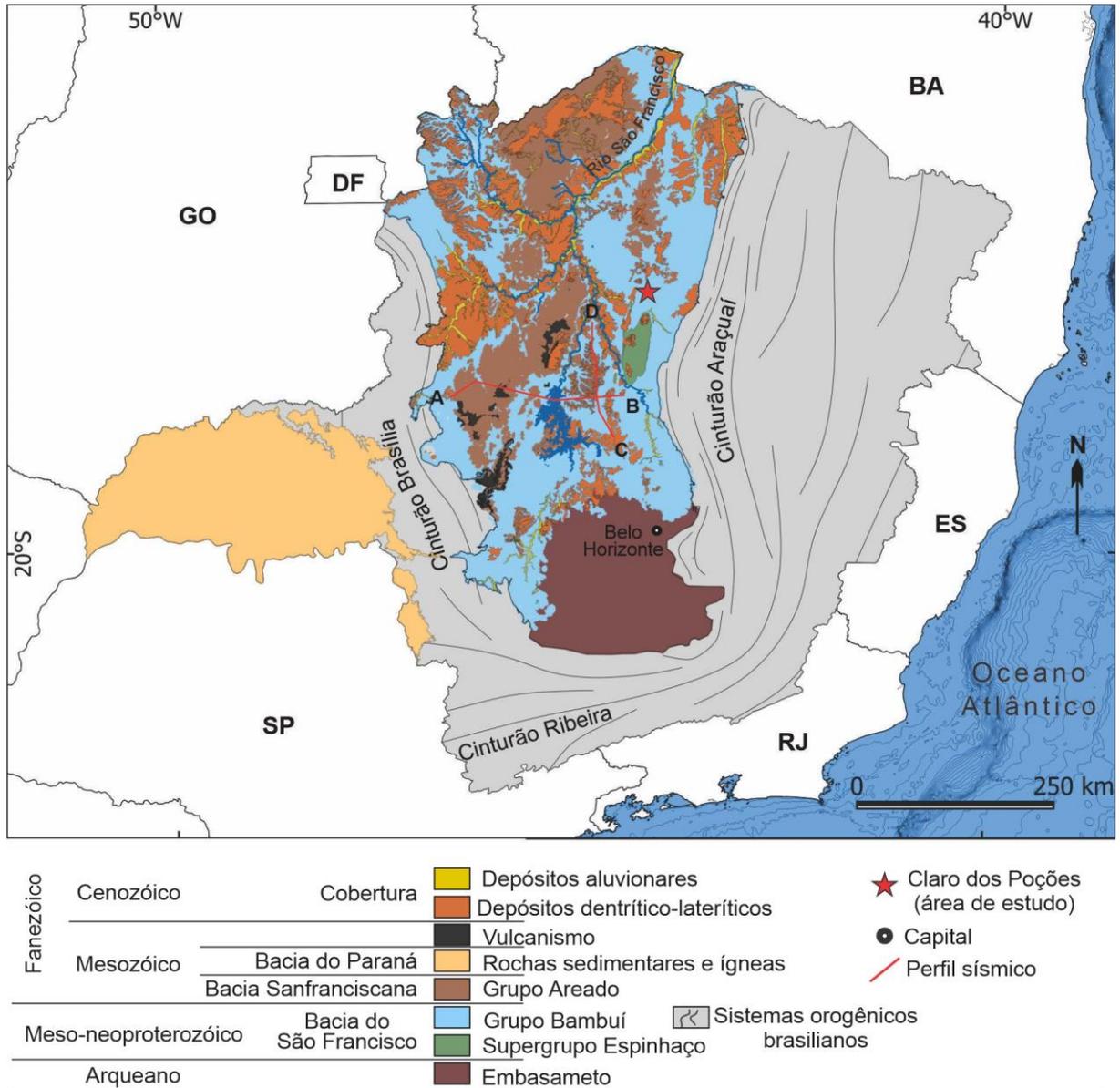
Fonte: O autor.

5.2 Geologia

5.2.1 Geologia regional

O município de Claro dos Poções está localizado à leste da região central da Bacia sedimentar do São Francisco. Esta bacia cobre substancialmente a porção norte-sul do Cráton do São Francisco que corresponde ao seu embasamento. Seus limites leste, oeste e norte coincidindo com os limites cratônicos, é dado pelas estruturas das faixas marginais ediacaranas Araçuaí e Brasília, respectivamente (HEILBRON; CORDANI; ALKMIM, 2017). O limite sul é erosivo. Essas características são ilustradas na figura 9.

Figura 9 - Esboço do mapa geológico da Bacia e do Cráton do São Francisco



Fonte: Extraído do mapa geológico do estado de Minas Gerais na escala de 1:1.000.000 executado pelo CPRM (2003).

O preenchimento sedimentar da Bacia do São Francisco engloba múltiplos e superimpostos ciclos de preenchimento de bacias mais jovens que 1,8 Ga (HEILBRON; CORDANI; ALKMIM, 2017). As unidades geotectônicas e litoestratigráficas que preenchem essa bacia, estão organizadas na tabela 2:

Tabela 2 - Litoestratigrafia da Bacia de São Francisco

Idade	Unidades tectono-geológicas	Litoestratigrafia	Depósitos dominante
Cenozóico	Cobertura superimposta final	Depósitos Cenozóicos	Siliciclástico
Mesozóico	Bacia tipo sinéclise	Grupo Areado	Siliciclástico
Neoproterozóico	Bacia Epicontinental	Supergrupo São Francisco	Silícico-carbonático
Mesoproterozóico	Rifte Intracratônico	Supergrupo Espinhaço	Siliciclástico

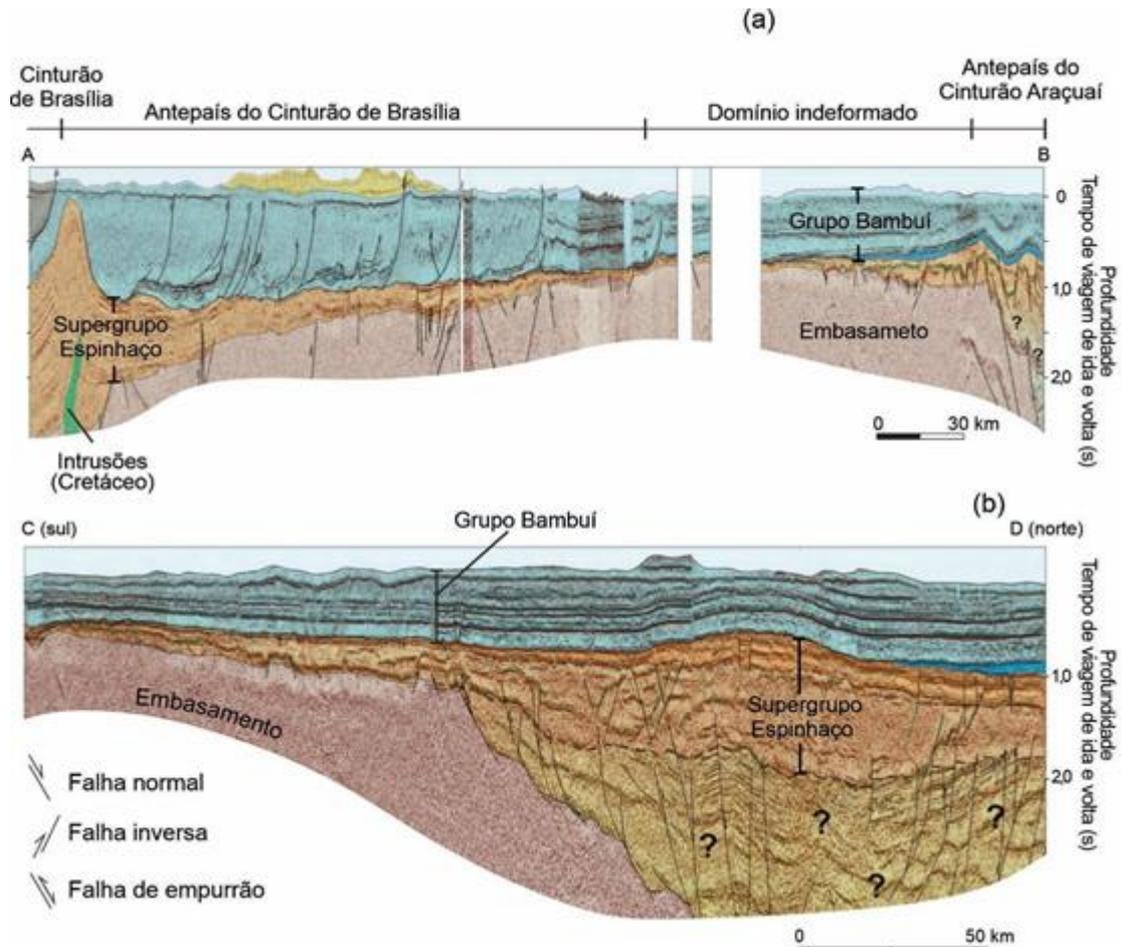
Fonte: Adaptada de (REIS *et al.*, 2017) .

Das unidades litoestratigráficas que preenchem esta bacia, o município de Claro dos Poções está inserido sobre rochas do Grupo Bambuí, unidade pertencente ao Supergrupo São Francisco.

5.2.1.1 O grupo Bambuí

O Grupo Bambuí representa uma associação de litofácies siliciclásticas, químicas e bioquímicas, depositadas sobre uma extensa plataforma epicontinental, desenvolvida sobre o paleocontinente São Francisco durante o término do Neoproterozóico (LIMA, 2011). Sua distribuição geográfica, e de seus correlatos, é ampla e contínua ao longo da porção centro-oriental, conforme ilustrado na figura abaixo.

Figura 10 - Seções sísmicas compostas ao longo do sul da Bacia de São Francisco



Fonte: Adaptado de (REIS *et al.*, 2017).* **a)** distribuição das principais unidades estratigráficas do Supergrupo São Francisco depositadas na bacia de nome homônimo, e a configuração dos cinturões orogênicos neoproterozóicos de Brasília e Araçuai; **b)** Aulacógeno de Pirapora, parcialmente invertido através da influência compressional do Cinturão Araçuai.

