

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JORGE LUÍS GINEITES DARONCO FILHO

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD E DRASTIC NA ANÁLISE DE
VULNERABILIDADE NATURAL DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA
GERAL NO MUNICÍPIO DE CHAPECÓ-SC**

**Caçapava do Sul
2023**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JORGE LUÍS GINEITES DARONCO FILHO

**APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD E DRASTIC NA ANÁLISE DE
VULNERABILIDADE NATURAL DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA
GERAL NO MUNICÍPIO DE CHAPECÓ-SC**

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

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza

**Caçapava do Sul
2023**

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

F481a Filho, Jorge Luís Gineites Daronco
APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD E DRASTIC NA ANÁLISE DE
VULNERABILIDADE NATURAL DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL
NO MUNICÍPIO DE CHAPECÓ-SC / Jorge Luís Gineites
Daronco Filho.
128 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2023.
"Orientação: Luis Eduardo de Souza".

1. Vulnerabilidade. 2. Aquífero. 3. Estimativa. 4.
GOD. 5. DRASTIC. I. Título.

JORGE LUÍS GINEITES DARONCO FILHO**APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD E DRASTIC NA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE NATURAL DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL NO MUNICÍPIO DE CHAPECÓ-SC**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 21 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza

Orientador

Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. José Waldomiro Jiménez Rojas

Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Vinicius Matté

Universidade Federal do Pampa



Assinado eletronicamente por **VINICIUS MATTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/12/2023, às 12:11, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JOSE WALDOMIRO JIMENEZ ROJAS, Diretor(a) Campus Caçapava do Sul**, em 21/12/2023, às 12:21, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/12/2023, às 13:52, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1338271** e o código CRC **FOA800D3**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

AGRADECIMENTO

Agradeço a Um Poder Superior, da maneira como eu sou capaz de compreendê-Lo, um Poder Superior a mim, infinitamente amoroso e justo. Agradeço ao Mestre Jesus Cristo pelos mais belos ensinamentos deixados na Terra através do seu exemplo. Agradeço a Maria, mãe sublime do Mestre Jesus, por ter me confortado nos momentos de aflição. Ave Maria! No lugar das aflições, encheste meu coração de esperança!

Agradeço ao Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza pelo dia em que ele decidiu tornar-se professor. Agradeço pela sua conduta, sempre profissional e ética, dentro e fora da sala de aula. Agradeço por sempre ter acreditado em meu potencial e por ter estado ao meu lado ao longo dos anos. Através das suas orientações, pude retomar o rumo da minha vida acadêmica. Sem o senhor, nada disso seria possível.

Agradeço a mim, por fazer um dia de cada vez aquilo que só eu posso fazer por mim.

Agradeço à minha mãe pelo seu amor incondicional. Agradeço à minha irmã pelo seu exemplo de dedicação aos estudos e superação de limites. Agradeço ao Hernanes Firmo, por, em um momento da minha vida, ter feito por mim o que eu não fui capaz de fazer. Agradeço ao Alan Werli pela camaradagem. Aproveito para agradecer aos meus amigos que tornam minha vida mais leve: Nelson, Daniel, Humberto e Marcelo.

Finalmente, agradeço à minha esposa, Marília, pela sua compreensão ao longo do período em que estive dedicado a esta pesquisa. Além disso, agradeço pela vida que estamos construindo juntos e pelo amor compartilhado entre nós. Por fim, agradeço ao Joaquim por ter escolhido me amar, assim como eu o amo, independentemente de qualquer circunstância.

*“Deus, conceda-me serenidade para aceitar
as coisas que não posso modificar,
coragem para modificar aquelas que posso e
sabedoria para reconhecer a diferença.”*

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo a avaliação da vulnerabilidade à contaminação natural no Sistema Aquífero Serra Geral em Chapecó – SC, combinando as metodologias GOD (*Groundwater hydraulic confinement, Overlying strata, Depth to groundwater table*) e DRASTIC (*Depth to water table, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, hydraulic Conductivity*). Ambas as abordagens foram aplicadas em conjunto para desenvolver modelos de avaliação de vulnerabilidade, permitindo uma análise comparativa de seus resultados. Durante a pesquisa, os parâmetros de cada método foram determinados, e os modelos resultantes foram validados e integrados às técnicas de avaliação aquífera. Isso possibilitou a identificação das vantagens e desvantagens de cada abordagem. O método GOD, mais simples com apenas três parâmetros, facilitou a obtenção de dados do banco de dados do SIAGAS. Por outro lado, o método DRASTIC, mais complexo ao considerar sete parâmetros, ofereceu uma análise mais detalhada, requerendo informações mais específicas nem sempre disponíveis no banco de dados mencionado. Os resultados revelaram padrões de vulnerabilidade na área estudada. A análise pelo método GOD indicou uma baixa vulnerabilidade na maior parte da região, enquanto o método DRASTIC classificou a maioria do território como vulnerabilidade média. A zona urbana de Chapecó foi identificada como altamente vulnerável por ambos os métodos, com o DRASTIC indicando alta vulnerabilidade e o GOD apresentando índices variados entre baixo e alto. Estes resultados indicaram a sensibilidade das áreas urbanas aos riscos de contaminação, ressaltando a necessidade de monitoramento contínuo e implementação de medidas preventivas para preservar a qualidade do aquífero. A conclusão do estudo enfatiza a importância de escolher a abordagem mais adequada às características locais e aos objetivos específicos da avaliação de vulnerabilidade. A combinação das metodologias GOD e DRASTIC permitiu uma análise detalhada da vulnerabilidade à contaminação no Sistema Aquífero Serra Geral em Chapecó. A escolha entre essas abordagens deve considerar a disponibilidade de dados, os objetivos da avaliação e as características hidrogeológicas da região. Essa abordagem integrada oferece informações fundamentais para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, contribuindo para a preservação da qualidade da água nessa importante área aquífera.

Palavras-chave: Vulnerabilidade; Aquífero; Estimativa; GOD; DRASTIC.

ABSTRACT

The present study aimed to assess the vulnerability to natural contamination in the Serra Geral Aquifer System in Chapecó – SC, combining the GOD (Groundwater hydraulic confinement, Overlying strata, Depth to groundwater table) and DRASTIC (Depth to water table, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, hydraulic Conductivity) methodologies. Both approaches were jointly applied to develop vulnerability assessment models, allowing for a comparative analysis of their results. During the research, parameters for each method were determined, and resulting models were validated and integrated into aquifer evaluation techniques. This facilitated the identification of advantages and drawbacks of each approach. The GOD method, simpler with only three parameters, eased data acquisition from the SIAGAS database. Conversely, the more complex DRASTIC method, considering seven parameters, provided a more detailed analysis, requiring more specific information not always available in the mentioned database. Results revealed vulnerability patterns in the studied area. The GOD analysis indicated low vulnerability in most of the region, while the DRASTIC method classified the majority of the territory as medium vulnerability. Chapecó's urban zone was identified as highly vulnerable by both methods, with DRASTIC indicating high vulnerability and GOD showing varied indices between low and high. These outcomes highlighted the sensitivity of urban areas to contamination risks, emphasizing the need for continuous monitoring and implementation of preventive measures to preserve aquifer quality. The study's conclusion underscores the importance of selecting an approach tailored to local characteristics and specific vulnerability assessment goals. The combination of GOD and DRASTIC methodologies allowed for a detailed analysis of contamination vulnerability in the Serra Geral Aquifer System in Chapecó. The choice between these approaches should consider data availability, evaluation objectives, and hydrogeological characteristics of the region. This integrated approach offers crucial insights for sustainable management of underground water resources, contributing to preserving water quality in this significant aquifer area.

KEYWORDS: Vulnerability; Aquifer; Estimation; GOD; DRASTIC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da metodologia aplicada na elaboração deste trabalho.....	26
Figura 2 – Mapa de localização e acesso ao município de Chapecó - SC.....	28
Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná. O município de Chapecó – SC, área de estudo deste trabalho, está sobre o Supergrupo São Bento, que contém o Grupo Serra Geral, que por sua vez, compreende, entre outras, a Formação Paranapanema, pertencente ao Cretáceo Inferior, e a Formação Chapecó, com uma idade estimada em $132,1 \pm 0,19$ milhões de anos segundo análises de datação Ar-Ar.....	30
Figura 4 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná com profundidade do embasamento e a distribuição no tempo das Supersequências divididas por Milani (1997).	32
Figura 5 - Coluna estratigráfica parcial da Bacia do Paraná.	33
Figura 6 - Mapa geológico do município de Chapecó-SC.	35
Figura 7 - Mapa de localização da área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral (em verde).....	36
Figura 8 – Mapa das Regiões Hidrográficas do Estado de Santa Catarina, destaca-se o município de Chapecó.	37
Figura 9 – Mapa das bacias hidrográficas que compõe a Região Hidrográfica do Meio Oeste (RH2), destaca-se o município de Chapecó.....	38
Figura 10 - Mapa geomorfológico do município de Chapecó-SC.....	40
Figura 11 - Mapa hipsométrico do município de Chapecó-SC.	41
Figura 12 - Histograma da distribuição da altitude no território do município de Chapecó-SC.	42
Figura 13 - Representação esquemática do ciclo hidrológico: E = evaporação; ET = evapotranspiração; I = infiltração; R = escoamento superficial (deflúvio).	43
Figura 14 - Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos, de acordo com o sistema de pressão de suas águas e com a natureza das camadas que os delimitam no topo e na base.	44
Figura 15 - O método de vulnerabilidade GOD.	50
Figura 16 - Mapa de localização das 190 ocorrências de água subterrânea analisadas a partir do banco de dados fornecido por SIAGAS.	57
Figura 17 – Mapa de localização dos 190 poços tubulares com distribuição espacial associada à classificação do grau de confinamento do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó - SC.....	59

Figura 18 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro G atribuídos às ocorrências de água subterrânea analisadas.....	60
Figura 19 - Visualização da triangulação aplicada para estimar a área total investigada.	62
Figura 20 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice G.....	64
Figura 21 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice G.	65
Figura 22 - Mapa da distribuição espacial do índice G na área de estudo, o município de Chapecó-SC.....	65
Figura 23 - Mapa pedológico do município de Chapecó - SC.	67
Figura 24 – O mapa apresenta a relação entre as unidades de solo, suas texturas de acordo com a classificação do IBGE (2018), e os pesos atribuídos ao parâmetro O para os 190 poços tubulares analisados.....	69
Figura 25 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro O atribuídos às ocorrências de água subterrânea analisadas.....	69
Figura 26 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice O.....	70
Figura 27 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice O.	71
Figura 28 - Mapa da distribuição espacial do índice O na área de estudo, o município de Chapecó-SC.....	72
Figura 29 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa da distância até o nível da água.	74
Figura 30 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa da distância até o nível da água no município de Chapecó – SC.	74
Figura 31 - Representação da distância até o lençol freático na área de estudo com intervalos de classe de acordo com o método GOD.	75
Figura 32 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro D atribuídos às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.....	76
Figura 33 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice D.....	77
Figura 34 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice D.	77

Figura 35 - Mapa da distribuição espacial do índice D na área de estudo, o município de Chapecó-SC.....	78
Figura 36 - Distribuição espacial dos 190 valores pontuais do índice de vulnerabilidade à contaminação obtidos através da aplicação da metodologia GOD.....	80
Figura 37 – Mapa da distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó – SC, de acordo com o método GOD.	81
Figura 38 - Representação dos intervalos de profundidade de água, parâmetro D.	83
Figura 39 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro D atribuídos às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.....	84
Figura 40 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice D.....	85
Figura 41 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice D.	85
Figura 42 - Mapa da distribuição espacial do índice D na área de estudo, o município de Chapecó-SC.....	86
Figura 43 – Representação da distribuição espacial da recarga anual (mm/ano) do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó – SC, baseado nos dados de Rabelo (2006). 88	
Figura 44 - Mapa da distribuição espacial do índice R na área de estudo, o município de Chapecó-SC.....	89
Figura 45 - Mapa geológico e estrutural do município de Chapecó - SC, apresentando a distribuição espacial do 190 poços tubulares analisados.....	90
Figura 46 - Mapa da distribuição espacial do índice A na área de estudo, o município de Chapecó-SC.....	91
Figura 47 - Relação entre as unidades de solo, suas texturas de acordo com a classificação do IBGE (2018), e os pesos atribuídos ao parâmetro S para os 190 poços tubulares analisados..	93
Figura 48 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro S atribuídos às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.....	93
Figura 49 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice S.	94
Figura 50 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice S.	95
Figura 51 - Mapa da distribuição espacial do índice S na área de estudo, o município de Chapecó-SC.....	95

Figura 52 - Mapa de declividade do município de Chapecó - SC, com a integração da distribuição espacial dos 190 poços tubulares analisados associados ao valor do índice T conforme classe de declividade.	97
Figura 53 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro T atribuídos às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.....	97
Figura 54 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice T.	98
Figura 55 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice T.	99
Figura 56 - Mapa da distribuição espacial do índice T na área de estudo, o município de Chapecó-SC.	100
Figura 57 – Mapa exibindo a relação entre a característica da zona vadosa e os pesos atribuídos ao parâmetro I para os 190 poços tubulares analisados.....	102
Figura 58 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro I atribuídos às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.....	103
Figura 59 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice I.	103
Figura 60 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice I.	104
Figura 61 - Mapa da distribuição espacial do índice I na área de estudo, o município de Chapecó-SC.	105
Figura 62 - Faixas de valor de condutividade hidráulica (m/dia) para diversos materiais geológicos.....	106
Figura 63 - Mapa exibindo estruturas geológicas e o valor de condutividade hidráulica, compreendido no intervalo de 12,2 - 28,5 m/dia, portanto índice 4 para o parâmetro C conforme proposto por Aller <i>et al.</i> (1987) para os 190 poços tubulares analisados.....	108
Figura 64 - Mapa da distribuição espacial do índice C na área de estudo, o município de Chapecó-SC.	109
Figura 65 - Histograma de distribuição de frequência de ocorrência para cada valor obtido de vulnerabilidade DRASTIC através da aplicação da metodologia descrita para cada uma das 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.....	112
Figura 66 - Histograma de distribuição de frequência de ocorrência das classes de vulnerabilidade DRASTIC obtidos através da aplicação da metodologia descrita para cada uma das 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.	113

Figura 67 - Mapa da distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó – SC, de acordo com o método DRASTIC.	114
Figura 68 - Mapa da distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral, de acordo com o método GOD, com ênfase exclusivamente na zona urbana do município de Chapecó – SC.	119
Figura 69 - Mapa da distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral, de acordo com o método DRASTIC, com ênfase exclusivamente na zona urbana do município de Chapecó – SC.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – O termo "vulnerabilidade" acompanhado de diferentes adjetivos resulta em diferentes expressões com significados específicos.	47
Tabela 2 - Classes de vulnerabilidade absoluta de aquíferos à contaminação segundo Foster <i>et al.</i> , 2002.	48
Tabela 3 - Valores dos índices do parâmetro D.	51
Tabela 4 - Valores dos índices do parâmetro R.	51
Tabela 5 - Valores dos índices do parâmetro A.	52
Tabela 6 - Valores dos índices do parâmetro S.	53
Tabela 7 - Valores dos índices do parâmetro T.	53
Tabela 8 - Valores dos índices do parâmetro I.	54
Tabela 9 - Valores dos índices do parâmetro C.	54
Tabela 10 - A tabela relaciona cada uma das unidades de solo mapeadas por IBGE (2018) na área de estudo, o município de Chapecó – SC, à sua textura, peso atribuído ao parâmetro O e justificativa para essa atribuição de peso.	68
Tabela 11 - A tabela apresenta a área total de cada classe de índice GOD e sua porcentagem em relação à área total do município de Chapecó - SC.	82
Tabela 12 - Classes de vulnerabilidade DRASTIC, conforme proposto por Aller <i>et al.</i> (1987).	110
Tabela 13 - Parâmetros, classes, número de ocorrência por classe, valor do índice atribuído proposto pela metodologia, peso padrão proposto pela metodologia e resultado por parâmetro do índice final DRASTIC de vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó – SC.	110
Tabela 14 - A tabela apresenta a área total de cada classe de índice DRASTIC e sua porcentagem em relação à área total do município de Chapecó - SC.	114
Tabela 15 – Quadro comparativo entre os resultados obtidos com as metodologia GOD e DRASTIC.	118
Tabela 16 - Quadro comparativo entre os resultados obtidos com as metodologia GOD e DRASTIC com ênfase exclusivamente na zona urbana do município de Chapecó – SC.	121

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
1.1.	Estado da arte.....	20
1.2.	Justificativa.....	23
1.3.	Objetivos.....	23
1.3.1.	Objetivos gerais.....	23
1.3.2.	Objetivos específicos.....	23
1.4.	Metodologia.....	24
1.5.	Organização deste trabalho.....	26
2.	APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	27
2.1.	Localização da área de estudo.....	27
2.2.	Contexto geológico regional.....	28
2.2.1.	Bacia do Paraná.....	29
2.2.2.	Supergrupo São Bento.....	33
2.3.	Contexto geológico local.....	34
2.4.	Contexto hidrogeológico.....	35
2.5.	Contexto hidrológico.....	37
2.6.	Contexto geomorfológico.....	39
2.6.1.	Modelo Digital de Elevação.....	40
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	42
3.1.	Definições gerais.....	42
3.2.	Tipo de aquíferos.....	43
3.3.	Tipos de aquíferos relacionados com as rochas armazenadoras.....	44
3.4.	Contaminação das águas subterrâneas.....	45
3.5.	Vulnerabilidade à poluição de aquíferos.....	46
3.6.	Métodos de Cartografia da Vulnerabilidade.....	48

3.7.	Método GOD	49
3.8.	Método DRASTIC	50
3.8.1.	Parâmetro D	51
3.8.2.	Parâmetro R.....	51
3.8.3.	Parâmetro A	52
3.8.4.	Parâmetro S	52
3.8.5.	Parâmetro T	53
3.8.6.	Parâmetro I.....	54
3.8.7.	Parâmetro C.....	54
4.	RESULTADOS	55
4.1.	Banco de dados	55
4.2.	Aplicação do método GOD.....	58
4.2.1.	Parâmetro G	58
4.2.2.	Parâmetro O	66
4.2.3.	Parâmetro D	72
4.2.4.	Índice final GOD.....	78
4.3.	Aplicação do método DRASTIC	82
4.3.1.	Parâmetro D	82
4.3.2.	Parâmetro R.....	86
4.3.3.	Parâmetro A	89
4.3.4.	Parâmetro S	91
4.3.5.	Parâmetro T	96
4.3.6.	Parâmetro I.....	100
4.3.7.	Parâmetro C.....	105
4.3.8.	Índice final DRASTIC	109
4.4.	Comparação entre os resultados obtidos com as diferentes metodologias ...	115
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	121

REFERÊNCIAS.....	123
------------------	-----

1. INTRODUÇÃO

A água subterrânea é um recurso natural vital para o abastecimento hídrico tanto em ambientes urbanos quanto rurais. Esta fonte de abastecimento possui importância estratégica economicamente e desempenha um papel fundamental, mas muitas vezes subestimado, no bem-estar social humano, assim como em muitos ecossistemas.

De acordo com Foster *et al.* (2002), nas décadas passadas, os recursos hídricos subterrâneos foram, de fato, abandonados ao acaso. Comumente, mesmo aqueles que dependem de tais recursos para abastecimento de água potável não tomaram nenhuma ação significativa para garantir a qualidade da água explorada, tampouco concentraram esforços adequados para avaliar a vulnerabilidade natural destes aquíferos.

Ainda de acordo com Foster *et al.* (2002), as estratégias de gestão e proteção das águas subterrâneas e seus pré-requisitos de avaliação do risco de poluição devem ser promovidas pelas agências públicas reguladoras dos recursos hídricos e ambientais. É importante, no entanto, que a atenção seja focada na escala e nível de detalhe da avaliação e proteção dos recursos hídricos disponíveis para abastecimento.

Uma forma de conciliar atividades humanas com preservação da água subterrânea é estimar a vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos. A avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação das águas subterrâneas é necessária para fornecer um panorama mais claro de ações necessárias para preservar a qualidade dos recursos hídricos disponíveis (Sánchez, 2020).

A vulnerabilidade de um sistema aquífero depende das suas propriedades físicas bem como de sua sensibilidade a impactos naturais e àqueles causados por seres humanos (Guinger e Kohnke, 2002). Existem diversas metodologias para se determinar a vulnerabilidade de aquíferos, ainda de acordo com os autores supracitados, os métodos GOD (Foster & Hirata, 1988) e DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) estão entre os mais utilizados.

A degradação da qualidade da água subterrânea pode decorrer de processos naturais, em razão da interação água-rocha. Por outro lado, as intervenções antrópicas no meio físico são os principais agentes degradantes da qualidade das águas subterrâneas. Para citar exemplos, o manejo inadequado de componentes do saneamento básico, bem como a contaminação por hidrocarbonetos em postos de abastecimento e também os efluentes industriais proporcionam a

degradação das águas subterrâneas em núcleos urbanos. Fora dos aglomerados populacionais, a mineração e a agricultura extensiva são agentes da contaminação das águas subterrâneas (Viero e Silva, 2010).

As metodologias de determinação de vulnerabilidade de aquíferos devem ser aplicadas através da utilização de sistemas de informações geográficas (SIG), já que ocorre sempre uma sobreposição de mapas de parâmetros (Guinger e Kohnke, 2002).

O presente estudo tem como objetivo fundamental a aplicação concomitante das abordagens metodológicas GOD (*Geological setting, Overlying strata, Depth to water table, aquifer media*) e DRASTIC (*Depth to water table, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, hydraulic Conductivity*) no intuito de desenvolver modelos de avaliação de vulnerabilidade à contaminação natural no Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó – SC. Através da adoção desses métodos de cartografia de vulnerabilidade, almeja-se a obtenção de parâmetros modelados que posteriormente serão validados e incorporados às técnicas de avaliação de vulnerabilidade aquífera, viabilizando, assim, a realização de uma análise comparativa dos resultados alcançados por meio da implementação das distintas abordagens metodológicas empregadas.

A área de estudo compreende o município de Chapecó, localizado na região oeste do estado de Santa Catarina, a aproximadamente 560 km a oeste da capital do estado, Florianópolis. De acordo com os dados do censo de 2021, conduzido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Chapecó abriga uma população de 254.781 habitantes. Este município apresenta um total de 380 poços tubulares profundos registrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), tornando-o um importante ponto de estudo para a gestão e análise de recursos hídricos subterrâneos na região.

A presente pesquisa encontra sua justificativa na considerável dificuldade inerente à avaliação precisa da vulnerabilidade de aquíferos, destacando-se a limitação decorrente da insuficiência de informações robustas. A disponibilidade restrita de dados amostrais, conforme observado nos registros do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), portal criado e mantido pelo Serviço Geológico do Brasil (SBG) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), reflete em uma densidade insatisfatória, comprometendo a fidedignidade das avaliações realizadas. A conseqüente propensão a erros de estimativa

introduz um risco substancial no processo de avaliação. Nesse contexto, emerge a necessidade de adotar um método de estimativa que demonstre robustez e confiabilidade, capaz de considerar minuciosamente as particularidades geológicas e hidrogeológicas inerentes à região de estudo. A relevância desta justificativa reside na busca por um procedimento analítico que mitigue as lacunas de dados e assegure resultados mais consistentes e representativos, possibilitando que as decisões e práticas de gestão hídrica estejam fundamentadas em uma base científica e técnica sólida e adaptada à realidade específica da área investigada.

1.1. Estado da arte

O desenvolvimento dos estudos sobre a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos constitui uma área essencial na hidrogeologia, cujas raízes remontam a investigações pioneiras conduzidas por notáveis pesquisadores. Albinet (1963, 1970), Albinet e Margat (1971), LeGrand (1964), Margat e Albinet (1965), Margat (1968), Taltasse (1972), Vrana (1968), Walker (1969), Zanoni (1972), e Hirata *et al.* (1991) destacam-se como pioneiros na formulação dos conceitos basilares para a avaliação da vulnerabilidade à contaminação aquífera. Eles forneceram as bases para a abordagem preventiva, que permite a antecipação da capacidade de proteção natural dos aquíferos e a identificação das áreas sujeitas a riscos de contaminação devido à intervenção humana. Estes estudos estabelecem um arcabouço teórico para a análise dos perigos e ameaças de contaminação, considerando o contexto ambiental como um fator fundamental.

As contribuições desses pesquisadores não apenas forneceram alicerces sólidos para o entendimento da vulnerabilidade aquífera, mas também desempenharam um papel crucial na formulação de estratégias de gestão e preservação dos recursos hídricos subterrâneos. Esses estudos não só enriqueceram o campo da hidrogeologia, mas também desencadearam um movimento contínuo em direção à compreensão aprofundada dos processos de contaminação, possibilitando a identificação e implementação de medidas mitigatórias e de redução de riscos em áreas suscetíveis à contaminação.

Concomitantemente ao avanço das descobertas científicas, emergiram sistemas automatizados, desencadeando amplas discussões na comunidade científica acerca da adaptação a essas inovações. O propósito era representar aspectos específicos do mundo real em uma estrutura geograficamente referenciada, utilizando informações provenientes de

diversas fontes. Esse sistema foi denominado Sistema de Informação Geográfica - SIG, conforme descrito por Melo *et al.* (2015).

Em um curto período, o SIG se consolidou como uma ferramenta essencial nos estudos hidrogeológicos, atendendo às demandas de gestão de informações geográficas e incorporando as evoluções metodológicas e tecnológicas, conforme destacado por Melo *et al.* (2015). O sistema desempenha um papel fundamental na integração de dados geográficos e na análise de informações espaciais, o que o torna indispensável para a eficaz condução de estudos no campo da hidrogeologia.

Na década de 1980, um grupo de pesquisadores liderado por Linda Aller introduziu um método pioneiro para a avaliação da vulnerabilidade intrínseca e específica à contaminação aquífera, fundamentado na análise paramétrica de indexadores, conforme detalhado por Aller *et al.* (1985). Esse método, chamado de DRASTIC, emprega sete parâmetros associados aos processos que influenciam o transporte de contaminantes nos aquíferos. Esses parâmetros incluem a profundidade do aquífero (*Depth to groundwater*), a recarga do aquífero (*net Recharge*), as características do material na zona saturada (*Aquifer media*), as propriedades do solo (*Soil media*), a topografia do terreno (*Topography*), as características do material na zona não saturada (*Impact of the vadose zone media*) e a condutividade hidráulica do aquífero (*hydraulic Conductivity*). Cada parâmetro recebe uma pontuação que expressa o grau de vulnerabilidade, variando de 1 a 10, e é posteriormente multiplicado por um peso relativo, variando de 1 a 5. O índice final é calculado somando os produtos de cada índice pelo peso correspondente, resultando em valores que variam de 23 a 226. Quanto maior o índice, maior a vulnerabilidade à contaminação. Esse método inovador revolucionou a avaliação da vulnerabilidade aquífera, fornecendo uma ferramenta sólida para a gestão e proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

O método paramétrico GOD, desenvolvido por Foster (1987) e posteriormente adaptado para atender às condições dos países latino-americanos por Foster e Hirata (1988), bem como por Foster *et al.* (2002), representa uma abordagem importante na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos. Esse método se concentra na hierarquização de índices que consideram a extrema ou baixa vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos, levando em conta os mecanismos de recarga das águas subterrâneas e a capacidade natural de atenuação de contaminantes, variando de acordo com as condições geológicas. Conforme ressaltado por Bartolomeu (2012), o método prioriza os mecanismos de recarga e destaca a importância de considerar fraturas e outras

heterogeneidades nas rochas, uma vez que podem facilitar o fluxo preferencial e, conseqüentemente, aumentar a vulnerabilidade.

Esse método baseia-se na análise de três variáveis principais: o tipo de aquífero (*Groundwater occurrence*), as características geológicas (*Overall aquifer class*) e a profundidade do nível piezométrico (*Depth to groundwater*). Para cada um desses parâmetros, são atribuídos valores que variam de 0,0 ou 0,4 a 1,0. O índice integral de vulnerabilidade à contaminação do aquífero é calculado como o produto da multiplicação dos três índices. Este método oferece uma estrutura sistemática e eficaz para avaliar a vulnerabilidade à contaminação aquífera, considerando fatores geológicos, hidrogeológicos e hidráulicos.

Rebouças (1978) classifica o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) como um sistema fraturado e instável, atribuindo-lhe características de heterogeneidade e anisotropia. Nanni (2008) complementa esta visão, descrevendo o desenvolvimento do SASG ao longo de fraturas e descontinuidades, particularmente nas zonas interderrames que compõem basaltos vesiculares e amigdaloidais, bem como em zonas de disjunção horizontal. Adicionalmente, Machado (2013) destaca a relevância da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral, que abrange 49,73% da área do Estado de Santa Catarina. Esta unidade é constituída por diversas rochas vulcânicas de composição básica e ácida, formando a Serra Geral. Duas características hidrogeológicas significativas emergem dessa descrição: as litologias fraturadas desempenham o papel de aquíferos, ao mesmo tempo em que atuam como camada confinante para as Unidades Hidroestratigráficas Piramboia e Botucatu, que correspondem ao Sistema Aquífero Guarani.

Soares (2016) conduziu um estudo abordando o "Mapeamento do risco à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó (SC)". O objetivo desse trabalho foi mapear a vulnerabilidade do aquífero à contaminação utilizando métodos como GOD, POSH e álgebra de mapas. A pesquisa se valeu de informações relacionadas à hidrogeologia, pedologia e níveis estáticos de poços registrados na região, disponíveis no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Os resultados indicaram que a vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral era predominantemente baixa em cerca de 90% da área do município. No entanto, 57% da extensão territorial do município e 83% do perímetro urbano foram classificados como áreas de alto perigo de contaminação, de acordo com o método POSH.

1.2. Justificativa

A presente pesquisa encontra sua justificativa na necessidade de aprimorar a avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, um desafio complexo agravado pela carência de dados robustos. A escassez de informações representativas, notadamente evidenciada nos registros do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), resulta em uma inadequada densidade de dados, comprometendo a confiabilidade das análises efetuadas. Tal deficiência de informações aumenta o risco de erros na estimativa da vulnerabilidade aquífera, introduzindo incertezas significativas no processo de avaliação. Portanto, a justificativa desta pesquisa reside na necessidade de adotar um método de avaliação que demonstre solidez e consistência, abrangendo de forma detalhada as peculiaridades geológicas e hidrogeológicas específicas da região de estudo. A importância desta justificativa se destaca na busca por uma abordagem analítica capaz de superar as limitações de dados e proporcionar resultados mais sólidos e representativos.

A escolha do município de Chapecó, situado em Santa Catarina, como área de estudo foi fundamentada em critérios específicos. Santa Catarina se destaca na Região Sul do Brasil pela consolidação do banco de dados do portal SIAGAS, sobressaindo-se em qualidade e abrangência em comparação aos estados vizinhos. Dentro deste contexto, Chapecó emerge como um dos municípios catarinenses com uma das maiores quantidades de usos de água subterrânea registrados no SIAGAS.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos gerais

O estudo de caso desenvolvido neste trabalho envolve a aplicação das metodologias GOD e DRASTIC para criar modelos de avaliação de vulnerabilidade aquífera do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó/SC, integrando parâmetros em análises comparativas.

1.3.2. Objetivos específicos

Com vistas a atingir ao objetivo geral proposto, este trabalho buscará cumprir os seguintes objetivos específicos:

- i. realizar a aplicação das metodologias GOD e DRASTIC para avaliar a vulnerabilidade aquífera em uma área de estudo específica;
- ii. integrar uma variedade de parâmetros relevantes, como geológicos, hidrogeológicos e pedológicos, na análise comparativa para desenvolver modelos de vulnerabilidade aquífera.

1.4. Metodologia

No desenvolvimento deste estudo, foi adotada uma abordagem metodológica estruturada para avaliar a vulnerabilidade aquífera em uma área de estudo delimitada pelo limite administrativo do município de Chapecó, no Estado de Santa Catarina. A base desse processo metodológico teve início com uma revisão bibliográfica, que serviu como ponto de partida para a definição das melhores práticas e metodologias já estabelecidas no campo da avaliação de vulnerabilidade aquífera. Essa revisão proporcionou uma base teórica e diretrizes essenciais para as etapas subsequentes.

Com base no conhecimento obtido por meio da revisão bibliográfica, prosseguiu-se com a consolidação de um banco de dados de relevância para esta investigação. O Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), constitui-se de uma base de dados permanentemente atualizada, munida de módulos que capacitam a realização de consultas, pesquisas e extração, bem como a geração de relatórios. No contexto específico do município de Chapecó, situado em Santa Catarina, o SIAGAS inicialmente disponibilizava informações referentes a 380 poços previamente registrados no sistema. Todavia, a consolidação desse banco de dados se fez necessária devido a inconsistências e lacunas presentes em muitos dos registros dos poços cadastrados. Essa ação abrangeu informações relacionadas à geologia, hidrogeologia, hidrologia e ao uso do solo na área de estudo.

Foram empregadas técnicas convencionais de estimativas para a interpolação dos parâmetros requeridos na avaliação da vulnerabilidade aquífera. Paralelamente, cada modelo de estimativa foi validado, resultando em estimativas confiáveis dos parâmetros essenciais que foram integrados às metodologias escolhidas para análise subsequente.

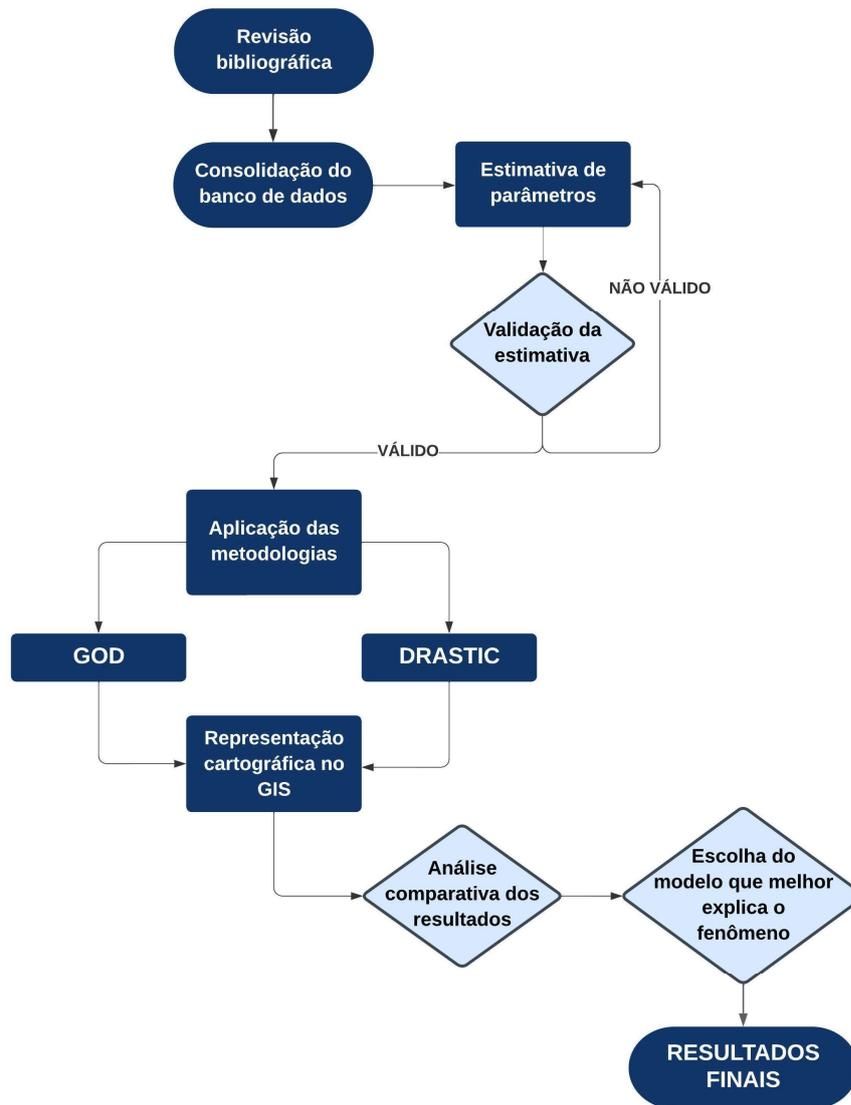
As metodologias escolhidas para a avaliação da vulnerabilidade foram o GOD (*Groundwater Occurrence and Depth*) e o DRASTIC (*Depth to Water, Recharge, Aquifer Media, Soil Media, Topography, Impact of Vadose Zone, and Conductivity of Aquifer*). Ambas

são amplamente reconhecidas no campo da hidrogeologia e forneceram uma estrutura sistemática para a análise da vulnerabilidade aquífera. Essas metodologias consideraram a interação entre diversos parâmetros, proporcionando uma base sólida para a avaliação.

A integração de parâmetros geológicos, hidrogeológicos e pedológicos na análise comparativa permitiu o desenvolvimento de modelos de vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). A representação dos resultados dessas avaliações em mapas, produzidos em uma plataforma de Sistema de Informações Geográficas (SIG), facilitou a visualização e interpretação dos dados.

Uma análise comparativa entre os resultados obtidos pelas metodologias GOD e DRASTIC foi conduzida, visando avaliar a variabilidade de cada resultado obtido. Em conjunto, essa metodologia proporcionou uma abordagem bem estruturada para a avaliação da vulnerabilidade aquífera na área de estudo, fornecendo diretrizes importantes para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia aplicada na elaboração deste trabalho.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* OpenOffice.

1.5. Organização deste trabalho

No Capítulo 1 foi realizada a introdução do tema de pesquisa e seu estado da arte, apresentando também a relevância e a justificativa do estudo. Também foi estabelecida a meta a ser alcançada neste trabalho, bem como a descrição da metodologia a ser empregada para atingir os objetivos propostos.

Ao longo do Capítulo 2 foi contextualizada de forma mais aprofundada a área de estudo, incluindo informações sobre a geologia presente na região investigada. A compreensão da geologia local é essencial para a análise da vulnerabilidade do aquífero.

O Capítulo 3 envolve a realização de uma revisão bibliográfica, abordando estudos, pesquisas e trabalhos de autores relevantes que se concentraram nos tópicos relacionados à análise de vulnerabilidade de aquíferos e modelagem espacial. A revisão da literatura servirá como base teórica sólida para o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 4 são apresentadas as avaliações de vulnerabilidade dos aquíferos estudados. Os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia, como GOD e DRASTIC, serão detalhadamente descritos, analisados e posteriormente comparados. Esta seção demonstrará a aplicação prática dos métodos e as descobertas alcançadas.

Por fim, o Capítulo 5 engloba as considerações finais do trabalho, oferecendo sugestões para trabalhos futuros, apontando direções de pesquisa que podem se beneficiar das descobertas geradas no presente estudo.

2. APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

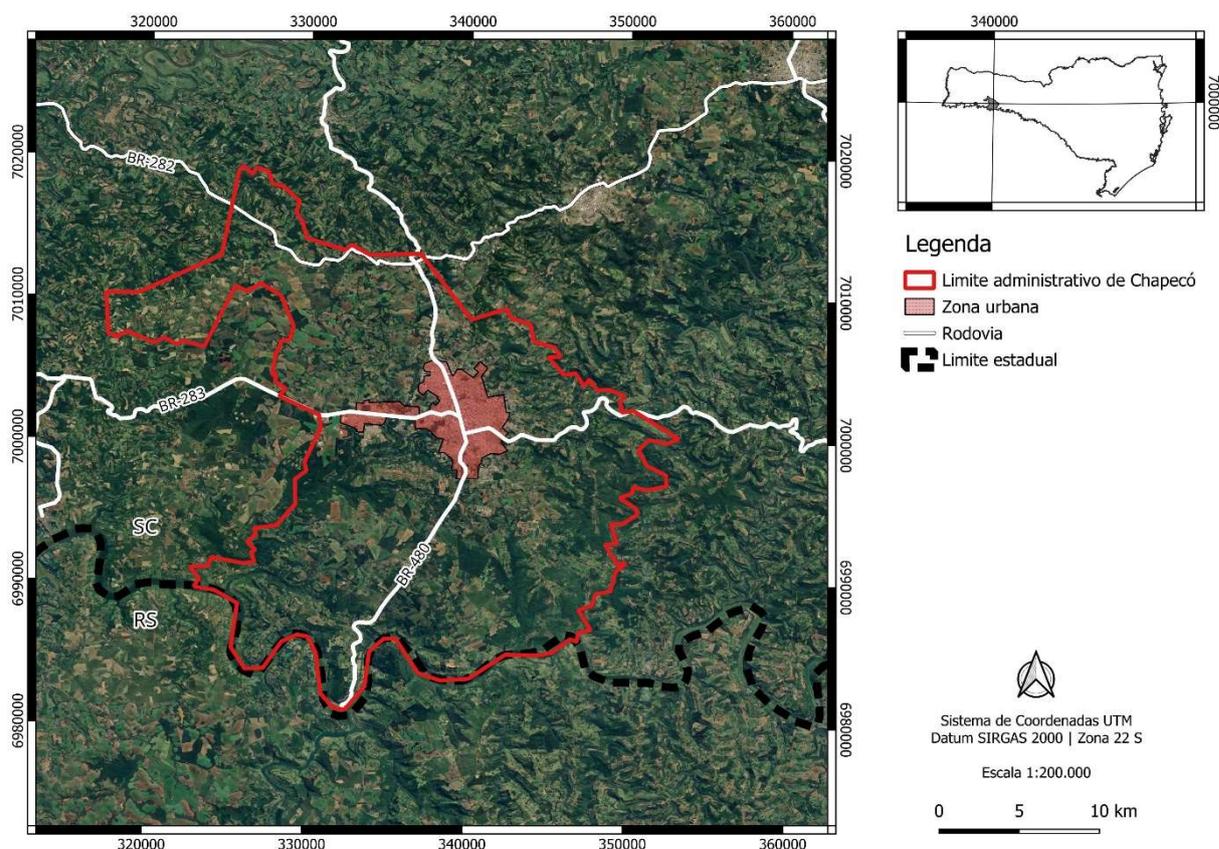
Neste capítulo, são apresentados os detalhes relacionados à localização da área de estudo, assim como os aspectos geológicos, hidrogeológicos e hidrológicos de importância para a análise da vulnerabilidade de aquíferos.

2.1. Localização da área de estudo

A área de estudo é o município de Chapecó, localizado na região oeste do estado de Santa Catarina, Brasil. Chapecó é um município de significativa importância na geografia catarinense e brasileira devido à sua localização estratégica e à sua relevante atividade econômica. Com coordenadas geográficas de aproximadamente 27° 06' de latitude sul e 52° 37' de longitude oeste, o município se estende por uma área territorial de aproximadamente 626,060 km², tornando-o um dos maiores municípios do estado de Santa Catarina (IBGE, 2022).

O município de Chapecó é acessível por diversas vias de transporte. A principal via de acesso é a rodovia BR-282, que conecta Chapecó a outras cidades e regiões do estado (Figura 2). Além disso, a cidade possui um aeroporto regional, o Aeroporto Serafim Enoss Bertaso, que oferece voos comerciais e facilita o acesso aéreo à região. Chapecó também é servida por rodovias estaduais e municipais que ligam a cidade a municípios vizinhos

Figura 2 – Mapa de localização e acesso ao município de Chapecó - SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de Google Earth Pro (2023) e Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2021).

Situado a cerca de 560 km a oeste da capital do estado, Florianópolis, Chapecó desempenha um papel vital na região, atuando como um centro industrial, agrícola e de serviços. A região é caracterizada por sua topografia plana e fértil, o que a torna propícia para atividades agropecuárias, especialmente a produção de grãos e a agroindústria. Além disso, o município abriga uma população residente de aproximadamente 254.781 habitantes, de acordo com IBGE (2022), e a cidade tem experimentado um crescimento constante em decorrência do desenvolvimento econômico e da expansão de suas atividades industriais e comerciais.

2.2. Contexto geológico regional

De acordo com o Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina (CPRM, 2014), o município de Chapecó encontra-se inserido em um contexto geológico situado na Bacia do Paraná, uma extensa área vulcano-sedimentar na América do Sul com aproximadamente 323,2 milhões de anos. Chapecó encontra-se sobre o Supergrupo São Bento, datado em torno de 145 milhões de anos. Contido no Supergrupo São Bento, está o Grupo Serra Geral (135 Ma), que

constitui uma das maiores províncias magmáticas da Terra, e compreende geograficamente a extensão da Formação Paranapanema, pertencente ao Cretáceo Inferior, e a Formação Chapecó, com uma idade estimada em $132,1 \pm 0,19$ milhões de anos segundo análises de datação Ar-Ar.

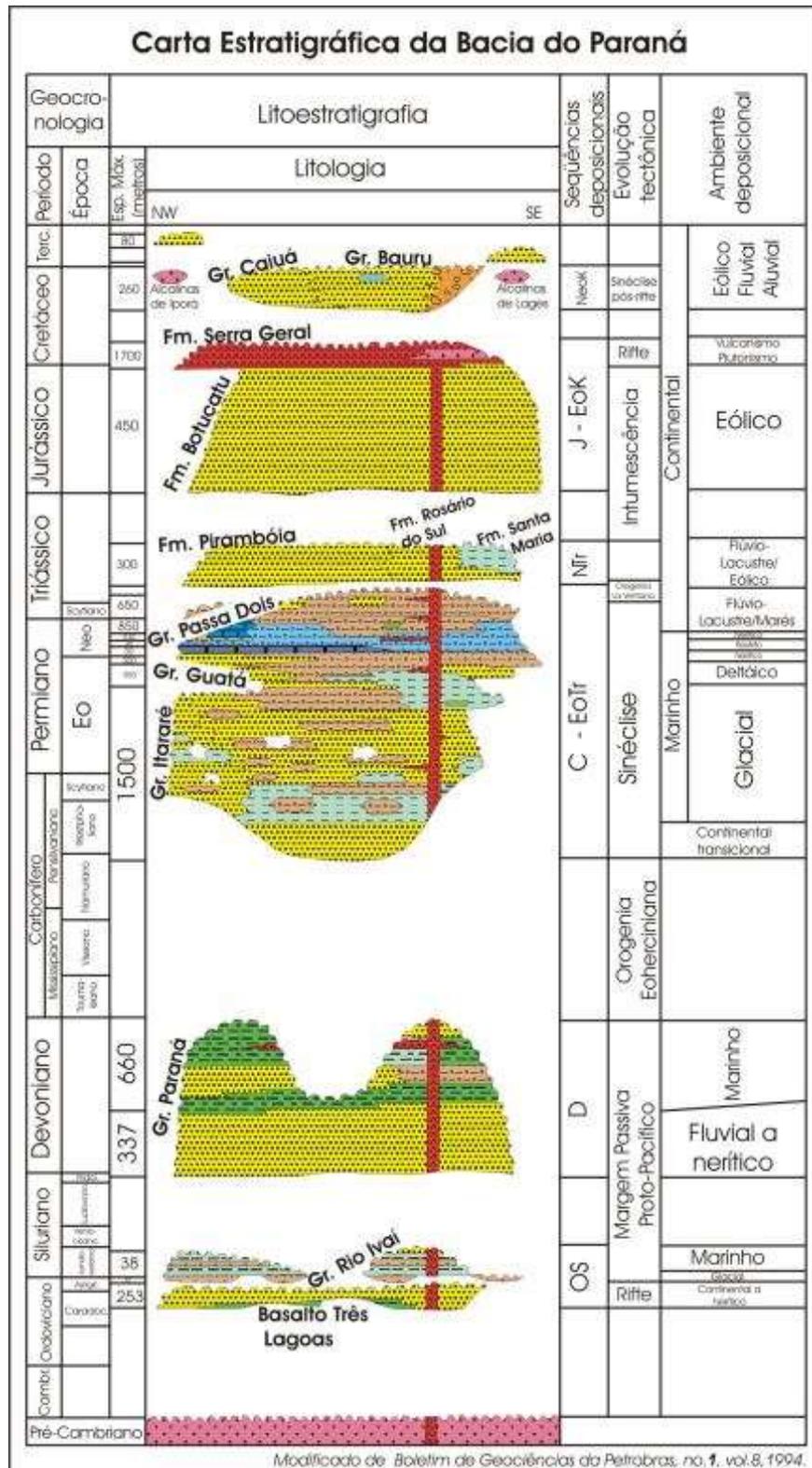
A Bacia do Paraná é caracterizada por uma complexa sucessão de camadas vulcano-sedimentares com idades abrangendo o intervalo do Neo-Ordoviciano ao Neocretáceo (Milani, 2004), englobando aproximadamente 385 milhões de anos de processos de sedimentação e vulcanismo (Wildner, 2004)

2.2.1. Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é uma ampla região vulcano-sedimentar do continente sul-americano que inclui porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai, totalizando uma área que se aproxima dos 1,5 milhão de quilômetros quadrados. A bacia tem uma forma ovalada com eixo maior N-S (Milani *et al.*, 2007).

De idade ordoviciana-cretácica, a Bacia do Paraná (Figura 3) compreende um pacote sedimentar-magmático com espessura máxima de 7 mil metros, delimitado por terrenos proterozoicos a neoproterozoicos como os crátons e faixas móveis, sendo que ao leste a bacia é limitada por uma região afetada pelos processos distensivos responsáveis pela abertura do Oceano Atlântico (Milani *et al.*, 2007).

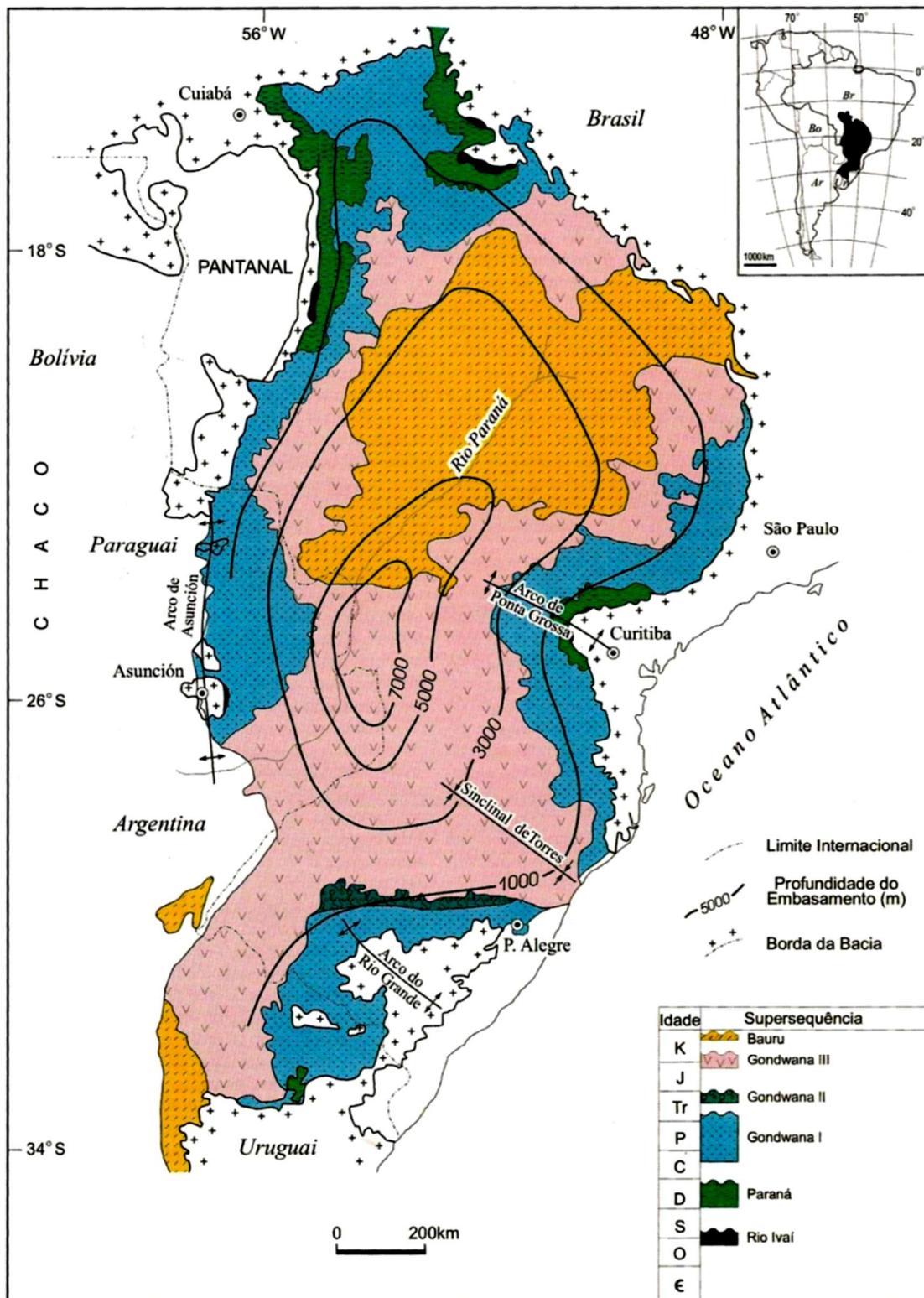
Figura 3 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná. O município de Chapecó – SC, área de estudo deste trabalho, está sobre o Supergrupo São Bento, que contém o Grupo Serra Geral, que por sua vez, compreende, entre outras, a Formação Paranapanema, pertencente ao Cretáceo Inferior, e a Formação Chapecó, com uma idade estimada em $132,1 \pm 0,19$ milhões de anos segundo análises de datação Ar-Ar.



Fonte: Bizzi *et al.* (2003).

Milani (1997) reconheceu no registro estratigráfico da Bacia do Paraná seis unidades de ampla escala, na forma de pacotes rochosos materializando cada um deles intervalos temporais com algumas dezenas de milhões de anos de duração e envelopados por superfícies de discordância de caráter inter-regional: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo), das mais antigas para as mais recentes, respectivamente (Figura 4).

Figura 4 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná com profundidade do embasamento e a distribuição no tempo das Superseqüências divididas por Milani (1997).

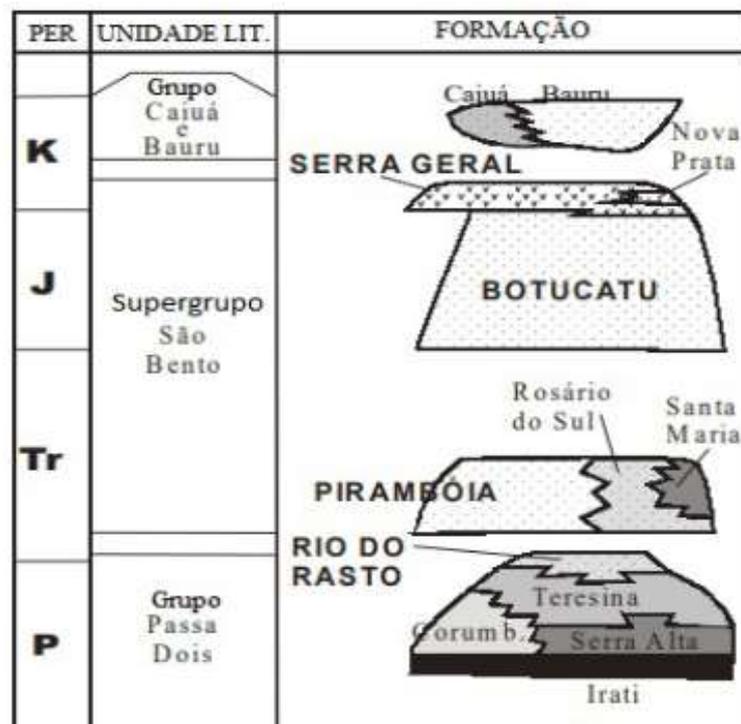


Fonte: Extraído de Milani (2004).

2.2.2. Supergrupo São Bento

Segundo Hartmann (2014), o Supergrupo São Bento (163,5 Ma), anteriormente designado Grupo São Bento, compreende o magmatismo fissural intracontinental, formador dos derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral (135 Ma) e a sedimentação eólica constituída pelas Formações Piramboia (Triássico Inferior) e Botucatu (163,5±1.0 Ma). A Figura 5 apresenta a coluna estratigráfica parcial da Bacia do Paraná.

Figura 5 - Coluna estratigráfica parcial da Bacia do Paraná.



Fonte: Modificado de Milani *et al.* (1994).

Wildner (2004) descreveu o vulcanismo do Grupo Serra Geral como a província magmática relacionada aos derrames e intrusões que recobrem uma área de $1,2 \times 10^6$ km² na Bacia do Paraná. Essa província, que alcança uma espessura máxima de aproximadamente 1.720 metros no centro da bacia, estende-se pela região centro-sul do Brasil e ao longo das fronteiras do Paraguai, Uruguai e Argentina (Wildner, 2004).

O magmatismo predominante é composto por basaltos e basalto-andesitos de filiação toleítica, com a presença de riolitos e riodacitos aflorantes nas regiões serranas dos estados do Rio Grande do Sul, entre as localidades de Palmas e Guarapuava (estados de Santa Catarina e Paraná), assim como na região fronteira do Uruguai. Esses riolitos e riodacitos caracterizam

um hiato praticamente completo de rochas com composições contendo entre 60-64% de SiO₂ (Wildner, 2004).

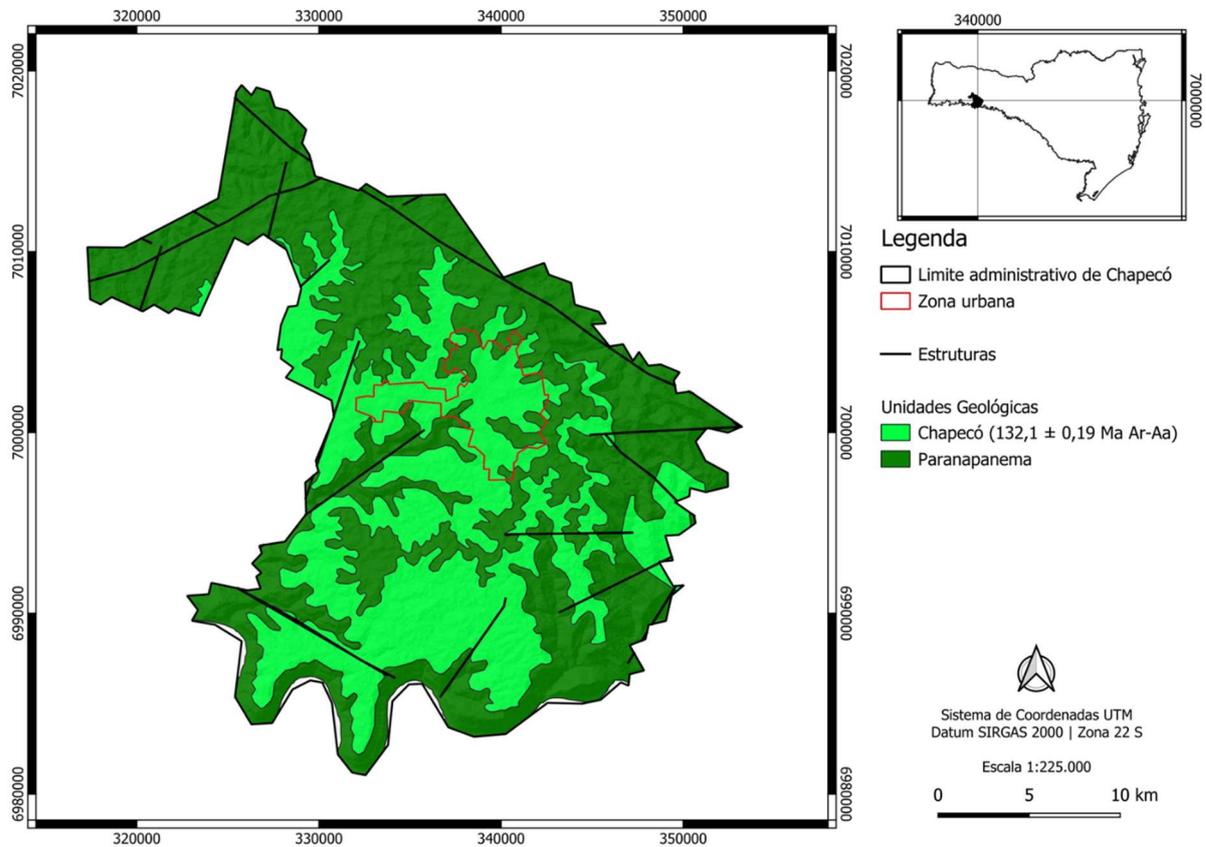
De acordo com Wildner *et al.* (2014), o Supergrupo São Bento engloba várias formações do Grupo Serra Geral, que incluem a Formação Gramado, Formação Paranapanema, Formação Campos Novos, Formação Chapecó, Formação Palmas, Formação Cordilheira Alta e Formação Campo Erê. Todas essas formações pertencem ao período Cretáceo Inferior.

2.3. Contexto geológico local

O município de Chapecó, objeto de estudo neste trabalho, encontra-se situado sobre duas Formações que compõem o Supergrupo São Bento (Figura 6). A Formação Paranapanema (Cretáceo Inferior), presente na área, é caracterizada por uma composição predominantemente de basaltos microgranulares, frequentemente exibindo descontinuidades com alterações de coloração para tons de vermelho a marrom e a presença de horizontes vesiculares consideráveis. Paralelamente, a Formação Chapecó (132,1±0,19 Ma), outra unidade geológica na região, é constituída por rochas ácidas que abrangem uma ampla gama de composições, variando de riolacitos a riolitos, com uma matriz de natureza vitrofírica e a presença de pórfiros de feldspato.

O trabalho de Zalán *et al.* (1990) fornece uma descrição dos principais elementos tectônicos da Bacia do Paraná. Eles identificam feições lineares que se interceptam e podem ser categorizadas em três grupos de acordo com suas orientações: NW-SE, NE-SW e E-W. As feições lineares mais significativas são aquelas com direções NW-SE e NE-SW, e elas podem representar tanto falhas simples quanto zonas de falhas extensas. Essas estruturas foram reativadas durante o processo de evolução da bacia.

Figura 6 - Mapa geológico do município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de Google Earth Pro (2023) e Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2021).

2.4. Contexto hidrogeológico

O município de Chapecó está localizado sobre a Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral, que abrange aproximadamente 49,73% da área do Estado de Santa Catarina (Figura 7).

Essa unidade é composta por uma variedade significativa de rochas vulcânicas de composição básica e ácida, formando a Serra Geral. Um aspecto de relevância hidrogeológica é que as litologias fraturadas presentes nessa unidade funcionam como aquíferos, além de atuarem como uma camada confinante para as Unidades Hidroestratigráficas Piramboia e Botucatu, que compõem o Sistema Aquífero Guarani (Machado, 2013).

Figura 7 - Mapa de localização da área de ocorrência da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral (em verde).



Fonte: Extraído e modificado de Machado (2013).

Do ponto de vista hidrogeológico, as rochas que compõem a Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral demonstram comportamento de aquíferos fraturados, onde tanto a condutividade hidráulica quanto a porosidade são predominantemente influenciadas por discontinuidades, como fraturamentos, a intercalação de zonas amidgdalóides, contatos entre derrames e leitos de paleosolos, ou mesmo áreas sujeitas a intenso intemperismo (Machado, 2013).

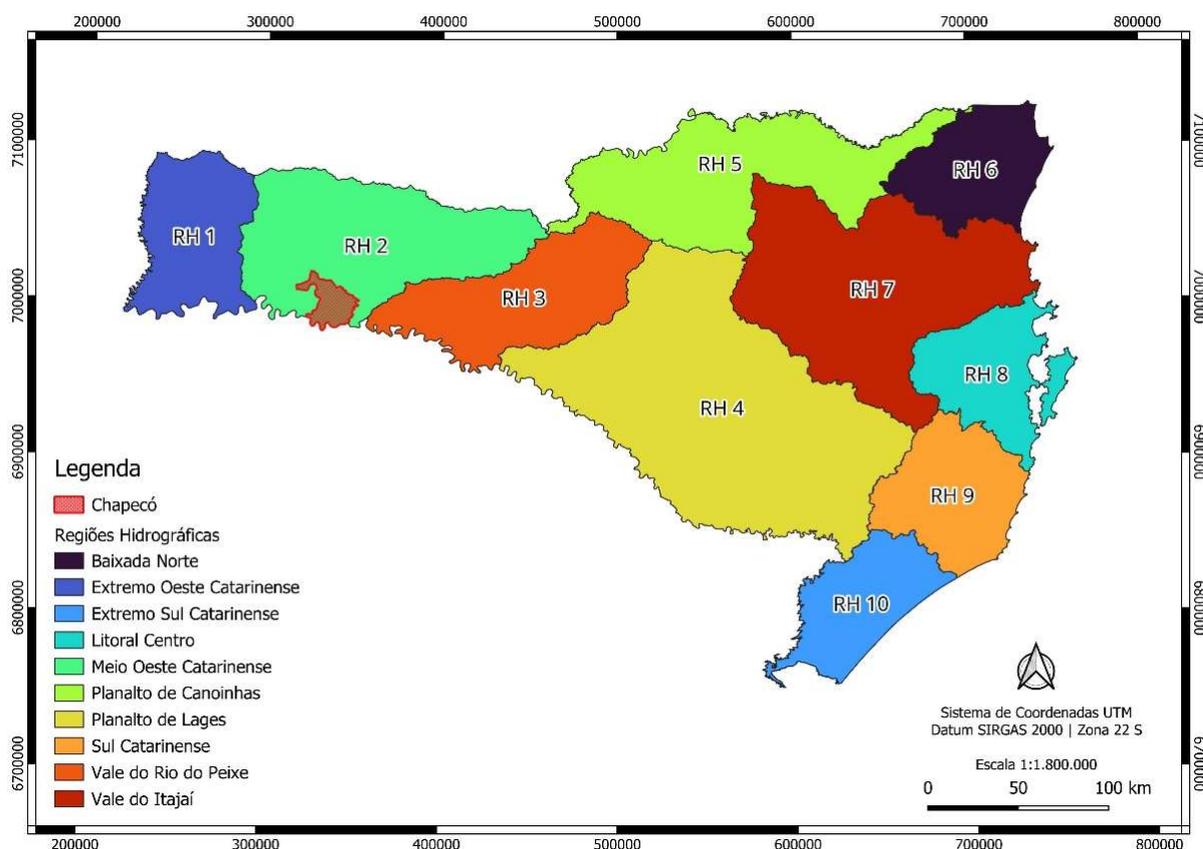
A condição de ocorrência da água subterrânea dentro desta unidade é inicialmente a de aquífero livre, pelo menos nas camadas superficiais, com potencial para evoluir para condições de aquífero confinado à medida que a profundidade aumenta. A hidrodinâmica apresenta uma notável variabilidade e está sujeita a influências de fatores topográficos, geomorfológicos e tectônicos. A condutividade hidráulica, como um parâmetro hidrodinâmico fundamental, exibe considerável variação e sua avaliação e previsão são complexas devido à natureza normalmente heterogênea e anisotrópica do meio. A expressão regional das propriedades hidrogeológicas da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral, tanto em termos de distribuição superficial quanto em

profundidade, bem como suas características de armazenamento e circulação de água, a tornam uma formação de considerável interesse social e econômico, embora não seja o aquífero com os maiores recursos de água subterrânea. Dada a quantidade significativa de poços perfurados, a relativa facilidade e eficiência na exploração e os volumes substanciais de água extraídos dessa unidade, ela pode ser considerada o aquífero mais relevante do Estado de Santa Catarina (Machado, 2013).

2.5. Contexto hidrológico

O município de Chapecó encontra-se situado na Região Hidrográfica do Meio Oeste (RH2), que se estende entre as coordenadas geográficas 26,341° Sul 51,392° Oeste e 27,284° Sul 53,182° Oeste (Figura 8).

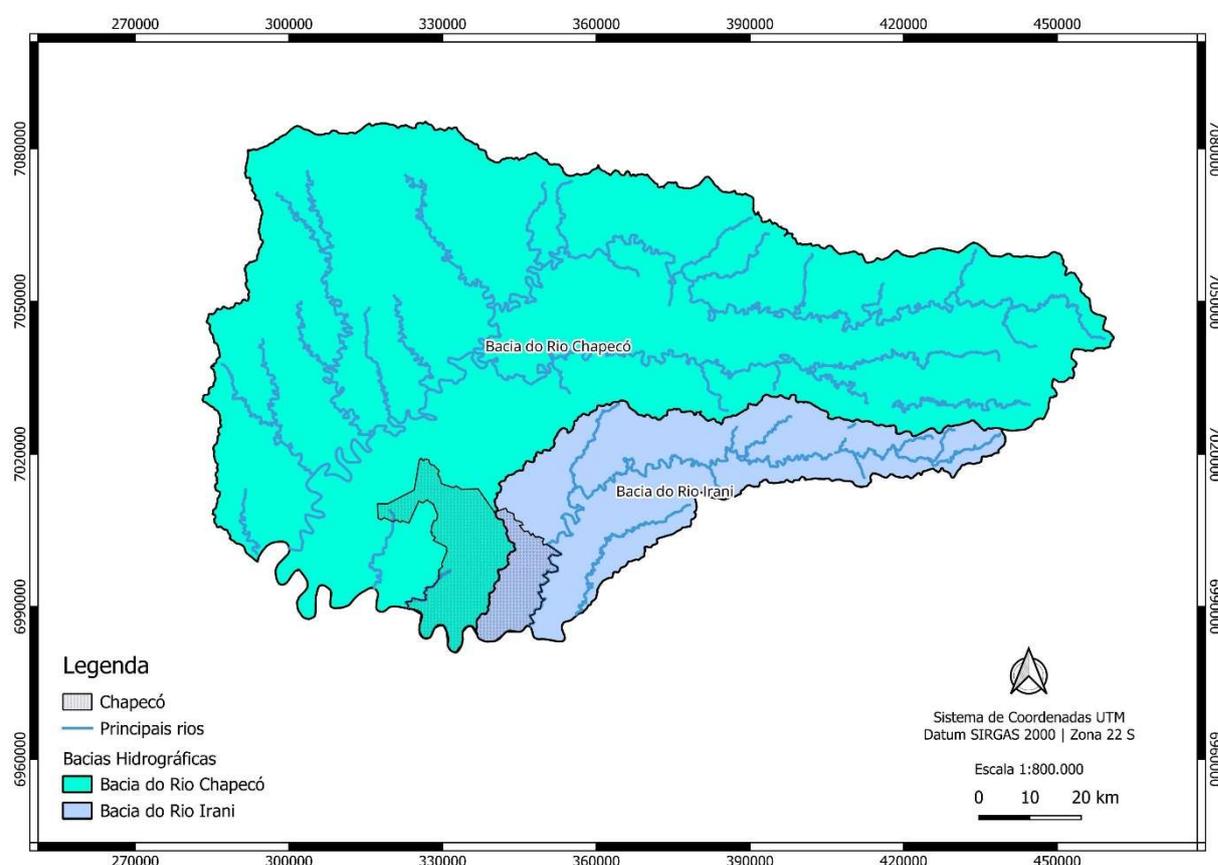
Figura 8 – Mapa das Regiões Hidrográficas do Estado de Santa Catarina, destaca-se o município de Chapecó.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de Google Earth Pro (2023) e Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2021).

A RH2 engloba uma área total de cerca de 10.784 km² e possui um perímetro de 911 km, abrangendo total ou parcialmente 59 municípios no estado de Santa Catarina. As informações sobre essa região hidrográfica são baseadas no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina (PERH/SC, 2017). Esta região hidrográfica abrange integralmente as bacias hidrográficas do Rio Chapecó e do Rio Irani (Figura 9). Essas duas bacias são subordinadas à bacia do rio Uruguai que incorpora além do Estado de Santa Catarina, o Rio Grande do Sul e os países vizinhos Argentina e Uruguai.

Figura 9 – Mapa das bacias hidrográficas que compõe a Região Hidrográfica do Meio Oeste (RH2), destaca-se o município de Chapecó.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de Google Earth Pro (2023) e Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2021).

O município de Chapecó abrange as duas bacias hidrográficas que compõem a Região Hidrográfica do Meio Oeste (RH2), como previamente mencionado. O Rio Chapecó, que faz parte dessa região hidrográfica, tem suas nascentes na divisa entre os estados de Santa Catarina e Paraná, no município de Água Doce, e deságua no Rio Uruguai, na divisa entre Santa Catarina e o Rio Grande do Sul, entre os municípios de São Carlos e Águas de Chapecó. Este rio, com

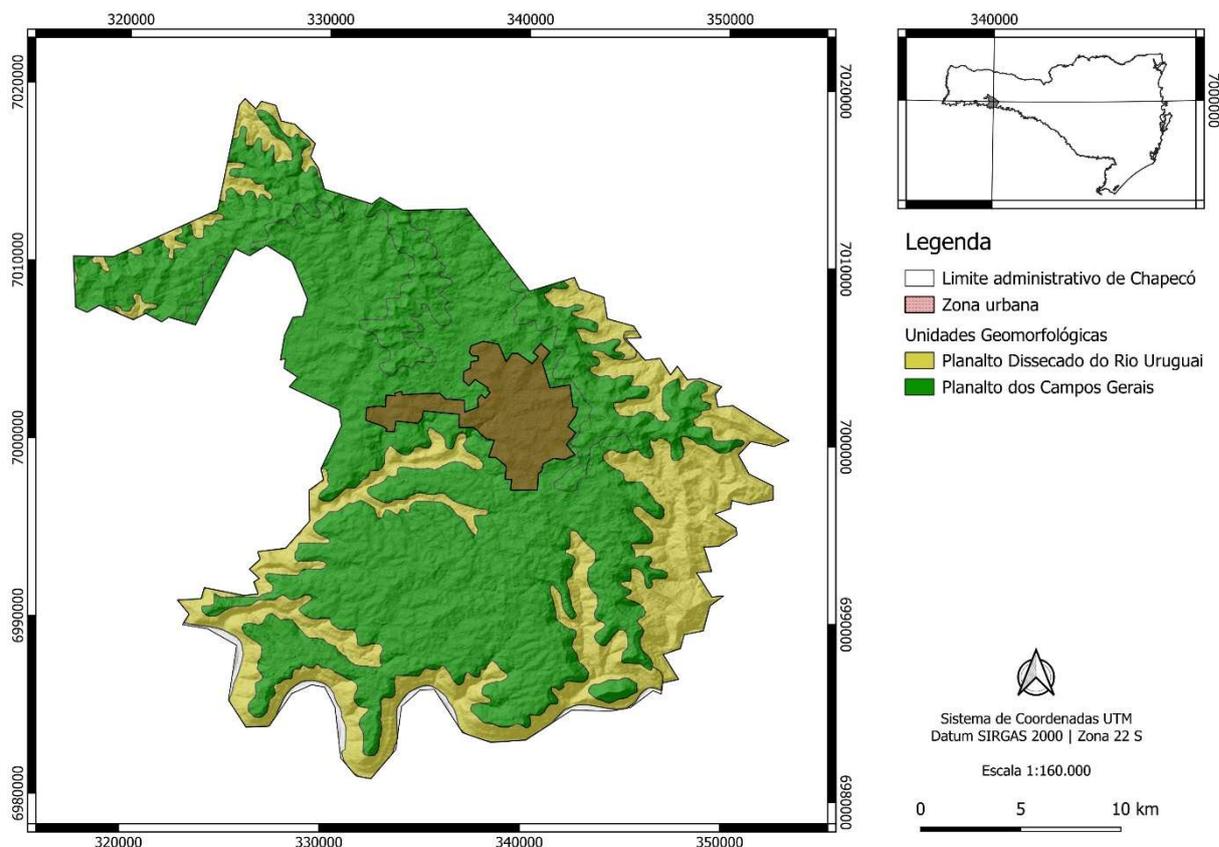
um comprimento total de 460 km, apresenta um curso sinuoso e recebe afluentes significativos, incluindo o Rio Chapecozinho, na margem esquerda, e os rios Feliciano, do Ouro, Santo Antônio do Pinhal, Pesqueiro e Saudade, na margem direita.

O Rio Irani, outra importante bacia da RH2, tem suas principais nascentes nos municípios de Água Doce e Vargem Bonita e deságua no Rio Uruguai, entre os municípios de Chapecó e Paial, na divisa entre Santa Catarina e o Rio Grande do Sul. Este rio, também caracterizado por seu curso sinuoso, possui um comprimento total de 236 km e é alimentado por afluentes notáveis, como os Rios Xanxerê e Bahia, na margem direita, e o Rio Bonito, na margem esquerda.

2.6. Contexto geomorfológico

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022) em seu "Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil", o município de Chapecó encontra-se inserido no contexto geográfico do Domínio das Bacias e Coberturas Sedimentares, que faz parte da Região Geomorfológica do Planalto das Araucárias. No âmbito desses compartimentos, é possível identificar duas unidades geomorfológicas que caracterizam a paisagem local. A primeira unidade corresponde ao Planalto Dissecado do Rio Iguaçu/Rio Uruguai, que se destaca por suas características topográficas, evidenciando a presença de vales e rios, o que resulta em um relevo notavelmente dissecado. A segunda unidade, por sua vez, é o Planalto dos Campos Gerais, que se caracteriza por uma topografia mais plana e suave quando comparada à unidade anterior (Figura 10).

Figura 10 - Mapa geomorfológico do município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de Google Earth Pro (2023) e Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2021).

2.6.1. Modelo Digital de Elevação

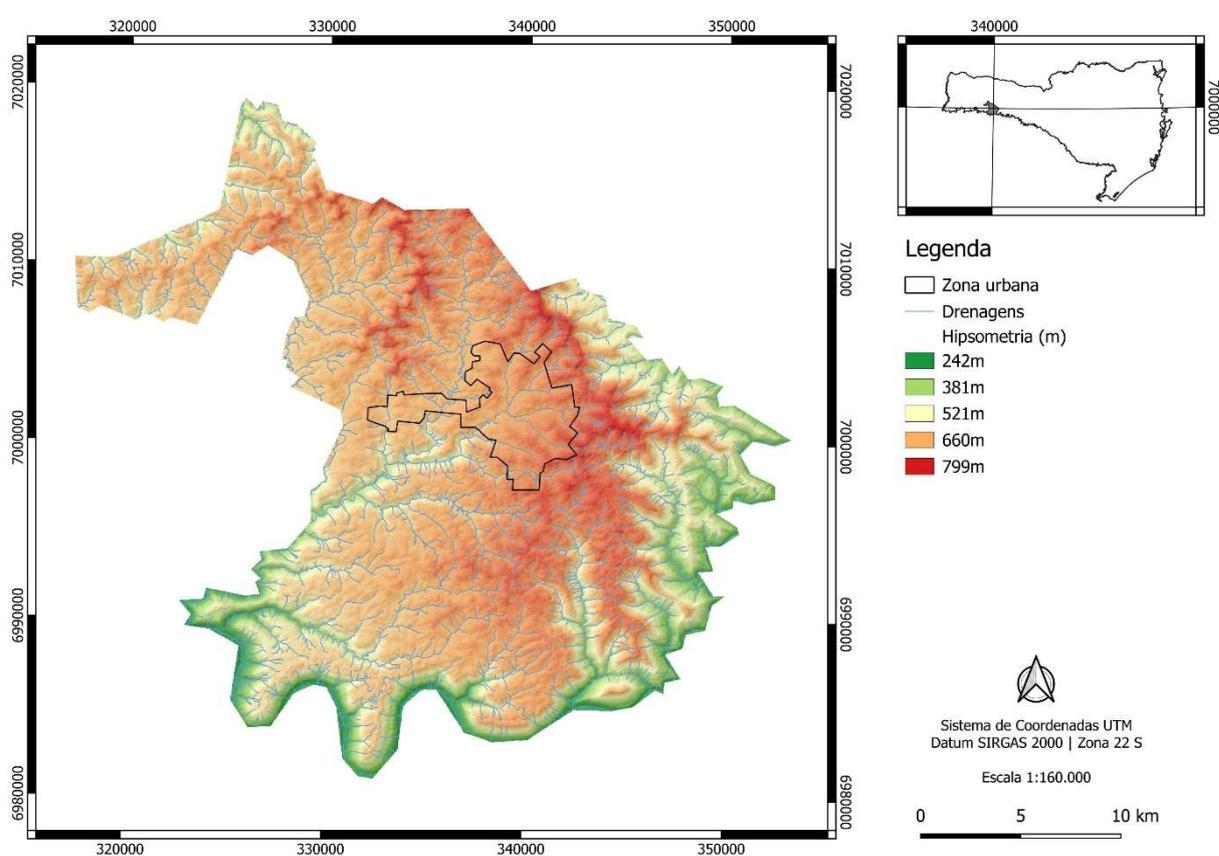
Conforme IBGE (2022), o Modelo Digital de Elevação (MDE) é definido como uma representação numérica do relevo da superfície terrestre, que registra as variações de altitude em um contexto geoespacial. Este modelo é gerado pela subdivisão da topografia em uma malha regular, onde cada célula ou pixel da malha contém dados relativos à elevação em relação a um datum de referência, geralmente o nível médio do mar.

