

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

PÂMELA BOFF MARCON

AVALIAÇÃO DO PERIGO E VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DA
ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA O MUNICÍPIO DE IPÊ, REGIÃO NORDESTE DO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

CAXIAS DO SUL

2020

PÂMELA BOFF MARCON

**AVALIAÇÃO DO PERIGO E VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DA
ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA O MUNICÍPIO DE IPÊ, REGIÃO NORDESTE DO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos necessários para a obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin

CAXIAS DO SUL

2020

PÂMELA BOFF MARCON

**AVALIAÇÃO DO PERIGO E VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DA
ÁGUA SUBTERRÂNEA PARA O MUNICÍPIO DE IPÊ, REGIÃO NORDESTE DO
ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos necessários para a obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin

Aprovado em: 11/12/2020

Banca Examinadora

Prof. Dr. Taison Anderson Bortolin
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dra. Gisele Cemin
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pois foram a base da minha graduação e de toda a minha dedicação. Agradeço aos meus pais, Rosalita Boff Marcon e Rogério Francisco Marcon, que tornaram esse sonho possível, sempre acreditando no meu potencial, pela força, incentivo e por sempre estarem ao meu lado. Agradeço a minha irmã Samanta Boff Marcon, por me escutar, me apoiar, pela alegria de conviver e por todo o companheirismo.

Agradeço ao Elvis Luis Candiago, pelo apoio nesta minha jornada, pelo companheirismo e pela compreensão, suportando momentos de tristeza e vibrando nos de alegria.

Agradeço ao professor e orientador Taison Anderson Bortolin por todas as horas dedicadas à este trabalho, pelo apoio, acessibilidade, paciência, pelo conhecimento compartilhado, aprendi muito com você e por ter tornado esse estudo possível.

Agradeço à professora Gisele Cemin por ter auxiliado no meu pedido de ajuda, por todo apoio, pelas horas dedicadas, pela atenção e gentileza, pelo conhecimento compartilhado, aprendi muito com você e por fim, por tornar este trabalho possível.

Agradeço aos meus amigos que entenderam meus momentos difíceis e os convites negados, pela amizade e pela paciência que mesmo muitos de longe, outros próximos me apoiaram e me incentivaram a não desistir, torcendo pela minha conquista.

Agradeço a todos que de alguma forma fizeram parte desta jornada, me apoiando, vibrando com minhas alegrias e compartilhando minhas angústias. Obrigado por acreditarem em mim.

Agradeço a UCS e seus professores, por todo o conhecimento, oportunidades e experiências compartilhadas, tornando real o sonho de me tornar Engenheira Ambiental.

Por fim, agradeço à minha pet Luna por estar presente em diversos momentos dos meus estudos, sempre companheira, me recebendo com alegria e disposição, sendo meu ponto de paz e equilíbrio!

RESUMO

A água subterrânea é um recurso muito importante para o fornecimento de água, tanto para o meio urbano como para o meio rural. Dessa forma, preservar a qualidade destas águas é essencial para a população bem como para o meio ambiente. Visando manter a proteção e a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, realizou-se o mapeamento da vulnerabilidade e do perigo à contaminação, ferramentas importantes para uma boa gestão dos recursos hídricos, principalmente em locais que utilizam a água subterrânea para o abastecimento público. A área em que foi realizado o estudo está localizada no estado do Rio Grande do Sul e pertence à Formação Serra Geral, com ocorrência de aquíferos fraturados. Na área em questão possui 45 poços cadastrados no sistema, sendo que 40% possui situação bombeando, com a finalidade de abastecimento público, abastecimento múltiplo, atividade industrial e sem informação. A avaliação da vulnerabilidade à contaminação do aquífero foi realizada para toda a área do município, onde os dados foram obtidos através da caracterização da área, atribuindo pesos de acordo com suas características e gerando mapas com o auxílio dos *softwares* QGIS 3.4.15 e IDRISI Selva, a partir dos métodos DRASTIC que avalia sete parâmetros e o método GOD que considera três parâmetros. Para o perigo à contaminação o método aplicado foi o de POSH, que permite a realização da classificação das fontes pontuais de contaminação para a área urbana e entorno, extraindo informações de um raio de 4 km aproximadamente. A interação entre a vulnerabilidade e as cargas contaminantes do subsolo resultam no mapa do perigo à contaminação da água subterrânea para a área de estudo. Os resultados obtidos para a vulnerabilidade à partir do método DRASTIC indicam que 71,33% da área refere-se a vulnerabilidade baixa e 28,67% da área apresenta vulnerabilidade intermediária. A metodologia GOD aponta que 13,52% da área é composta por uma vulnerabilidade baixa e 86,48% da área apresenta vulnerabilidade média. Relacionado com as atividades potencialmente poluidoras no município, através do método POSH, foram destacadas 14 empreendimentos localizados na área urbana e entorno, sendo eles: indústrias, olarias, postos de combustíveis, posto de saúde, serralherias, esquadrias, cemitério e aterro municipal encerrado. Estes empreendimentos foram classificados como potencial poluidor de risco reduzido, moderado e elevado. O perigo à contaminação da água subterrânea a partir do método DRASTIC obteve como resultado 14,14% risco desprezível, 71,96% risco baixo, 13,40% risco moderado e 0,5% perigo com risco elevado, já o perigo com o método GOD indicou uma área de 19,31% risco baixo, 78,96% risco moderado e 1,73% de risco elevado. Tanto no método DRASTIC como no método GOD a classificação do perigo à contaminação predominante é o de risco baixo à moderado. Dos poços levantados que estão bombeando pra fins de abastecimento público e que compõem a área urbana 3 encontram-se em perigo moderado e 2 no perigo baixo, para o método GOD, já pela classificação do método DRASTIC, apenas um está no perigo moderado, 3 no risco baixo e 1 no risco desprezível. Os resultados apresentados nos mostram que avaliar o perigo à contaminação da água subterrânea permite elencar as áreas que necessitam um maior acompanhamento no que se refere à qualidade e proteção, auxiliando na gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Serra Geral. DRASTIC. GOD. POSH. Mapeamento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo Hidrológico da Água.....	18
Figura 2 – Representação Esquemática da Distribuição Vertical da Água no Solo e Subsolo, Expondo as Diversas Zonas de Umidade	19
Figura 3 – Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul	23
Figura 4 – Formações geológicas do Estado Rio Grande do Sul.....	24
Figura 5 – Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul	25
Figura 6 – Principais Fontes de Contaminação da Água Subterrânea	36
Figura 7 – Estudo sobre a Gestão e Avaliação do Perigo de Contaminação da Fonte de Água Subterrânea nos Cercanais de Manágua - Nicarágua.....	39
Figura 8 – Fluxograma Metodológico do Estudo	40
Figura 9 – Localização do Município de Ipê	42
Figura 10 – Área Urbana Município de Ipê.....	42
Figura 11 – Parâmetros Hidrogeológicos e seus respectivos fatores.....	47
Figura 12 – Parâmetro G: Grau de Confinamento da Água Subterrânea	57
Figura 13 – Parâmetro O: Ocorrência de Estratos de Cobertura	58
Figura 14 – Parâmetro D: Distância até o Lençol Freático ou o Teto do Aquífero Confinado	58
Figura 15 – Classes de Vulnerabilidade do Método GOD	59
Figura 16 – Sistema GOD para a avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação	60
Figura 17 – Classificação e Mapeamento das Fontes de Contaminação Difusas Método POSH.....	62
Figura 18 – Classificação e Ranqueamento das Fontes de Contaminação Pontuais Método POSH.....	62
Figura 19 – Esquema Conceitual para a Avaliação do Perigo de Contaminação da Água Subterrânea	63
Figura 20 – Geologia do Município de Ipê – RS.....	66
Figura 21 – Geomorfologia do Município de Ipê - RS.....	68
Figura 22 – Hidrografia do Município de Ipê - RS.....	69
Figura 23 – Hidrogeologia do Município de Ipê – RS	70
Figura 24 – Distribuição dos Poços no Município de Ipê.....	71
Figura 25 – Situação dos Poços Município de Ipê – SIAGAS	72
Figura 26 – Usos dos Poços para o Município de Ipê – SIAGAS	72

Figura 27 – Profundidade do Nível Estático do Município de Ipê	73
Figura 28 – Classificações do Solo para o Município de Ipê – RS	74
Figura 29 – Vegetação do Município de Ipê - RS	75
Figura 30 – Gráfico da Temperatura Média para a Estação climatológica de Caxias do Sul	77
Figura 31 – Precipitação mensal Estação meteorológica de Caxias do Sul.....	77
Figura 32 – Evapotranspiração mensal Estação meteorológica de Caxias do Sul.....	78
Figura 33 – Uso e Ocupação do Solo para o Município de Ipê no ano de 2018	79
Figura 34 – Uso e Ocupação do Solo do Município de Ipê.....	80
Figura 35 – Clinografia do Município de Ipê – RS	81
Figura 36 – Parâmetro Profundidade do Nível Estático classificado com o índice DRASTIC	82
Figura 37 – Parâmetro Recarga classificado com o índice DRASTIC.....	83
Figura 38 - Parâmetro do Meio Aquífero classificado com o índice DRASTIC.....	84
Figura 39 – Parâmetro Solos classificado com o índice do DRASTIC	84
Figura 40 – Parâmetro Topografia classificado com o índice DRASTIC	85
Figura 41 – Parâmetro Influência da Zona Vadosa classificado com o índice DRASTIC..	86
Figura 42 – Parâmetro Condutividade Hidráulica classificado com o índice DRASTIC ...	86
Figura 43 – Mapa de Vulnerabilidade do Município de Ipê do Método DRASTIC	88
Figura 44 – Parâmetro Grau de Confinamento da Água Subterrânea com índice GOD	89
Figura 45 – Parâmetro da Ocorrência de Estratos de Cobertura com o índice GOD	90
Figura 46 – Parâmetro da Distância até o Lençol Freático com o índice GOD	91
Figura 47 – Mapa da Vulnerabilidade do Município de Ipê do Método GOD.....	92
Figura 48 – Fontes Pontuais do Município de Ipê na área Urbana.....	95
Figura 49 – Classificação das Fontes Poluidoras para o Município de Ipê a partir do Método de POSH	97
Figura 50 – Perigo à Contaminação da Água Subterrânea do Município de Ipê, a partir da metodologia DRASTIC	99
Figura 51 - Perigo à Contaminação da Água Subterrânea do Município de Ipê, a partir da metodologia GOD.....	100
Figura 52 – Poços SIAGAS e o Perigo à Contaminação pelo Método DRASTIC	101
Figura 53 – Poços SIAGAS e o Perigo à Contaminação pelo Método GOD.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação do Perigo de Contaminação relacionado com as Fontes de Contaminação: Método DRASTIC.....	64
Quadro 2 – Classificação do Perigo de Contaminação relacionado com as Fontes de Contaminação: Método GOD	65
Quadro 3 – Valores obtidos na Classificação das Fontes Pontuais de Contaminação para o Município de Ipê: Método DRASTIC	98
Quadro 4 – Valores obtidos na Classificação das Fontes Pontuais de Contaminação para o Município de Ipê: Método GOD.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de Declividade	46
Tabela 2 – Relação entre o Parâmetro Profundidade de Nível da Água e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC	48
Tabela 3 - Relação entre o Parâmetro Recarga e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC	49
Tabela 4 – Classificação do escoamento superficial	51
Tabela 5 - Relação entre o Parâmetro Meio Aquífero e o Índice de Ponderação do Método	52
Tabela 6 - Relação entre o Parâmetro Solo e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC	53
Tabela 7 - Relação entre o Parâmetro Topografia e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC	54
Tabela 8 - Relação entre o Parâmetro Influência da Zona Vadosa e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC	55
Tabela 9 - Relação entre o Parâmetro Condutividade Hidráulica e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC	56
Tabela 10 – Relação entre o Índice DRASTIC e a Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas	56
Tabela 11 – Definição das Classes de Vulnerabilidade do Aquífero pelo Método GOD ...	59
Tabela 12 – Classificação do Potencial de Contaminação das Águas Subterrâneas por Fontes Pontuais.....	63
Tabela 13 – Recarga estimada mensal para o Município de Ipê	82
Tabela 14 – Resultados parciais dos parâmetros do método DRASTIC	87
Tabela 15 – Resultados parciais dos parâmetros do método GOD.....	91
Tabela 16 – Estimativa da Carga Contaminante no Subsolo para o Município de Ipê	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANA – Agência Nacional de Águas
- ASTM – *American Society for Testing Materials*
- AVI – *Aquifer Vulnerability Index*
- BH – Balanço hídrico
- C' – Coeficiente de escoamento superficial
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
- DRASTIC – *Depth to Water, Recharge, Aquifer Media, Soil Media, Topography, Impact of the Vadose Zone, Conductivity of the Water*
- DRH – Departamento de Recursos Hídricos
- EPA – *Environmental Protection Agency*
- ET – Evapotranspiração
- ETR – Evapotranspiração real
- ETP – Evapotranspiração potencial
- FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS
- FUNASA – Fundação Nacional de Saúde
- GOD – Grau de Confinamento, Ocorrência de Estratos de Cobertura, Distância do Nível Freático
- hab – habitante
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IDW – *Inverse Distance Weighted*
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- Km – quilômetro
- Km² - quilômetro quadrado
- m - Metro
- MMA – Ministério do Meio Ambiente
- NBR – Norma Brasileira
- OMS – Organização Mundial da Saúde
- P – Precipitação

PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico

POSH – *Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*

R – Recarga

R_{off} – Escoamento direto ou superficial

RS – Rio Grande do Sul

SASG – Sistema Aquífero Serra Geral

SC – Sem classificação

SEMA – Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul

UCS – Universidade de Caxias do Sul

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UTM – Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	18
3.1.1 Principais usos da água subterrânea.....	21
3.2 GEOLOGIA REGIONAL	22
3.3 HIDROGEOLOGIA REGIONAL.....	25
3.3.1 Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)	26
3.4 VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS À CONTAMINAÇÃO	28
3.4.1 Método DRASTIC	29
3.4.2 Método GOD	32
3.5 CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	34
3.5.1 Estimativa de Carga Contaminante de Subsolo.....	35
3.5.2 Método POSH	36
3.6 PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	37
4 METODOLOGIA.....	40
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	41
4.1.1 Localização Geográfica	41
4.1.2 Geologia e Geomorfologia Local	43
4.1.3 Hidrografia e Hidrogeologia	43
4.1.3.1 Poços cadastrados no município	43
4.1.3.2 Profundidade do Nível Estático	43
4.1.4 Pedologia.....	44
4.1.5 Clima	44
4.1.6 Vegetação e Uso e Ocupação do Solo	45

4.1.7 Clinografia	45
4.2 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO	47
4.2.1 Método DRASTIC	47
4.2.2 Método GOD	57
4.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES DE CONTAMINAÇÃO.....	61
4.3.1 Estimativa da Carga Contaminante no Subsolo	61
4.4 ANÁLISE DO PERIGO DE CONTAMINAÇÃO.....	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	66
5.1.1 Geologia e Geomorfologia	66
5.1.2 Hidrografia	68
5.1.3 Hidrogeologia	69
5.1.3.1 Poços Cadastrados no Município.....	70
5.1.3.2 Profundidade do Nível Estático	73
5.1.4 Pedologia	74
5.1.5 Vegetação	75
5.1.6 Clima	76
5.1.7 Uso e Ocupação do Solo	78
5.1.8 Clinografia	80
5.2 VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS.....	81
5.2.1 Método DRASTIC	81
5.2.1.1 Parâmetro D – Profundidade do Nível Estático.....	81
5.2.1.2 Parâmetro R – Recarga	82
5.2.1.3 Parâmetro A – Meio Aquífero	83
5.2.1.4 Parâmetro S – Solos.....	84
5.2.1.5 Parâmetro T – Topografia.....	85
5.2.1.6 Parâmetro I – Influência da Zona Vadosa	85

5.2.1.7 Parâmetro C – Condutividade.....	86
5.2.1.8 Vulnerabilidade à Contaminação Método DRASTIC	87
5.2.2 Método GOD	89
5.2.2.1 Parâmetro G – Grau de Confinamento da Água Subterrânea.....	89
5.2.2.2 Parâmetro O – Ocorrência de Estratos de Cobertura	90
5.2.2.3 Parâmetro D – Distância até o Lençol Freático	90
5.2.2.4 Vulnerabilidade à Contaminação Método GOD.....	91
5.2.3 Comparação dos métodos DRASTIC e GOD.....	93
5.3 FONTES DE CONTAMINAÇÃO	94
5.3.1 Classificação das Fontes de Contaminação	94
5.3.2 Estimativa da Carga Contaminante no Subsolo	95
5.4 PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	97
6 CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS.....	106

1 INTRODUÇÃO

A água é um bem natural de grande importância, pois é ela quem sustenta todas as formas de vida presentes no planeta (MMA, 2007). Toda forma de água existente, tem seu início através do ciclo hidrológico, onde a qualidade e a quantidade são afetadas com o crescimento da população humana, e conseqüentemente aos seus diversos usos, além de estar ligado ao grau de urbanização das cidades (TUNDISI, 2011). Portanto, é necessário analisar o uso deste bem, evitando os impactos negativos, como o esgotamento dos recursos naturais, para que não afete a geração atual e gerações futuras do planeta e do meio ambiente.

De acordo com Borba et al. (2016), recursos hídricos superficiais vêm sofrendo com a constante contaminação e, deste modo, os recursos hídricos subterrâneos surgem como soluções para o abastecimento de água. Este recurso é essencial no ciclo hidrológico, sendo o elemento que promove o equilíbrio do processo de infiltração e escoamento da água (FRANCO & ARCOS, 2020). Phillippi Junior (2005), destaca a água subterrânea como um recurso essencial para o fornecimento de água, tanto para o meio urbano como para o meio rural, tendo como vantagem os processos naturais de filtragem no subsolo.

No entanto, o desenvolvimento urbano gerado pelo crescimento acelerado, causa a degradação do meio ambiente, afetando tanto as águas superficiais como as águas subterrâneas. As ações antrópicas que agravam os danos são as descargas de resíduos industriais, contendo produtos químicos, bem como resíduos sólidos e efluentes urbanos, sem tratamento e disposição adequada, estes com o crescimento gradativo. Além disso, nos países subdesenvolvidos, a precariedade do saneamento básico e até a falta em determinados locais, juntamente com a fragilidade na fiscalização, refletem na degradabilidade dos recursos hídricos (MANOEL FILHO, 2008).

Compreendendo a importância da qualidade apropriada dos recursos hídricos, em evidência os recursos hídricos subterrâneos, é inevitável sustentar a conservação dos mesmos. Apesar de aparentar ser mais protegida, as águas subterrâneas podem ser contaminadas ou poluídas no momento em que os poluentes e contaminantes penetram no solo, atravessando a parte não saturada (CETESB, 2019). Estas águas quando contaminadas possuem uma recuperação de qualidade muito lenta, tornando o custo do processo de recuperação mais elevado (MMA, 2007).

Com o intuito de identificar níveis de proteções de uma determinada área, realiza-se a avaliação e o mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos (MARTELLI et al., 2010). Como passo fundamental para realizar a análise destaca-se, o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação, além de avaliar o perigo de contaminação,

como consequência irá proteger e manter a qualidade do aquífero (FOSTER et al., 2006). Para Foster e Hirata (1993), o estudo da vulnerabilidade é realizado onde ocorrem as atividades de ação humana, pois são nestes locais que surgem as modificações dos recursos naturais. Em virtude dos diferentes níveis de vulnerabilidade e perigo à contaminação, as medidas preventivas tornam-se mais eficazes em relação à conservação de aquíferos (PEIXOTO et al., 2019).

A vulnerabilidade de aquíferos é constituída por diferentes métodos, sendo que sua eficácia depende dos dados disponíveis e da qualidade dos mesmos. Dentre os métodos mais usuais encontra-se o método DRASTIC, que tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade considerando sete parâmetros hidrogeológicos. A classificação do método é designada de maneira que quanto maior for o índice DRASTIC encontrado, maior será a vulnerabilidade do aquífero à contaminação (GUIGUER & KOHNKE, 2002).

Outro método frequentemente utilizado é o método GOD, considerando 3 parâmetros hidrogeológicos, no qual o método evidencia a vulnerabilidade natural ou intrínseca relacionada ao meio aquífero, possibilitando identificar as classes de vulnerabilidade referente aos seus parâmetros (PINHEIRO et al., 2015). Visto que ocorre sobreposição de mapas de parâmetros, os métodos citados devem ser aplicados com a utilização de sistemas de informações geográficas (SIG).

Possuindo a finalidade de avaliar as fontes pontuais de poluição, o método POSH classifica as fontes de geração de carga contaminante em três níveis, sustentando-se por aspectos de localidade da atividade poluidora, tipos e tamanho e o uso e disponibilidade da água (PINHEIRO et al., 2015). O perigo de contaminação da água subterrânea, proveniente da aplicação dos estudos de vulnerabilidade e da análise das fontes pontuais, pode ser compreendido como a possibilidade de penetração de um contaminante na porção saturada do aquífero, dependendo das condições de vulnerabilidade, podendo alcançar a água subterrânea (PEIXOTO et al., 2019).

Com o intuito de avaliar a vulnerabilidade e o perigo à contaminação da água subterrânea para o município de Ipê – RS, será desenvolvido um estudo que possibilite definir as áreas que precisam ser monitoradas com prioridade, além de definir as áreas mais propensas a poluição, exigindo maior proteção. Sendo assim, os resultados obtidos podem contribuir com a preservação dos recursos hídricos subterrâneos, bem como na delimitação de zonas das áreas territoriais de maior perigo à contaminação no município.

No estudo proposto serão aplicados os métodos de análise DRASTIC e GOD para avaliar a vulnerabilidade do aquífero e o método POSH que classifica as fontes pontuais de contaminação, que pôr fim, é realizado a interação entre as análises, resultando no perigo à

contaminação da água subterrânea. Desenvolvendo o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação do aquífero, bem como a avaliação das fontes pontuais de contaminação, tendo em vista que no município encontram-se áreas de potencial poluidor. Além disso, o abastecimento público do município ocorre totalmente pelo sistema de poços tubulares, ou seja, ocorre a utilização da água subterrânea do sistema aquífero fraturado.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o perigo e a vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea no município de Ipê – RS. Desenvolvendo a interação entre a carga contaminante da área urbana do município relacionada à fonte potencial de contaminação e à vulnerabilidade do aquífero, estabelecendo as áreas com maior suscetibilidade à contaminação e à poluição.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar e comparar os mapas da vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea, utilizando os métodos GOD e DRASTIC;
- Elaborar mapas das fontes pontuais de contaminação da área urbana, fazendo uso do método POSH;
- Avaliar o perigo à contaminação da água subterrânea para a área urbana do município, apresentando as áreas mais propensas à contaminação antrópica.

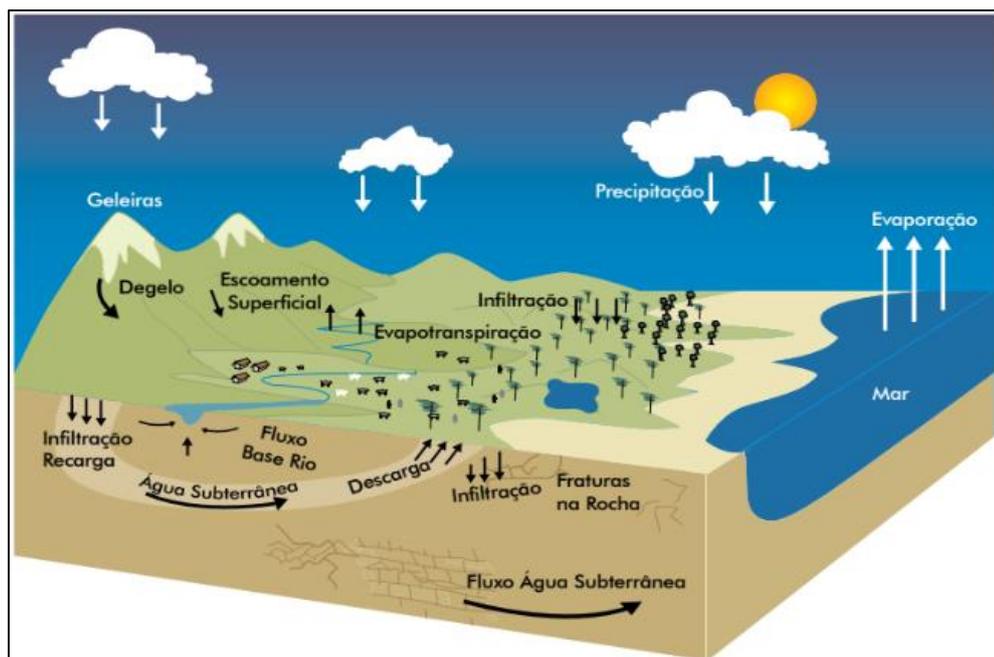
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico é apresentada a fundamentação teórica utilizada como base para o estudo da Vulnerabilidade e do Perigo à Contaminação da Água Subterrânea. Serão abordados assuntos e conceitos, a partir de referenciais, que sustentam e contribuem para o entendimento da temática deste trabalho, além de estudos e aplicações relacionados ao tema abordados por diferentes autores.

3.1 ÁGUA SUBTERRÂNEA

Toda água existente na Terra faz parte do ciclo hidrológico, onde a água está sempre em movimento, alterando somente a sua condição, chuva, neve ou granizo, realizando uma troca entre oceano e atmosfera, conforme evidenciado na Figura 1 (MMA, 2007). Deste modo, a água subterrânea é um elemento essencial presente no ciclo, pois uma parcela da água da chuva que precipita infiltra no solo, realizando o papel de manutenção da umidade do solo, dos fluxos dos rios, lagos, mangues e pântanos (BORGHETTI et al. 2004).

Figura 1 – Ciclo Hidrológico da Água



Fonte: MMA (2007).

Rebouças (2008) define a água subterrânea como o resultado de um processo de infiltração no solo, resultante das águas localizadas em bacias hidrográficas e de uma parcela

da água precipitada em forma de chuva, neblina e neve. Em decorrência desta infiltração, ocorre o armazenamento e o transporte da água no subsolo até o seu deságue em rios.

A Resolução CONAMA nº 396 de 2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, define água subterrânea como sendo aquela que ocorre naturalmente ou artificialmente no subsolo, classificando em seis classes de acordo com o seu uso baseado na análise das características físicas, químicas, biológicas e intrínsecas dos aquíferos (BRASIL, 2008).

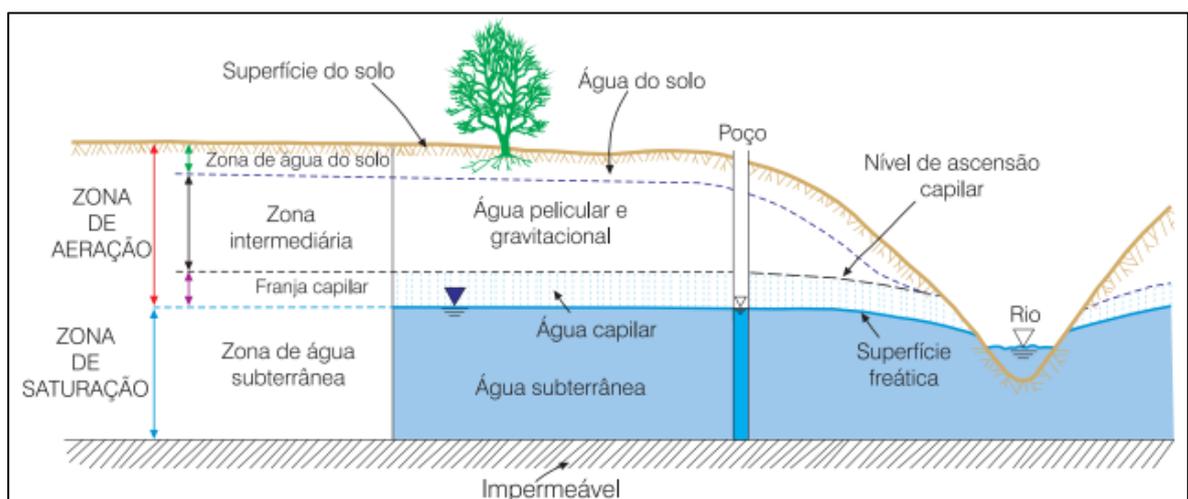
Constituída pelo excesso da água da chuva que infiltra e percorre as camadas no subsolo e entre as rochas, a água subterrânea preenche os espaços vazios das rochas, formando os armazenamentos de água, cuja formação geológica é conhecida como aquífero. No Brasil os aquíferos auxiliam para que a maioria dos rios seja perene, isto é, rios que não secam em períodos de estiagem (ANA, 2017).

Os caminhos pelos quais a água subterrânea percorre desde a superfície do solo até o subsolo, para formar os aquíferos, ocorrem a partir de duas zonas horizontais, sendo elas:

- **Zona não saturada ou zona de aeração:** onde ocorre o preenchimento de água e ar nos espaços vazios e entre os grânulos, situada entre a superfície freática, onde a água encontra-se exposta as pressões atmosféricas (FEITOSA et al., 2008);
- **Zona saturada:** a água preenche todos os espaços vazios, localizada abaixo da superfície freática (FEITOSA et al., 2008).

Estas zonas horizontais, encontram-se na zona vertical localizada abaixo da superfície do terreno, estando entre o nível freático, conforme esquema apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Representação Esquemática da Distribuição Vertical da Água no Solo e Subsolo, Expondo as Diversas Zonas de Umidade



Fonte: Feitosa et al. (2008), modificado de Bear & Verruijt, (1987).

O solo desempenha uma função imprescindível para a água subterrânea, procedendo como filtro natural dos poluentes, proporcionando que ocorra os processos de adsorção físico-química e de degradação bioquímica dos compostos que percolam juntamente com a água. Desta forma, o processo filtrante permite que a água subterrânea seja utilizada como água potável, não havendo necessidade de tratamentos complexos (DE SOUZA, 2009).

Os aquíferos podem ser classificados conforme a pressão das águas na superfície limítrofe, segundo sua geometria e hidráulica, sendo classificados em aquíferos livres e confinados.

- **Aquífero Livre:** Conhecido também por freático ou não confinado, são os aquíferos onde o limite superior é localizado na superfície freática, obtendo todos os pontos sob pressão atmosférica. A manutenção do aquífero ocorre nesta classificação, pois é onde a parte da água da chuva infiltra (MANOEL FILHO, 2008). Ainda para Feitosa et al. (2008), estes aquíferos apresentam maior vulnerabilidade natural à contaminação, pelo fato de ocorrer a recarga de forma mais rápida e em quantidades elevadas;
- **Aquífero Confinado:** Chamado também por aquífero sob pressão, é o aquífero que se situa entre duas camadas impermeáveis, localizadas entre o meio poroso (PEREIRA CABRAL, 2008). Suas características configuram uma vulnerabilidade a contaminação menor, a recarga ocorre de forma mais lenta, devido ao difícil acesso em que o aquífero se encontra (FEITOSA et al., 2008);

Os aquíferos também podem ser classificados quanto à porosidade, ou seja, de acordo com os tipos de vazios existentes, classificados de três formas: Aquífero Poroso ou Granular que armazenam a água nos espaços entre os grãos das rochas ou solos, criados durante a formação da rocha, ocorrendo essencialmente em formações sedimentares, Aquífero Fissural ou Fraturado que armazenam a água nas fraturas presentes das rochas impermeáveis (ígneas ou metamórficas) e o Aquífero Cárstico formado por rochas carbonáticas (sedimentares, ígneas e metamórficas) no qual a água é armazenada através das fraturas causadas pela dissolução do carbonato pela água (MMA, 2007).

O processo no qual a água subterrânea é reabastecida é chamado de recarga, sendo que, a maior parte dos aquíferos são reabastecidos constantemente. A recarga é determinada como um resultado da água que infiltra e alcança o aquífero, ocasionando em um volume adicional no reservatório subterrâneo (LERNER et al., 1990).

Existem duas formas de recarga a natural e a induzida, sendo que a natural ocorre pelos processos de precipitação ou infiltração dos rios, canais e lagos (BORTOLIN, 2018), relacionados com o equilíbrio do escoamento e evaporação (MMA, 2007), já a recarga

induzida ocorre através de atividades antrópicas como a irrigação e a urbanização (BORTOLIN, 2018).

De acordo com SIMMERS (1990), o processo de recarga é dividido em modo direto e indireto. Quando a precipitação infiltra na superfície do solo percolando até alcançar o lençol freático, abrangendo uma extensa área denominando assim de recarga direta, já a recarga indireta ocorre quando à percolação da água do lençol freático é abastecida pelos leitos dos cursos dos recursos hídricos superficiais, como os rios e lagos (BORTOLIN, 2018).

Estimar a recarga natural de um aquífero precisamente é um processo difícil, conforme explanam Honero et al. (2016), pois os processos que envolvem esta estimativa são complexos e fundamentam-se a partir de muitos fatores que atuam em diferentes escalas espaciais. Para estes processos estimativos os aspectos locais são os que mais se enquadram e influenciam para obter os melhores dados estimados. No entanto, as estimativas das taxas de recarga apresentam um grau elevado de incertezas (SIMMERS, 1998). Dessa forma, a metodologia escolhida deve considerar um equilíbrio entre a representação do modelo físico conceitual, juntamente com a realidade dos dados disponíveis para a área (EILERS, 2004).

3.1.1 Principais usos da água subterrânea

As águas superficiais possuem uma facilidade de contaminação maior, devido a sua exposição em locais livres, sem proteção do solo e através dos resultados das atividades antrópicas que ocorrem na superfície do solo. Desta forma, a água subterrânea atua como fonte confiável de abastecimento para o consumo humano, pois possui uma potabilidade natural, além de apresentar baixos custos operacionais, o que torna o uso das águas subterrâneas um mecanismo viável (BORBA et al., 2018).

A partir da década de 70 o uso da água subterrânea obteve uma progressão, intensificando-se nos anos seguintes. Diversos fatores acarretam no desenvolvimento do uso da água subterrânea, motivados pelos avanços da hidrogeologia e pelos avanços da tecnologia, favorecendo assim com os custos da extração. Além disso, a demanda da sociedade por água aumentou, causando um excesso na exploração da água superficial, fazendo com que a mesma não desse conta de abastecer toda população, além de que boa parte desta água já está degradada e impossibilitada de ser usada no consumo humano. Já a água subterrânea possui uma vulnerabilidade menor à contaminação, propiciando uma qualidade melhor para o consumo humano (REBOUÇAS, 2006).

Leal (1999) aponta que os usos da água subterrânea estão vinculados com três fatores: quantitativo que está diretamente ligado com às diferentes taxas de recarga dos aquíferos, qualitativo onde a influência parte da qualidade da água, podendo ser alterada pelas condições climáticas, composição das rochas e a renovação das águas, e por fim, tem o fator econômico sendo capaz de ser alterado por motivos da profundidade do aquífero e das condições necessárias para o bombeamento.

Segundo Foster et al. (2006), a água subterrânea, frequentemente pouco valorizada, representa tanto para o ser humano como para os ecossistemas aquáticos, um papel fundamental para o bem-estar, sendo um recurso essencial para o abastecimento econômico e seguro de água potável, para os meios urbanos e rurais.

No Brasil, o consumo da água subterrânea ocorre especialmente nos grandes centros urbanos, tanto para usos na distribuição pública, como para o consumo privado. Em áreas rurais, o consumo da água subterrânea ocorre principalmente no desenvolvimento das atividades agrícolas, destacando-se a irrigação (MILLON, 2004). Rebouças (2008) enfatiza sobre o uso descontrolado da água subterrânea, ocasionando graves impactos nos fluxos subterrâneos de sistemas naturais e no subsolo acarretando em recalques diferenciados.

Em determinadas regiões do Brasil, o uso da água subterrânea é complementar a água superficial, porém, em outros locais estabelece uma importante função no desenvolvimento econômico (VOGUEL, 2008). Segundo Hirata et al. (2019) os estados mais dependentes deste recurso, em relação a área urbana, são: São Paulo, Piauí, Ceará, Rio Grande do Sul, Bahia e Paraná. Já para a área rural os estados que mais utilizam esse recurso são: Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Tocantins e Rio Grande do Sul.

O acesso a água subterrânea ocorre através de perfurações de poços, ou em nascentes, casos em que a superfície do terreno intercepta o lençol freático, formando fontes aflorantes (MILLON, 2004). Porém, é importante tomar extremo cuidado e seguir as normas vigentes com relação a perfuração de um poço. Rebouças (2008) destaca que a fonte principal de contaminação e degradação da qualidade dos aquíferos, provém da superfície do terreno. Se o poço for mal implantado, a poluição poderá se deslocar pela perfuração abaixo, degradando a qualidade do aquífero, local onde é realizada a retirada da água.

3.2 GEOLOGIA REGIONAL

Desenvolver a caracterização geológica para a região, proporciona para o estudo um embasamento detalhado e objetivo, possibilitando a abrangência para definição de outros parâmetros essenciais para o estudo, destacando: a avaliação da recarga, descarga, fluxo,

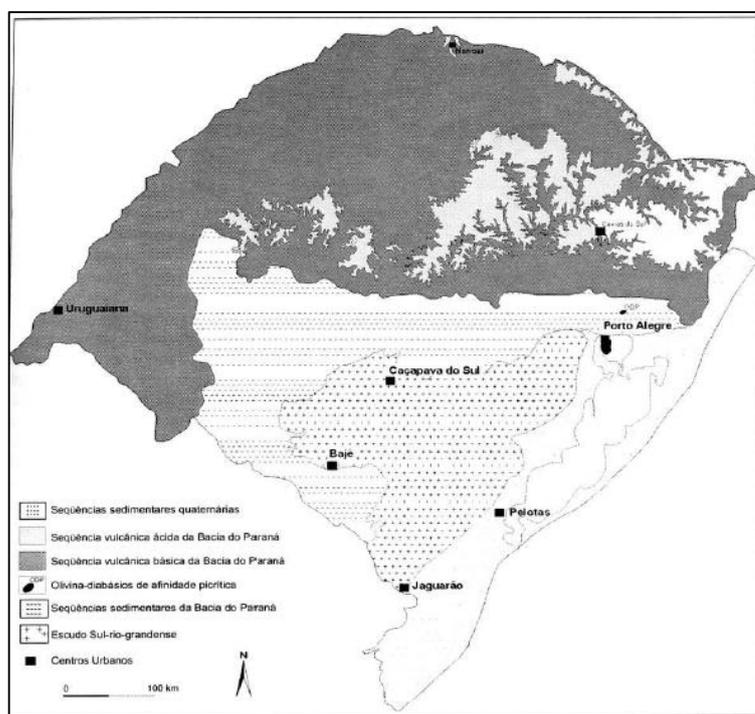
qualidade da água, exploração, entre outros. As análises e explicações de dados quantitativos, perdem a efetividade, sem o entendimento geológico qualitativo de um local (LISBOA et al., 2004).

