



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

SUÉLEN CAPALONGA

**AVALIAÇÃO DO RISCO DE POLUIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAQUARI-ANTAS**

Porto Alegre

2017

Suélen Capalonga

**AVALIAÇÃO DO RISCO DE POLUIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAQUARI-ANTAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde

Coorientadora: Eng. Ambiental Elisa de Mello Kich

Porto Alegre

2017

Suélen Capalonga

**AVALIAÇÃO DO RISCO DE POLUIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAQUARI-ANTAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovado em: 06 de julho de 2017.

BANCA EXAMINADORA

.....
Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato – IPH

.....
Prof. Me. Alfonso Risso – IPH

.....
Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde – IPH (orientador)

Conceito:.....

DEDICATÓRIA

*“Dedico este trabalho à minha família, afinal sem
ela nada disso seria possível.”*

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha família, ela é a base de toda a minha graduação. Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Angélica e Ronaldo, por me ajudarem a tornar esse sonho possível, e sempre permanecerem ao meu lado. E também ao meu irmão, Alisson, pelo apoio e companheirismo.

Agradeço ao Luiz Felipe, por suportar comigo os momentos de nervosismo, trazendo o humor e alegria para os meus dias.

Agradeço à Marta, minha colega de quarto, pelas conversas, por compartilhar esse momento comigo e principalmente pela amizade.

Agradeço ao meu orientador, Gustavo, pela acessibilidade, paciência e preocupação com as quais me instruiu. À Elisa, pela generosidade que sempre encontrei quando recorri a ela, e principalmente por ter compartilhado seus conhecimentos comigo, tornando esse trabalho possível.

Agradeço ao professor Pedro, pela atenção e gentileza que me ofereceu quando lhe pedi ajuda.

Agradeço aos amigos que fiz na Engenharia Ambiental, certamente eles tornaram esses anos de graduação melhores. Principalmente à Natália, uma amiga para a vida toda.

Agradeço a todos que torceram por mim durante essa etapa.

Por fim, agradeço à UFRGS e a todos os professores, por me ajudarem a tornar real a escolha de ser Engenheira Ambiental.

RESUMO

Avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, assim como o risco de poluição, são ferramentas importantes para a gestão de recursos hídricos, com o intuito de preservar essas mananciais, principalmente nos municípios onde o abastecimento público depende dessas fontes de água. Na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas há cerca de 1.333 poços em bombeamento para finalidades como abastecimento público, atividade industrial, irrigação e dessedentação animal, e aproximadamente 45% dos municípios da bacia utilizam água subterrânea. Para análise da vulnerabilidade dos aquíferos foi aplicado o método DRASTIC, que leva em consideração sete parâmetros, entre eles a profundidade da água, a recarga, o meio aquífero, o solo, a topografia, a influência da zona vadosa e a condutividade hidráulica. Enquanto para classificação das fontes potenciais de contaminação difusas o método POSH foi utilizado, categorizando as áreas urbanas e as atividades agrícolas. A união desses dois fatores resultou no mapa de risco de poluição da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas. Os resultados obtidos mostraram que 82% da bacia corresponde à vulnerabilidade média, 14% à baixa e 4% à alta, na qual destacam-se os municípios Soledade, Arvorezinha, Guaporé, Anta Gorda e Gentil. O potencial de poluição por cargas difusas foi categorizado como 56% moderado, 3% alto e 0,3% baixo. Por fim, a avaliação do risco de poluição resultante mostrou que o risco moderado predomina, com 47% de abrangência, enquanto 4% da área é classificada como risco elevado e contempla toda a região estudada de forma espalhada, e 9% foi classificada como risco baixo, predominando em alguns municípios como Lajeado e Bento Gonçalves. Um aspecto importante que foi levantado é que cerca de 229 poços da CORSAN estão bombeando em áreas de risco elevado, além disso 12 poços considerados de maior produtividade estão em áreas de alta vulnerabilidade, e 10 poços em áreas de risco elevado. As observações levantadas despertam um alerta para a extrema necessidade de monitoramento da qualidade da água explorada. Espera-se que este trabalho possa servir como uma ferramenta de auxílio para a gestão de recursos hídricos e uso e ocupação do solo dos municípios da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.

Palavras-chave: Vulnerabilidade, poluição, DRASTIC, POSH, água subterrânea.

ABSTRACT

Evaluate the vulnerability of groundwater, as the risk of pollution, are important tools for water resource management, with the purpose of preserving these sources, especially in municipalities where public water supply depends on these water sources. In the hydrographic basin of the river Taquari-Antas there are about 1.400 pumping wells, for purpose such as public water supply, industrial activity, irrigation and animal feed, and approximately 45% of the municipalities of the basin use groundwater. To analyze the vulnerability of aquifers, it was applied the DRASTIC method, which takes into account seven parameters, between them water depth, recharge, aquifer media, soil, topography, impact of the vadose zone and hydraulic conductivity. While for the classification the diffuse potential source of contamination, the POSH method was used, categorizing the urban areas and the agricultural activities. The union of these two factors resulted in the map of risk of pollution of the basin of the river Taquari-Antas. The obtained results show that 82% of the basin corresponds to the mean vulnerability, 14% to the low and 4% to the high, in which the cities of Soledade, Arvorezinha, Guaporé, Anta Gorda e Gentil stand out. The pollution potential of diffuse loads was categorized as 56% moderate, 3% high and 0,3% low. Finally, the assessment of the risk of pollution showed that moderate risk predominates, with 47% coverage, while 4% of the área is classified as high risk and covers the whole region, in scattered form, and 9% was classified as low risk, prevailing in some cities such as Lajeado and Bento Gonçalves. An important aspect that has been raised is that about 229 CORSAN wells are pumping in high risk areas, in addition 12 wells considered to be of higher productivity are in areas of high vulnerability, and 10 wells in high risk areas, arousing an alarm for the extreme need to monitor the quality of the water explored. It is hoped that this word serve as relief tool for the management of water resources and land use and occupation of the cities of the Taquari-Anta river basin.