As informações sobre a topografia do terreno foram extraídas das imagens do Satélite ALOS PALSAR para a elaboração do mapa hipsométrico. Isso foi feito utilizando técnicas de processamento de imagem e análise espacial para identificar as variações de altitude do terreno. O satélite ALOS PALSAR coletou imagens utilizando um radar de abertura sintética (SAR) que emite pulsos de micro-ondas e mede o tempo de retorno do sinal refletido pela superfície da Terra. As imagens obtidas possuem alta resolução espacial (12,5 metros x 12,5 metros) e são capazes de penetrar nuvens e obter informações sobre a topografia do terreno, mesmo em

condições climáticas adversas. O período de operação do ALOS PALSAR ocorreu entre 2006 e 2011, quando o satélite parou de funcionar devido a uma falha de comunicação com a equipe de controle.

Com as informações extraídas das imagens de satélite, foi possível integrá-las à plataforma de SIG para a criação do mapa hipsométrico. Isso incluiu a definição das classes de altitude, a simbologia para representar as variações de altitude e a adição de informações complementares (Figura 11).

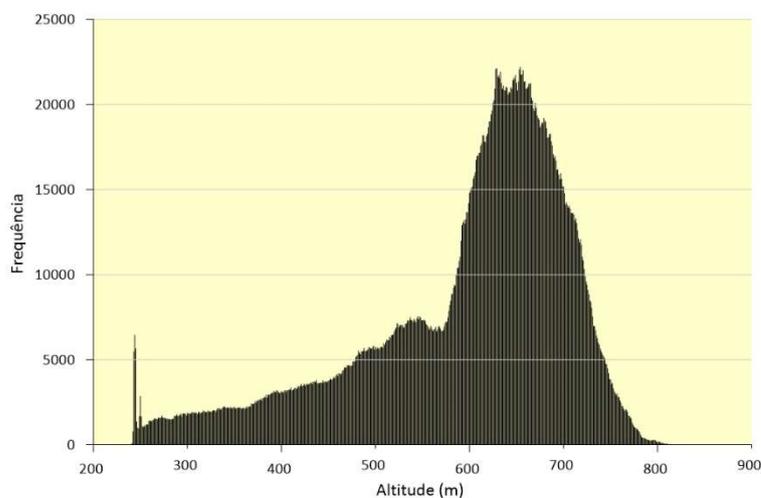
Figura 11 - Mapa hipsométrico do município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de ALOS PALSAR (2011).

O relevo do município de Chapecó exibe uma ampla variação altimétrica, com uma altitude média de cerca de 674 metros acima do nível do mar. As altitudes mais baixas, em torno de 238 metros, estão associadas à unidade geomorfológica do Planalto Dissecado do Rio Uruguai, enquanto as altitudes mais elevadas, aproximadamente 819 metros, são características da unidade geomorfológica do Planalto dos Campos Gerais. A Figura 12 apresenta o histograma da distribuição da altitude no território do município de Chapecó/SC.

Figura 12 - Histograma da distribuição da altitude no território do município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

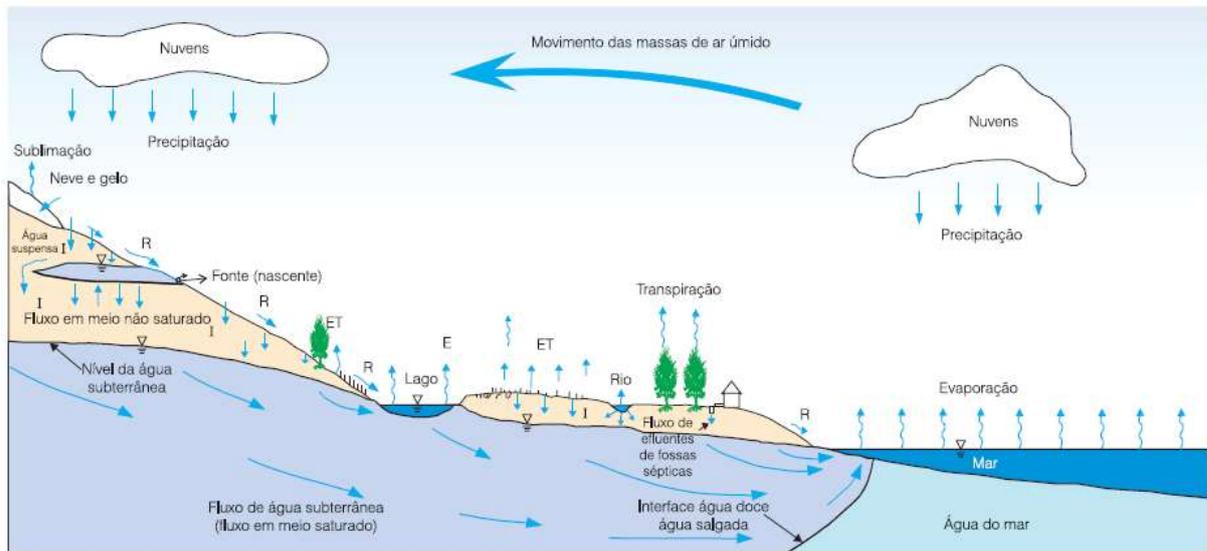
Nesta seção são fornecidas análises das pesquisas, estudos e metodologias relevantes no campo da avaliação de vulnerabilidade aquífera e modelagem espacial, servindo como base teórica de maneira a permitir uma compreensão aprofundada das práticas, teorias e abordagens mais atuais nesse domínio, preparando o cenário para as etapas subsequentes da pesquisa.

3.1. Definições gerais

Feitosa *et al.* (2008) define água subterrânea como aquela que ocorre abaixo do nível de saturação ou nível freático, presente nas formações geológicas aflorantes e parcialmente saturadas, e nas formações geológicas profundas totalmente saturadas.

Feitosa *et al.* (2008) afirmam que quase toda a água subterrânea existente na Terra, com exceção daquelas presas nos interstícios das rochas sedimentares por ocasião da sua formação, chamadas congênicas, tem origem no ciclo hidrológico, isto é, no sistema pelo qual a natureza faz a água circular do oceano para a atmosfera e daí para os continentes, de onde retorna, superficial e subterraneamente, ao oceano (Figura 13).

Figura 13 - Representação esquemática do ciclo hidrológico: E = evaporação; ET = evapotranspiração; I = infiltração; R = escoamento superficial (deflúvio).

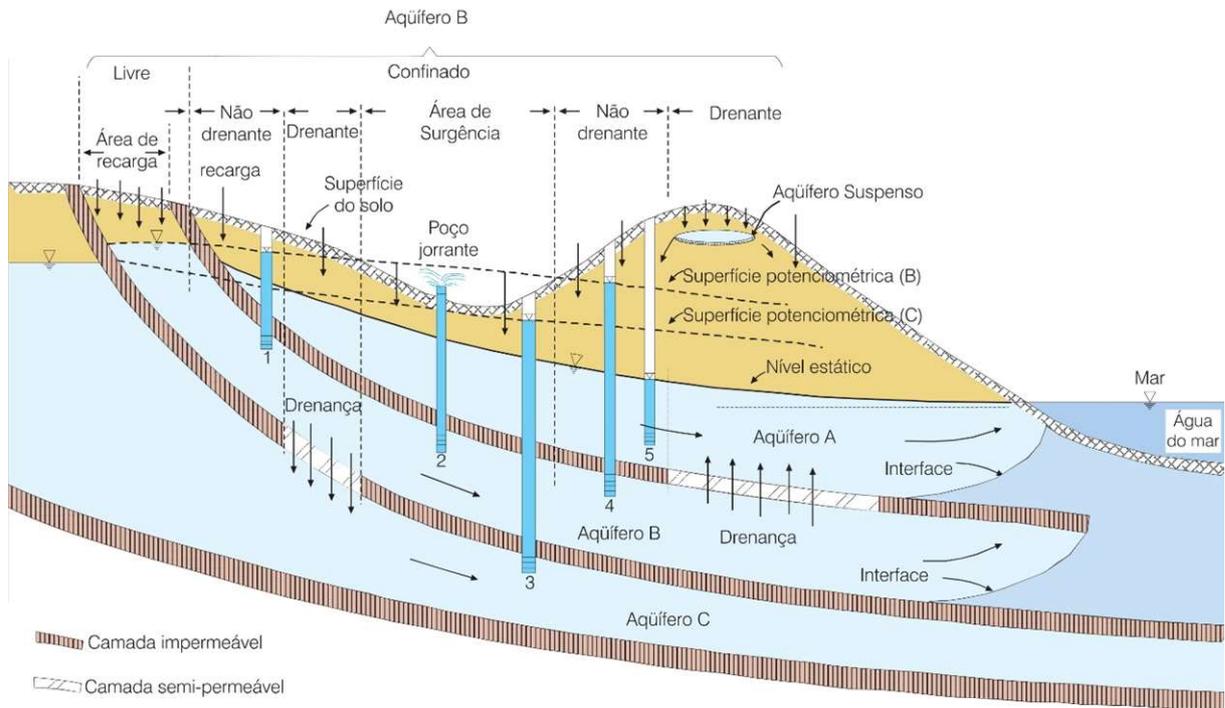


Fonte: Extraído de Feitosa *et al.* (2008).

3.2. Tipo de aquíferos

De acordo com Feitosa *et al.* (2008), os aquíferos podem ser classificados com base na pressão das águas em suas superfícies limitantes (superior, chamada topo, e inferior, chamada base) e também em relação à capacidade de transmissão de água dessas camadas limitantes específicas (a camada confinante superior do topo e a camada confinante inferior da base). A Figura 14 representa esquematicamente os tipos de aquíferos de acordo com Feitosa *et al.* (2008).

Figura 14 - Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos, de acordo com o sistema de pressão de suas águas e com a natureza das camadas que os delimitam no topo e na base.



Fonte: Extraído de Feitosa *et al.* (2008).

Conforme Feitosa *et al.* (2008), os aquíferos confinados, também denominados aquíferos sob pressão, são caracterizados pela pressão da água em sua parte superior que excede a pressão atmosférica. A classificação desses aquíferos está relacionada às propriedades das camadas limitantes, resultando em subdivisões entre confinados não drenantes e confinados drenantes.

Segundo Feitosa *et al.* (2008), os aquíferos livres, também conhecidos como aquíferos freáticos ou não confinados, são caracterizados pela presença de uma superfície de saturação como seu limite superior, onde a pressão da água encontra-se em equilíbrio com a pressão atmosférica. Esses aquíferos desempenham um papel fundamental nas áreas de recarga dos aquíferos confinados, permitindo a infiltração do excesso de água proveniente da chuva.

3.3. Tipos de aquíferos relacionados com as rochas armazenadoras

A hidrogeologia dos meios fissurados tem sua principal aplicação no domínio das rochas ígneas e metamórficas, genericamente designadas como cristalino. Nesse domínio, a matriz do maciço rochoso é caracterizada pela inexistência ou presença muito reduzida de espaços

intergranulares na rocha. Nesse meio, a água encontra-se em espaços representados por fissuras ou fraturas, juntas ou, ainda, em falhas e, em casos particulares, em vesículas, aberturas de dissolução, zonas de decomposição, dentre outros (Feitosa *et al.*, 2008).

Os aquíferos porosos, aqueles que são encontrados em rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados e solos arenosos decompostos *in situ* são reconhecidos por armazenar grandes volumes de água e por sua ampla distribuição geográfica. São particularmente importantes por ocorrerem em bacias sedimentares e áreas de acumulação de sedimentos arenosos, abrangendo vastas extensões. Uma característica notável desses aquíferos é a homogênea distribuição de sua porosidade (isotropia), o que permite que a água flua em diversas direções devido às diferenças na pressão hidrostática (Feitosa *et al.*, 2008).

Os aquíferos cársticos são distintos pela sua formação em rochas carbonáticas e representam um tipo peculiar de aquífero fraturado. O armazenamento e movimentação das águas subterrâneas nesses aquíferos são fortemente influenciados pela dissolução irregular e a presença de fraturas e outras descontinuidades nas rochas carbonáticas, que às vezes podem ser desafiadoras de identificar (Feitosa *et al.*, 2008).

3.4. Contaminação das águas subterrâneas

Segundo Feitosa *et al.* (2008), as origens da contaminação das águas subterrâneas são diversas e frequentemente associadas a atividades industriais, domésticas e agrícolas. No âmbito industrial, a contaminação subterrânea pode ser causada por descargas de águas com compostos químicos, metais, alta temperatura e elementos radioativos, bem como pela infiltração de chorumes provenientes de aterros sanitários, lixões e incidentes com produtos químicos. As atividades domésticas contribuem para a contaminação subterrânea por meio de chorumes provenientes de aterros sanitários e lixões, além de acidentes envolvendo fossas sépticas e redes de esgotos. No setor agrícola, a contaminação subterrânea ocorre quando solutos dissolvidos são transportados por chuva ou irrigação, e o uso de fertilizantes minerais, sais, herbicidas e pesticidas contribui para essa problemática.

As fontes de contaminação da água subterrânea podem ser classificadas com base em várias categorias, conforme definido pelo *Office of Technology Assessment* (OTA) dos Estados Unidos e modificado por Fetter (1993). Dentre essas categorias, podemos identificar:

(a) fontes projetadas para recepção de substâncias, como fossas sépticas, poços de injeção e aplicações no solo (fertilizantes) que podem originar nitrogênio, fósforo e metais pesados na contaminação das águas subterrâneas;

(b) fontes projetadas para armazenar, tratar ou receber substâncias, incluindo aterros sanitários, valas clandestinas, resíduos de mineração e vazamentos em tanques de armazenamento, que podem liberar materiais tóxicos e resíduos perigosos no aquífero;

(c) fontes projetadas para reter substâncias durante o transporte, como vazamentos em oleodutos, gasodutos, esgotos, acidentes com caminhões e trens que conduzem produtos químicos;

(d) fontes produtoras de substâncias devido a outras atividades, como irrigação, aplicação de pesticidas e fertilizantes, *run-off* urbano, percolação de poluentes atmosféricos que introduzem poluentes diversos nas águas subterrâneas;

(e) fontes que podem atuar como condutoras da água contaminada, como poços produtores, poços mal construídos, poços escavados e abandonados, que podem servir como vias de contaminação entre aquíferos;

(f) fontes naturais cuja descarga é criada pela atividade humana, como as interações entre água superficial e subterrânea, lixiviação natural de minerais, e intrusão de água do mar em aquíferos costeiros.

3.5. Vulnerabilidade à poluição de aquíferos

De acordo com Feitosa *et al.* (2008), nas últimas duas décadas, a crescente preocupação com a degradação dos recursos hídricos subterrâneos tem levado à implementação de programas de proteção e remediação de aquíferos, devido à maior dependência dessas águas para o abastecimento público e atividades econômicas. A conscientização sobre as limitações técnicas, econômicas e de recursos humanos para a remediação tem favorecido a ênfase na proteção dos aquíferos, impulsionando o desenvolvimento de técnicas de mapeamento de vulnerabilidade à contaminação para harmonizar atividades humanas com a capacidade ambiental.

No que se refere ao conceito de vulnerabilidade, ele tem sido amplamente adotado por hidrogeólogos e gestores de recursos hídricos, assumindo diferentes significados.

Pode representar a suscetibilidade intrínseca do meio aquífero em ser impactado negativamente por poluentes de origem humana (Feitosa *et al.*, 2008).

Além disso, pode expressar a importância socioeconômica do recurso hídrico tanto no presente quanto no futuro, considerando a possibilidade de ser substituído por fontes alternativas. A avaliação da vulnerabilidade leva em conta a disponibilidade de alternativas, com análises dos custos sociais e econômicos associados aos programas de tratamento de aquíferos e à busca de fontes alternativas (Hirata, 1994). Adicionalmente, a importância do aquífero na manutenção de áreas ecologicamente sensíveis também pode influenciar a classificação de sua vulnerabilidade (Canter *et al.*, 1987).

Nos Estados Unidos, por exemplo, os aquíferos são classificados em diferentes níveis de vulnerabilidade, relacionados às características hidráulicas, à dificuldade de substituição por fontes alternativas e ao papel ecológico vital que desempenham em sistemas frágeis (Canter *et al.*, 1987).

A atribuição de adjetivos ao termo "vulnerabilidade" resulta em diferentes expressões com significados específicos, conforme demonstrado no quadro a seguir:

Tabela 1 – O termo "vulnerabilidade" acompanhado de diferentes adjetivos resulta em diferentes expressões com significados específicos.

Expressão	Significado
Vulnerabilidade Relativa	As unidades de um mapa de vulnerabilidade são classificadas uma com relação à outra e não possuem significado absoluto.
Vulnerabilidade Absoluta	Cada unidade mapeada possui um significado em si, ou seja, cada índice de vulnerabilidade seria associado à capacidade de degradação de um contaminante ou grupo de contaminantes.
Vulnerabilidade Geral	Dirige-se a todas as atividades ou classes de contaminantes.
Vulnerabilidade Específica	Volta-se a um certo contaminante ou ainda atividade ou classe de contaminantes.

Fonte: Modificado de Feitosa *et al.*, 2008.

O uso de um índice relativo, embora mais simples e, em certa medida, mais confiável, apresenta desafios práticos em sua aplicação, como a compatibilização de mapas gerados em diferentes etapas ou por meio de métodos distintos. Além disso, gestores ambientais enfrentam

dificuldades ao determinar os usos do terreno em relação à vulnerabilidade relativa. Nesse contexto, estudos como os de Foster (1988) e Foster *et al.* (2002) propõem uma definição prática de classes de vulnerabilidade absoluta, conforme detalhado no quadro a seguir.

Tabela 2 - Classes de vulnerabilidade absoluta de aquíferos à contaminação segundo Foster *et al.*, 2002.

Classes de Vulnerabilidade	Definição Prática	Exemplos de compostos contaminante
Extrema	Vulnerabilidade a muitos poluentes, incluindo os rapidamente degradáveis em muitos cenários de contaminação	
Alta	Vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles muito pouco móveis e pouco persistentes	
Moderada	Vulnerável a alguns poluentes, e somente quando continuamente lançados	
Baixa	Somente vulnerável a contaminantes conservativos em longo prazo, quando continuamente e amplamente lançados	
Negligenciável	Não vulnerável, exceto em locais restritos que permitam o fluxo vertical	

- Pesticidas catiônicos, metais pesados não associados à elevada carga orgânica ou em condições de pH e Eh extremados;
- Bactérias e vírus e compostos aromáticos;
- Hidrocarbonetos clorados e não-clorados;
- Sais e nitratos;
- Sais e nitrato quando hidraulicamente possível.

Fonte: Modificado de Feitosa *et al.*, 2008.

3.6. Métodos de Cartografia da Vulnerabilidade

Os métodos de avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação desempenham um papel fundamental na proteção dos recursos hídricos subterrâneos. Diversos estudos e especialistas (Albinet & Margat, 1970; Haertlé, 1983; Aller *et al.*, 1987; Foster & Hirata, 1988; Hirata *et al.*, 1991) sugerem a utilização de sistemas menos detalhados e mais generalistas, como a criação de mapas de vulnerabilidade abrangentes que consideram todos os tipos de contaminantes. Esses métodos possuem a vantagem de poder incorporar dados

qualitativos, permitindo a análise de intervalos amplos de valores. Essa abordagem se mostra particularmente útil em áreas onde os dados hidrogeológicos e físico-químicos são limitados.

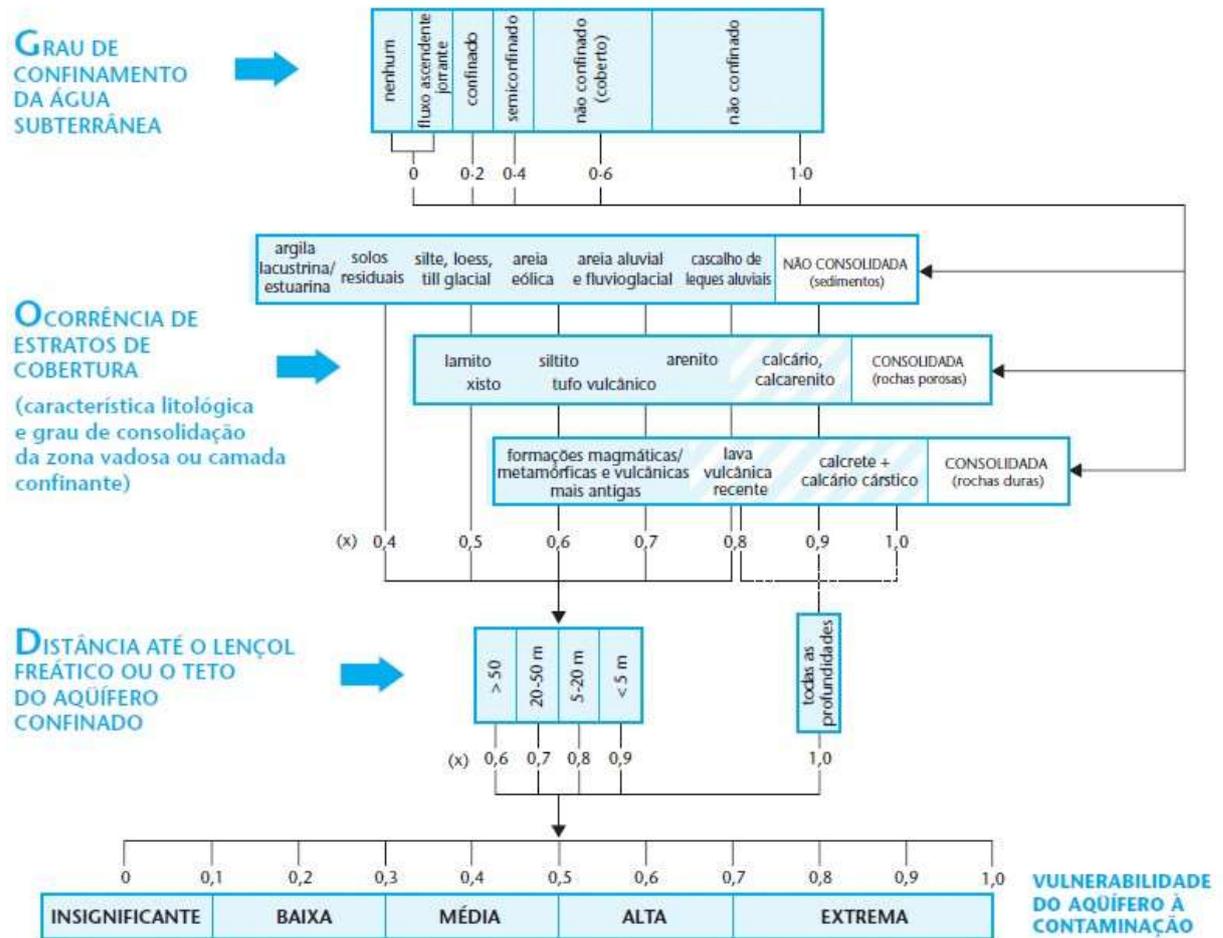
Esses métodos são mais adequados para avaliações em larga escala, em nível regional, onde é necessário analisar um grande número de atividades potencialmente contaminantes com um conjunto limitado de informações. Dessa forma, eles conseguem superar as limitações relacionadas à falta de dados detalhados e à complexidade geológica, proporcionando uma visão mais geral e homogênea em termos geográficos.

3.7. Método GOD

O método GOD (Foster & Hirata, 1988) tem sido uma das técnicas para determinação de vulnerabilidade mais utilizadas na América Latina e Caribe durante os anos 90, por causa de sua simplicidade de conceitos e aplicação. As informações necessárias à aplicação deste método são disponíveis em estudos básicos de hidrogeologia regional.

A sua denominação é um acrônimo dos três seguintes fatores, em inglês: confinamento do aquífero (*Groundwater hydraulic confinement*), o qual pode ser classificado em não confinado, não confinado com cobertura, semiconfinado, confinado e jorrante; natureza composicional da zona não saturada e/ou aquífero e seu grau de fraturamento (*Overlying strata*); e profundidade do nível d'água ou da base da camada confinante do aquífero (*Depth to groundwater table*). Para cada um destes fatores existe uma gradação de 0 ou 0,4 a 1,0, que, multiplicados entre si, definem o grau de vulnerabilidade do aquífero, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - O método de vulnerabilidade GOD.



Fonte: Modificado de Foster & Hirata (1988).

3.8. Método DRASTIC

Segundo Feitosa *et al.* (2008), o método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) é amplamente reconhecido como o método mais popular para a cartografia de vulnerabilidade na Europa e nos Estados Unidos.

Este método baseia-se na criação de um índice relativo de vulnerabilidade, que é calculado por meio da soma ponderada de sete parâmetros distintos. Esses parâmetros incluem a profundidade do nível de água, recarga natural, características do meio aquífero, tipo de solo, topografia (declividade), zona vadosa e condutividade hidráulica da zona saturada.

Os parâmetros considerados no método DRASTIC são incorporados a um esquema de ponderação aritmética, que é automatizado em ambiente SIG e tem como principal produto o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação do meio físico na região de interesse. A

somatória ponderada DRASTIC é representada pela fórmula a seguir, onde p é o peso por parâmetro e i é o índice de cada parâmetro.

$$DRASTIC = Dp \times Di + Rp \times Ri + Ap \times Ai + Sp \times Si + Tp \times Ti + Ip \times Ii + Cp \times Ci$$

Neste cálculo cada parâmetro é dividido em subclasses que representam aspectos da hidrogeologia local, às quais se atribui um índice (i) que varia de 1 a 10 que, em seguida, são multiplicados pelo peso (p) de cada parâmetro correspondente.

3.8.1. Parâmetro D

A Profundidade do nível de água (Tabela 3) no aquífero representa a espessura de material consolidado (solo e zona vadosa) que um potencial contaminante inserido na superfície do terreno terá que percorrer até atingir o lençol freático. Profundidades maiores acarretam em maiores tempos de trânsito para um contaminante atingir o aquífero, possibilitando a ocorrência de processos de atenuação natural, enquanto pequenas profundidades demandam tempos de trânsito baixos, possibilitando ao contaminante atingir a zona saturada do aquífero rapidamente.

Tabela 3 - Valores dos índices do parâmetro D.

Profundidade (m)	< 1,5	1,5-4,6	4,6-9,1	9,1-15,2	15,2-22,9	22,9-30,5	> 30,5
Índice	10	9	7	5	3	2	1

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice. Modificado de Aller *et al.* (1987).

3.8.2. Parâmetro R

A Recarga (Tabela 4) refere-se à quantidade de água pluvial que infiltra na superfície do terreno e atravessa a zona vadosa, alcançando o lençol freático. Sua importância está associada ao potencial de transporte de contaminantes por fluxo vertical. Quanto maior a quantidade de água, maiores quantidades de contaminantes podem ser transportadas e com maior velocidade em direção à zona saturada do aquífero.

Tabela 4 - Valores dos índices do parâmetro R.

Recarga (mm/ano)	< 51	51-102	102-178	178-254	> 254
Índice	1	3	6	8	9

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice. Modificado de Aller *et al.* (1987).

3.8.3. Parâmetro A

O parâmetro material do aquífero (Tabela 5) faz referência à influência das características dos aquíferos na mobilidade de contaminantes no meio físico, sobretudo em relação à composição morfo-granulométrica, textura e permeabilidade. Em aquíferos menos favoráveis ao deslocamento dos contaminantes, há maior potencial de retenção física e potencial de ocorrência de reações físico-químicas, o que aumenta seu tempo de trânsito e pode favorecer processos de atenuação natural.

Tabela 5 - Valores dos índices do parâmetro A.

Natureza do Aquífero	Índice
Xisto argiloso	1-3
Rocha metamórfica/ígnea	2-5
Rocha metamórfica/ígnea alterada	3-5
Till glacial	4-6
Arenito, calcário e argilito estratificados	5-9
Arenito maciço	4-9
Calcário maciço	4-9
Areia e cascalho	4-9
Basalto	2-10
Calcário carstificado	9-10

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice. Modificado de Aller *et al.* (1987).

3.8.4. Parâmetro S

O tipo de solo (Tabela 6) influencia a hidrodinâmica local de modo semelhante ao material do aquífero, entretanto, trata-se aqui do solo agrícola acima da zona vadosa. Para ponderação dos índices, são consideradas as quatro principais características do solo que condicionam a mobilidade de contaminantes no meio: espessura; textura; expansibilidade e teor de matéria orgânica (Aller *et al.*, 1987). Assim, solos mais arenosos tendem a ter maior vulnerabilidade do que solos mais argilosos, dado que grandes volumes de água contaminada podem migrar livremente em curtos períodos de tempo pelos espaços vazios interconectados.

Tabela 6 - Valores dos índices do parâmetro S.

Tipos de Solo	Índice
Pouco espesso ou ausente	10
Cascalho	10
Areia	9
Turfa	8
Argila expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
Argila orgânica	2
Argila não-expansível	1

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice. Modificado de Aller *et al.* (1987).

3.8.5. Parâmetro T

O parâmetro Topografia remete à declividade do terreno na área estudada no que concerne à mobilidade hídrica na superfície do terreno, diferenciando o potencial de escoamento superficial ou de infiltração. Menores declividades resultam em movimentação lenta da água, favorecendo a infiltração da água e contaminantes potenciais no solo. Em áreas de altas declividades, há predominância de fluxo superficial e velocidades altas do fluxo da água, desfavorecendo a infiltração no solo, mas possibilitando a ocorrência de processos erosivos agressivos do solo, que podem resultar em sulcos, ravinas e voçorocas (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores dos índices do parâmetro T.

Topografia (Declividade em %)	Índice
<2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice. Modificado de Aller *et al.* (1987).

3.8.6. Parâmetro I

A Zona Vadosa (Tabela 8) corresponde à área não saturada acima da zona saturada do aquífero, incluindo o nível d'água do lençol freático intermitente. Após ser introduzido na superfície e infiltrar no solo, o contaminante migra verticalmente pela zona vadosa até alcançar o aquífero. As configurações hidrogeológicas da zona vadosa determinam o tempo de contato do contaminante com o meio físico durante esta movimentação.

Tabela 8 - Valores dos índices do parâmetro I.

Influência da Zona Vadosa	Índice
Camada confinante	1
Argila/Silte	2-6
Xisto argiloso, argilito	2-5
Calcário	2-7
Arenito	4-8
Arenito, calcário e argilito estratificados	4-8
Areia e cascalho com % significativa de silte e argila	4-8
Rocha metamórfica/Ígnea	2-8
Areia e cascalho	6-9
Basalto	2-10
Calcário carstificado	8-10

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice. Modificado de Aller *et al.* (1987).

3.8.7. Parâmetro C

A Condutividade Hidráulica (Tabela 9) é o parâmetro que representa a facilidade ou dificuldade de movimentação da água nos poros, fraturas e cavidades na zona saturada do aquífero. Quanto mais espaços vazios interconectados presentes na formação aquífera, maior a disponibilidade de possíveis caminhos para água e, portanto, maior a facilidade de movimentação do contaminante pelo aquífero.

Tabela 9 - Valores dos índices do parâmetro C.

Condutividade Hidráulica (m/dia)	Índice
<4,1	1

4,1 - 12,2	2
12,2 - 28,5	4
28,5 - 40,7	6
40,7 - 81,5	8
> 81,5	10

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice. Modificado de Aller *et al.* (1987).

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através da aplicação das metodologias anteriormente descritas.

4.1. Banco de dados

O banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) é um conjunto de informações sobre as características hidrogeológicas do território brasileiro, como a localização, as propriedades físicas e químicas e a qualidade da água subterrânea. O banco de dados é gerenciado pelo Serviço Geológico do Brasil (SBG) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), e disponibiliza informações relevantes para a gestão e o monitoramento das águas subterrâneas do país.

Ao início da implementação da metodologia proposta, foi criada uma tabela de trabalho no *software* LibreOffice. O cabeçalho dessa tabela inclui as seguintes informações: Código do Poço, Cota (m), UTM E (m) e UTM N (m) no *Datum* SIRGAS 2000 zona 22 S, Natureza do Poço Tubular, Diâmetro do Poço Tubular, Profundidade (m), Condição de Confinamento, Profundidade, Formação Geológica, Surgência, Nível Dinâmico, Nível Estático, Vazão Específica e Vazão de Estabilização. Durante o processo de coleta e organização dos dados, informações adicionais foram incorporadas à tabela sempre que disponíveis no portal SIAGAS e acessíveis através da busca pelo código de cadastro específico associado a poços individuais, afim de aprimorar a compreensão e análise dos dados no âmbito da metodologia proposta.

O conjunto inicial de dados era composto por 380 entradas. Inicialmente, realizou-se uma filtragem na coluna do parâmetro "natureza da ocorrência de água subterrânea", que continha quatro categorias de ocorrências registradas, sendo 8 classificadas como "fonte natural", 11 como "nascente", 7 como "poço escavado" e 354 como "poço tubular". Após a

filtragem, as entradas de dados relativas à fonte natural, nascente e poço escavado foram excluídas, pois essas categorias de ocorrência de água se relacionam com o fluxo de água superficial ou o fluxo de água em meio não saturado. Visto que as metodologias que serão empregadas neste trabalho se relacionam com a vulnerabilidade à poluição de aquíferos, foram mantidas no banco de dados apenas as ocorrências registradas como "poço tubular", totalizando 354 entradas de dados.

Posteriormente, foram identificadas 49 entradas de dados que não continham informações na coluna "Nível Estático" e, portanto, foram removidas do conjunto de dados. Resultando, assim, em uma contagem total de 305 dados após a exclusão dessas entradas vazias de dados.

Por último, foram analisados os dados com nível estático inferior a 5 metros. Nessa avaliação, 114 entradas de dados foram excluídas devido à consideração de inconsistência nos valores informados para o nível estático. Essa decisão é respaldada por razões hidrogeológicas, uma vez que, em termos práticos, a presença de poços tubulares profundos com nível estático inferior a 5 metros sugere discrepâncias que podem ser atribuídas a informações imprecisas ou anomalias no registro. Ao término desse processo de filtragem e correção, o banco de dados resultante foi composto por 191 entradas.

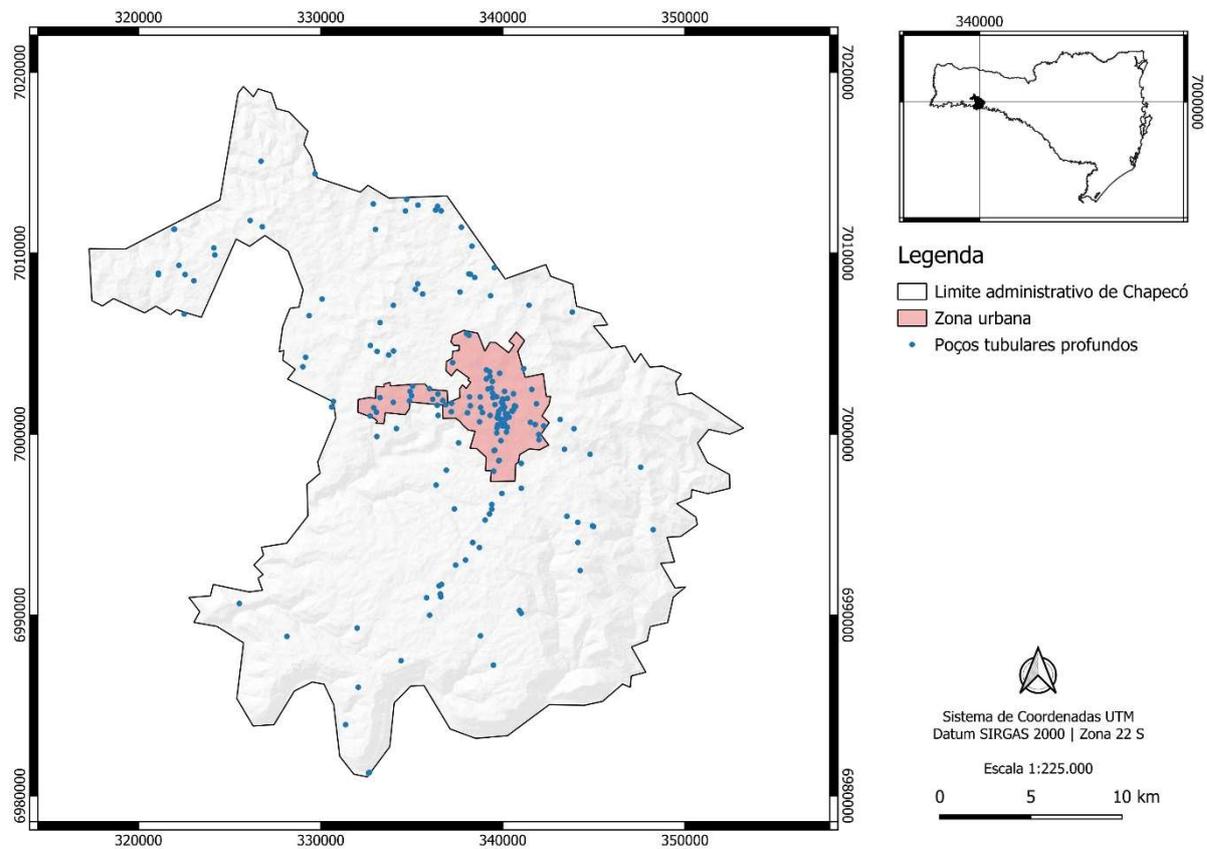
Das 191 entradas restantes após o processo de filtragem e correção, somente uma entrada está associada ao Aquífero Guarani (o poço tubular profundo cadastrado sob código 4300027070 junto ao SIAGAS, que possui 871 metros de profundidade), enquanto os restantes 190 correspondem ao Aquífero Serra Geral. Diante dessa discrepância na representatividade dos dois aquíferos, foi tomada a decisão de excluir o único dado relacionado ao Aquífero Guarani. Esta abordagem justifica-se com base na necessidade de aplicar a metodologia de forma mais consistente e específica ao Sistema Aquífero Serra Geral, considerando apenas as suas características geológicas e hidrogeológicas representadas por dados relativos a 190 ocorrências de água subterrânea. Dessa forma, a análise e resultados subsequentes estarão alinhados com as particularidades desse aquífero e proporcionarão uma abordagem mais apropriada para a região de estudo.

Em relação ao banco de dados consolidado, que consiste em 190 entradas, foi elaborado um sumário estatístico com o propósito de facilitar a interpretação dos dados e a sua subsequente aplicação para as metodologias GOD e DRASTIC. Esse sumário estatístico

fornece informações sobre parâmetros relevantes dentro do contexto das metodologias propostas, contribuindo assim para uma melhor compreensão dos dados no contexto da pesquisa.

O banco de dados compreende 190 entradas, todas categorizadas como poços tubulares profundos. No que se refere às informações altimétricas, a cota varia de um mínimo de 264 metros a um máximo de 764 metros. Em relação à profundidade de perfuração dos poços, observa-se uma profundidade mínima de perfuração de 42 metros, uma profundidade máxima de 310 metros e uma profundidade média de 140 metros. Quando se trata do nível estático, os valores variam de um mínimo de 5 metros a um máximo de 199 metros, com um nível médio de 50,10 metros. Cabe salientar que dos 190 poços tubulares em estudo, 91 deles ocorrem dentro da zona urbana do município. A Figura 16 apresenta o mapa de localização das 190 ocorrências de água subterrâneas que compõe o banco de dados.

Figura 16 - Mapa de localização das 190 ocorrências de água subterrânea analisadas a partir do banco de dados fornecido por SIAGAS.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de SIAGAS (2023).