A composição da geologia do Rio Grande do Sul é constituída por colisões entre continentes, assoalhos oceânicos, arcos de ilhas, vulcões e bacias sedimentares (WILDNER & LOPES, 2010). O estado do Rio Grande do Sul conta com 5 unidades geomorfológicas, divididas pelas regiões do estado. A oeste do estado formou-se a chamada Cuesta do Haedo, ao centro do estado situa-se a Depressão Central, na região sul é formado o Escudo Cristalino Sul-Riograndense, ao norte encontra-se o Planalto Meridional, já no sentido norte-sul, encontra-se a Planície Costeira (ATLAS SOCIOECONÔMICO, 2019).

Pertencentes à Bacia do Paraná a sequência vulcânica básica, composta por rochas basálticas e andesíticas, está presente em mais da metade do estado (ROISENBERG & VIERO, 2002), sendo que os derrames tem espessuras médias que variam de 5 a 50 metros, com predominância de espessuras inferiores a 20 metros. Para a sequência vulcânica ácida, também pertencente à Bacia do Paraná, os derrames médios possuem espessura de 40 metros, a composição destas rochas é caracterizada por riolitos, riodacitos e quartzo-latitos (ROISENBERG & VIERO, 2002).

Na Figura 3 é apresentado o mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul, onde pode ser observado as sequências vulcânicas ácidas e básicas da Bacia do Paraná.

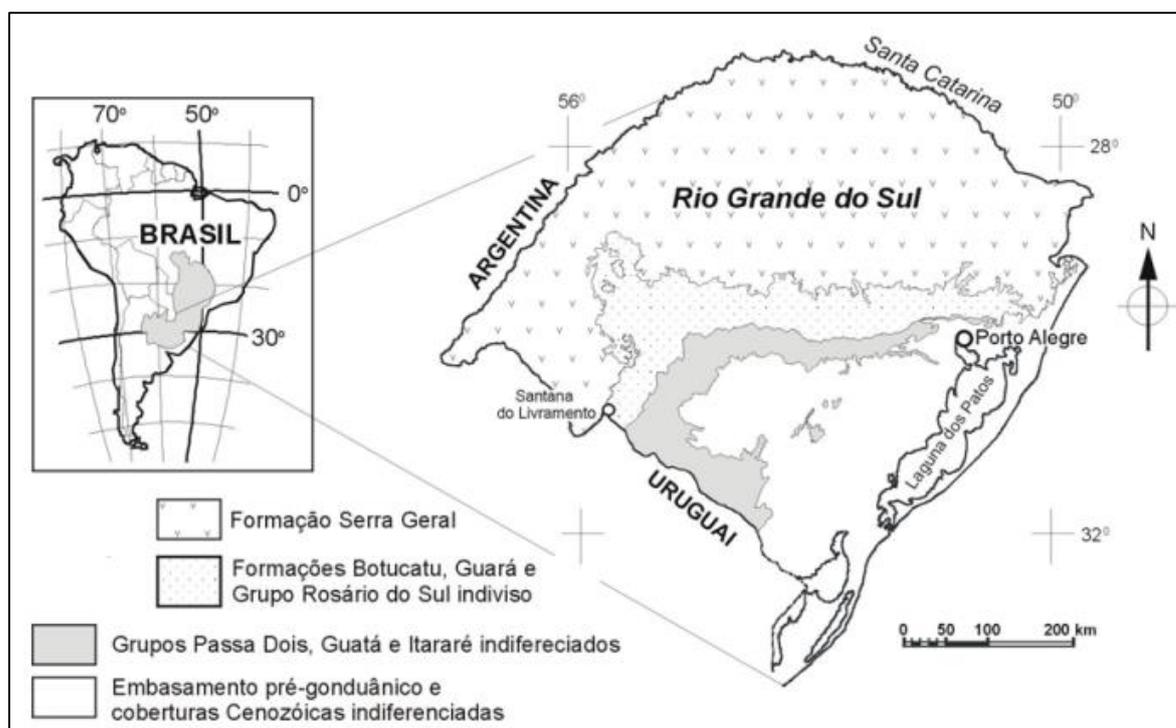
Figura 3 – Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Roisenberg e Viero (2002)

De acordo com a Figura 4 a Formação Serra Geral está presente em mais da metade da superfície do estado do Rio Grande do Sul, sendo constituída por um conjunto de rochas vulcânicas com características de ácidas até básicas, com espessuras médias de 800 metros e máximas de 1.500 metros (ROISENBERG & VIERO, 2002). Segundo o Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul (2006), a Formação Serra Geral é pertencente da Província Paraná, incluída no Grupo São Bento.

Figura 4 – Formações geológicas do Estado Rio Grande do Sul



Fonte: adaptado de Machado (2005).

A composição geológica da Formação Serra Geral é caracterizada por: “Derrames de basaltos, basalto andesitos, riodacitos e riolito, de filiação toleítica, onde intercalam-se arenitos intertrápicos Botucatu na base e litarenitos e sedimentos vulcanogênicos da porção mediana ao topo da sequência (CPRM, 2006).”

As diversas composições da Formação Serra Geral e as características texturais, além dos dados geocronológicos e o arranjo entre os derrames e intrusivas da bacia, ocasionaram a criação da divisão em oito fácies, sendo elas: Jaguarão, Alegrete, Esmeralda, Paranapanema, Caxias, Gramado, Chapecó e Várzea do Cedro (CPRM, 2006).

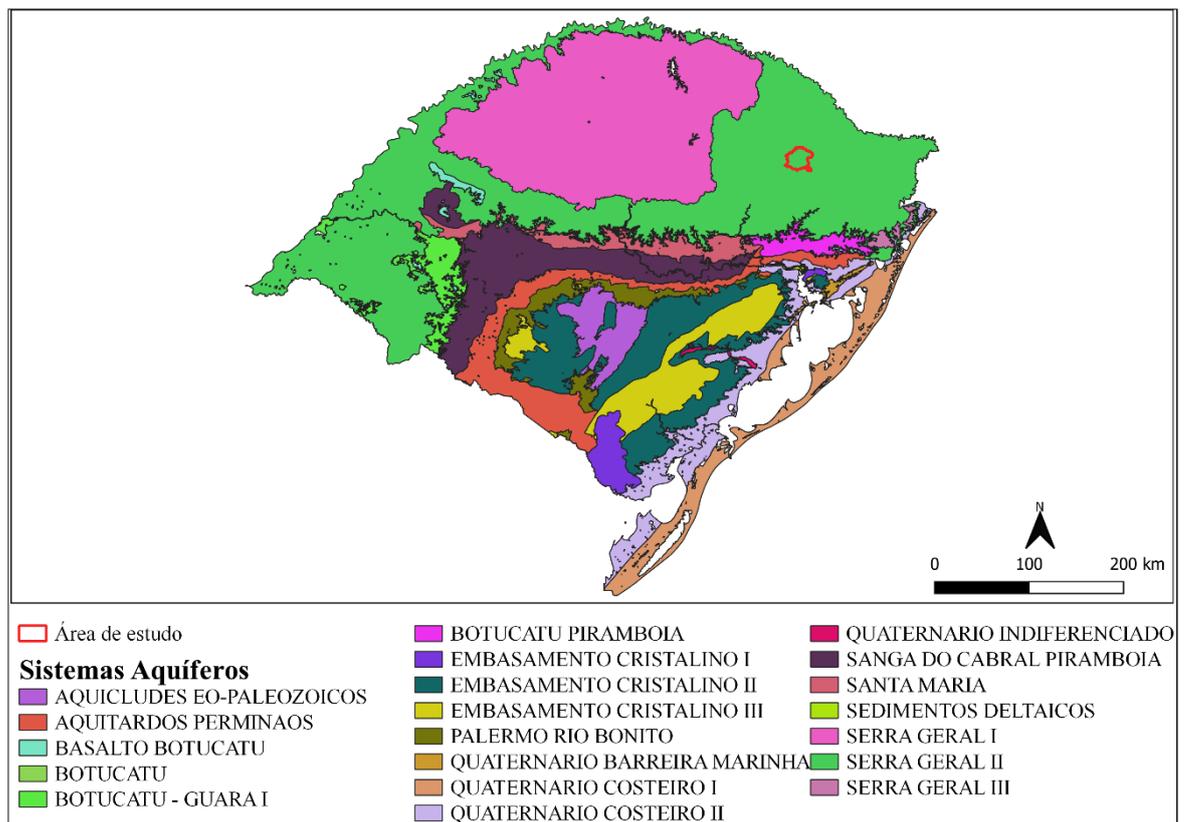
As rochas ácidas são encontradas nas regiões Norte e Nordeste do estado do Rio Grande do Sul e são constituídas por riolitos, riodacitos e quartzo-latitos, com espessuras máximas de 400 metros (WILDNER et al., 2006). Já as rochas básicas se constituem nos aquíferos do centro-sul do Brasil, os derrames possuem espessuras de 10 a 40 metros e

geralmente apresentam na sua composição intercalações de arenito com características da Formação Botucatu (intertrápicas) (NANNI, 2008).

3.3 HIDROGEOLOGIA REGIONAL

O estado do Rio Grande do Sul, possui diversos sistemas aquíferos, cujos podem ser observados no mapa Hidrogeológico, desenvolvido pela CPRM (2005), conforme apresentados na Figura 5. O município do estudo está localizado no Sistema Aquífero Serra Geral, na divisão hidrológica denominada Bacia do Paraná (CPRM, 2005).

Figura 5 – Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul



Fonte: A autora adaptado de CPRM (2005)

Os aquíferos que possuem características de alta a média possibilidade para águas subterrâneas em rochas e sedimentos com porosidade intergranular, são os sistemas aquíferos: Botucatu/Guará I, Santa Maria, Quaternário I, Quaternário Barreira Marinha, Sedimentos Deltaicos, Quaternário Indiferenciado. Os aquíferos que apresentam características de média a baixa possibilidade para águas subterrâneas em rochas e sedimentos com porosidade intergranular, são os sistemas aquíferos: Botucatu/Quará II,

Sanga do Cabral/Pirambóia, Botucatu/Pirambóia, Palermo/Rio Bonito, Quaternário Costeiro II (CPRM, 2005).

Para os aquíferos com características de alta a média possibilidade para águas subterrâneas em rochas com porosidade por fraturas, o único sistema aquífero com essa característica é o Serra Geral I. Já os aquíferos com média a baixa possibilidade para águas subterrâneas em rochas com porosidade por fraturas, encontram-se os sistemas aquíferos Serra Geral II e o Embasamento Cristalino I (CPRM, 2005).

Aquíferos limitados de baixa possibilidade para água subterrânea em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas, possuem dois, sendo eles o Aquitardos Permianos e o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II. E por fim, vem a característica de aquíferos que são praticamente improdutivos em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas, sendo os sistemas aquíferos: Basalto/Botucatu, Botucatu, Serra Geral III, Aquícludes Eo-Paleozóicos, Embasamento Cristalino III (CPRM, 2005).

Além destes sistemas aquíferos, existe o Sistema Aquífero Guarani, classificado como área aflorante e área confinada, no estado do Rio Grande do Sul as unidades hidroestratigráficas que formam este sistema são: Botucatu, Guará II, Sanga do Cabral e Pirambóia (MACHADO, 2005).

3.3.1 Sistema Aquífero Serra Geral (SASG)

O Sistema Aquífero Serra Geral é essencial para o abastecimento da água subterrânea em várias áreas do sul do Brasil, sendo que no Estado do Rio Grande do Sul, boa parte dos municípios pertencentes à metade norte do estado usufrui, para o abastecimento, a água subterrânea proveniente deste sistema aquífero (CASSALI IOP, 2019). Pertencente a Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral este sistema estende-se por uma ampla área localizada no nordeste do planalto rio-grandense, associado diretamente com as rochas vulcânicas ácidas e básicas (MACHADO & FREITAS, 2005). Boa parte da captação da água subterrânea da Formação Serra Geral, é realizada em maior parte no SASG, utilizada para o abastecimento da população (NANNI, 2008).

Devido a Formação Serra Geral, os aquíferos nestas áreas podem ser livres ou freáticos e fraturados. Os fatores condicionantes do aquífero livre são o tipo e espessura do solo, relevo, tipo e estruturação primária da litologia e o clima. Já o principal condicionante do aquífero fraturado são as fraturas e zonas de fraturas ocasionadas pelas estruturas tectônicas, pois o mesmo está localizado nas rochas vulcânicas, quando o aquífero livre se encontra no manto, sobre as rochas vulcânicas (REGINATO & STRIEDER, 2006). As

explorações da água subterrânea acontecem por meio de poços tubulares e captações por fontes, as vazões desta exploração variam entre 1 e 220 m³/h (REBOUÇAS & FRAGA, 1988).

Este sistema é dividido em três unidades, onde cada unidade agrupa regiões de mesma característica. A denominação dos Sistemas Aquíferos é diferenciada por Serra Geral I, Serra Geral II e o Serra Geral III. Todos os Sistemas Aquíferos Serra Geral, podem possuir áreas com influências do Sistema Aquífero Guarani (MACHADO, 2005).

O Sistema Aquífero Serra Geral I, abrange a região centro-oeste do Rio Grande do Sul, especificamente o planalto rio-grandense, constituída principalmente de litologias basálticas, amigdaloides e fraturadas, encoberta por denso solo avermelhado. Nesta região existe capacidades específicas muito diversificadas, possuindo poços não produtivos e muito próximos deste encontram-se poços com ótimas vazões (MACHADO, 2005).

Presente na região oeste do estado, além de extensa área do nordeste, o Sistema Aquífero Serra Geral II, conforme Machado (2005), é um sistema que possui litologia predominantemente de riolitos, riodacitos e em menor proporção os basaltos fraturados.

Por fim, o Sistema Aquífero Serra Geral III é encontrado nas regiões litorâneas do estado, incluindo também morros isolados de basalto em áreas dissecadas no noroeste do estado. São caracterizados pelas litologias ácidas (riolitos e riodacitos) ou as básicas (basaltos). A perfuração de poços não é recomendada nestas regiões (MACHADO, 2005).

O SASG possui como sua recarga principal a chuva e através de suas características fissurais a água se desenvolve por entre as fraturas e descontinuidades que quando interceptadas por zonas de fraturas podem armazenar grandes quantidades de água (NANNI, 2008). Pelo fato da água estar acondicionada em meio aquífero heterogêneo e anisotrópico, as condições do armazenamento e circulação desta água, tornam-se restritos, pois neste meio ocorrem as rochas com falhas, fraturas, juntas, zonas de dissolução, entre outras deste gênero (MACHADO et al., 2005).

Outro fator que influencia na recarga deste sistema é o relevo que possui declividades inferiores a 30%, e os solos do tipo neossolos e cambissolos, sendo que as maiores vazões ocorrem em classes de solos cambissolos, argissolos e nitossolos (REGINATO, 2003).

Segundo o Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul (CPRM, 2005), o município encontra-se sobre o Sistema Aquífero Serra Geral II, que possui como característica aquíferos de média a baixa possibilidade para águas subterrâneas em rochas com porosidade por fraturas. O SASG II é um aquífero com características fissurais, onde a profundidade média dos poços é de 110 m e as vazões ficam em torno de 40 à 100 m³/h (IBGE, 2015).

Este sistema está ligado à Unidade Hidroestratigráfica da Serra Geral, apresenta características como a capacidade específica inferior a 0,5 m³/h/m e dispõe de baixa concentração de sólidos totais dissolvidos, apresentando valores menores que 250 mg/L (MACHADO & FREITAS, 2005). As vazões presentes neste aquífero são classificadas como variáveis, tal como as capacidades específicas classificadas como baixas, particularidades ocasionadas pelas fortes anisotropias do aquífero (REGINATO & AHLERT, 2013).

A existência de fraturas neste sistema está diretamente vinculado com a circulação da água subterrânea, além de que o fator secundário pode estar ligado com a estrutura primária da rocha (REGINATO & AHLERT, 2013). Ao observar a circulação da água subterrânea neste meio, por se tratar de um sistema fraturado, faz com que ocorra a interconexão com o Sistema Aquífero Guarani (SAG), este localizado abaixo dos derrames vulcânicos pertencentes a Bacia do Paraná (VARGAS et al., 2018).

3.4 VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS À CONTAMINAÇÃO

Atividades antrópicas potencialmente poluidoras que agem diretamente nas alterações da qualidade da água dos aquíferos, possuem relação direta com a vulnerabilidade do aquífero e desta forma a preservação dos aquíferos, torna-se um dos principais enfoques de estudos nesta área. Um dos meios de estudo para promover a proteção dos aquíferos, logo a qualidade dos recursos hídricos, é realizar estudos de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos (REGINATO & AHLERT, 2013).

No sentido amplo do termo vulnerabilidade, pode-se empregar para qualquer elemento ambiental, sendo determinado como a sensibilidade que tal elemento possui perante os impactos de origem natural ou antrópica (VOGUEL, 2008).

Descrito por Foster e Hirata (1988), o conceito de vulnerabilidade do aquífero à contaminação é definido como “o conjunto de características intrínsecas dos estratos que dividem o aquífero saturado da superfície do solo, determinando a suscetibilidade de sofrer os efeitos divergentes de uma carga contaminante aplicada na superfície, desta forma, apresentando ou não o risco à contaminação.”

A *American Society for Testing Materials* (ASTM) (1996), relacionou a vulnerabilidade dos aquíferos com a facilidade que um contaminante tem de deslocar-se para as águas subterrâneas. À vista disso, a vulnerabilidade depende das características do aquífero, da superfície do solo (uso e ocupação do solo, topografia, geomorfologia, entre outros) além do contaminante presente.

Hirata et al. (1997), descrevem em relação à vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, apresentando o significado de maior ou menor suscetibilidade de ser atingido por uma carga poluidora. Logo, torna-se um estudo importante, no qual destaca as áreas onde os recursos hídricos subterrâneos necessitam uma proteção maior.

Para Foster et al. (2006), a vulnerabilidade à contaminação de um aquífero é o conjunto de características intrínsecas que determinam a sua suscetibilidade a ser eventualmente afetado por uma carga contaminante.

Pesquisadores e responsáveis pelo gerenciamento das águas subterrâneas, preocupados com a degradação dos recursos hídricos, desenvolveram metodologias que procuram avaliar o quanto um aquífero é vulnerável à contaminação (MILLER, 2004). Dentre as diferentes metodologias existentes, os métodos GOD (FOSTER & HIRATA, 1988), DRASTIC (ALLER et al., 1987) e o método AVI (VAN STEMPVOORT et al., 1992), são os mais utilizados atualmente. Para obtenção de resultados de cada metodologia, as mesmas devem ser aplicadas por meio da utilização de informações geográficas (SIG), pois ocorre a sobreposição de mapas com os parâmetros analisados (GUIGUER & KOHNKE, 2002).

3.4.1 Método DRASTIC

O método DRASTIC desenvolvido por Aller et al. no ano de 1987, para a Agência Ambiental Norte Americana (EPA), é um sistema padronizado de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos diante de eventos de poluição. A metodologia tem como objetivo principal colaborar na atribuição de recursos e na priorização das diversas atividades com relação a água subterrânea. Através de mapas de vulnerabilidade é possível definir as áreas que devem ser monitoradas de forma mais intensiva, também pode-se aplicar para as áreas que devem obter maior proteção, perante as poluições (GUIGUER & KOHNKE, 2002).

Para realizar a metodologia, deve-se seguir as seguintes premissas:

- O contaminante é inserido na superfície;
- O contaminante atinge a água subterrânea através da precipitação;
- O contaminante possui a mobilidade da água;
- A área a ser avaliada precisa ter uma dimensão de no mínimo 40 hectares (GUIGUER & KOHNKE, 2002).

O método fundamenta-se de sete fatores hidrogeológicos, sendo atribuídos para cada letra do nome DRASTIC. Logo, D – profundidade, R – recarga, A – meio aquífero, S – solos, T – topografia, I – influência da zona vadosa e C – condutividade hidráulica. Estes parâmetros possuem fatores (“w”) que variam de 1 a 5 que serão multiplicados posteriormente por pesos (“r”) atribuídos baseados na interpretação de dados e que variam de 1 a 10 (ALLER et al. 1987).

A descrição para cada parâmetro pode ser observada a seguir, conforme Aller et al. (1987) propôs:

- Profundidade: retrata o nível estático da água subterrânea, ou seja, a probabilidade do contaminante alcançar a zona saturada;
- Recarga: representa a quantidade de água que infiltra no solo atingindo o aquífero;
- Meio Aquífero: é a composição do material e a sua capacidade de degradação;
- Solos: é a camada superficial, encarregado pela infiltração da água;
- Topografia: influência na possibilidade de ocorrer recarga ou escoamento superficial;
- Influência da Zona Vadosa: pertence a camada não saturada, responsável pela atenuação dos contaminantes;
- Condutividade Hidráulica: representa a movimentação dos contaminantes no interior do aquífero.

Esta metodologia pode ser aplicada em estudos de grau de contaminação ou exposição, aplicados para o grau de vulnerabilidade à contaminação. O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), foi avaliado por Reginato e Ahlert (2013), para a região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Um dos métodos avaliado neste estudo foi o DRASTIC. O mapa gerado por este método aponta um resultado para a região de três classes de vulnerabilidade, tendo como resultados principais a intermediária (54,1%) e a baixa (45,6%).

O grau de vulnerabilidade que o método DRASTIC apresenta, pode ser aplicado para usos nos Sistemas Aquíferos, como exemplo o Sistema Aquífero Guarani, análises de vulnerabilidade para águas subterrâneas em determinada cidade ou município, em suas áreas urbanas e/ou rurais, as bacias hidrográficas e sub-bacias também recebem este estudo. Além disso, o estudo pode ser focado em determinado local, como avaliação do índice de suscetibilidade dos poços tubulares conforme Borba et al. (2016), que realizaram um estudo determinando a suscetibilidade das captações por poços tubulares para o Sistema Aquífero Guarani em um município do Rio Grande do Sul.

Muradás et al. (2010) levantaram dados geomorfológicos e hidrogeológicos para mapear a vulnerabilidade de contaminação do Aquífero Guarani para os municípios de

Portão e Estância Velha no Rio Grande do Sul. O estudo identificou características intrínsecas do geossistema aquífero, como a função hídrica dos domínios de solo. Na comparação do mapa de vulnerabilidade com os dados levantados no campo e laboratório, o mapa mostra-se com resultados coerentes. Com relação às classes, 25% da área aponta alto grau de vulnerabilidade, 72,4% com grau intermediário e 2,6% da área possui baixo grau de vulnerabilidade.

A região norte do estado do Rio de Janeiro, especificamente no município de Campos dos Goytacases, possui dois tipos de aquíferos o fraturado e o poroso. Para a determinação da vulnerabilidade à contaminação, os autores Alves et al. (2009) selecionaram o aquífero poroso da região e aplicaram a metodologia DRASTIC, obtendo como resultado uma variação de baixa a extrema. Na área central a vulnerabilidade foi extrema, devido a área ser composta por sedimentos quaternários. Regiões com sedimentos de Formação Barreira a vulnerabilidade variou de alta e moderada. Nos solos residuais provenientes do embasamento cristalino a vulnerabilidade variou de alta, moderada e baixa.

A avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos foi realizada pelos autores Novais et al. (2019). O local do estudo foi no município de Divinópolis, no estado de Minas Gerais, onde ocorre a disposição final dos resíduos sólidos urbanos, o local não possui controle das poluições. A vulnerabilidade que os autores encontraram nesta área com a aplicação do método DRASTIC é caracterizada como baixa, sendo assim possui uma vulnerabilidade à contaminação baixa. Já o índice de poluição que determinaram apontou elevada capacidade à contaminação.

Borba et al. (2020) aplicou a metodologia DRASTIC para determinar a suscetibilidade da Bacia Hidrográfica dos rios Turvo, Santa Rosa e Santo Cristo, localizada no estado do Rio Grande do Sul, o resultado obteve um predomínio da classe moderada a baixa para vulnerabilidade à contaminação.

Borges et al. (2017) desenvolveram um estudo em escala regional para o estado do Paraná, para as águas subterrâneas pertencentes ao SASG, um dos métodos aplicados foi o método DRASTIC. O resultado obtido neste estudo foi de vulnerabilidade baixa (5,01%), moderada (83,13%) e elevada (11,85%). Aplicando o método para o município de Cascavel no Estado do Paraná, Borges et al. (2017) obtiveram como resultado para a vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas as seguintes classificações: baixa (1,23%), moderada (84,06%) e elevada (14,71%).

Estudo realizado para analisar a vulnerabilidade da água subterrânea do SASG para o município de Caxias do Sul, foi desenvolvido através do método DRASTIC por Gomes et

al. (2019) e obtiveram como resultado uma vulnerabilidade insignificante (0,49%), muito baixa (39,26%), baixa (57,55%) e moderada (2,70%).

3.4.2 Método GOD

A metodologia GOD desenvolvida por Foster e Hirata no ano de 1988, para a Organização Mundial da Saúde (OMS), atende os requisitos para os aquíferos que não possuem todos os componentes mensurados simplificando os parâmetros a serem analisados. A metodologia utiliza três parâmetros, sendo eles especificados em cada letra: G – grau de confinamento hidráulico da água, O – ocorrência de estratos geológicos e grau de consolidação da zona não saturada ou camadas confinadas e D – profundidade do nível da água subterrânea (GUIGUER & KOHNKE, 2002).

O método avalia a vulnerabilidade à contaminação através dos mecanismos de recarga de um aquífero e na capacidade natural de atenuação dos efluentes, variando em razão das condições geológicas superficiais e da profundidade do nível de água (VOGUEL, 2008).

Como exemplo de aplicação para áreas pontuais tem o estudo realizado por Feron (2013), que aplicou o método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos, tendo como enfoque no estudo os postos de combustíveis em uma cidade do Rio Grande do Sul.

Santos et al. (2007), realizaram o estudo de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral/Guarani no município de Quaraí/RS. A metodologia utilizada foi o método GOD, obtendo uma vulnerabilidade na área de estudo classificada como baixa ou desprezível, nos locais que possuem aquíferos confinados em basalto. Já para as áreas que possuem aquíferos livres, com ocorrência de arenito e basalto, a classificação encontrada foi média a alta. No geral a classe da vulnerabilidade que predominou foi a classificação desprezível.

Através da aplicação do método GOD, Pinheiro et al. (2015) determinaram a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos para a cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul. O estudo contou com a utilização dos dados de 36 poços tubulares na região, destes 30% apresentaram a classificação moderada a alta, de modo que o estudo identificou 4 classes de vulnerabilidade dos aquíferos.

Oliveira (2017) e Silva et al. (2020), avaliaram a vulnerabilidade à contaminação para o município de Caçapava do Sul, localizado na região da Campanha no estado do Rio Grande do Sul, a partir do método de GOD, gerando mapas de índices de vulnerabilidade apontando a situação do território em estudo.

Costa (2018) determinou a vulnerabilidade a contaminação do Sistema Aquífero Guarani, para os municípios de Ivoti, Dois Irmãos e Morro Reuter, obtendo como resultado uma vulnerabilidade média que ocorre nas regiões de aquíferos livres e nas áreas de aquífero confinado a vulnerabilidade dominante é da classe insignificante a baixa.

A avaliação da suscetibilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral, foi avaliada no município de Aratiba – RS pelos autores Favaretto et. al (2020), o método usado foi o método de GOD, apresentando um resultado de vulnerabilidade variando de insignificante à média.

A Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria localizada no estado do Rio Grande do Sul obteve a avaliação da vulnerabilidade à contaminação através do método de GOD pelos autores Lobler et al. (2016), a bacia possui predominância de arenitos porosos/permeáveis, além de possuir níveis freáticos rasos, tornando boa parte da bacia de risco alto a vulnerabilidade.

Outro método aplicado por Reginato e Ahlert (2013) para o SASG, foi o método GOD, onde os resultados indicam para a região à ocorrência das classes de vulnerabilidade baixa (79,1%) e média (20,9%). De modo geral, o SASG apresenta vulnerabilidade baixa a média, apresentando um bom grau de proteção.

Lobler e Silvério da Silva (2014) avaliaram a vulnerabilidade à contaminação dos poços para o município de Nova Palma no Rio Grande do Sul, pertencente aos Sistemas SASG e SAG, obtendo os resultados a partir da aplicação do método GOD: 8% das captações em área da classe de vulnerabilidade insignificante; 15% baixa; 31% média; 31% alta e ainda, 15% da classe extrema.

Ibirubá município localizado no Estado do Rio Grande do Sul possui como abastecimento público de água potável 100% por fontes provenientes da água subterrânea, na qual está inserida no SASG, ao determinar a vulnerabilidade à contaminação através do método GOD, Canova e Salazar (2018), obtiveram como resultado para a vulnerabilidade como insignificante.

Fernandes et al. (2020) avaliou a vulnerabilidade natural à contaminação do SASG para o município de Panambi – RS, aplicando o método GOD obtendo como resultado em maior parte do aquífero classes de vulnerabilidade que variaram de insignificante à baixa. Para o município de Erechim – RS, Silvério da Silva et al. (2013), obtiveram como resultado na classe de vulnerabilidade média, 85,5% da área total, para a classe baixa foi de 12,7% da área e apenas 1,8% inseriu-se na classe insignificante.

Em um estudo desenvolvido de forma regional para os aquíferos pertencentes ao SASG no Estado do Paraná, trouxeram como resultado as seguintes classes de

vulnerabilidade, desenvolvidas pelo método GOD pelos autores Borges et al. (2017): vulnerabilidades baixa (66,21%), moderada (0,67%), alta (14,32%) e extrema (18,81%).

3.5 CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Conforme CPRM (2012), uma água contaminada é aquela que possui organismos patogênicos, substâncias tóxicas e/ou radioativas, com proporções prejudiciais à saúde humana. Voguel (2008), define contaminação como um método de poluição no qual a concentração de poluentes não esteja enquadrada dentro dos padrões legais estabelecidos.

A contaminação da água subterrânea é toda e qualquer degradação que afeta diretamente a qualidade da água, resultantes de atividades antrópicas, ocasionadas voluntariamente ou de forma acidental (VOGUEL, 2008). Foster et al. (2002), afirma que a contaminação surge quando uma carga de contaminantes afeta o subsolo e deste modo o subsolo não consegue depurar, excedendo a sua capacidade natural. Essa carga de contaminantes advém de ocupações inadequadas em áreas, sem constar um estudo prévio da capacidade do solo em depurar as substâncias introduzidas no solo (MINDRIZ, 2006).

As fontes de contaminação são determinadas para os locais onde existe ou já existiu atividades antrópicas, com prováveis riscos de contaminação do solo, relacionadas com o uso deste solo (URSULINO, 2014). Feitosa et al. (2008), classificam os impactos ambientais nos aquíferos de duas formas, sendo elas:

- **Contaminação:** Ocorre de maneira que a área é ocupada de modo irregular, não verificando a vulnerabilidade, ou seja, a eficiência que o solo tem em degradar determinado componente ou as substâncias tóxicas introduzidas no ambiente, essencialmente nas zonas de recarga dos aquíferos (ABAS, 2019).
- **Superexploração ou superexploração de aquíferos:** Ocorre quando a retirada da água subterrânea é maior do que os limites de produção das reservas reguladoras ou ativas, causando assim, um rebaixamento do nível potenciométrico. Deste modo, conforme NBR 12.244/2006, a perfuração do poço deve vir acompanhada de um estudo preliminar onde a vazão de retirada da água deve ser exposta, e, conseqüentemente respeitada, além de ter o respectivo nível dinâmico (ABNT, 2006).

Portanto, para os recursos hídricos subterrâneos a classificação das fontes de contaminação dividem-se em três categorias, sendo elas: as fontes de contaminação pontual que normalmente produzem plumas definidas e com uma concentração maior sendo possível a sua visualização e possibilitando um controle, fontes de contaminação difusas que não

geram as plumas bem definidas, normalmente afetando uma área, logo afetando um volume maior no aquífero (FOSTER et al., 2006) e as fontes de contaminação lineares ocorrendo em rios ou canais, ou seja, um rio contaminado provoca a ocorrência de uma pluma ao longo de toda extensão do rio (BARROS NETA et al., 2007).

As questões relacionadas a qualidade da água subterrânea no Brasil vem tornando-se cada vez mais importantes para o gerenciamento dos recursos hídricos, isso porque há um crescimento descontrolado na perfuração de poços e nas atividades antrópicas (ZOBY, 2008). Uma das problemáticas da contaminação dos recursos hídricos subterrâneos é o comprometimento da água para os usos com muitas finalidades, gerando impactos na ordem ambiental e socioeconômica (LISBOA et al., 2016).

As principais fontes de contaminação de manancial subterrâneo no Brasil são: construções de poços, esgotos, resíduos sólidos, a agricultura, as indústrias, postos de combustíveis, a mineração e os cemitérios (ZOBY, 2008). Estas fontes podem comprometer a qualidade dos recursos hídricos quando ultrapassam a capacidade de depuração do subsolo e dos estratos da zona não saturada (FURTADO, 2007).

Dessa forma, a vulnerabilidade pode ser extrema em determinada região, que se não existir alguma fonte de contaminação no local a área não sofre nenhum risco de contaminação, da mesma forma ocorre se for o contrário (FOSTER et al., 2002).

3.5.1 Estimativa de Carga Contaminante de Subsolo

Compreender quais são as principais fontes de contaminação do subsolo é essencial para a realização das análises e proteção da água subterrânea, pois é a partir destas fontes que obtêm-se as informações da emissão de contaminantes que são geradas (FOSTER et al. 2006).

A contaminação pode ocorrer através das atividades humanas e por processos naturais, sendo classificadas por contaminações diretas ou indiretas. A contaminação é direta quando o poluente atinge diretamente o aquífero, sem passar por uma diluição, podendo ocorrer através de poços mal construídos, ilegais ou abandonados. Já a contaminação indireta ocorre quando o poluente atinge o aquífero depois de passar por alterações partindo do ponto de origem, ou seja, passa por diluições (FEITOSA et al., 1997).

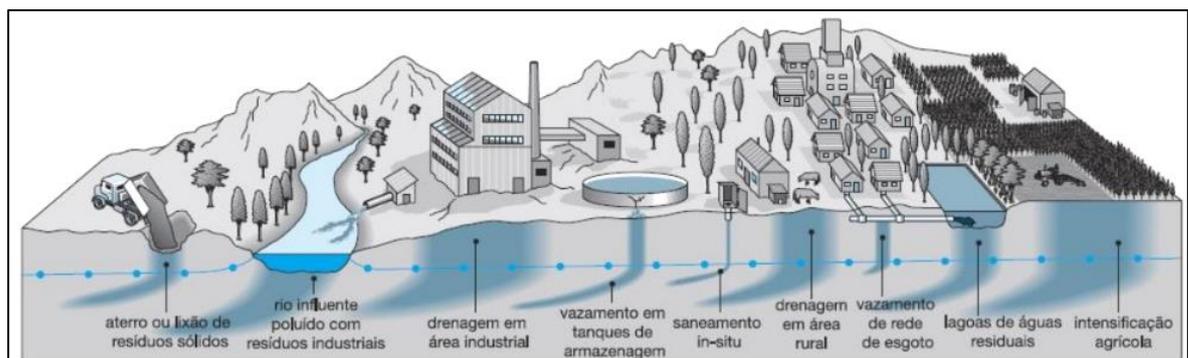
Conforme MMA (2007), as fontes de contaminação direta se aplicam para a disposição de resíduos sólidos no solo, esgotos e fossas, atividades agrícolas, atividades industriais, mineração, vazamento de substâncias tóxicas e cemitérios. Para as fontes de

contaminação indireta de aquíferos têm-se: filtragem vertical descendente, contaminações naturais e poços mal construídos e/ou abandonados.

Para realizar a montagem de um cadastro das fontes potencialmente poluidoras é necessário localizar, caracterizar e identificar sistematicamente todas as fontes existentes, e se possível levantar informações sobre a evolução histórica do local. Estes dados são de extrema importância para realizar o levantamento das fontes potenciais poluidoras, pois servem de base para a caracterização e posterior estudo de todas fontes poluidoras que se classificam como carga potencialmente poluidora (FOSTER et al., 2006).

Na Figura 6 são expostas as principais fontes de contaminação dos aquíferos.

Figura 6 – Principais Fontes de Contaminação da Água Subterrânea



Fonte: Foster et al. (2006).

Geralmente difícil de detectar, a contaminação em águas subterrâneas, em muitos casos só é descoberta no momento em que as substâncias surgem nos reservatórios de água potável e, neste momento, os agentes poluidores já espalharam por boa parte da área (CAPUCI et al., 2001).

3.5.2 Método POSH

A metodologia POSH empregada por Foster et al. (2006), avalia o potencial de contaminação de um aquífero com base em duas características: a primeira é empregando a probabilidade da presença de contaminantes, que são persistentes e móveis no subsolo enquanto a segunda está associada à existência de uma carga hidráulica capaz de possibilitar o transporte adverso dos contaminantes nos sistemas aquíferos (FOSTER et al., 2006).

Porém, nem sempre é possível obter as informações necessárias, e torna-se fundamental utilizar suposições simplificadoras. Deste modo, a classificação das fontes, para gerar uma carga contaminante, ocorre em três níveis qualitativos (reduzido, moderado e

elevado), levando em consideração o tipo de atividade, a capacidade geradora de contaminante e a carga hidráulica associada (FOSTER et al., 2006).

3.6 PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Foster et al. (2006) define o perigo à contaminação da água subterrânea decorrente das atividades humanas, como sendo a probabilidade que o aquífero tem de suportar os impactos negativos, chegando a um nível que se torna impróprio o seu consumo para os padrões estabelecidos de água potável.

Analisando a sobreposição dos resultados obtidos nos índices de vulnerabilidade natural do aquífero, com as análises de cargas contaminantes aplicadas no solo, tem-se o perigo à contaminação de determinado local (FOSTER et al., 2006). Para tanto, além da avaliação da vulnerabilidade através de metodologias anteriormente citadas, é necessário identificar e classificar as fontes de contaminação existentes na área do estudo (CASSALI IOP, 2019).

Segundo Foster & Hirata (1991), um aquífero pode possuir vulnerabilidade média a alta e ao mesmo tempo baixo risco de contaminação das águas subterrâneas, portanto para que isso ocorra a carga de contaminante potencial deve ser reduzida ou inexistente.

Os mapas referentes ao perigo à contaminação da água subterrânea, determinados a partir da vulnerabilidade, juntamente com as fontes pontuais de poluição são de extrema importância para definir no município os locais que devem receber os distritos industriais, depósitos, aterros sanitários, cemitérios, postos de combustíveis, entre outras atividades com potencial poluidor ou que sejam capazes de oferecer risco à contaminação dos aquíferos (MARION et al., 2010).