Keywords: Vulnerability, pollution, DRASTIC, POSH, groundwater.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Municípios com poços em bombeamento registrados no SIAGAS.....	2
Figura 2. Ciclo hidrológico.....	5
Figura 3. Distribuição vertical da água.....	6
Figura 4. Tipos de aquíferos quanto à pressão	6
Figura 5. Principais fontes de contaminação de águas subterrâneas.....	10
Figura 6. Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação	15
Figura 7. Esquema conceitual para avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea.....	20
Figura 8. Localização da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	22
Figura 9. Principais rios da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	23
Figura 10. Mapa de altimetria da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	24
Figura 11. Mapa de declividades da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	25
Figura 12. Mapa de Geologia da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	26
Figura 13. Mapa dos sistemas aquíferos da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	27
Figura 14. Mapa de Solos da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	28
Figura 15. Poços tubulares da plataforma SIAGAS, presentes na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	32
Figura 16. Componentes do balanço hídrico.....	34
Figura 17. Estações pluviométricas presentes na bacia hidrográfica do rio Taquari- Antas.....	36
Figura 18. Estações climatológicas presentes na bacia hidrográfica do rio Taquari- Antas e ao seu redor.....	37
Figura 19. Localização dos registros de transmissividade.....	44
Figura 20. Mapa de profundidade.....	48
Figura 21. Parâmetro profundidade classificado com índices do DRASTIC.....	49
Figura 22. Mapa de precipitação da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	50
Figura 23. Mapa de evapotranspiração da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	51
Figura 24. Mapa de escoamento superficial para a bacia do rio Taquari-Antas.....	52
Figura 25. Mapa de recarga/precipitação.....	53
Figura 26. Mapa de recarga da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.....	53
Figura 27. Parâmetro recarga classificado com índices do DRASTIC.....	54

Figura 28. Parâmetro meio aquífero classificado com índices do DRASTIC	55
Figura 29. Parâmetro solos classificado com índices do DRASTIC.....	57
Figura 30. Parâmetro topografia classificado com índices do DRASTIC.....	58
Figura 31. Parâmetro influência da zona vadosa classificado com índices do DRASTIC.	60
Figura 32. Valores de transmissividade para a bacia hidrográfica, em m ² /h.....	61
Figura 33. Parâmetro transmissividade classificado com índices do DRASTIC.	62
Figura 34. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas de acordo com o DRASTIC.	63
Figura 35. Municípios da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas que apresentam áreas significativas de alta vulnerabilidade.	64
Figura 36. Poços presentes em áreas de vulnerabilidade alta.	65
Figura 38. Municípios com maiores áreas de alta vulnerabilidade, poços em áreas de alta vulnerabilidade e volumes anuais de exploração.....	66
Figura 37. Poços com dados de vazão específica presentes nas áreas de alta vulnerabilidade.	66
Figura 39. Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas.	67
Figura 40. Classificação do potencial de poluição por cargas difusas.	68
Figura 41. Risco de poluição da água subterrânea da bacia hidrográfica do rio Taquari- Antas.....	70
Figura 42. Poços em áreas de risco de poluição elevado.....	71
Figura 43. Municípios com maiores concentrações de áreas de risco elevado	72
Figura 44. Poços com dados de vazão específica presentes nas áreas de alta vulnerabilidade.	72
Figura 45. Municípios com maiores áreas de risco elevado, poços em áreas de risco elevado e volumes anuais de exploração.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação das fontes de contaminação difusas pelo método POSH.....	11
Tabela 2. Classificação e ranqueamento das fontes de contaminação pontuais pelo método POSH.....	12
Tabela 3. Definições práticas das classes de vulnerabilidade do aquífero.	13
Tabela 4. Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero à contaminação.....	14
Tabela 5. Índices do DRASTIC e seus pesos.	18
Tabela 6. Classes de Vulnerabilidade para Aquíferos, segundo AVI.....	19
Tabela 7. Operações e respectivas ferramentas do programa ArcGis.	29
Tabela 8. Peso de cada parâmetro do DRASTIC.....	30
Tabela 9. Relação entre o índice DRASTIC e a vulnerabilidade das águas subterrâneas.	31
Tabela 10. Relação entre profundidade e índice DRASTIC.....	32
Tabela 11. Relação entre recarga e índice DRASTIC.	34
Tabela 12. Estações pluviométricas e dados utilizados.	35
Tabela 13. Valores de C recomendados pelo SCS – USDA (1972).....	38
Tabela 14. Valores de C baseados nas características detalhadas das diversas superfícies presentes na bacia.....	39
Tabela 15. Valores de C recomendados pela ASCE (1969).	39
Tabela 16. Relação entre meio aquífero e índice DRASTIC.....	41
Tabela 17. Relação entre solos e índice DRASTIC.....	42
Tabela 18. Relação entre topografia e índice DRASTIC.....	42
Tabela 19. Relação entre influência da zona vadosa e índice DRASTIC.....	43
Tabela 20. Classificação e mapeamento das fontes de contaminação difusas segundo o sistema POSH.....	46
Tabela 21. Valores obtidos para perigo de contaminação em relação a cargas difusas.	47
Tabela 22. Classificação do perigo de contaminação por cargas difusas.	47
Tabela 23. Valores de coeficiente de escoamento estimados	51
Tabela 24. Fatores usados na classificação do meio aquífero.	56
Tabela 25. Fatores usados para classificação dos solos.....	57
Tabela 26. Fatores usados para classificar a influência da zona vadosa.....	59