Os depósitos do Grupo Bambuí são interpretados como formados em Bacia de Antepais ediacarana, localizada no continente São Francisco em resposta à sobrecarga litosférica causada pelo soerguimento dos cinturões orogênicos de Brasília e Araçuai (ALKMIM; BRITO NEVES; CASTRO ALVES, 1993; ALKMIM; MARTINS-NETO, 2001; HEILBRON; CORDANI; ALKMIM, 2017). Seus estratos podem ser divididos em seis formações litoestratigráficas, conforme apresentado na tabela 3

Tabela 3 - Divisão e características litoestratigráficas do Grupo Bambuí

Formação	Litologias predominantes	Espessura (m)
Tres Marias	Siltitos e arenitos	100
Serra da Saudade	Folhelhos, argilitos e siltitos	25 - 200
Lagoa do Jacaré	Calcários e margas	0-100
Serra de Santa Helena	Folhelhos e siltitos	150-220
Sete Lagoas	Calcários dolomíticos	200-250
Jequitaiá	Paraconglomerados com matriz argilosa	0-300

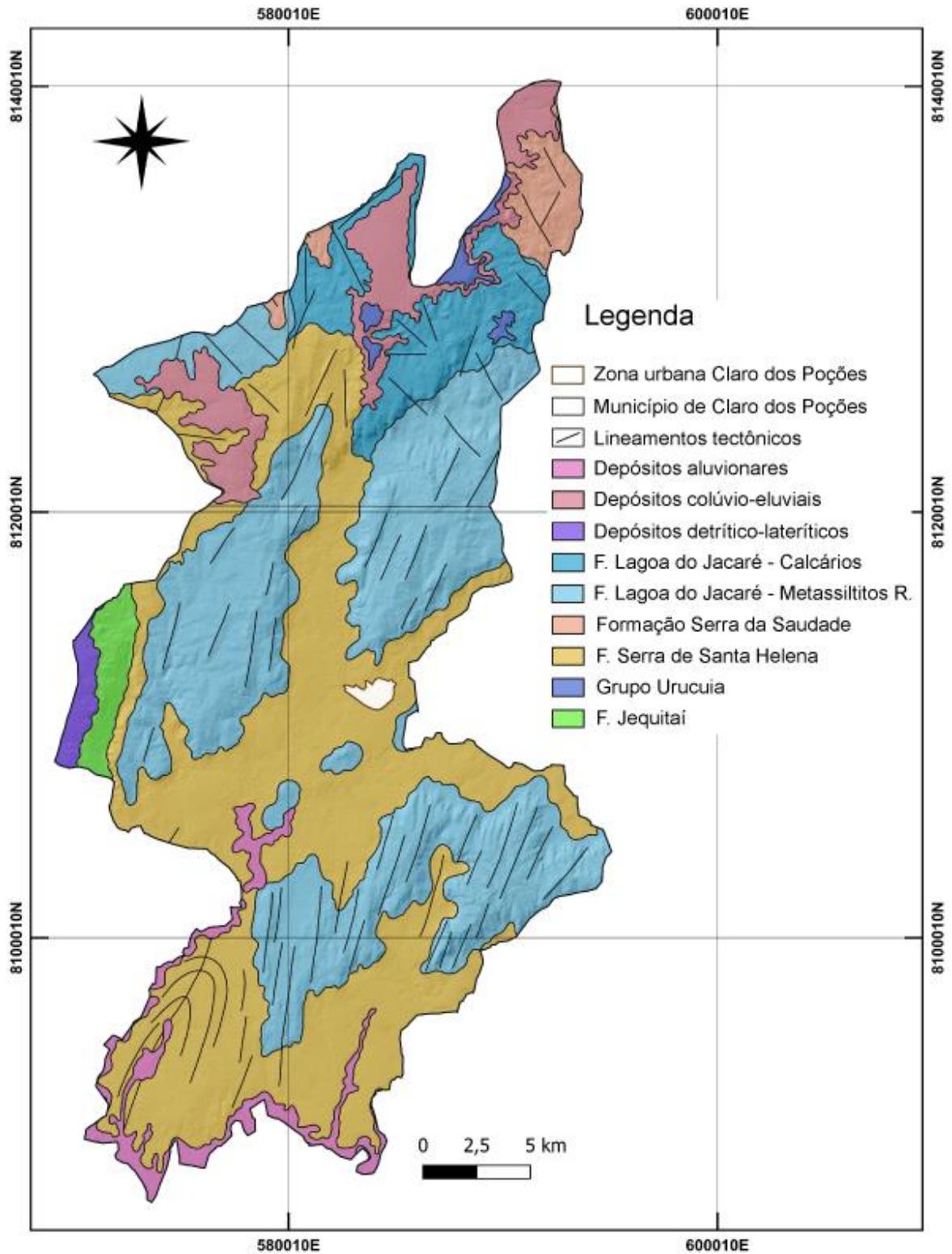
Fonte: Adaptada de (DARDENNE, 1978) .

De modo geral, os sedimentos proterozóicos dessa bacia recobrem regiões cratônicas, pouco perturbadas tectonicamente, sendo o Grupo Bambuí disposto horizontalmente ou suavemente ondulado, com metassedimentos intensamente dobrados e importantes falhas em situações localizadas (IGLESIAS; UHLEIN, 2009).

5.3 Geologia local

A geologia local foi baseada principalmente no mapa geológico da Folha Jequitaiá, na escala 1:100.000 elaborado por CHAVES *et al.* (2011) para o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e na Folha Coração de Jesus, na escala 1:100.000 (figura 11). O primeiro cobre cerca de 70% da área do município, desde o limite sul, dado pelo rio Itajaí até cerca 8 km a norte da cidade de Claro dos Poções, o segundo mapa cobre o restante da área.

Figura 11 - Mapa geológico do município de Claro dos Poções



Fonte: O autor.

5.3.1 Estratigrafia

O município de Claro dos Poções é formado por rochas metassedimentares e sedimentares carbonáticas do Grupo Bambuí – formações Jequitai, Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré – e sedimentares Cenozóicas (Neógeno). A coluna estratigráfica das rochas do município de Claro dos Poções é apresentada na figura 12.

Figura 12 - Coluna estratigráfica das rochas aflorantes no município de Claro dos Poções

IDADE	COLUMNA ESTRATIGRÁFICA	LITOLOGIAS	ESTRUTURAS SEDIMENTARES	AMBIENTE DE SEDIMENTAÇÃO	
Cenozóico Cretáceo Neoproterozóico	Cobertura Fanerozóica Supergrupo São Francisco	Dep. Colúvio Eluvial Aluvial	(Areias e cascalhos)		Elúvio-Colúvio-Aluvionar
		Cob. Debrítico - Laterítico	Lateritas (e solo arenosos)		Supergênico
		Grupo Urucula	Arenitos finos	Estratos plano-paralelos	Desértico
		Grupo Areado	Arenitos e conglomerados	Estrat. cruzadas	Fluvio-desértico
		Formação Serra da Saudade	Siltitosossilíferos	Laminações	Lacustre
		Formação Serra da Saudade	Argilitos e siltitos, com intercalações de diamictitos	Estratos plano-paralelos	Marinho plataformala marinho profundo (?)
		Calcários	Ritmitos silticos, calcarenitos e calcilitos	Laminações cíclicas de siltes e siltes-argilas carbonáticas, calcários maciços intercalados	Marinho plataformala
		Fm. Lagoa do Jacaré			
		Ritmitos			
		Formação Serra de Santa Helena	Metassiltitos e metargilitos	Laminações cruzadas	Marinho plataformala
		Discordância angular / erosiva			
Formação Jequitai	Metadiamictitos	Maciça, estruturas acanaladas	Glácio-marinho		

Fonte: Adaptado de (CHAVES & ANDRADE, 2014)

5.3.2 Grupo Bambuí

5.3.2.1 Formação Jequitaiá

Esta unidade é formada por metadiamicritos cinza escuros, altamente compactados, com variada composição granulométrica e litológica. A matriz dessas rochas varia de síltica arenosa fina, e os clastos incluem seixos, blocos e raros matacões de quartzito, quartzo e granito, além de rochas carbonáticas e vulcânicas básicas. Sua exposição é restrita a uma estreita faixa no oeste da área, disposta no flanco leste da Serra das Porteiras (DARDENNE, 1978).

5.3.2.2 Formação Serra de Santa Helena

Esta unidade apresenta uma ampla distribuição na área, aflorando nas topografias mais baixas e com espessura máxima de 250 metros (CHAVES; ANDRADE; BENITEZ, 2011). É constituída por metassiltitos e folhelhos arcoseanos intercalados, em geral bastante intemperizados. De modo característico na base ocorrem lentes de calcário (DARDENNE, 1978; MARTINEZ, 2007).

5.3.2.3 Formação Lagoa do Jacaré

Esta unidade sobrepõe-se à Formação Serra de Santa Helena em contato gradacional. É encontrada principalmente nas cotas topográficas mais altas, ocorrendo, então, como áreas isoladas, separadas pelo aprofundamento dos vales com espessura máxima de 150 metros na porção nordeste e sudeste da folha de Jequitaiá. (CHAVES; BENITEZ; ANDRADE; QUEIROGA, 2007).

É constituída predominantemente por calcilutitos e calcarenitos. A base é composta por ritmitos que mostram alternâncias de níveis argilo-siltosos, com níveis carbonáticos. Em direção ao topo os níveis carbonáticos tornam-se pelíticos, ocorrendo no entanto, níveis calcários maciços e puros.

5.3.2.4 Formação Serra da Saudade:

Formada predominantemente por siltitos e argilitos. Essas rochas apresentam-se na coloração rosada, com tons amarelados ou arroxeados quando alteradas. Esta formação ocorre na parte extremo norte da área de estudo.

5.3.2.5 Grupo Urucuia:

Unidade formada exclusivamente por arenitos constituídos principalmente por grãos de quartzo nas frações fina a média cimentada por óxidos e hidróxidos de ferro nas frações finas e médias. Esta unidade ocorre em uma faixa no extremo oeste da área de estudo.

5.3.2.6 Depósitos colúvio – eluviais

Formado predominantemente de areias finas e muito finas (60 – 70%) com frações silte e argila perfazendo o restante. Porções cascalhosas ricas em clastos angulosos a subangulosos de quartzo de veio, ocorrem localmente. Estes depósitos ocorrem na porção norte e noroeste da área de estudo. Em geral compreendem áreas aplainadas com espessuras métricas até próximo de 30 metros

5.3.2.7 Depósitos dentrítico-lateríticos

Compreende as coberturas arenosas finas a médias, consolidadas ou semi-consolidadas, em geral de cor vermelha denotando forte contribuição ferruginosa. Localmente há concreções ferruginosas centimétricas a decimétricas em diversos locais formando níveis de laterita com até 1 m de espessura. Na região estudada, tais depósitos estão restritos a uma pequena área situada a oeste, compreendendo o flanco leste da Serra das Porteiras.