Portanto, para ser efetivo o plano diretor deve propor que a instalação das atividades potencialmente poluidoras sejam instaladas em locais que apresentem baixa vulnerabilidade e preferivelmente à jusante do fluxo subterrâneo que contém os poços de captação para o abastecimento, evitando assim o risco à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, mantendo a sua qualidade (MARION et al., 2010).

Avaliar os perigos de contaminação do aquífero é um pré-requisito primordial para obter a proteção dos recursos hídricos subterrâneos. Uma vez que a avaliação possibilita identificar as atividades antrópicas que mais causam impactos negativos no aquífero, evidenciando os locais que devem ter prioridade nas medidas de controle e remediação (FOSTER et al., 2006). Desta forma, é de extrema importância que a análise dos perigos de

contaminação faça parte da gestão dos recursos hídricos subterrâneos, para conduzir as medidas de controle e uso do solo (CAPALONGA, 2017).

Oliveira (2017) avaliou as fontes de contaminação do município de Caçapava do Sul, no estado do Rio Grande do Sul, a partir da metodologia de POSH obteve como resultado as principais fontes de contaminação, sendo as atividades como postos de combustíveis, oficinas mecânicas, frigorífico e a falta de tratamento de efluentes.

A determinação do perigo de contaminação realizado por Costa (2018), a partir do método de POSH, resultou nas áreas de maior risco à contaminação na zona urbana e nos arredores dos municípios de Ivoti e Dois Irmãos, já para o município de Morro Reuter a um baixo risco à contaminação.

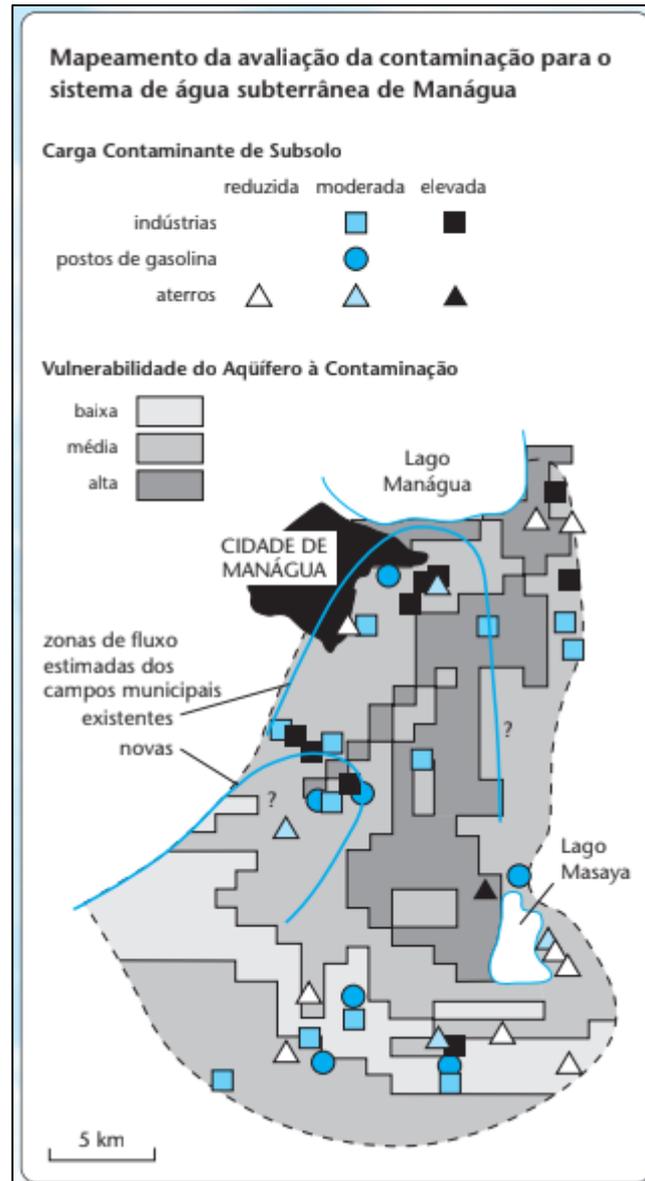
O estudo apresentado por Brito e Reginato (2018) propôs a espacialização de cargas pontuais com potencial contaminante, para a avaliação do perigo à contaminação da água subterrânea em uma área urbana, a partir de Zonas de Concentrações de Cargas Contaminantes, nesta zona realizou-se a interpolação dos valores que correspondem ao índice de POSH. Esta espacialização possibilitou a realização de uma análise das atividades potencialmente contaminantes e o seu perigo a contaminação.

Lima (2014) avaliou o perigo à contaminação da água subterrânea para o município de Bento Gonçalves, inserido no SASG. Ao avaliar as fontes pontuais de contaminação a predominância foi de empreendimentos avaliados como atividades reduzidas de carga contaminante, obtendo um risco de contaminação de 93,3% baixo e 6,7% moderado.

Em uma avaliação do perigo à contaminação da água subterrânea do SASG pertencente ao município de Chapecó – SC, Soares e Mota (2017), obtiveram como resultados 57% da área do município e 83% do perímetro urbano foram classificados como de perigo elevado, o que demonstra que da área total mais da metade tem risco alto e para a área urbana 71% apresenta o risco alto.

Na Figura 7 é apresentado o resultado do estudo de Foster et al. (2006) sobre a Gestão e avaliação do perigo de contaminação da fonte de água subterrânea nas cercanias de Manágua – Nicaraguá. Onde foi realizado uma avaliação sistemática do perigo de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos que incluem o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação e o cadastro de carga contaminante do subsolo. Sendo que a vulnerabilidade apresentou três classes: baixa, média e alta e as cargas contaminantes classes que variam de reduzida, moderada e elevada.

Figura 7 – Estudo sobre a Gestão e Avaliação do Perigo de Contaminação da Fonte de Água Subterrânea nos Cercanais de Manágua - Nicarágua



Fonte: Foster et al. (2006).

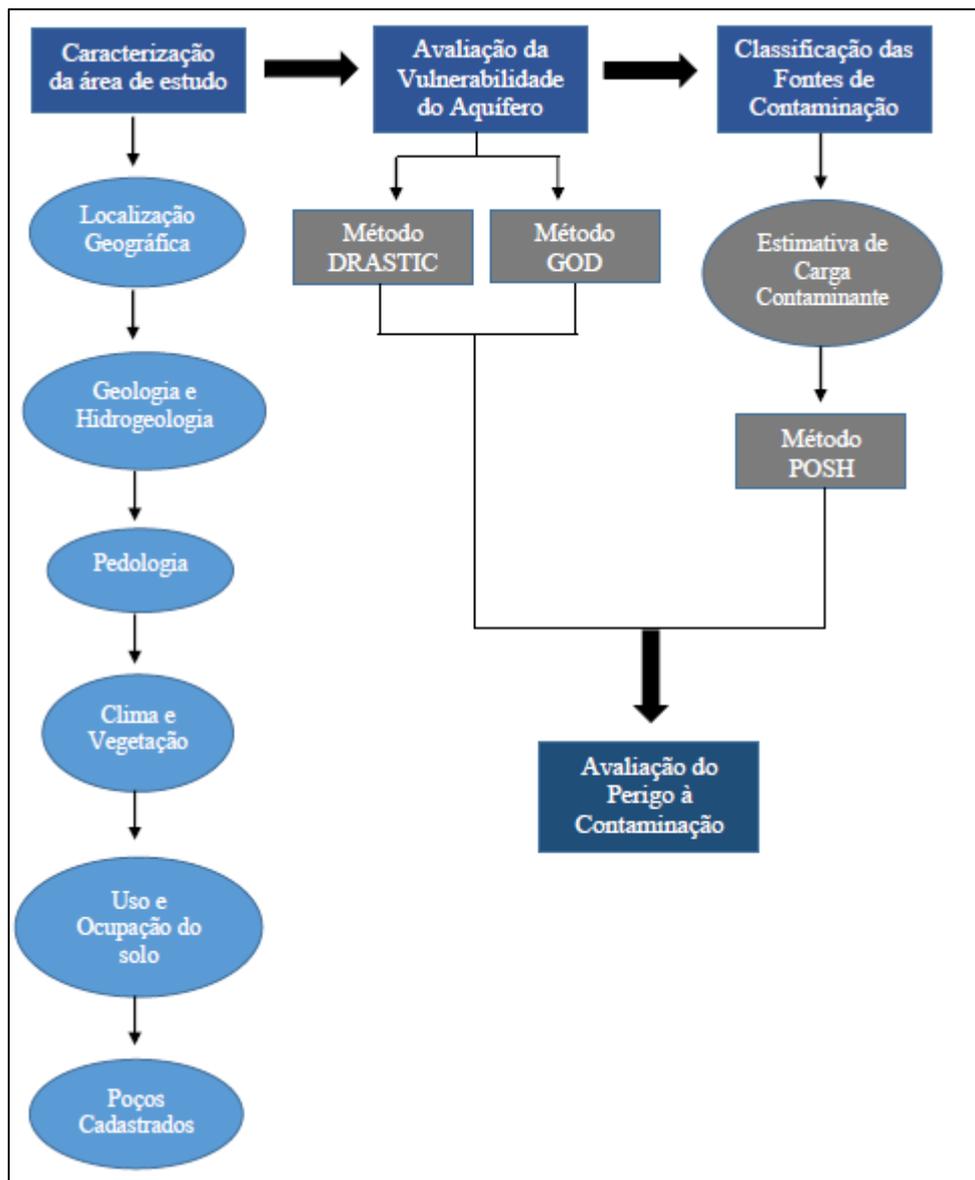
No capítulo a seguir será apresentada a metodologia utilizada para o estudo com base no que a análise do referencial teórico proporcionou.

4 METODOLOGIA

No presente capítulo será apresentada a metodologia para avaliação da vulnerabilidade e contaminação do aquífero no município de Ipê, definido como sendo a área de estudo. Foram desenvolvidas quatro etapas divididas em: Caracterização da área de estudo, avaliação da vulnerabilidade do aquífero, a classificação das fontes contaminantes, e a avaliação do perigo à contaminação.

Na Figura 8 é possível observar todas as etapas metodológicas simplificadas.

Figura 8 – Fluxograma Metodológico do Estudo



Fonte: A autora (2020).

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Nesta seção é apresentada a localização geográfica da área de estudo, além da informação detalhada da literatura e softwares utilizados para a obtenção dos dados e geração dos mapas referentes à geologia e hidrogeologia, pedologia e vegetação, clima, levantamento dos poços cadastrados no município e o uso e ocupação do solo na área urbana e rural. A obtenção destas informações é essencial para alcançar os objetivos propostos neste estudo. O mapeamento desenvolvido para a caracterização do estudo foi realizado a partir do *software* QGIS 3.4.15 (2020).

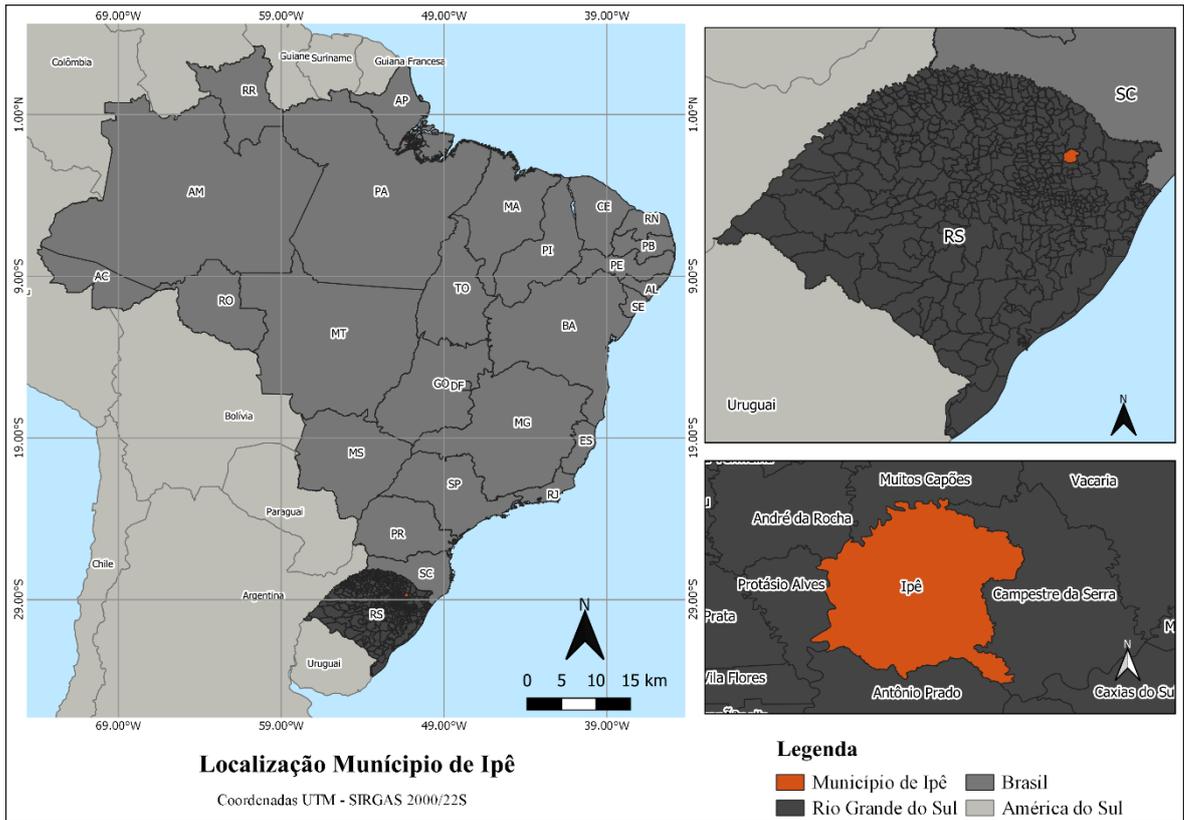
4.1.1 Localização Geográfica

O município de Ipê localiza-se na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul, pertencente a microrregião dos Campos de Cima da Serra (MUNICÍPIO DE IPÊ, 2003). De acordo com IBGE (2018) o município está situado a uma altitude média de 750 metros. Suas coordenadas geográficas são latitude 28°49'12" Sul e a uma longitude 51°16'45" Oeste, com uma área de 599,245 km² de extensão e uma densidade demográfica de 10,04 hab/km² (IBGE, 2020). Conforme último censo realizado no ano de 2010, o município conta com 6.016 habitantes (IBGE, 2010).

O município faz divisa com Antônio Prado (distância da sede de 5 km), Muitos Capões (distância da sede de 95 km), Protásio Alves (distância da sede de 29 km), André da Rocha (distância da sede de 30 km) e Campestre da Serra (distância da sede de 22 km), ficando a 180 km de distância da sede da capital Porto Alegre (MUNICÍPIO DE IPÊ, 1990). A área delimitada, juntamente com a localização do município de Ipê estão apresentadas na Figura 9, sendo destacada a área total.

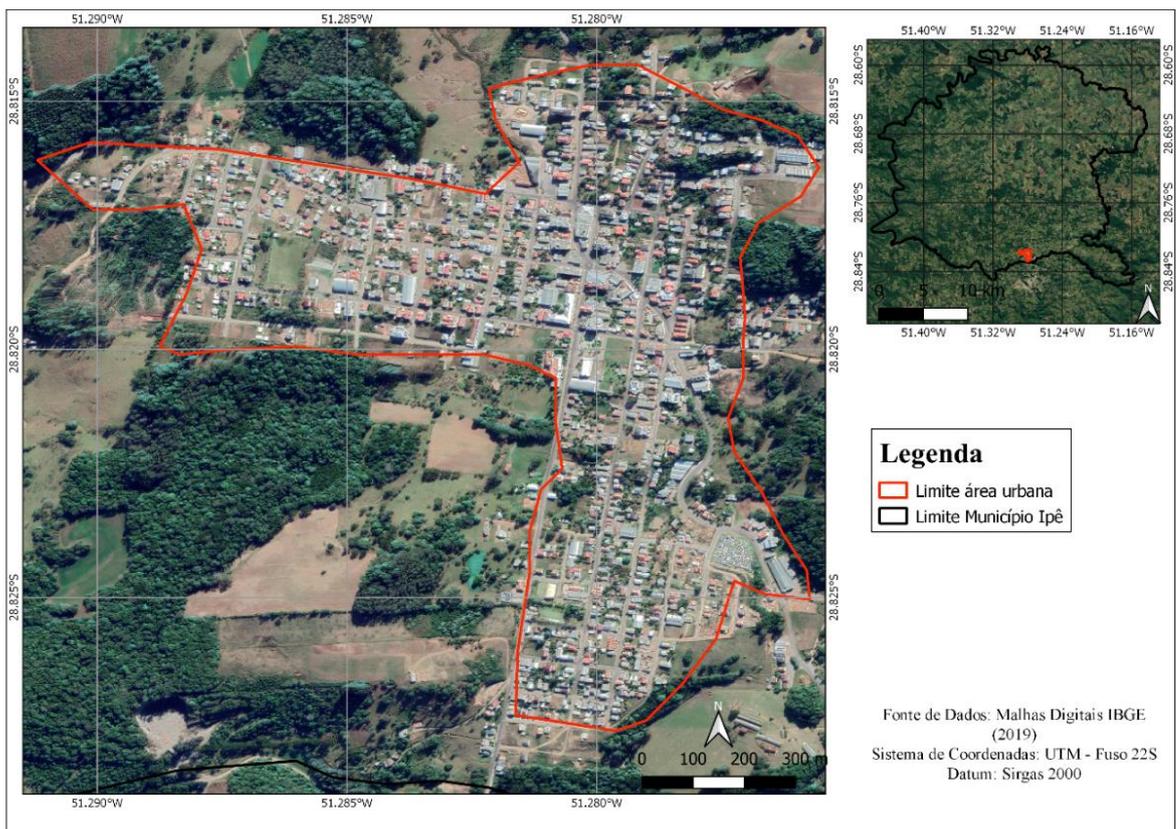
O município conta com uma extensa área territorial, porém a área urbana é uma pequena parcela desta área, representando 0,16%, ou seja, 0,96 km². Na Figura 10 é possível observar o mapa da área urbana do município de Ipê.

Figura 9 – Localização do Município de Ipê



Fonte: A autora, adaptado de IBGE (2019).

Figura 10 – Área Urbana Município de Ipê



Fonte: A autora (2020).

4.1.2 Geologia e Geomorfologia Local

A determinação da geologia local partiu das informações cedidas no Mapa Geológico do Rio Grande do Sul desenvolvido pela Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais - CPRM (2006), onde elenca as classificações geológicas de todo o estado. Já as informações da geomorfologia local, foram obtidas por meio do mapa geomorfológico disponibilizados pelo IBGE (2003), com base cartográfica 1:750.000.

4.1.3 Hidrografia e Hidrogeologia

Para os dados da hidrografia utilizou-se as informações cedidas na base cartográfica digital 1:250.000, disponibilizado pela FEPAM (2005). Já os dados hidrogeológicos do estado foram obtidos a partir do Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul desenvolvido pela CPRM (2005), com base cartográfica digital de 1:750.000.

4.1.3.1 Poços cadastrados no município

O levantamento dos dados e a identificação dos poços cadastrados na área de estudo foi realizado com base nos dados disponibilizados no Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), desenvolvido pelo CPRM (2020). Com as informações obtidas da localização dos poços foi confeccionado o mapa com a distribuição destes poços no município.

Além do mais o SIAGAS fornece informações que podem ser utilizadas para a geração de gráficos comparativos, como o gráfico gerado da situação e o uso dos poços no município.

4.1.3.2 Profundidade do Nível Estático

Para a obtenção da profundidade do nível estático foi realizado uma busca dos poços no SIAGAS de todos os municípios vizinhos, além do município de estudo, para fins de busca dos dados de nível estático. A escolha da utilização de poços vizinhos, além dos poços do município, teve como intuito evitar o efeito de borda causado pela interpolação entre os dados dos poços (VARGAS et al., 2018).

O município de Ipê possui cadastrado 45 poços, Antônio Prado possui cadastrado 90 poços, André da Rocha possui 14 poços registrados, Campestre da Serra possui no sistema 30 poços, Muitos Capões possui 10 poços cadastrados e Protásio Alves possui cadastrado 32 poços, ao todo são 221 poços utilizados para a interpolação (SIAGAS, 2020).

A partir das informações do nível estático de cada poço, foi inserido no *software* QGIS 3.4.15 para realizar a interpolação dos dados, este *software* possui ferramentas geoestatísticas que desenvolvem o tratamento dos dados, no estudo foi utilizado o *Inverse Distance Weighted* (IDW).

O método IDW é definido como um interpolador global, sendo considerado razoavelmente fiel aos dados amostrados, além de apresentar os resultados em um processamento rápido. Tem como finalidade a utilização dos valores amostrados, para realizar a atribuição de valores em locais com a ausência de dados, desta forma, cada ponto com dados terá a influência em locais mais próximos e sem informações, evitando a ocorrência do efeito de borda (VARGAS et al., 2018).

4.1.4 Pedologia

A determinação dos solos existentes no município foi obtida através do mapeamento semidetalhado de solos para a região de abrangência do COREDE Serra, onde o município de Ipê está incluído, realizado pela Embrapa juntamente com a UFGRS (2007), com escala de 1:50.000.

4.1.5 Clima

Como o município de Ipê não possui estação meteorológica os dados referentes ao clima do município foram obtidos a partir da estação meteorológica do município de Caxias do Sul disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Os dados de temperatura média foram obtidos em uma série histórica de 29 anos, referentes ao período de 1981 à 2010 (INMET, 2020).

Para a obtenção da recarga foi necessário a precipitação em uma série histórica de no mínimo 20 anos, desta forma, foi possível coletar os dados da precipitação no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para a estação meteorológica de Caxias do Sul (INMET, 2020).

A determinação da evapotranspiração no município foi determinada através do sistema denominado como Intermediador que utiliza dados disponíveis nos sistemas de

informações AgriTempo e Agência Nacional das Águas, o sistema permite calcular os dados de evapotranspiração em diferentes modelos matemáticos e para longos períodos de tempo. É um sistema que facilita a busca dos dados da evapotranspiração, considerando que por muitas vezes ocorre uma dificuldade na obtenção dos parâmetros, comprometendo a obtenção de resultados (BORTOLIN et al., 2019).

O método escolhido para determinar a evapotranspiração da área de estudo foi o método de Thornthwaite (1948), que trata-se de um método empírico que se baseia na temperatura média do ar e nas coordenadas geográficas do local (PEREIRA et al., 2002) e a estação meteorológica utilizada é a do município de Caxias do Sul, pois no município de estudo não existe estação, sendo a de Caxias do Sul a mais próxima do município.

4.1.6 Vegetação e Uso e Ocupação do Solo

A caracterização da vegetação e do uso e ocupação do solo para o município foi adquirida pelo site do MapBiomas Brasil v. 5.0 (2020), com escala 1:250.000. Estas informações proporcionaram o desenvolvimento do mapa de vegetação e de uso e cobertura do solo no município para o ano de 2018.

4.1.7 Clinografia

Clinografia é um termo usado para referir-se as cartas de declividade, onde aborda a medição de uma forma mais abrangente com relação aos componentes dadas da mesma. Sendo assim, a base da clinografia são as curvas de nível das cartas topográficas que quantificam o declive de determinado terreno, agindo como suporte para a análise da área (DE BIASI, 1992).

Os dados da clinografia da área em estudo, foram obtidos no sistema Topodata que é um Banco de Dados Geomorfológicos do Brasil disponibilizado pelo INPE. Os dados disponibilizados estão estruturados em quadrículas compatíveis com as articulações 1:250.000 (TOPODATA, 2020), onde a informação obtida foi adquirida em formato raster, gerando a declividade da área.

A clinografia foi apresentada em classes de declividade conforme dados da EMBRAPA (1995), onde a classificação, o grau de limitação e as considerações podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de Declividade

Classes de Declividade (%)	Classificação	Grau de Limitação	Considerações
0 – 3	Plano/ Praticamente Plano	Nulo	Terras não suscetíveis à erosão. Geralmente ocorrem em solo plano ou quase plano e com boa permeabilidade. Quando cultivadas por 10 a 20 anos podem apresentar erosão ligeira, que pode ser controlada com práticas simples de manejo.
3 – 8	Suave/Ondulado	Ligeiro	Terras que apresentam pouca suscetibilidade à erosão. Geralmente, possuem boas propriedades físicas. Quando utilizadas com lavouras por um período de 10 a 20 anos, mostram normalmente uma perda de 25% ou mais do horizonte superficial. Práticas conservacionistas simples podem prevenir contra esse tipo de erosão.
8 – 13	Moderadamente ondulado	Moderado	Terras que apresentam moderada suscetibilidade à erosão. Se utilizadas fora dos princípios conservacionistas, essas terras podem apresentar sulcos e voçorocas, requerendo práticas de controle à erosão desde o início de sua utilização agrícola.
13 – 20	Ondulado	Forte	Terras que apresentam forte suscetibilidade à erosão. Ocorrem em relevo ondulado a forte ondulado, com declive normalmente de 13 a 20%, os quais podem ser maiores ou menores, dependendo de suas condições físicas. Na maioria dos casos a prevenção à erosão depende de práticas intensivas de controle.
20 – 45	Forte ondulado	Muito Forte	Terras com suscetibilidade maior que o grau forte, tendo o seu uso agrícola muito restrito. Na maioria dos casos o controle à erosão é dispendioso, podendo ser antieconômico.
45 – 100	Montanhoso/Escarpado	Extremamente forte	Terras que apresentam severa suscetibilidade à erosão. Não são recomendáveis para o uso agrícola, sob pena de serem totalmente erodidos em poucos anos. Tratam-se de terras onde deve ser estabelecida uma cobertura vegetal de preservação ambiental.

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (1995).

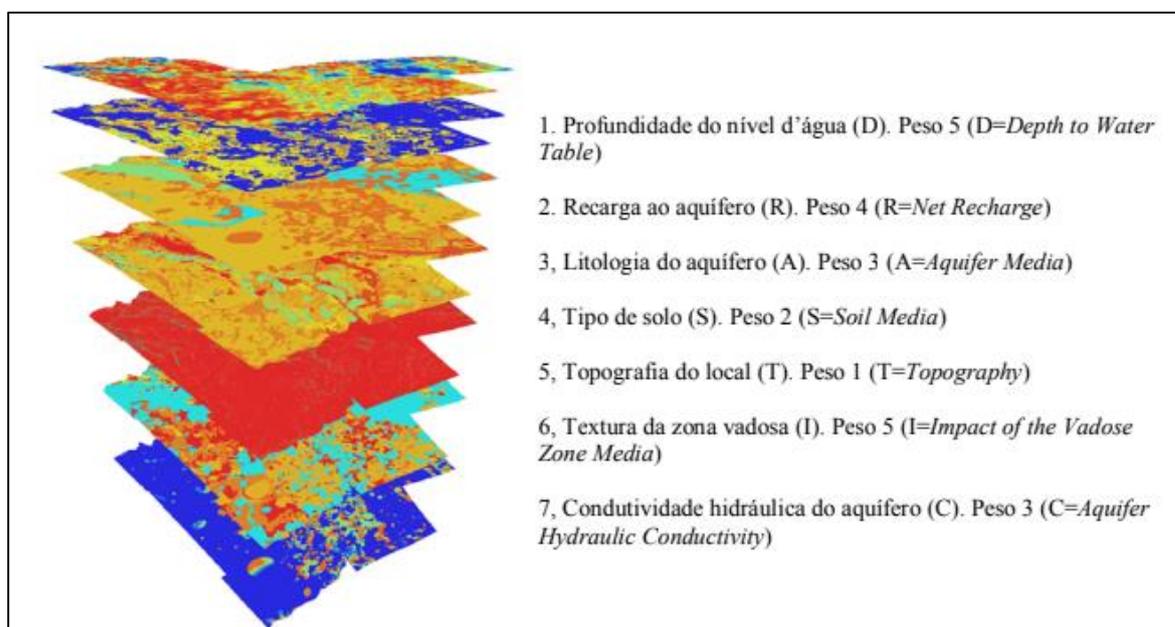
4.2 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO

Nesta seção serão abordados os métodos utilizados para a obtenção dos resultados da vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea. Para a realização do mapeamento dos resultados para cada método foi utilizado os *softwares* QGIS 3.4.15 e IDRISI Selva 17.0 (2020).

4.2.1 Método DRASTIC

Para aplicação da metodologia DRASTIC, foi necessária a descrição e caracterização dos parâmetros hidrogeológicos conforme Figura 11, e a definição dos fatores atribuídos a cada parâmetro metodológico. Os fatores variam de 1 a 5, e foram distribuídos de forma que, os parâmetros que possuem fator 5 são os mais significativos e os que possuem fator 1 são os menos significativos (GUIGUER & KOHNKE, 2002).

Figura 11 – Parâmetros Hidrogeológicos e seus respectivos fatores



Fonte: Guiguer & Kohnke (2002).

A determinação para atribuir os valores de cada parâmetro hidrogeológico parte das características encontradas na caracterização da área de estudo, obtendo assim os valores para o peso (“r”). Para obter os resultados a partir do método DRASTIC, é necessário aplicar a Equação 1, que determina o índice DRASTIC. O resultado é encontrado realizando a multiplicação aos números atribuídos para o peso (“r”), que variam de 1 a 10 dependendo da faixa de valores obtidos através da interpretação da base de dados e multiplicados pelo

fator (“w”) já determinados pelo método e que variam de 1 a 5 (GUIGUER & KOHNKE, 2002).

$$\text{DRASTIC}=(D_r \times D_w)+(R_r \times R_w)+(A_r \times A_w)+(S_r \times S_w)+(T_r \times T_w)+(I_r \times I_w)+(C_r \times C_w) \quad (1)$$

Avaliar a profundidade do nível da água é importante, pois é ela quem determina o nível que o contaminante vai percorrer até alcançar o aquífero, além de definir quanto tempo o contaminante permanece em contato com o meio circulante (ALLER et al., 1987). Desta forma, para a profundidade do nível de água, na Tabela 2 é apresentada a relação com os índices de ponderação do método.

Tabela 2 – Relação entre o Parâmetro Profundidade de Nível da Água e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC

D – Profundidade do Nível da Água (m)	Grau (“r”)
0 – 2	10
2 – 5	9
5 – 10	7
10 – 17	5
17 – 26	3
26 – 34	2
> 34	1

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1984).

Para a obtenção do parâmetro D, ou seja, a profundidade do nível estático, foi utilizado o resultado encontrado da interpolação realizada com os dados dos 189 poços do município e dos municípios que fazem divisa, com a classificação determinada por Aller et al. (1984), que divide em 7 classes com pesos atribuídos de 1 à 10.

A precipitação é o principal meio de abastecimento da água subterrânea, onde ocorre através do processo de infiltração na superfície, percolando até alcançar o nível freático. Logo, a quantidade de água que infiltra por unidade de área no solo, alcançando o nível freático é chamado de recarga, que viabiliza o transporte vertical do contaminante até o nível da água e o transporte horizontal até o aquífero. Porém, este parâmetro pode colaborar na dispersão ou diluição do contaminante presente nas zonas saturadas e na zona não-saturada (ALLER et al., 1987).

A determinação do grau para o parâmetro de recarga da metodologia é dada a partir da relação apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação entre o Parâmetro Recarga e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC

R – Recarga (mm)	Grau (“r”)
< 51	1
51 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1984).

O método utilizado para o cálculo da estimativa da recarga é o método do balanço hídrico desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955), conforme apresentada na Equação 2. Este método utiliza os dados de precipitação e evapotranspiração, neste caso, os dados utilizados foram da estação meteorológica de Caxias do Sul – RS, cidade mais próxima do município, do ano de 1961 à 2020 para a evapotranspiração e de 2000 à 2010 para a precipitação. O método utilizado para a obtenção da evapotranspiração foi o de Thornthwaite (1948).

$$R = P - ETR - ALT - R_{off} \quad (2)$$

Para realizar os cálculos seguintes, adotou-se o estudo da análise realizada por Bortolin (2018), denominado como método BH1. Onde é realizado uma análise dos estudos de Wahnfried e Hirata (2005), que realizaram uma adaptação de Fenn et al. (1975).

O cálculo da alteração da umidade do solo (ALT), é realizado conforme Equação 3.

$$ALT = ARM - ARM_{n-1} \quad (3)$$

Dessa forma, para calcular a variação do armazenamento (ΔARM) utiliza-se as equações apresentadas a seguir:

$$ARM_n = CAD \times \exp\left(\frac{Neg\ acum}{CAD}\right) = CAD \times \exp\left(\frac{\sum(P-ETP)_n}{CAD}\right) \quad (4)$$

Onde:

ARM_n - armazenamento no mês “n”

CAD – armazenamento máximo do solo. Segundo Thorntwaite & Mather (1955), CAD varia de 25 mm a 400 mm, sendo adotado conforme Bortolin (2018) 100 mm

P – precipitação média mensal no mês “n” (mm)

ETP – evapotranspiração potencial (mm)

Neg acum – somatório anual dos negativos acumulados até o mês “n”.

Para os meses que apresentaram $(P-ETP) < 0$, aplicou-se a Equação 5:

$$ARM_n = ARM_{n-1} \times \exp\left(\frac{\sum(P-ETP)_n}{CAD}\right) \quad (5)$$

No caso de ocorrer um ou mais meses com $(P-ETP) > 0$ e que apresentam valores insuficientes para aumentar o ARM até o valor de CAD, utiliza-se a Equação 6:

$$ARM_n = ARM_{n-1} + (P - ETP)_n \quad (6)$$

Utilizou-se a Equação 7 para início dos cálculos, onde foi escolhido o mês de fevereiro, definido como o mês do fim do período de estiagem e que antecede o início dos períodos de chuva.

$$ARM = \frac{M}{1 - \exp\left(\frac{N}{CAD}\right)} \quad (7)$$

Onde:

ARM – armazenamento no mês

M – somatório de (P-ETP) positivos em mm

N – somatório de (P-ETP) negativos em mm

O cálculo da evapotranspiração real (ETR) foi calculado a partir das equações a seguir:

$$ETR = ETP \quad \text{se } ((P-ETP) > 0) \quad (8)$$

$$ETR = P + \text{ABS}(\Delta ARM) \quad \text{se } ((P-ETP) < 0) \quad (9)$$

A Equação 10 apresentada a seguir, foi utilizada para o cálculo do escoamento superficial R_{off} , obtido através do coeficiente de escoamento superficial (C') aplicado à precipitação mensal:

$$R_{off} = C' \times P$$

$$C' = \alpha \times C \quad (10)$$

O coeficiente C determina o quanto de água que precipitou que irá escoar pela superfície, em função do tipo de solo da área de estudo. O α é definido a partir da declividade da área e da estação do ano que é dividida em seca ou úmida. A Tabela 4 indica a classificação do escoamento superficial, um estudo de Carvalho (2013) adaptado de Fenn et al. (1975).

Tabela 4 – Classificação do escoamento superficial

Tipo de solo	Declividade (%)	Coeficiente α	
		Estação seca	Estação úmida
Arenoso (C=0,35)	< 3	0,43	0,65
	3 a 7	0,54	0,7
	> 7	0,6	0,7
Argiloso (C=0,45)	< 3	0,53	0,63
	3 a 7	0,65	0,75
	> 7	0,70	0,85

Fonte: Adaptado de Fenn (1975) e Carvalho (2013).

Os valores definidos para este estudo partiram do tipo de solo da área, sendo classificado como argiloso, logo $C = 0,45$, e em função da declividade média do terreno, obtendo assim os valores de $\alpha = 0,65$ para a estação seca e $\alpha = 0,75$ para a estação úmida. Foram considerados como estações secas os meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro e estações úmidas os meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro.

Os cálculos apresentados para obtenção da estimativa da recarga, foram elaborados com o auxílio do programa BHnorm, desenvolvido em planilha por Rollin et al. (1998).

O parâmetro meio aquífero condiz com o material, seja consolidado ou não, que atua como aquífero (ALLER et al., 1987). A constituição do aquífero influencia no fluxo da água, sendo afetado pelo material que o compõe, além de alterar a rota e o percurso do contaminante. Para estabelecer o tempo necessário e disponível para a dispersão e o processo

de atenuação do contaminante é importante ter o comprimento do percurso de um contaminante (MENESES, 2007).

A determinação do material que constitui o aquífero, classificando se o mesmo é um material consolidado ou não, é estabelecido através do parâmetro meio aquífero, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação entre o Parâmetro Meio Aquífero e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC

A – Meio Aquífero		
Tipo	Intervalo	Grau (“r”)
Argilito maciça	1 – 3	2
Metamórfica/ígnea	2 - 5	3
Metamórfica/ígnea alterada	3 - 5	4
Till glacial	4 – 6	5
Argilito/siltito laminado	5 – 9	6
Arenito maciço	4 – 9	6
Calcário maciço	4 – 9	6
Areia ou cascalho	4 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário cárstico	9 – 10	10

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1984).

O meio aquífero é constituído de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e pertence a duas unidades litológicas: Gramado, composta por rochas básicas e Caxias que apresenta rochas ácidas (REGINATO & AHLERT, 2013). Levando em consideração o material de formação do meio aquífero, foi determinado um peso para cada unidade, sendo assim para a unidade Gramado que possui material com características de areia e cascalho, atribui-se o peso 8, já a unidade Caxias com as características de material basalto, atribuiu-se o peso 9.

O parâmetro denominado como solo é caracterizado pela atividade biológica significativa de determinada área, onde trata-se da parte superficial da zona vadosa. A tipologia do solo, reflete diretamente na recarga de um aquífero, pois, ocorre a infiltração da água por meio do mesmo, influenciando no deslocamento vertical de um contaminante (ALLER et al., 1987).

As características do solo como a textura e a granulometria podem ser responsáveis pela maior ou menor permeabilidade da água infiltrada, resultando no aumento ou na redução

da vulnerabilidade de um aquífero. Além disso, a espessura e a presença de matéria orgânica no solo, podem influenciar na vulnerabilidade do aquífero (MENESES, 2017).

O parâmetro solo possui características que determinam o grau que deve ser utilizado, conforme pode ser observado na Tabela 6, onde ocorre a relação entre o parâmetro com o grau de vulnerabilidade do método DRASTIC.

Tabela 6 - Relação entre o Parâmetro Solo e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC

S – Solos	Grau (“r”)
Fino ou ausente	10
Cascalho	10
Areia	9
Turfa	8
Argila estruturada	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
Muck	2
Argila maciça	1

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1984).