Tabela 27. Município com áreas de vulnerabilidade alta.	64
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Usos d'água dos poços em bombeamento cadastrados no SIAGAS.....	1
Gráfico 2. Distribuição dos índices DRASTIC para o parâmetro precipitação na bacia.	49
Gráfico 3. Distribuição dos índices DRASTIC para o parâmetro recarga na bacia. ...	54
Gráfico 4. Distribuição dos índices DRASTIC para o meio aquífero.	55
Gráfico 5. Distribuição dos índices DRASTIC para o solo.....	58
Gráfico 6. Distribuição dos índices DRASTIC para a topografia.	59
Gráfico 7. Distribuição dos índices DRASTIC para a influência da zona vadosa.	60
Gráfico 8. Distribuição dos índices DRASTIC para a transmissividade.....	61
Gráfico 9. Distribuição dos índices DRASTIC para a vulnerabilidade.	63
Gráfico 10. Distribuição de uso e ocupação do solo na bacia.	67
Gráfico 11. Distribuição da classificação do potencial de poluição por POSH.....	69
Gráfico 12. Distribuição do risco de poluição da água subterrânea na bacia.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
AVI	<i>Aquifer Vulnerability Index</i>
CORSAN	Companhia Rio-grandense de Saneamento
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais-CPRM
DRASTIC	<i>Depth to Water, Recharge, Aquifer Media, Soil Media, Topography, Impact of the Vadose Zone, Conductivity of the Water</i>
EPA	Environmental Protection Agency
GOD	Grau de confinamento; Ocorrência de estratos de cobertura; Distância do nível freático
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MDE	Modelo Digital de Elevação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NHRI	Instituto Nacional de Pesquisa Hidrológica Canadá
POSH	<i>pollutant origin, surcharge hydraulically</i>
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	4
2.1. OBJETIVO GERAL	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRAFIA.....	5
3.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA	5
3.2. FONTES DE POLUIÇÃO	7
3.2.1. Classificação do contaminante pelo método POSH.....	10
3.3. VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS	12
3.3.1. Métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos	13
3.3.1.1. <i>GOD</i>	13
3.3.1.2. <i>DRASTIC</i>	15
3.3.1.3. <i>AVI</i>	19
3.4. RISCO DE POLUIÇÃO DE AQUÍFEROS	20
3.5. ESCOLHA DOS MÉTODOS	21
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	22
4.1.1. Localização e hidrografia.....	22
4.1.2. Altimetria	23
4.1.3. Geologia e Hidrogeologia	25
4.1.4. Solos	27
4.1.5. Clima e Vegetação	28
4.2. GEOPROCESSAMENTO	29
4.3. APLICAÇÃO DO MÉTODO DRASTIC	30
4.3.1. Profundidade.....	31
4.3.2. Recarga	33

4.3.2.1.	<i>Precipitação</i>	35
4.3.2.2.	<i>Evapotranspiração</i>	36
4.3.2.3.	<i>Escoamento superficial</i>	38
4.3.2.4.	<i>Capacidade de armazenamento de água do solo</i>	40
4.3.3.	Meio aquífero	40
4.3.4.	Solo	41
4.3.5.	Topografia	42
4.3.6.	Influência da zona vadosa	43
4.3.7.	Condutividade	44
4.4.	CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES DE POLUIÇÃO	45
4.4.1.	Uso e ocupação do solo	45
4.4.2.	Aplicação do método POSH	45
4.5.	ANÁLISE DO RISCO DE POLUIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	46
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1.	MAPAS DOS PARÂMETROS DRASTIC E VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	
	48	
5.1.1.	Profundidade do nível estático	48
5.1.2.	Recarga	49
5.1.3.	Meio aquífero	55
5.1.4.	Solos	57
5.1.5.	Topografia	58
5.1.6.	Influência da zona vadosa.....	59
5.1.7.	Transmissividade	60
5.1.8.	Vulnerabilidade das águas subterrâneas.....	62
5.2.	MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E CLASSIFICAÇÃO POSH.....	67
5.3.	MAPA DE AVALIAÇÃO DE RISCO DE POLUIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	69
6.	CONCLUSÕES	74
7.	BIBLIOGRAFIA	76

1. INTRODUÇÃO

A água é um elemento fundamental para a manutenção de todas as formas de vida em nosso planeta. De toda a água doce disponível para consumo, 96% é proveniente de água subterrânea (MMA, 2007). Esta é um importante contribuinte ao sistema de abastecimento público no Brasil. Segundo (ANA, 2013), 47% dos municípios brasileiros são abastecidos apenas por mananciais superficiais, 39% por águas subterrâneas e 14% pelos dois tipos de recursos.