5.3.2.8 Depósitos aluvionares

Na região de estudo, tais depósitos são compostos de sedimentos inconsolidados com predomínio de areias e cascalhos formados por seixos de quartzo arredondados. Podem ainda ocorrer, de modo esporádico, sedimentos enriquecidos nas frações mais finas, com siltes e argilas predominantes. Os depósitos mais representativos ocorrem ao longo do rio Jequitaí, que contorna o limite sul do município Claro dos Poções e em alguns afluentes diretos, como no rio São Lamberto.

5.4 Geologia estrutural e metamorfismo

De modo geral, as rochas que compreende o município de Claro dos Poções são estruturalmente caracterizadas por tectônica rúptil e dúctil formadas principalmente durante a orogenia brasiliana (CHAVES; BENITEZ; ANDRADE; QUEIROGA, 2007), elas são caracterizadas por estratos sub-horizontais e ondulados (HERCOS; MARTINS-NETO; DANDERFER FILHO, 2008).

A região sul do município de Claro dos Poções é a mais afetada. É formada por um conjunto contínuo de anticlinais-sinclinais que se estende desde o oeste, a partir do flanco leste da Serra das Porteiras compreendendo um anticlinório, e segue para leste até a Serra do Garrote à Sul de Claro dos Poções, todas com caimento para norte-nordeste. Destas dobras duas se destacam pela escala de ocorrência. Uma pequena área dela é representada conforme supracitado pelo anticlinório da Serra das Porteiras situado à oeste da área, onde ocorrem as rochas metamórficas da Formação Jequitaí sobreposta pelos depósitos detrítico-lateríticos. A outra corresponde a uma sinclinal de escala quilométrica com flancos abertos situado entre a Serra das Porteiras e a Serra do Garrote, nesta última serra ocorrem anticlinais e sinclinais menores e apertadas com tendência axial para norte-nordeste.

As estruturas rúpteis incluem pequenos falhamentos normais e fraturas verticais, com direções preferenciais variando entre N20°-40°W. Essas estruturas, nitidamente podem ser consideradas associadas, entretanto posteriores ao dobramento regional.

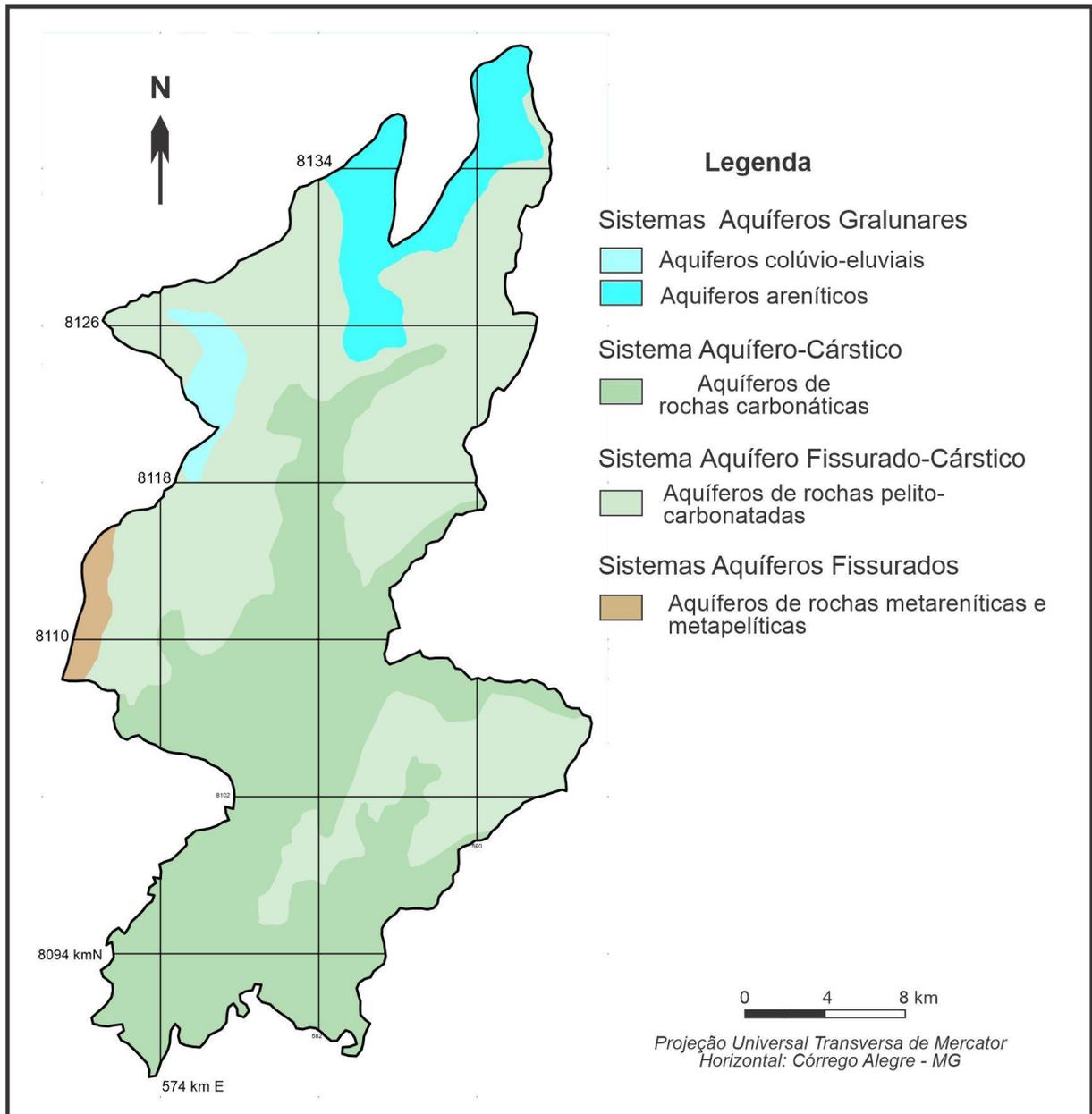
Em relação ao metamorfismo atuante, os estudos petrográficos indicaram um grau muito tênue, o qual permitiu que a maioria das estruturas sedimentares se bem preservadas (CHAVES; BENITEZ; ANDRADE; QUEIROGA, 2007).

De acordo com WALDE (1978) que na região sul da Serra do Cabral as rochas do Supergrupo São Francisco encontram-se metamorfizadas regionalmente em um grau fraco (fácies xistos verdes).

5.5 Características hidrogeológicas da área de estudo

De acordo como mapa de Sistemas Aquíferos do município de Claro dos Poções, escala 1:100.000 (figura 13), no qual está inserida a área de estudo, pertencente o Sistema Aquífero do Grupo Bambuí, aflorante no domínio hidrogeológico de rochas pelito-carbonatadas.

Figura 13 - Mapa de Sistemas Aquíferos do município de Claro dos Poções



Fonte: O autor. Adaptado de

O município de Claro dos Poções é constituído por quatro tipos de aquíferos, são os sistemas Aquíferos Fissural-Cárstico, Aquífero Cárstico, Aquífero Granular e Aquífero Fissural.

O primeiro é o Sistema Aquífero Fissural-Cárstico constituído por folhelhos, siltitos, margas e lentes espessas de calcário constituindo toda a área norte da Formação Serra de Santa Helena classificado como aquífero semi-confinado e livre. Este sistema de aquífero ocorre na região de Vista Alegre seguindo para direção oeste até o limite com o município de São João da Lagoa, na direção leste para Formação Lagoa do Jacaré limitando com o município de Montes Claros e na Serra do Pouso Alto localizada a sudeste da área de estudo limitando com município de Francisco Dumont. Essas formações ocorrem em regiões de superfícies tabulares onduladas em cotas altimétricas variando entre 750 metros a 900 metros ao norte e 650 metros a 900 metros a sudoeste dos planaltos do São Francisco.

O segundo é o Sistema Aquífero Cárstico constituído por siltitos, margas, calcários pretos da Formação Lagoa do Jacaré e rochas carbonáticas do Subgrupo Paraopeba. Essas rochas estão recobertas por depósitos argilosos com espessura chegando aproximadamente a 20 metros classificados como aquífero semi-confinado e livre. Este sistema de aquífero ocorre na porção central até 8 km na direção norte da cidade de Claro dos Poções e para direção Sul desta cidade abrangendo a região central e sul do município, exceto na Serra do Pouso Alto que pertence ao primeiro sistema. Essas formações ocorrem em regiões rebaixadas em cotas altimétricas médias entre de 625 m da Depressão Franciscana.

Esses dois sistemas mencionados acima cobrem quase toda a região da área de estudo.

O terceiro é o Sistema Aquífero Granular constituídos arenitos e conglomerados e arenitos argilosos da Formação Urucuia e depósitos colúvio-eluviais classificado como aquífero livre. Essas formações ocorrem nas regiões dos planaltos residuais do São Francisco em superfícies tabulares em cotas altimétricas variando entre 900 metros a 1.000 metros. Este sistema de aquífero abrange o extremo norte da área de estudo na região de Lagoa do Engenho limitando com o município de São João da Lagoa e na região de Lagoa dos Freitas limitando com o município de Montes

Claros e em uma pequena porção no limite noroeste da área de estudo na localidade de Jenipapo próximo ao limite com o município de Jequitaiá.

O quarto é o Sistema Aquífero Fissural constituído por depósitos detrítico-lateríticos e depósitos de tilitos da Formação Jequitaiá classificado como aquífero livre. Este sistema aquífero ocorre em uma faixa muito pequena no limite oeste do município de Claro dos Poções, nos planaltos com cotas altimétricas variando de 700 metros a 900 metros.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

A realização deste trabalho se consistiu basicamente em quatro etapas principais, descritas sumariamente a seguir:

6.1 Consulta bibliográfica

Dentro da revisão de literatura, os trabalhos que serviram de base para a caracterização da vulnerabilidade foram: (FOSTER & HIRATA 1988); HIRATA e FERREIRA (2001) e FEITOSA; MANOEL FILHO; FEITOSA e DEMETRIO (2008) .