4.2. Aplicação do método GOD

Após a consolidação do banco de dados, a etapa seguinte consistiu na aplicação da metodologia GOD.

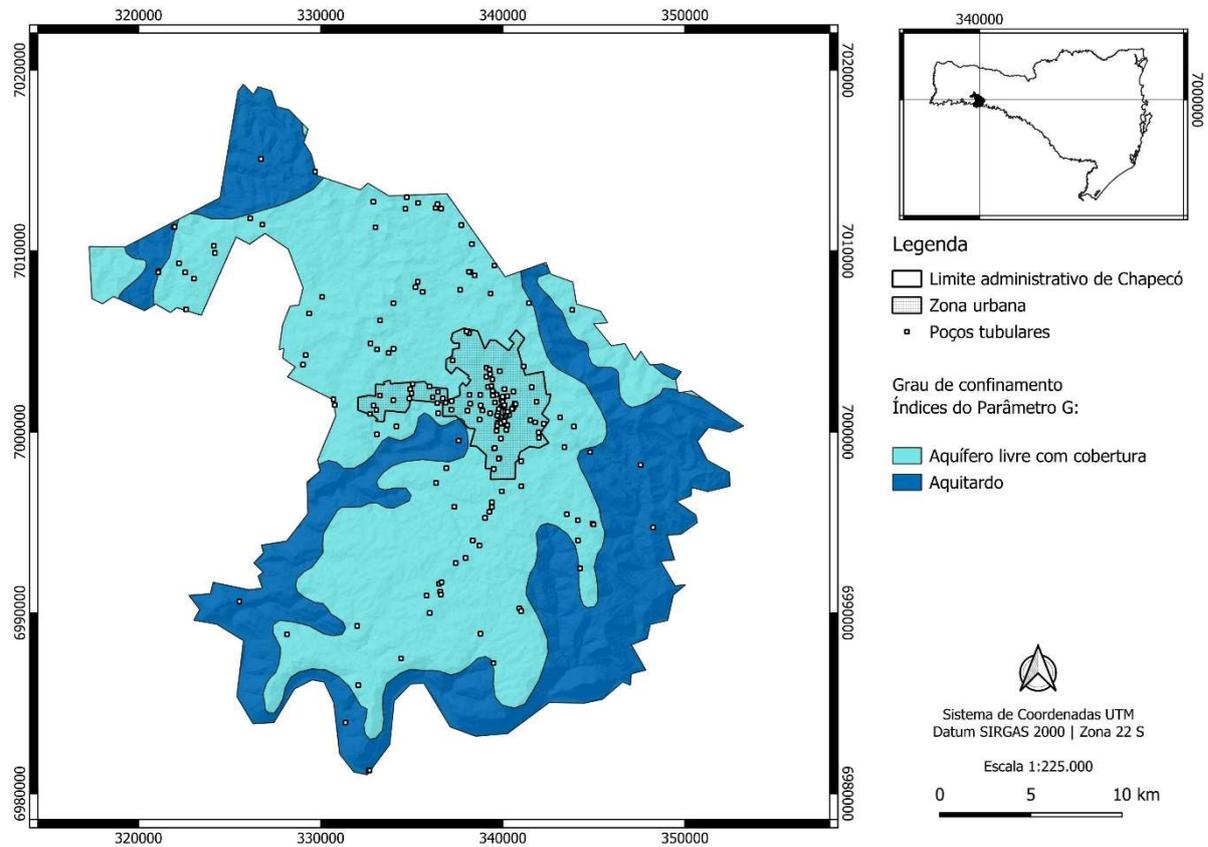
4.2.1. Parâmetro G

O primeiro passo foi a atribuição do peso do parâmetro G a cada uma das 190 ocorrências de água subterrânea. Conforme definido por Foster & Hirata (1988), o grau de confinamento do aquífero (*Groundwater hydraulic confinement*) pode ser categorizado da seguinte forma: não confinado (peso 1), não confinado coberto (peso 0,6), semiconfinado (peso 0,4), confinado (peso 0,2) e fluxo jorrante (peso 0).

A atribuição dos pesos para o parâmetro G, que caracteriza o grau de confinamento do aquífero, é fundamentada nas informações descritas por Machado (2013) no "Mapa Hidrogeológico do Estado de Santa Catarina" em escala 1:500.000. Nessa obra, o autor fornece uma análise das condições hidrogeológicas das unidades hidroestratigráficas, descrevendo sua ocorrência como aquífero livre, semiconfinado ou confinado, considerando tanto a extensão regional quanto a local. Além disso, Machado (2013) apresenta dados detalhados sobre propriedades como continuidade, homogeneidade ou heterogeneidade e isotropia/anisotropia da unidade hidroestratigráfica, o que contribui para uma caracterização completa das condições hidrogeológicas.

A Figura 17 ilustra o mapa de localização dos 190 poços tubulares no município de Chapecó, Santa Catarina, com a distribuição espacial associada à classificação do grau de confinamento do Sistema Aquífero Serra Geral, conforme definido por Machado (2013). Essa representação cartográfica oferece uma visão geral da distribuição geográfica dos poços tubulares nessa região e a maneira como eles se relacionam com as condições de confinamento do aquífero, como descritas pelo referido autor.

Figura 17 – Mapa de localização dos 190 poços tubulares com distribuição espacial associada à classificação do grau de confinamento do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó - SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de Machado (2013).

Conforme ilustrado na Figura 17, a maior parte da região, aproximadamente 68% do território do município de Chapecó (incluindo toda a área urbana), é caracterizada como não confinada com cobertura. No entanto, cerca de 32% do território do município é identificado como aquitardo, o que implica em uma menor permeabilidade nessa porção do aquífero, limitando a circulação da água subterrânea.

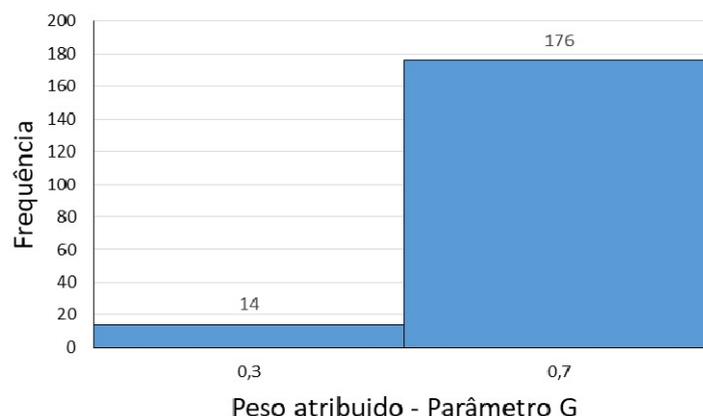
Segundo Feitosa *et al.* (2008), o termo aquitardo é utilizado na hidrogeologia para descrever camadas ou formações geológicas que possuem baixa permeabilidade. Geralmente, são compostos por materiais como argila, silte e arenito fino. Essas características reduzem a capacidade dessas camadas de transmitir água, tornando o fluxo mais lento. A condutividade hidráulica, que determina a facilidade com que a água se move através do material, é consideravelmente menor nessas camadas, resultando em volumes menores de armazenamento de água subterrânea.

De acordo com Foster & Hirata (1988), aos aquíferos classificados como não confinados com cobertura são atribuídos pesos que variam de 0,6 a 0,7 para o parâmetro G. Essa atribuição de peso considera que, ainda que o aquífero seja classificado como não confinado, ele possui uma camada de cobertura, mesmo que seja composta por horizontes de solo residual. Isso é relevante para a avaliação da vulnerabilidade, uma vez que essa cobertura pode influenciar no grau de proteção contra a contaminação. Portanto, para as ocorrências de água subterrânea localizadas sob o domínio não confinado com cobertura, foi atribuído o peso de 0,7 para o parâmetro G, indicando um nível mais elevado de vulnerabilidade. Mais detalhes sobre a natureza composicional da zona não saturada serão abordados no próximo item deste trabalho.

Segundo Machado (2013), as regiões identificadas como aquíferos são caracterizadas por volumes de água subterrânea estocados comparativamente menores e apresentam fluxos mais lentos ou tardios devido à sua baixa permeabilidade e capacidade de armazenamento. Consequentemente, para as ocorrências de água subterrânea registradas sob este domínio, foi atribuído o peso de 0,3 para o parâmetro G, refletindo um menor grau de vulnerabilidade devido à menor capacidade de fluxo e armazenamento dessas camadas.

A Figura 18 exibe o histograma de distribuição de frequência dos pesos associados ao parâmetro G em relação às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas. Esses pesos refletem a classificação do grau de confinamento dos aquíferos a que as ocorrências pertencem.

Figura 18 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro G atribuídos às ocorrências de água subterrânea analisadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

No processo de classificação, um total de 176 ocorrências foram identificadas como não confinadas com cobertura, atribuindo-se um peso de 0,7 ao parâmetro G. Além disso, 14 ocorrências foram categorizadas como confinadas, caracterizadas como aquíferos, e receberam um peso de 0,3 para o parâmetro G.

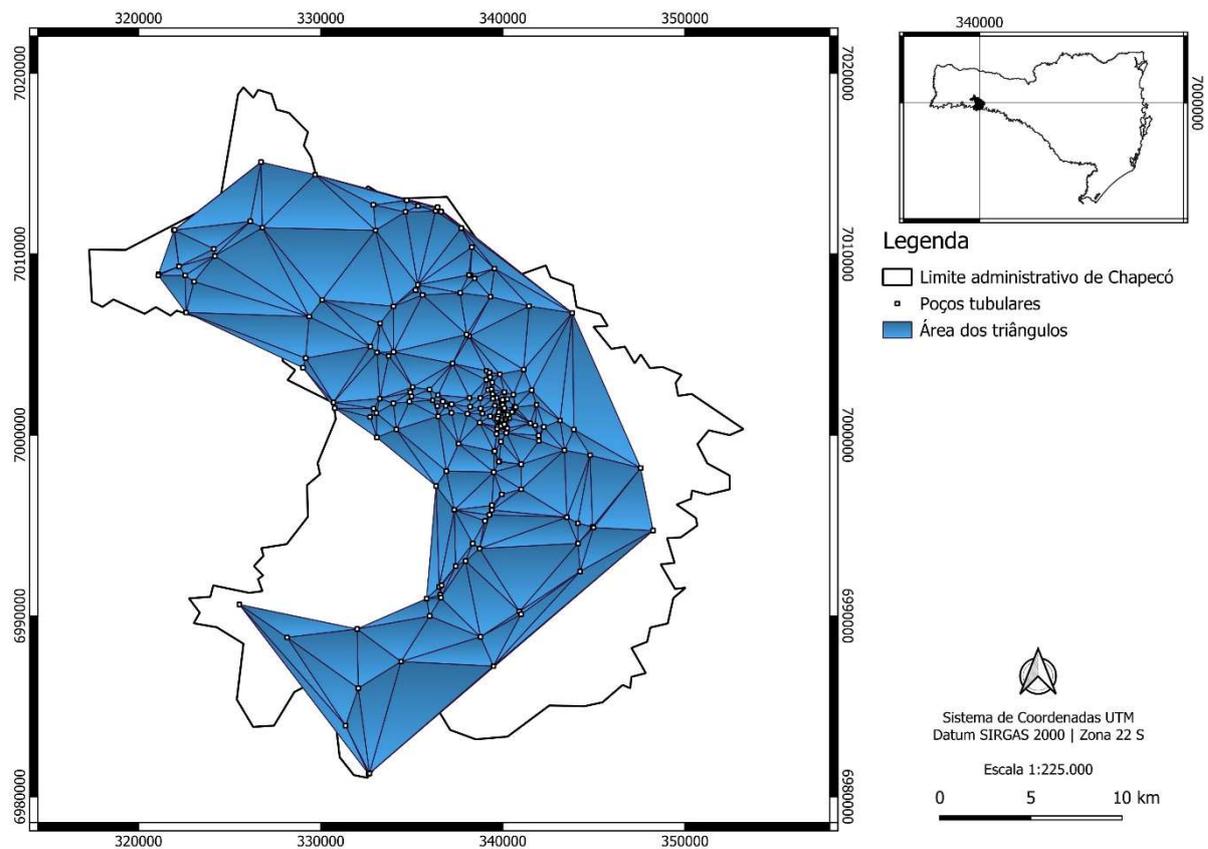
A aplicação do método do vizinho mais próximo na estimativa do índice G, pertencente ao método GOD, foi conduzida na área de estudo após a classificação do índice G para as 190 ocorrências de água subterrânea. Esse método de interpolação foi empregado para estimar os valores do índice G em locais não amostrados, utilizando os dados categorizados de cada ocorrência de água subterrânea presentes no banco de dados. O procedimento de interpolação realizado por meio do método do vizinho mais próximo, conduzido no *software* Surfer, versão 25.2.259, baseia-se em técnicas deterministas. Nesse método, o valor estimado para um determinado ponto é sempre equivalente ao valor do ponto amostral mais próximo, sem considerar quaisquer outros pontos amostrados na área de estudo (Landin, 2002). A implementação desse método requer, por meio do algoritmo do *software*, o cálculo das distâncias entre todos os pontos amostrais e a localização a ser interpolada. O valor interpolado é determinado pelo ponto amostral que apresenta a menor distância em relação à localização alvo, sendo este o valor adotado para a interpolação.

Em geoprocessamento e análise espacial, um *grid* se refere a uma estrutura regular composta por células, neste caso quadradas, distribuídas em uma malha sobre uma área de estudo. Essas células formam uma grade, onde cada célula representa uma unidade discreta na área considerada. O *grid* é utilizado para representar e armazenar informações georreferenciadas, neste caso em específico, a categoria do índice G. Ao realizar a interpolação em uma área, os valores conhecidos em pontos amostrais são utilizados para estimar ou prever valores desconhecidos em outros locais dentro da mesma área. A interpolação é aplicada em cada célula do *grid*, permitindo estimar valores para cada unidade de célula, com base nos valores conhecidos dos pontos de amostra ao redor. Isso resulta na criação de um novo *grid* interpolado, onde cada célula contém um valor estimado, representando a predição do fenômeno em estudo para toda a área coberta pelo *grid*.

A determinação do tamanho das células de *grid* desempenha um papel fundamental na análise espacial e na obtenção de estimativas precisas em estudos geoespaciais. Neste estudo, o dimensionamento das células de *grid* foi fundamentado em uma abordagem baseada na equação do espaçamento médio amostral, permitindo a definição de um padrão consistente para

as estimativas realizadas. O espaçamento médio amostral foi obtido por meio do cálculo da raiz quadrada do total da área amostrada dividida pelo número de amostras. A área amostrada foi determinada utilizando o algoritmo de triangulação no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch, permitindo a obtenção da área de cada triângulo formado pelos pontos amostrais. A representação gráfica desse processo é evidenciada na Figura 19, a qual oferece uma visualização da triangulação aplicada para estimar a área total investigada, totalizando 420 km² ou 420.000.000 m².

Figura 19 - Visualização da triangulação aplicada para estimar a área total investigada.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch.

A partir do cálculo supracitado, o espaçamento médio amostral foi aproximadamente de 1500 metros. O próximo passo foi a determinação do tamanho de célula do *grid*, optando-se por um quarto do espaçamento médio obtido, totalizando 375 metros. Portanto, cada célula do *grid* adotou o tamanho uniforme de 375 m x 375 m para estimar o índice G e todas as outras análises deste estudo. Essa abordagem padronizada foi adotada visando garantir que todas as estimativas realizadas estivessem em conformidade com o mesmo suporte amostral, garantindo assim uma comparação justa e consistente entre os resultados obtidos.

A qualidade do modelo de estimativa é avaliada por meio da técnica de validação cruzada. Essa abordagem, aplicável a qualquer método de estimativa, envolve a comparação entre valores reais e valores estimados. A técnica consiste em ocultar um a um os valores reais observados nas localizações onde eles existem, estimando um valor no mesmo local. Este processo é repetido para todo, ou ao menos para uma parcela do banco de dados. A validação cruzada, ao comparar valores reais e estimados, permite calibrar os parâmetros configurados durante a estimativa. Um gráfico de correlação pode ser gerado para representar a relação entre valores reais e estimados, revelando a distribuição dos erros de estimativa. Vale ressaltar que a validação cruzada não confirma que o modelo escolhido é o correto, mas indica que não é inteiramente incorreto. A melhor verificação ainda é obtida confrontando os valores estimados com a realidade de campo (LANDIN, 2002).

O processo de validação cruzada, assim como o de estimativa, foi realizado no *software* Surfer, na versão 25.2.259. O processo de validação cruzada teve como finalidade estabelecer quais os parâmetros gerariam o menor erro na estimativa por mínima curvatura. Para isso foram gerados histogramas dos erros e gráficos de correlação entre valor real e valor estimado. Entende-se por erro a diferença entre o valor estimado e o valor real no ponto testado. Nos histogramas, buscava-se a média de erro mais próxima de 0, enquanto que nos gráficos de correlação buscava-se o coeficiente de correlação mais próximo de 1.

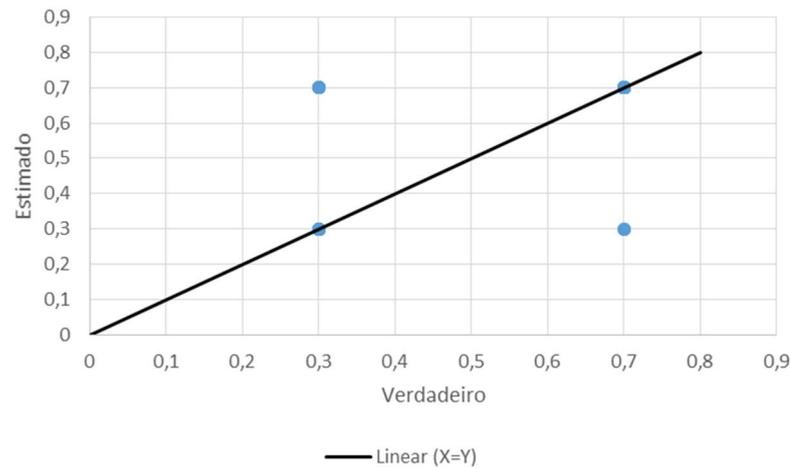
Quando se analisam duas ou mais variáveis, a correlação entre o valor estimado e o valor verdadeiro pode ser avaliada quantitativamente, conforme destacado por Sinclair & Blackwell (2004). A correlação, medida de similaridade entre variáveis, é frequentemente quantificada pelo coeficiente de correlação linear (r), indicando a relação entre pares de variáveis. Um coeficiente $r = 1$ sugere uma correlação linear perfeita entre x e y , enquanto $r = -1$ representa uma correlação inversa ideal entre as variáveis. Por outro lado, um valor de $r = 0$ denota a ausência de relação entre x e y (Sinclair & Blackwell, 2004).

A representação gráfica dessa relação linear é apresentada por meio do diagrama de dispersão, uma ferramenta comum na análise de correlação de variáveis, conforme mencionado por Correia (2003).

A Figura 20 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados para os 190 pontos investigados pelo algoritmo de validação cruzada do *software* Surfer, na versão 25.2.259. O coeficiente de correlação obtido entre os valores estimados e

verdadeiros, conforme aplicado na metodologia descrita, foi de 0,7065. Essa medida sugere uma correlação de natureza forte entre os dados estimados e os verdadeiros, de acordo com as classificações estabelecidas para coeficientes de correlação (Siegel, 1975).

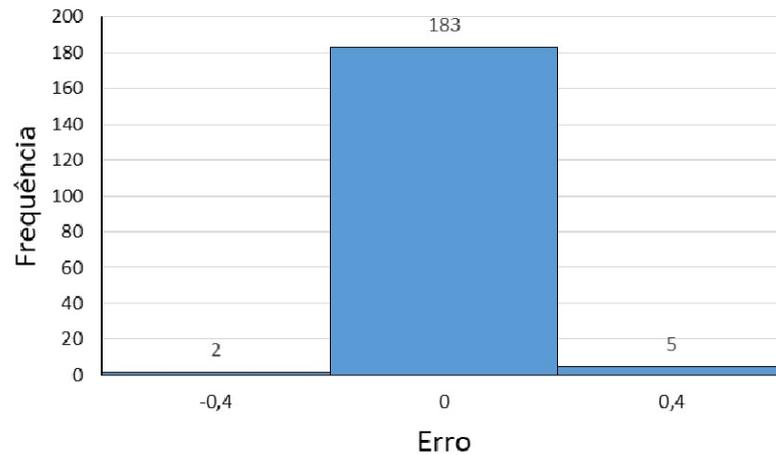
Figura 20 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice G.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

A Figura 21 exibe o histograma da distribuição das frequências das classes de erro, representando a diferença entre o valor estimado e o valor real nos 190 pontos testados. Os dados estatísticos associados a esses erros revelam uma média próxima a zero (0,0063), indicando que, em média, os valores estimados se aproximam dos valores reais. A mediana do erro, por sua vez, demonstra uma tendência à estimativa exata, visto que o valor mais frequente de erro, em 183 das 190 estimativas pontuais, foi igual a 0,00. O desvio padrão foi de 0,0765 e ressalta a dispersão dos erros em torno da média. O valor máximo e mínimo dos erros são, respectivamente, 0,4 e -0,4.

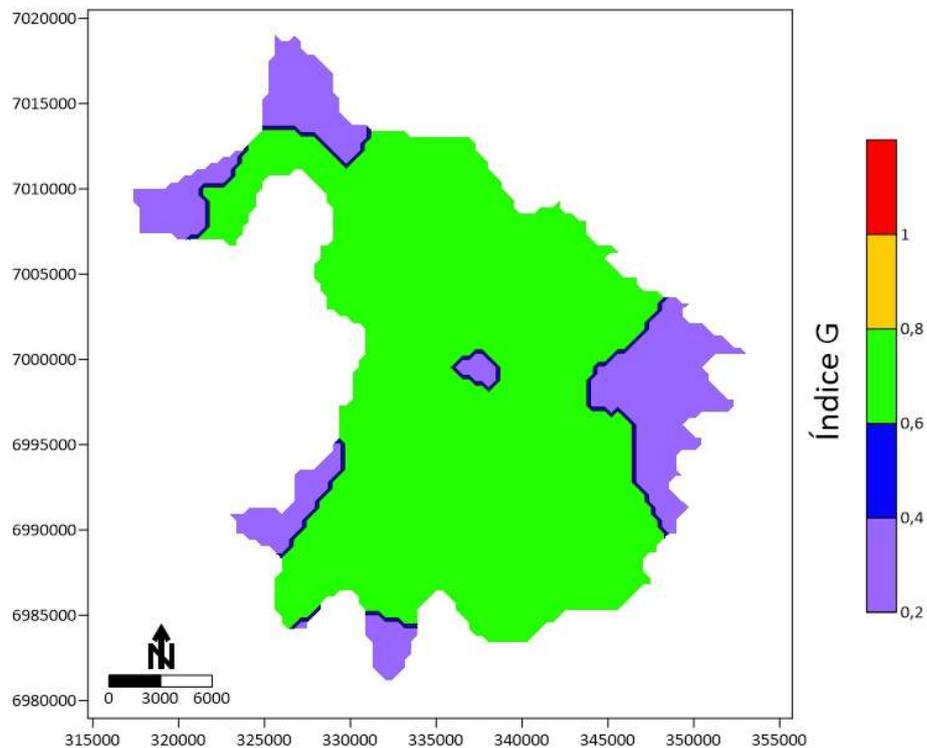
Figura 21 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice G.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

O mapa apresentado na Figura 22 constitui o resultado da aplicação da técnica de interpolação pelo método do vizinho mais próximo para os 190 índices associados ao parâmetro G, correspondentes às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

Figura 22 - Mapa da distribuição espacial do índice G na área de estudo, o município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259.

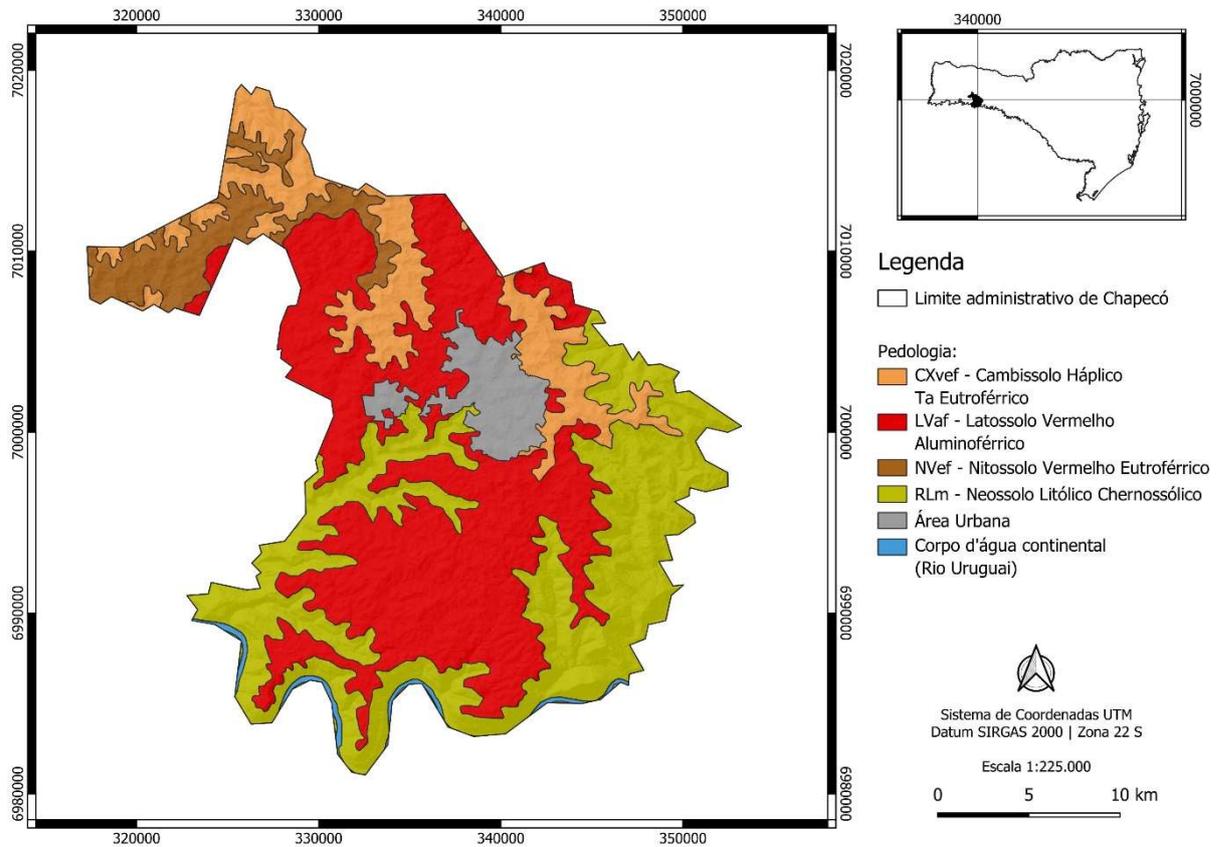
4.2.2. Parâmetro O

A etapa subsequente envolveu a atribuição de pesos ao parâmetro O (*Overlying strata*), relacionado à sua natureza composicional da zona não saturada e/ou aquífero e seu grau de faturamento. Essa atribuição de pesos foi realizada mediante consulta às informações de cada um dos 190 cadastros de uso de água subterrânea disponíveis no portal SIOUT. Essa abordagem justifica-se pela necessidade de adequar os pesos do parâmetro O às características específicas de cada ocorrência de água subterrânea, levando em consideração a natureza composicional da zona não saturada e do aquífero, assim como o grau de fraturamento presente, de forma a tornar a metodologia GOD mais precisa e adaptada às condições locais.

Além da análise das fichas técnicas de cada cadastro de uso de água subterrânea disponíveis no SIAGAS, que contêm informações detalhadas sobre o perfil construtivo e a seção tipo geológica de cada ocorrência de água subterrânea, foi também elaborado um mapa pedológico abrangendo o município de Chapecó, Santa Catarina.

As informações sobre a presença de estratos de cobertura foram obtidas a partir do mapeamento de recursos naturais do Brasil, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala 1:250.000. Esse mapeamento forneceu detalhes das unidades de solos distribuídas na paisagem, destacando as características específicas de cada área. No município de Chapecó, foram identificadas seis unidades de solo, incluindo Área Urbana, Corpo d'água continental (Rio Uruguai), CXvef - Cambissolo Háplico Ta Eutroférico, LVaf - Latossolo Vermelho Aluminoférico, NVef - Nitossolo Vermelho Eutroférico e RLm - Neossolo Litólico Chernossólico. Esse mapa foi desenvolvido com base no novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, conforme estabelecido pela Embrapa, e publicado pelo IBGE. A finalidade dessa abordagem foi fornecer informações adicionais para a melhor compreensão da ocorrência e distribuição dos estratos de cobertura do aquífero. O mapa apresentado na Figura 23 ofereceu um subsídio importante para a avaliação e classificação dessas ocorrências, tornando o processo de atribuição de pesos ao parâmetro O do método GOD mais preciso e ajustado às condições locais.

Figura 23 - Mapa pedológico do município de Chapecó - SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de IBGE (2018).

A integração dos dados sobre estratos de cobertura com informações pedológicas, como o tipo de solo e sua textura, desempenha um papel relevante no aprimoramento da metodologia de vulnerabilidade GOD. Embora o método originalmente não considerasse explicitamente o solo (S), estudos como os realizados por Foster *et al.* (2002), destacaram que a maioria dos processos de atenuação e eliminação de contaminantes no subsolo ocorre na zona biologicamente ativa do solo. Esse entendimento justifica a determinação do parâmetro O (*Overlying strata*) no presente trabalho, no qual o peso atribuído está relacionado diretamente à natureza composicional da zona não saturada, levando em conta a textura do solo como fator determinante nesse processo.

A Tabela 10 fornece informações sobre as unidades de solo identificadas no município de Chapecó, incluindo a área urbana, o corpo d'água continental (Rio Uruguai) e os tipos de solo: CXvef (Cambissolo Háplico Ta Eutroférico), LVaf (Latossolo Vermelho Aluminoférico), NVef (Nitossolo Vermelho Eutroférico) e RLM (Neossolo Litólico Chernossólico), conforme mapeados pelo IBGE (2018) e anteriormente apresentados na Figura

23. A tabela relaciona cada uma dessas unidades de solo à sua textura, ao peso atribuído ao parâmetro O e fornece uma justificativa para essa atribuição de peso.

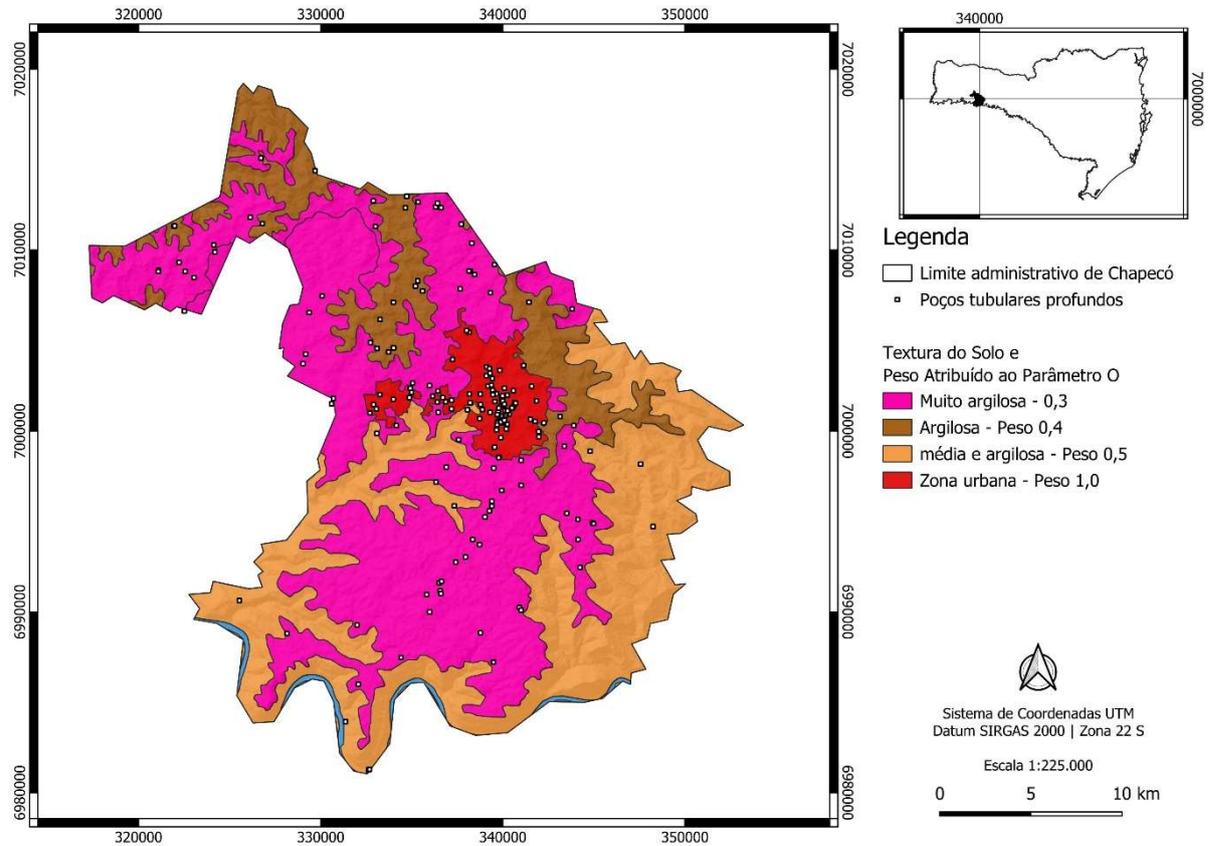
Tabela 10 - A tabela relaciona cada uma das unidades de solo mapeadas por IBGE (2018) na área de estudo, o município de Chapecó – SC, à sua textura, peso atribuído ao parâmetro O e justificativa para essa atribuição de peso.

Unidade Mapeada	Textura	Peso atribuído	Justificativa
CXvef - Cambissolo Háplico Ta Eutroférico	Argilosa	0,4	Valor proposto pelo método GOD
LVaf - Latossolo Vermelho Aluminoférico	Muito argilosa	0,3	Textura “muito argilosa” tende a apresentar efeito de atenuação maior do que textura "Argilosa"
NVef - Nitossolo Vermelho Eutroférico	Muito argilosa	0,3	Textura “muito argilosa” tende a apresentar efeito de atenuação maior do que textura "Argilosa"
RLm - Neossolo Litólico Chernossólico	Média a argilosa	0,5	Valor proposto pelo método GOD
Área Urbana	-	1	Solos com estrutura perturbada devido à ação antrópica intensa, as atividades humanas aumentam a vulnerabilidade à contaminação
Corpo d'água continental	-	-	Não há ocorrência de água subterrânea analisada sob domínio desta unidade

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice. Modificado de Foster & Hirata (1988).

O mapa representado na Figura 24 estabelece uma correlação entre as distintas unidades de solo e suas respectivas texturas, de acordo com a classificação fornecida pelo IBGE (2018). Essa correlação permitiu a associação de cada poço tubular analisado aos pesos atribuídos ao parâmetro O, conforme especificado na Tabela 10, contemplando um total de 190 poços.

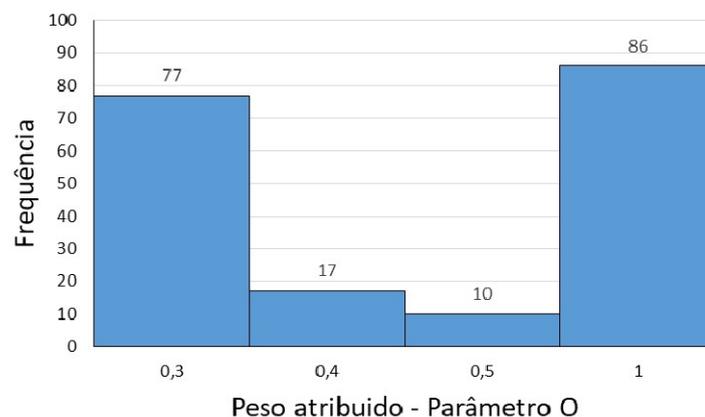
Figura 24 – O mapa apresenta a relação entre as unidades de solo, suas texturas de acordo com a classificação do IBGE (2018), e os pesos atribuídos ao parâmetro O para os 190 poços tubulares analisados.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de IBGE (2018).

A Figura 25 exibe o histograma de distribuição de frequência dos pesos associados ao parâmetro O em relação às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas. Esses pesos refletem a classificação quanto natureza composicional da zona não saturada.

Figura 25 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro O atribuídos às ocorrências de água subterrânea analisadas.

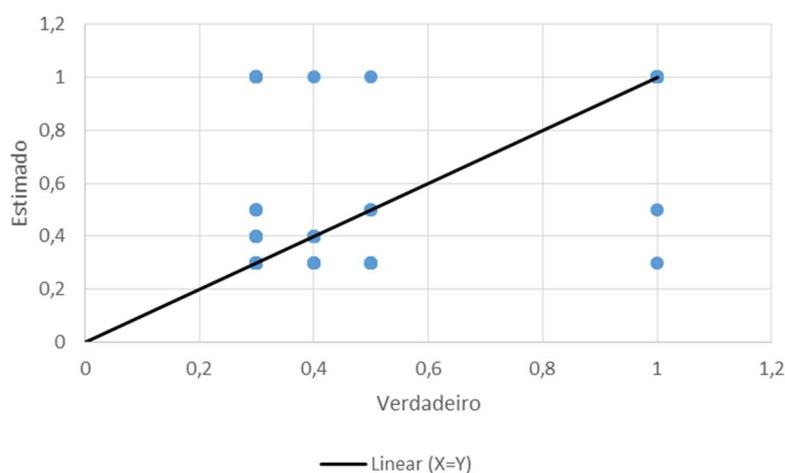


Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

No processo de classificação, identificou-se um conjunto de 86 ocorrências dentro da zona urbana, ao qual foi atribuído um peso de 1 para o parâmetro O. Além disso, 10 ocorrências foram caracterizadas como textura média a argilosa, recebendo um peso de 0,5, enquanto 17 ocorrências foram classificadas como argilosas, com um peso de 0,4. Adicionalmente, um total de 77 ocorrências foi designado como muito argiloso, obtendo um peso de 0,3 para o índice O. Posteriormente, a aplicação do método do vizinho mais próximo foi empregada para estimar o índice O, integrante do método GOD, na área de estudo, após a classificação das 190 ocorrências de água subterrânea.

A Figura 26 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados para os 190 pontos investigados pelo algoritmo de validação cruzada do *software* Surfer, na versão 25.2.259. O coeficiente de correlação obtido entre os valores estimados e verdadeiros, conforme aplicado na metodologia descrita, foi de 0,8688. Essa medida sugere uma correlação de natureza forte entre os dados estimados e os verdadeiros, de acordo com as classificações estabelecidas para coeficientes de correlação (Siegel, 1975).

Figura 26 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice O.

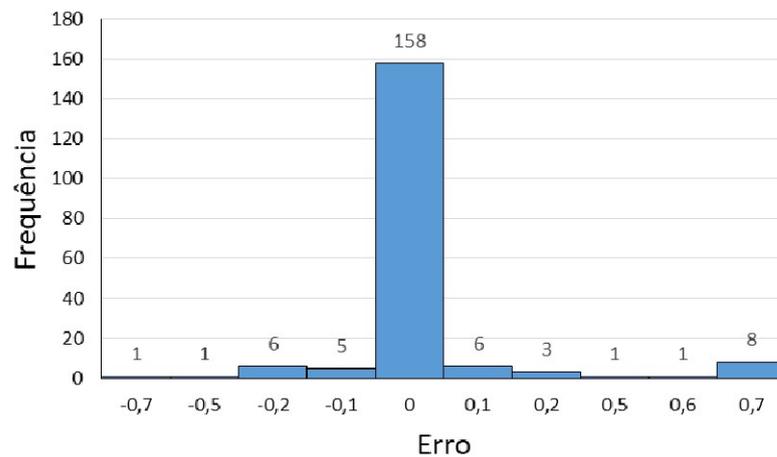


Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

A Figura 27 exibe o histograma da distribuição das frequências das classes de erro, representando a diferença entre o valor estimado e o valor real nos 190 pontos testados. Os dados estatísticos associados a esses erros revelam uma média próxima a zero (0,0263), indicando que, em média, os valores estimados se aproximam dos valores reais. A mediana do erro, por sua vez, demonstra uma tendência à estimativa exata, visto que o valor mais frequente

de erro, em 153 das 190 estimativas pontuais, foi igual a 0,00. O desvio padrão foi de 0,1718 e ressalta a dispersão dos erros em torno da média. O valor máximo e mínimo dos erros são, respectivamente, 0,7 e -0,7.