De acordo com o SIAGAS (Sistemas de Informações de Águas Subterrâneas), na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas estão cadastrados cerca de 1.333 poços em bombeamento, para finalidades como abastecimento público, dessedentação animal, irrigação, uso industrial, entre outros, sendo que o uso abastecimento doméstico/animal é predominante na bacia, correspondendo a 45% do total (**Gráfico 1**). Os mesmos dados também demonstraram que aproximadamente 45% dos municípios da bacia utilizam água subterrânea para algum desses usos, apresentados na **Figura 1**. O que caracteriza os aquíferos como sistemas de captação de água relevantes para a bacia, que tem uma população estimada de 1,2 milhões de habitantes, o que representa 16% da população total do Rio Grande do Sul.

Gráfico 1. Usos d'água dos poços em bombeamento cadastrados no SIAGAS.

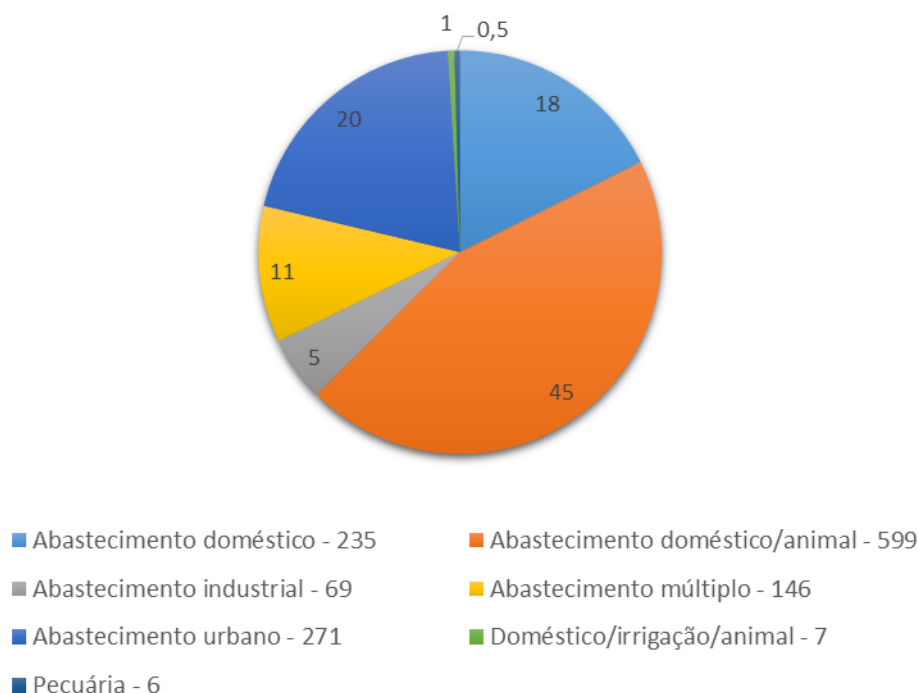
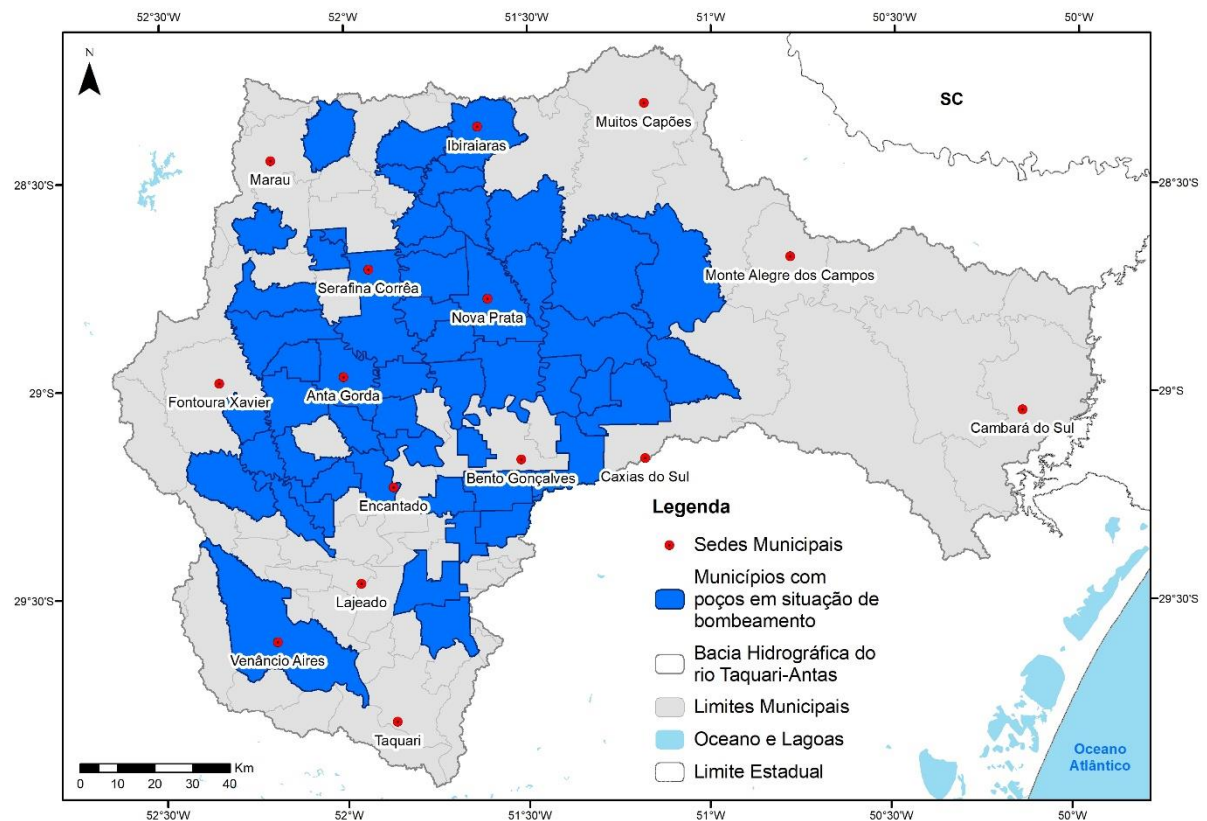