6.2 Aquisição de material cartográfico e hidrogeológico

As informações cartográficas e hidrogeológicas utilizadas na construção dos mapas temáticos foram:

- a) Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido pelo sensor Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR) a bordo do satélite Advanced Land Observing Satellite (ALOS) e disponibilizados pelo (Alaska Satellite Facility);
- b) Mapa geológico do município de Claro dos Poções, MG elaborada por (CHAVES; BENITEZ, 2006) e adaptado através de (CODEMIG, 2021; CRPM, 2021);
- c) Mapa de Sistemas de Aquíferos elaborado por CPRM (2003);
- d) Geologia da Folha Jequitaí SE. 23-X-C-II escala 1:100.000 elaborada por Chaves & Benitez (2006) para o Serviço Geológico do Brasil (CPRM); e
- e) Geologia da Folha Coração de Jesus SE 23-X-A-V escala 1:100.000 elaborada por Chaves & Andrade (2014) para o Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

6.3 Banco de dados

6.3.1 Aquisição e tratamento do banco de dados

As informações necessárias para a aplicação do método foram obtidas a partir dos relatórios feitos durante a construção dos poços e disponibilizados

eletronicamente pelo Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) desenvolvido pelo (CPRM, 2021).

Nestes relatórios constam uma diversidade de informações sobre geologia, hidrogeologia e construção de cada poço, conforme mostrado nas figuras 14 e 15.

Figura 14 - Banco de dados contendo informações acerca dos poços do município de Claro dos Poções

ponto	utm_e	utm_n	natureza	situacao	uso_agua	condicao	tipo_formacao	nivel_estatic
3100000665	576142	8113323	Poço tubular	Equipado		LIVRE	Sub-grupo paraopeba	8
3100000666	577778	8123766	Poço tubular	Não instalado		LIVRE	Sub-grupo paraopeba	39
3100004900	585123	8111967	Poço tubular			Livre	Formacao Lagoa do Jacare	12,44
3100004901	583820	8112021	Poço tubular	Abandonado		Livre	Formacao Lagoa do Jacare	5,1
3100004902	585093	8111906	Poço tubular			Livre	Formacao Lagoa do Jacare	14
3100004903	583654	8111931	Poço tubular	Abandonado		Semi-Confinado	Formacao Lagoa do Jacare	28,24
3100004904	585005	8111937	Poço tubular			Livre	Formacao Lagoa do Jacare	10,92
3100004905	581650	8127046	Poço tubular	Seco		Livre	Grupo Bambui	
3100004906	580853	8129893	Poço tubular	Equipado		Livre	Grupo Bambui	3,1
3100004907	581108	8128486	Poço tubular			Livre	Grupo Bambui	16,78
3100004908	584570	8100723	Poço tubular	Equipado		Livre	Formacao Lagoa do Jacare	9,82
3100004909	580861	8129929	Poço tubular	Equipado	Abastecimento doméstico/animal	Livre	Formacao Lagoa do Jacare	3,91
3100006306	593462	8106092	Poço tubular			Livre	Formacao Lagoa do Jacare	2,43
3100007545	590702	8103246	Poço tubular		Abastecimento múltiplo			
3100010998	581650	8127036	Poço tubular	Parado		Semi-Confinado	Proterozoico superior	16,87
3100010999	581725	8127274	Poço tubular	Equipado	Abastecimento doméstico	Livre	Proterozoico superior	35,89
3100011000	581779	8127599	Poço tubular	Equipado				
3100011001	580577	8130024	Poço tubular	Equipado	Abastecimento doméstico	Livre	Subgrupo Paraopeba	9,9
3100011002	582618	8128305	Poço tubular	Equipado	Abastecimento múltiplo	Livre	Subgrupo Paraopeba	10
3100011003	575503	8122359	Poço tubular	Equipado		Livre	Subgrupo Paraopeba	4
3100011004	576260	8124951	Poço tubular	Equipado	Abastecimento doméstico/animal	Livre	Subgrupo Paraopeba	4
3100011005	580166	8120948	Poço tubular	Equipado	Abastecimento doméstico/animal			

Fonte: O Autor. Extraído de SIAGAS (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>).

Figura 15 - Modelo de relatório disponibilizado pela plataforma SIAGAS

Poço: 3100004915 UF: MG Município: Claro dos poços Localidade: CASSIANOPOLIS

Perfil Construtivo

Gerais Construtivos Geológicos Hidrogeológicos Teste de Bombeamento Análises Químicas

Dados Gerais:

Nome: _____

Data da Instalação: _____

Proprietário: _____

Natureza do Ponto: Poço tubular

Uso da Água: Abastecimento doméstico/animal

Cota do Terreno (m): _____

Localização:

Localidade: CASSIANOPOLIS

UTM (Norte/Sul): 8109163

UTM (Leste/Oeste): 579074

Latitude (GMMSS): 170602

Longitude (GMMSS): 441524

Bacia Hidrográfica: Rio São Francisco

Subbacia Hidrográfica: Rios São Francisco, Paracatu e outros

Situação:

Data: 06/06/2001

Situação: Equipado

Fonte: O Autor. Extraído de SIAGAS (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>).

As informações relevantes e coletadas para os objetivos do estudo são:

- a) ponto;
- b) localização;
- c) natureza;

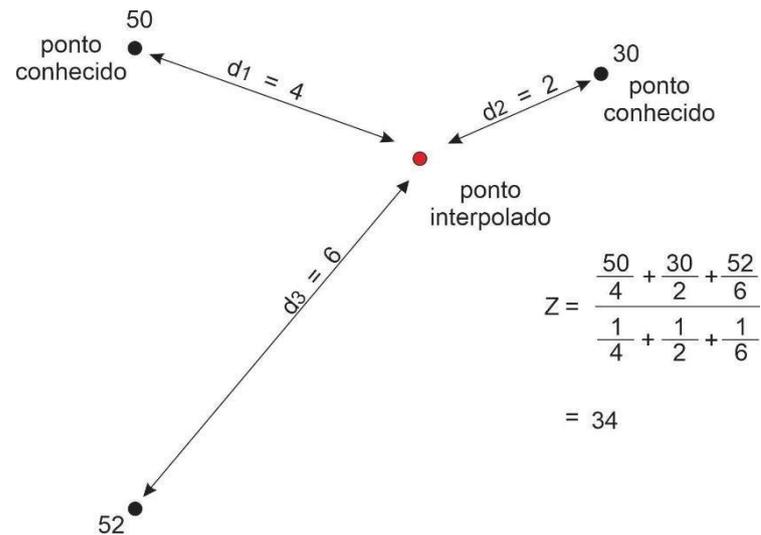
- d) situação;
- e) uso da água;
- f) condição;
- g) tipo de formação; e
- h) nível estático.

Destes, os três últimos são imprescindíveis para aplicação do método.

Para o município de Claro dos Poções a plataforma SIAGAS contém cadastrado 117 poços, dos quais dois foram excluídos: o de número 3100013126 e 31110003. O primeiro por estar localizado além dos limites do município e o segundo por não conter as informações básicas.

Dos 115 poços restantes, 37 faltavam informações sobre o nível estático e 27 sobre o grau de confinamento. O primeiro caso foi resolvido por estimativa pelo método de interpolação inverso do quadrado da distância (IQD), método apropriado para estimar dados hidrogeológicos em aquíferos sedimentares (HERNANDEZ; ATHAYDE; ATHAYDE; LICHT, 2020) e superfícies altimétricas (SILVA; QUINTAS; CENTENO, 2007). Tal método, atribui pesos ponderados aos pontos amostrais, de maneira que a influência de um ponto sobre outro diminui com a distância do novo ponto a ser estimado, conforme ilustrado na figura 16. Para compor as informações faltantes do grau de confinamento foram utilizadas informações do Projeto São Francisco, escala 1:100.000 (rigeo.cprm.gov.br).

Figura 16 - Ilustração da interpolação de um ponto estimado com base em sua distância dos valores de pontos conhecidos



Fonte: O autor. Adaptada de (CEGATTA, 2017).

6.4 Metodologia GOD para avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas

Ao iniciar este estudo, uma revisão bibliográfica foi realizada visando entender a temática que envolve a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação. Foram revistos, os parâmetros e dinâmicas das águas subterrâneas, formação dos aquíferos, além dos meios e fatores de contaminação, vulnerabilidade e a metodologia GOD (FOSTER; HIRATA; ROCHA, 1988) .

Tendo estes conceitos bem esclarecidos, seguiu se para a aplicação do método, em seis etapas:

- Obtenção do grau de confinamento hidráulico do aquífero;
- Obtenção da característica litológica e grau de consolidação;
- Obtenção da distância da água subterrânea à superfície do aquífero;
- Multiplicação dos parâmetros a, b e c para obtenção de um valor pontual de vulnerabilidade;
- Aplicação do método IQD para interpolação da malha de pontos obtida na etapa anterior, para integração desta informação; e
- Discussão dos resultados levando em consideração parâmetros não considerados pelo método, como grau de fraturamento e topografia.

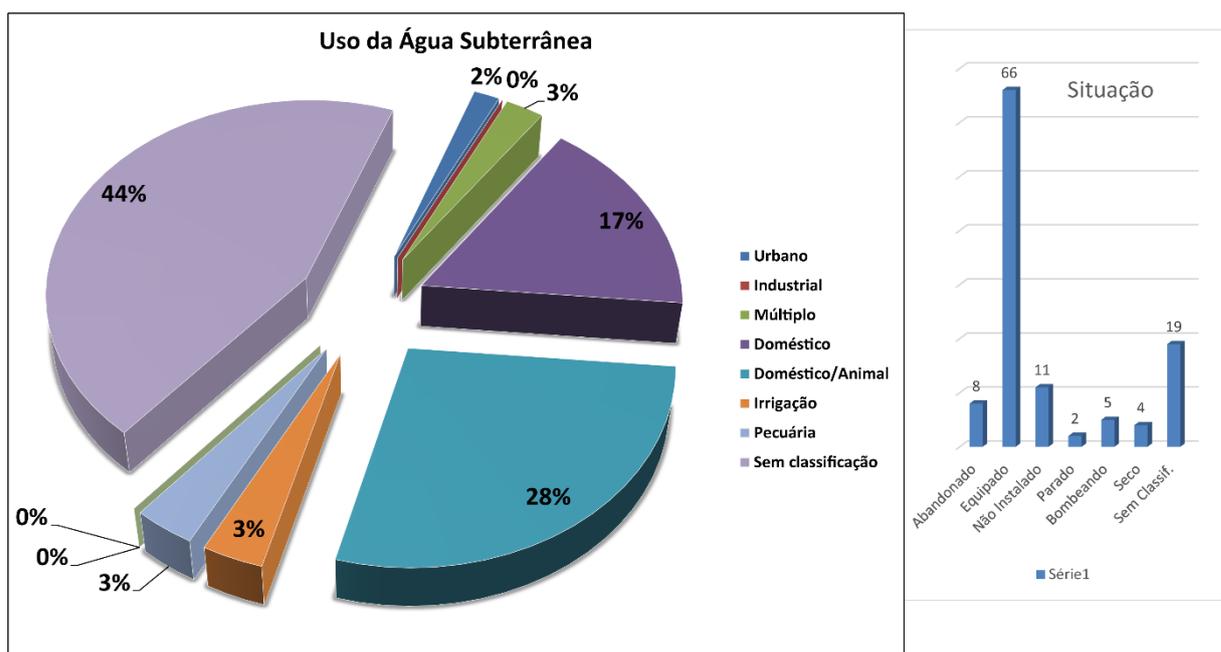
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Uso da água subterrânea e Situação dos poços do município de Claro dos Poções

São escassas as informações sobre o uso da água subterrânea, 51% não possui tal classificação. A parcela restante de 2% é destinado a uso urbano, 17% a uso doméstico, 28% uso doméstico/animal, 3% irrigação, 3% uso múltiplos e 3% para pecuária.