A área de estudo é composta por três classes de solos principais, sendo elas: Cambissolos, Neossolos e os Nitossolos. O cambissolo é um solo franco arenoso ou mais argiloso, dessa forma pode ser considerado um solo franco, pois pode conter frações de areia, silte e argila (EMBRAPA, 2018), definindo desta forma o peso 5 (“r”). A classe de neossolos é uma classe de solos pouco desenvolvida, com predomínio de areia quartzosas ou pela presença de camadas do próprio material herdado (EMBRAPA, 2018), sendo assim o peso atribuído a essa classe é o de 6 (“r”), classificado como solo franco arenoso. E por fim a classe de nitossolos classificada como um solo de textura argilosa e muito argilosa (EMBRAPA, 2018), designando o peso 3 (“r”), ou seja, solo franco argiloso.

A classificação dos valores para o parâmetro topografia, são determinados a partir da declividade (%), através do método, exposto na Tabela 7, apresentando a relação parâmetro x grau. Este parâmetro diz respeito à declividade da superfície do solo e a sua variação, sendo assim, auxilia na contenção do escoamento ou na permanência do contaminante na superfície, pelo tempo considerável para ocorrer a infiltração (CAPALONGA, 2017).

Tabela 7 - Relação entre o Parâmetro Topografia e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC

T – Topografia (%)	Grau (“r”)
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1984).

A topografia corresponde a declividade do terreno da área de estudo, dessa forma, para determinar o parâmetro T da metodologia, buscou os dados obtidos na clinografia da área de estudo. Como a declividade na área tem uma grande variabilidade espacial (REGINATO & AHLERT, 2013), foi dividida a declividade em cinco classes que variam de 0 à 100%, atribuindo dessa forma os pesos (“r”) como 1, 3, 5, 9 e 10.

Outro parâmetro do método DRASTIC é a zona vadosa, ou seja, zona não-saturada acima do nível da água, na qual sua constituição em determinada região define as características de atenuação do material presente abaixo do solo e acima do nível freático. A influência que este parâmetro apresenta, está associado com o tempo de deslocamento vertical do contaminante, propiciando atenuações no seu efeito de grau maior ou menor (MENESES, 2007).

O grau para a influência da zona vadosa foi identificado a partir do material encontrado na zona vadosa, deste modo a Tabela 8, apresenta a relação entre o material da zona vadosa com o grau do método.

Tabela 8 - Relação entre o Parâmetro Influência da Zona Vadosa e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC

I – Material da Zona Vadosa	Grau (“r”)
Camada confinante	1
Silte/argila	3
Argilito	3
Calcário	6
Arenito	6
Argilito/siltito laminado	6
Areia e cascalho com silte e argila	6
Metamórfica/ígnea	7
Areia e cascalho	8
Basalto	9
Calcário cárstico	10

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1984).

A determinação da influência da zona vadosa levou em consideração as características do solo presentes na área, especificamente a resistência dos solos quanto aos impactos ambientais, bem como a profundidade, textura, mineralogia, drenagem, erodibilidade, rochiosidade, entre outros (CAPALONGA, 2017). Para a busca dos dados utilizou-se o mapa de solos do município de Ipê, elaborado a partir dos dados obtidos da Embrapa.

Deste modo, sabe-se que os solos presentes no município são divididos em três classes sendo elas: cambissolos, neossolos e nitossolos. Os solos classificados como cambissolos são solos argilosos, classificados como pouco desenvolvidos (EMBRAPA, 2018), sua drenagem é moderada e possuem resistência baixa, comparada as outras classes (CAPALONGA, 2017). Dessa forma, atribui-se para a classe dos cambissolos o peso 7 (“r”).

Já a classe de solo nomeada como neossolos é um solo classificado por possuir espessura baixa além de ser pouco desenvolvido (EMBRAPA, 2018), apresenta uma boa drenagem e resistência muito baixa (CAPALONGA, 2017). Com base nas informações disponíveis atribui para essa classe de solos o peso 8 (“r”). Por fim, a classe de solos denominada como nitossolos que possui uma avançada evolução pedogenética e solos argilosos (EMBRAPA, 2018), além de dispor de uma drenagem moderada para boa e uma resistência alta (CAPALONGA, 2017). Por consequência, o peso atribuído a este solo é de 3 (“r”).

E por fim, o parâmetro da condutividade hidráulica que é relacionado com os graus referentes do método, conforme exposto na Tabela 9. A condutividade está relacionada com

os espaços vazios nos aquíferos, que ocorrem devido a porosidade da rocha, as fraturas ou estratificações. É um parâmetro que representa a capacidade dos materiais que compõem o aquífero de transmitir a água no seu interior, sendo que a mobilidade de um contaminante é controlada pelo fluxo de água subterrânea presente no aquífero (MENESES, 2017).

Tabela 9 - Relação entre o Parâmetro Condutividade Hidráulica e o Índice de Ponderação do Método DRASTIC

C – Condutividade Hidráulica (m/s)	Grau (“r”)
$5.10^{-7} - 5.10^{-5}$	1
$5.10^{-5} - 1.10^{-4}$	2
$1.10^{-4} - 3.10^{-4}$	4
$3.10^{-4} - 5.10^{-4}$	6
$5.10^{-4} - 10.10^{-4}$	8
$> 10.10^{-4}$	10

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1984).

Definiu-se o valor de 5.10^{-7} a 5.10^{-5} m/s para a condutividade hidráulica segundo Reginato & Ahlert (2013), observando que a área de estudo pertence ao mesmo aquífero, ou seja, fraturado, deste modo o parâmetro C é considerado homogêneo, atribuindo desta forma o peso 1 (“r”).

Após definidos os pesos de cada parâmetro, foi gerado os mapas parciais com os parâmetros e seus respectivos pesos, que através da ferramenta *Image Calculator* do software IDRISI Selva 17.0, foi possível determinar o índice DRASTIC, aplicando a equação 1, que gerou o mapa com o resultado da vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea para o município de Ipê pelo método DRASTIC.

A classificação dos dados obtidos a partir de Aller et al. (1987), apresentados na Tabela 10, através de um dos métodos propostos o DRASTIC, irá fornecer a base que determinará a vulnerabilidade da água subterrânea para o município de Ipê.

Tabela 10 – Relação entre o Índice DRASTIC e a Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade
Superior a 199	Muito Elevada
159 a 199	Elevada
120 a 159	Intermediária
Inferior a 120	Baixa

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1987).

De acordo com Aller et al. (1987), o índice mais baixo que pode-se obter de vulnerabilidade é o 23, quando todos os parâmetros recebem peso (“1”) e o índice mais alto é de 230, considerando que todos os parâmetros recebem peso com valor 10. Quanto maior o índice DRASTIC, maior é a classificação da vulnerabilidade do aquífero. Se a classificação for baixa, significa que na área pode ocorrer contaminação, porém com probabilidades menores que em outras áreas (GUIGUER & KOHNKE, 2002).

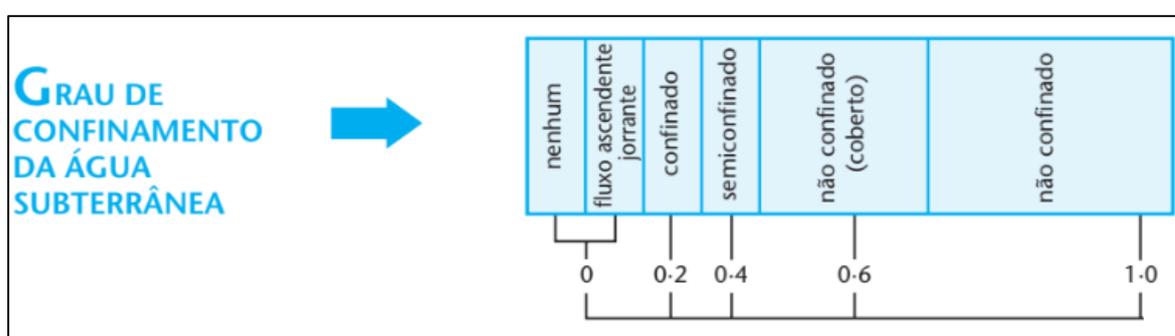
4.2.2 Método GOD

A metodologia GOD foi outro método escolhido para ser utilizado no estudo da determinação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas. Foram considerados os dados levantados na caracterização do local de estudo, com base nos três elementos que a metodologia leva em conta e determinado os pesos para cada elemento.

A partir dos resultados parciais, a junção dos três mapas foi realizada por intermédio da ferramenta *Image Calculator*, disponibilizada pelo *software* IDRISI Selva 17.0, o tratamento do mapa foi desenvolvido a partir do *software* QGIS 4.3.15, resultando assim no mapa da vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea do método GOD.

O primeiro parâmetro que a metodologia GOD determina é para a classificação do grau de confinamento hidráulico do aquífero, apresentando um intervalo entre 0,0 à 1,0. Conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Parâmetro G: Grau de Confinamento da Água Subterrânea



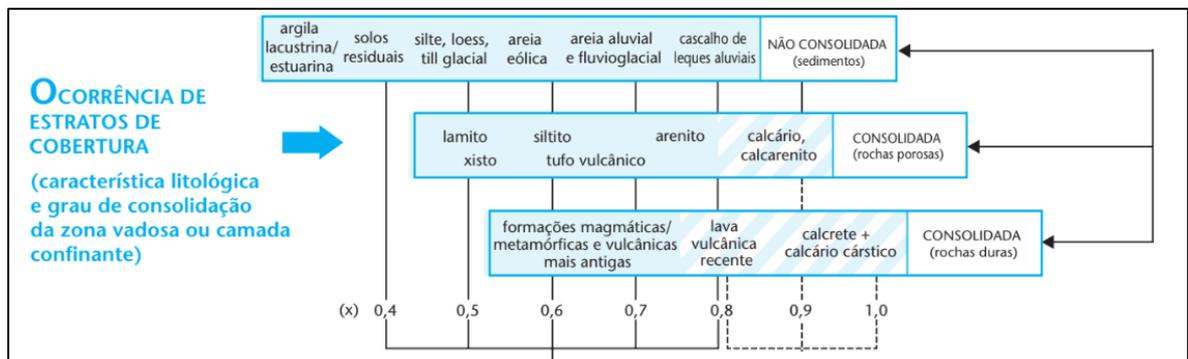
Fonte: Adaptado de Foster et al. (2006).

O parâmetro G está diretamente associado ao tipo de aquífero que a área possui (REGINATO & AHLERT, 2013), como determinado no mapa da hidrogeologia, o município pertence ao SASG, com ocorrência de aquíferos fraturados. Estes aquíferos possuem sistemas livres e confinados, dessa forma o peso atribuído para o parâmetro, levou

em consideração os dois comportamentos assumindo a classificação de aquífero não confinado coberto atribuindo o peso 0,6.

No segundo parâmetro, são utilizados os dados levantados referentes a geologia (caracterização litológica e grau de consolidação da zona vadosa ou camada confinante), da região acima da zona saturada, ou seja, é determinado o parâmetro da ocorrência de estratos de cobertura, conforme pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Parâmetro O: Ocorrência de Estratos de Cobertura

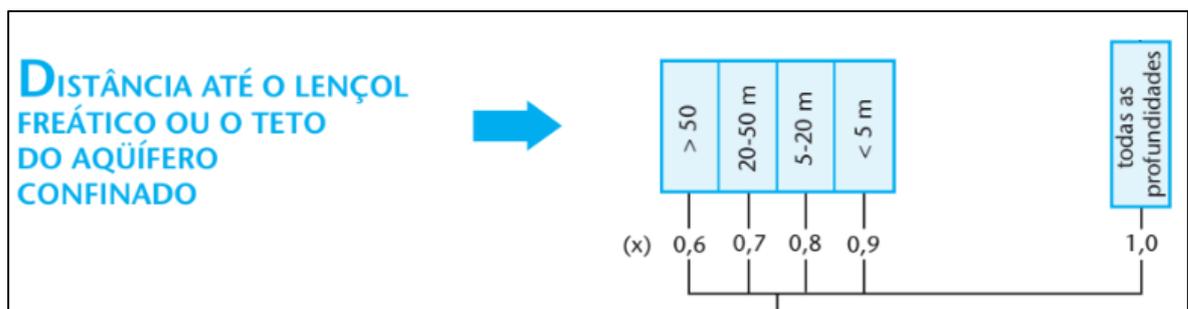


Fonte: Adaptado de Foster et al. (2006).

Relacionado de modo direto com a litologia dos estratos de cobertura do aquífero, o parâmetro O foi determinado a partir de duas unidades litológicas, apresentadas em forma de mapa na geologia do município de Ipê, através de dados disponibilizados pela CPRM (2006). A característica dessas unidades é conter rochas duras, ou seja, consolidadas, dessa forma, o peso atribuído foi de 0,7 para a unidade Gramado e 0,75 para a unidade Caxias.

E por fim o parâmetro D é atribuído para o terceiro e último parâmetro da metodologia, onde requer um estudo de dados sobre a profundidade do nível de água do aquífero, ou seja, a distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado. Na Figura 14 são dispostos os valores das determinações aplicadas ao método.

Figura 14 – Parâmetro D: Distância até o Lençol Freático ou o Teto do Aquífero Confinado



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

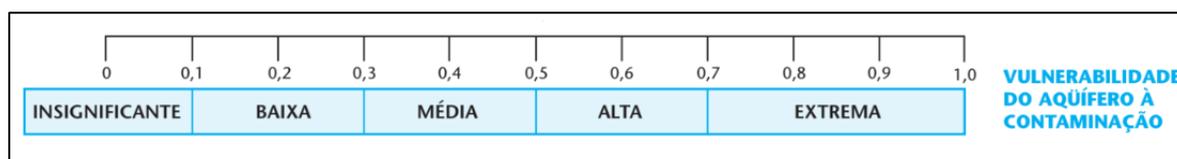
Para aplicar o parâmetro D da metodologia, foi utilizado os dados da profundidade do nível estático, obtido através dos dados dos 189 poços cadastrados no SIAGAS, após se submeterem a interpolação IDW, realizada pelo *software* QGIS 3.4.15. Deste modo, foram divididas as profundidades em 7 intervalos, que receberam pesos variando entre 0,4 à 1,0, conforme proposto por Foster e Hirata (2006).

A obtenção dos resultados parte da determinação dos valores para cada parâmetro, baseado nos dados e informações levantadas da área em estudo, e a partir disto, realiza-se a multiplicação dos três parâmetros, Equação 11, obtendo o resultado final do índice de vulnerabilidade do método GOD.

$$IV = G \times O \times D \quad (11)$$

O resultado final é classificado de acordo com a Figura 15, obtendo vulnerabilidade desde insignificante para os valores entre 0 a 0,1 e de vulnerabilidade extrema para intervalo de valores entre 0,7 a 1,0 (FOSTER et al. 2006).

Figura 15 – Classes de Vulnerabilidade do Método GOD



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

As classes de vulnerabilidade do aquífero são definidas por Foster et al. (2002) conforme apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Definição das Classes de Vulnerabilidade do Aquífero pelo Método GOD

(continua)

Valor	Classe Vulnerabilidade	Definição
0,0 – 0,1	Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea.
0,1 – 0,3	Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados.

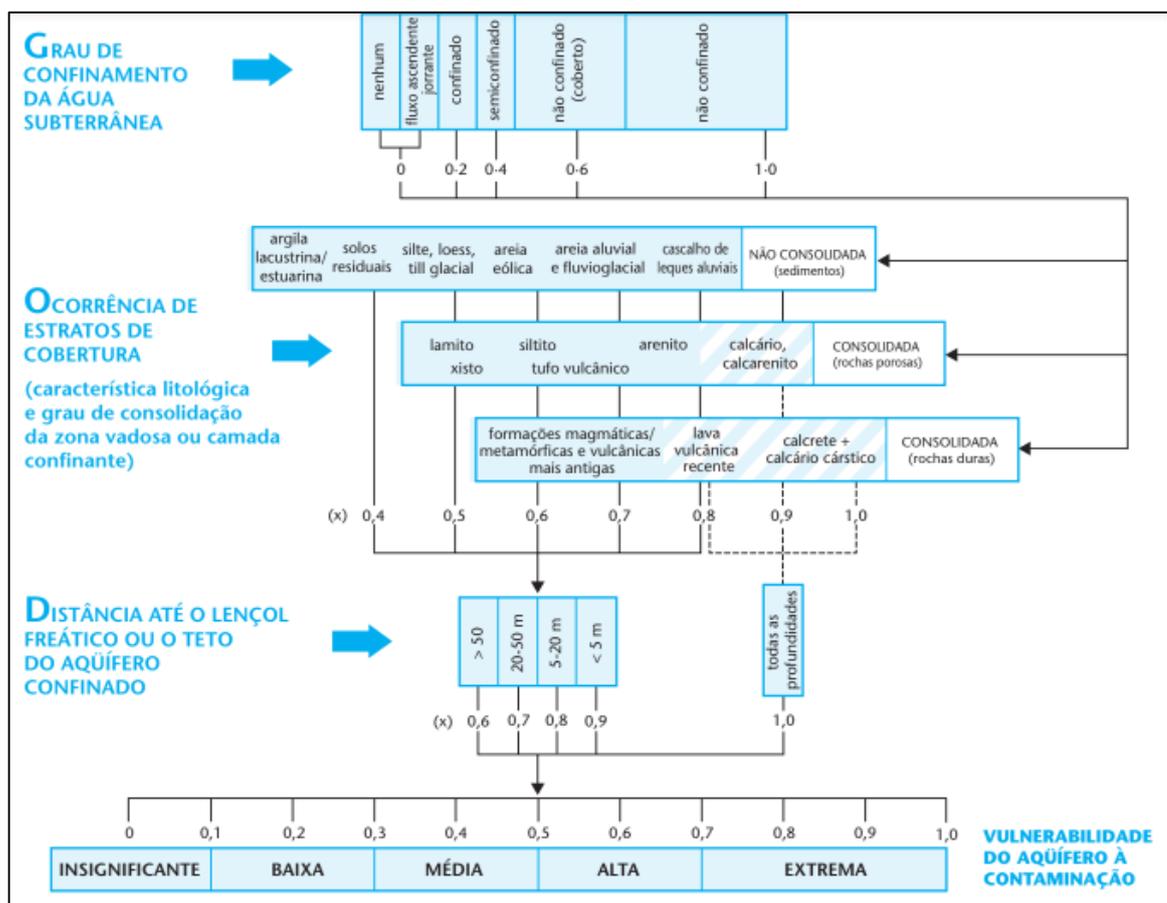
(conclusão)

0,3 – 0,5	Média	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou para lixiviados.
0,5 – 0,7	Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente absorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação.
0,7 – 1,0	Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação.

Fonte: Adaptado de Foster et al. (2002) in Pinheiro et al. (2015).

O esquema completo da metodologia GOD para a avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero está exposta na Figura 16.

Figura 16 – Sistema GOD para a avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação



Fonte: Foster et al. (2006).

4.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES DE CONTAMINAÇÃO

A classificação das fontes de contaminação foi realizada através da estimativa de carga contaminante, onde determinou-se as principais atividades potenciais de poluição no município, sendo que no estudo foi realizado somente para a área urbana e seu entorno e avaliado a partir das fontes pontuais de contaminação. Utilizou-se a metodologia POSH classificando a carga contaminante no solo e através do sistema de informação geográfica desenvolveu-se o mapa desta área com os resultados, o *software* utilizado para a geração destes mapas foi o QGIS 3.4.15 (2020).

Para o estudo foi proposto a avaliação das fontes de poluição pontuais da área urbana e seu entorno, aproximadamente à um raio de 4 km. Esta escolha partiu do fato de que o município possui uma extensa área territorial, o que dificulta a obtenção, a partir de imagens de satélite, da produção agrícola de cada uma das regiões, demandando um tempo maior do que para o proposto estudo. Portanto, foi levantado as principais atividades e empreendimentos do município da área urbana conforme exposto a seguir.

A partir do inventário desenvolvido com pesquisas a campo e através do *software Google Earth* (2020), foi elencada as principais atividades com potencial poluidor do município, sendo elas: indústrias do ramo moveleiro, vidreiro, confecção têxtil, olarias, serralherias, esquadrias, postos de combustíveis, cemitério e aterro sanitário encerrado.

Deste modo, com as fontes pontuais listadas, é possível realizar um estudo avançado das estimativas de carga contaminante no solo os quais serão expostos na próxima seção, aplicadas a partir do método de POSH.

4.3.1 Estimativa da Carga Contaminante no Subsolo

Para realizar a estimativa da carga contaminante no subsolo, além de ser necessário a classificação das fontes potenciais de contaminação, é necessário o uso de metodologias que relacionem as fontes de contaminação com um resultado final, neste caso a metodologia usada será o método de POSH. Segundo Foster et al. (2006), os resultados obtidos através do método POSH do potencial em gerar uma carga contaminante no solo, possuem três níveis qualitativos, reduzido, moderado e o elevado. Na Figura 17, é apresentada a classificação para as fontes de contaminação difusas, com os parâmetros de saneamento e das atividades agrícolas.

Além das fontes de contaminação difusas, o método POSH realiza a classificação das fontes de contaminação pontuais, onde enquadram-se empreendimentos industriais,

comerciais e demais atividades que se classificam como fontes pontuais (ANA, 2014). Na Figura 18, é possível analisar a classificação através do método POSH das fontes de contaminação pontuais.

Figura 17 – Classificação e Mapeamento das Fontes de Contaminação Difusas Método POSH

POTENCIAL DE CARGA CONTAMINANTE DE SUBSOLO	FONTE DE CONTAMINAÇÃO	
	saneamento <i>in situ</i>	práticas agrícolas
Elevado	cobertura da rede de esgoto inferior a 25% e densidade populacional superior a 100 pessoas/ha	culturas comerciais intensivas, geralmente monoculturas em solos bem drenados, em climas úmidos ou com baixa eficiência de irrigação, pasto intensivo em campos intensamente fertilizados
Moderado	intermediário entre elevado e reduzido	
Reduzido	cobertura da rede de esgoto superior a 75% e densidade populacional inferior a 550 pessoas/ha	rotação das culturas, terra para pasto extensivo, sistemas de cultivo ecológico, plantações com alta eficiência de irrigação em regiões áridas e semi-áridas

Fonte: Foster et al. (2006).

Figura 18 – Classificação e Ranqueamento das Fontes de Contaminação Pontuais Método POSH

POTENCIAL DE GERAR CARGA CONTAMINANTE NO SUBSOLO	FONTES DE CONTAMINAÇÃO				
	deposição de resíduos sólidos	áreas industriais*	lagos de águas residuais	outras (urbanas)	mineração e exploração de petróleo
Elevado	resíduo industrial tipo 3, resíduo de origem desconhecida	indústria tipo 3 ou qualquer atividade que manuseie >100 kg/d de produtos químicos perigosos	todos os resíduos industriais tipo 3, qualquer efluente (exceto esgoto residencial) se a área >5 ha		operações em campos de petróleo, mineração de metais
Moderado	chuva >500 mm/a com resíduos residenciais/ agroindustriais/ industriais tipo 1, ou todos os demais casos	indústria tipo 2	esgoto residencial se a área >5 ha, demais casos não relacionados acima ou abaixo	postos de gasolina, vias de transporte com tráfego regular de produtos químicos perigosos	algumas atividades de mineração/ extração de materiais inertes
Reduzido	chuva <500 mm/a com resíduos residenciais/ agroindustriais/ industriais tipo 1	indústria tipo 1	águas residuais residenciais, mistas, urbanas, agroindustriais e de mineração de não metálicos	cemitérios	
<p>* solos contaminados de indústrias abandonadas devem ter a mesma classificação que a da própria indústria</p> <p>Indústrias Tipo 1: madeiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos</p> <p>Indústrias Tipo 2: fábricas de borracha, fábricas de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão</p> <p>Indústrias Tipo 3: oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamento de metal</p>					

Fonte: Foster et al. (2006)

Foi realizado a interpolação das fontes pontuais de contaminação, com a ferramenta interpolador IDW, assim distribuindo a classificação para as áreas próximas que não apresentam fontes de contaminantes. Após foi determinado e somado os pesos para cada fonte potencial de contaminação que foram classificados a partir da Tabela 12.

Tabela 12 – Classificação do Potencial de Contaminação das Águas Subterrâneas por Fontes Pontuais

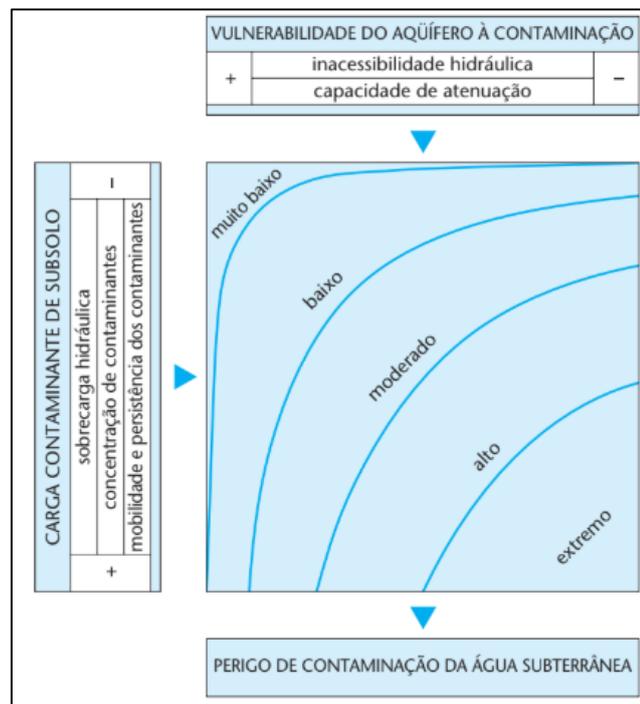
Reduzido	Moderado	Elevado
0 a 20	20 a 100	> 100

Fonte: Adaptado de ANA (2014).

4.4 ANÁLISE DO PERIGO DE CONTAMINAÇÃO

Considerando as interações entre a vulnerabilidade do aquífero à contaminação com a carga contaminante, elaboradas através dos métodos GOD e DRASTIC para a vulnerabilidade e o método de POSH para a classificação da carga contaminante, tem-se como resultado o perigo de contaminação de um aquífero. Desta forma, usou-se o esquema conceitual apresentado na Figura 19, que relaciona os resultados dos métodos utilizados no estudo, para a obtenção do resultado final, ou seja o perigo à contaminação.

Figura 19 – Esquema Conceitual para a Avaliação do Perigo de Contaminação da Água Subterrânea



Fonte: Foster et al. (2006)

A análise do perigo à contaminação da água subterrânea, contempla a sobreposição das prováveis cargas contaminantes classificadas na área de estudo, aplicada para as fontes pontuais de contaminação, juntamente com o resultado obtido da vulnerabilidade à contaminação (FOSTER et al., 2006), desenvolvido neste estudo pelos métodos GOD e DRASTIC.

O modelo para a avaliação do perigo de contaminação a partir dos dados obtidos através da metodologia DRASTIC, são aplicadas no Quadro 1, acompanhadas dos resultados obtidos para as fontes de contaminação pontuais.

Quadro 1 – Classificação do Perigo de Contaminação relacionado com as Fontes de Contaminação: Método DRASTIC

Perigo de Contaminação relacionado com as Fontes Pontuais de Contaminação		POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO			
		Reduzido	Moderado	Elevado	Sem Classificação
VULNERABILIDADE	Baixo	Desprezível	Baixo	Moderado	SC
	Médio	Baixo	Moderado	Alto	SC
	Alto	Moderado	Alto	Alto	SC
	Extremo	Moderado	Alto	Extremo	SC

Fonte: Classificação de potencial de contaminação modificado de GOMES (2008) in ANA (2014), classificação do perigo modificado de SMA-SP (2010) in ANA (2014) e Classificação do Perigo de Contaminação por Cargas Difusas de CAPALONGA (2017).

Para determinar o perigo de contaminação da água subterrânea, foi utilizado a ferramenta disponível no *software* IDRISI, *Image Calculator*, na qual multiplicou os resultados encontrados para o potencial de contaminação, juntamente com os resultados da vulnerabilidade do método DRASTIC. Para os resultados obtidos de potencial de contaminação determinou-se os valores de 1, 2 e 3, para as classificações reduzida, moderada e elevada, respectivamente. Para o resultado da vulnerabilidade obtido, foram atribuídos pesos de 1 e 10, para as vulnerabilidades baixa e intermediária, respectivamente.

No Quadro 2 é apresentado o modelo para a classificação do perigo à contaminação em relação ao resultado obtido do potencial de contaminação aplicada com os resultados obtidos na metodologia GOD.

Quadro 2 – Classificação do Perigo de Contaminação relacionado com as Fontes de Contaminação: Método GOD

Perigo de Contaminação relacionado com as Fontes Pontuais de Contaminação		POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO		
		Reduzido	Moderado	Elevado
VULNERABILIDADE	Insignificante	Desprezível	Desprezível	Baixo
	Baixa	Desprezível	Baixo	Moderado
	Média	Baixo	Moderado	Alto
	Alta	Moderado	Alto	Alto
	Extrema	Moderado	Alto	Extremo

Fonte: Adaptado de Barbosa et al., (2011)

Para determinar o perigo de contaminação da água subterrânea, foi utilizado a ferramenta disponível no *software* IDRISI, *Image Calculator*, na qual multiplicou os resultados encontrados para o potencial de contaminação, juntamente com os resultados da vulnerabilidade do método GOD. Para os resultados obtidos de potencial de contaminação determinou-se os valores de 1, 2 e 3, para as classificações reduzida, moderada e elevada, respectivamente. Para o resultado da vulnerabilidade obtido, foram atribuídos pesos de 1 e 10, para as vulnerabilidades baixa e média, respectivamente.

Baseado nas metodologias descritas neste capítulo é possível mensurar uma estimativa do perigo de contaminação da água subterrânea para a área pertencente ao município de Ipê. Os resultados obtidos serão apresentados no capítulo a seguir, acompanhado de seus mapas, para uma maior visualização do contexto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

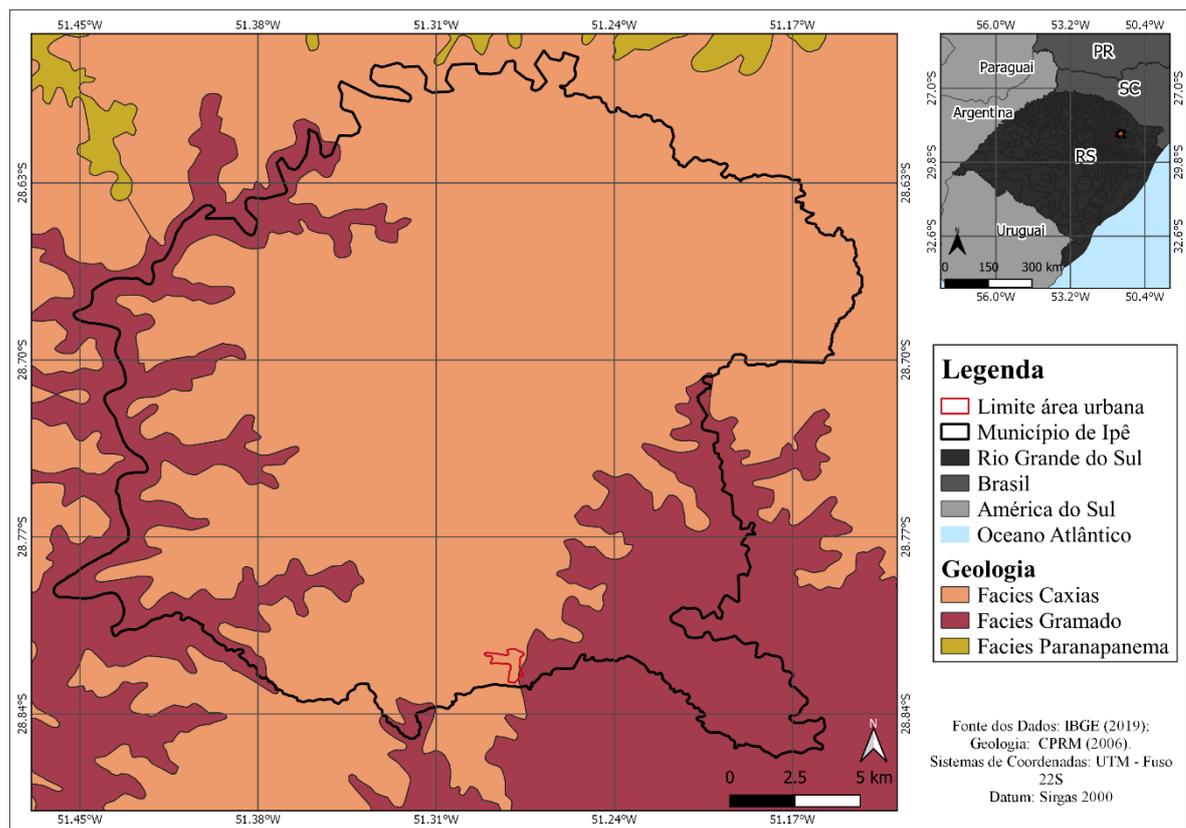
A seguir serão apresentados os resultados alcançados referentes à caracterização da área de estudo, mapeamento da vulnerabilidade e perigo de contaminação da água subterrânea. Os mapeamentos obtidos para os resultados foram desenvolvidos através dos softwares QGIS 3.4.15 (2020), onde foi realizado o tratamento dos mapas e o IDRISI Selva 17.0 (2020), onde realizou-se a inserção dos pesos e os cálculos para obtenção dos índices de vulnerabilidade e o perigo.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

5.1.1 Geologia e Geomorfologia

Pertencente à Província do Paraná, no Grupo São Bento, o município de Ipê insere-se na Formação Serra Geral, especificamente nas Fácies Caxias e nas Fácies Gramado (CPRM, 2006), conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Geologia do Município de Ipê – RS



Fonte: A autora adaptado de CPRM (2006).

A unidade litológica que abrange a maior parte do território do município, denominada por Fácies Caxias é caracterizada por:

Derrames de composição intermediária a ácida, riocitos a riolitos, mosecráticos, microgranulares a vitrofíricos, textura esferulítica comum (tipo carijó), forte disjunção tubular no topo dos derrames e maciço na porção central, dobras de fluxo e autobrechas frequentes, vesículas preenchidas predominantemente por clacedônia e ágata, fonte das mineralizações da região (CPRM, 2006).

A unidade litológica Caxias compreende as rochas vulcânicas ácidas, com espessuras médias de 50 metros variando até 350 metros, a sua coloração é de cinza clara a cinza esverdeada azulada (BORTOLIN, 2014).

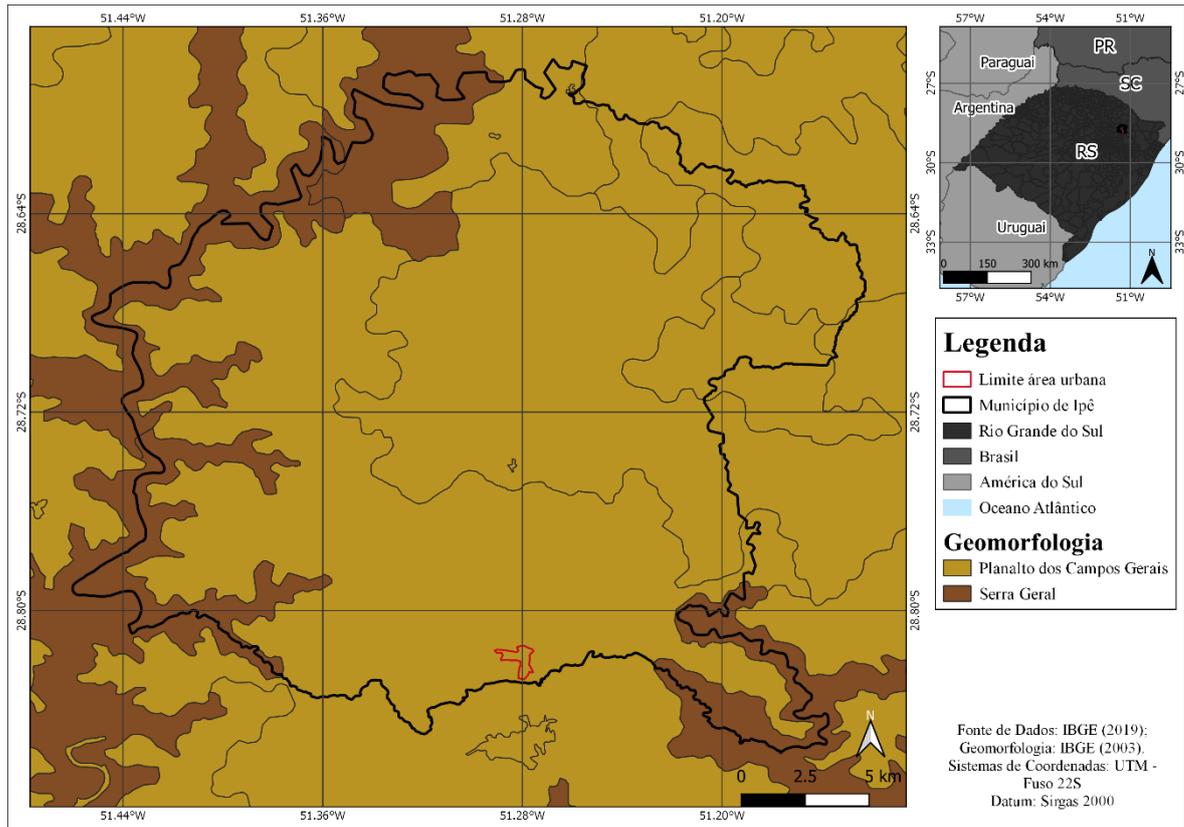
Outra unidade que compõe o município, porém menos abrangente é a Fácies Gramado, que é caracterizada segundo CPRM (2006), por conter: “Derrames basálticos granulares finos a médio, melanogromáticos cinza, horizontes vesiculares preenchidos por zeolitas, carbonatos, apofilitas e saponita, estruturas de fluxo e derremas *pahoehoe* comuns, intercalações com os arenitos Botucatu.”

A unidade litológica Gramado é composta por rochas basálticas e rochas andesibasaltos, de 132 milhões de anos, obtendo espessuras máximas de 300 metros, representando as primeiras manifestações vulcânicas (CPRM, 2006). As rochas possuem coloração cinza escura, castanha a marrom, possuem espessuras mínimas de 30 metros (BORTOLIN, 2014).

A geomorfologia está diretamente relacionada com o estudo das formas, gêneses, estrutura e a dinâmica do relevo (CHRISTOFOLETTI, 2005). Caracterizar a geomorfologia da área de estudo auxilia para a definição dos diferentes tipos de riscos que determinada área possui relacionado com sua estrutura e características, oferecendo assim diferentes formas de ocupação do solo de forma segura (OLIVEIRA et al., 2015).

Na Figura 21 é apresentada a geomorfologia do município, especificamente as unidades geomorfológicas da área, ou seja, o município é composto pelas unidades do Planalto dos Campos Gerais e da Unidade Serra Geral.

Figura 21 – Geomorfologia do Município de Ipê - RS



Fonte: A autora, adaptado de IBGE (2003).