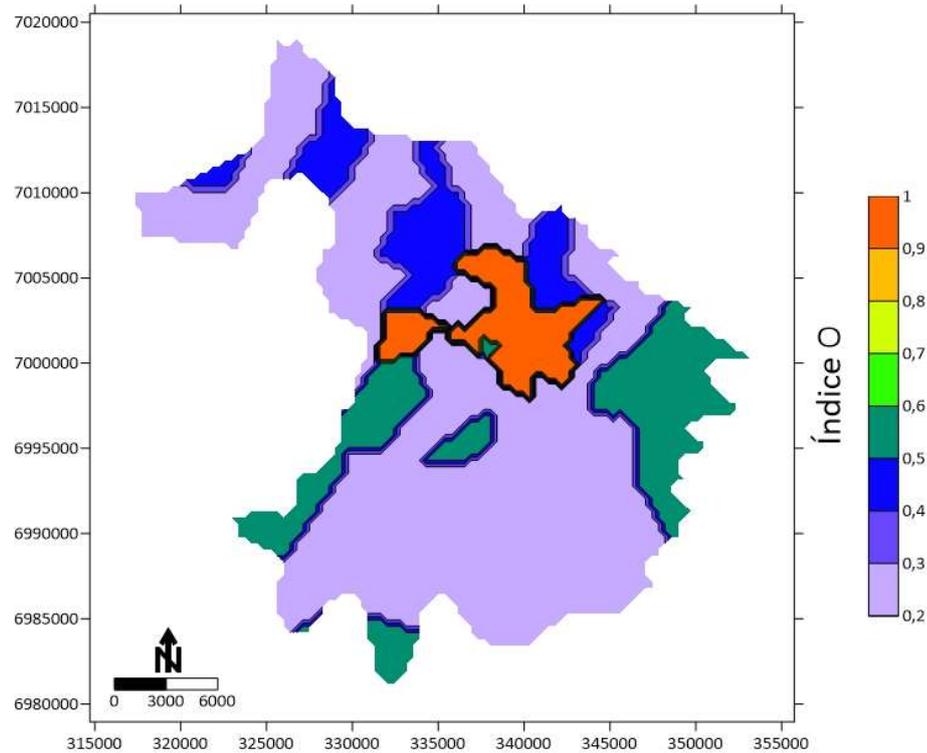
Figura 27 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice O.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

O mapa apresentado na Figura 28 constitui o resultado da aplicação da técnica de interpolação pelo método do vizinho mais próximo para os 190 índices associados ao parâmetro O, correspondentes às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

Figura 28 - Mapa da distribuição espacial do índice O na área de estudo, o município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259.

4.2.3. Parâmetro D

A última fase na atribuição de pesos, seguindo a metodologia proposta, envolveu a determinação do parâmetro D (*Depth to groundwater table*), que representa a distância da superfície até o lençol freático ou o topo do aquífero. Nesse processo, aplicou-se a ferramenta de filtro à coluna "nível estático" do banco de dados consolidado, permitindo a determinação do valor de peso atribuído a cada ocorrência de água subterrânea, de acordo com intervalos de classe de distância até o lençol freático, conforme proposto por Foster & Hirata (1988).

Além disso, foi elaborado um mapa representando a distância da superfície até o lençol freático. Utilizando os 190 dados disponíveis relacionados ao nível estático de cada ocorrência de água subterrânea no banco de dados, realizou-se a interpolação desses dados utilizando o método da mínima curvatura no *software* Surfer, na versão 25.2.259.

O método de mínima curvatura é uma abordagem clássica de interpolação amplamente utilizada para estimar valores em locais não amostrados, proporcionando uma superfície suavizada. De acordo com Andriotti (2009), essa técnica emprega um polinômio para gerar uma

superfície que minimiza a curvatura, passando suavemente pelos pontos amostrados e reproduzindo os valores da variável em questão.

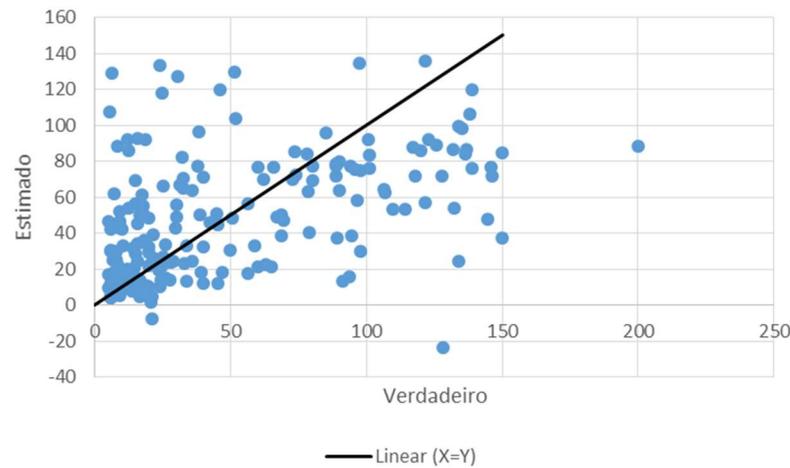
A escolha do método de mínima curvatura como interpolador, neste caso, foi fundamentada em uma análise das vantagens e desvantagens associadas a essa técnica, conforme discutido por Landim (2002). Uma das principais vantagens do método é sua independência em relação à distribuição dos dados e à presença de ruído, o que confere robustez às estimativas. Além disso, a suavidade da superfície gerada é notável quando comparada a outros algoritmos de ajuste de superfícies, proporcionando uma representação mais realista da variável em estudo. A fidelidade da superfície aos dados originais, especialmente em células do *grid* com um valor amostrado, contribui para a precisão da interpolação.

As desvantagens inerentes à técnica de mínima curvatura, como a capacidade de realizar estimativas extrapoladas e a ocorrência potencial de artefatos em áreas próximas às bordas ou em células específicas do *grid*, destacam a importância de uma análise crítica e da validação das estimativas geradas. A possibilidade de extrapolação para além dos limites dos dados amostrados pode resultar em informações não representativas da realidade, comprometendo a confiabilidade dos resultados. Além disso, a presença de artefatos pode distorcer a interpretação da distribuição da variável, tornando essencial um processo de validação que assegure a confiabilidade das estimativas.

Para a interpolação do parâmetro "nível estático" por meio do método da mínima curvatura, foi adotado um *grid* com espaçamento de 375 metros por 375 metros. Foi estabelecido um critério ao limitar os valores mínimos e máximos do parâmetro a ser estimado, assegurando que estivessem dentro da faixa correspondente aos valores reais observados, variando entre 5 e 199,8 metros. Esses limites foram impostos para que a superfície interpolada se mantivesse dentro do intervalo dos dados reais, evitando extrapolações e inconsistência das estimativas em relação às medições obtidas nos 190 poços tubulares analisados.

A Figura 29 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados para os 190 pontos investigados pelo algoritmo de validação cruzada do *software* Surfer, na versão 25.2.259. O coeficiente de correlação obtido entre os valores estimados e verdadeiros, conforme aplicado na metodologia descrita, foi de 0,4635. Essa medida sugere uma correlação de natureza moderada entre os dados estimados e os verdadeiros, de acordo com as classificações estabelecidas para coeficientes de correlação (Siegel, 1975).

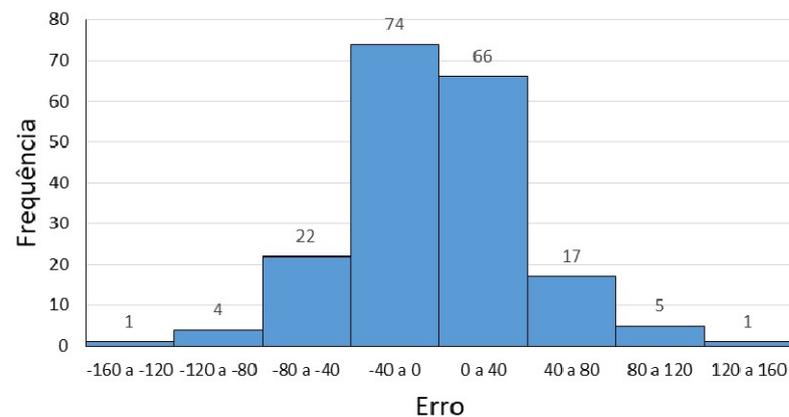
Figura 29 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa da distância até o nível da água.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

A Figura 30 apresenta o histograma que exibe a distribuição das frequências das classes de erro, representando a diferença entre o valor estimado e o valor real nos 190 pontos testados. As informações estatísticas dos erros revelam uma média próxima a zero (-1,662366778), entretanto negativa, o que sugere uma tendência de subestimação dos valores estimados em relação aos valores reais. A mediana, que se encontra negativa (-1,299288622), confirma essa tendência. O desvio padrão considerável (41,35524676) indica uma dispersão significativa dos erros em torno da média. Além disso, o erro máximo e mínimo, respectivamente 122,9223016 e -151,4439739, revelam uma variação considerável na precisão das estimativas.

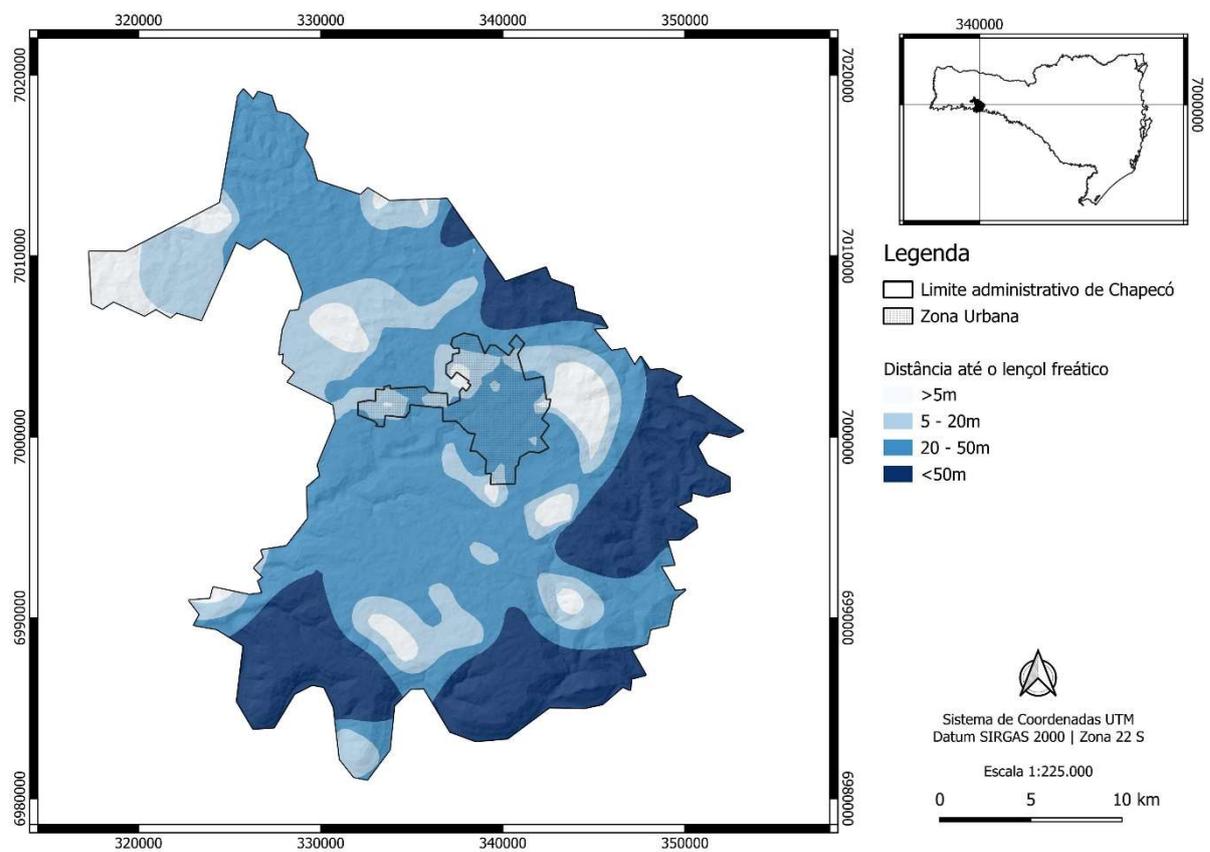
Figura 30 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa da distância até o nível da água no município de Chapecó – SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

O mapa representado na Figura 31 permitiu a avaliação das variações da distância entre a superfície e o lençol freático para cada ocorrência de água subterrânea analisada. Esse processo resultou na categorização das profundidades em classes que incluem valores inferiores a 5 metros, entre 5 e 20 metros, entre 20 e 50 metros e valores superiores a 50 metros, conforme proposto originalmente por Foster & Hirata (1988). Essa categorização desempenhou um papel fundamental na atribuição dos respectivos pesos D para cada classe, de acordo com a metodologia empregada.

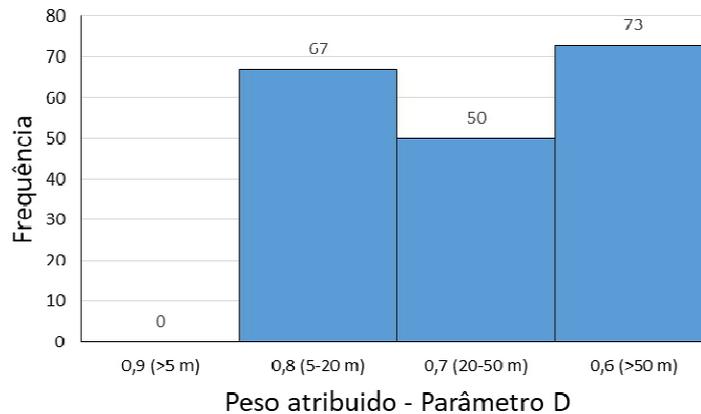
Figura 31 - Representação da distância até o lençol freático na área de estudo com intervalos de classe de acordo com o método GOD.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259. Modificado de SIAGAS (2023).

A Figura 32 exibe o histograma de distribuição de frequência para cada classe de profundidade nas ocorrências analisadas, juntamente com os valores atribuídos para o parâmetro D.

Figura 32 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro D atribuídos às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

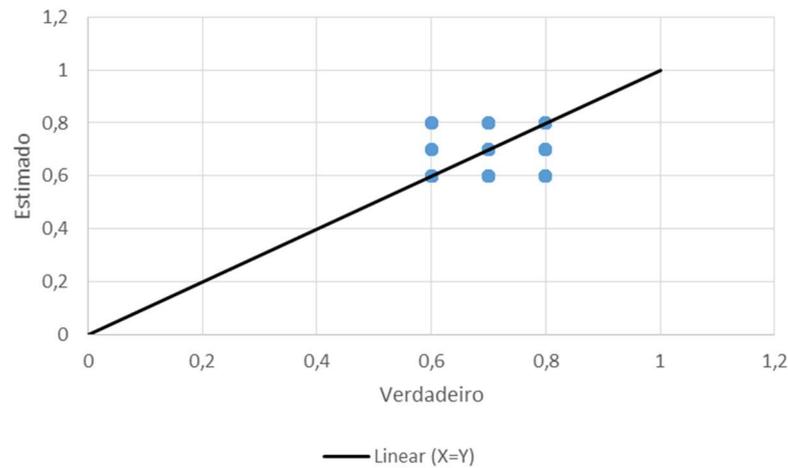


Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

No processo de classificação, identificou-se um conjunto de 73 ocorrências que excedem 50 metros entre a superfície e o teto do aquífero, ao qual foi atribuído o peso de 0,6 para o parâmetro D. Adicionalmente, 50 ocorrências foram caracterizadas com distância até o teto do aquífero entre 20 e 50 metros, recebendo um peso de 0,7. Outro grupo de 67 ocorrências foi delimitado com distância entre 5 e 20 metros até o teto do aquífero, sendo atribuído um peso de 0,8. Posteriormente, a aplicação do método do vizinho mais próximo foi empregada para estimar o índice D, componente do método GOD, na área de estudo, após a classificação das 190 ocorrências de água subterrânea.

A Figura 33 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados para os 190 pontos investigados pelo algoritmo de validação cruzada do *software* Surfer, na versão 25.2.259. O coeficiente de correlação obtido entre os valores estimados e verdadeiros, conforme aplicado na metodologia descrita, foi de 0,4675. Essa medida sugere uma correlação de natureza moderada entre os dados estimados e os verdadeiros, de acordo com as classificações estabelecidas para coeficientes de correlação (Siegel, 1975).

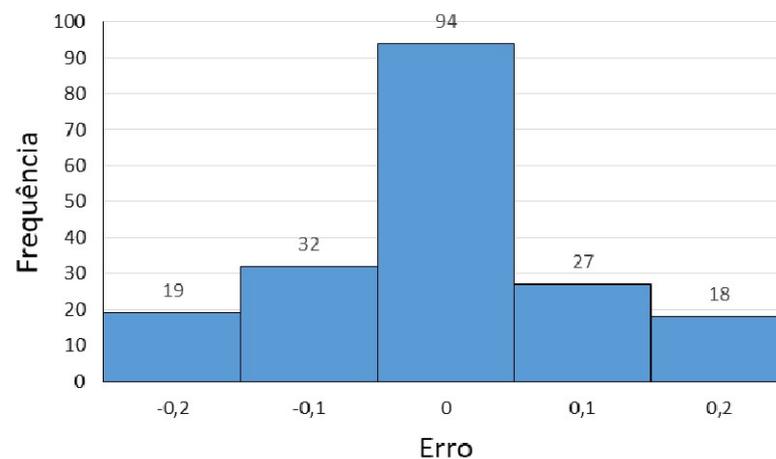
Figura 33 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice D.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

A Figura 34 apresenta o histograma que representa a distribuição das frequências das classes de erro, ilustrando a diferença entre o valor estimado e o valor real nos 190 pontos testados. Os dados estatísticos associados a esses erros revelam uma média quase nula (0,0263), indicando que, em geral, os valores estimados se aproximam dos valores reais. A mediana do erro demonstraram erro igual a zero (0,00). Com um desvio padrão de 0,1718, observa-se a dispersão dos erros ao redor da média. O valor máximo e mínimo dos erros são, respectivamente, 0,7 e -0,7.

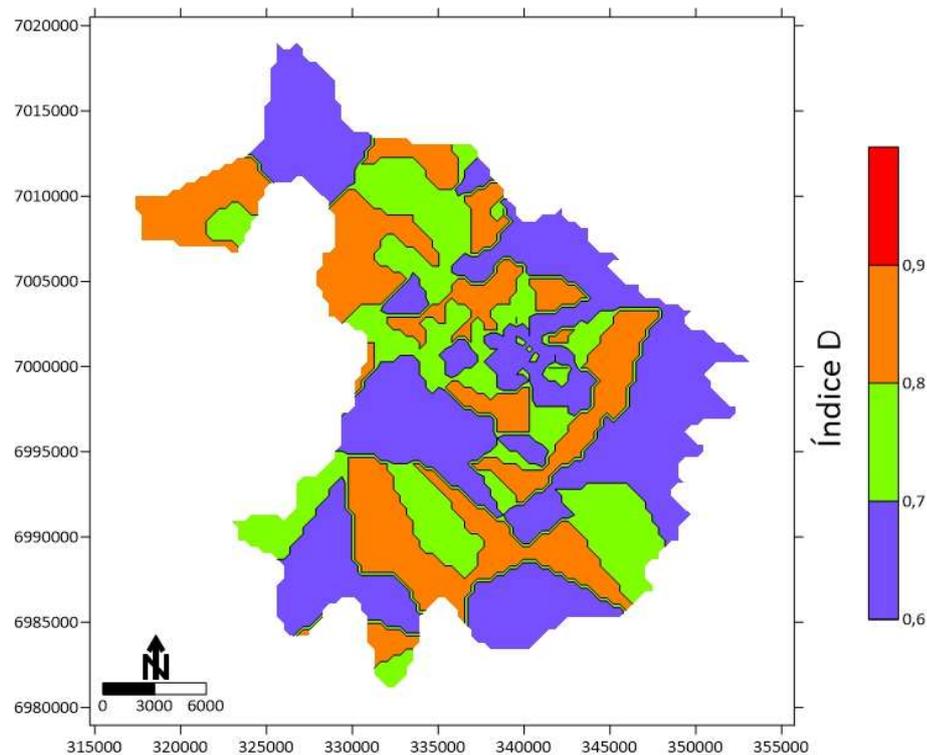
Figura 34 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice D.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

O mapa apresentado na Figura 35 constitui o resultado da aplicação da técnica de interpolação pelo método do vizinho mais próximo para os 190 índices associados ao parâmetro D, correspondentes às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

Figura 35 - Mapa da distribuição espacial do índice D na área de estudo, o município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259.

4.2.4. Índice final GOD

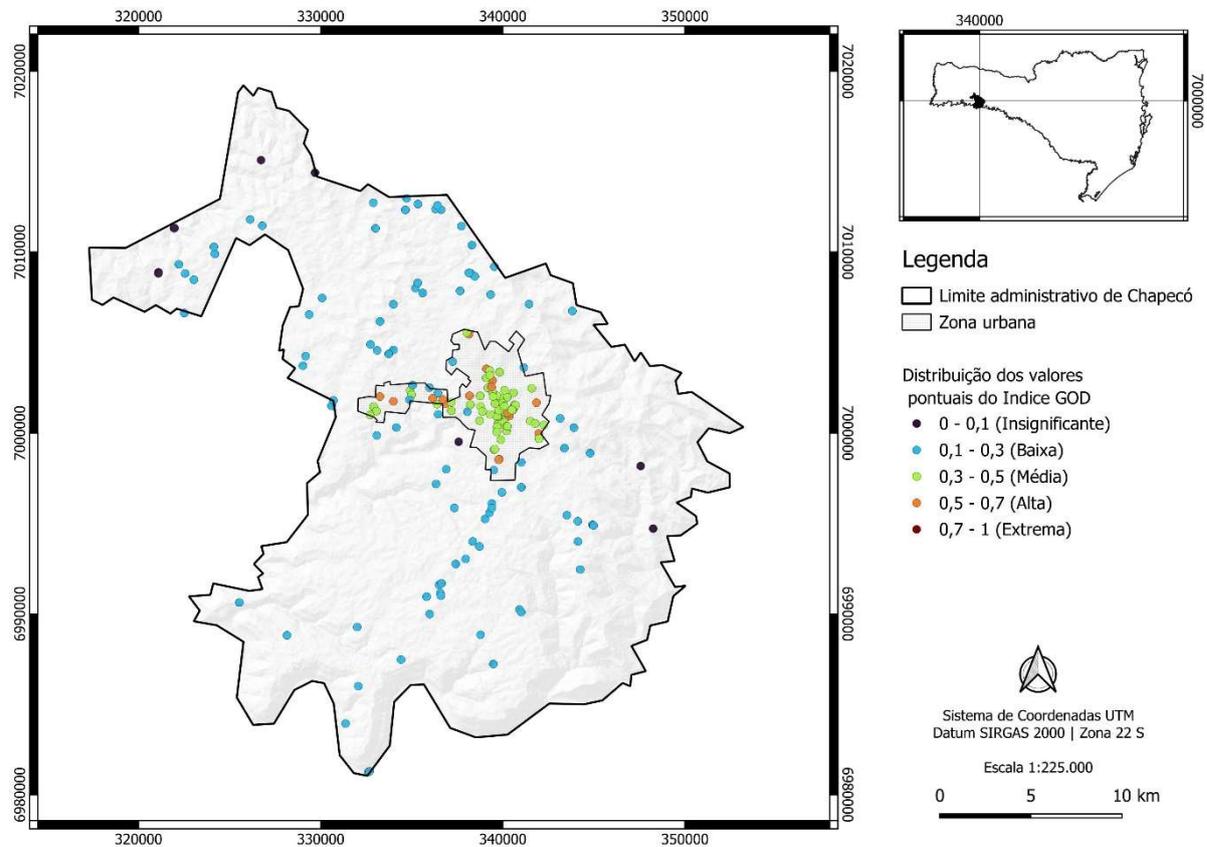
A aplicação do método GOD (Foster & Hirata, 1988) para a avaliação da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó - SC resultou na determinação de um índice de vulnerabilidade para cada uma das 190 ocorrências pontuais de água subterrânea presentes no banco de dados. Os parâmetros incluídos foram G (tipo de aquífero), O (litologia da zona não-saturada), e D (profundidade da água), conforme detalhado nos itens anteriores deste trabalho. A multiplicação desses três parâmetros ($G \times O \times D$) resultou no índice de vulnerabilidade à contaminação para cada uma das 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

O resultado obtido após a aplicação do método GOD (Foster & Hirata, 1988) consiste em um índice contínuo que varia em um intervalo de 0 a 1. Esse índice contínuo é então

discretizado em cinco classes distintas que atribuem uma categoria específica para cada valor numérico, refletindo a vulnerabilidade do aquífero à contaminação. Na escala utilizada, valores compreendidos entre 0 e 0,1 são classificados como "insignificante" em termos de vulnerabilidade à contaminação, enquanto valores entre 0,1 e 0,3 são classificados como "baixa". Para valores entre 0,3 e 0,5, a classificação é "média", e para valores entre 0,5 e 0,7, a vulnerabilidade é classificada como "alta". Por fim, valores entre 0,7 e 1 são categorizados como "extrema" em relação à vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

No contexto da aplicação do método à área em estudo, os resultados demonstraram uma variabilidade na vulnerabilidade à contaminação entre as diversas ocorrências de água subterrânea. Essa variabilidade é atribuída à combinação dos diferentes fatores hidrogeológicos e geológicos particulares a cada ocorrência analisada, incluindo a natureza do aquífero, as características da zona não-saturada e a profundidade do lençol freático. A Figura 36 proporciona uma representação gráfica da distribuição dessa variabilidade, mostrando a distribuição espacial dos 190 valores pontuais do índice de vulnerabilidade à contaminação obtidos.

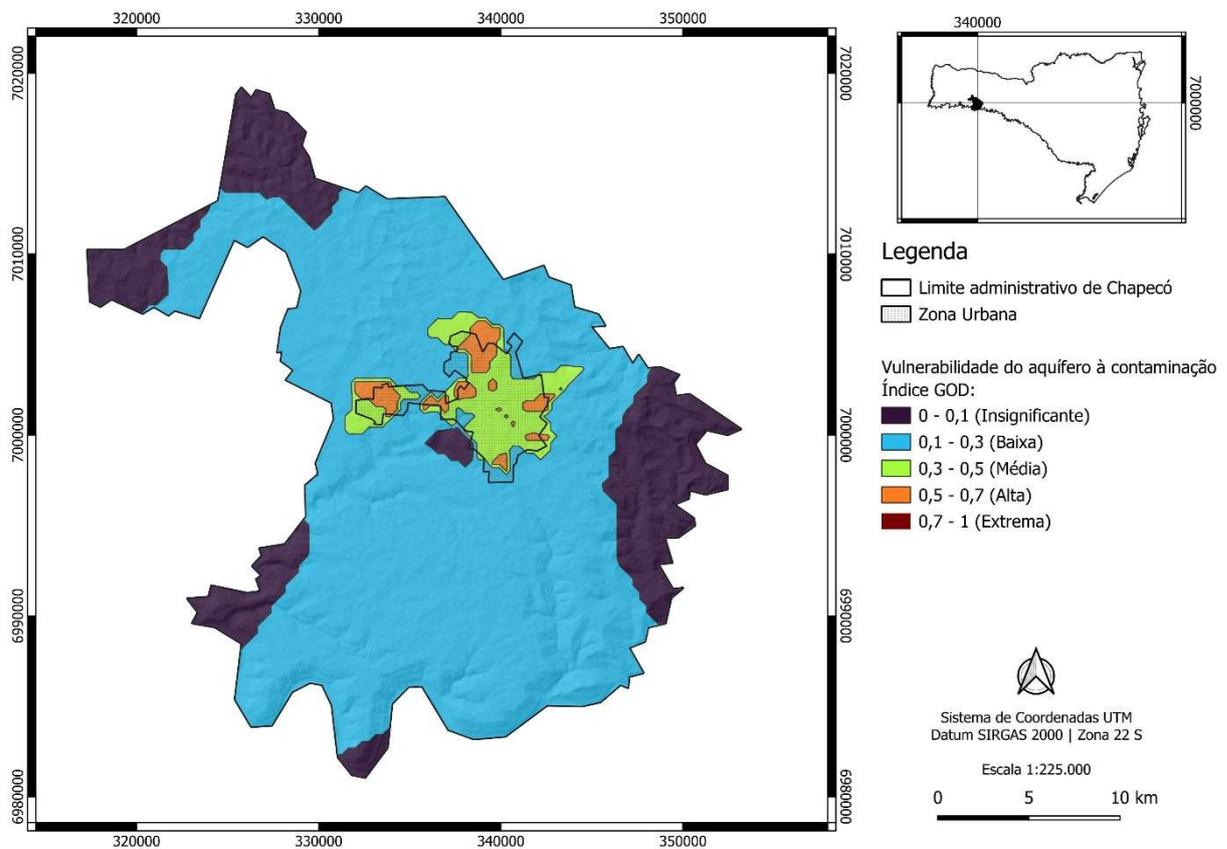
Figura 36 - Distribuição espacial dos 190 valores pontuais do índice de vulnerabilidade à contaminação obtidos através da aplicação da metodologia GOD.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch.

Os resultados obtidos através da aplicação das metodologias descritas ao longo dos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 deste trabalho, possibilitaram a elaboração de um mapa de vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó, Santa Catarina (Figura 37). Esse mapa fornece a representação da distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação de acordo com o método GOD (Foster & Hirata, 1988).

Figura 37 – Mapa da distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó – SC, de acordo com o método GOD.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch.

O referido mapa foi produzido por meio da utilização da ferramenta de cálculo de *grid* no *software* Surfer. Nesse processo, foram gerados três *grids*, apresentados anteriormente na forma de modelos de distribuição espacial dos parâmetros G, O e D, correspondentes a cada um dos parâmetros do método GOD. Esses *grids* foram combinados utilizando a fórmula matemática $G \times O \times D$, proposta por Foster & Hirata (1988), resultando em um valor único de índice de vulnerabilidade para cada célula do *grid*, que possui dimensões de 375 m x 375 m. Essa metodologia permitiu a criação de um mapa de vulnerabilidade final à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó - SC.

Com base no mapa apresentado anteriormente, na Figura 37, a Tabela 11 apresenta a distribuição da área total de cada índice GOD e a porcentagem correspondente em relação à área total do município de Chapecó - SC, que é de 626.060 km² (IBGE, 2022).

Tabela 11 - A tabela apresenta a área total de cada classe de índice GOD e sua porcentagem em relação à área total do município de Chapecó - SC

Índice GOD	Vulnerabilidade do aquífero à contaminação	Área (km ²)	%
> 0,1	Insignificante	118,52	18,9309
0,1-0,3	Baixa	463,89	74,0964
0,3-0,5	Média	32,67	5,2188
0,5-0,7	Alta	10,98	1,7537
0,7 - 1	Extrema	0,00	0,00
	Σ	626.060,0000	100,00

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

No contexto analisado, observa-se que a maior parte da extensão territorial do município de Chapecó apresenta baixa vulnerabilidade à contaminação, compreendendo aproximadamente 463,89 km², o que representa cerca de 74,09% da área total do município. A classe insignificante abrange 118,52 km² do território municipal, correspondendo a 18,93% da área total. Já a classe de vulnerabilidade média abrange aproximadamente 32,67 km², representando 5,21 % da área total do município. Destaca-se que a vulnerabilidade alta, que ocupa uma área de 10,98 km², encontra-se concentrada na zona urbana de Chapecó, representando 1,75% da área total do município. Não há ocorrência da classe de vulnerabilidade extrema dentro dos limites territoriais do município de Chapecó – SC, de acordo com a metodologia discutida e aplicada.

4.3. Aplicação do método DRASTIC

O método DRASTIC foi aplicado utilizando o mesmo banco de dados consolidado que foi previamente utilizado no método GOD, conforme detalhado no item 4.1 deste trabalho.

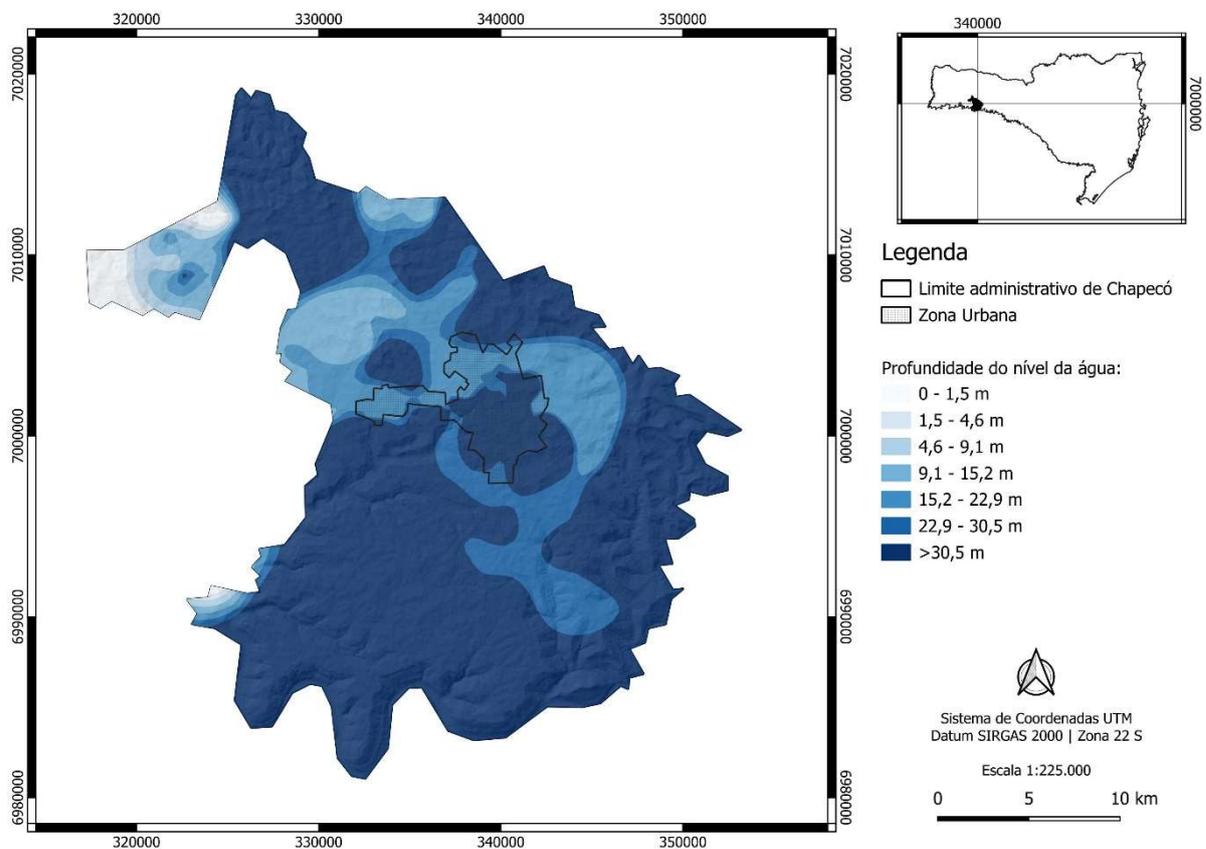
4.3.1. Parâmetro D

A atribuição dos pesos do parâmetro D (Profundidade do nível de água) no método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) foi o primeiro passo na sua aplicação às 190 ocorrências de água subterrânea. A profundidade do lençol freático, conforme detalhado anteriormente na Tabela 3, representa a espessura do material consolidado, que inclui solo e zona não saturada, que um potencial contaminante inserido na superfície do terreno deve percorrer para atingir o lençol freático. Profundidades maiores indicam um tempo de trânsito maior para que um contaminante

alcance o aquífero, aumentando a probabilidade de ocorrência de processos naturais de atenuação. Por outro lado, profundidades menores significam tempos de trânsito mais curtos, aumentando a probabilidade de um contaminante atingir rapidamente a zona saturada do aquífero.

A Figura 38 ilustra os intervalos de profundidade da água, representando o parâmetro D na aplicação do método DRASTIC para avaliar a vulnerabilidade do aquífero a fontes potenciais de contaminação. Esse mapa foi desenvolvido a partir do modelo anterior apresentado na Figura 31, discutido na seção 4.2.3 deste estudo, que abordou o parâmetro D do método GOD. Apesar de o parâmetro D do método DRASTIC indicar o nível estático do aquífero e o parâmetro D do método GOD representar o teto do aquífero, ambos utilizam o dado "nível estático" da coluna no banco de dados consolidado para atribuir pesos e realizar a estimativa. Assim, a Figura 38 reflete uma reclassificação dos intervalos de nível estático para apresentar as classes relevantes ao parâmetro D do método DRASTIC, conforme proposto por Aller *et al.* (1987).

Figura 38 - Representação dos intervalos de profundidade de água, parâmetro D.

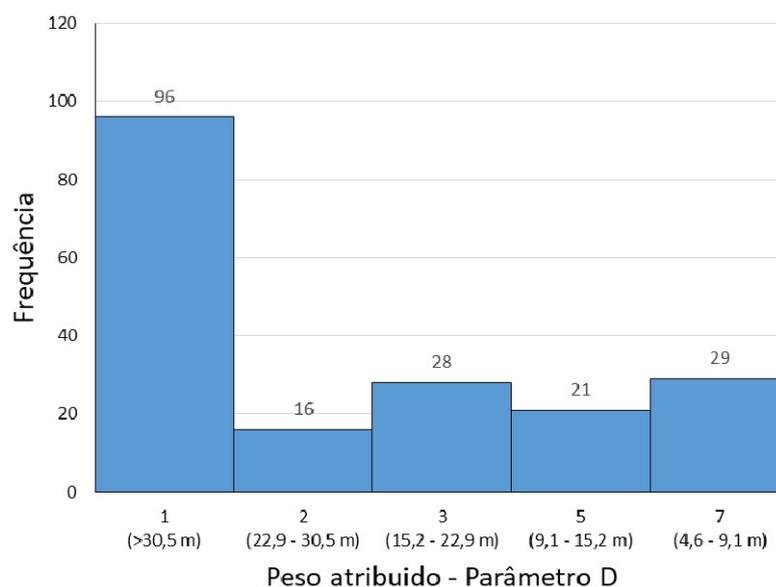


Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de SIAGAS (2023).

O modelo proposto, discutido na seção 4.2.3 deste estudo, foi submetido a processos de validação cruzada e estimativa no *software* Surfer, versão 25.2.259, tendo sido apresentados os gráficos referentes à validação cruzada na seção citada.

A Figura 39 exibe o histograma de distribuição de frequência para cada classe de profundidade nas ocorrências analisadas, juntamente com os valores atribuídos para o parâmetro D. Esse histograma permite visualizar a relação entre a profundidade e os pesos D designados às diferentes classes.

Figura 39 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro D atribuídos às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

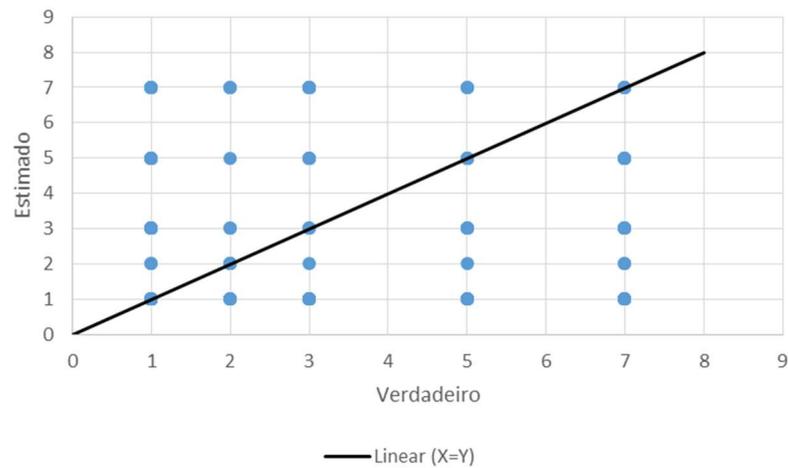


Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

A aplicação do método do vizinho mais próximo foi empregada para estimar o índice D, integrante do método DRASTIC, na área de estudo, após a classificação das 190 ocorrências de água subterrânea.