Quanto à situação dos poços, 19% estão sem classificação, 4% seco, 5% bombeando, 2% parado, 11% não instalado, 66% equipado e 8% abandonado (figura 17).

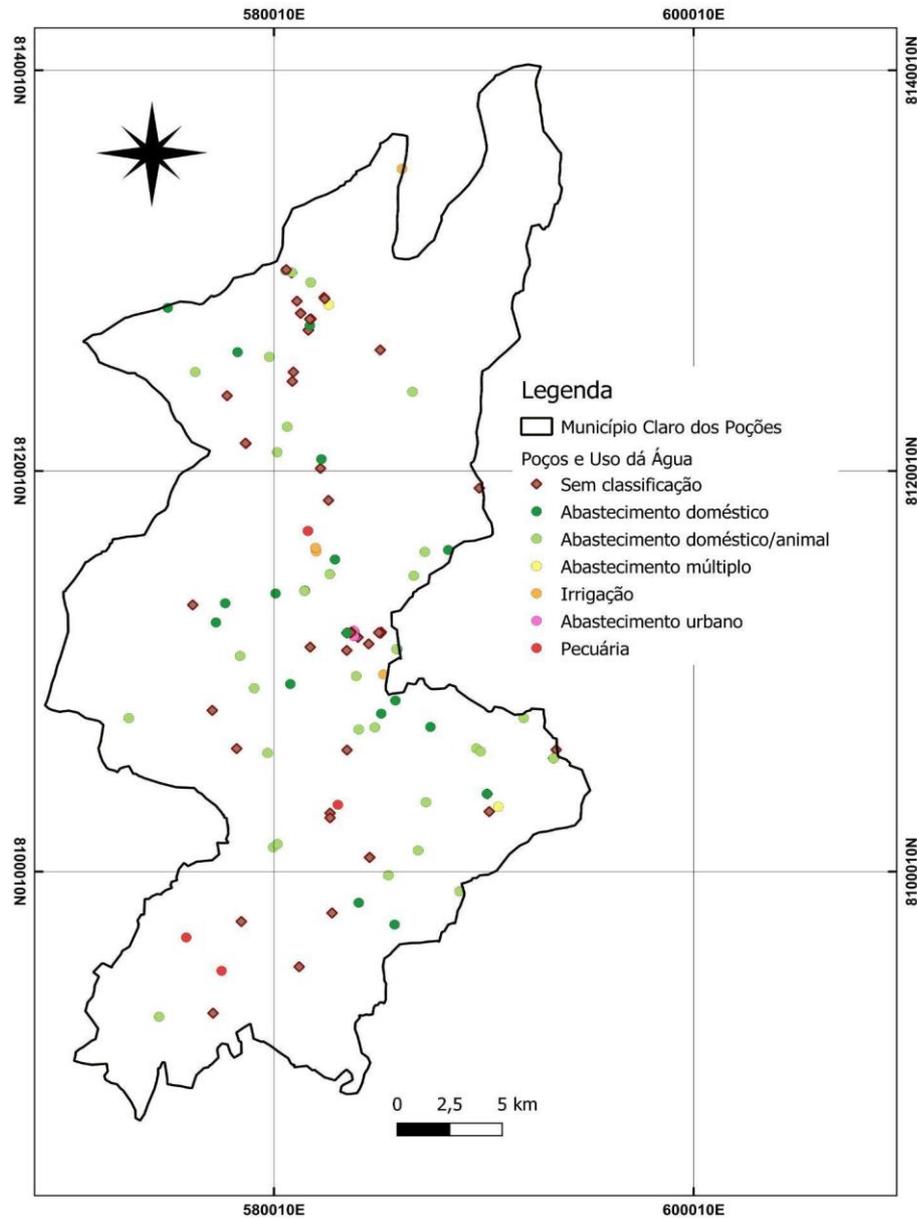
Figura 17 - Uso da água subterrânea e situação dos poços do município de Claro dos Poções



Fonte: O autor.

A figura 18 apresenta o mapa com a localização dos poços tubulares e seus respectivos usos para o abastecimento. Observa-se que existe uma boa distribuição dos poços na região, possibilitando um melhor aproveitamento de dados para a aplicação da metodologia GOD.

Figura 18 - Localização dos poços tubulares e seus respectivos usos para o abastecimento



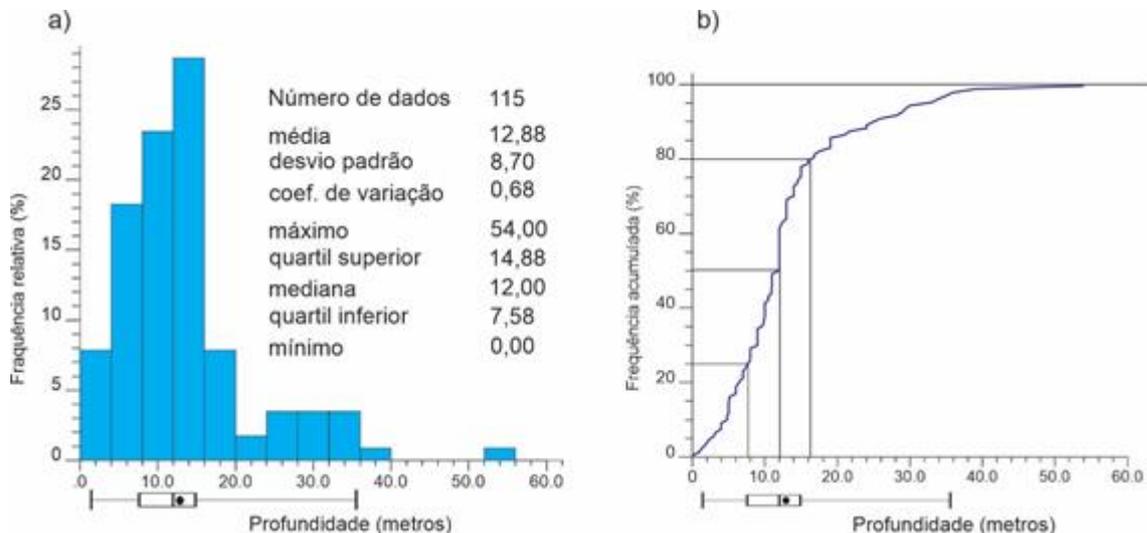
Fonte: O autor.

7.2 Características do nível estático do município de Claro dos Poções

A análise estatística e interpretação das informações sobre o nível estático dos 115 poços descritos nos relatórios do SIAGAS para o município de Claro dos Poções, permitiu caracterizá-lo como raso. O histograma desses valores e seu respectivo

gráfico de probabilidade acumulada é mostrado na figura 19. No geral, a distribuição dos valores do nível estático apresenta uma suave assimetria positiva com centro da distribuição em torno de 12 m de profundidade, conforme evidenciados pela média e mediana. Apresenta uma moderada variabilidade em relação à média, indicada por um desvio padrão de 8,70 m e intervalo interquartil de 7,30 m, ou seja, uma variação de apenas 8 metros em 50% dos dados. Apesar da amplitude total de 54 m de profundidade, cerca de 80% dos valores são menores que 16 m de profundidade, conforme evidenciado no histograma de probabilidade acumulada na figura 19b.

Figura 19 - Resumo estatístico nível estático. a) Histograma da profundidade pela frequência relativa; e b) Gráfico da profundidade pela frequência acumulada.