Figura 1. Municípios com poços em bombeamento registrados no SIAGAS.



Os municípios integrantes desta bacia concentram cerca de 20% do PIB estadual, sendo que está ocorrendo uma ascensão industrial da região, destacando-se os ramos de vestuário e artefatos de tecido, metalúrgica, madeira, produtos alimentares, mobiliário, calçados e minerais não metálicos. Outra importante fonte de renda para a região é a agricultura, que ocupa uma área maior que um milhão de hectares, gerando problemas relativos à agrotóxicos e adubos químicos. Um aspecto relevante também é o alto grau de urbanização, levando à criação de centros urbanos nos municípios. (FEPAM, 2017)

Considerando que a água subterrânea é essencial para a bacia hidrográfica, e devido ao aumento de instalações industriais, da notável prática agrícola e aumento de densidades populacionais em determinadas cidades, é importante para a região a realização de um estudo de vulnerabilidade de águas subterrâneas. Além de que, por serem menos visíveis, os mananciais muitas vezes ficam mais suscetíveis à contaminação por não receberem devida atenção.

O objetivo deste trabalho foi analisar a vulnerabilidade dos aquíferos presentes na bacia, e determinar o risco de poluição das águas subterrâneas da bacia do rio Taquari-Antas por fontes

potenciais de poluição difusas. Este trabalho tem como intuito ser um auxílio para gestores municipais e de bacias hidrográficas.

É importante ressaltar, que, manter a qualidade das águas diminui o custo de tratamento para abastecimento, além de que prevenir a contaminação das águas por causas antrópicas é uma obrigação de todos, visto que somos os maiores causadores de poluição e fazemos parte de um ecossistema maior, no qual outros seres vivos também necessitam de água limpa.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo a avaliação do risco de poluição da água subterrânea da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, mediante a integração do mapa de vulnerabilidade natural do aquíferos e do mapa de cargas potencialmente poluidoras difusas.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

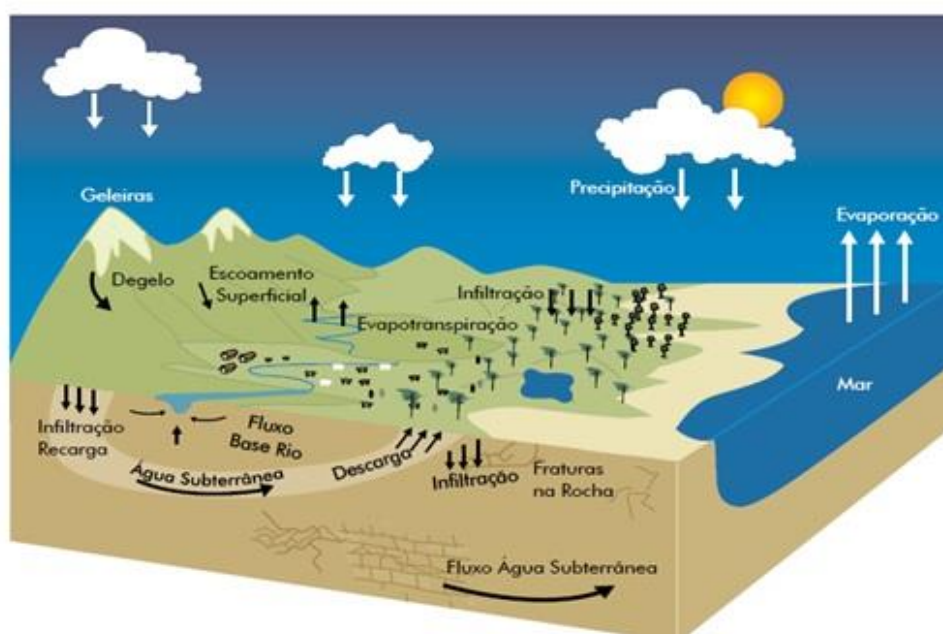
- Elaboração do mapa de recarga;
- Elaboração do mapa de vulnerabilidade do aquíferos presentes na bacia do rio Taquari-Antas;
- Elaboração do mapa de uso e ocupação do solo e de cargas contaminantes difusas;
- Elaboração do mapa de avaliação do risco de poluição da água subterrânea da bacia e sua análise.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFIA

3.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA

A água subterrânea provém da infiltração e percolação da água no solo ou nas rochas, fluindo lentamente entre as partículas e espaços vazios dos solos e das rochas, podendo ficar armazenada por um período muito variável, formando os aquíferos, sendo uma parte do ciclo hidrológico (**Figura 2**). Apesar de as denominações serem diferentes, a água é uma só e está sempre mudando de condição.

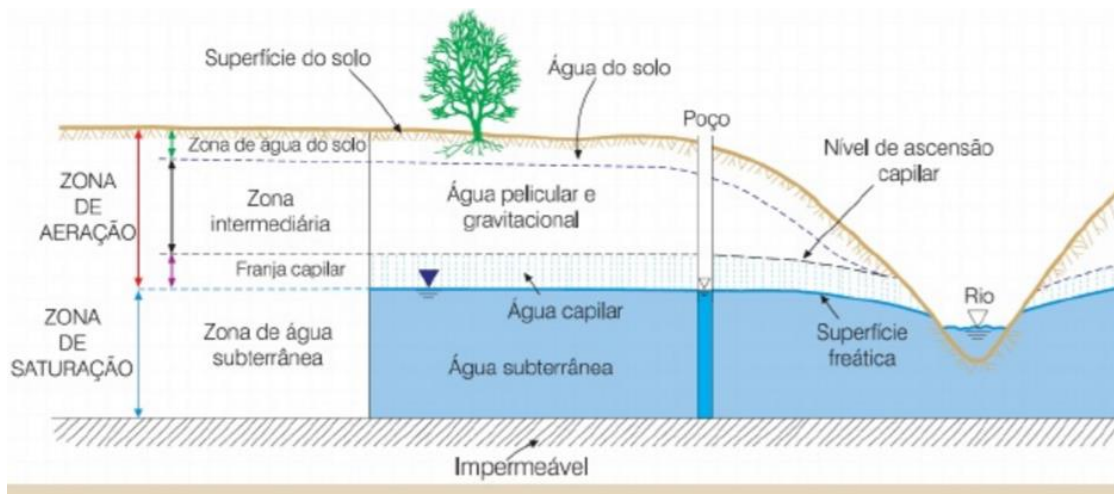
Figura 2. Ciclo hidrológico.



Fonte: MMA (2007).

Abaixo da superfície do terreno, a água contida no solo e nas formações geológicas é basicamente dividida verticalmente em duas zonas horizontais, a saturada e a não saturada. A **zona saturada** fica situada abaixo da superfície freática e nela todos os vazios existentes estão preenchidos com água. Enquanto a **zona não saturada** (zona de aeração ou vadosa), situa-se entre a superfície freática e a superfície do terreno, e nela os poros estão parcialmente preenchidos por gases (principalmente ar e vapor d' água) e por água. Pode ainda ser dividida em três partes, a zona capilar, zona intermediária e zona de água do solo ou zona de evapotranspiração. (FEITOSA e FILHO, 2000). A **Figura 3** esquematiza a distribuição vertical da água.

Figura 3. Distribuição vertical da água.



Fonte: Modificado de Bear e Verrujit (1987).

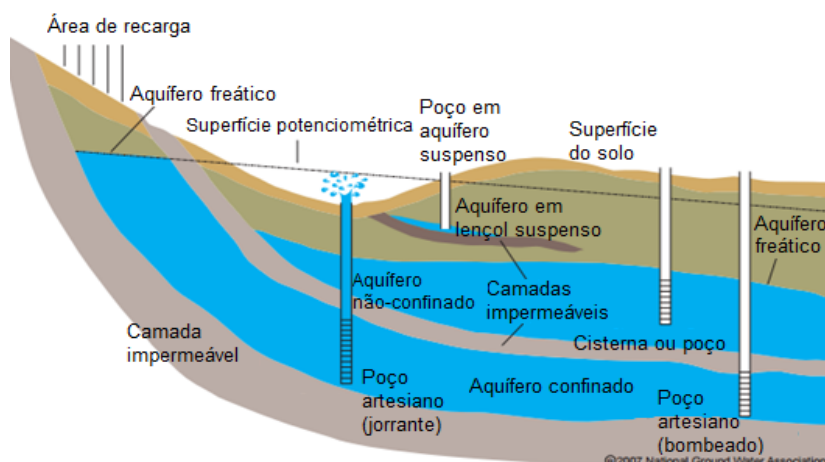
Conforme Feitosa e Filho (2000), os tipos de aquíferos podem ser classificados quanto à pressão das águas nas superfícies limítrofes (**Figura 4**), em:

Aquífero livre (freático e não confinado): é aquele cujo limite superior é uma superfície freática, na qual todos os pontos se encontram a pressão atmosférica. Podem ser drenantes (de base semipermeável) ou não drenantes (de base impermeável).