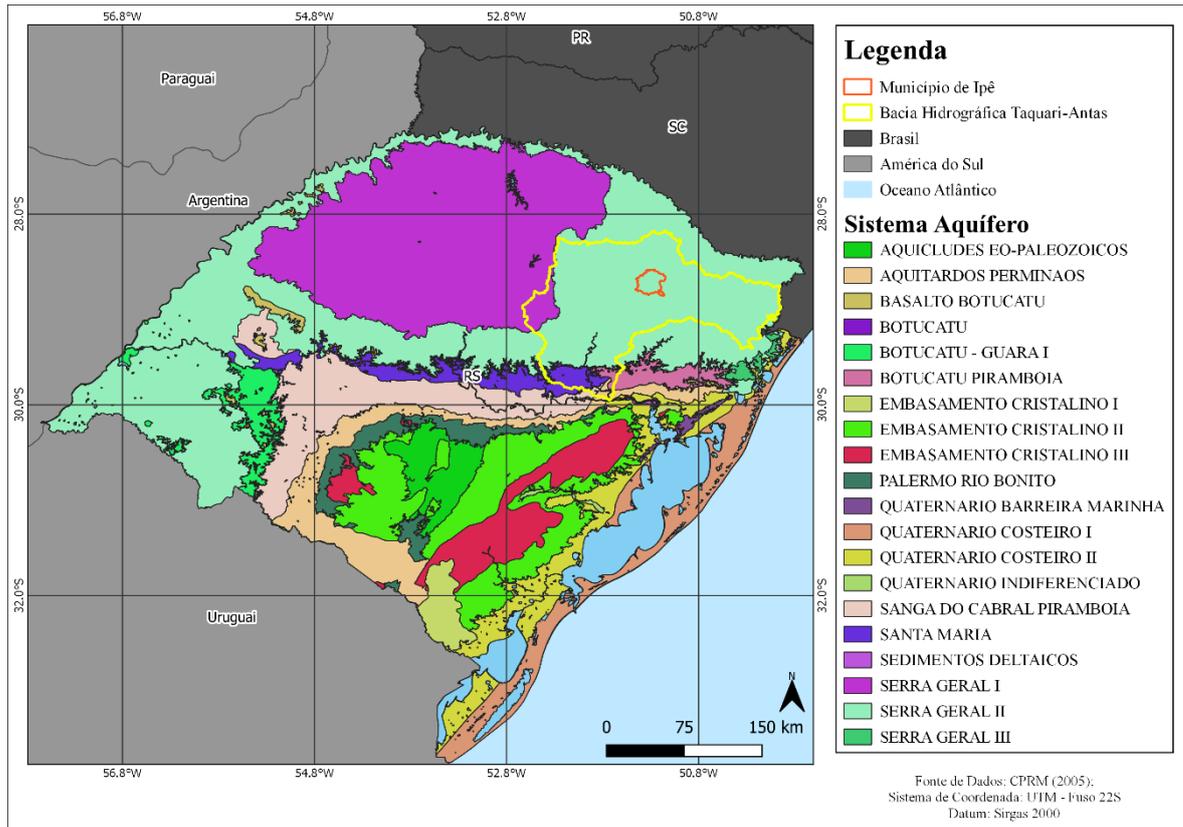
A unidade geomorfológica Planalto dos Campos Gerais, em predominância na área de estudo, é uma área com características de relevo plano a ondulado e caracterizada por topos de morros tabulares. É uma área fragmentada em muitos casos por áreas de relevo dissecado, além de apresentar-se recortada pelas áreas escarpadas da Serra Geral (OLIVEIRA et al., 2015).

Outra unidade que compõe o município é a unidade geomorfológica Serra Geral, presente em uma área menor no município, as características em relação ao relevo na unidade são de formas muito abruptas com vales fluviais bastante aprofundados, além de apresentar muitos topos de morro angulares e estreitos. A unidade se estabelece em terminais escarpados abruptos dos Planaltos das Missões e das Araucárias, que se desenvolvem sobre as rochas efusivas ácidas (OLIVEIRA et al., 2015).

5.1.2 Hidrografia

De acordo com a Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Rio Grande do Sul, o município de Ipê está inserido na Bacia do Rio Taquari-Antas, na região nordeste do

Figura 23 – Hidrogeologia do Município de Ipê – RS



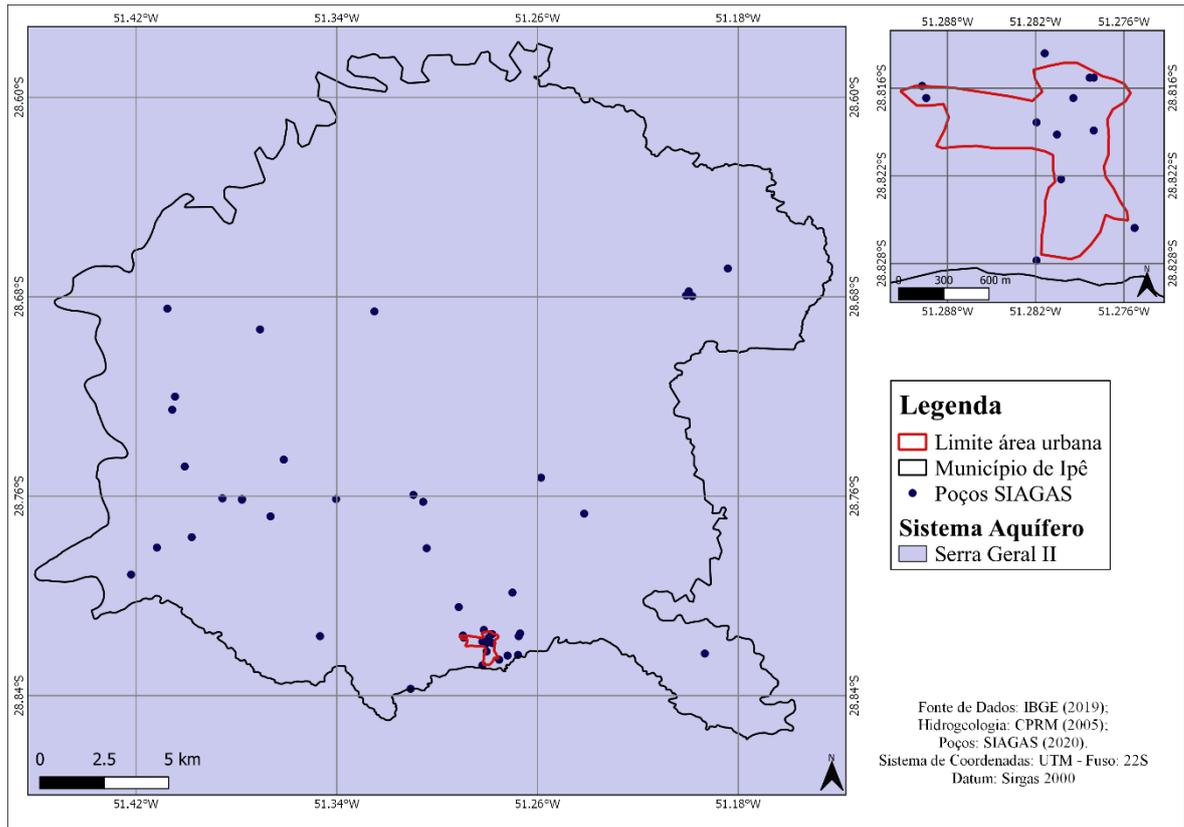
Fonte: A autora adaptado de CPRM (2005).

A área em que o município inclui-se é denominada de “Província Basáltica” por Hausman (1995), classificação que avalia o comportamento da água subterrânea através das características geológicas, morfológicas e climáticas. A Província expande-se por 1.200.000 km², sustentando um dos maiores derrames de lava do Planeta (DA SILVA, 2004). Desta área, Lisboa (1993) adotou três unidades morfotectônicas: Fachada Atlântica, Abóboda Central e Abóboda Oeste, sendo que a região na qual situa-se o Sistema Aquífero Serra Geral II é definido como Fachada Atlântica pertencente a região litológica efusiva ácida, cujo divisão das unidades hidrogeológicas são descritas por ácidas aplainadas e ácidas dissecadas.

5.1.3.1 Poços Cadastrados no Município

O município possui cadastrado no sistema de informações das águas subterrâneas 45 poços, que podem ser observados de acordo com a sua localização através de pontos azuis, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Distribuição dos Poços no Município de Ipê

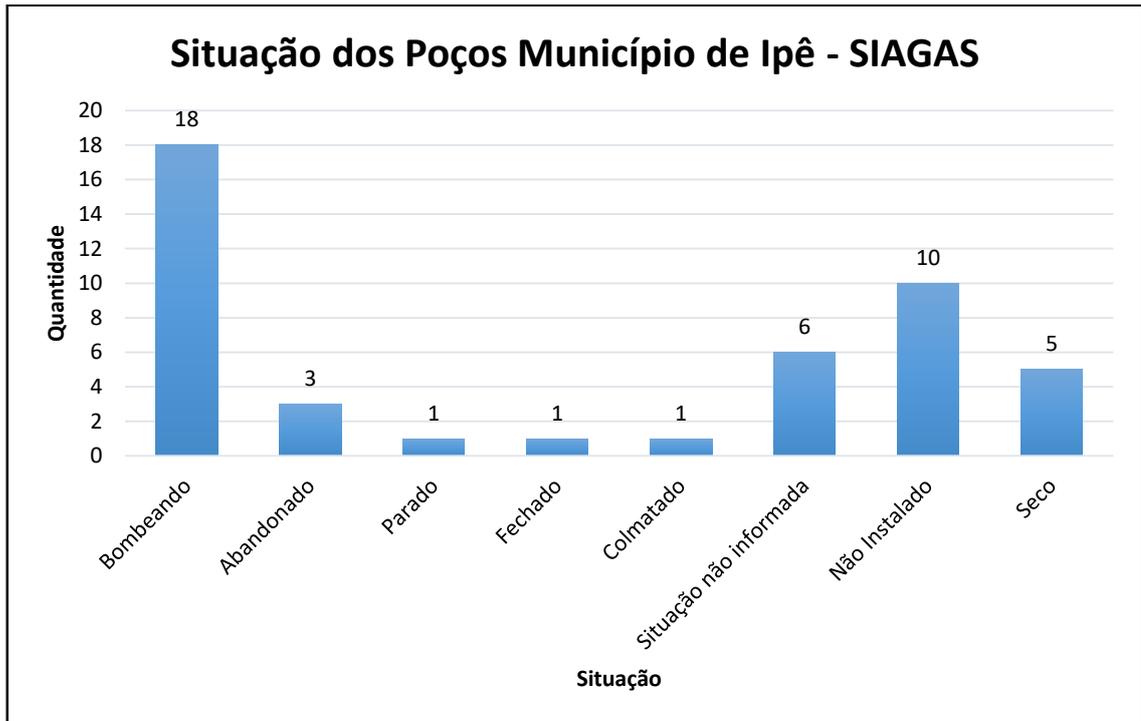


Fonte: A autora adaptado do SIAGAS (2020).

A partir de buscas pelo SIAGAS foi possível obter as informações sobre os poços instalados no município. Estes dados são divididos em localização geográfica (coordenadas UTM e cota), características construtivas (profundidade, presença e intervalo de filtros e o diâmetro), formação geológica e litologia, aquíferos que são captados e as características hidrodinâmicas (vazão, nível dinâmico e transmissividade). As informações encontradas auxiliam na caracterização dos aquíferos da região, na identificação das formas de captação, uso da água subterrânea e para a determinação dos valores para os parâmetros das metodologias utilizadas no estudo, método GOD e método DRASTIC.

Verificando cada poço cadastrado no sistema SIAGAS, é possível realizar uma varredura e elencar a situação de cada poço, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Situação dos Poços Município de Ipê – SIAGAS

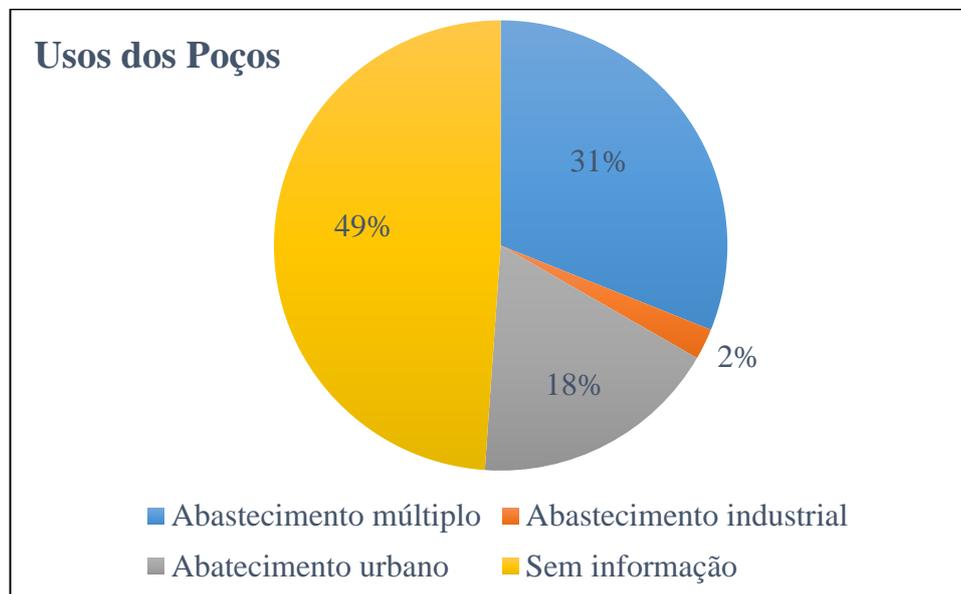


Fonte: Adaptado do SIAGAS (2020).

Dentre os 45 poços cadastrados no municípios, 40% estão sendo bombeados, 22% dos poços possuem situação de não instalados, 14% estão com situação não informada, 11% dos poços estão secos, 7% de poços abandonados, 2% está parado, 2% abandonado e 2% colmatado.

Conforme pode-se observar na Figura 26, os poços em Ipê possuem três finalidades, abastecimento múltiplo, abastecimento industrial e o abastecimento urbano.

Figura 26 – Usos dos Poços para o Município de Ipê – SIAGAS



Fonte: Adaptado do SIAGAS (2020).

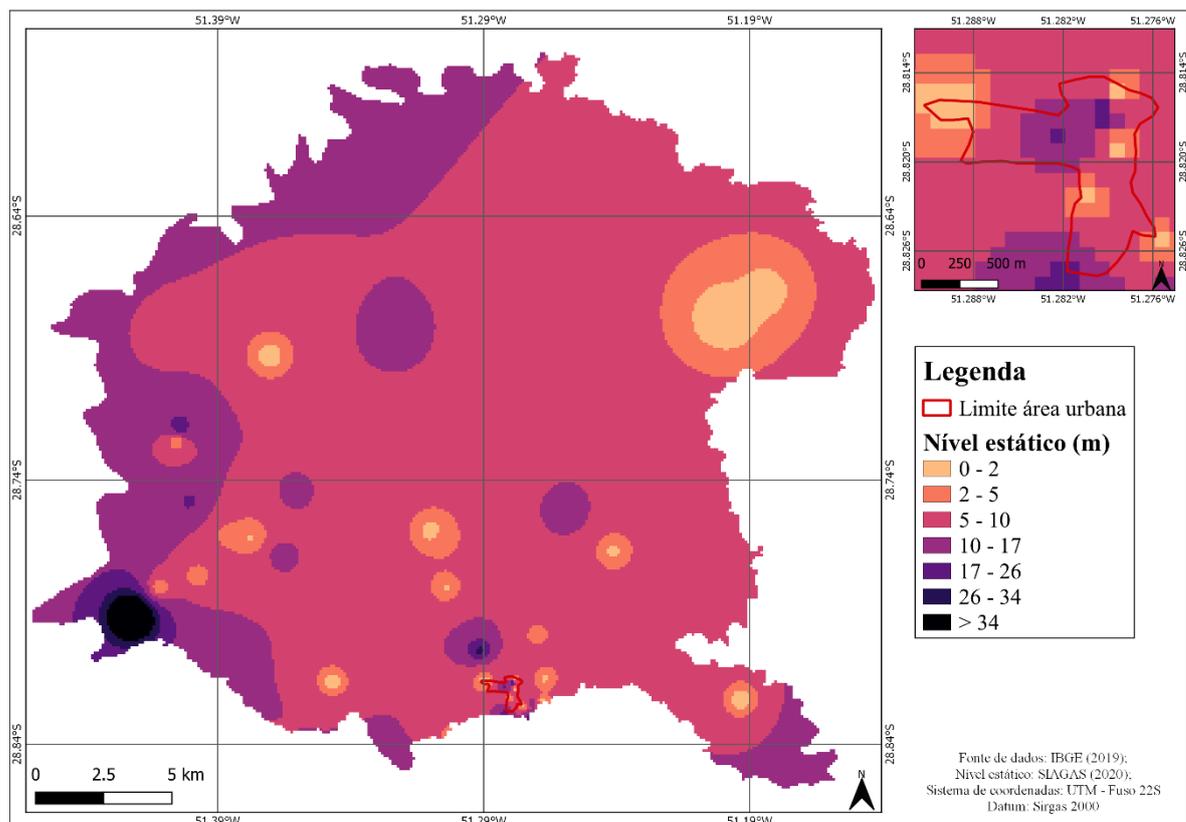
Realizando uma análise dos poços, nota-se que 49% dos poços no município não contém informações sobre o uso da água, 31% tem como finalidade o abastecimento múltiplo, 18% é para o abastecimento urbano e 2% com utilidade de abastecimento industrial.

Além disso, todos os poços pertencem a Formação Serra Geral e 3 poços são pertencentes ao Grupo São Bento, desta forma, todos poços estão localizados em aquíferos fraturados (SIAGAS, 2020).

5.1.3.2 Profundidade do Nível Estático

A profundidade do nível estático corresponde a profundidade do nível da água, para o município de Ipê, após aplicação do método de Interpolação IDW, as profundidades do município variam de 0,4 metros, sendo a menor profundidade até 78 metros, maior profundidade encontrada, conforme indicado no mapa apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Profundidade do Nível Estático do Município de Ipê



Fonte: A autora, adaptado do SIAGAS (2020).

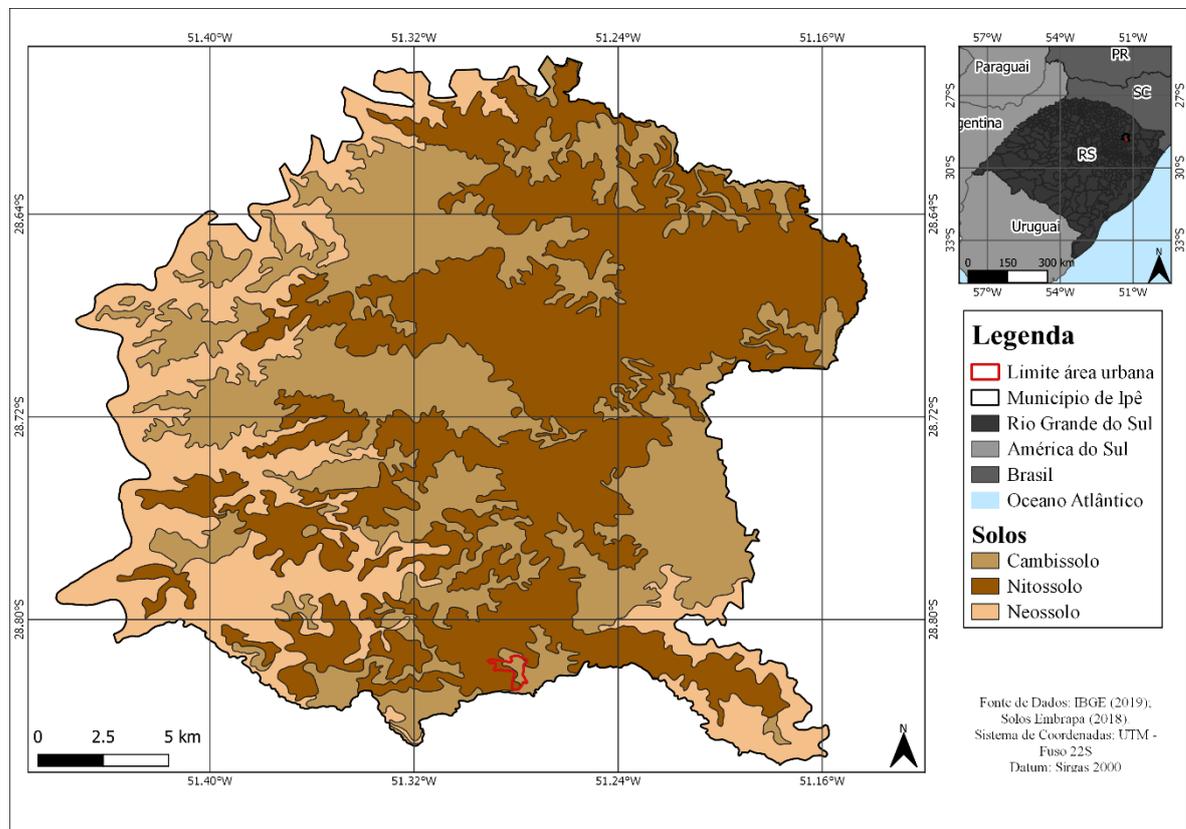
As profundidades que possuem maior predominância no município variam de 2 à 17 metros, sendo que as profundidades de 5 à 10 metros ocupam 69,82% da área, acompanhado

das profundidades de 10 à 17 metros que ocupam 21,44% e as profundidades de 2 à 5 metros compõem 5,46% da área, a profundidade que varia de 26 à 34 metros, possui menor influência na área ocupando 0,3%.

5.1.4 Pedologia

Os solos que representam o município segundo Mapa de Solos do Município de Ipê (2007), são: Cambissolos, Neossolos e os Nitossolos, conforme apresentado na Figura 28. Nota-se que a classe de nitossolos é a mais abrangente ocupando uma área de 43,25%, seguido da classe dos cambissolos com uma área de 34,85% e pôr fim a classe menos abrangente os neossolos com 21,9% de área.

Figura 28 – Classificações do Solo para o Município de Ipê – RS



Fonte: A autora adaptado da EMBRAPA (2018).

Os cambissolos são definidos por solos de horizonte B incipiente, na qual possui os materiais originários, como a rocha, demonstrados pelos minerais primários, são solos pouco desenvolvidos. A estrutura da rocha é praticamente ausente, bem como as estratificações do solo. A coloração é vermelha e uma elevada concentração de argila (EMBRAPA, 2018).

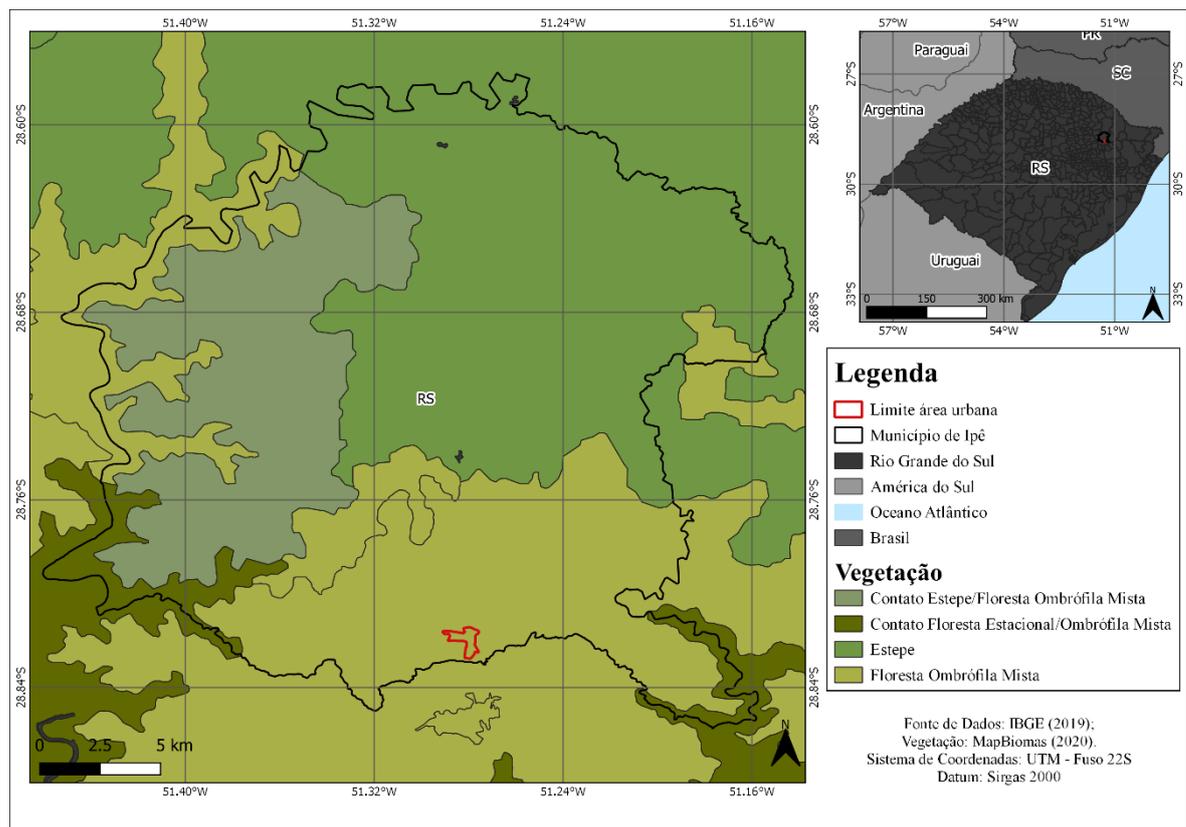
Os neossolos não possuem horizonte B e são determinados como solos pouco desenvolvidos, ou seja, solos rasos, a sua constituição é de material mineral ou material orgânico de espessura baixa. São solos em formação decorrentes dos desempenhos reduzidos dos processos pedogenéticos, ocasionados pelas características inerentes do material originário (EMBRAPA, 2018).

Por fim os nitossolos possuem horizonte B nítico situado abaixo do horizonte A, são constituídos por material mineral não hidromórfico, com avançada evolução pedogenética gerada na ação da ferralitização com intensa hidrólise. Possui textura argilosa ou muito argilosa (EMBRAPA, 2018).

5.1.5 Vegetação

A vegetação no município é composta por floresta estacional decidual, floresta ombrófila mista e estepe. A floresta ombrófila mista tem predominância na área do município, já a floresta estacional decidual e a savana dominam uma menor área (MAPBIOMAS, 2020). O mapa da vegetação do município pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 – Vegetação do Município de Ipê - RS



Fonte: A autora, adaptado do MapBiomas (2020)

A floresta ombrófila mista é definida como unidade fitogeográfica e é conhecida por conter araucárias, pinheirais ou pinhais (KERSTEN et al., 2015). A floresta estacional decidual, também conhecida como matas secas, representa uma parcela importante para a biota brasileira, geralmente está floresta ocorre em locais com duas estações bem definidas e sua vegetação são árvores arbóreas (GONÇALVES, 2014).

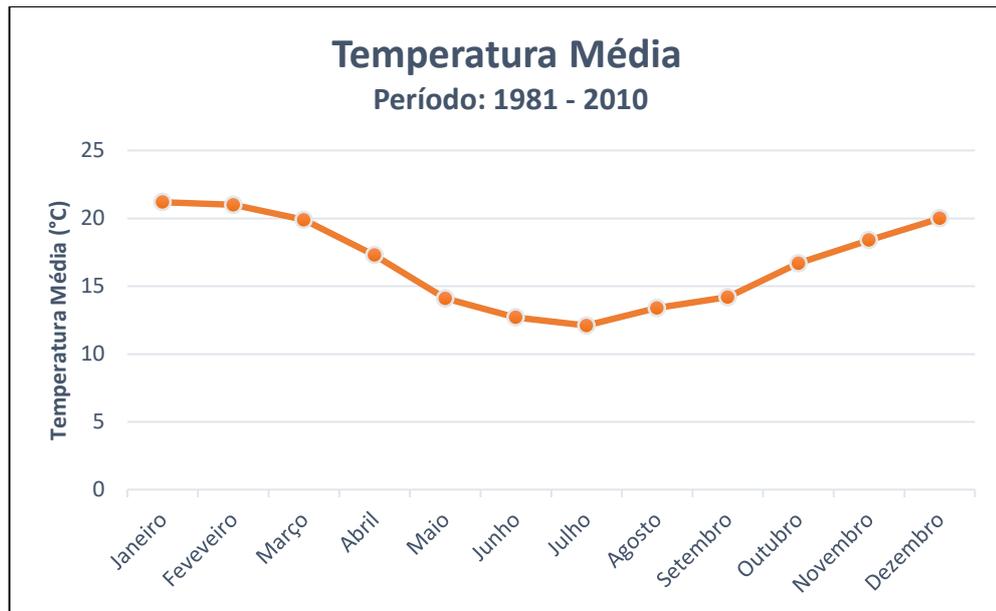
Já a vegetação estepe, formações campestres segundo RADAMBRASIL, cobre as áreas de relevo aplainado/ondulado, com dominância de solos com origem dos derrames basálticos e de formações litológicas sedimentares (VELOSO & GÓES FILHO, 1982). As espécies mais frequentes são: A capim-caninha (*Andropogon lateralis* e *Andropogon sellowianus*), o capim-touceira (*Sporobolus indicus*) e *Eragrostis baiensis*, além de inúmeras espécies dos gêneros *Stipa*, *Aristida*, *Panicum*, *Erianthus*, *Piptochaetium*, etc (LEITE & KLEIN, 1990).

5.1.6 Clima

O clima do município de Ipê é classificado como Subtropical I do tipo Ia: clima pouco úmido com inverno frio e verão fresco. A precipitação anual para este clima é de 1.200 mm – 1.500 mm anuais. A temperatura média anual varia de 17°C à 20°C, para o mês mais frio a temperatura média varia de 11°C à 14°C e para o mês mais quente a temperatura média varia entre 20°C e 26°C (ROSSATTO, 2011). A classificação climática para o município segundo classificação de Köppen é mesotérmico úmido do tipo Cfb úmido com verões amenos (FEE, 2017).

Na Figura 30 é apresentada a temperatura média mensal da estação meteorológica do município de Caxias do Sul para o período de 1981 a 2010, uma série histórica de 29 anos. Observa-se que os meses que apresentam menor temperatura são junho e julho, com temperaturas de 12,7°C e 12,1°C respectivamente e os meses com maior temperatura foram janeiro e fevereiro com temperaturas de 21,2°C e 21°C, respectivamente (INMET, 2020).

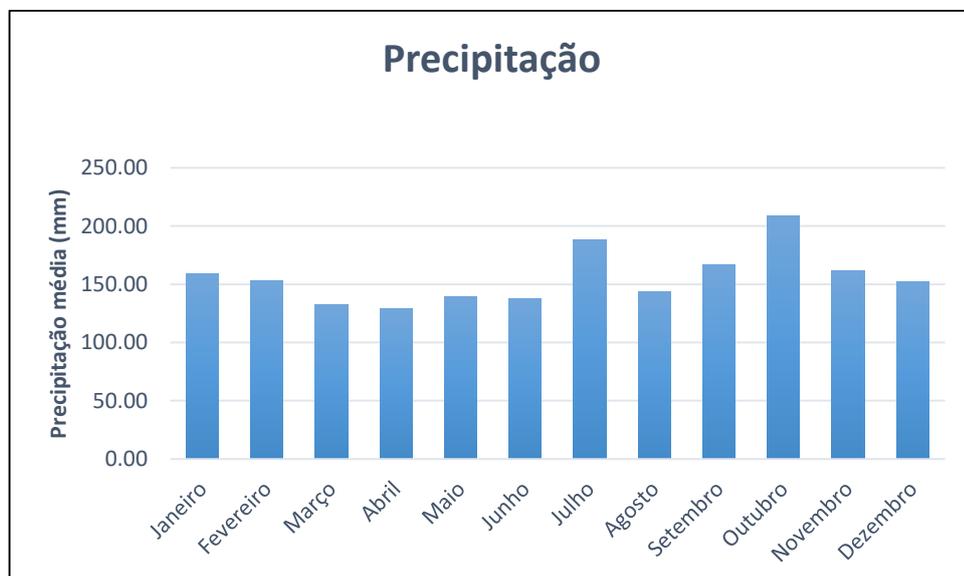
Figura 30 – Gráfico da Temperatura Média para a Estação climatológica de Caxias do Sul



Fonte: adaptado de INMET (2020).

A precipitação média mensal para a estação meteorológica de Caxias do Sul, para o período de 2000 até 2020, é observada no gráfico indicado na Figura 31. O mês que obteve precipitação maior é o mês de outubro com o valor de 208,16 mm, acompanhado do mês de julho com precipitação de 188,20 mm. Os meses mais secos são abril com 128,98 mm, março com 132,39 mm, junho com 137,40 e maio com 139,61. Já a precipitação média anual obtida foi de 1.781,45 mm (INMET, 2020).

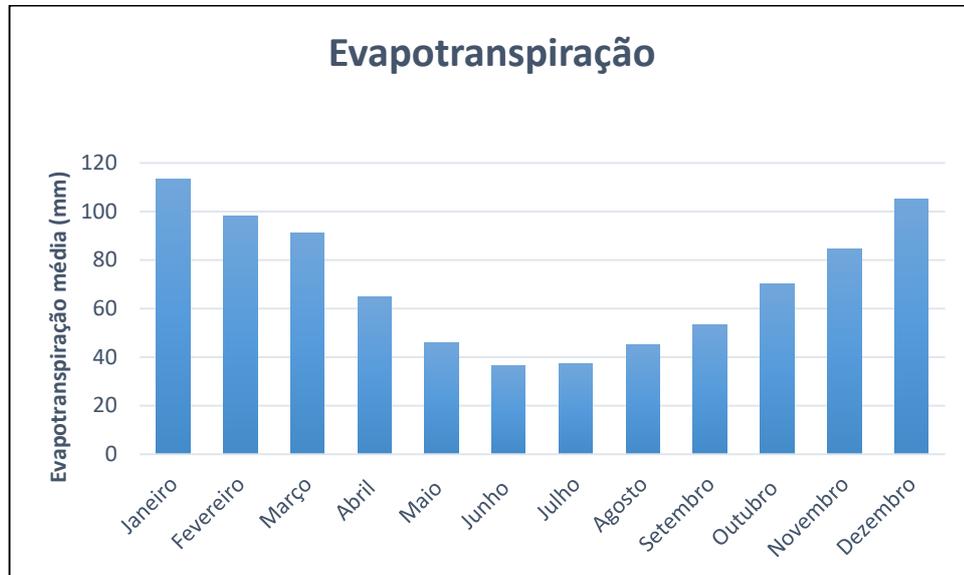
Figura 31 – Precipitação mensal Estação meteorológica de Caxias do Sul



Fonte: Adaptado de INMET (2020).

A média mensal da evapotranspiração, estimada a partir do método de Thornthwaite (1948), para a estação meteorológica de Caxias do Sul, para o período de 1961 à 2020, é apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Evapotranspiração mensal Estação meteorológica de Caxias do Sul



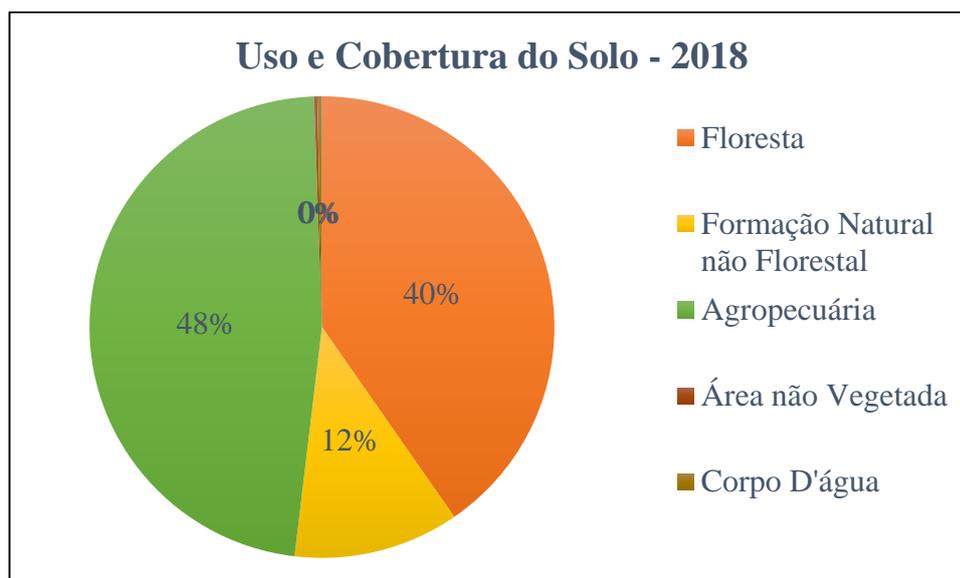
Fonte: Adaptado de Intermediador (2020).

Conforme apresentado o mês que possui menor evapotranspiração é o mês de junho com 36,51 mm, já o mês que possui a maior evapotranspiração é o mês de janeiro com um valor de 113,22 mm. Além disso, observa-se que os meses de inverno são os que possuem as menores evapotranspirações e os meses mais quentes, ou seja, verão são os que possuem as maiores evapotranspirações.

5.1.7 Uso e Ocupação do Solo

O município de Ipê possui extensa área territorial detendo de uma área de 599,245 km² (IBGE, 2019), avaliando o uso e ocupação do solo, o município distribui-se em florestas, formação natural não florestal, agropecuária, áreas não vegetadas e corpos d'água, conforme apresentado na Figura 33, com suas determinadas porcentagens (MAPBIOMAS, 2018).

Figura 33 – Uso e Ocupação do Solo para o Município de Ipê no ano de 2018



Fonte: A autora, adaptado de MapBiomias (2018).

A agropecuária usufrui de 28.504,99 hectares, 48% da área, deste valor 38% é utilizado para a agricultura que realiza cultivo anual e perene, 35% são pastagens naturais ou plantadas, com destino para a agropecuária, e por fim 27% são áreas de mosaico da agricultura ou pastagem, classificados como uso agropecuário que não foram distinguidos entre pastagem e agricultura (MAPBIOMAS, 2018).