A Figura 40 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados para os 190 pontos investigados pelo algoritmo de validação cruzada do *software* Surfer, na versão 25.2.259. O coeficiente de correlação obtido entre os valores estimados e verdadeiros, conforme aplicado na metodologia descrita, foi de 0,4241. Essa medida sugere uma correlação de natureza moderada entre os dados estimados e os verdadeiros, de acordo com as classificações estabelecidas para coeficientes de correlação (Siegel, 1975).

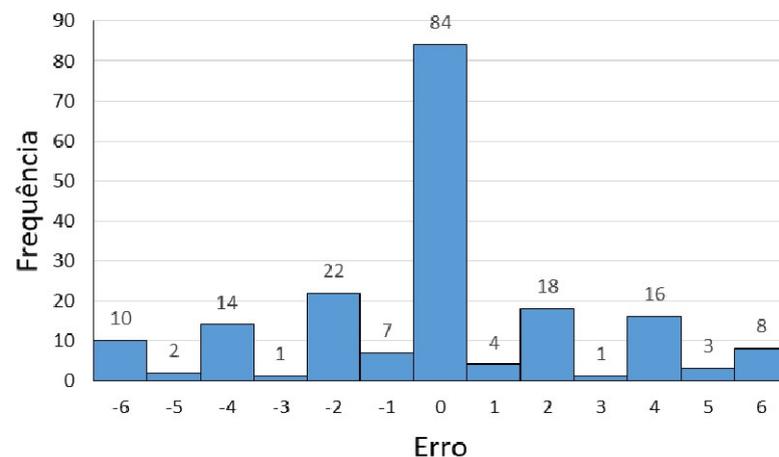
Figura 40 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice D.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

Na Figura 41, é apresentado o histograma da distribuição das discrepâncias entre os valores estimados e os valores reais nos 190 pontos testados. A análise estatística dos erros revela uma média próxima a zero (-0,0526), indicando que, em média, os valores estimados se aproximam dos valores reais. A mediana dos erros é igual a zero (0,00). O desvio padrão, de aproximadamente 2,7544, ressalta uma dispersão considerável dos erros em relação à média. O erro máximo e mínimo observado nos resultados foram, respectivamente, 6 e -6, evidenciando uma variação significativa nos extremos das estimativas.

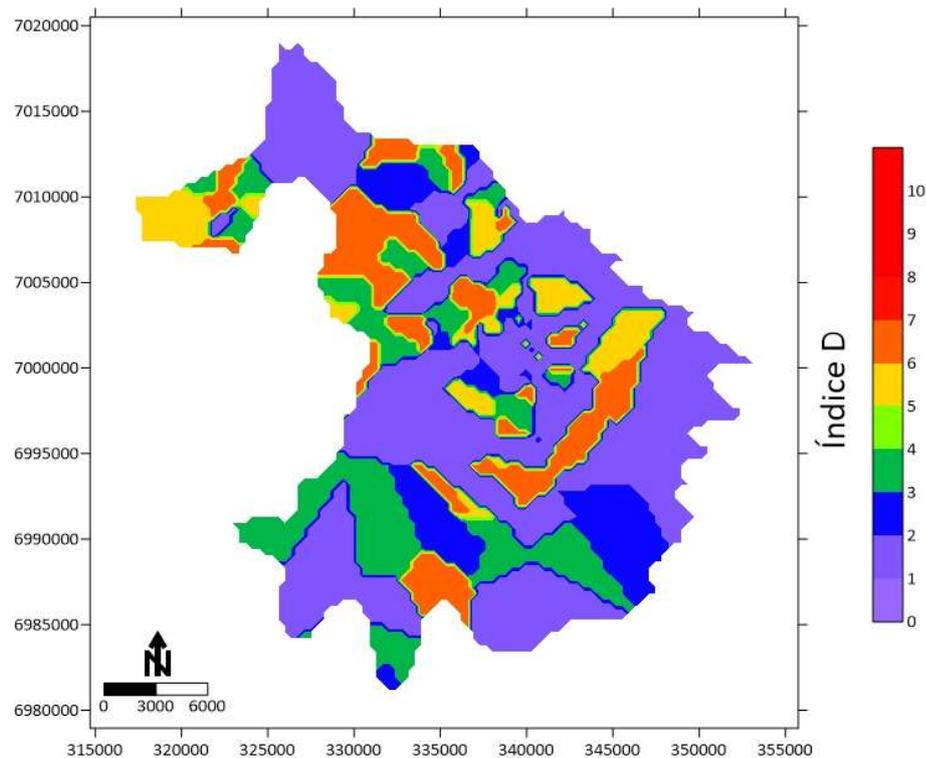
Figura 41 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice D.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

O mapa apresentado na Figura 42 constitui o resultado da aplicação da técnica de interpolação pelo método do vizinho mais próximo para os 190 índices associados ao parâmetro D, correspondentes às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

Figura 42 - Mapa da distribuição espacial do índice D na área de estudo, o município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259.

4.3.2. Parâmetro R

O conceito de recarga, no contexto hidrogeológico, é interpretado de maneiras diversas, adaptando-se ao arcabouço específico da investigação. Em termos gerais, recarga refere-se ao fluxo descendente de água que, ao se infiltrar no solo, alcança o sistema aquífero, contribuindo para um aumento no volume do reservatório subterrâneo (Lerner *et al.*, 1990).

A complexidade inerente à determinação da recarga de um aquífero é evidenciada pela diversidade de técnicas disponíveis e pela consideração de uma gama abrangente de fatores hidrogeológicos. Como apontado por Scanlon *et al.* (2002), a escolha da técnica apropriada demanda uma análise criteriosa da escala temporal e espacial, objetivos específicos da estimativa, características climáticas, geológicas, geomorfológicas e hidrológicas do local em

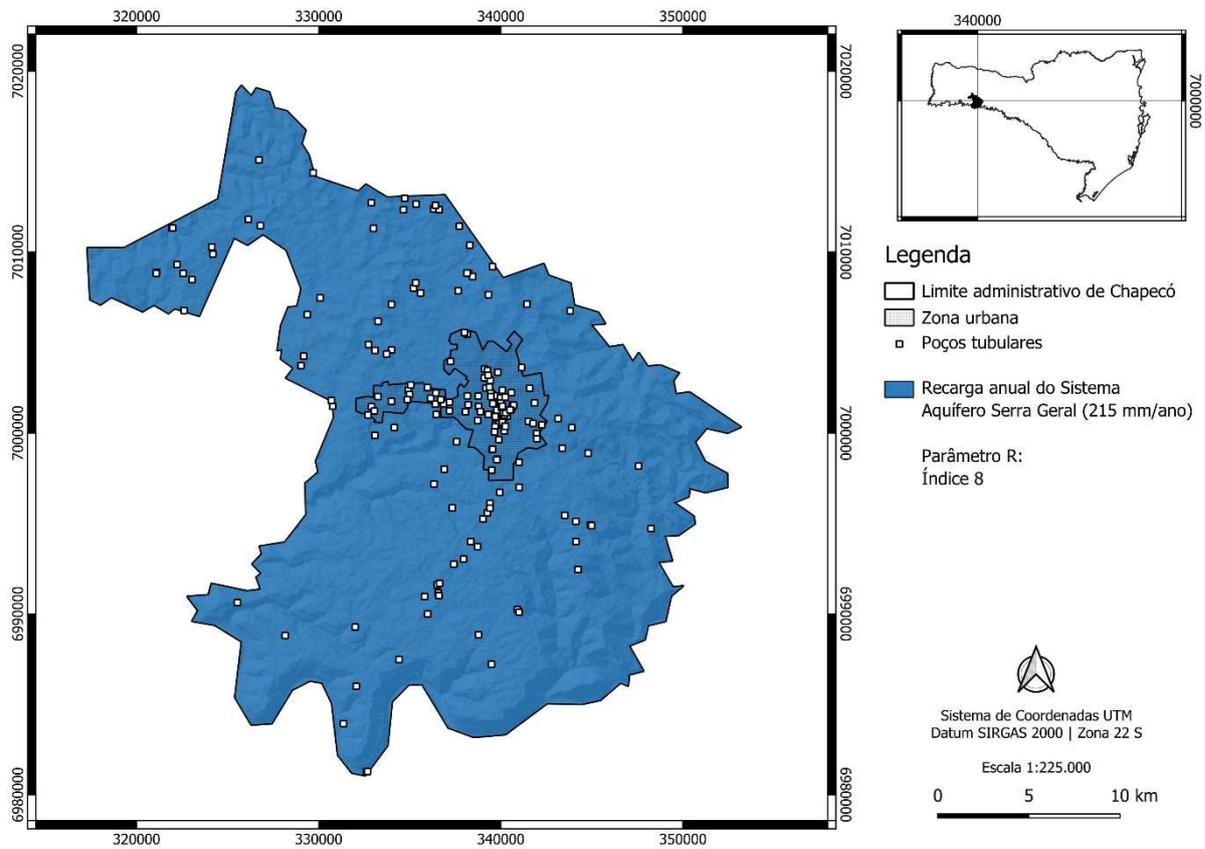
estudo. Adicionalmente, Wahnfried & Hirata (2005) ressaltam a importância de critérios práticos, como facilidade de aplicação, custo e disponibilidade de dados, no processo decisório.

Devido à complexidade inerente à determinação da recarga de um aquífero, conforme discutido anteriormente, a presente pesquisa adotou uma abordagem embasada em referência bibliográfica para determinar a recarga média anual do Sistema Aquífero Serra Geral. Diante da variedade de técnicas e considerações envolvidas, optou-se por fundamentar essa estimativa no trabalho de Rabelo (2006). Em sua tese de doutorado, Rabelo (2006) conduziu uma análise da recarga e do sistema de fluxo tanto no Sistema Aquífero Guarani quanto no Sistema Aquífero Serra Geral. Entre os resultados de sua pesquisa, destaca-se a determinação da recarga média anual do Sistema Aquífero Serra Geral, estimada em 215 mm/ano.

De acordo com a abordagem proposta por Aller *et al.* (1987), a Tabela 4, apresentada anteriormente neste trabalho, refere-se à quantidade de água pluvial que infiltra na superfície do terreno e atravessa a zona vadosa, alcançando o lençol freático. Sua importância está associada ao potencial de transporte de contaminantes por fluxo vertical. Quanto maior a quantidade de água, maiores quantidades de contaminantes podem ser transportadas e com maior velocidade em direção à zona saturada do aquífero.

A determinação da recarga média anual do Sistema Aquífero Serra Geral, conforme estabelecido por Rabelo (2006), foi o valor de 215 mm/ano. Nesse contexto, a atribuição do índice R à recarga, com base na metodologia proposta por Aller *et al.* (1987), posiciona-a na classe de 178 a 254 mm/ano, recebendo um índice R igual a 8 para a totalidade da área em estudo (Figura 43).

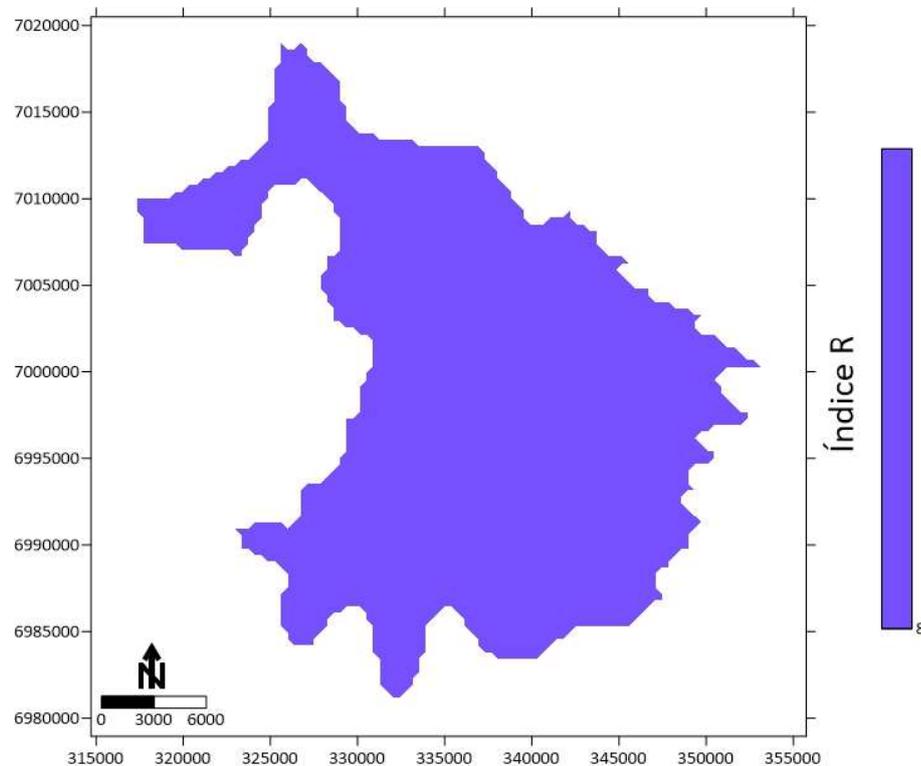
Figura 43 – Representação da distribuição espacial da recarga anual (mm/ano) do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó – SC, baseado nos dados de Rabelo (2006).



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de Rabelo (2006).

O mapa apresentado na Figura 44 constitui o resultado da aplicação da técnica de interpolação pelo método do vizinho mais próximo para os 190 índices associados ao parâmetro R, correspondentes às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas. Visto que neste caso o valor interpolado é constante para toda área investigada, não há erro associado a esta interpolação.

Figura 44 - Mapa da distribuição espacial do índice R na área de estudo, o município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259.

4.3.3. Parâmetro A

O parâmetro material do aquífero, conforme apresentado anteriormente na Tabela 5, está relacionado às características físicas dos aquíferos e como essas características influenciam a mobilidade de contaminantes no meio físico.

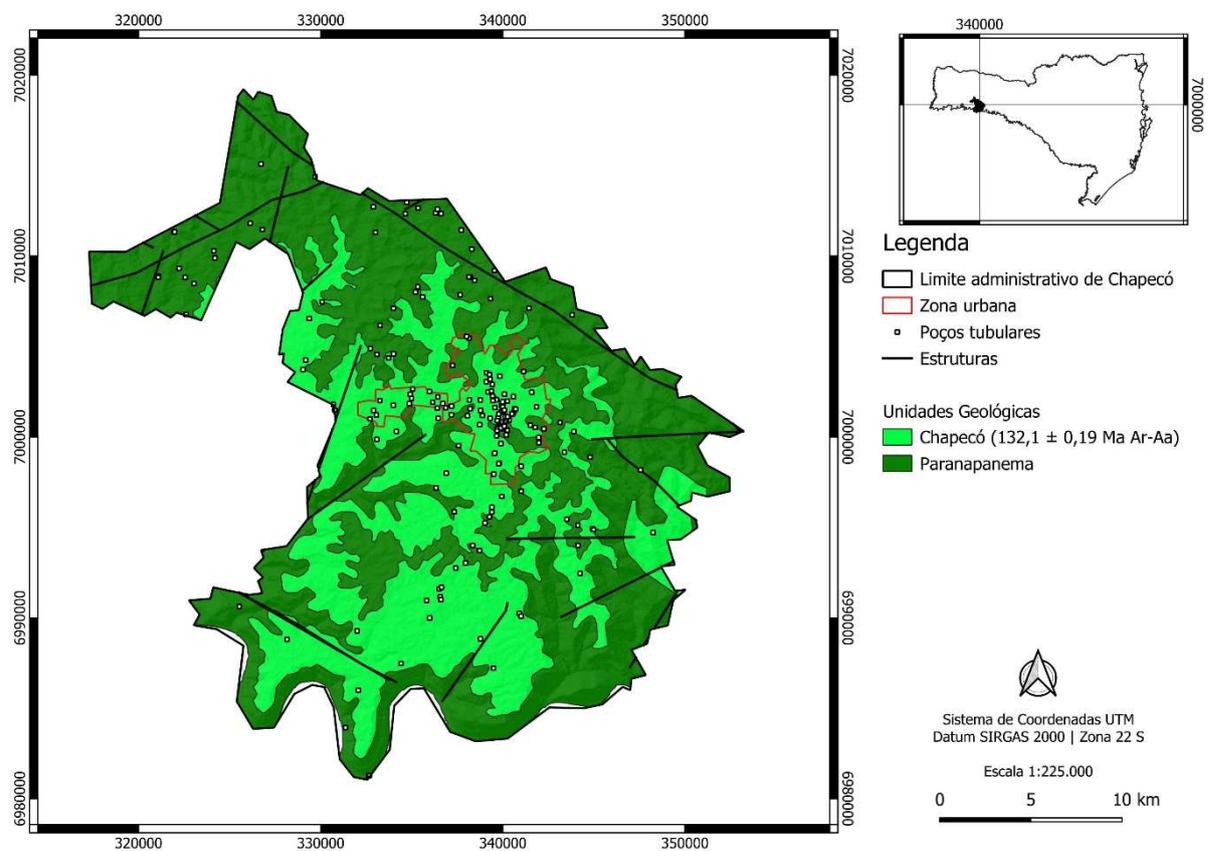
Na área de estudo, que abrange o município de Chapecó, duas formações geológicas do Supergrupo São Bento são de relevância. A Formação Paranapanema é predominante na região e é caracterizada por uma composição de basaltos microgranulares. Essas rochas frequentemente apresentam descontinuidades com alterações de coloração que variam de tons de vermelho a marrom e são marcadas pela presença de horizontes vesiculares consideráveis (CPRM, 2014).

Por outro lado, a Formação Chapecó, também presente na área de estudo, é composta por rochas ácidas que abrangem uma ampla gama de composições, variando de riolitos a riolitos (CPRM, 2014). Essas rochas possuem uma matriz de natureza vitrofírica e contêm a presença de pórfiros de feldspato. Além disso, no Sistema Aquífero Serra Geral, são observados

importantes fraturamentos e falhamentos que desempenham um papel significativo na recarga natural do aquífero por meio da precipitação, como documentado por Machado (2013).

No Estado de Santa Catarina, Freitas *et al.* (2002) registram frequentemente lineamentos morfoestruturais nas direções N30-50E e N40-60W. A Figura 45 representa o mapa geológico e estrutural do município de Chapecó - SC, apresentando a distribuição espacial do 190 poços tubulares analisados.

Figura 45 - Mapa geológico e estrutural do município de Chapecó - SC, apresentando a distribuição espacial do 190 poços tubulares analisados.



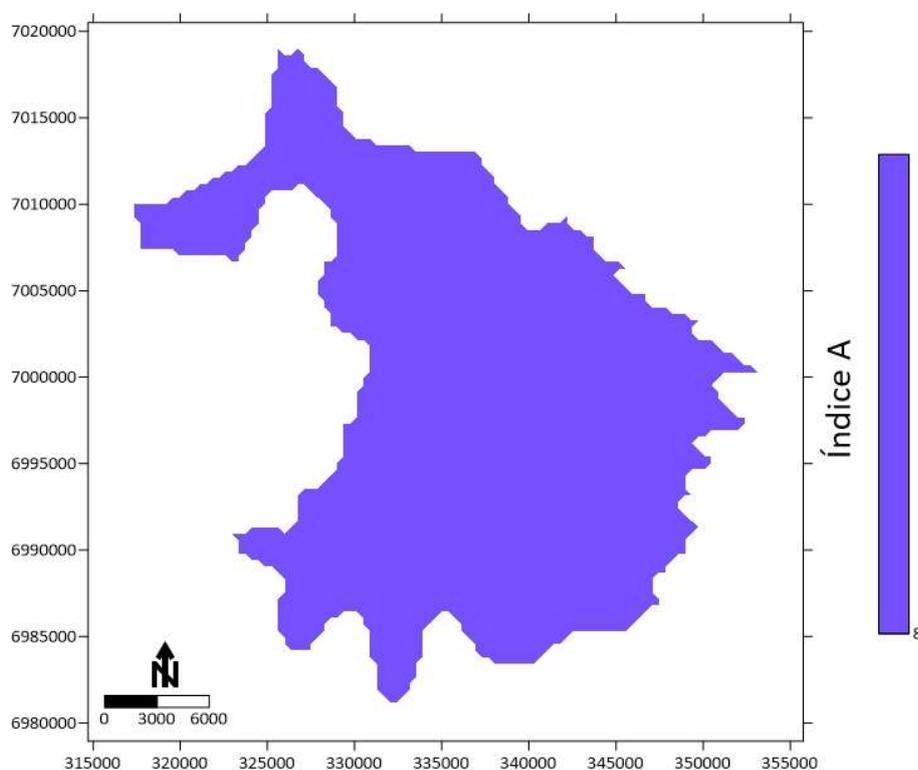
Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de CPRM (2021).

De acordo com a abordagem proposta por Aller *et al.* (1987), o índice A atribuído ao material do aquífero "basalto" varia de 2 a 10. No contexto específico do município de Chapecó, onde o Sistema Aquífero Serra Geral se manifesta de forma não confinada, mesmo que com cobertura de solo, suas características estruturais são marcadas por descontinuidades horizontais. Essas descontinuidades têm origem na gênese do pacote magmático, que ocorreu por meio do fluxo de lavas tabulares, as quais foram posteriormente interconectadas por fraturas verticais de origem tectônica, conforme detalhado por Machado (2013). No que se refere ao

parâmetro A, foi atribuído o índice 8 a todas as ocorrências de água subterrânea no município, refletindo as propriedades físicas do aquífero local e seu comportamento hidrogeológico.

O mapa apresentado na Figura 46 constitui o resultado da aplicação da técnica de interpolação pelo método do vizinho mais próximo para os 190 índices associados ao parâmetro A, correspondentes às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas. Visto que neste caso o valor interpolado é constante para toda área investigada, não há erro associado a esta interpolação.

Figura 46 - Mapa da distribuição espacial do índice A na área de estudo, o município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259.

4.3.4. Parâmetro S

Seguindo a proposta de Aller *et al.* (1987), o tipo de solo, conforme descrito anteriormente na Tabela 6, exerce uma influência na hidrodinâmica local, de maneira semelhante ao material do aquífero. No entanto, neste contexto, refere-se ao solo situado acima da zona vadosa. O mapa pedológico da área de estudo foi previamente apresentado no item 4.2.2 deste trabalho, quando foi abordado e discutido o parâmetro O no contexto da metodologia GOD.

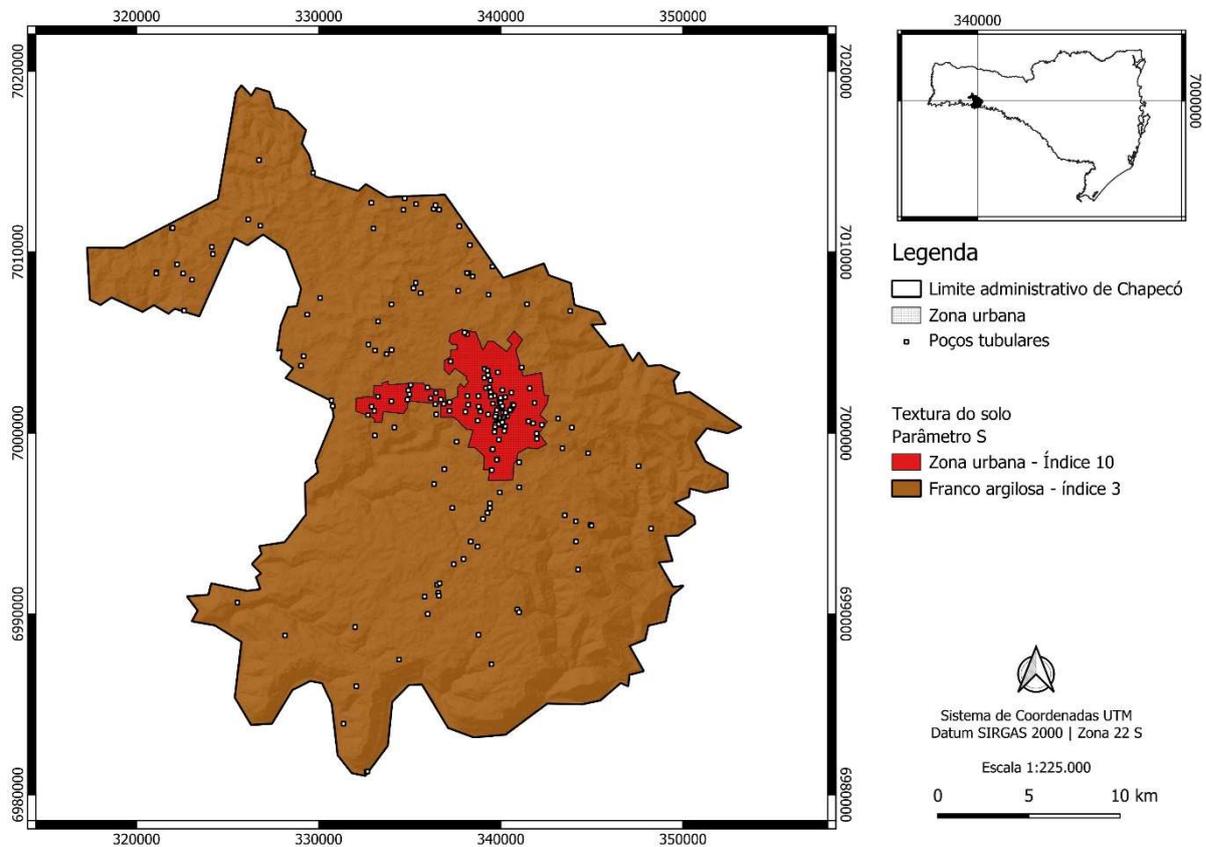
Novamente, as informações sobre a presença de estratos de cobertura foram obtidas a partir do mapeamento de recursos naturais do Brasil, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala 1:250.000. No município de Chapecó, foram identificadas seis unidades de solo, incluindo Área Urbana, Corpo d'água continental (Rio Uruguai), CXvef - Cambissolo Háptico Ta Eutroférico, LVaf - Latossolo Vermelho Aluminoférico, Nvef - Nitossolo Vermelho Eutroférico e RLm - Neossolo Litólico Chernossólico.

As unidades de solo mapeadas por IBGE (2018) na área de estudo apresentam uma variedade de texturas, importantes para compreender a dinâmica hídrica e a vulnerabilidade à contaminação. O CXvef - Cambissolo Háptico Ta Eutroférico é caracterizado por uma textura argilosa, indicando a presença de partículas finas. Já o LVaf - Latossolo Vermelho Aluminoférico e o Nvef - Nitossolo Vermelho Eutroférico exibem texturas muito argilosas, sugerindo uma maior retenção de água e potencial influência na mobilidade de substâncias no perfil do solo. Por fim, o RLm - Neossolo Litólico Chernossólico apresenta uma textura média a argilosa, indicando uma composição de solo que se situa entre texturas mais arenosas e argilosas. Ainda assim, de acordo com a Tabela 6, todas estas unidades são caracterizadas como franco argilosas, sendo atribuídas a elas, portanto, o índice 3 ao que diz respeito ao parâmetro S.

A unidade de solo designada como "Área Urbana" apresenta características específicas relacionadas à intensa ação antrópica, resultando em uma estrutura do solo perturbada. A influência das atividades humanas nesse contexto aumenta significativamente a vulnerabilidade do solo à contaminação. Em consonância com o critério estabelecido anteriormente no item 4.2.2 deste trabalho, onde índices mais altos indicam maior vulnerabilidade, foi atribuído o valor máximo de 10 para o índice S desta unidade. Essa determinação reflete a máxima susceptibilidade dessa área à contaminação.

A Figura 47 apresenta a relação entre as unidades de solo, suas respectivas texturas conforme a classificação do IBGE (2018) e os pesos atribuídos ao parâmetro S para os 190 poços tubulares analisados.

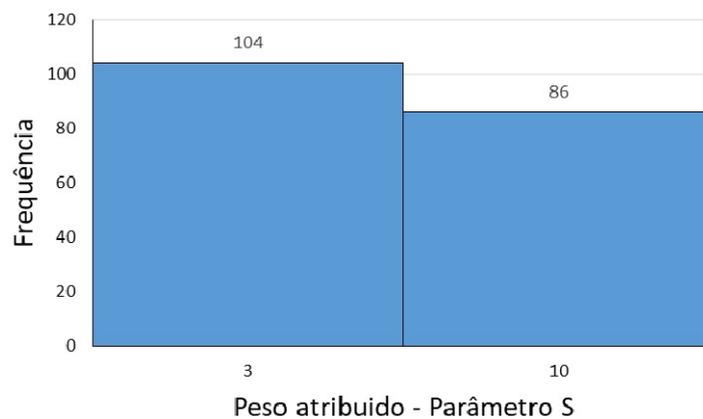
Figura 47 - Relação entre as unidades de solo, suas texturas de acordo com a classificação do IBGE (2018), e os pesos atribuídos ao parâmetro S para os 190 poços tubulares analisados.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de IBGE (2018).

A Figura 48 exibe o histograma de distribuição de frequência dos pesos associados ao parâmetro S em relação às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas. Esses pesos refletem a classificação quanto ao tipo de solo que cobre o aquífero.

Figura 48 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro S atribuídos às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

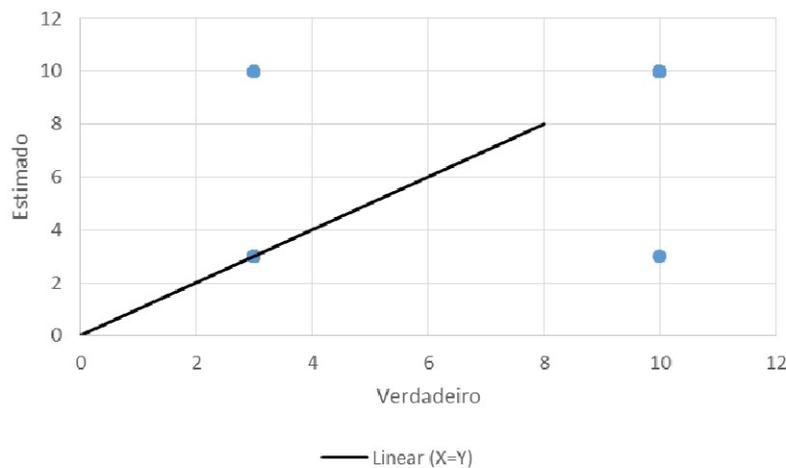


Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

Posteriormente, a aplicação do método do vizinho mais próximo foi empregada para estimar o índice S, integrante do método DRASTIC, na área de estudo, após a classificação das 190 ocorrências de água subterrânea.

A Figura 49 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados para os 190 pontos investigados pelo algoritmo de validação cruzada do *software* Surfer, na versão 25.2.259. O coeficiente de correlação obtido entre os valores estimados e verdadeiros, conforme aplicado na metodologia descrita, foi de 0,8766. Essa medida sugere uma correlação de natureza forte entre os dados estimados e os verdadeiros, de acordo com as classificações estabelecidas para coeficientes de correlação (Siegel, 1975).

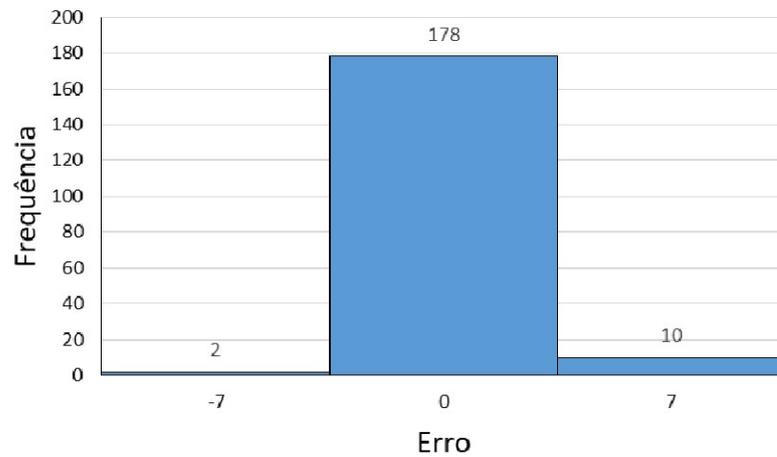
Figura 49 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice S.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

Na Figura 50, apresenta-se o histograma representando a distribuição das diferenças entre os valores estimados e os valores reais obtidos nos 190 pontos testados. Os dados estatísticos revelam uma média dos erros próxima a zero (0,2947), indicando que, em média, os valores estimados se aproximam dos valores reais. A mediana dos erros permanece em zero. O desvio padrão, calculado em aproximadamente 1,7343, demonstra uma dispersão considerável dos erros em relação à média. Observou-se um erro máximo de 7 e um erro mínimo de -7, ilustrando uma variação notável nos extremos das estimativas.

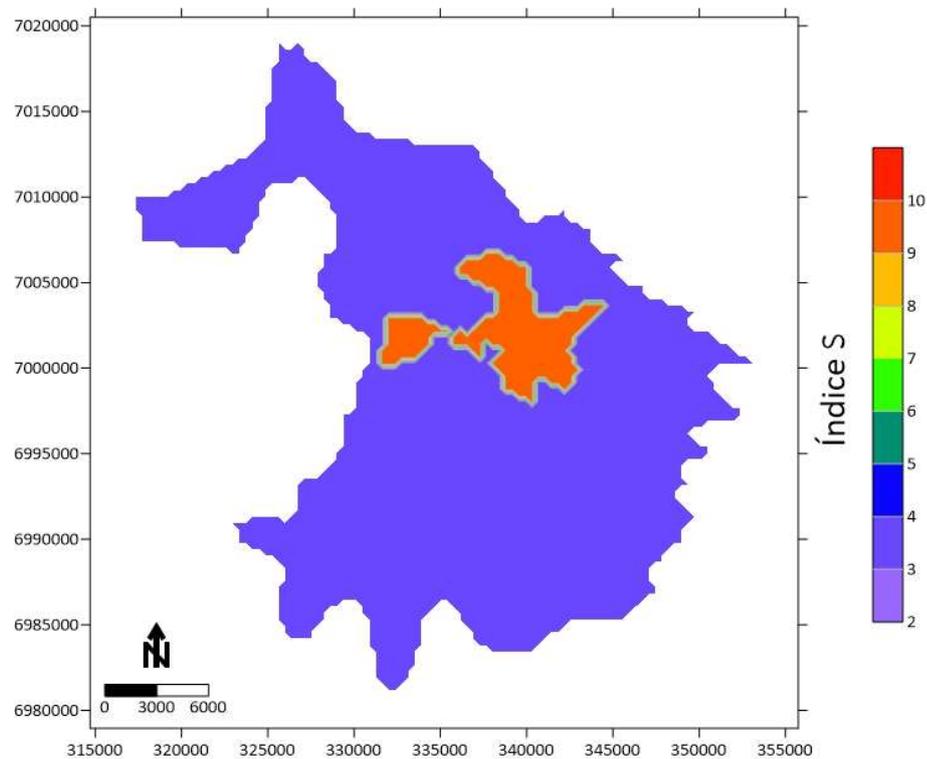
Figura 50 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice S.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

O mapa apresentado na Figura 51 constitui o resultado da aplicação da técnica de interpolação pelo método do vizinho mais próximo para os 190 índices associados ao parâmetro S, correspondentes às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

Figura 51 - Mapa da distribuição espacial do índice S na área de estudo, o município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259.

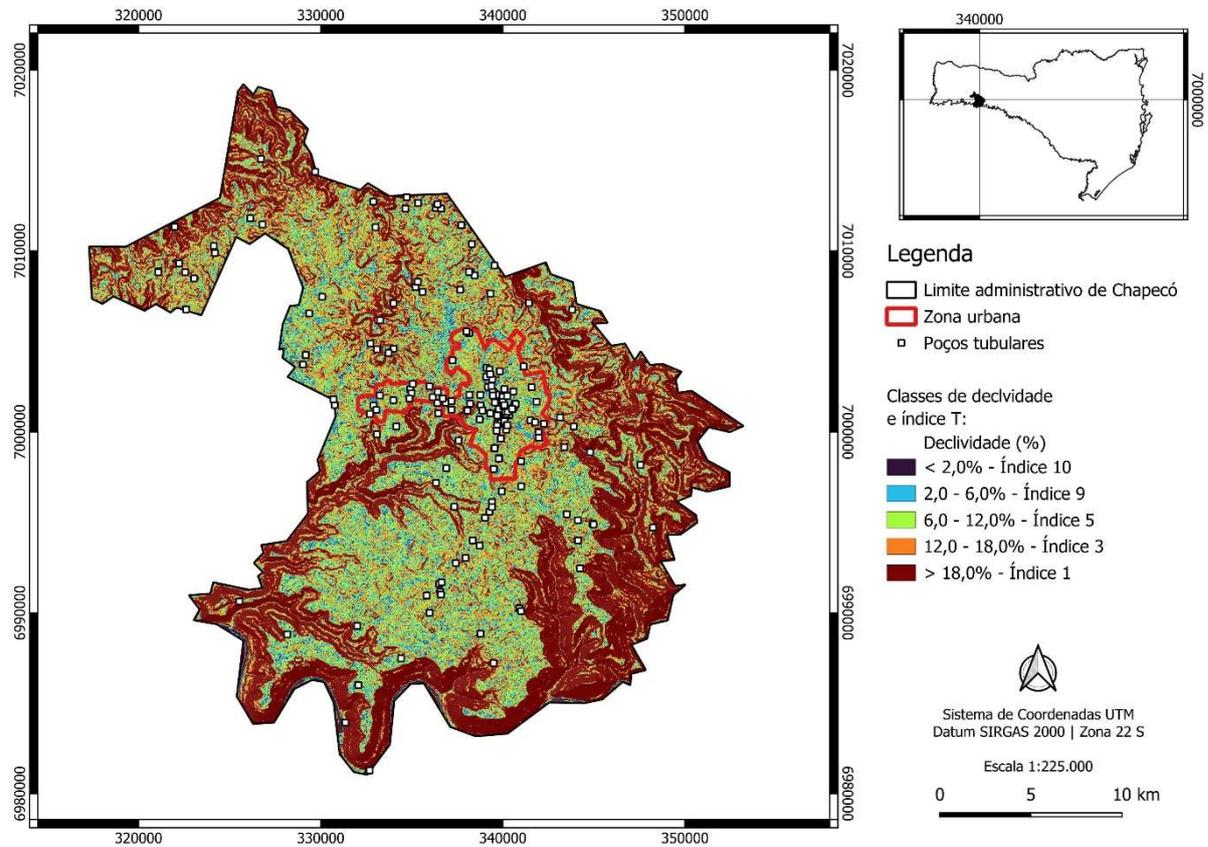
4.3.5. Parâmetro T

Na análise da topografia, utilizou-se o modelo digital de elevação derivado da imagem do satélite ALOS PALSAR (2011) e a ferramenta de análise de declividade no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Estabeleceram-se classes de declividade em porcentagem, associadas aos valores do índice T, conforme proposto por Aller *et al.* (1987). O índice T foi atribuído considerando diferentes faixas de declividade: < 2%, 2-6%, 6-12%, 12-18%, e > 18%, com valores de índice 10, 9, 5, 3 e 1, respectivamente.

Após a geração do mapa de declividade, como mencionado anteriormente, procedeu-se à determinação da declividade específica para cada um dos 190 poços tubulares analisados. Utilizou-se a ferramenta complementar ao QGIS chamada SAGA *Next Generation*, que atribuiu a cada ponto vetorial, representando os poços tubulares, o valor de declividade correspondente ao *pixel* da camada raster que expressa a declividade em porcentagem.