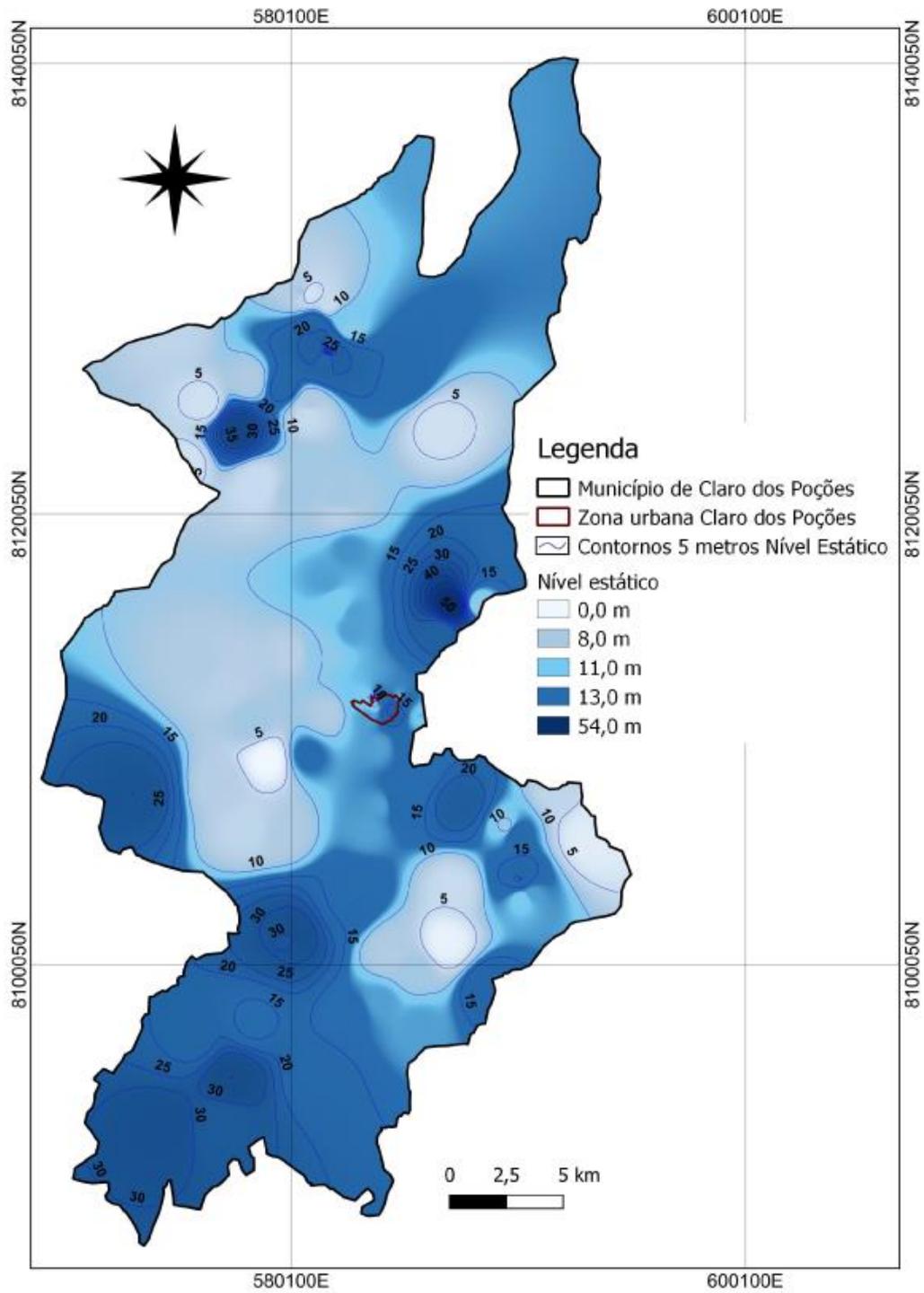


Fonte: O autor. **a)** Análise descritiva mostrada através de histograma; **b)** Frequência Acumulada da quantidade de poços x profundidade nível estático.

Em 80% da área de estudo as profundidades rasas predominam e alcançam até 16 m, sendo mais ocorrentes no Sistema Aquífero Cárstico-Fissural, Fissural e Granular, exceto na porção sudeste na Serra dos Fonseca que alcança 35 m ao nível máximo de 54 m pontualmente, no Sistema Aquífero Granular e na porção norte do Sistema Aquífero Fissural.

As profundidades do nível estático que variam de 16 m a 30 m ocorrem de forma predominante no Sistema Aquífero Cárstico e na porção sul do Sistema Aquífero Fissural (figura 20).

Figura 20 - Mapa de profundidade e predominância de aquíferos.



Fonte: O autor.

7.3 Vulnerabilidade do aquífero do município de Claro dos Poções

A vulnerabilidade natural do aquífero do município de Claro dos Poções foi encontrada por meio da multiplicação dos parâmetros do método GOD, como mostra a tabela 4.

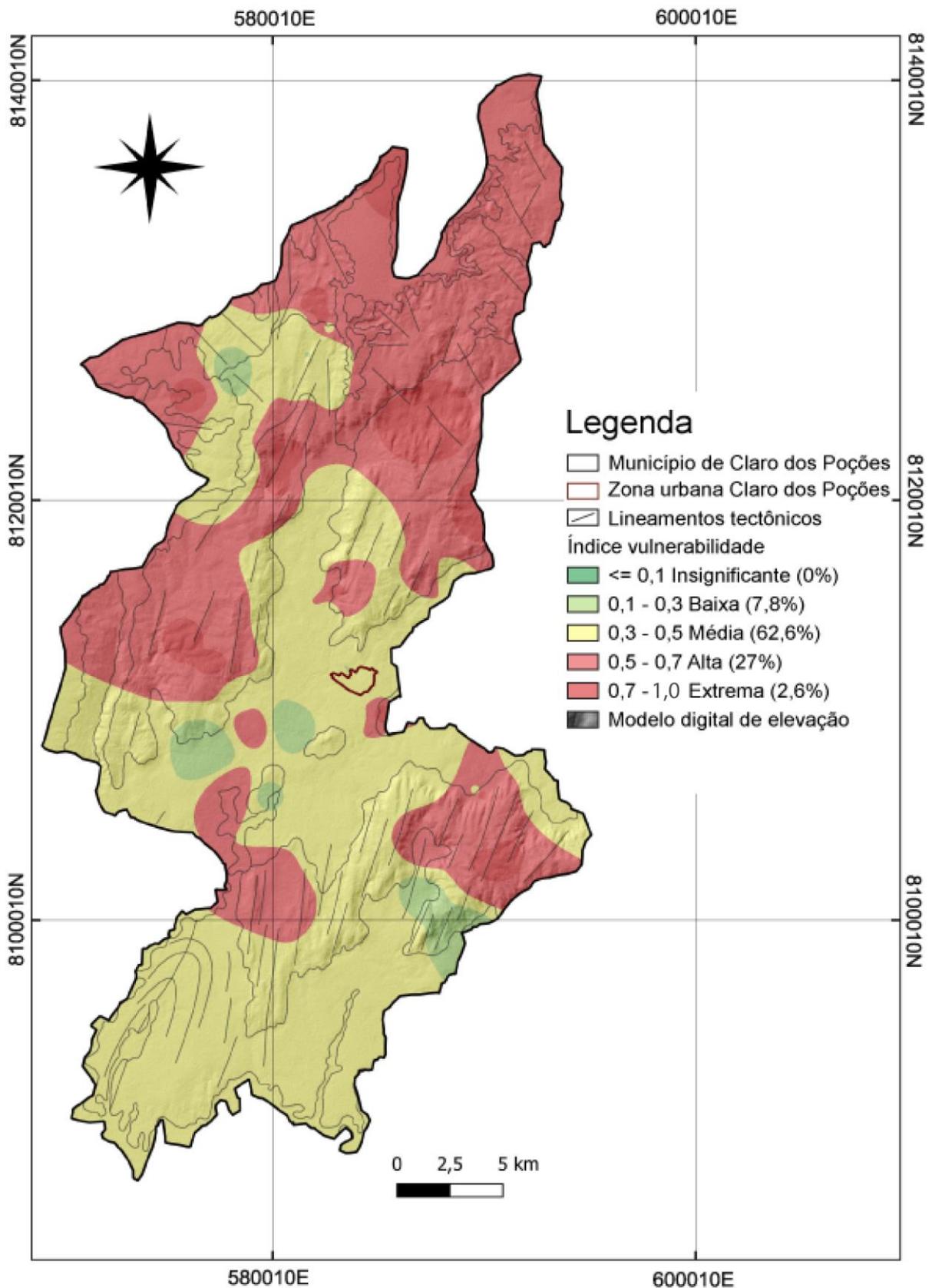
Tabela 4 - Índices de Vulnerabilidade de aquíferos do município de Claro dos Poções

Ponto	Condição	Nível Estático	Parâmetros			GOD	Vulnerabilidade
			Grau de confinamento hidráulico	Ocorrência de estratos	Distância até o lençol freático (m)		
3100000665	Livre	8,00	1,0	0,9	0,8	0,72	Alta
3100000666	Livre	39,00	1,0	0,6	0,7	0,42	Média
3100004900	Livre	12,44	1,0	0,6	0,6	0,36	Média
3100004901	Livre	5,10	1,0	0,6	0,6	0,36	Média
3100004902	Livre	14,00	1,0	0,6	0,8	0,48	Média
3100004903	Semi-Confinado	28,24	0,4	0,6	0,6	0,14	Baixa
3100004904	Livre	10,92	1,0	0,6	0,6	0,36	Média
3100004905	Livre	19,00	1,0	0,6	0,8	0,48	Média
3100004906	Livre	3,10	1,0	0,9	0,6	0,54	Alta
3100004907	Livre	16,78	1,0	0,6	0,6	0,36	Média
3100004908	Livre	9,82	1,0	0,6	0,6	0,36	Média
3100004909	Livre	3,91	1,0	0,9	0,6	0,54	Alta
3100004913	Livre	19,00	1,0	0,6	0,8	0,48	Média
3100004914	Livre	1,74	1,0	0,6	0,6	0,36	Média
3100011009	Livre	12,00	1,0	0,6	0,8	0,48	Média
3100011010	Livre	12,00	1,0	0,9	0,8	0,72	Alta
3100011011	Livre	12,00	1,0	0,6	0,8	0,48	Média
3100011012	Livre	9,00	1,0	0,6	0,8	0,48	Média
3100011013	Livre	7,00	1,0	0,9	0,8	0,72	Alta
3100011014	Livre	9,00	1,0	0,6	0,8	0,48	Média
3100011015	Livre	4,00	1,0	0,9	0,9	0,81	Extrema
3100011016	Livre	13,05	1,0	0,6	0,6	0,36	Média

Fonte: O autor. Resultados obtidos após aplicação da metodologia GOD (FOSTER; HIRATA; ROCHA, 1988)

Os resultados obtidos para área de estudo abrangem quatro classes de vulnerabilidades a contaminação: baixa, média, alta, e extrema conforme o mapa de vulnerabilidade mostrado na figura 21.

Figura 21 - Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas do município de Claro dos Poções após aplicação do método GOD



Fonte: O autor. Resultado obtido após aplicação do método GOD (FOSTER; HIRATA; ROCHA, 1988). Este mapa de vulnerabilidade está sobreposto à um MDE com sombreamento dado com uma incidência de luz com ângulo 315°.

A classe de vulnerabilidade baixa cobre 7,8% da região distribuídas em pequenas porções na área de estudo. A sudeste nas proximidades da fazenda Cipó Fonseca, na direção sudoeste da cidade de Claro dos poções nas proximidades da fazenda Brejinho, Fazenda Vargem das Pedras e na região de Vista Alegre no Córrego Bonsucesso.

Mesmo com porcentagens muito baixas há motivo de preocupação, pois a condição dos aquíferos da área de estudo são classificados como livres e semiconfinados, possibilitando um maior fluxo das águas subterrâneas e facilitando o alcance dos contaminantes adicionados na superfície, pelas atividades antrópicas até o aquífero.