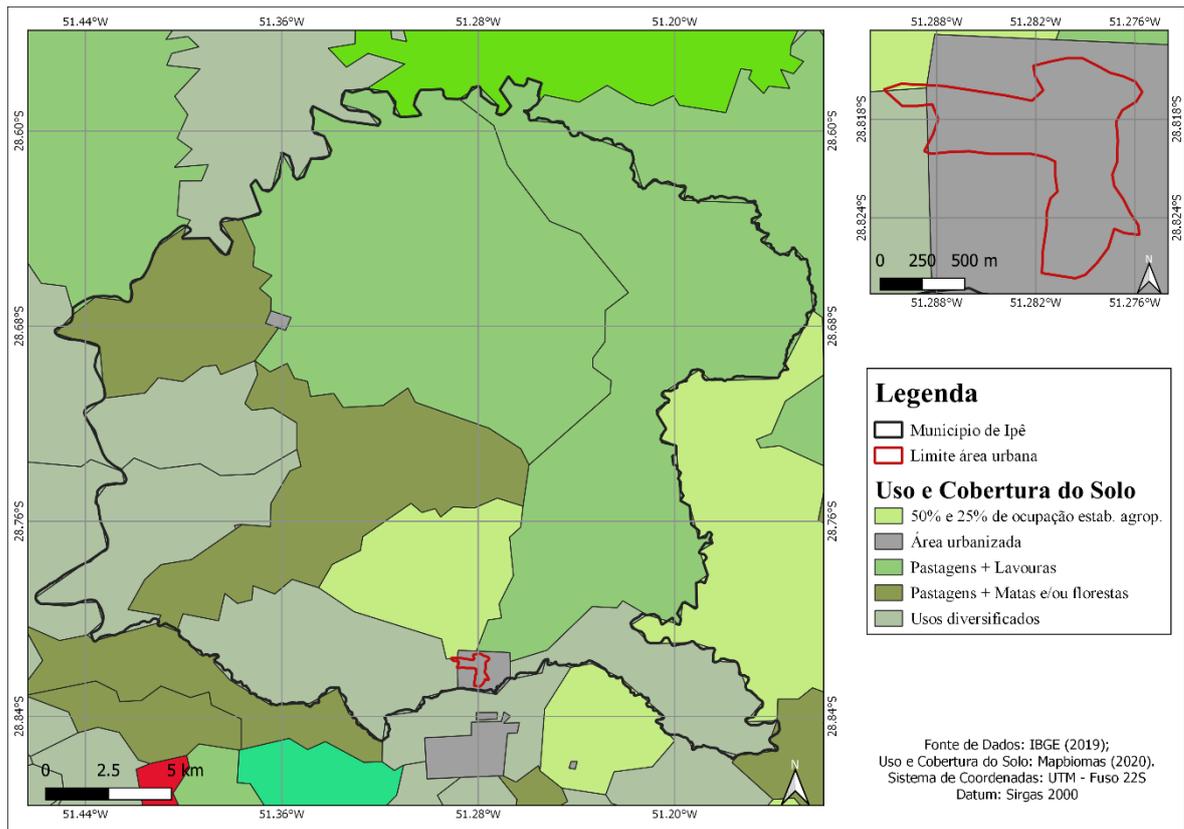
Com 40%, ou seja 24.188,02 hectares de área, são ocupadas pelas florestas que se especificam entre floresta natural e floresta plantada. 91% desta área florestada é apropriada pela floresta natural classificada pela formação florestal que pode apresentar os biomas: Amazônia, caatinga, cerrado, mata atlântica, pampa e pantanal. Apenas 9% desta área é para floresta plantada, que possui como classificação espécies arbóreas plantadas para fins comerciais (MAPBIOMAS, 2018).

Por fim, a formação natural não florestal ocupando 12% da área, sendo assim 6.903,75 hectares, e classificada segundo MapBiomias (2018), pela formação campestre, ou seja campo, podendo pertencer aos biomas: Amazônia, caatinga, cerrado, mata atlântica, pampa e pantanal.

Além disso, no município desenvolvem-se os rios e lagos ocupando no ano de 2018 uma área de 188,77 hectares. E para as áreas não vegetadas, cuja classificação são para infraestrutura urbana podendo ser áreas urbanizadas, estradas, vias e construções. Este setor ocupa 137,53 hectares da área do município (MAPBIOMAS, 2018).

Na Figura 34 é apresentado o mapa do uso e ocupação do solo para o município, onde observa a área urbana, áreas de pastagens e lavouras, áreas com pastagens, matas e florestas, área de ocupação agropecuária e usos diversificados.

Figura 34 – Uso e Ocupação do Solo do Município de Ipê



Fonte: A autora, adaptado do MapBiomas (2020).

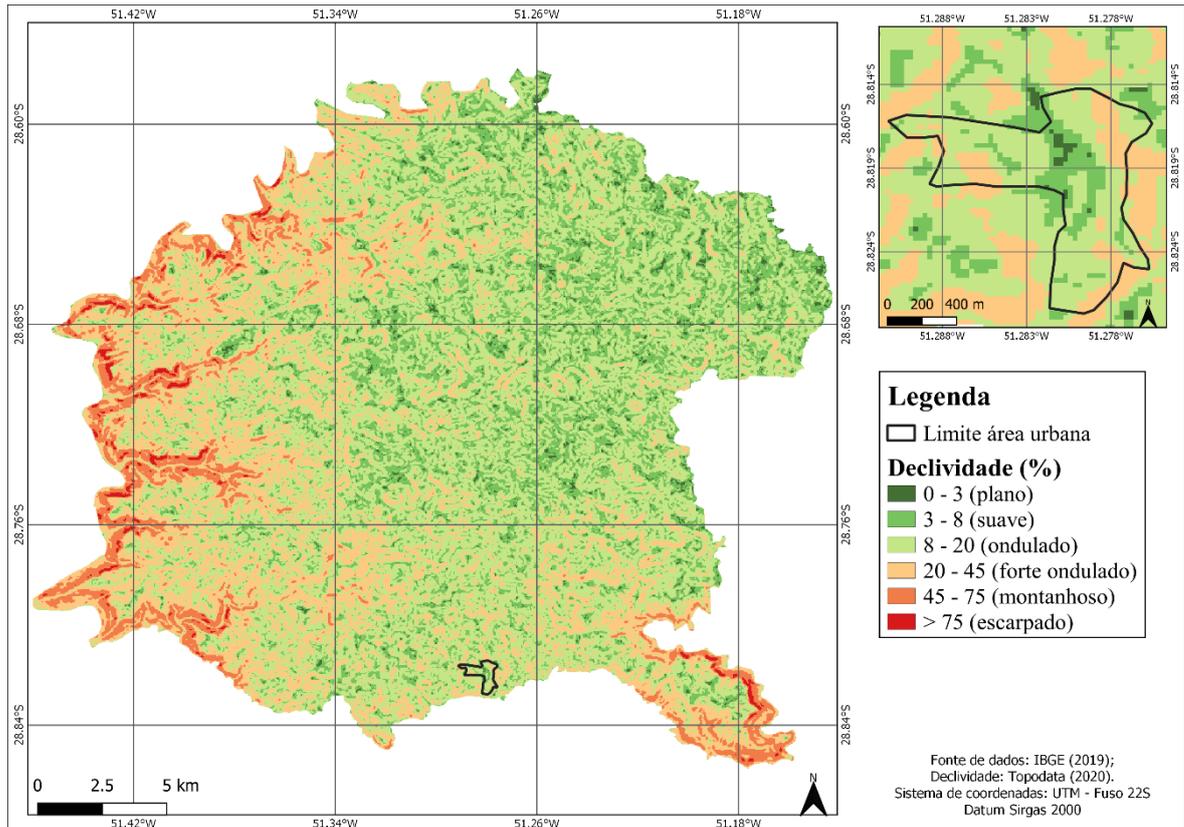
5.1.8 Clinografia

A partir dos dados da Embrapa (1995), no município as declividades variam entre plano, ondulado, forte ondulado e em algumas áreas a classificação obtida é montanhoso a escarpado. O mapa de clinografia do município é apresentado na Figura 35.

A declividade predominante no município é a ondulada compreendendo uma área de 48,23%, após com 25,16% a declividade classificada como forte ondulada, na sequência a declividade suave está presente em 18,62%. As declividades menos expressivas na área são: montanhoso, plano e escarpado com 5,81%, 1,54% e 0,64% respectivamente.

Cabe ressaltar que uma das áreas que apresentam as declividades classificadas como montanhosas à escarpadas são as áreas em que tem ocorrência de recursos hídricos superficiais, ou seja, rios, pois o entorno destes rios tem características deste tipo de relevo.

Figura 35 – Clinografia do Município de Ipê – RS



Fonte: A autora, adaptado do Topodata (2020).

5.2 VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos de vulnerabilidade dos aquíferos com a utilização de dois métodos (DRASTIC e GOD).

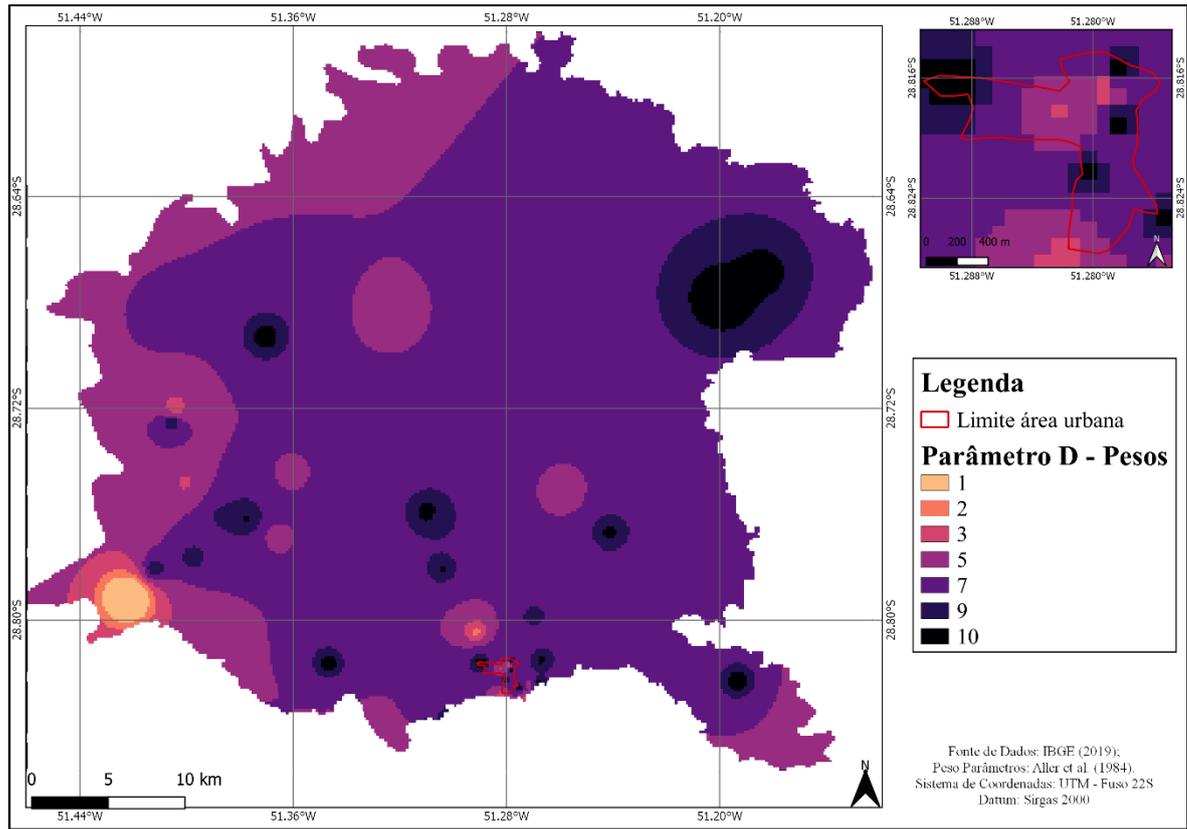
5.2.1 Método DRASTIC

Os resultados para cada parâmetro do método DRASTIC são apresentados a seguir.

5.2.1.1 Parâmetro D – Profundidade do Nível Estático

A Figura 36 indica o parâmetro correspondente a profundidade do nível estático com o índice DRASTIC aplicado, que por fim será multiplicado pelo fator (“w”) que é 5.

Figura 36 – Parâmetro Profundidade do Nível Estático classificado com o índice DRASTIC



Fonte: A autora (2020).

5.2.1.2 Parâmetro R – Recarga

Na Tabela 13 são apresentados os valores para a recarga estimada mensal.

Tabela 13 – Recarga estimada mensal para o Município de Ipê

(continua)

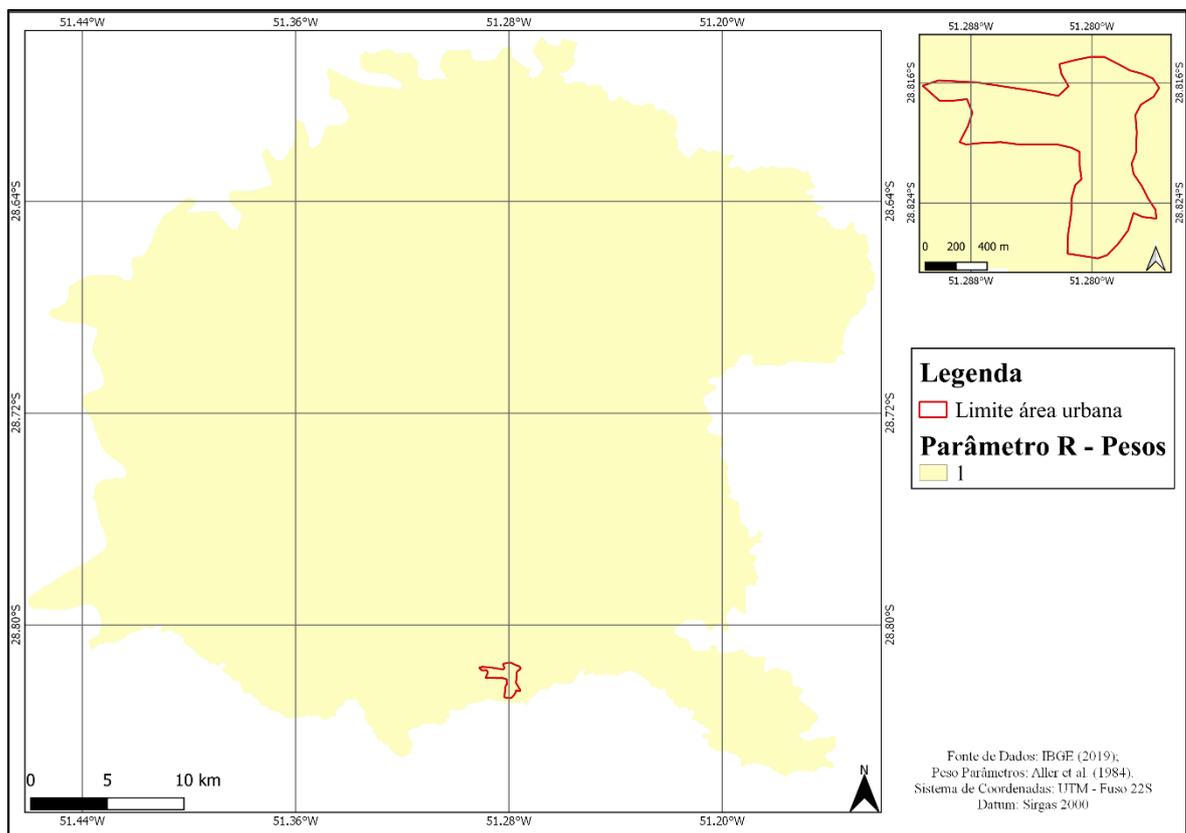
Mês	Estimativa de Recarga (mm/mês)
Janeiro	0
Fevereiro	2,97
Março	0
Abril	26,50
Maiο	52,88
Junho	60,70
Julho	95,79
Agosto	56,19
Setembro	64,59

(conclusão)	
Outubro	67,74
Novembro	22,40
Dezembro	0

Fonte: A autora (2020).

A partir dos dados da recarga estimada mensal, obteve-se uma média anual de 37,47 mm, onde foi atribuído o peso 1 (“r”), dessa forma, foi desenvolvido o mapa apresentado na Figura 37, que posteriormente será multiplicado pelo fator 4 (“w”), para gerar o mapa final da vulnerabilidade.

Figura 37 – Parâmetro Recarga classificado com o índice DRASTIC

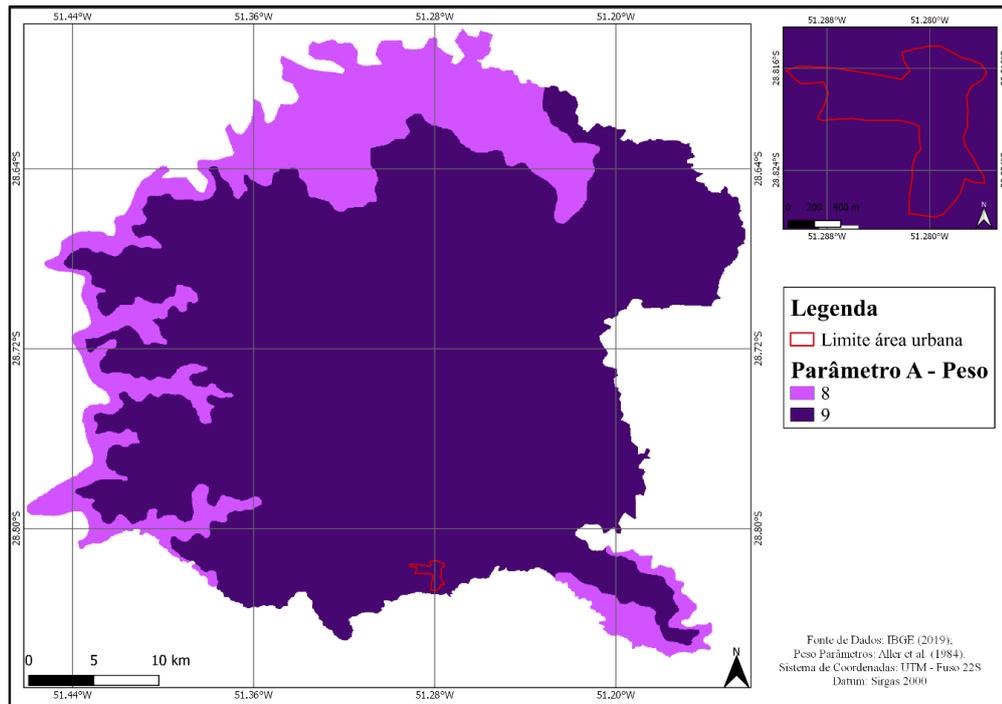


Fonte: A autora (2020)

5.2.1.3 Parâmetro A – Meio Aquífero

O mapa resultante da aplicação do índice DRASTIC para o parâmetro meio aquífero, é apresentado na Figura 38, que posteriormente será multiplicado pelo fator 3 (“w”).

Figura 38 - Parâmetro do Meio Aquífero classificado com o índice DRASTIC

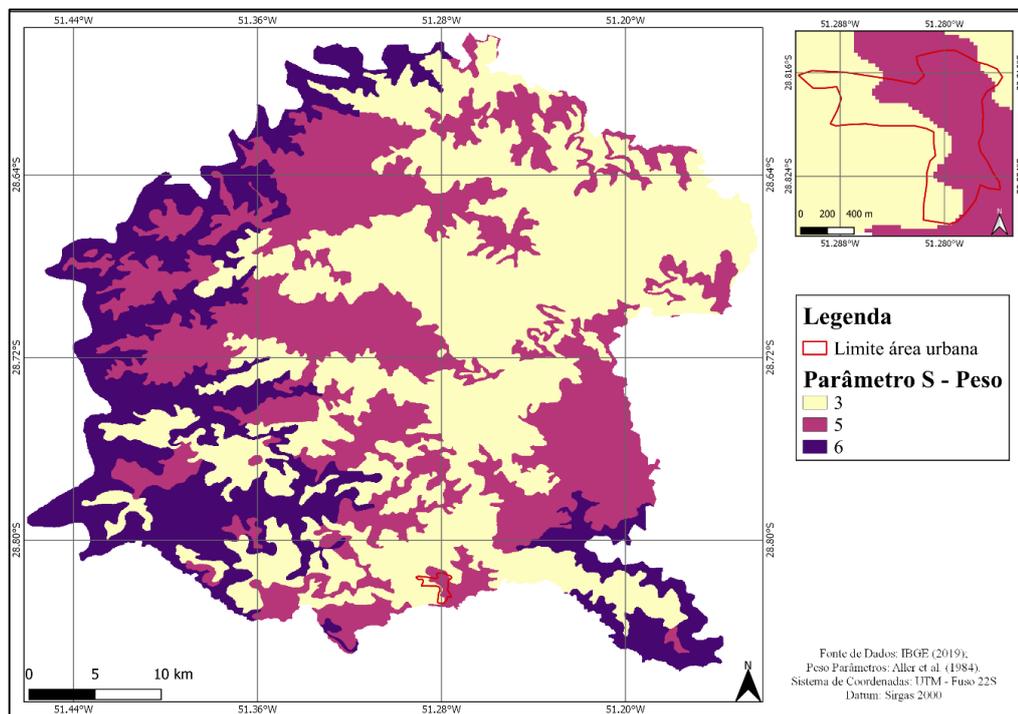


Fonte: A autora (2020).

5.2.1.4 Parâmetro S – Solos

A Figura 39 apresenta o parâmetro solo classificado com o índice DRASTIC, que posteriormente será multiplicado pelo fator 2 (“w”).

Figura 39 – Parâmetro Solos classificado com o índice do DRASTIC

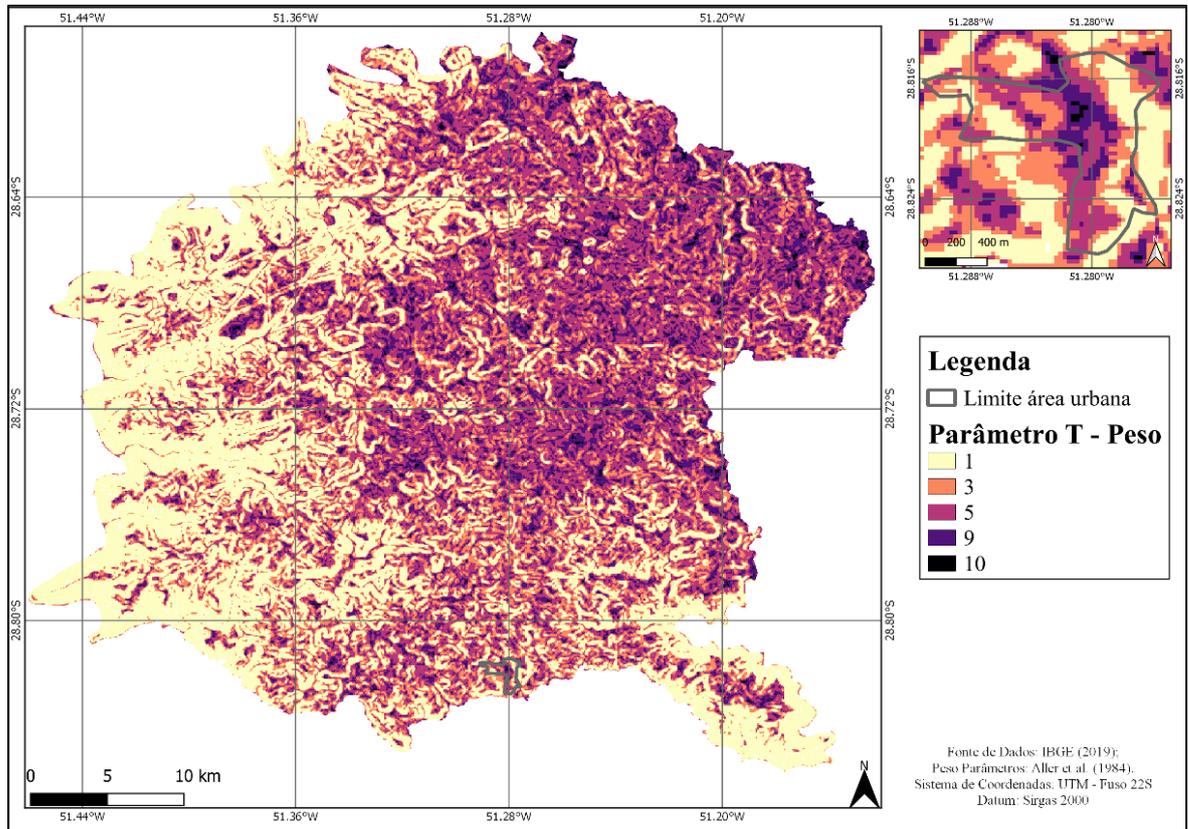


Fonte: A autora (2020).

5.2.1.5 Parâmetro T – Topografia

O mapa do parâmetro topográfico com a classificação do índice DRASTIC é apresentado na Figura 40, que será multiplicado pelo fator (“w”) 1.

Figura 40 – Parâmetro Topografia classificado com o índice DRASTIC

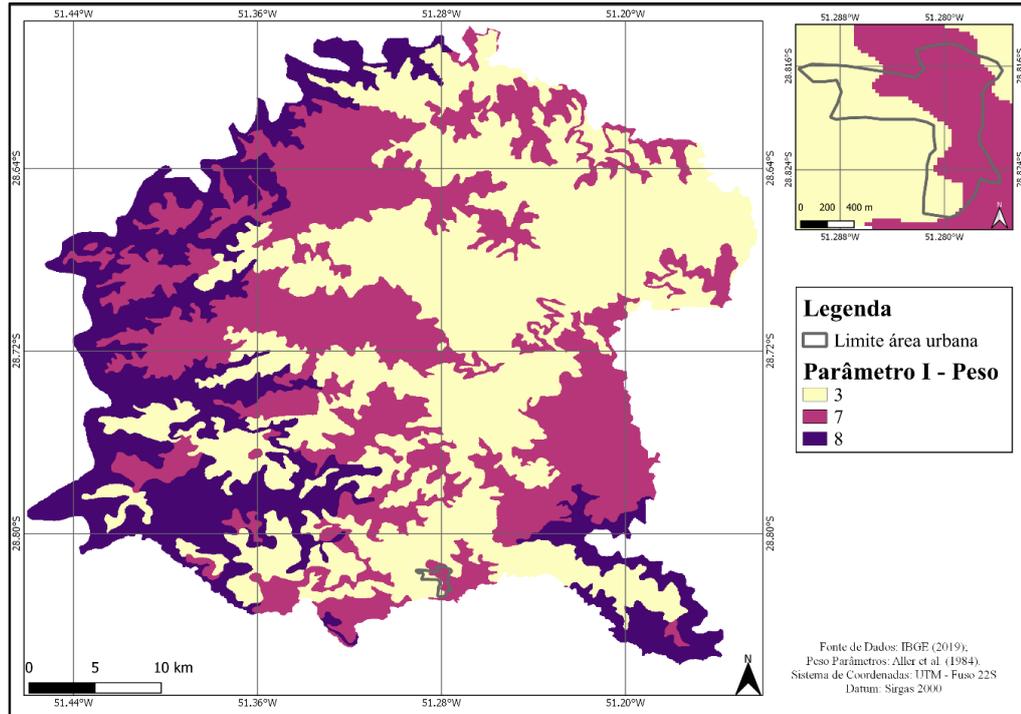


Fonte: A autora (2020).

5.2.1.6 Parâmetro I – Influência da Zona Vadosa

Na Figura 41 é apresentado o mapa da influência da zona vadosa classificado com os índices DRASTIC, que serão multiplicados pelo fator (“w”) correspondente a 5.

Figura 41 – Parâmetro Influência da Zona Vadosa classificado com o índice DRASTIC

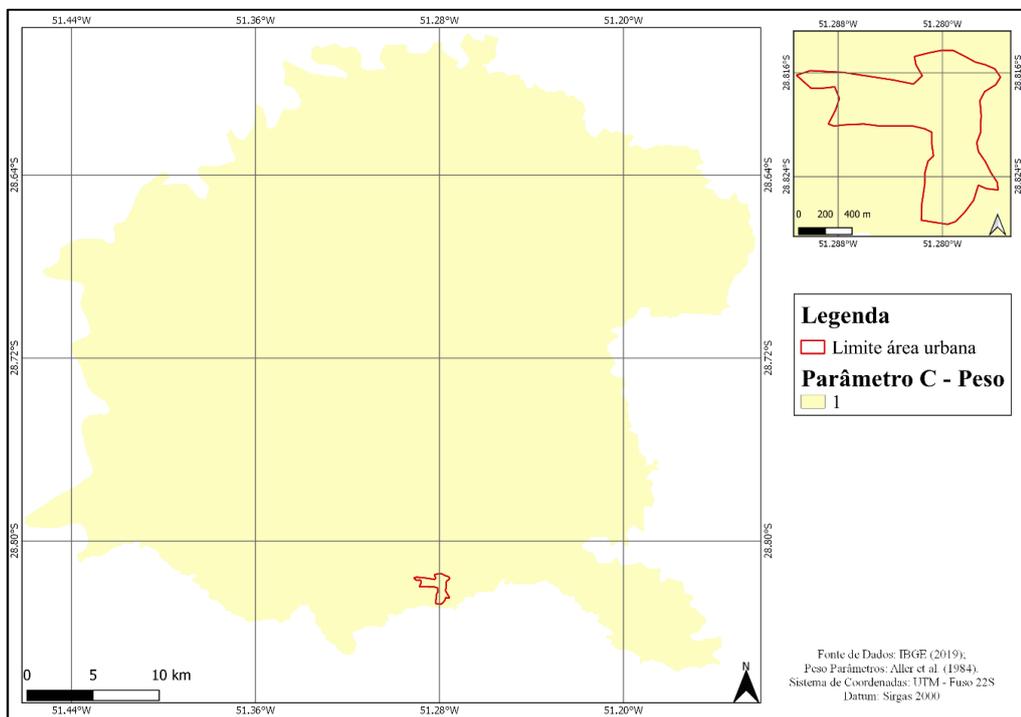


Fonte: A autora (2020).

5.2.1.7 Parâmetro C – Condutividade

O mapa da Figura 42 apresenta o parâmetro condutividade com o índice DRASTIC aplicado, que será multiplicado pelo fator 3 (“w”).

Figura 42 – Parâmetro Condutividade Hidráulica classificado com o índice DRASTIC



Fonte: A autora (2020).

5.2.1.8 Vulnerabilidade à Contaminação Método DRASTIC

Na Tabela 14 são apresentados os tipos de classe encontrados para cada parâmetro, os pesos atribuídos, o fator utilizado para multiplicação e o resultado, utilizando o método DRASTIC.

Tabela 14 – Resultados parciais dos parâmetros do método DRASTIC

(continua)			
Parâmetro D – Profundidade do N.A. (m)	Peso “r”	Fator “w”	Resultado
> 34	1	5	5
26 – 34	2	5	10
17 – 26	3	5	15
10 – 17	5	5	25
5 – 10	7	5	35
2 – 5	9	5	45
0 – 2	10	5	50
Parâmetro R – Recarga (mm)	Peso “r”	Fator “w”	Resultado
37,47	1	4	4
Parâmetro A – Litologia do Meio Aquífero	Peso “r”	Fator “w”	Resultado
Unidade Gramado	8	3	24
Unidade Caxias	9	3	27
Parâmetro S – Tipo de Solos	Peso “r”	Fator “w”	Resultado
Nitossolos	3	5	15
Cambissolos	5	5	25
Neossolos	6	5	30
Parâmetro T – Declividade (%)	Peso “r”	Fator “w”	Resultado
> 18	1	1	1
12 – 18	3	1	3
6 – 12	5	1	5
2 – 6	9	1	9
0 – 2	10	1	10

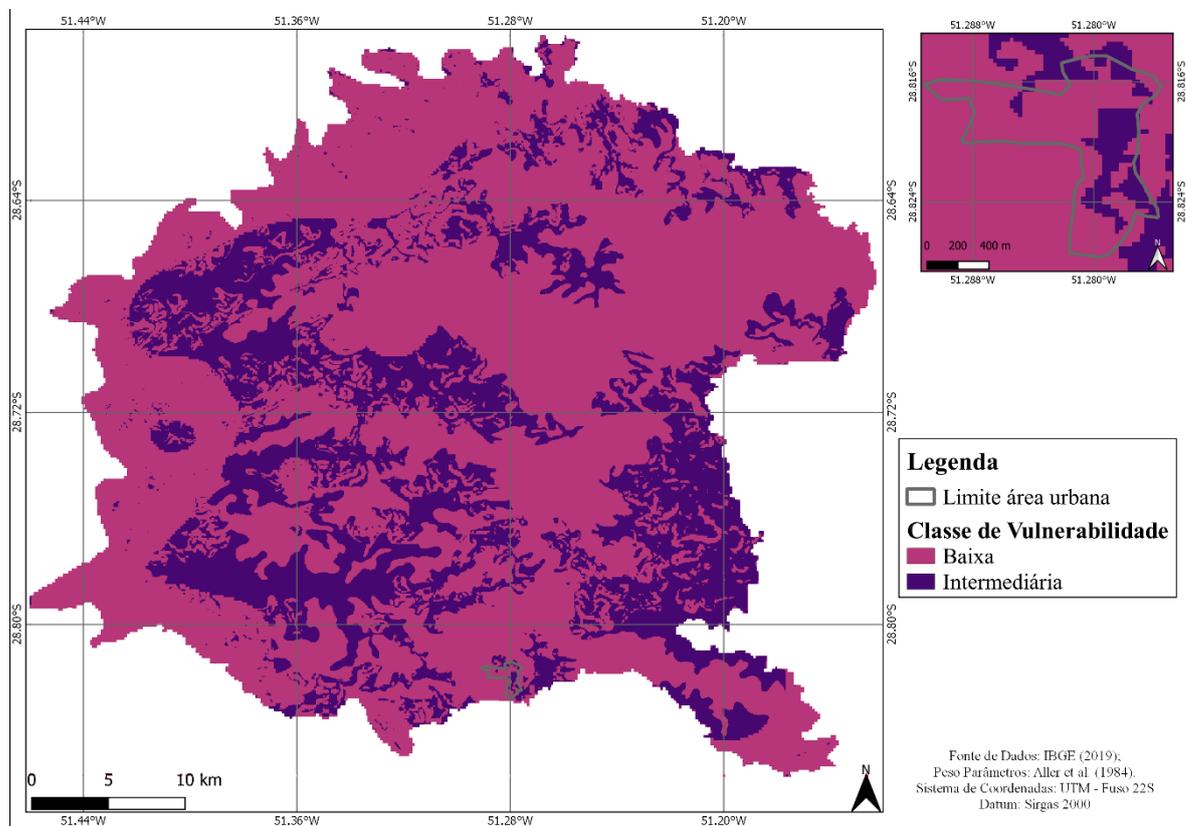
(conclusão)

Parâmetro I – Zona Não Saturada	Peso “r”	Fator “w”	Resultado
Nitossolo	3	5	15
Cambissolo	7	5	35
Neossolo	8	5	40
Parâmetro C – Condutividade Hidráulica	Peso “r”	Fator “w”	Resultado
5.10^{-7} a 5.10^{-5} m/s	1	3	3

Fonte: A autora (2020).

Após, aplicação da equação definida por Aller et al. (1987), foi possível obter o resultado da vulnerabilidade à contaminação para o município de Ipê através do método DRASTIC, Figura 43.

Figura 43 – Mapa de Vulnerabilidade do Município de Ipê do Método DRASTIC



Fonte: A autora (2020).

O resultado obtido para a vulnerabilidade pelo método DRASTIC, gerou duas classes, cuja variou de baixa a intermediária, ou seja, os valores obtidos foram de inferior à 120 para classificação baixa e valores entre 120 à 159 para a classificação intermediária (ALLER et al., 1987). A vulnerabilidade baixa abrange uma área de 71,33%, enquanto a vulnerabilidade intermediária ocupou 28,67% da área.

Para a avaliação da vulnerabilidade o parâmetro mais importante é o da profundidade do nível estático (MARION, et al., 2010). Neste estudo os parâmetros profundidade do nível estático, tipo de solo e a influência da zona não saturada são as que mais possuem influência nos resultados, pois são multiplicadas pelo valor atribuído “5”, maior valor do método, além disso, são parâmetros que apresentaram maior variabilidade. Outro parâmetro com maior variabilidade é o da topografia, porém o valor atribuído é “1”, ou seja, menor valor da metodologia, indicando uma influência inferior.

O parâmetro como a recarga que possui um valor atribuído de “4” apresenta uma variabilidade menor, porém devido ao seu fator pode influenciar nos resultados, já a litologia do meio aquífero e condutividade hidráulica, não influenciam tanto, pois são parâmetros com menor variabilidade, além disso possuem menor valor atribuído.

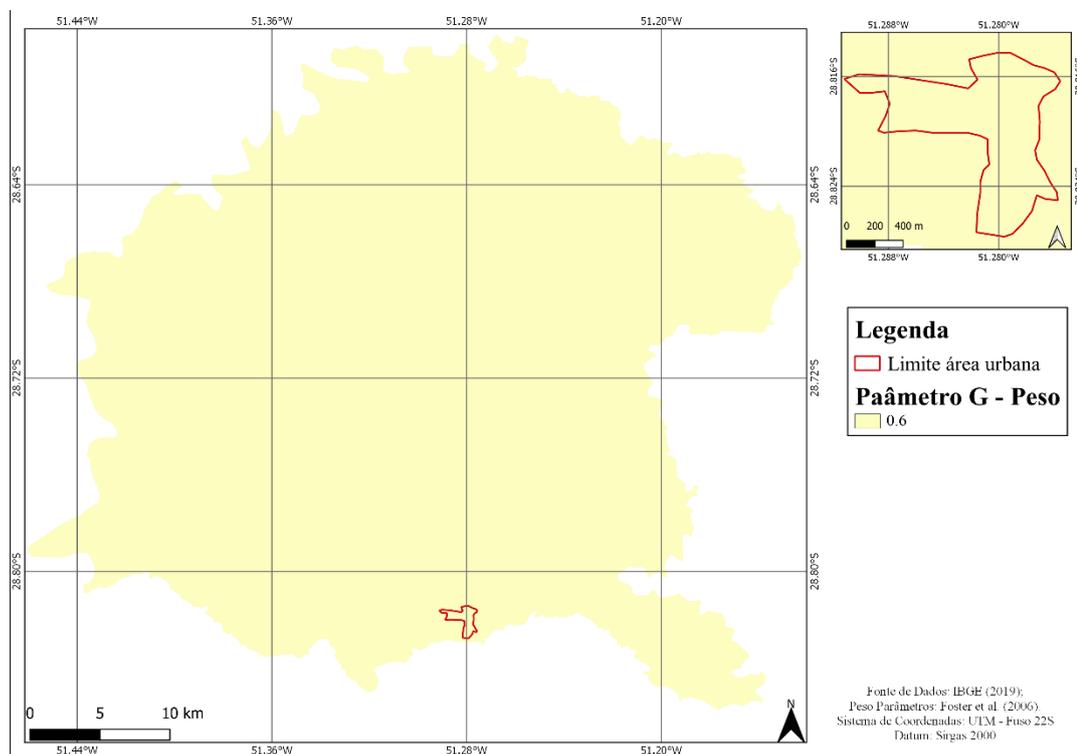
5.2.2 Método GOD

Os resultados para cada parâmetro do método GOD são apresentados a seguir.