A Figura 52 apresenta o mapa de declividade do município de Chapecó - SC, integrando a distribuição espacial dos 190 poços tubulares analisados e a atribuição do valor do índice T de acordo com as classes de declividade estabelecidas. Essa representação visual permite uma visualização da relação entre a topografia local e a vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral, destacando áreas com diferentes níveis de declividade e, conseqüentemente, distintos graus de susceptibilidade à contaminação.

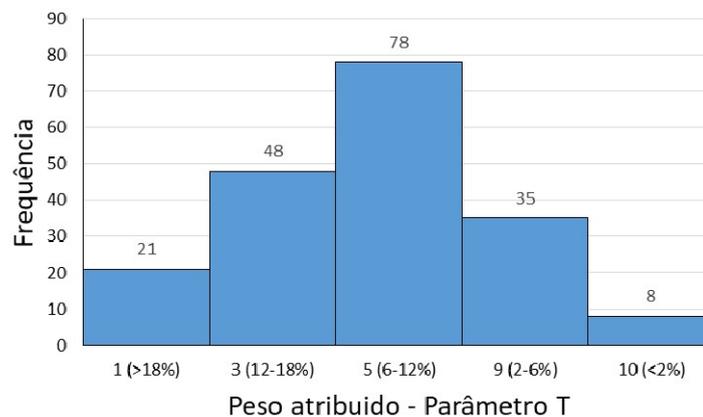
Figura 52 - Mapa de declividade do município de Chapecó - SC, com a integração da distribuição espacial dos 190 poços tubulares analisados associados ao valor do índice T conforme classe de declividade.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de ALOS PALSAR (2011).

A Figura 53 exibe o histograma de distribuição de frequência dos pesos associados ao parâmetro T em relação às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

Figura 53 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro T atribuídos às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

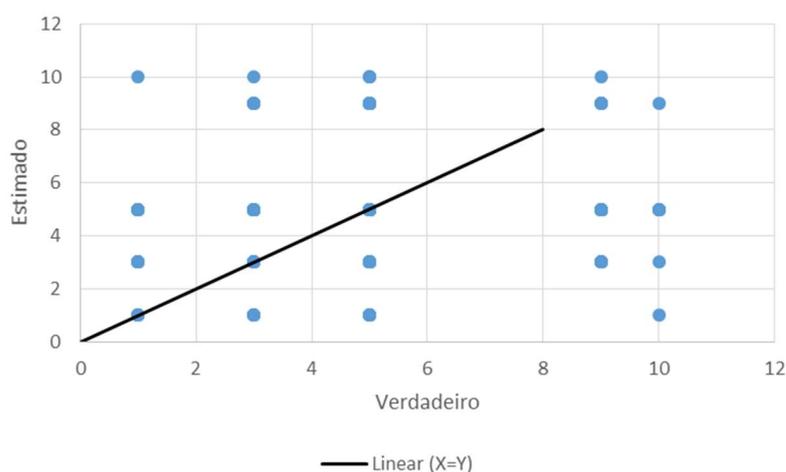


Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

Posteriormente, a aplicação do método do vizinho mais próximo foi empregada para estimar o índice T, integrante do método DRASTIC, na área de estudo, após a classificação das 190 ocorrências de água subterrânea.

A Figura 54 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados para os 190 pontos investigados pelo algoritmo de validação cruzada do *software* Surfer, na versão 25.2.259. O coeficiente de correlação obtido entre os valores estimados e verdadeiros, conforme aplicado na metodologia descrita, foi de 0,3467. Essa medida sugere uma correlação de natureza baixa entre os dados estimados e os verdadeiros, de acordo com as classificações estabelecidas para coeficientes de correlação (Siegel, 1975).

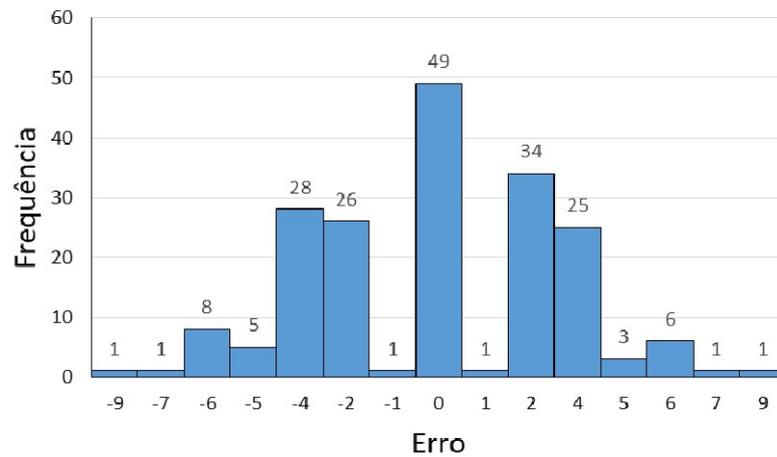
Figura 54 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice T.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

Na Figura 55, apresenta-se o histograma da distribuição das discrepâncias entre os valores estimados e os valores reais nos 190 pontos testados. Em uma análise estatística dos dados, a média dos erros revelou-se próxima a zero (-0,0947), sugerindo que, em média, os valores estimados se aproximam dos valores reais. A mediana permaneceu em zero. O desvio padrão, calculado em aproximadamente 3,2866, aponta uma dispersão considerável dos erros em relação à média. O erro máximo foi de 9, enquanto o mínimo foi de -9, ilustrando uma variação substancial nos extremos das estimativas.

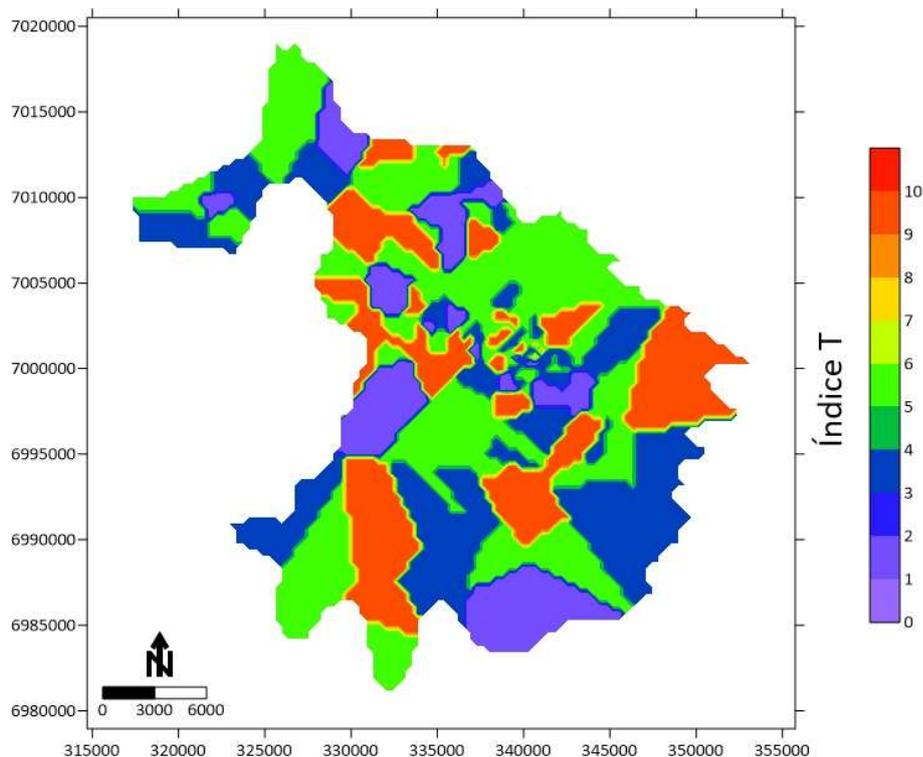
Figura 55 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice T.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

O mapa apresentado na Figura 56 constitui o resultado da aplicação da técnica de interpolação pelo método do vizinho mais próximo para os 190 índices associados ao parâmetro T, correspondentes às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

Figura 56 - Mapa da distribuição espacial do índice T na área de estudo, o município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259.

4.3.6. Parâmetro I

De acordo Aller *et al.* (1987) o parâmetro I refere-se à "influência da zona vadosa", ou seja, a área não saturada acima da zona saturada do aquífero, sendo os valores do índice atribuídos conforme apresentado anteriormente na Tabela 8. O parâmetro "influência da zona vadosa" refere-se ao tipo de material que compõe essa zona, levando em consideração o tempo de contato com o contaminante. Essa caracterização é importante, uma vez que influencia a ocorrência de diversos processos físico-químicos atenuantes de contaminação nessa região, tais como a diluição, retardação ou mesmo eliminação.

A zona de aeração, também conhecida como zona não saturada ou zona vadosa, é a camada subsuperficial localizada entre a superfície freática e a superfície do terreno. De acordo com Feitosa *et al.* (2008), nessa região, os poros estão parcialmente preenchidos por gases, principalmente ar e vapor d'água, além da presença de água.

A caracterização dessa zona, resultante do intemperismo das formações geológicas, envolve a espacialização do solo residual originado desse processo. Para mapeamento e

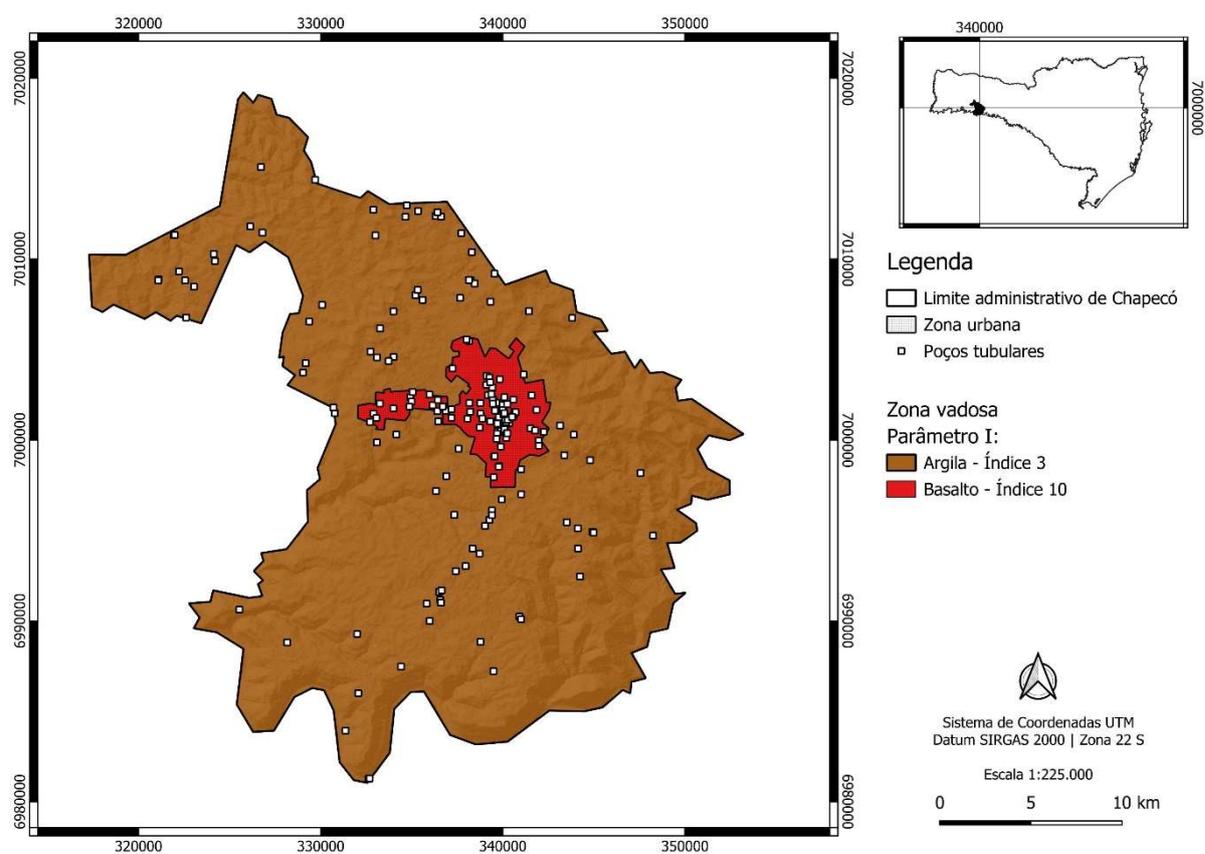
determinação das classes de vulnerabilidade, foi adotada uma abordagem que associa o principal material constituinte desse solo residual aos índices DRASTIC. Essa consideração é importante para compreender como as características do solo residual influenciam diretamente os índices de vulnerabilidade e, por conseguinte, a propagação da contaminação no aquífero.

De maneira análoga ao critério empregado na definição do parâmetro S, relacionado ao tipo de solo que recobre o aquífero, para o mapeamento da distribuição espacial do material constituinte da zona não saturada, utilizaram-se informações sobre a presença de estratos de cobertura. Esses dados foram obtidos por meio do mapeamento de recursos naturais do Brasil, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala 1:250.000.

Com base na classificação de textura do solo apresentada pelo IBGE (2018) para o município de Chapecó - SC, todas as unidades de solo mapeadas, incluindo CXvef - Cambissolo Háplico Ta Eutroférico, LVaf - Latossolo Vermelho Aluminoférico, Nvef - Nitossolo Vermelho Eutroférico, e RLm - Neossolo Litólico Chernossólico, são categorizadas como argilosas, conforme apresentado na Tabela 8 deste trabalho. Seguindo a abordagem de Aller *et al.* (1987), essas unidades de solo recebem um valor de índice I igual a 3.

A unidade de solo designada como "Área Urbana" exibe características particulares associadas à ação antrópica intensa, o que resulta em uma estrutura do solo perturbada. Novamente, seguindo o critério de atribuição de índices com valores elevados para indicar maior vulnerabilidade, adotou-se a abordagem de atribuir um índice mais alto. Neste contexto, considerou-se que a zona vadosa dentro dos limites da zona urbana corresponde à própria rocha basáltica, reforçando a predisposição à contaminação devido às atividades humanas presentes nessa área. A Figura 57 apresenta a relação entre as características da zona vadosa e os pesos atribuídos ao parâmetro I para os 190 poços tubulares analisados.

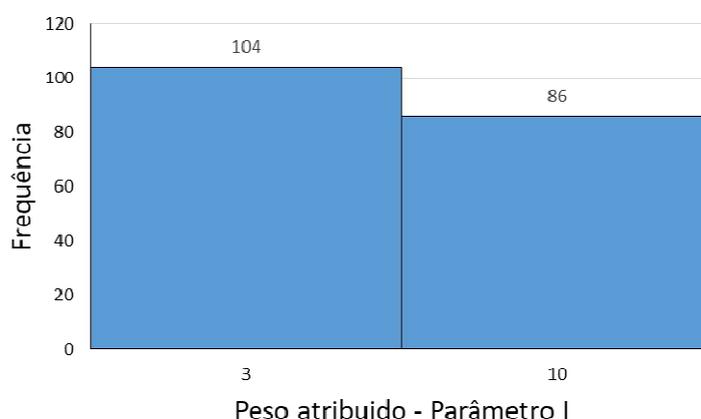
Figura 57 – Mapa exibindo a relação entre a característica da zona vadosa e os pesos atribuídos ao parâmetro I para os 190 poços tubulares analisados.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de IBGE (2018).

A Figura 58 exibe o histograma de distribuição de frequência dos pesos associados ao parâmetro I em relação às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas. Esses pesos refletem a classificação quanto à composição da zona vadosa sobre o aquífero.

Figura 58 - Histograma de distribuição de frequência dos pesos do parâmetro I atribuídos às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

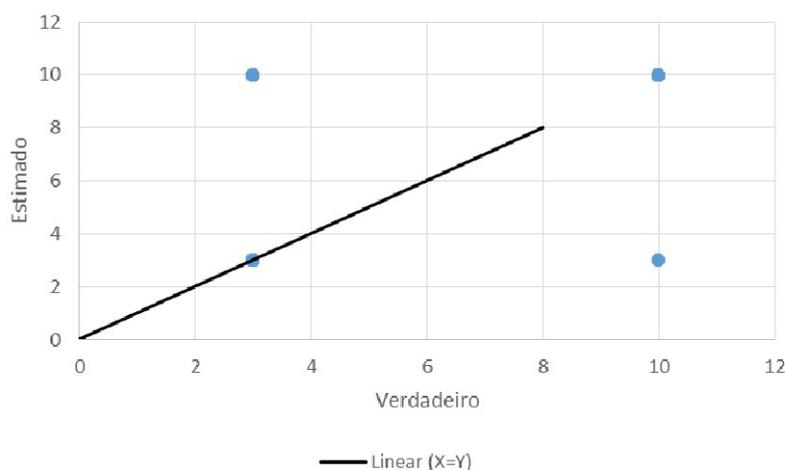


Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

Posteriormente, a aplicação do método do vizinho mais próximo foi empregada para estimar o índice I, integrante do método DRASTIC, na área de estudo, após a classificação das 190 ocorrências de água subterrânea.

A Figura 59 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados para os 190 pontos investigados pelo algoritmo de validação cruzada do *software* Surfer, na versão 25.2.259. O coeficiente de correlação obtido entre os valores estimados e verdadeiros, conforme aplicado na metodologia descrita, foi de 0,8766. Essa medida sugere uma correlação de natureza forte entre os dados estimados e os verdadeiros, de acordo com as classificações estabelecidas para coeficientes de correlação (Siegel, 1975).

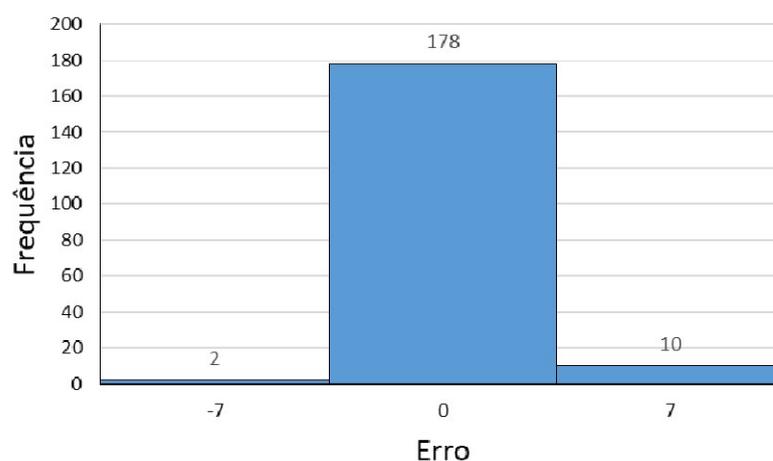
Figura 59 - Diagrama de dispersão entre os valores reais e os valores estimados durante o processo de validação cruzada para estimativa do índice I.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

A Figura 60 exibe o histograma da distribuição das frequências das classes de erro, representando a diferença entre o valor estimado e o valor real nos 190 pontos testados. Os resultados revelaram uma média positiva (0,2947), indicando que, em média, os valores estimados se afastam ligeiramente dos valores reais. A mediana permaneceu em zero. O desvio padrão, aproximadamente 1,7343, mostra uma dispersão moderada dos erros em relação à média. O erro máximo registrado foi de 7, enquanto o mínimo foi de -7, ilustrando uma variação considerável entre os extremos das estimativas.

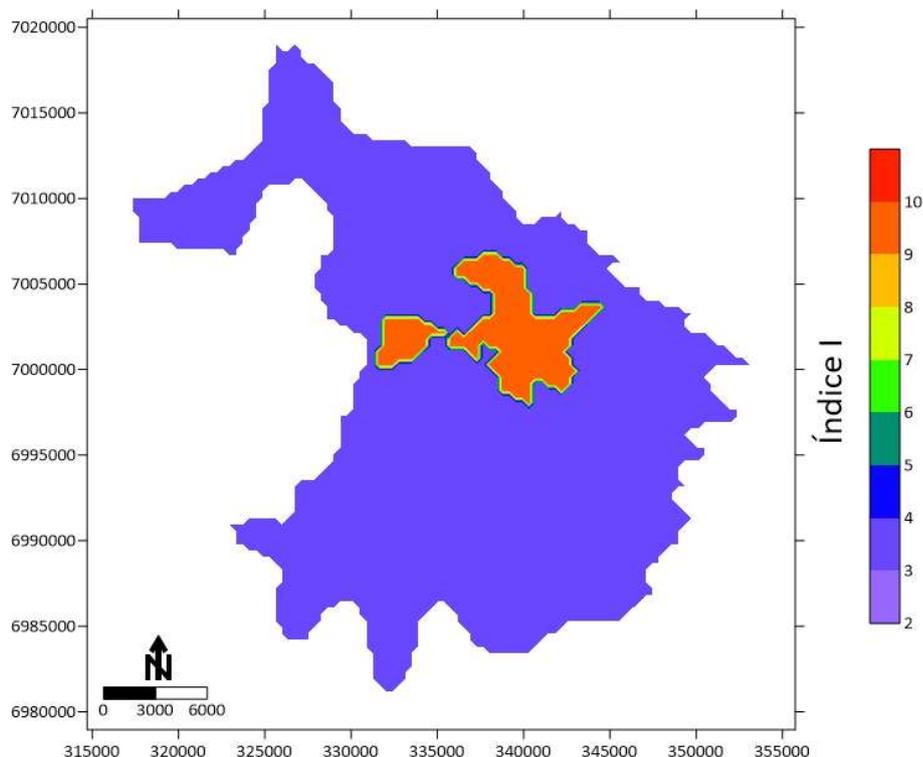
Figura 60 - Histograma exibindo a distribuição de frequência do erro associado à estimativa do índice I.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

O mapa apresentado na Figura 61 constitui o resultado da aplicação da técnica de interpolação pelo método do vizinho mais próximo para os 190 índices associados ao parâmetro I, correspondentes às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

Figura 61 - Mapa da distribuição espacial do índice I na área de estudo, o município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259.

4.3.7. Parâmetro C

A Condutividade Hidráulica é o parâmetro que expressa a facilidade ou dificuldade com que a água se desloca nos poros, fraturas e cavidades presentes na zona saturada do aquífero. Essa propriedade é importante para compreender a capacidade do aquífero em permitir o fluxo de água, desempenhando, assim, um papel fundamental na dinâmica hídrica subterrânea.

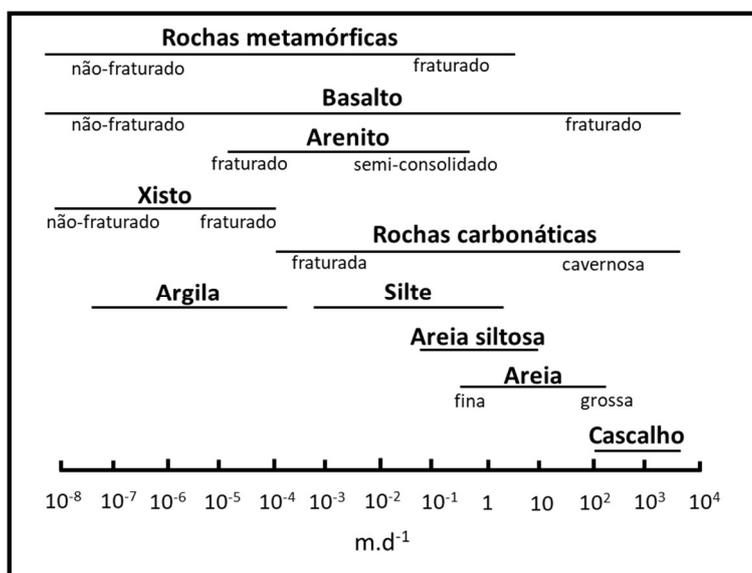
De acordo com Feitosa *et al.* (2008), amostras sólidas e não fraturadas de rochas ígneas possuem porosidades praticamente nulas. Os vazios intercrystalinos condicionantes da porosidade são mínimos e não interconectados. Por esta razão, as permeabilidades primárias dessas rochas, expressas como condutividade hidráulica, são extremamente pequenas, na ordem de 10^{-11} a 10^{-13} m/s.

Machado (2013) destaca que, do ponto de vista hidrogeológico, as rochas do Sistema Aquífero Serra Geral manifestam-se como aquíferos fraturados. Nesse contexto, tanto a condutividade hidráulica quanto a porosidade, são consideradas características secundárias, e

resultam das discontinuidades, como fraturamentos, intercalação de zonas amidgdalóides, contatos entre derrames e leitos de paleossolos, ou mesmo áreas com intenso intemperismo.

Considerando a situação descrita, Heath (2004) propõe faixas de valores de condutividade hidráulica (m/dia) para materiais com diferentes propriedades reológicas (Figura 62). Segundo o autor, a condutividade hidráulica do basalto, a rocha reservatório do Sistema Aquífero Serra Geral, varia em ordens de grandeza dependendo do grau de fraturamento. Essa variação abrange valores da ordem de 10^{-8} m/dia para basalto não fraturado, até 10^4 m/dia para basaltos fraturados. Essa ampla gama de valores destaca a influência significativa do fraturamento na capacidade de fluxo de água nesse tipo de formação rochosa.

Figura 62 - Faixas de valor de condutividade hidráulica (m/dia) para diversos materiais geológicos.



Fonte: Modificado de Heath (2004).

O estudo de Heath (2004) fornece uma ampla faixa de valores de condutividade hidráulica para rochas basálticas, variando de acordo com o grau de fraturamento. No entanto, ao aplicar esses valores na determinação dos índices do parâmetro C para as classes de condutividade hidráulica (m/dia), conforme proposto por Aller *et al.* (1987), a contribuição específica dessas variações não se torna objetiva.

De acordo com a classificação proposta por Aller *et al.* (1987), a atribuição de índices para diferentes faixas de condutividade hidráulica segue a seguinte escala: para condutividades hidráulicas inferiores a 4,1 m/dia, o índice atribuído é 1. Na faixa de 4,1 a 12,2 m/dia, o índice

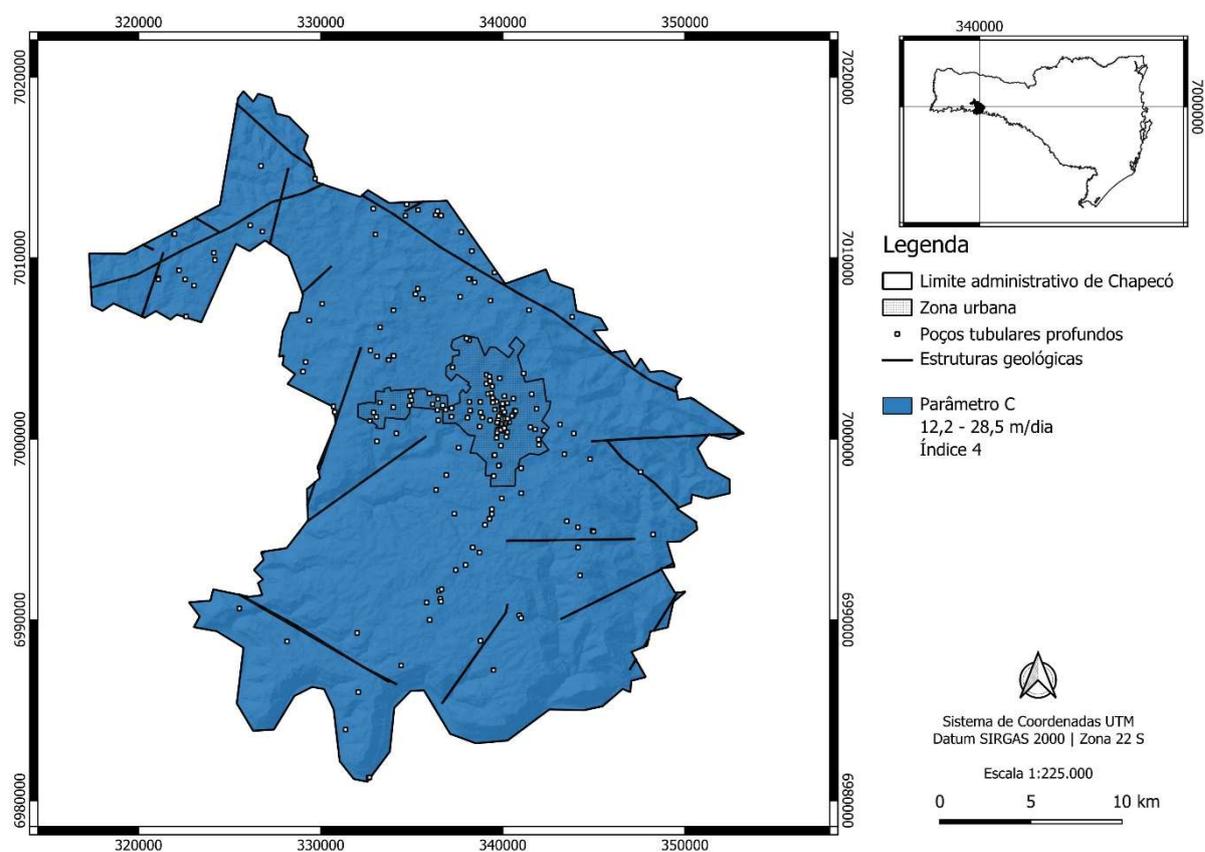
é 2. Para condutividades entre 12,2 e 28,5 m/dia, o índice atribuído é 4. Na faixa de 28,5 a 40,7 m/dia, o índice é 6. Para condutividades entre 40,7 e 81,5 m/dia, o índice é 8. Para valores de condutividade superiores a 81,5 m/dia, o índice atribuído é 10.

No entanto, para uma análise mais precisa e contextualizada, Giampá & Gonçalves (2013) sugerem valores absolutos de condutividade hidráulica de rochas cristalinas fraturadas. Os dados fornecidos pelos autores variam de 8×10^{-7} cm/s a 3×10^{-2} cm/s. Convertendo esses valores para a unidade de m/dia, obtemos uma faixa de condutividade hidráulica de aproximadamente 0,0006912m/dia a 25,92 m/dia, destacando a significativa variabilidade desses parâmetros em rochas cristalinas fraturadas. Essa conversão é crucial para garantir a consistência e comparabilidade dos resultados dentro do contexto proposto por Aller *et al.* (1987) e facilitar a aplicação desses dados na classificação do índice do parâmetro C no método DRASTIC.

Considerando a necessidade de adotar um valor específico de condutividade hidráulica para o presente estudo, optou-se pelo valor de 25,92 m/dia, fornecido por Giampá & Gonçalves (2013). Essa escolha foi respaldada por Machado (2013), que descreve um perfil clássico de derrame basáltico na região de estudo, destacando características como zonas vítrea basal com disjunção horizontal, zona intermediária com juntas verticais, zona superior com disjunção vertical e horizontal, e basalto vesicular no topo. Devido à alta densidade de estruturas como falhas e juntas, associada à natureza das rochas basálticas, justifica-se a adoção do valor mencionado para representar a condutividade hidráulica na modelagem do parâmetro C. Portanto, para todos os 190 poços tubulares profundos que compõe o banco de dados analisado neste trabalho, visto que o valor de condutividade hidráulica está compreendido no intervalo de 12,2 - 28,5 m/dia, foi atribuído o índice 4 para este parâmetro conforme proposto por Aller *et al.* (1987).

A Figura 63 representa um mapa que exhibe as estruturas geológicas conforme documentado pelo CPRM (2014) e, adicionalmente, destaca o valor da condutividade hidráulica. Nesse mapa, os valores de condutividade hidráulica variam entre 12,2 e 28,5 m/dia, o que corresponde ao índice 4 para o parâmetro C, conforme proposto por Aller *et al.* (1987). Essa representação cartográfica proporciona uma visualização das estruturas geológicas e de sua influência na variação na condutividade hidráulica, elementos importante para compreender a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas nos 190 poços tubulares analisados.

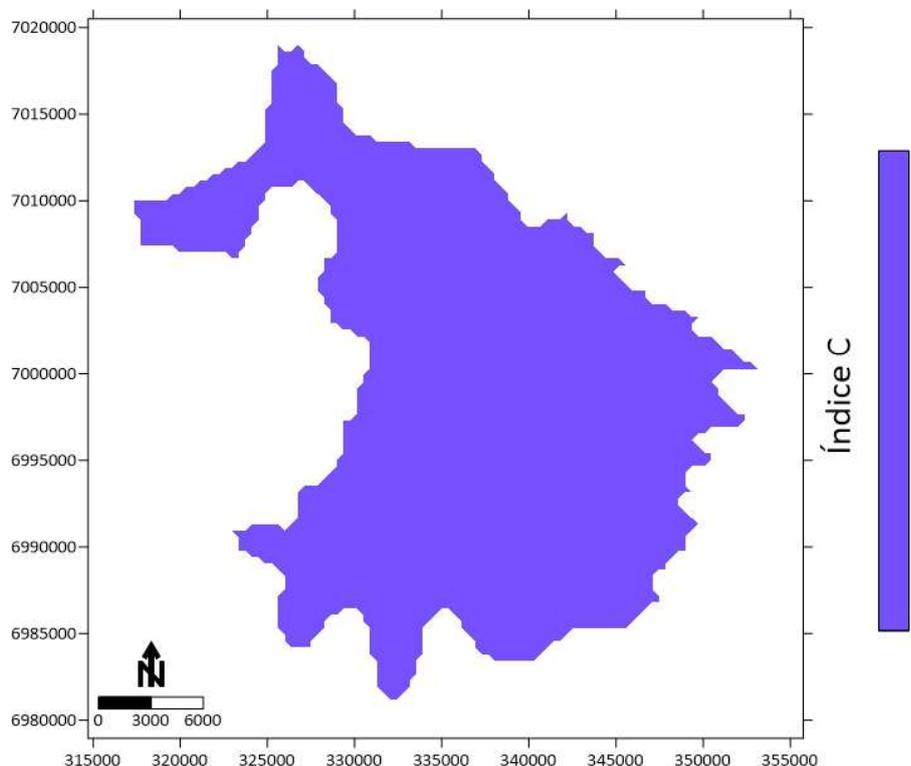
Figura 63 - Mapa exibindo estruturas geológicas e o valor de condutividade hidráulica, compreendido no intervalo de 12,2 - 28,5 m/dia, portanto índice 4 para o parâmetro C conforme proposto por Aller *et al.* (1987) para os 190 poços tubulares analisados.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch. Modificado de CPRM (2021).

O mapa apresentado na Figura 64 constitui o resultado da aplicação da técnica de interpolação pelo método do vizinho mais próximo para os 190 índices associados ao parâmetro C, correspondentes às 190 ocorrências de água subterrânea analisadas. Visto que neste caso o valor interpolado é constante para toda área investigada, não há erro associado a esta interpolação.

Figura 64 - Mapa da distribuição espacial do índice C na área de estudo, o município de Chapecó-SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* Surfer versão 25.2.259.

4.3.8. Índice final DRASTIC

A aplicação do método DRASTIC (*Depth to Water, Recharge, Aquifer Media, Soil Media, Topography, Impact of Vadose Zone, and Conductivity of Aquifer*), conforme proposto por Aller *et al.* (1987) para a avaliação da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó - SC resultou na determinação de um índice de vulnerabilidade para cada uma das 190 ocorrências pontuais de água subterrânea presentes no banco de dados.

Para a determinação do índice DRASTIC final foram avaliados os sete parâmetros propostos pelo método, sendo eles, a profundidade do aquífero (*Depth to groundwater*), a recarga do aquífero (*net Recharge*), as características do material na zona saturada (*Aquifer media*), as propriedades do solo (*Soil media*), a topografia do terreno (*Topography*), as características do material na zona não saturada (*Impact of the vadose zone media*) e a condutividade hidráulica do aquífero (*hydraulic Conductivity*).

A avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação foi realizada de acordo com a metodologia DRASTIC proposta por Aller *et al.* (1987). Cada um dos sete parâmetros considerados recebeu uma pontuação, variando de 1 a 10, e foi multiplicado por um peso relativo, variando de 1 a 5, também conforme a proposta mencionada. A soma dos produtos desses índices pelo peso correspondente resultou no índice final, cujos valores podem variar de 23 a 226 (Tabela 12). Conforme a interpretação, índices mais altos indicam maior vulnerabilidade à contaminação.

Tabela 12 - Classes de vulnerabilidade DRASTIC, conforme proposto por Aller *et al.* (1987).

Classe	Intervalo
Vulnerabilidade Baixa	Entre 23 e 71
Vulnerabilidade Média	Entre 71 e 126
Vulnerabilidade Alta	Entre 126 e 180
Vulnerabilidade Muito Alta	Entre 180 e 226

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice. Modificado de Aller *et al.* (1987)

A análise individual de cada parâmetro permitiu a construção de um banco de dados robusto, contendo os índices atribuídos a cada classe de vulnerabilidade para todos os parâmetros DRASTIC. A Tabela 13 apresenta os parâmetros analisados, suas classes, assim como o número de ocorrência por classe dentro de cada parâmetro, a relação dos índices atribuídos a cada classe, juntamente com os pesos associados e índice final por parâmetro.

Tabela 13 - Parâmetros, classes, número de ocorrência por classe, valor do índice atribuído proposto pela metodologia, peso padrão proposto pela metodologia e resultado por parâmetro do índice final DRASTIC de vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó – SC.

Parâmetro	Classe	Número de ocorrências	Índice (<i>i</i>)	Peso padrão (<i>p</i>)	Índice final
D	> 30,5 m	96	1	5	5
	22,9 - 30,5 m	16	2	5	10
	15,2 - 22,9 m	28	3	5	15
	9,1 - 15,2 m	21	5	5	25
	4,6 - 9,1 m	29	7	5	35
R	178 a 254 mm/ano	190	8	3	24
A	Basalto fraturado	190	8	3	24
S	Franco argiloso	104	3	2	6
	Zona urbana	86	10	2	20

T	> 18 %	21	1	1	1
	12- 18 %	48	3	1	3
	6 – 12 %	78	5	1	5
	2 – 6 %	35	9	1	9
	< 2%	8	10	1	10
I	Argila	104	3	5	15
	Basalto fraturado	86	10	5	50
C	12,2 e 28,5 m/dia	190	4	3	12

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

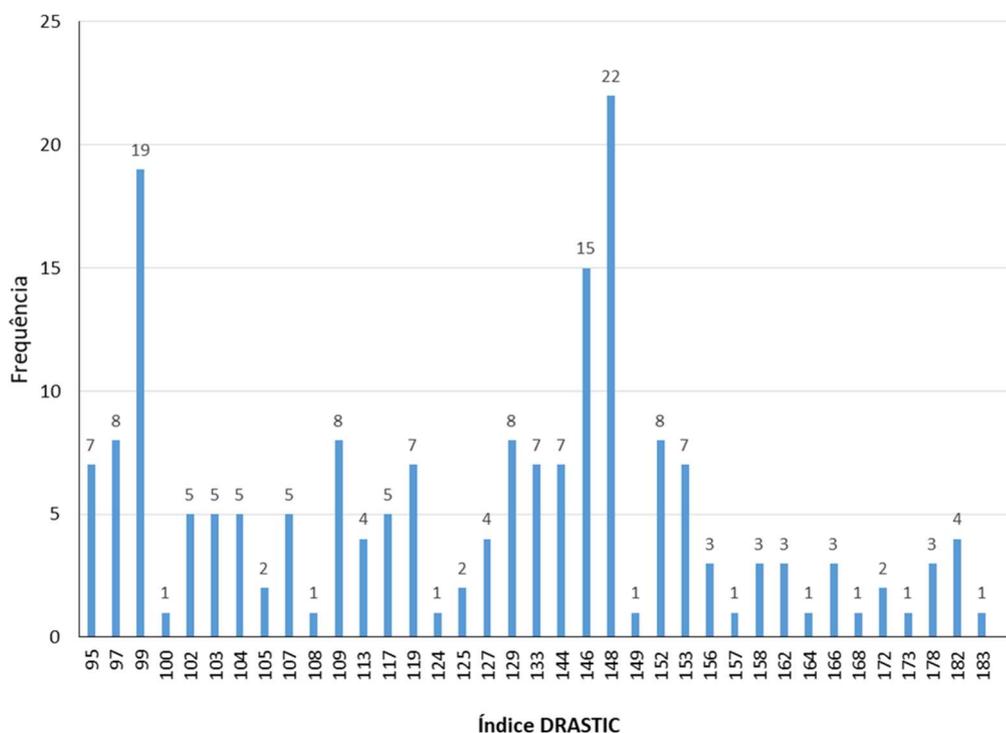
Posteriormente, os parâmetros considerados no método DRASTIC foram incorporados a um esquema de ponderação aritmética. A somatória ponderada DRASTIC é representada pela fórmula a seguir, onde p é o peso por parâmetro e i é o índice de cada parâmetro.

$$DRASTIC = Dp \times Di + Rp \times Ri + Ap \times Ai + Sp \times Si + Tp \times Ti + Ip \times Ii + Cp \times Ci$$

Neste cálculo cada parâmetro é dividido em subclasses, conforme apresentado na Tabela 13, às quais foram atribuídos um índice (i) que varia de 1 a 10 que, em seguida, são multiplicados pelo peso (p) de cada parâmetro correspondente. Através da aplicação desta ponderação aritmética obteve-se o índice final DRASTIC de vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral para cada uma das 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

Os resultados da avaliação da vulnerabilidade à contaminação no Sistema Aquífero Serra Geral, realizada por meio do método DRASTIC, refletem uma ampla gama de índices finais obtidos para as 190 ocorrências de água subterrânea analisadas. A Figura 65 apresenta o histograma de distribuição de frequência dos valores de vulnerabilidade DRASTIC obtidos, evidenciando essa variação. Os índices variaram entre 95 e 183, com o valor de 148 apresentando a maior frequência com 22 ocorrências.