Aquífero confinado (sob pressão): a pressão da água no topo é maior do que a pressão atmosférica. Podem ser não drenantes (as camadas limítrofes são impermeáveis) ou drenantes (pelo menos uma das camadas limítrofes é permeável).

Aquífero suspenso é o caso especial de aquífero livre formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável de extensão limitada e situada entre a superfície freática regional e o nível do terreno.

Figura 4. Tipos de aquíferos quanto à pressão



Fonte: Coelho e Havens, 2015 adaptado de NGWA, 2007

Os aquíferos também podem ser classificados de acordo com os tipos de vazios existentes. Os **aquíferos porosos** armazenam água nos espaços entre os grãos criados durante a formação da rocha, é o caso das rochas sedimentares, como os arenitos do Sistema Aquífero Guarani. Nos **aquíferos fissurais** a água circula pelas fraturas presentes nas rochas impermeáveis (ígneas ou metamórficas), como os basaltos que estão sobre arenitos da Formação Botucatu. Enquanto os **aquíferos cársticos** são formados por rochas carbonáticas (sedimentares, ígneas ou metamórficas), onde as fraturas, devido à dissolução do carbonato pela água, podem atingir aberturas muito grandes, criando, neste caso, verdadeiros rios subterrâneos. São exemplos as regiões da Gruta de Maquiné, São Domingos, Vale da Ribeira e Bonito. (MMA, 2007).

3.2. FONTES DE POLUIÇÃO

As fontes de poluição podem ser classificadas de acordo com sua distribuição espacial, fornecendo uma impressão direta e visual do tipo de contaminação subterrânea que causam. Segundo Foster et al. (2006), são elas:

- *Fontes de contaminação difusas*: não geram plumas de contaminação claramente definidas, mas normalmente afetam uma área, e, portanto, um volume, maior do aquífero;
- *Fontes de contaminação pontuais*: geralmente produzem plumas claramente definidas e mais concentradas, facilitando sua identificação e possível controle. Entretanto, quando as atividades poluentes são pontuais e múltiplas, mesmo que pequenas, acabam representando uma fonte de poluição difusa.

Algumas fontes de poluição difusas e pontuais serão descritas detalhadamente a seguir.

Fontes de poluição difusas

Áreas residenciais urbanas sem rede de esgoto

Na maioria dos municípios de países em desenvolvimento, o rápido crescimento populacional resultou em grandes áreas que dependem de sistemas de saneamento *in situ*, como latrinas e fossas sépticas (Lewis et al., 1982), ou não possuem nenhum sistema para tratar seus efluentes. Tais sistemas funcionam por percolação do líquido efluente no solo, e, em perfis de solo permeáveis, isso resulta em recarga do aquífero. As partes sólidas, que deveriam ser

periodicamente removidas e despejadas em outro local, em muitos casos permanecem no solo e são progressivamente lixiviadas pela água da chuva ou por outros fluidos que se infiltram. (Foster, 2006), representando assim uma potencial fonte de contaminação para os aquíferos.

Os tipos de contaminantes predominantes são os compostos de nitrogênio, os micro-organismo patogênicos, e em alguns casos, produtos químicos orgânicos sintéticos.

Cultivo agrícola do solo

O cultivo agrícola do solo exerce importante influência sobre a qualidade da recarga da água subterrânea, e adicionalmente as áreas irrigadas alteram as taxas de recargas totais. (FOSTER e CHILTON, 1998; FOSTER et al., 2000 apud FOSTER et al., 2006). Algumas práticas agrícolas provocam grave contaminação difusa, por nutrientes (sobretudo nitratos) e, às vezes, por agrotóxicos.

Os tipos de atividade agrícola responsáveis pelos casos mais graves de contaminação difusa da água subterrânea são aqueles relacionados a áreas extensas de monocultura.

Fontes de poluição pontuais

Atividades industriais

Qualquer atividade industrial é capaz de gerar uma carga contaminante no subsolo em decorrência da emissão de efluentes líquidos, do despejo inadequado de resíduos sólidos (PANKOW et al., 1984; BERNARDES et al., 1991) e de materiais indesejados, além de acidentes envolvendo vazamentos de produtos químicos. As atividades industriais são capazes de gerar séria contaminação do solo e consideráveis cargas contaminantes no subsolo.