5.2.2.1 Parâmetro G – Grau de Confinamento da Água Subterrânea

Na Figura 44 é apresentado o mapa do grau de confinamento da água subterrânea com o índice GOD aplicado.

Figura 44 – Parâmetro Grau de Confinamento da Água Subterrânea com índice GOD

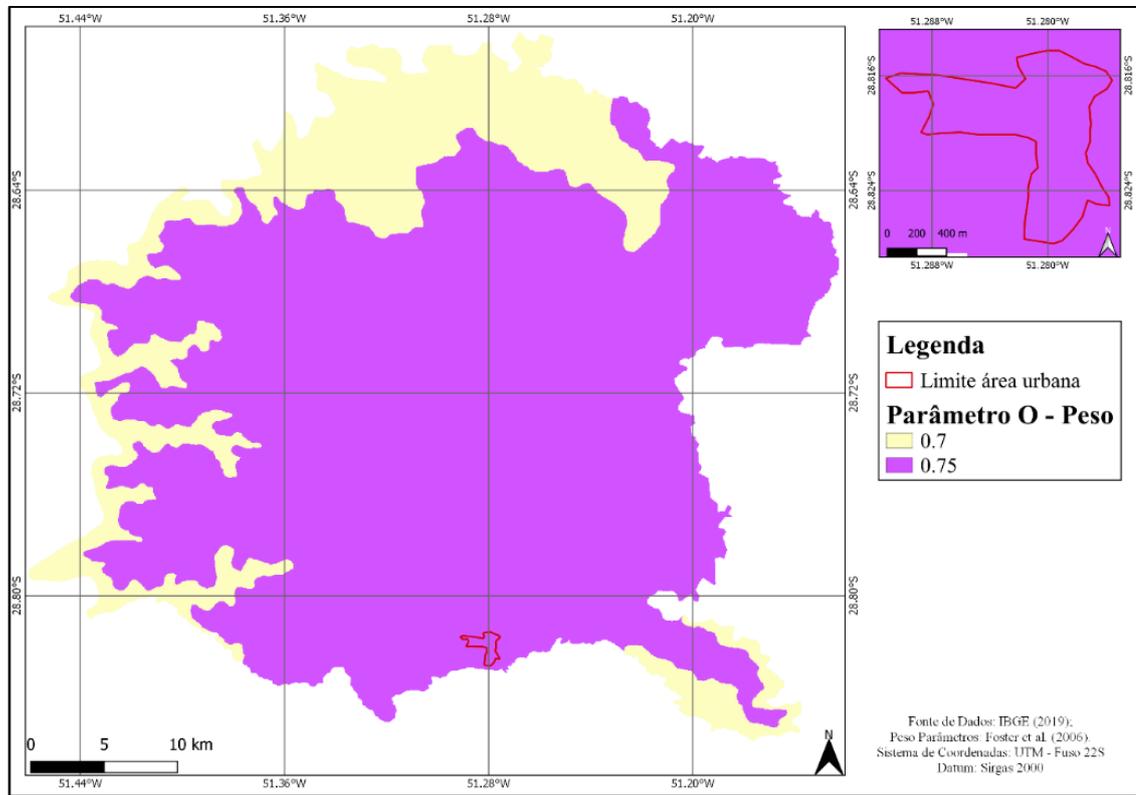


Fonte: A autora (2020).

5.2.2.2 Parâmetro O – Ocorrência de Estratos de Cobertura

O mapa do parâmetro O é apresentado na Figura 45, onde está aplicado o método GOD.

Figura 45 – Parâmetro da Ocorrência de Estratos de Cobertura com o índice GOD

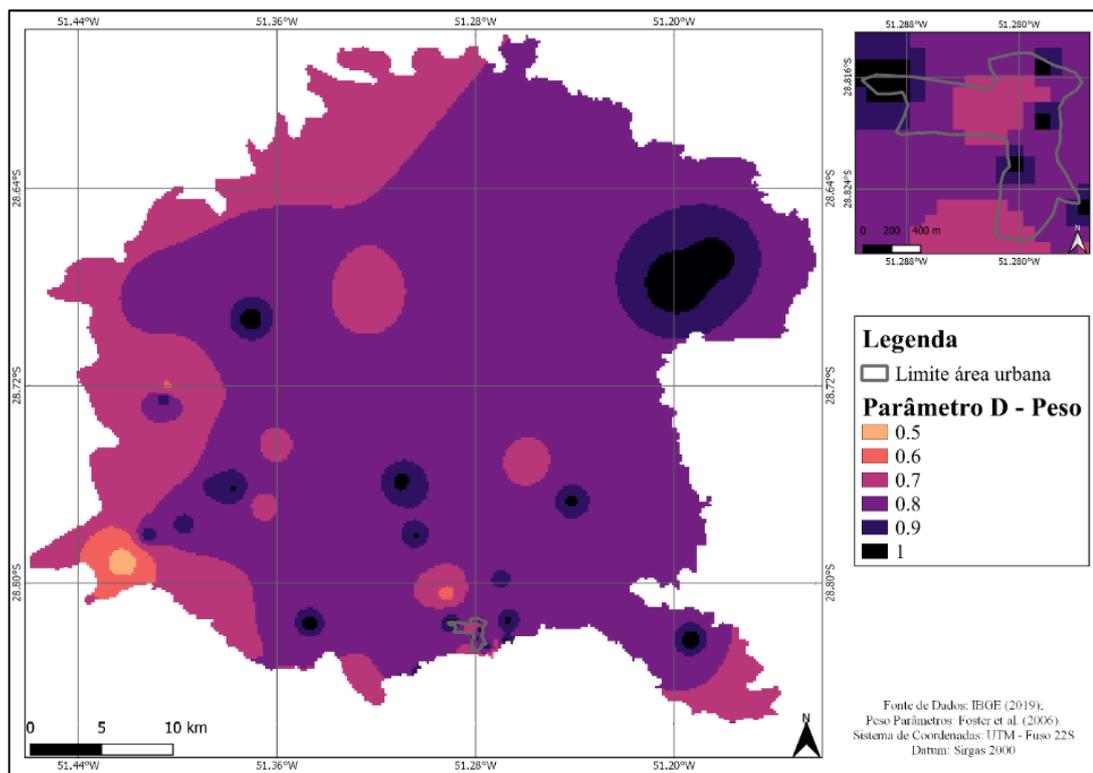


Fonte: A autora (2020).

5.2.2.3 Parâmetro D – Distância até o Lençol Freático

O mapa do parâmetro D é apresentado na Figura 46 com seus respectivos pesos aplicados.

Figura 46 – Parâmetro da Distância até o Lençol Freático com o índice GOD



Fonte: A autora (2020).

5.2.2.4 Vulnerabilidade à Contaminação Método GOD

Na Tabela 15 são apresentados os tipos de classes encontrados para cada parâmetro, e o valor obtido, utilizando a metodologia GOD.

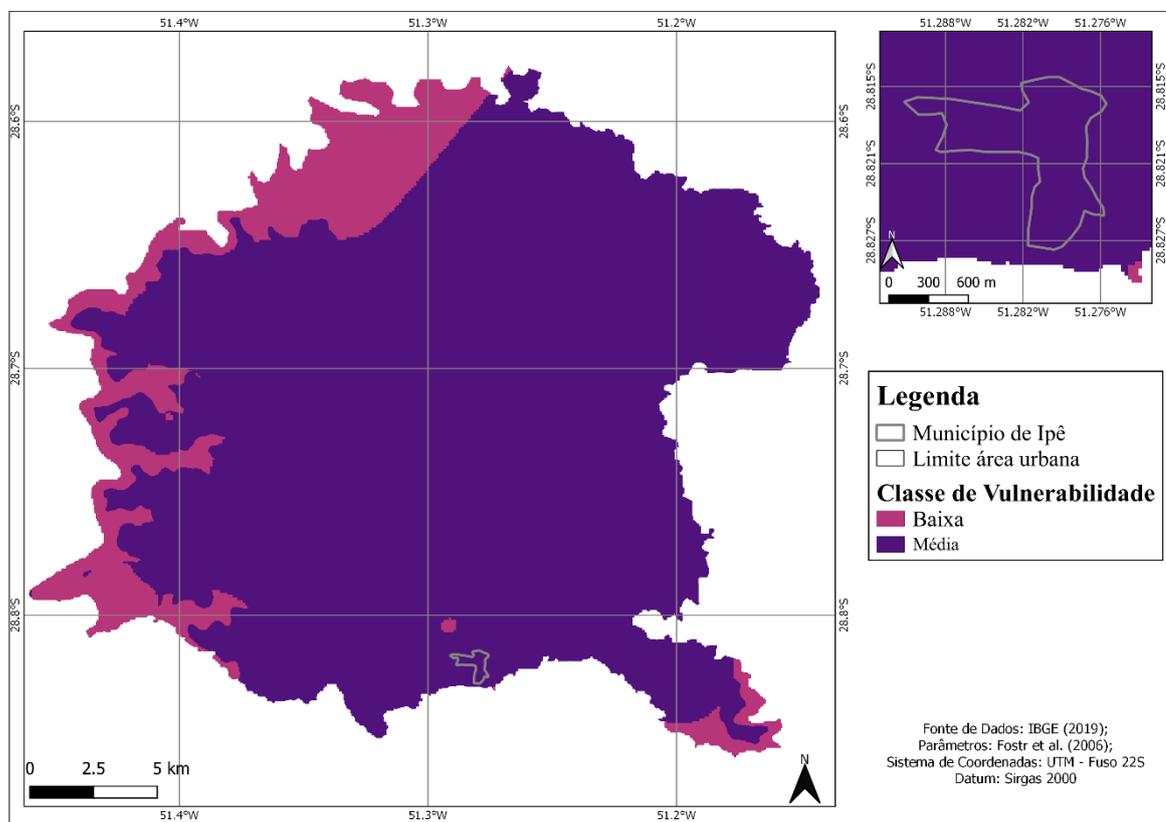
Tabela 15 – Resultados parciais dos parâmetros do método GOD

Parâmetro G – Tipo de Aquífero	Valor
Aquífero Fraturado	0,6
Parâmetro O – Litologia dos Estratos de Cobertura	Valor
Unidade Gramado	0,7
Unidade Caxias	0,75
Parâmetro D – Profundidade do Nível de Água (m)	Valor
> 100	0,4
50 – 100	0,5
20 – 50	0,6
10 – 20	0,7
5 – 10	0,8
2 – 5	0,9
< 2	1,0

Fonte: A autora (2020).

Após desenvolvidos os mapas estipulados pela metodologia GOD, foram aplicados na ferramenta *Image Calculator* do *software* IDRISI Selva 17.0, multiplicando os mesmos. Desta forma, foi possível obter o mapa da vulnerabilidade do município de Ipê pelo método GOD, conforme apresentado na Figura 47.

Figura 47 – Mapa da Vulnerabilidade do Município de Ipê do Método GOD



Fonte: A autora (2020).

O resultado obtido para a vulnerabilidade pelo método GOD, gerou 2 classes de vulnerabilidade que resultaram em classe baixa e classe média, segundo Foster et al. (2006), a classe baixa tem valores variando entre 0,1 à 0,3. Já a classe média de vulnerabilidade tem os valores entre 0,3 à 0,5. A área ocupada pela vulnerabilidade baixa é de 13,52%, enquanto que para a vulnerabilidade média foi de 86,48%.

Considerando os parâmetros que influenciam no resultado da vulnerabilidade, tem-se que o parâmetro da profundidade do nível estático é o que apresenta uma maior variabilidade, posterior o parâmetro litologia dos estratos de cobertura com uma variabilidade menor, após tem os dados do grau de confinamento, com pouca variabilidade, porém como o método multiplica os pesos dos parâmetros, todos os parâmetros influenciam, alterando o resultado da vulnerabilidade.

Hirata & Fernandes (2008) definem as classes de vulnerabilidade de um aquífero, onde a vulnerabilidade baixa ocorre em aquíferos para os contaminantes somente a longo prazo, quando lançados continuamente, já a vulnerabilidade média (intermediária) ocorre nos aquíferos com alguns poluentes e quando lançados continuamente.

5.2.3 Comparação dos métodos DRASTIC e GOD

No estudo proposto foram aplicados ambos os métodos, para fins de avaliação, com intuito de realizar uma análise comparativa, sendo que estes métodos são os mais utilizados para a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos.

Analisando as vulnerabilidades obtidas entre os métodos DRASTIC e GOD, pode-se observar que a classificação da vulnerabilidade apresentada no método DRASTIC está distribuída em toda a área de forma mesclada, onde obteve-se classificação de vulnerabilidade baixa e intermediária. Já a vulnerabilidade obtida pelo método GOD, apresentou a classificação da vulnerabilidade de forma mais homogênea, sendo que a maior vulnerabilidade encontrada foi a média.

Percebe-se que tanto no método DRASTIC como no método GOD, obteve-se vulnerabilidades de duas classes baixa ou média (intermediária), o que diferencia os resultados foi que no método GOD o que é vulnerabilidade baixa para o método DRASTIC é correspondente a classe intermediária e vice versa. O que difere as distribuições das classes de vulnerabilidade nos métodos é a quantidade de parâmetros analisados, pois no método DRASTIC avalia-se sete parâmetros, já o método GOD é avaliado três parâmetros (REGINATO & AHLERT, 2013).

Deste modo, o método GOD é indicado para locais que não apresentem tantas informações, pois é um método mais sucinto, porém utiliza os parâmetros mais importantes para obtenção de resultados e é um método que diferencia aquíferos livres de confinados, mas uma das desvantagens é o fato de não utilizar o parâmetro da recarga, já o DRASTIC requer uma quantidade maior de informações tornando o resultado mais conclusivo (GUIGUER & KONHNKE, 2002).

Definido como um método mais conservador por autores como Reginato & Ahlert (2013), Moura (2014), Mendoza & Barmen (2006) e Cardoso (2010), o método DRASTIC apresenta mais áreas com a classe de vulnerabilidade elevada, no caso do estudo proposto o método DRASTIC apresentou mais áreas com classificação intermediária (média) de forma mais variável. Porém, o método GOD para a área de estudo apresentou maior área de

vulnerabilidade média, o que torna os resultados mais seguros, aplicando tanto um método como o outro.

Ao comparar os métodos na avaliação da vulnerabilidade para a área de estudo, observa-se que os dois métodos podem ser utilizados, porém quando refere-se a aquíferos fraturados o solo é muito importante, pois a influência ocorre diretamente na recarga, assim é aconselhado que utilize o método DRASTIC que possui entre os seus parâmetros, o tipo de solo e a influência da zona não saturada, que está relacionada com o material da zona não saturada (REGINATO & AHLERT, 2013).

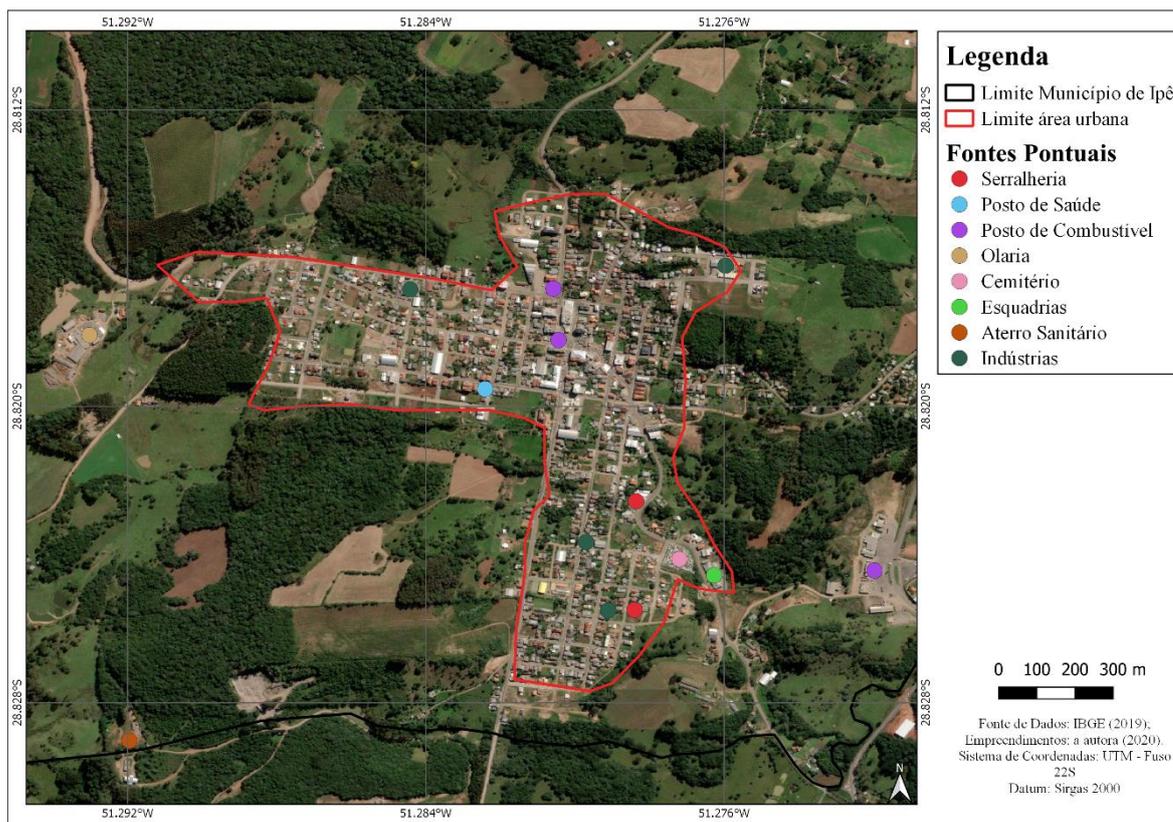
5.3 FONTES DE CONTAMINAÇÃO

Neste item serão apresentados os resultados obtidos para as fontes de contaminação, para o município de Ipê, aplicando a metodologia apresentada no capítulo anterior, na qual inclui a aplicação do método POSH, para as fontes pontuais, na área urbana do município.

5.3.1 Classificação das Fontes de Contaminação

A obtenção das informações de uso e ocupação do solo partiram de uma investigação a campo. Considerou-se as principais atividades do município que estão instaladas na área urbana e empreendimentos localizados próximos da área urbana, conforme exposto na Figura 48. O município conta com os seguintes empreendimentos potencialmente poluidores na área de estudo: 4 indústrias, 1 olaria, 3 postos de combustíveis, 1 posto de saúde, 2 serralherias, 1 esquadria, 1 cemitério e 1 aterro sanitário encerrado.

Figura 48 – Fontes Pontuais do Município de Ipê na área Urbana



Fonte: A autora (2020).

A partir da análise realizada pelo método POSH, foi possível observar os locais que possuem atividades antrópicas com potencial contaminante, apresentando uma grande variedade no município. Desta forma, essas áreas devem ser priorizadas e possuir uma fiscalização de modo que dificulte e amenize os problemas de poluição dos recursos hídricos subterrâneos. Conforme Meira et al. (2014) geralmente quando um aquífero é contaminado a sua recuperação é irreversível, portanto garantir a proteção torna-se mais preferível do que recuperar depois, garantindo uma boa qualidade para utilizações futuras.

Estas atividades potencialmente poluidoras destacadas possuem utilidade na classificação das fontes potenciais de contaminação, para posteriormente realizar uma avaliação aprofundada nos perigos de contaminação que estas fontes podem causar na área em que estão instaladas.

5.3.2 Estimativa da Carga Contaminante no Subsolo

De acordo com a metodologia de POSH descrita por Foster et al. (2006) e com a classificação realizada na área de estudo referente as cargas pontuais poluidoras, foi possível

realizar a estimativa da carga contaminante no subsolo do município. À vista disso, foi classificada as atividades conforme descrito na metodologia e apresentados na Tabela 16.

A classificação das cargas poluidoras do município foi determinada estipulando pesos conforme classificação aplicada pelo método de POSH para as atividades poluidoras do município. O método POSH não estabelece pesos aos parâmetros (GOMES et al., 2018), dessa forma os pesos para este estudo serão aplicados a partir da classificação de cada atividade poluidora. As atividades poluidoras com classificação elevada receberam peso 3, atividades poluidoras com classificação moderada receberam peso 2 e atividades poluidoras com classificação reduzida receberam peso 1.

Tabela 16 – Estimativa da Carga Contaminante no Subsolo para o Município de Ipê

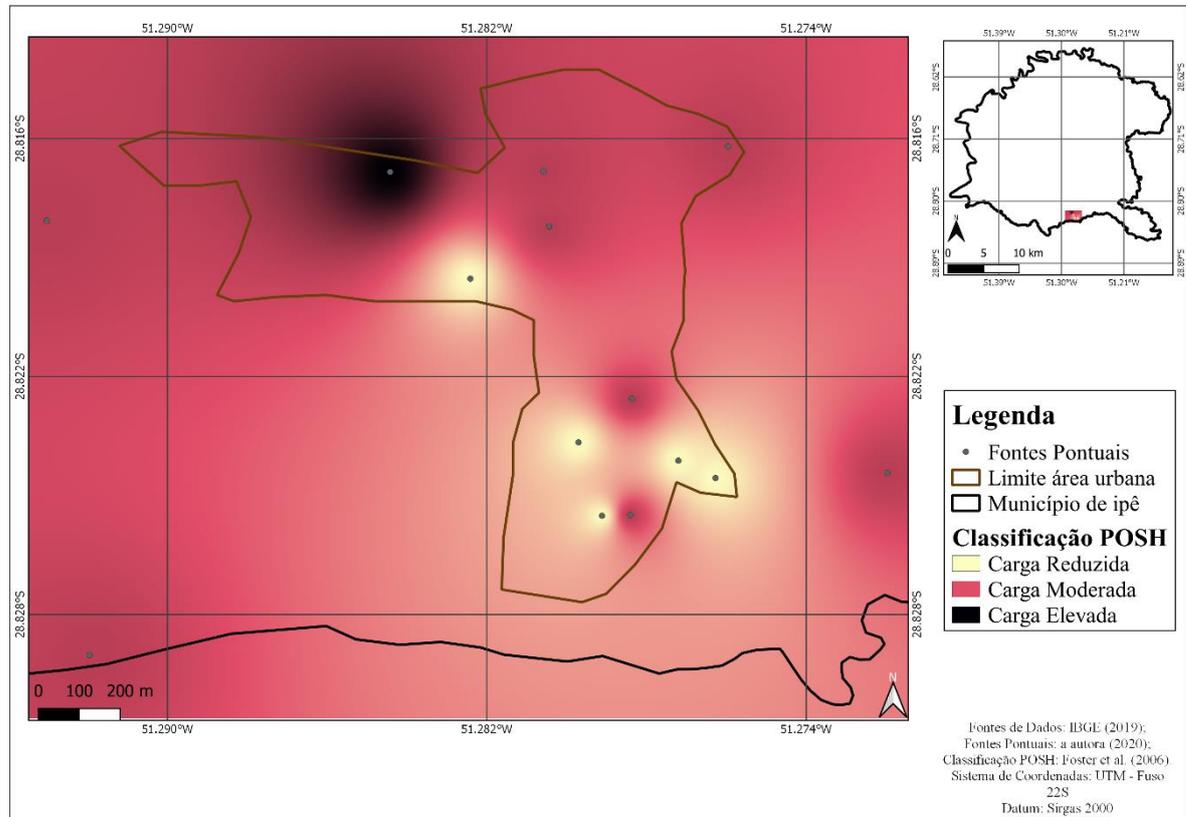
QUANTIDADE	ATIVIDADE	CLASSIFICAÇÃO	VALOR ATRIBUÍDO
01	Cemitério Municipal	Reduzido	1
01	Posto de Saúde	Reduzido	1
03	Postos de Combustíveis	Moderado	2
01	Olaria	Moderado	2
01	Aterro Sanitário Municipal Encerrado	Moderado	2
02	Serralherias	Moderado	2
01	Indústria de Fabricação de Garrafão de Vidro	Elevada	3
01	Indústria Têxtil	Moderado	2
01	Indústria de Vime	Reduzido	1
01	Indústria Moveleira	Reduzido	1
01	Esquadria	Reduzido	1
VALOR ATRIBUÍDO TOTAL			18

Fonte: A autora (2020).

Portanto, ao somar os pesos atribuídos as atividades poluidoras, de acordo com sua classificação, pode-se obter o valor atribuído total, sendo este de 18, na qual indica que a área pode indicar uma classificação do potencial de contaminação das águas subterrâneas de reduzido para a área urbana do estudo. Após será gerado a interação entre os resultados da vulnerabilidade com a classificação das fontes de contaminação onde será possível obter o perigo à contaminação na área, tendo a classificação encontrada como um comparativo.

O mapa com as fontes poluidoras pontuais classificadas a partir do método de POSH, podem ser observadas na Figura 49, com seus determinados pesos atribuídos, aplicados a classificação de reduzido, moderado e elevado.

Figura 49 – Classificação das Fontes Poluidoras para o Município de Ipê a partir do Método de POSH



Fonte: A autora (2020).

5.4 PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

O Quadro 3 apresenta os valores obtidos na classificação das fontes pontuais de contaminação a partir do método DRASTIC e o Quadro 4 apresenta os valores obtidos na classificação das fontes pontuais de contaminação a partir do método GOD.

Quadro 3 – Valores obtidos na Classificação das Fontes Pontuais de Contaminação para o Município de Ipê: Método DRASTIC

Perigo de Contaminação relacionado com as Fontes Pontuais de Contaminação		POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO			
		Reduzido – 1	Moderado – 2	Elevado – 3	Sem Classificação – 0
VULNERABILIDADE	Baixo – 1	1	2	3	SC
	Intermediário – 10	10	20	30	SC
	Alto	-	-	-	SC
	Extremo	-	-	-	SC

Fonte: A autora, a partir da classificação de potencial de contaminação modificado de GOMES (2008) in ANA (2014), classificação do perigo modificado de SMA-SP (2010) in ANA (2014) e Classificação do Perigo de Contaminação por Cargas Difusas de CAPALONGA (2017).

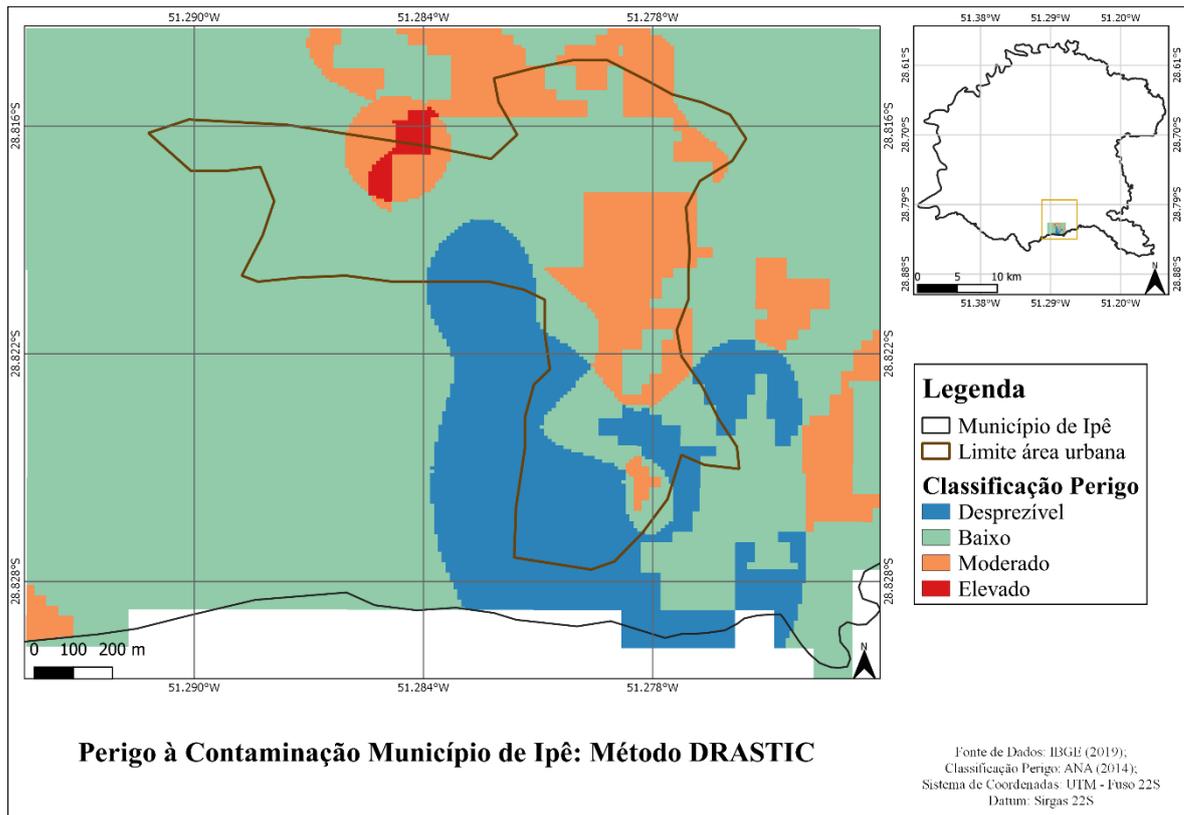
Quadro 4 – Valores obtidos na Classificação das Fontes Pontuais de Contaminação para o Município de Ipê: Método GOD

Perigo de Contaminação relacionado com as Fontes Pontuais de Contaminação		POTENCIAL DE CONTAMINAÇÃO		
		Reduzido – 1	Moderado – 2	Elevado – 3
VULNERABILIDADE	Insignificante – 0	-	-	-
	Baixa – 1	-	2	-
	Média – 10	10	20	30
	Alta	-	-	-
	Extrema	-	-	-

Fonte: A autora, adaptado de Barbosa et al., (2011).

A partir dos resultados obtidos, apresentados neste capítulo é possível avaliar a estimativa do perigo à contaminação da água subterrânea para o município de Ipê, pelos métodos GOD e DRASTIC conforme apresentado os mapas nas Figuras 50 e 51.

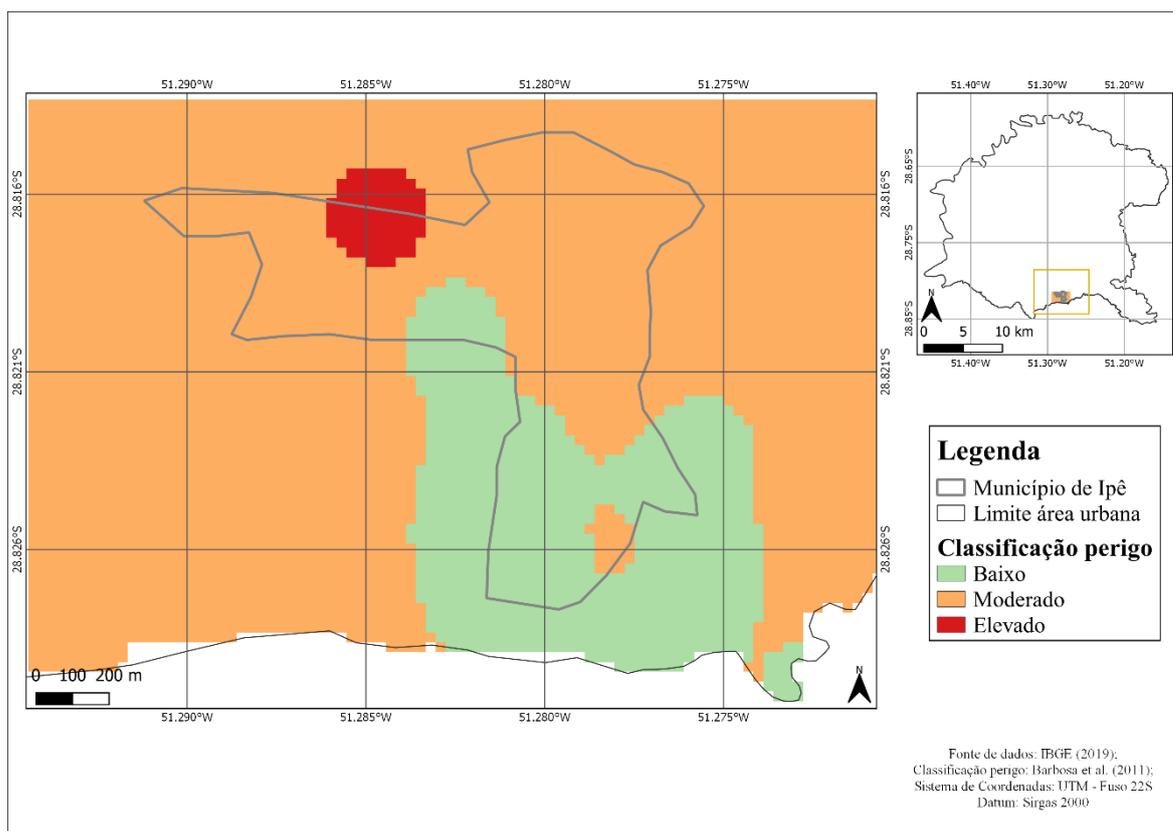
Figura 50 – Perigo à Contaminação da Água Subterrânea do Município de Ipê, a partir da metodologia DRASTIC



Fonte: A autora (2020).

As classificações obtidas para o perigo à contaminação da água subterrânea juntamente com o método DRASTIC, foram de: desprezível, baixo, moderado e elevado, considerando que foi avaliado as fontes pontuais de contaminação para um raio de 4 km, abrangendo a área urbana e seu entorno. O perigo desprezível abrange uma área de 14,14%, para o perigo baixo a área ocupada é de 71,96%, o perigo moderado apresenta-se em 13,40% da área e o perigo elevado em 0,50% da área.

Figura 51 - Perigo à Contaminação da Água Subterrânea do Município de Ipê, a partir da metodologia GOD



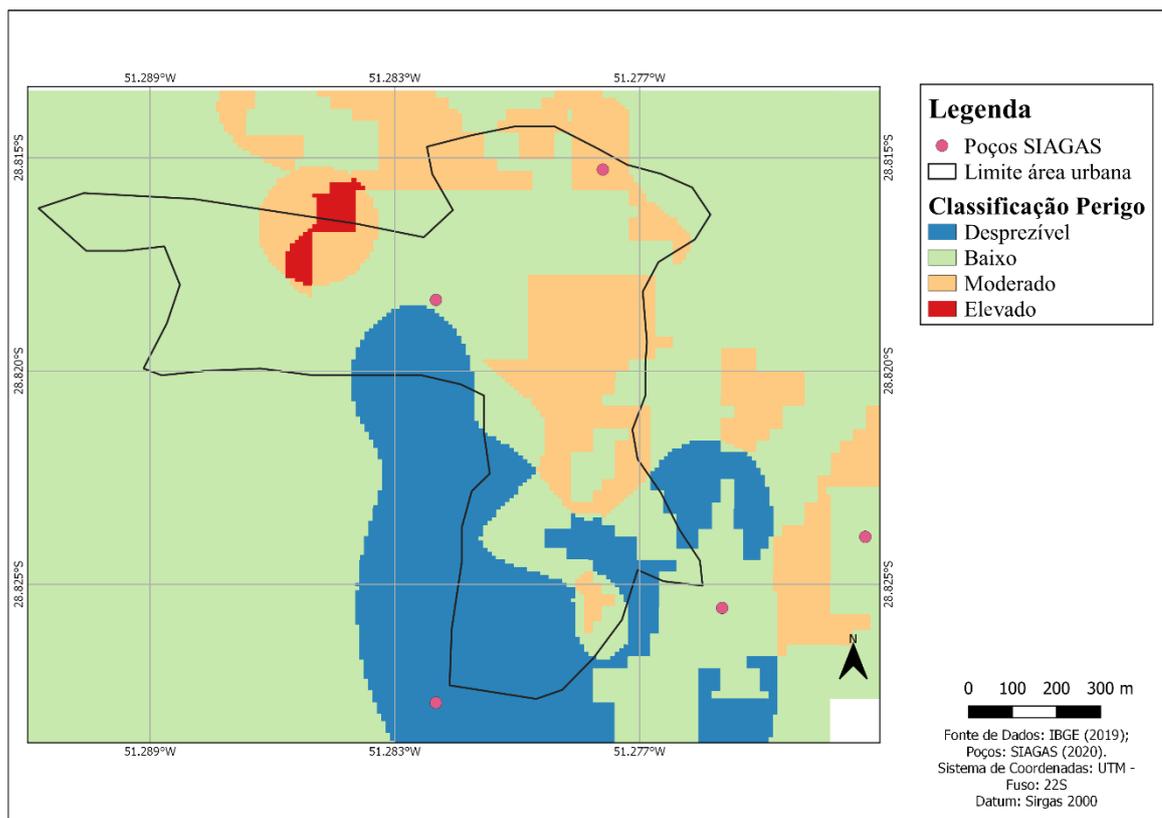
Fonte: A autora (2020).

As classificações obtidas para o perigo à contaminação da água subterrânea juntamente com o método GOD, foram de: baixo, moderado e elevado, considerando que foi avaliado as fontes pontuais de contaminação para um raio de 4 km, abrangendo a área urbana e seu entorno. Para o perigo o perigo baixo foi obtido uma área de 19,31%, o perigo moderado apresentou uma área de 78,96% e o perigo elevado presente em 1,73% da área.

Considerando os métodos aplicados, o método DRASTIC apresentou maior área com perigo baixo, já o método GOD apresentou maior área com a classificação do perigo à contaminação de risco baixo. Ainda, na metodologia desenvolvida pelo DRASTIC a área apresentou perigo desprezível, já no método GOD não obteve presente de risco desprezível.

Na área urbana do município e em seu entorno, possui cadastrado no SIAGAS 5 poços bombeando com a função de abastecimento. Estes poços estão situados no SASG e são aquíferos fraturados. Dessa forma são apresentados os mapas do perigo à contaminação juntamente com os poços indicados nas Figuras 52 e 53.