A classe de vulnerabilidade média foi predominante no município de Claro dos Poções, cobrindo 62,6% da região na porção sudoeste no limite com o município de Jequitaiá abrangendo a região do Morrinhos e Serra da Umburana, na porção sul limitando com o município de Francisco Dumont seguindo para a Serra do Garrote, Canto dos Bois e na porção sudoeste da Serra do Pouso Alto. Seguindo para porção central da área no encontro dos rios São Lamberto com o rio Traíras, estendendo para leste na Serra do funil e para oeste até o limite com o município de Jequitaiá, exceto na região da fazenda Riacho e fazenda Vargem Grande que receberam a classe de vulnerabilidade alta. Abrange também a zona urbana de Claro dos Poções estendendo a região do Brejão, fazenda Morro Grande, a porção sul da Serra dos Fonseca e uma porção a noroeste da área de estudo cobrindo parte das localidades a oeste de Olhos de Água, Coqueiros, Vista Alegre, seguindo na direção da fazenda Barreiro do Mato até o lado leste da localidade Jenipapo.

As classes baixa e média na maior parte da área de estudo estão associadas aos vales com cotas variando entre 600 m a 750 m caracterizadas pela predominância das rochas metapelíticas da Formação Santa Helena, apresentando uma pequena porção em cotas acima de 750 m no noroeste da área de estudo. Abrange também uma porção pequena da Formação Lagoa do Jacaré no sudeste da Serra do Pouso Alto, se estendendo até a Serra do Garrote.

A região da Formação Serra Santa Helena engloba o Sistema Aquífero Cárstico, onde o nível do lençol freático na maior parte apresenta a cima da média,

em profundidades de 16 m chegando a 30 m o que pode explicar as classes de vulnerabilidades baixas e médias na área de estudo, associadas também com as rochas de baixo grau metamórfico com empacotamento mais apertado em relação às outras rochas ocorrentes.

A classe de vulnerabilidade alta cobre 27% da região, sendo que a maior parte está localizada na porção norte-nordeste da área de estudo limitando a norte com município de São João da Lagoa, na região da Lagoa do Engenho estendendo na direção do córrego Poço Verde, Rio Fundo, fazenda São Benedito, leste de Olhos de Água, Boa Sorte, seguindo na direção nordeste – leste na região de Três Irmãos, Córrego das Lajes, Lagoa dos Freitas limitando com o município de Montes Claros. Abrange também a região oeste na Serra Santo Antônio até o limite com a Serra das Porteiras no município de Jequitaiá, região da fazenda Vargem Grande, fazenda Riacho, fazenda Maravilhas e a leste na Serra do Pouso Alto no limite com o município de Francisco Dumont.

A classe de vulnerabilidade extrema cobre apenas 2,6% da região distribuídas em pequenas porções por toda área de estudo. No extremo norte na região da Lagoa do Engenho, no Córrego Cachoeirinha, no Córrego do Macaco, no Córrego das Pedras na Serra dos Fonseca, na localidade São Jacinto próximo ao povoado de Boa Sorte, no Córrego Quebra-Ovo na Serra Santo Antônio.

Na área de estudo as classes de vulnerabilidade alta e extrema estão associadas a regiões mais altas nos planaltos São Francisco com cotas variando entre 750 m a 900 m caracterizadas pela predominância de rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré e em menor proporção siltitos da Formação Serra da Saudade, arenitos do Grupo Urucuia e depósitos colúvio-eluviais.

As rochas e depósitos desta região caracteriza os Sistema Aquífero Cárstico-Fissural, Aquífero Granulares e Fissurais, onde o nível do lençol freático apresenta em profundidades menores que 16 m, ocorrendo em 80% da área em profundidades rasas na média de 12 m, o que pode contribuir para vulnerabilidades alta e extrema.

A geologia estrutural do município de Claro dos Poções caracterizada por um conjunto contínuo de anticlinais nas regiões das serras podem influenciar também na vulnerabilidade das águas subterrâneas ocorrentes na porção sul e sudeste devido a concentração de dobras, fraturamento e alargamento dessas estruturas por

dissoluções comumente associados às anticlinais. Tais características podem gerar permeabilidades secundárias pelas mudanças de tensões e dissoluções pelo maior grau de fluxo das águas subterrâneas nos lineamentos, intersecções e fraturas verticais gerando zonas interconectadas de alta permeabilidade. Na porção norte da área, os lineamentos ocorrem em maior quantidade e em diferentes direções aumentando ainda mais a vulnerabilidade regional. Nas zonas de sinclinais caracterizadas pela região de depressão esses fatores atuam com menor grau de aberturas e dissolução das rochas, podendo diminuir as vulnerabilidades nesta região.

A abordagem estrutural da área de estudo juntamente com a metodologia GOD garantem uma melhor percepção e análise das informações complementando a presente pesquisa.

8 CONCLUSÕES

A realização deste estudo permitiu a identificação das condições de ocorrência das águas subterrâneas na região de Claro dos Poções. Na região, as profundidades conhecidas do nível freático são mais rasas menores que 16 m, ocorrente nos estratos metassedimentares intercalados com rochas sedimentares, caracterizando aquíferos na forma livre e semiconfinado a estratos sedimentares e carbonáticos com presença de fraturas e falhas em escala quilométricas, expondo este recurso a uma maior probabilidade à contaminação.

A análise da vulnerabilidade do aquífero à contaminação através do método GOD, em ambiente SIG, se mostrou rápido e eficiente. Quando atrelado ao conhecimento das características hidrogeológicas e litológicas regionais e locais, fundamentais para estas análises e diagnósticos, torna-se mais robusto.

Os resultados obtidos para a área de estudo abrangem quatro classes de vulnerabilidades a contaminação: baixa, média, alta e extrema. Tal estudo despertou a preocupação com relação à possibilidade de contaminação das águas subterrâneas, que se concentram principalmente nos Sistemas Aquíferos Cársticos-Fissurais, Granulares e Fissurais situados no Norte e na Região Centro-Oeste, onde o nível freático é menos espesso. O desenvolvimento de mais estudos, aplicações de outras metodologias para análises e mapeamentos de vulnerabilidade à contaminação natural das águas subterrâneas dessas regiões são de suma importância, dada a elevada vulnerabilidade.

As regiões cársticas requerem um gerenciamento específico para oferecer segurança e qualidade quando se trata dos riscos de contaminação das águas subterrâneas.

Espera-se que estas informações contribuam para auxiliar futuros estudos de gestão destes recursos hídricos subterrâneos com segurança e qualidade pelos órgãos ambientais e secretarias de meio ambiente responsáveis. Também é importante a conscientização da população para um uso consciente da água, por se tratar de um recurso natural limitado em qualidade ser elemento vital para a vida e essencial para diversos segmentos estruturais da sociedade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRANEAS. **Águas Subterrâneas: O que são?** Disponível em: <https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/>. Acesso 16 de Junho de 2021.

ALCOFORADO, F. **A QUESTÃO DA ÁGUA NO MUNDO E SEUS IMENSOS DESAFIOS.** Direito UNIFACS–Debate Virtual, n. 179, 2015. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/redu/article/view/3624>. Acesso em: 16 de Junho de 2021.

ALKMIM, F. F.; BRITO NEVES, B. B.; CASTRO ALVES, A. J. **Arcabouço tectônico do Cráton São Francisco** in: Domingues JML & Misi A.(ed.) o Cráton São Francisco. Salvador, SBG/Núcleo BA/SE, p. 45-62, 1993.

ALKMIM, Fernando Flecha; MARTINS-NETO, Marcelo A. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. **A Bacia do São Francisco geologia e recursos naturais.** SBG, Belo Horizonte, p. 9-30, 2001.

AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Situação da água no mundo.** São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/textos-das-paginas-do-portal/agua-no-mundo/agua-no-mundo>. Acesso em 16 de junho de 2021.

BLONDES, M. S.; GANS, K. D.; THORSEN, J. J.; REIDY, M. E. et al. **US Geological Survey National Produced Waters Geochemical Database v2. 3 (PROVISIONAL).** United States Geological Survey, 2016. Disponível em: https://www.gsa.state.al.us/apps/CAGDV/Metadata/Environmental/USGS_National_Produced_Waters_Geochemical_Database_v2.3_Documentation.pdf. Acesso em: 18 de junho de 2021.

BOSCARDIN BORGHETTI, N. R.; BORGHETTI, J. R.; DA ROSA FILHO, E. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul.** 2004. 214p.

CEGATTA, Í. **Interpolação pelo inverso do quadrado da distância.** Disponível em: <https://italocegatta.github.io/interpolacao-pelo-inverso-do-quadrado-da-distancia/>, 2017. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

CHAVES, M. L. d. S. C.; ANDRADE, K. W.; BENITEZ, L. J. G. **Geologia integrada das Folhas Jequitaiá, Bocaiúva e Montes Claros** .(1: 100.000), norte de Minas Gerais. Geonomos, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11757>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

CHAVES, M. L. d. S. C.; BENITEZ, L. **Folha Jequitaí 1: 100.000: SE 23-XC-II.** 2006. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/10250/1/relatorio.pdf>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

CHAVES, M. L. S. C.; BENITEZ, L.; ANDRADE, K. W.; QUEIROGA, G. N. J. G. **Estratigrafia e evolução geomorfológica do Grupo Bambuí na região de Morro da Garça (MG).** Geonomos, 2007. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11622>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021

CHAVES, M. L. S. C.; ANDRADE, K. W. **Folha Coração de Jesus 1: 100.000: SE 23-X-A-V.** 2014. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

CIRINO, C. G.; GUERRA, H. C. **Use of the energy-soil water content relationship for the physical-hydric characterization of soils.** Agro-Ciencia (Chile), 1994. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=CL9600071>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

CODEMIG. **Portal da Geologia de Minas Gerais: Mapas.** Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

CONNOR, R.K., Engin; Tran, Michael; Unesco; **World Water Assessment Programme: The United Nations World Water Development Report 2021 : valuing water : facts and figures.** UNESCO. 12 p. 2021. Disponível em: <https://en.unesco.org/wwap>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

CPRM, COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: Texto, mapas & SIG.** 2003. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/5006>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.10.

CPRM, COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Serviço Geológico do Brasil.** Disponível em: <https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G. J. G. **Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na Cidade De Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH.** Geociências (São Paulo), 29, n. 3, p. 401-411, 2010. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7145>. Acesso em: 01 de Agosto de 2021.

DARDENNE, M. A. **Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central.** In: Congresso Brasileiro de Geologia. 1978. p. 597-610. Disponível em:

<https://www.academia.edu/17749176/Dardenne-1978-Sintese-Sobre-A-Estratigrafia-do-Grupo-Bambui-No-Brasil-Central>, Acesso em: 02 de Agosto de 2021.

DOS SANTOS, V. S.; LORANDI, R. **Características hidrogeológicas e vulnerabilidade à contaminação das unidades aquíferas da bacia hidrográfica dos Córregos Amaral e Brilhante-Jaciara (MT)**. Revista Brasileira de Geografia Física, 10, n. 05, p. 1624-1637, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/download/234118/27496>. Acesso em: 02 de Agosto de 2021.