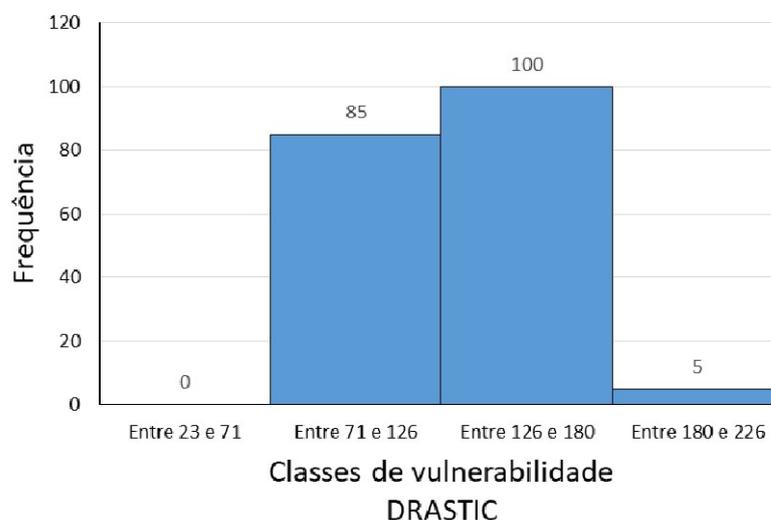
Figura 65 - Histograma de distribuição de frequência de ocorrência para cada valor obtido de vulnerabilidade DRASTIC através da aplicação da metodologia descrita para cada uma das 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

A Figura 66 apresenta o histograma de distribuição de frequência das classes de vulnerabilidade DRASTIC, geradas a partir da aplicação e categorização, conforme metodologia proposta, para cada uma das 190 ocorrências de água subterrânea analisadas. O intervalo de índices mais elevados indica uma maior vulnerabilidade à contaminação, conforme a interpretação das classes estabelecidas. Segundo a Tabela 12, apresentada anteriormente, conforme proposto por Aller *et al.* (1987), as classes de vulnerabilidade são definidas pelos intervalos dos índices DRASTIC. A "Vulnerabilidade Baixa" compreende índices entre 23 e 71, seguida pela "Vulnerabilidade Média" entre 71 e 126. A categoria de "Vulnerabilidade Alta" abrange índices entre 126 e 180, enquanto a "Vulnerabilidade Muito Alta" está na faixa de 180 a 226. Essas categorias delimitam os diferentes graus de suscetibilidade à contaminação do aquífero.

Figura 66 - Histograma de distribuição de frequência de ocorrência das classes de vulnerabilidade DRASTIC obtidos através da aplicação da metodologia descrita para cada uma das 190 ocorrências de água subterrânea analisadas.

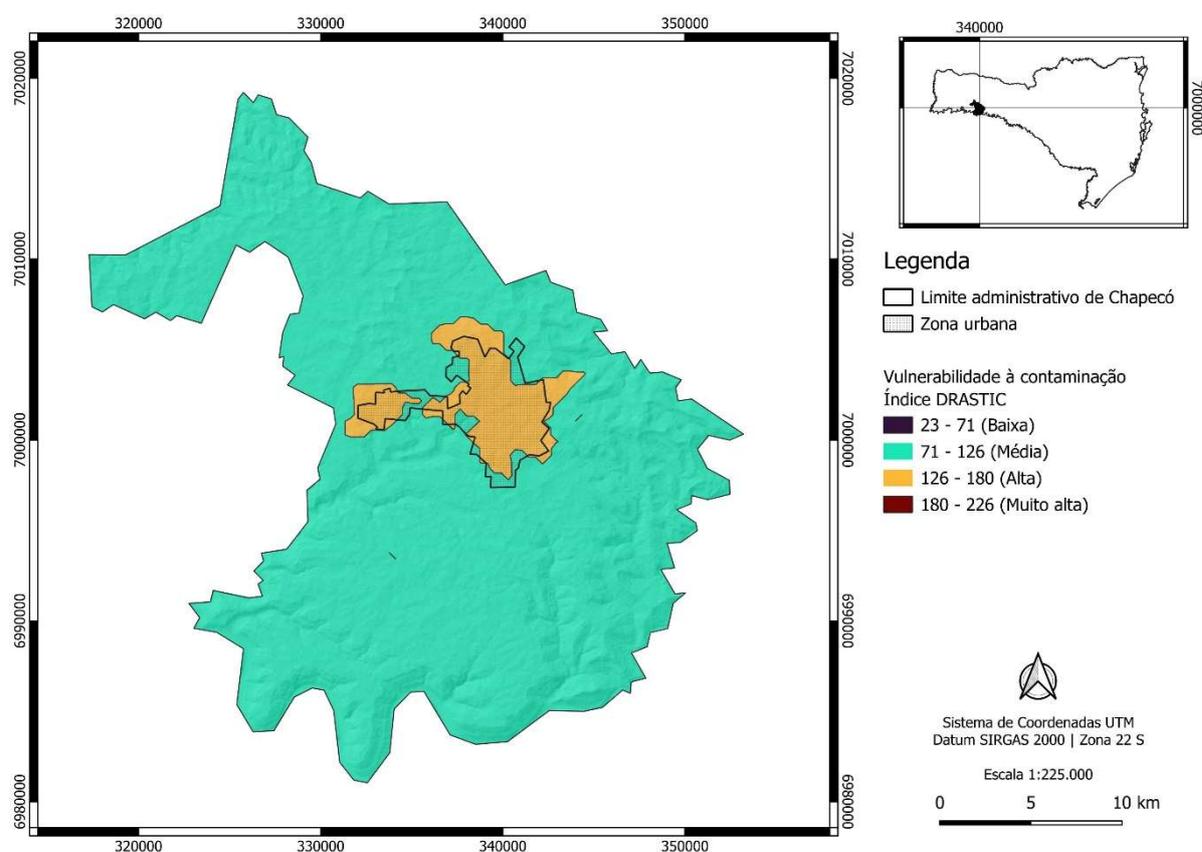


Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

O mapa de vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral, no município de Chapecó - SC, foi elaborado por meio da ferramenta de cálculo de *grid* disponível no *software* Surfer. O processo envolveu a geração de sete *grids* representando a distribuição espacial dos índices correspondentes a cada parâmetro do método DRASTIC. Cada parâmetro, como apresentado na Tabela 13, foi subdividido em subclasses, atribuindo-se um índice variando de 1 a 10, multiplicado pelo peso correspondente (p). A fórmula de cálculo da somatória ponderada DRASTIC foi aplicada, combinando os índices ponderados de profundidade do aquífero (D), recarga (R), material do aquífero (A), área de solo (S), topografia (T), influência da zona não saturada (I) e condutividade hidráulica (C). Essa metodologia resultou em um valor de índice de vulnerabilidade particular para cada célula do *grid*, dimensionada em 375 m x 375 m.

Desta forma, o mapa final de vulnerabilidade foi gerado de acordo com o método DRASTIC, conforme proposto por Aller *et al.* (1987), permitindo uma representação cartográfica da vulnerabilidade à contaminação natural do Sistema Aquífero Serra Geral abrangendo a totalidade do território municipal de Chapecó - SC. O referido mapa é apresentado na Figura 67.

Figura 67 - Mapa da distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó – SC, de acordo com o método DRASTIC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch.

Com base no mapa apresentado anteriormente, na Figura 67, a Tabela 14 apresenta a distribuição da área total de cada classe de índice DRASTIC e a porcentagem correspondente em relação à área total do município de Chapecó - SC, que é de 626.060 km² (IBGE, 2022).

Tabela 14 - A tabela apresenta a área total de cada classe de índice DRASTIC e sua porcentagem em relação à área total do município de Chapecó - SC

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade do aquífero à contaminação	Área (km ²)	%
23 - 71	Baixa	0,00	0,00
71 - 126	Média	584,3412	93,33
126 - 180	Alta	41,7187	6,67
180 - 226	Muito Alta	0,00	0,00
	Σ	626.060,0000	100,00

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

Os resultados obtidos pela aplicação do método DRASTIC para avaliar a vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó, em Santa Catarina, revelaram uma predominância de grande escala da classe de vulnerabilidade média, abrangendo cerca de 93,33% do território municipal. A área de alta vulnerabilidade, representando 6,67% da extensão total do município, também foi identificada. Entretanto, a classe de vulnerabilidade alta está fortemente associada à zona urbana do município. Não foram observadas ocorrências das classes de vulnerabilidade baixa e muito alta dentro dos limites do município.

4.4. Comparação entre os resultados obtidos com as diferentes metodologias

De acordo com Foster & Hirata (1988), os desafios na cartografia de vulnerabilidade de aquíferos se evidenciam na escassez ou desconhecimento de dados regionais pertinentes ao estudo. Assim, segundo Hirata (2001), uma classificação universal e absoluta nesse contexto é utópica e complexa. No entanto, o autor Souza (2016), considera que em determinadas circunstâncias, considerando a escala do estudo, a geologia local e a resolução de cada metodologia, é possível identificar certa correlação nos resultados da vulnerabilidade de aquíferos obtidos por diferentes modelos.

Através da aplicação das metodologias GOD e DRASTIC, foi possível estimar a vulnerabilidade à contaminação natural do Sistema Aquífero Serra Geral em Chapecó, Santa Catarina. As análises comparativas entre esses modelos revelaram vantagens e desvantagens individuais, refletindo diretamente na cartografia do índice final de vulnerabilidade à contaminação do aquífero.

Ambos os métodos aplicados foram desenvolvidos com base no mesmo banco de dados, entretanto o método GOD revela uma abordagem mais simplificada, envolvendo apenas três parâmetros: grau de confinamento do aquífero, composição da zona não saturada e profundidade do nível d'água ou do teto do aquífero. Esses dados são facilmente acessíveis de forma objetiva por meio do banco de dados fornecido pelo SIAGAS, disponível em seu portal *online*. O método DRASTIC, por outro lado, considera uma gama mais extensa de parâmetros, incluindo a profundidade do nível de água, a recarga do aquífero, a natureza do material do aquífero, o tipo de solo, a topografia por meio da análise de declividade, a composição da zona vadosa e a taxa de condutividade hidráulica do aquífero.

O parâmetro D em ambos os métodos se baseia na profundidade do nível de água, utilizando o dado do "nível estático" do poço tubular profundo, fornecido pelo SIAGAS, para atribuir os pesos adequados a cada método. No entanto, os outros parâmetros envolvidos requerem análises contextualizadas, adaptadas à aplicação específica de cada metodologia. Parâmetros como o G, que avalia o grau de confinamento do aquífero, e o parâmetro O, relacionado à composição da zona vadosa sobre o aquífero, ambos do método GOD, em geral, estão disponíveis diretamente nos bancos de dados do SIAGAS. No entanto, consultando mapas geológicos e pedológicos, é possível determiná-los com maior contextualização por meio de referências bibliográficas. Essa abordagem complementar permite preencher eventuais lacunas existentes na oferta de dados, de forma a consolidar um banco de dados robusto.

No método DRASTIC, a maioria dos parâmetros considerados não está diretamente disponível nos bancos de dados do SIAGAS. Portanto, é fundamental determinar ou inferir esses parâmetros a partir de fontes alternativas, sejam elas bibliográficas ou, quando possível, por meio de observações diretas no local. Essa abordagem é essencial para consolidar um banco de dados robusto e completo, permitindo uma análise mais precisa da vulnerabilidade do aquífero. A aplicação do método DRASTIC demanda mais tempo e, às vezes, quando necessário, recursos financeiros adicionais para viagens de campo ou análises laboratoriais, em comparação com o método GOD. Isso ocorre devido à necessidade de coletar e consolidar dados complementares, além de realizar análises mais detalhadas para determinar parâmetros específicos, o que pode resultar em um processo mais demorado e custoso em termos de recursos humanos e financeiros.

O parâmetro R do método DRASTIC, relacionado à infiltração de água pluvial no lençol freático, é complexo de ser determinado devido à variedade de técnicas disponíveis e à consideração de diversos fatores hidrogeológicos. Wahnfried & Hirata (2005) destacam a importância de critérios práticos, como facilidade de aplicação, custos e disponibilidade de dados, na tomada de decisão. Isso evidencia a natureza desafiadora desse parâmetro, tanto em aplicações locais quanto regionais do método DRASTIC.

O método DRASTIC, ao considerar a condutividade hidráulica, parâmetro C, para avaliar a vulnerabilidade do aquífero, apresenta desafios em regiões onde a estrutura geológica é complexa e anisotrópica, como no Sistema Aquífero Serra Geral de Chapecó - SC. Em tal contexto, determinar um valor específico para a condutividade hidráulica torna-se complexo. Neste estudo, optou-se por utilizar um valor geral baseado em fontes bibliográficas como uma

estimativa representativa para a área em análise. No entanto, se reconhece que um mapeamento geológico e estrutural detalhado e a obtenção de amostras de rochas, juntamente com testemunhos de sondagens, permitiriam a realização de ensaios laboratoriais para uma caracterização mais precisa da distribuição espacial da condutividade hidráulica em Chapecó. Essa constatação evidencia as desvantagens do método DRASTIC, que frequentemente requer a coleta e consolidação de dados complementares, além da realização de análises mais detalhadas para determinar parâmetros específicos, tornando o processo mais complexo, demorado e dispendioso em termos de recursos humanos e financeiros.

Ainda no contexto da metodologia DRASTIC, certos parâmetros como o A, que considera o material do aquífero, o S, relacionado ao tipo de solo, o I, que considera a influência da zona vadosa sobre o aquífero, assim como o T, referente à topografia do terreno e sua declividade, podem ser inferidos ou determinados por meio de consultas a fontes bibliográficas e análises de mapas geológicos e pedológicos. Desta forma, o processo de identificação desses dados complementares é fundamental, visto que não são diretamente disponíveis nos conjuntos de informações primárias, sendo necessário recorrer a fontes adicionais para enriquecer a análise e viabilizar a aplicação do método DRASTIC. O uso de ferramentas como processamento digital de imagens de satélite é fundamental para essa consolidação, agregando informações indispensáveis à compreensão da vulnerabilidade do aquífero.

Os métodos GOD e DRASTIC, mesmo com suas abordagens distintas, convergem na avaliação da vulnerabilidade da susceptibilidade natural do aquífero à contaminação. Ambos visam a compreender o índice geral de vulnerabilidade, abrangendo todas atividades ou classes de contaminantes. Apesar de suas diferenças metodológicas, compartilham o objetivo de fornecer uma avaliação geral da susceptibilidade do aquífero à contaminação. Tendo sido consideradas as vantagens e desvantagens da aplicação de cada método, é possível comparar de modo geral os resultados obtidos através da aplicação de ambos os métodos propostos. A Tabela 15 apresenta um quadro comparativo que sumariza os resultados obtidos através da aplicação de ambos os métodos propostos.

Tabela 15 – Quadro comparativo entre os resultados obtidos com as metodologias GOD e DRASTIC.

Classes	MÉTODOS			
	GOD (Foster & Hirata, 1988)		DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987)	
	km ²	%	km ²	%
Insignificante	118,52	18,93	Não se aplica	
Baixa	463,89	74,09	0,00	0,00
Média	32,67	5,21	584,34	93,33
Alta	10,98	1,75	41,71	6,67
Extrema	0,00	0,00	0,00	0,00
Σ	626,06	100,00	626,06	100,00

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

Os resultados obtidos através da aplicação dos métodos GOD e DRASTIC para a avaliação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó indicaram diferenças substanciais na classificação da vulnerabilidade à contaminação. Enquanto o método GOD pode categorizar uma área de estudo em até cinco classes de vulnerabilidade, o método DRASTIC é capaz de categorizar em até quatro classes de vulnerabilidade.

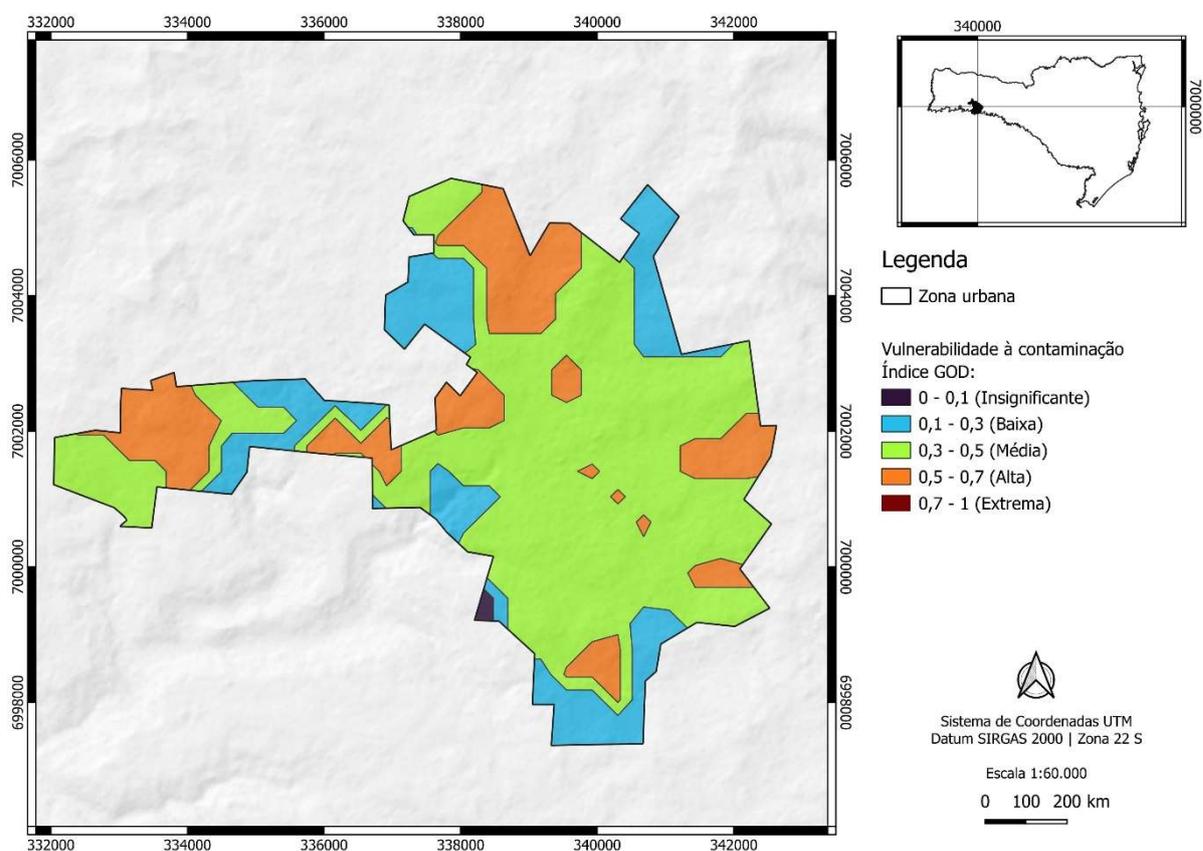
No município de Chapecó - SC, segundo o método GOD, a maior parte do território é categorizada como de baixa vulnerabilidade à contaminação, cobrindo 463,89 km², o que representa 74,09% da área total. Adicionalmente, 118,52 km² (18,93% do território) são classificados como insignificantes pelo método GOD. A vulnerabilidade média abrange 32,67 km² (5,99% do território), enquanto a alta vulnerabilidade corresponde a 10,98 km² (0,98% do território). Não há áreas classificadas como de extrema vulnerabilidade no município. De acordo com o método GOD, a área de estudo foi discretizada em quatro categorias, das cinco possíveis de acordo com o método.

De maneira contrastante, o método DRASTIC resultou na classificação do território do município de Chapecó - SC em apenas duas categorias, das quatro possíveis. Os resultados derivados da aplicação do método DRASTIC para a avaliação da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral no referido município indicam uma predominância em larga escala da classe de vulnerabilidade média, englobando aproximadamente 93,33% da área total municipal. A presença de áreas de alta vulnerabilidade, compreendendo 6,67% da extensão total do município, também foi identificada, com essa classe de vulnerabilidade concentrada principalmente na zona urbana. Contudo, não foram

observadas ocorrências das classes de vulnerabilidade baixa e muito alta nos limites do município.

Na análise específica dos resultados do método GOD aplicado à zona urbana de Chapecó, os resultados da cartografia de vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral indicam uma predominância significativa da classe de média vulnerabilidade, abrangendo 60,88% da área total da zona urbana, equivalente a 21,67 km² em um território de 35,59 km². A classe de vulnerabilidade alta, conforme definida pelo método GOD, representa 20,65% dessa região urbana, equivalente a 7,34 km². A classe de vulnerabilidade baixa ocupa 18,22% dessa área, correspondendo a 6,48 km². Por fim, a classe de vulnerabilidade insignificante compreende 0,25% do território urbano, correspondendo a 0,08 km². É relevante observar que, dentro dos limites dessa zona urbana, estão localizados 91 dos 190 poços tubulares presentes no banco de dados deste estudo. A Figura 68 apresenta o mapa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero com detalhamento da zona urbana do município.

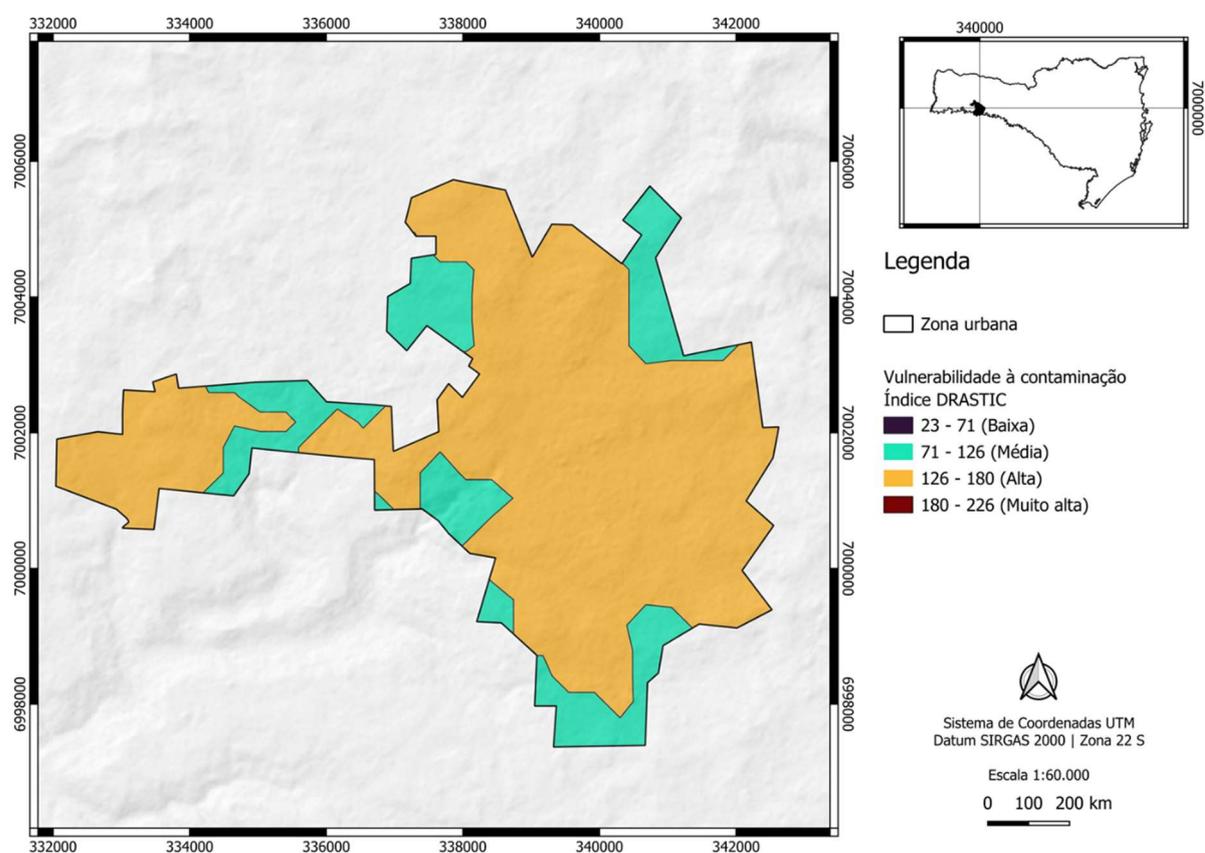
Figura 68 - Mapa da distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral, de acordo com o método GOD, com ênfase exclusivamente na zona urbana do município de Chapecó – SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch.

No contexto do método DRASTIC, os resultados detalhados da cartografia de vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral, quando analisados exclusivamente na zona urbana de Chapecó, revelam uma predominância da classe de alta vulnerabilidade, abrangendo cerca de 79,31% da área total dessa zona urbana, o equivalente a 28,23 km² de um território de 35,59 km². Em contraste, a classe de vulnerabilidade média ocupa uma área de 7,36 km², representando aproximadamente 20,68% dessa zona urbana (Figura 69).

Figura 69 - Mapa da distribuição espacial da vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Serra Geral, de acordo com o método DRASTIC, com ênfase exclusivamente na zona urbana do município de Chapecó – SC.



Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* QGIS 3.30.3-'s-Hertogenbosch.

A Tabela 16 apresenta um quadro comparativo que sumariza os resultados obtidos através da aplicação de ambos os métodos propostos com ênfase exclusivamente na zona urbana do município de Chapecó - SC.

Tabela 16 - Quadro comparativo entre os resultados obtidos com as metodologias GOD e DRASTIC com ênfase exclusivamente na zona urbana do município de Chapecó – SC.

Classes	MÉTODOS			
	GOD (Foster & Hirata, 1988)		DRASTIC (Aller <i>et al.</i> , 1987)	
	km ²	%	km ²	%
Insignificante	0,08	0,25	Não se aplica	
Baixa	6,48	18,22	0,00	0,00
Média	21,67	60,88	7,36	20,68
Alta	7,34	20,65	28,23	79,31
Extrema	0,00	0,00	0,00	0,00
Σ	35,59	100,00	35,59	100,00

Fonte: Elaborado pelo Autor no *software* LibreOffice.

A disparidade nas categorias resultantes dos métodos GOD e DRASTIC destaca a importância de considerar as especificidades de cada abordagem metodológica ao avaliar a vulnerabilidade à contaminação em sistemas aquífero.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo fundamental a aplicação concomitante das abordagens metodológicas GOD (*Geological setting, Overlying strata, Depth to water table, aquifer media*) e DRASTIC (*Depth to water table, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone, hydraulic Conductivity*) no intuito de desenvolver modelos de avaliação de vulnerabilidade à contaminação natural no Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó – SC. Através da adoção desses métodos de cartografia de vulnerabilidade, foram determinados os parâmetros inerentes a cada método, bem como os modelos gerados foram validados e incorporados às técnicas de avaliação de vulnerabilidade aquífera, viabilizando, assim, a realização de uma análise comparativa dos resultados alcançados por meio da implementação das distintas abordagens metodológicas empregadas.

No decorrer desta pesquisa, foi possível identificar as vantagens e desvantagens de cada abordagem, destacando-se a simplicidade do método GOD, que considera apenas três parâmetros, facilitando a obtenção de dados a partir de fontes acessíveis como o banco de dados do SIAGAS. Por outro lado, o método DRASTIC, embora mais complexo ao incorporar sete parâmetros, oferece uma análise mais minuciosa da vulnerabilidade, exigindo, contudo, informações mais detalhadas e, por vezes, não disponíveis no referido banco de dados.

Os resultados obtidos por meio da aplicação dessas metodologias foram comparados, revelando padrões de vulnerabilidade à contaminação no Sistema Aquífero Serra Geral em

Chapecó. Verificou-se que, em relação ao método GOD, a maior parte da área municipal apresenta baixa vulnerabilidade, mas a análise detalhada proporcionada pelo método DRASTIC permitiu classificar a maior parte do território municipal como vulnerabilidade média. Essa diferenciação evidencia a importância de escolher a abordagem mais adequada às características locais e aos objetivos específicos da avaliação de vulnerabilidade. Para ambos os métodos, a zona urbana do município de Chapecó foi classificada com índices mais altos.

Os resultados obtidos pela aplicação dos métodos DRASTIC e GOD revelaram que a zona urbana de Chapecó apresenta índices de vulnerabilidade mais elevados. De acordo com o método DRASTIC, essa área foi classificada majoritariamente como de alta vulnerabilidade, enquanto o método GOD demonstrou variações entre os índices insignificante, baixo, médio e alto nessa região. Essa constatação ressalta a sensibilidade dessas áreas urbanas a potenciais riscos de contaminação, evidenciando a necessidade premente de monitoramento contínuo e implementação de medidas preventivas para resguardar a qualidade do aquífero na localidade.

Diante do exposto, conclui-se que a combinação das metodologias GOD e DRASTIC proporcionou uma análise detalhada da vulnerabilidade à contaminação no Sistema Aquífero Serra Geral no município de Chapecó, Estado de Santa Catarina. A escolha entre essas abordagens deve ser orientada pela disponibilidade de dados, objetivos específicos da avaliação e características hidrogeológicas da região em estudo. Essa abordagem integrada fornece subsídios valiosos para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, contribuindo para a preservação da qualidade da água nessa importante área aquífera.

Como proposta de aprimoramento à presente pesquisa, sugere-se a implementação da normalização dos índices DRASTIC e GOD, seguindo a abordagem proposta por Borge *et al.* (2017). Essa recomendação se baseia na necessidade de aprofundar a comparação entre os métodos de avaliação de vulnerabilidade aquífera, especialmente em contextos de aquíferos fraturados. A normalização dos valores de vulnerabilidade permite uma análise mais precisa das diferenças e similaridades entre os resultados obtidos por meio dos métodos DRASTIC e GOD, contribuindo para a compreensão da vulnerabilidade do aquífero e promovendo melhorias na avaliação e gestão de riscos de contaminação.

REFERÊNCIAS

- ALBINET, M. **La pollution des eaux souterraines.** Bureau de recherches géologiques et minières. Orléans, DS 63 A 127, out. 1963. 127 p.
- ALBINET, M. **Les cartes de vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution.** Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 70 SGN 325 HYD, ago. 1970. 31 p.
- ALBINET, M.; MARGAT, J. **Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine.** Bull BRGM 2me Series, v. 3, n. 4, p. 13-22, 1970.
- ALBINET, M.; MARGAT, J. **Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine.** In: SYMPOSIUM GROUNDWATER POLLUTION, ago. 1971, Moscou. Proceedings [...] Moscou: IAHS, 1971. p. 58 - 70.
- ALLER, L., BENNETT, T., LEHR, J. H., PETTY, R. H. & HACKET, G. **DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings.** National Water.
- ANDRIOTTI, José Leonardo Silva. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística.** São Leopoldo, RS: Unisinos, 2ª reimpressão, 2009. Well Association. Dublin, Ohio, 1987.
- ASSINE, Mario L.; SOARES, Paulo C.; MILANI, E. J. **Sequências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, Sul do Brasil.** Revista Brasileira de Geociências, v. 24, n. 2, p. 77-89, 1994.
- BARTOLOMEU, Daniel. **Análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos na região urbana de São Carlos (SP) por vazamentos em postos de combustíveis, utilizando o método GOD e avaliação dos condicionantes geotécnicos.** 2012. Tese (Doutorado em [área correspondente]). Universidade de São Paulo.
- BISNETO MELO, Danilo Heitor Caires Tinoco *et al.* **Decifrando georreferenciamento no ArcGIS.** 2015.
- BIZZI, L. A. *et al.* **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG.** CPRM, 2003.

BORGES, Vinícius Menezes; ATHAYDE, Gustavo Barbosa; REGINATO, Pedro Antônio Roehe. 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.

CANTER, Larry W.; KNOX, Robert C.; FAIRCHILD, Deborah M. **Ground water quality protection**. Florida: Lewis Publishers, 1987.

CORREIA, Maria Sonia Barros Barbosa. **Probabilidade e estatística**. 2003.

DE SANTA CATARINA, Estado. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina-PERH/SC. Diagnóstico da Situação Atual dos Recursos Hídricos de Santa Catarina. Cenário hídrico atual**. [online] [http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHR I/Plano%20Estadual/etapa_b/PERH_SC_Cenario_atual_CERTI-CEV_2017_final-2.pdf](http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHR_I/Plano%20Estadual/etapa_b/PERH_SC_Cenario_atual_CERTI-CEV_2017_final-2.pdf), 2017.

DO BRASIL, CPRM-Serviço Geológico. **Mapa geológico do estado de Santa Catarina**. 2014.

ESTADO DE SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. Secretaria Executiva de Meio Ambiente. **Metadados para compor as informações contidas na plataforma do SIGSC**, 2016.

FEITOSA, Fernando A. Carneiro *et al.* **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM, 2008.

FETTER, C. W. **Contaminant Hydrogeology**. New York: Macmillan Pub. Co., 1993. 458 p.

FOSTER, S. S. D. **Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy**. In: VAN DUIJVENBOODEN, W.; VAN WALGENINGH, H. G. (Orgs.). *Proceeding of Conference on vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. National Institute of Public Health and Environmental Hygiene, The Hague, 1987.

FOSTER, S. S.D., HIRATA, R. C., ROCHA, G. A. **Riscos de poluição de águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional**. São Paulo, ABAS, p. 175 – 185. 1988.

FOSTER, Stephen *et al.* **Quality Protection**. 2002.

FREITAS, Marcos Alexandre de; CAYE, Braulio Robério; MACHADO, José Luiz Flores. **Projeto Oeste de Santa Catarina-PROESC: diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do estado de Santa Catarina.** 2002.

GIAMPÁ, Carlos Eduardo Quaglia; GONÇALES, Valter Galdiano. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos–2ª ed.** Oficina de Textos, 2013.

GUINGUER, N. KOHNKE M. W. **Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos.** XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Águas Subterrâneas, n. 1, 2002.

HARTMANN, Léo Afraneo. **A história natural do Grupo Serra Geral desde o Cretáceo até o Recente.** Ciência e Natura, v. 36, p. 173-182, 2014.

HEARTLE, A. **Toxic organic chemicals: destruction and waste treatment.** Poli Tech Review, v. 40, 1983, 317 p.

HEATH, Ralph C. **Basic ground-water hydrology.** US Geological Survey, 2004.

HIRATA, Ricardo; FERREIRA, Luciana Martins Rodrigues. **Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição.** Revista Brasileira de Geociências, v. 31, n. 1, p. 43-50, 2001.

HIRATA, R. C. A.; BASTOS, C. R. A.; ROCHA, G. A.; GOMES, D. C.; IRITANI, M. A. **Groundwater Pollution Risk and Vulnerability Map of the State of São Paulo, Brazil.** Water Science and Technology, v. 24, n.11, p. 159 - 169, dez. 1991.

IBGE. **Cidades: Panorama de Chapecó, Santa Catarina.** Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/chapeco/panorama>>. Acesso em 17 de novembro de 2023 às 17:53.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapeamento de recursos naturais do Brasil-Escala 1: 250.000.** Geomorfologia. 2018.

LANDIM, PAULO M. BARBOSA; MONTEIRO, Rubens Caldeira; CORSI, ALESSANDRA CRISTINA. **Introdução à confecção de mapas pelo software SURFER.** DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático, v. 8, p. 21, 2002.

LEGRAND, H. E. **System for evaluation of contamination potential of some waste disposal sites.** Journal American Water Works Association, Denver, v. 56, n. 8, p. 959 - 974, ago. 1964.

LERNER, David N.; ISSAR, Arie S.; SIMMERS, Ian. **Groundwater recharge. A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge.** International Contributions to Hydrogeology. International Association of Hydrogeologists, v. 8, 1990.

MACHADO, José Luiz Flores. **Mapa hidrogeológico do estado de Santa Catarina.** 2013.

MARGAT, J.; ALBINET, M. **La pollution des eaux souterraines par les eaux de surface.** Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, DS 65 A 96, nov. 1965. 21 p.

MARGAT, J. **Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution: bases de la cartographie.** Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 68 SGL 198 HYD, nov. 1968. 12 p

Milani, E.J., 1997. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental.** IG/UFRGS, Porto Alegre, Tese de Doutorado, 255p (2vol.).

MILANI, E. J.; ZÁLAN, P. V, 1999. **An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America.** pg. 199-205.

MILANI, E.J. 2004. **Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná.** Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo; Beca, p. 265-279.

MILANI, E. J. *et al.* **Bacias sedimentares brasileiras: cartas estratigráficas.** Anexo ao Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 15, n. 1, 2007.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B., 2007. **Bacia do Paraná.** Boletim Geociências Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287;

NANNI, Arthur Schmidt. **O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico.** 2008.

RABELO, Jorge Luiz. **Estudo da recarga do Aquífero Guarani no sistema Jacaré-Tietê.** 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

REBOUÇAS, A. C. **Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia do Paraná no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. Anais... v. 6. Recife: SBG, p. 2963-1976.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. Oficina de textos, 2020.

SCANLON, Bridget R.; COOK, Peter G. **Theme issue on groundwater recharge**. 2002.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM. **Litoestratigrafia integrada do Brasil ao Milionésimo (*Shapefile*)**. Rio de Janeiro: CPRM, 2021.

SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa hidrogeológico Web – Serviço Geológico do Brasil – SIAGAS/CPRM**. Disponível em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar_mapa.php. Acesso em 17 de novembro de 2023 às 16:20.

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento**. Tradução. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. **Applied mineral inventory estimation**. Cambridge University Press, 2002.

SOARES, Mirianne Ugolini Goulart. **Mapeamento do risco à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no município de Chapecó-SC**. 2016.

SOUSA, Rafael Rolim de. **Estudo comparativo entre métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquífero, aplicado na porção oriental da bacia sedimentar do Parnaíba no município de Tinguá, Ceará**. 2016. Tese de Doutorado.

TALTASSE, P. **Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP)**. São Paulo: USP (Instituto de Geociências), 1972. (Publicação Avulsa, n. 1).

VIERO, Ana Cláudia; SILVA, Diogo Rodrigues Andrade da (Orgs.). **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010. 1 DVD. Programa Geologia do Brasil - PGB. Levantamento da Geodiversidade.

VRANA, M. **Map of groundwater protection in Bohemia and Moravia**. Praha: Wat. Res. Plan Cent., 1968.

WALKER, W. H. **Illionois ground water pollution**. Journal American Water Works Association. Washington: AWWA, v. 61, n.1, p. 31 - 40, jan. 1969.

WAHNFRIED, Ingo; HIRATA, Ricardo. **Comparação de métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na bacia hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo)**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 2, p. 15-25, 2005.

WILDNER, Wison. Estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná–Conceitos básicos e divisão faciológica. **Reunião Aberta da Comissão Brasileira de Estratigrafia**, p. 62, 2004.

WILDNER, W. *et al.* **Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina**. CPRM. Escala 1:5000.000, 2014.

ZALÁN, Pedro Victor *et al.* **The Parana Basin, Brazil**: Chapter 33: Part II. Selected Analog Interior Cratonic Basins: Analog Basins. 1990.

ZANONI, A. E. **Ground-water pollution and sanitary landfills – a critical review**. Groundwater, v. 10, n. 1, p. 3-16, jan. 1972.