Figura 52 – Poços SIAGAS e o Perigo à Contaminação pelo Método DRASTIC

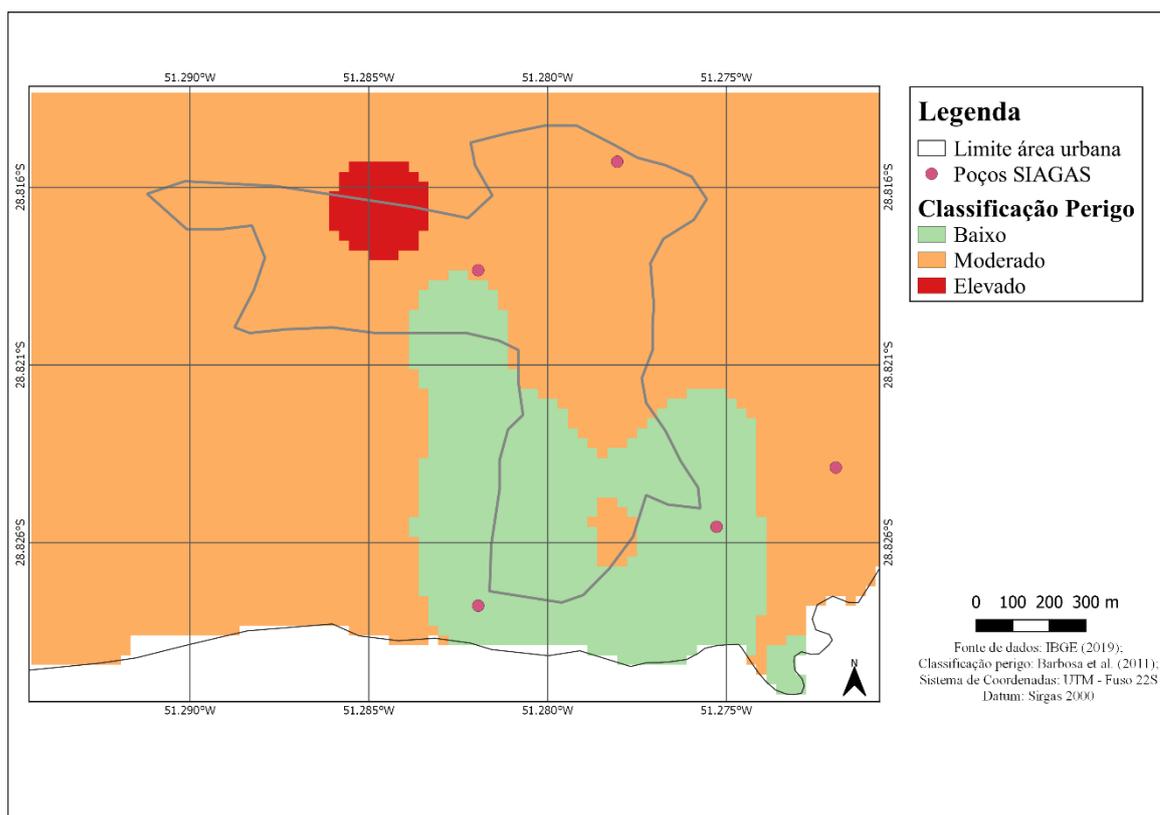


Fonte: a autora (2020).

No mapa do perigo à contaminação pelo método DRASTIC, pode-se observar que dos 5 poços do município com uso para o abastecimento, 1 encontra-se em área de risco desprezível, 3 em área de risco baixo e 1 poço em área de risco moderado para à contaminação. Pinheiro et al., (2015) destaca que quanto mais raso for o nível de água do aquífero maior é o risco de contaminação, quando uma carga de contaminantes é exposta na superfície do terreno.

Ao analisar a profundidade do nível estático dos poços, destaca-se o poço presente na classificação de perigo moderado, cuja profundidade do nível estático é de 5,19 metros, oferecendo um maior perigo quando comparado a 2 poços localizados na classificação baixa que possuem níveis estáticos de 12,25 metros e 18,24 metros. Porém um dos poços localizados na área de perigo baixo, possui a profundidade do nível estático de 1,07 metros. Já o poço situado no perigo desprezível, oferece menor perigo à contaminação, tanto pela área ao qual está situado, tanto relacionado ao nível estático que é de 20,8 metros.

Figura 53 – Poços SIAGAS e o Perigo à Contaminação pelo Método GOD



Fonte: a autora (2020).

Para o perigo à contaminação através do método GOD, dos 5 poços do município que possuem função de abastecimento, 3 estão em área de risco moderado e 2 em área de risco baixo para a contaminação.

Analisando a classificação do perigo à contaminação relacionando com as profundidades dos níveis estáticos dos poços, percebe-se que os poços situados na classificação de perigo moderado, possuem o nível estático a uma profundidade de 5,19 m, 12,25 m e 18,24 m. Os poços situados na classificação de perigo moderado possuem profundidades do nível estático de 1,07 m e 20,8 m. Os poços que possuem os níveis estáticos menores devem possuir maior atenção quando relacionados a projetos de proteção.

Avaliar o perigo à contaminação da água subterrânea permitiu elencar as áreas que necessitam um maior acompanhamento no que se refere à qualidade e proteção da água subterrânea, esse acompanhamento deve vir vinculado à medidas de proteção na área. Consequentemente a avaliação do perigo à contaminação, ligadas a planos estratégicos e eficientes podem auxiliar o poder público na delimitação de zonas com diferentes graus de risco com vista na proteção da qualidade dos aquíferos (ZHANG et al., 2016).

Sendo assim, relacionado com a avaliação dos poços no município é indicado medidas de proteção para as áreas que possuem a profundidade dos níveis estáticos entre 1

à 6 metros, porém cabe ressaltar que como os poços possuem a função de abastecimento urbano as medidas de proteção devem ser realizados em todos as áreas, cada um com medidas de acordo com a classificação do perigo. Além disso, a delimitação de um zoneamento, deve ser realizada, prevendo a proteção destas áreas, evitando a instalação de empreendimentos potencialmente poluidores em locais de maior vulnerabilidade e maior perigo.

6 CONCLUSÕES

O presente estudo buscou avaliar a vulnerabilidade e o perigo à contaminação para o município de Ipê – RS, para a obtenção destes resultados foram utilizados os métodos DRASTIC e GOD para a vulnerabilidade e o método POSH para a estimativa da carga contaminante no solo. A utilização destes métodos apresentou bons resultados, o que torna possível a utilização de ambos para a área de estudo, que envolve o SASG, com ocorrência de aquíferos fraturados.

O método DRASTIC por avaliar mais parâmetros, torna o estudo mais completo apresentando melhores resultados e por ser um método mais conservador, apresenta maior proteção para a área de estudo. O método utiliza parâmetros como a tipologia do solo, profundidade do nível da água e o material da zona não saturada, parâmetros com uma influência maior na área de estudo.

Ao comparar, o método GOD avalia somente 3 parâmetros, sendo que destes somente um possui maior variabilidade que é a profundidade do nível estático, seguido dos parâmetros grau de confinamento e os estratos da cobertura da zona não saturada. Como o método multiplica os três parâmetros, cada peso atribuído afeta no resultado, indicando maior ou menor vulnerabilidade. No estudo proposto, pode-se observar que a vulnerabilidade apresentou maior classe média, o que pode ter sido resultado dos pesos atribuídos aos parâmetros, especialmente os de característica mais homogênea.

O mapa da vulnerabilidade desenvolvido para os métodos apontou uma vulnerabilidade baixa de 71,33% e vulnerabilidade intermediária de 28,67% para o método DRASTIC. Já o método GOD apresentou vulnerabilidade baixa para uma área de 13,52% e vulnerabilidade média para 86,48% da área. Os dados apontam uma boa proteção para o aquífero fraturado do SASG no município de Ipê, pois estas classes demonstram que a área é vulnerável somente a longo prazo e com contaminantes persistentes lançados continuamente no solo.

O perigo à contaminação da água subterrânea encontrada para a área de estudo, apontou que a classificação do perigo variou de desprezível à elevada para o método DRASTIC e de média à elevada para o método GOD. Tendo como resultados para o método DRASTIC desprezível 14,14%, baixo 71,96%, moderado 13,40% e elevado de 0,50% da área. Para o método GOD os resultados alcançados foram de 19,31% de perigo baixo, 78,96% da área de perigo moderado e 1,73% da área com perigo elevado.

De modo geral, a área avaliada apresenta risco de perigo à contaminação de classe baixa à moderada, o que significa menos riscos a contaminantes e poluentes, porém a

prevenção não pode ser descartada, pois a classificação do perigo pode mudar de acordo com a atividade poluidora no local, dessa forma, apresentar um plano de proteção para as áreas de maior risco é fundamental para manter a qualidade e a proteção dos aquíferos.

Para trabalhos futuros na área sugere-se que sejam desenvolvidas outras formas de avaliação para os parâmetros R e C do método DRASTIC e para os parâmetros G e O do método GOD, de maneira a evitar os mapas homogêneos, que podem interferir nos resultados obtidos da vulnerabilidade, além disso cabe realizar um estudo dos contaminantes químicos lançados no município, averiguando quais componentes podem afetar a qualidade e a proteção da água subterrânea a curto e longo prazo.

Com relação aos estudos de perigo à contaminação da água subterrânea é sugerido que seja realizado o estudo para toda área, tanto rural como urbana, para as fontes de contaminação pontuais e difusas, visando abranger o território com informações que conservem os recursos hídricos. Além disso, estudos referentes a divisão das zonas territoriais com fins de precaução, pois é uma área que está se desenvolvendo e com tendência de expandir, dessa forma podendo evitar custos elevados com o tratamento da água e a degradação dos recursos hídricos subterrâneos, mantendo a qualidade da água subterrânea.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA (BRASILIA/DF). **Água Subterrânea**. Brasília, 07 nov. 2017. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua/agua-subterranea>. Acesso em: 10 abr. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA, ENGECORPS. **Estudo de Vulnerabilidade Natural à Contaminação e Estratégias de Proteção do Sistema Aquífero Guarani nas Áreas de Afloramento**, Relatório Final – Tomo I. 2014. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/metadata.show?id=629&currTab=simple>. Acesso em: 24 out. 2020.

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H., PETTY, R. J. E HACKETT, G. (1987) – **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. *Environmental Protection Agency, Report EPA/600/2-85/018*.

ALVES, M. G.; RAMOS, I. S.; CORIDOLA, R. Metodologia DRASTIC na análise da vulnerabilidade dos aquíferos livres de Campos dos Goytacazes. **XIV Simpósio Brasileiro de Saneamento Remoto**, Natal, p. 25-30, abr. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – ABAS. **Águas subterrâneas. O que são?**. São Paulo – SP. Disponível em: <https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/>. Acesso em: 30 out. 2019.

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

ASTM D6030. **Standard Guide for Selection of Methods for Assessing Ground Water or Aquifer Sensitivity and Vulnerability**. West Conshohocken, PA, EUA. 1996, 8 p.

BARBOSA M. C.; CARVALHO A. M.; IKEMATSU P.; ALBUQUERQUE FILHO J. L.; CAVANI A. C. M. Avaliação do Perigo de Contaminação do Sistema Aquífero Guarani em sua Área de Afloramento no Estado de São Paulo Decorrente das Atividades Agrícolas. **Águas subterrâneas**, v. 25, n. 1, 2011.

BARROS NETA, M. A. P.; MIGLIORINI, R. B.; DUARTE, U. **Aquífero Guarani: educação ambiental para a sua preservação na região do Planalto dos Guimarães**. [S. l.]: Entrelinhas, 2007. 79 p. ISBN 8587226444, 9788587226440.

BATISTA, M. de A.; PAIVA, D. W. de; MARCOLINO, A. (Org.). **Solos para todos: perguntas e respostas**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2014. 87 p. (Embrapa Solos. Documentos, 169).

BORBA, W. F.; FERNANDES, G. D. A.; TERRA, L. G.; LOBLER, C. A.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. **Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação do Aquífero na Bacia do Rio Passo Fundo no Estado do Rio Grande do Sul**. Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ), v. 39, n. 2., p. 145-154, 2016. Disponível em: http://www.anuario.igeo.ufrj.br/2016_2/2016_2_145_154.pdf. Acesso em: 12 mar. 2020.

BORBA, W., RUCHEL, B., MENEGAZZO, K., PEIL, L., & ROSA, C. (2020). Aplicação do método índice de susceptibilidade para estimativa da susceptibilidade à contaminação na Bacia hidrográfica dos rios Turvo, Santa Rosa e Santo Cristo. *Geologia USP. Série Científica*, 20(1), 125-136. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v20-160797>

BORBA, W. F.; LOBLER, C. A.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Caracterização das Condições Naturais das Águas Subterrâneas no Município de São Borja - RS. São Paulo, UNESP, *Revista Geociências*. v. 37, n. 1, p. 75 - 84, 2018. Disponível em: https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/37/volume37_1_files/37-1-artigo-06.pdf. Acesso em: 15 abr. 2020.

BORBA, W. F.; SILVA, J. L. S.; ALLASIA, D. G.; DA ROSA, C. N.; FAVARETTO, J. R.; RIBEIRO, L. F. T. Geoprocessamento Aplicado à Determinação do Índice de Susceptibilidade das Captações por Poços Tubulares do Sistema Aquífero Serra Geral em Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul. *Anuário Igeo*, [s. l.], v. 39, ed. 3, 2016.

BORGES, V. M.; ATHAYDE, G. B.; REGINATO, P. A. R. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 4, p. 327-337, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i4.28857>

BORGES, V.; ATHAYDE, G.; REGINATO, P.; DUTRA, T. Vulnerabilidade e Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas no município de Cascavel - PR. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 26 de novembro a 01 de dezembro de 2017, Florianópolis- SC.

BORGHETTI, N. R. B; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: A Verdadeira Integração dos Países do Mercosul**. Curitiba: GIA, 2004. 214 p. ISBN 85900438511.

BORTOLIN, T. A.; DOS SANTOS, L. M.; DA SILVA, A. G.; SCHNEIDER, V. E. Sistema Web para estimativa de Evapotranspiração Potencial por diferentes métodos. *Ciência e Natura*, Santa Maria v.41, e22, p. 01-14, 2019 DOI:10.5902/2179460X36937 ISSN 2179-460X.

BORTOLIN, T. A. **Padrões Hidroquímicos e Isotópicos do Sistema Aquífero Serra Geral no Município de Carlos Barbosa, Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. 2014. 119 p. Dissertação de Mestrado (Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 396**, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília. Publicado em: Diário Oficial da União. 7 de abr. de 2008.

BRITO, D. O.; REGINATO, P. A. R. Zona de Concentração de Cargas Contaminantes para Avaliação do Perigo de Contaminação da Água Subterrânea em Área Urbana. *Revista Águas Subterrâneas*. v. 32, n. 1, p. 121-129, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v32i1.28882>

CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS (Rio Grande do Sul); ELETROSUL CENTRAIS ELÉTRICAS (Rio Grande do Sul) (ed.). **Atlas Eólico: Rio**

Grande do Sul. Porto Alegre: Optagraf, 2014. Atlas. Disponível em: http://www.cgteletrosul.gov.br/files/files/Destaques/Atlas_Eolico_Rio_Grande_do_Sul_2014.pdf. Acesso em: 2 maio 2020.

CANOVA, A. V.; SALAZAR, R. F. dos S. Avaliação da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas do Município de Ibirubá-Rs. **Ciência & Tecnologia**, UNICRUZ, v.2, n.1, p.75-88, ago./2018. ISSN: 2447-3472.

CAPALONGA, S. **Avaliação do Risco de Poluição da Água Subterrânea da Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

CAPUCCI, E.; MARTINS, A. M.; MANSUR, K. L.; MONSORES, A. L. M. **Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas**. DRMRJ- Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2001.

CARDOSO, L. V. R. Q. **Estudo Comparativo dos Métodos DRASTIC e GOD na Avaliação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas à Poluição da Bacia Hidrográfica do Rio Cabril – Vila Real**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Ouro, 2010.

CARRA, S. H. Z. **Avaliação da capacidade de depuração do Arroio Tega**. In: XVII Encontro de Jovens Pesquisadores da UCS. Caxias do Sul. Setembro de 2009.

CARVALHO, A. M. **Modelagem numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas em São José do Rio Preto, SP**. 2013. 170 p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

CASSALI IOP, G. T. **Avaliação da Vulnerabilidade e do Risco Potencial de Contaminação de Água Subterrânea no Município de Venâncio Aires - RS**. 2019. 117 p. Monografia (Bacharel em Geologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

CAVALCANTI JUNIOR, F. A.; OLIVEIRA, D. Análise Bibliométrica das Tendências do Uso do Índice DRASTIC. **XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Campinas, 2017.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Águas subterrâneas: Poluição das águas subterrâneas**. São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/informacoes-basicas/poluicao-das-aguas-subterraneas/>. Acesso em: 13 mar. 2020.

COLLINSON, A.S. *Introduction to world vegetation*. Unwin Hyman Ltda. 1988.

COSTA, L. M. **Avaliação da Vulnerabilidade e Risco Potencial de Contaminação das Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Guarani na Região de Ivoti, Dois Irmãos e Morro Reuter, RS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/189046/001088401.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 set. 2020.

CPRM. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: [s. n.], 2006. Atlas. Escala 1:750.000.

CPRM (RS). **Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: [s. n.], 2005. Projeto. Escala 1:750.000. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Sobre/Equipe-e-Enderecos/SUREG%7CPA---Mapa-Hidrogeologico-do-Rio-Grande-do-Sul---Escala-1%3A750.000-114.html>. Acesso em: 18 abr. 2020.

CPRM. **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: Relatório diagnóstico Aquífero Missão Velha, Bacia Sedimentar do Araripe**. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2012.

CHRISTOFOLETTI, A. **Aplicabilidade do Conhecimento Geomorfológico nos Projetos de Planejamento**. In: Guerra, A.J.T.; Cunha, S.B. (Org.). *Geomorfologia: uma Atualização de Bases e Conceitos*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2005. p. 89-110.

CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. 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, v. 29, n. 3, p. 401 - 411, 2010.

DA SILVA, J. L. S.; DOS SANTOS, E. F.; FRANTZ, L. C.; MALHEIROS, R. P. Arcabouço Geológico-Geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Rio Quaraí - Rio Grande do Sul/Brasil. **V Simpósio Nacional de Geomorfologia**, [s. l.], Ago. 2004.

DANTAS, M. E.; VIERO, A. C.; SILVA, D. R. A. Origem das Paisagens. In: VIEIRO, A. C. **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. cap. 3, p. 37-49.

DE BIASI, M. **A carta clinográfica: Os métodos de representação e sua confecção**. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, 1992. n. 06: 45-60.

DE SOUZA, N. A. **Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas – Um Estudo do Aquífero Bauru na Zona Urbana de Araguari, MG**. 2009. 167 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14133/1/VulnerabilidadePoluicaoAguas.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2020.

DOS SANTOS, J. M. **Análise Morfotectônica e Estrutural da Região Centro-Leste de Santa Catarina (SC)**. 2017. 101 p. Dissertação de Mestrado (Geologia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

EILERS, V. H. M. Estimativa de Recarga de Águas Subterrâneas utilizando o Método do Balanço Hídrico. **XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2004.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. 5 ed., ver. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.

EMBRAPA. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. RAMALHO FILHO, A. & BEEK, K.J. 3 ed. rev. – Rio de Janeiro. EMBRAPA/CNPS. 1995. 65p.

FAVARETTO, J. R.; ALLASIA, D. G.; DA SILVA, J. L. S.; BORBA, W. F.; DA ROSA, C. N.; FERNANDES, G. D. Estimativa da Susceptibilidade à Contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral em Aratiba – RS por Diferentes Métodos. **Revista Brasileira de Cartografia**. Vol. 72, n. 1, 2020. ISSN 1808-0936.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Org). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 1997. 389f.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 835 p. ISBN 978-85-7499-061-3. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/14818/3/livro_hidrogeologia_conceitos.pdf. Acesso em: 10 abr. 2020.

FENN, D.; HANLEY, K.; DE GEARE, T. *Use of the Water Balance Method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites*. US Environmental Protection Agency Report, 1975.

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – RS. **Base Cartográfica Digital do RS**. Porto Alegre, 2005. Escala 1:250.000. Disponível em: http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp. Acesso em: 14 out. 2020.

FERON, G. L. **Avaliação da Vulnerabilidade e do Risco de Contaminação de Aquíferos por postos de combustível localizados na região central de Canoas - RS**. 2013. 85 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

FERNANDES, G. D.; BORBA, W. F.; DE SOUZA, E. E. B.; KEMERICH, P. D. C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; HINTERHOLZ, D.; BAUMHARDT, E. Estimativa da Vulnerabilidade Natural à Contaminação do Aquífero em escala municipal: Estudo de caso em Panambi/RS. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, v.6, n.2, (Jul-Dez) p.126-132, 2020. ISSN: 2447-3359.

FETTER, C. *Applied hydrogeology*. New York: Macmillan Publishing Company. Kosteci, P. T. e E. Calabrese. 1989. *Petroleum contaminated soil: remediation techniques, environmental fate, and risk assessment*. Vol I. Mich.: Lewis Publishers. 1988.

FILHO J. M. **Contaminação das águas subterrâneas**. In: FEITOSA, Fernando. A. C. (org). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R. C. A. 1991. *Determinacion del Riesgo de Contaminacion de Águas Subterrâneas – una metodologia basada en datos existentes*. CEPIS, Lima, 81p.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes**. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. (Boletim N° 10). Disponível em: https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2019/02/Boletim_IG_10_Determinacao_de_Riscos_de_Contaminacao_das_Aguas_Subterraneas-1994.pdf. Acesso em: 13 mar. 2020.

FOSTER, S.; HIRATA, R. *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. WHO- PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual. Lima, Peru. 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELISA, M. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea**: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. São Paulo: Servemar, 2006.

FOSTER, S. S. D., et al. **Proteção da qualidade da água subterrânea**: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Lima: Banco Mundial. 2002.

FRANCO, A. O; ARCOS, F. O. **Vulnerabilidade natural de aquíferos e a potencial contaminação dos recursos hídricos subterrâneos no Estado do Acre**. Águas Subterrâneas (2020) - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas, 2020. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29749/19242>. Acesso em: 17 mar. 2020.

FURTADO, Z. N. C. **Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Subsuperficiais na Área Urbana Central do Município de Araçatuba-SP**. 2007. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia UNESP, Campus de Ilha Solteira, São Paulo, 2007.

GOOGLE EARTH. **Ipê - RS**. Pro. [S. l.]: Sistema, 20 mar. 2019. Aplicativo.

GOMES, M. G.; DE VARGAS, T.; BORTOLIN, T. A.; BELLADONA, R.; DAL BOSCO, V.; ADAMI, M. V. D. Estudo de Vulnerabilidade de Aquíferos no Município de Caxias do Sul/RS utilizando o Método DRASTIC. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. (ISSN 2318-0358), 24 a 28 de novembro de 2019, Foz do Iguaçu – PR.

GOMES, M. da C. R.; MENDONÇA, L. A. R.; CAVALCANTE, I. N. Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas na Porção Leste da Bacia Sedimentar do Araripe, Ceará, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. ISSN 0101-9759, e-ISSN 1982-3908 - Vol. 41 - 3 / 2018 p. 252-259.

GOMES, M. A. F. **Uso agrícola das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil: implicações para a água subterrânea e propostas de gestão com enfoque agroambiental**. Brasília: EMBRAPA. 2008.

GONÇALVES, T. S. A floresta estacional decidual no Brasil: distribuição geográfica e influência dos aspectos pedogeomorfológicos na vegetação. **REMOA**, Santa Maria, v. 14, ed. 1, p. 144-153, 2015.

GUIGUER, N.; KOHNKE, M.W. **Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos**. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Florianópolis-SC, 2002.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.). **Base cartográfica digital da Serra Gaúcha**: Mapeamento semidetalhado de solos Município de Ipê. Escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS – Centro de Ecologia, 2007.

HAUSMAN, A. Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul. **Acta Geológica Leopoldensia**. Série Mapas. São Leopoldo, RS. 1995.

HIRATA, R. C. A.; BASTOS, C. R. A.; ROCHA, G. A. **Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto Geológico, CETESB, 1997.

HIRATA, R.; FERNANDES, A. J. Vulnerabilidade a Poluição de Aquíferos. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3a ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM:LABHID, 812p. 2008.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **A Revolução Silenciosa das Águas Subterrâneas no Brasil: Uma Análise da Importância do Recurso e os Riscos pela falta de Saneamento**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2019. 19 p. Disponível em: http://www.tratabrasil.org.br/images/estudos/itb/aguas-subterraneas-e-saneamento-basico/Estudo_aguas_subterraneas_FINAL.pdf. Acesso em: 16 abr. 2020.

HORNERO, J.; MANZANO M.; ORTEGA, L.; CUSTODIO, M. *Integrating soil water and tracer balances, numerical modelling and GIS tools to estimate regional groundwater recharge: Application to the Alcaidoz Aquifer System (SE Spain)*. *Science of the Total Environment, Espanha*, v. 568, n. S.N., p. 415-432, jun. 2016.

IBGE. **Cidades: Ipê**. Ipê, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/ipe/panorama>. Acesso em: 30 abr. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2003) **Levantamento de recursos naturais**, Volume 33. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 14 out. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa Hidrogeológico Região Sul**. 2015. Disponível em: ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_hidrogeologico_e_hidroquimico/mapas/regionais/sul_hidrogeologico.pdf. Acesso em: 14 out. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal**, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/15774-malhas.html?=&t=downloads>. Acesso em: 15 nov. 2020.

IDRISI Selva.lnk. *Clark Labs, Clark University*. Versão 17.0. *Worcester, Massachusetts*. (2020).

INMET. **Mapas das Estações: Estação de Caxias do Sul**. 2020. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 17 out. 2020.

KERSTEN, R. A.; BORGIO, M.; GALVÃO, F. **Floresta Ombrófila Mista: aspectos fitogeográficos, ecológicos e métodos de estudo**. v. 2, ed. 1, 2015.

LERNER, D. N.; ISSAR, A. S.; SIMMERS, I. (1990). *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge. International Contributions to Hydrogeology*, Vol. 8. *International Association of Hydrogeologists, Verlag Heinz Heise*, 1990. 345 p.

- LIMA, D. R. de. **Avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas do sistema aquífero serra geral no município de Bento Gonçalves**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Ambiental. Porto Alegre, 2014.
- LISBOA, E. G.; MENDES, R. L. R.; BELLO, L. A. L. Mapeamento do Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas em Zonas Urbanas: Proposta de um índice de perigo *fuzzy*-AHP. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v. 14, n. 2, p. 777-799, ago./dez. 2016.
- LISBOA, N. A. **Fácies, estratificações hidrogeoquímicas e seus controladores geológicos, em unidades hidrogeológicas do sistema aquífero Serra Geral, na bacia do Paraná, Rio Grande do Sul**. 1996. 135 p. Tese de doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.
- LISBOA, N. A.; DANI, N.; REMUS, M. V. D.; CASTRO, J. 2004. **Síntese da Ocorrência Geológica das Águas Subterrâneas do Rio Grande do Sul**. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 13. Anais. Cuiabá. 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/23638/15719>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- LÖBLER, C. A.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Nova Palma, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, vol. 10 n. 1 Taubaté – Jan. / Mar. 2015. ISSN 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X.
- LÖBLER, C. A.; DE BORBA, W. F.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Vulnerabilidade das águas subterrâneas da bacia do rio Santa Maria, Rio Grande do Sul. **Ciência e Natura**, vol. 38, núm. 1, janeiro-abril, 2016, pp. 84-94 Universidade Federal de Santa Maria - Santa Maria, Brasil. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4675/467546196007.pdf>. Acesso em: 01 set. 2020.
- LOBO FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. M. **Análise de Sensibilidade da Aplicação de Métodos Indexados de Avaliação da Vulnerabilidade à Poluição de Águas Subterrâneas**. Jornadas Luso-Espanholas sobre Águas Subterrâneas no Sul da Península Ibérica. Faro 2003.
- LEAL, A.S. **As águas subterrâneas no Brasil. Ocorrências, disponibilidades e usos**. O Estado das Águas no Brasil. Brasília: ANEEL, 1999.
- MACHADO, J. L. F. Caracterização dos Compartimentos Estruturais do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Revista Águas Subterrâneas**, 2005. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/22209/14559>. Acesso em: 07 nov. 2020.
- MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. DE. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: Relatório Final**. Porto Alegre: CPRM, 2005. 65 p. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/5249?show=full>. Acesso em: 18 abr. 2020.

MAPBIOMAS (Brasil). **Uso e Ocupação do Solo**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>. Acesso em: 9 jun. 2020.

MARION, F. A.; MELLO FILHO, J. A. de; SILVA, J. L. S. da. Análise da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas por geoprocessamento no campus da UFSM – RS. **Terr@Plural**, Ponta Grossa, v.4, n.1, p.65-76, jan./jun. 2010.

MARTELLI, G.V.; FILHO, L.L.V.D; DA SILVA, J.L.S. **Determinação de áreas de risco potencial de contaminação das águas subterrâneas na área urbana de Cacequi/RS - Brasil**. UFSM. Santa Maria/RS, 2010. Disponível em: <https://iwra.org/member/congress/resource/PAP00-5077.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2020.

MATOS, B. A. **Avaliação da ocorrência e do transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, Município de São Paulo**. 2001. 172 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MEIRA, J. C. R.; DE-CAMPOS, A. B.; PEREIRA, L. C. Vulnerabilidade Natural e Perigo à Contaminação de Zona de Recarga do Aquífero Guarani. **Águas Subterrâneas**, (2014) 28(1): 31-46.

MENDOZA, J. A.; BARMEN, G. **Assessment of Groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua**. *Environmental Geology*, 50, p. 569-580, 2006.

MENESES, L. F. De. **Avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos superiores no município de João Pessoa/ PB, através do modelo DRASTIC**. 2007. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

MILLON, M. M. B. **Águas Subterrâneas e Política de Recursos Hídricos – Estudo de Caso: Campeche, Florianópolis, SC**. 2004. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/87336/223600.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 abr. 2020.

MINDRISZ, A. C. **Avaliação da contaminação da água subterrânea de poços tubulares por combustíveis fósseis no município de Santo André, São Paulo: Uma contribuição à gestão ambiental**. 2006. 254 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA (BRASIL). **Águas Subterrâneas: Um Recurso a ser Conhecido e Protegido**. Brasília, 2007. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/167/_publicacao/167_publicacao28012009044356.pdf. Acesso em: 10 abr. 2020.

MOURA, P. **Vulnerabilidade de Aquíferos: Uso dos Métodos DRASTIC e GOD na Porção Norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará**. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, 2014.

MUNICÍPIO DE IPÊ. Lei Orgânica do Município de Ipê, de 3 de abril de 1990. **Lei Orgânica**, Ipê-RS, 3 abr. 1990. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/lei->

organica-ipe-rs#:~:text=leismunicipa.is%2Fhyle-
Art.,de%20%C3%A1rea%20(742%20Km%C2%B2). Acesso em: 7 nov. 2020.

MURADÁS, K.; WOJAHN, D.; COELHO, O. G. W. Levantamentos de Dados Geomorfológicos e Hidrogeológicos para Mapeamento de Vulnerabilidade de Contaminação do Aquífero Guarani nos Municípios de Portão e Estância Velha/RS utilizando o Método DRASTIC. **Ambiente e Água**, [s. l.], v. 5, n. 3, 22 out. 2010.

NANNI, A. S. **O flúor em águas o Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós-graduação em geociências. Porto Alegre, 2008. 127f.

NOVAIS, T. M. F.; CRUZ, M. C. C.; AZEVEDO, M. A. Modelagem da vulnerabilidade e do risco de contaminação de águas subterrâneas em locais de disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, 25 maio 2019.

OLIVEIRA, B. A. **Avaliação de Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação das Águas Subterrâneas do Município de Caçapava do Sul – RS**. Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul, 2017. Disponível em:
<http://200.132.148.32/bitstream/riu/2975/1/Bruna%20Antunes%20de%20Oliveira%20-%202017.pdf>. Acesso em: 01 set. 2020.

OLIVEIRA, G. G. DE; GUASSELLI L. A.; BRUBACHER J. P.; SIRANGELO F. R. **Interpretação e mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, com suporte de técnicas de geoprocessamento e utilização de dados orbitais e cartográficos**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, João Pessoa – PB, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

PESSOA, M. L. (Org.). Clima do RS. In: _____. **Atlas FEE**. Porto Alegre: FEE, 2017. Disponível em: < <http://atlas.fee.tche.br/rio-grande-do-sul/socioambiental/clima/> >. Acesso em: 11 de junho de 2020.

PEREIRA CABRAL, J. J. S. **Movimento das águas subterrâneas**. In: FEITOSA, Fernando A. C. et al. **Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. cap. 2.2, p. 86-87. v. único.

PINHEIRO, R. J. B.; RAUBER, A. C. C.; NUMMER, A. V.; DA SILVA, J. L. S. Aplicação dos Métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria - RS. **REGA**, Porto Alegre, v. 12, ed. 2, p. 61-79, jul./dez. 2015.

PHILLIPPI, JR. A. **Saneamento, Saúde e Ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Barueri, 2005.

PREFEITURA MUNICIPAL DE IPÊ. **Plano Ambiental Municipal**. Brasil, Estado do Rio Grande do Sul, 2003.

PREFEITURA MUNICIPAL DE IPÊ. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Ipê – RS**. Administração Pública de Ipê – Comitê Diretor do PMGIRS. Ipê, 2013.

PREFEITURA MUNICIPAL DE IPÊ. **Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Ipê – RS.** Administração Pública de Ipê – Comitê Executivo do PMSB. Ipê, 2018.

PROCERGS (Rio Grande do Sul) (ed.). **Atlas Socioeconômico:** Rio Grande do Sul. 4. ed. Porto Alegre, 2019. Atlas. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao>. Acesso em: 2 maio 2020.

QGIS.org (2020). **QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.** Disponível em: <http://qgis.org>

REBOUÇAS, A. C. Águas Subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. C; BRAGA, B; TUNDISI, J.G. (Orgs). **Águas doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação.** 3. ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.

REBOUÇAS A. C. Importância da Água Subterrânea. In: FEITOSA, Fernando. A. C. (org). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações.** 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812p.

REBOUÇAS, A.C. E FRAGA, C.G. Hidrogeologia das rochas vulcânicas do Brasil. **Revista Água Subterrânea** n° 12. Agosto de 1988. p 30-55.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Caracterização Estrutural dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, 2006.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Caracterização Hidrogeológica e Potencialidades dos Aquíferos Fraturados da Formação Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. **XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, [s. l.], 2004.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], p. 32 - 46, 13 mar. 2013.

ROISENBERG, A.; VIERO A. P. 2002. **O Vulcanismo Mesozoico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul.** In: Holz, M.; De Ros, L. F. (Edit.) Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CIGO/UFRGS. Porto Alegre, 2000. 444p. il. – Edição Revista, 2002.

ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul:** variabilidade, tendências e tipologia. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. UFRGS/PPGEA. Porto Alegre, 2011. 240 f.

SANTOS, E. F.; DA SILVA, J. L. S.; DE CHAVES, A.; CAMPONOGARA, I. Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral/Guarani no Município de Quaraí/RS. **XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poço: I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste**, [s. l.], 2007.

SEBRAE. **Perfil das Cidades Gaúchas:** Ipê. Porto Alegre: Sebrae 2019. Disponível em: https://datasebrae.com.br/municipios/rs/Perfil_Cidades_Gauchas-Ipe.pdf. Acesso em: 13 mai. 2020.

SEMA – SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA. **G040 - Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas**. Porto Alegre - RS, 2020. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/g040-bh-taquari-antas>. Acesso em: 20 out. 2020.

SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas: **Banco de Dados CPRM, Município de Ipê**. 2020 Disponível em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php. Acesso em: 07 mai. 2020.

SILVA, H.; LOPES DA SILVA, S.; LUIS GINEITES DARONCO FILHO, J.; WINK SOARES, F.; CRISTINA LIMA DOS SANTOS MATOS, A. Vulnerabilidade à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos no município de Caçapava do Sul-RS. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 2, 3 mar. 2020. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/SIEPE/article/view/98102>. Acesso em: 01 set. 2020.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; LORENSI, R. P.; CRUZ, J. C.; ELTZ, F. L. F. Vulnerabilidade do aquífero Serra Geral à contaminação no município de Erechim - Rio Grande do Sul – Brasil. **Ciência e Natura**, Santa Maria, ISSN: 2179-460X v. 35 n. 1 jul. 2013, p. 010-023.

SIMMERS, I. **Groundwater recharge: an overview of estimation problems and recent developments**. In: N.S. Robins, ed. *Groundwater Pollution, Aquifer Recharge and Vulnerability*. Geological Society, London, *Special Publications*, 130, 1998, 107-115.

SOARES, M. U. G.; MOTA, A. A. Mapeamento do risco à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no município de Chapecó (SC). **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 299-309, 2017.

THORNTHWAITE, C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. **Geographical review**, v. 38, n. 1, 55-94.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (*Publications in Climatology*, vol. VIII, n.1)

TUNDISI, J. G. **Recursos Hídricos no Século XXI**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 328 p.

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL (UCS). **Intermediador**. 2020. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br/intermediador/>. Acesso em: 17 out. 2020.

URSULINO, B. S. **Avaliação da Vulnerabilidade à Contaminação da Água Subterrânea do Município de Juazeiro do Norte - CE**. 2014. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Juazeiro do Norte, Juazeiro do Norte, 2014.

VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. **AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada**. PPWD pilot project, Sept. 1991 - March 1992. *Groundwater and Contaminants Project, Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute, Saskatoon, 1992*.

VARGAS T. DE; GOMES M. G.; BELLADONA R.; ADAMI M. V. D. Aplicação do Interpolador IDW para Elaboração de Mapas Hidrogeológicos Paramétricos na Região da Serra Gaúcha. *Scientia cum Industria*, Caxias do Sul, 2018. V. 6, N. 3, PP. 38 — 43, 2018. Disponível em: <http://www.ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/6853>. Acesso em: 16 out. 2020.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária/UFV, 1991. 449 p.

VOGUEL, M. M. **Avaliação da Vulnerabilidade Natural à Contaminação dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Cultural da Quarta Colônia de Imigração Italiana, RS**. 2008. 138 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/9281>. Acesso em: 16 abr. 2020.

WAHNFRIED, Ingo; HIRATA, Ricardo. Comparação de Métodos de Estimativas de Recarga de Aquíferos em uma planície aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 10, n. 2, p. 15-25, 2005.

WILDNER, W.; LOPES, R. C. Evolução Geológica: Do Paleoproterozoico ao Recente. *In*: VIEIRO, A. C. **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. cap. 2, p. 17-30.

WILDNER, W.; ORLANDI FILHO, V.; GIFFONI, L. E. 2006. **Itaimbezinho e Fortaleza, RS e SC. Magníficos Cânions Esculpidos nas Escarpas Aparados da Serra do Planalto Vulcânico da Bacia do Paraná**. *In*: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; BERBERT-BORN, M.; QUEIROZ, E. T.; CAMPOS, D. A.; SOUZA, C. R. G.; FERNANDES, A. C. S. (Org.), **Sítios Geológicos e Paleobiológicos do Brasil**. Brasília: DNPM; CPRM; SIGEP, 2009. v. 2.

ZHANG, B.; LI, G.; CHENG, P.; JIM YEH, T.; HONG, M. (2016). *Landfill Risk Assessment on Groundwater Based on Vulnerability and Pollution Index*. **Water Resources Management**, 30(4), 1465-1480. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-016-1233-x>

ZOBY, J. L. G. Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil. **XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2008. Brasília – DF.