DUARTE, R.; MARQUES, M. F.; MORAES, A.; RIBEIRO, J. **Aplicação do método de eletrorresistividade (ce) em área de risco geotécnico em terreno cárstico, Nobres-mt**. Águas Subterrâneas, 2014. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28386>. Acesso em: 02 de Agosto de 2021.

EPA, UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Groundwater Contamination**. In: International Decontamination Research and Development Conference. . (EPA), E. P. A. Washington, DC: 15/283 p. 2015. Disponível em: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=310425&Lab=NHSRC&fed_org_id=1253&subject=Homeland%20Security%20Research&view=desc&sortBy=pubDateYear&showcriteria=1&count=25&searchall=decontamination%20AND%20conference. Acesso em: 03 de Agosto de 2021.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM, 2008. 835p. Disponível em: <http://dspace.cprm.gov.br/handle/doc/14818>. Acesso em: 04 de Agosto de 2021.

FEITOSA FILHO, J. B., TA ; PINTO, JM ;CAVALCANTE, LF, 2000, **Desempenho de um sistema de aeracao de reservatorio de agua constituído por tubos verticais ranhurados com descarga submersa**. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA; CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/134226>. Acesso em: 04 de Agosto de 2021.

FERREIRA, A. N. P.; LIMA, C.; CARDOSO, F.; KETTELHUT, J. **Águas Subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido**. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente. : 40 p. 2007.

FOSTER, S. S.; HIRATA, R. C.; ROCHA, G. A. **Riscos de poluição de águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional**. Águas Subterrâneas, 1988. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22664>. Acesso em: 04 de Agosto de 2021.

FREDDO FILHO, V. J. **Qualidade das águas subterrâneas rasas do aquífero Barreiras: estudo de caso em Benevides, PA**. 2018. Tese de Doutorado. Disponível em:

https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/19641/1/dissertacao_freddo_filho.pdf. Acesso em: 04 de Agosto de 2021.

GABAS, S. G.; LASTORIA, G. J. Á. S. **Perigo à contaminação de aquífero livre em área de preservação ambiental do município de Campo Grande, MS.** 2017. *Águas Subterrâneas*. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29004>. Acesso em: 04 de Agosto de 2021.

GUIGUER, N.; KOHNKE, M. W. **Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos.** *Águas Subterrâneas*, 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22314> Acesso em: 04 de Agosto de 2021.

HEILBRON, M.; CORDANI, U. G.; ALKMIM, F. F. **The São Francisco craton and its margins.** In: *São Francisco Craton, Eastern Brazil*: Springer, 2017. p. 3-13. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-01715-0_1. Acesso em: 04 de Agosto de 2021.

HERCOS, C. M.; MARTINS-NETO, M. A.; DANDERFER FILHO, A. **Arcabouço estrutural da Bacia do São Francisco nos arredores da Serra da Água Fria (MG), a partir da integração de dados de superfície e subsuperfície.** 38, n. 2 suppl, p. 197-212, 2008. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/8172>. Acesso em: 04 de agosto de 2021.

HERNANDEZ, P. G. L.; ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. d. V. M.; LICHT, O. A. B. **Efeito da interpolação de dados hidrogeológicos em aquíferos sedimentares: estudo de caso no estado do Paraná.** *Águas Subterrâneas*, 35, n. 1, p. 1-11, 2020. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29911>. Acesso em: 05 de Agosto de 2021.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; MARCELLINI, S.; VILLAR, P. et al. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento.** 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002928658> .Acesso em: 05 de Agosto de 2021

HIRATA, R. C.; FERREIRA, L. M. J. R. B. d. G. **Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição.** *Revista Brasileira de Geociências*, 31, n. 1, p. 43-50, 2001. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/download/10443/9868>. Acesso em: 05 de Agosto de 2021.

IGLESIAS, M.; UHLEIN, A. J. B. J. o. G. **Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais.** *Brazilian Journal of Geology*, 39, n. 2, p. 256-266, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Mario-Iglesias->

Martinez/publication/283434796_Estratigrafia_do_Grupo_Bambui_e_coberturas_fanerozoicas_no_vale_do_rio_Sao_Francisco_norte_de_Minas_Gerais/links/5c260bbc92851c22a34a7527/Estratigrafia-do-Grupo-Bambui-e-coberturas-fanerozoicas-no-vale-do-rio-Sao-Francisco-norte-de-Minas-Gerais.pdf. Acesso em: 06 de Agosto de 2021.

KALAOUM, J. **Avaliação da vulnerabilidade de contaminação do sistema de Aquíferos do município de Queimados-RJ.** (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://tede.ufrj.br/handle/jspui/2222>. Acesso em: 06 de Agosto de 2021.

LETRA, L. **Unicef: quase 750 milhões de pessoas sem água adequada para beber.** 2015. Disponível em: <https://memoria.ebc.com.br/noticias/meio-ambiente/2015/03/unicef-quase-750-milhoes-de-pessoas-sem-agua-adequada-para-beber>. Acesso em 06 de Agosto de 2021.

LIMA, O. N. B. d. **Estratigrafia isotópica e evolução sedimentar do Grupo Bambuí na borda ocidental do Cráton do São Francisco: implicação tectônica e paleo-ambiental.** 2011. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/10962>. Acesso em: 07 de Agosto de 2021.

MAIA, P. H. P.; CRUZ, M.J.M. **Um novo método para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos.** Brazilian Journal of Aquatic Science Technology, 15, n. 2, p. 29-40, 2011. Disponível em : <https://core.ac.uk/download/pdf/270173147.pdf>. Acesso em: 07 de Agosto de 2021.

MARTINEZ, M. I. **Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do estado de Minas Gerais.** 2007. Dissertação (Mestrado em Geologia)-Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-graduação em Geologia, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-76LHRV>. Acesso em : 07 de Agosto de 2021.

MEDEIROS, C. M.; RIBEIRO, M.; RUFINO, I. A. A.; BARBOSA, D. L. **Mapeamento da vulnerabilidade de parte da Bacia Sedimentar do Baixo Curso do rio Paraíba utilizando o método GOD.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 15, p. 3819-3826, 2011. Disponível em: <http://mart.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.11.16.42/doc/p0296.pdf>. Acesso em 07 de Agosto de 2021.

MELO, S.F.S; ROMANEL, C. **Gestão de Recursos Hídricos no Estado do Amazonas: o caso da Bacia do Tarumã-Acu.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=36988@1>. Acesso em: 08 de Agosto de 2021.

MIDÕES, C.; FERNANDES, J.; COSTA, C. G. d. **Água subterrânea: conhecer para proteger e preservar.** Publicação sob o projecto N° P-IV-, do Programa Ciência Viva,

2001. Disponível em: <https://repositorio.Ineg.pt/bitstream/10400.9/488/1/27629.pdf>. Acesso em: 08 de Agosto de 2021.

MOCELLIN, R. C.; FERREIRA, F. J. F. **Conectividade e compartimentação dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani no sudoeste do estado do Paraná, Brasil**. Brazilian Journal of Geology, 39, n. 3, p. 567-579, 2009. Disponível em: <http://www.geologia.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2017/08/mocelin15.pdf>. Acesso em: 08 de Agosto de 2021.

OLIVEIRA, D. C. **Modelos de Avaliação da Vulnerabilidade de Aquíferos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2013. Disponível em: http://www.muda.ufba.br/twiki/pub/IGeo/GeolMono20122/Monografia_Daniel.pdf. Acesso em: 08 de Agosto de 2021.

PERDIGÃO, T. **Relatório da ONU sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos-2021**. EcoDebate, v.1, n. 1, Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2021/03/24/relatorio-da-onu-sobre-o-desenvolvimento-dos-recursos-hidricos-2021/>. Acesso em: 08 de Agosto de 2021.

RABELO, J.; QUARESMA, E.; WENDLAND, E. **Modelo conceitual de Área de Afloramento do Aquífero Guarani na região central do estado de São Paulo**. Águas Subterrâneas, p.1-20,2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23683/15756>. Acesso em: 08 de agosto de 2021

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S. **Vulnerabilidade do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande Do Sul**. Águas Subterrâneas, 27, n. 2, 2013. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27060>. Acesso em: 09 de Agosto de 2021.

REIS, H. L.; ALKMIM, F. F.; FONSECA, R. C.; NASCIMENTO, T. C. et al. **The São Francisco Basin**. In: São Francisco Craton, Eastern Brazil: Springer, 2017. p. 117-143. Disponível em: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-01715-0_7.pdf. Acesso em: 09 de Agosto de 2021.

ROSENBERGER, M.; VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; FERREIRA, L. M. R. et al. **Vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero bauru na área urbana do município de Bauru (SP)**. Revista do Instituto Geológico, 34, n. 2, p. 51-57, 2013. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/61127142/8952-10176-1-PB20191104-100888-kjdeqf.pdf>. Acesso em: 09 de Agosto de 2021.

SILVA, C.; QUINTAS, M.; CENTENO, J. A. S. **Estudo dos métodos de interpolação do inverso da distância a uma potência**. II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 1, p. 57-62, 2007. Disponível em:

http://www2.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2007_II_SBG/artigos/A_009.pdf. Acesso em: 09 de Agosto de 2021.

SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C.; DE SOUZA, L. C.; GONÇALVES, M. C. et al. **Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 7, p. 191-196, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/8F3f4wBK7FNbgNsPQDhs3JF/abstract/?format=html&lang=pt&stop=previous>. Acesso em: 09 de Agosto de 2021.

TERRA, L. G.; DE BORBA, W. F.; FERNANDES, G. D. A.; TROMBETA, H. W. et al. **Caracterização hidroquímica e vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas no município de Ametista do Sul-RS**. v.15, n. 1, p. 94-104, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/index.php/remoa/article/view/20033>. Acesso em: 09 de Agosto de 2021.

WALDE, D.H.G. **Desenvolvimento faciológico do pré-cambriano entre a Serra Mineira e a Serra do Cabral (região sudoeste da Serra do Espinhaço, Minas Gerais)**. In: Congresso Brasileiro de Geologia (Vol. 30, No. 1978, pp. 711-725). Disponível em: <http://www.sbgeo.org.br/home/pages/44>. Acesso em: 10 de Agosto de 2021.

ZANETTI, N. **Estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero livre no município de Rio Claro/SP**. 2012. (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/92733>. Acesso em: 10 de Agosto de 2021.