Deposição de resíduos sólidos no solo

Descarte de resíduos provenientes das atividades industriais, comerciais ou domésticas em depósitos a céu aberto, como os lixões. Nessas áreas sem nenhuma impermeabilização e contenção dos contaminantes, a água da chuva e o líquido proveniente da decomposição da matéria orgânica (chorume), tendem a se infiltrar no solo, carregando substâncias potencialmente poluidoras, metais pesados e organismos patogênicos. (MMA, 2007)

Postos de gasolina

Os postos de gasolina são responsáveis por um grande número de casos de contaminação da água subterrânea (FETTER, 1988). Embora os incidentes isolados sejam de pequenas dimensões, essas instalações encontram-se por toda parte e lidam com volumes consideráveis de hidrocarbonetos potencialmente poluentes armazenados em tanques subterrâneos que não permitem inspeções visuais para verificar vazamentos. As principais fontes de poluição do solo e da água subterrânea são tanques corroídos, e há uma forte correlação entre a incidência e o tamanho dos vazamentos e a idade dos tanques instalados (KOSTECKI e CALABRESE, 1989; CHEREMISINOFF, 1992). Existe uma grande probabilidade de que tanques com mais de 20 anos estejam bastante corroídos e sujeitos a vazamentos substanciais, a menos que recebam manutenção regular. Além disso, as tubulações que ligam os tanques às bombas podem romper-se devido ao tráfego de veículos pesados ou à baixa qualidade da instalação. (Foster et al., 2006)

Mineração

Segundo Foster et al. (2006), as atividades de mineração e exploração de hidrocarbonetos podem causar importantes impactos na qualidade da água subterrânea em virtude de:

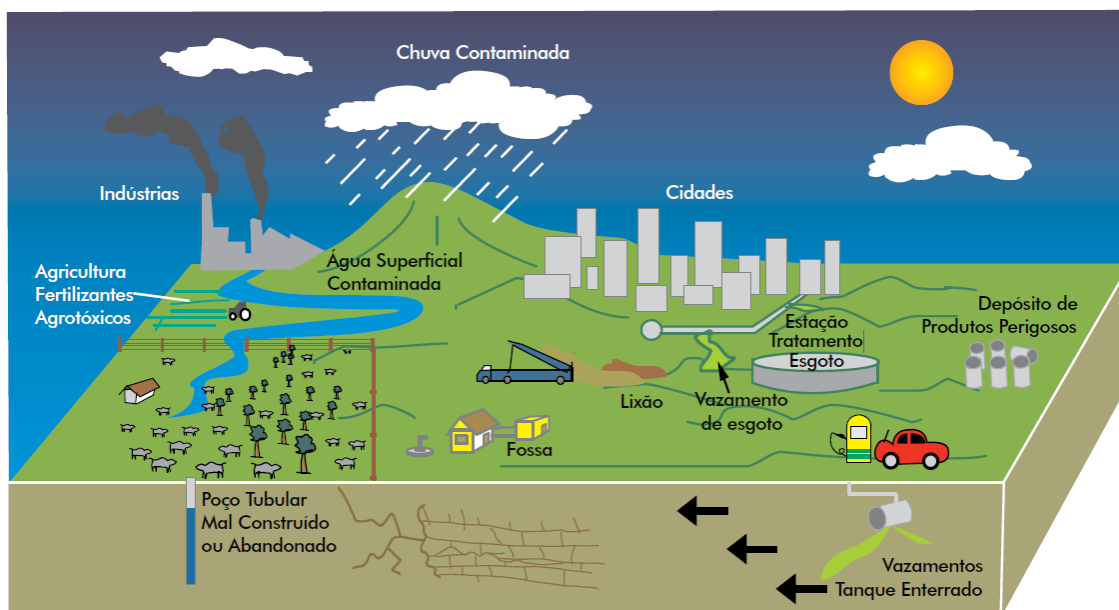
- modificações do regime de fluxo da água subterrânea, seja direta ou indiretamente, em razão da construção e operação de escavações a céu aberto e no subsolo;
- aumento na vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação, como resultado da remoção física de partes da zona vadosa ou das camadas confinantes que forneciam proteção natural;
- despejo das águas de drenagem da mina ou dos fluidos salinos dos reservatórios de hidrocarbonetos, por expansão do solo, descarga nos cursos de água superficiais, ou em lagoas de evaporação sujeitas a percolação;
- infiltração de lixiviado das pilhas de estéreis retiradas da mina;
- despejo de resíduos sólidos e efluentes líquidos em escavações de minas abandonadas;
- operação de minas subterrâneas ou poços de petróleo localizados imediatamente abaixo de importantes aquíferos de abastecimento de água;
- mobilização de metais pesados e outros compostos devido a mudanças no regime de escoamento da água subterrânea em áreas escavadas e/ou mudanças relacionadas às condições hidroquímicas.

Cemitérios

Os cemitérios podem contribuir com a contaminação de aquíferos por microrganismos, íons de metais e compostos nitrogenados. O necro-chorume, de cor castanho-acinzentada, viscosa, de cheiro forte e com grau variado de patogenicidade, é uma das características deste tipo de situação, associada à putrefação de corpos humanos. (PACHECO et al. 1991; MIGLIORINI, 1994; MARINHO, 1998; PACHECO & MATOS 2000; MATOS, 2001)

As formas mais comuns de poluição são filtragem vertical descendente, contaminação natural e poços mal construídos e/ou abandonados. A **Figura 5** apresenta um esquema com as principais fontes de contaminação.

Figura 5. Principais fontes de contaminação de águas



Fonte: MMA (2007)

3.2.1. Classificação do contaminante pelo método POSH

Existem vários sistemas de classificação das atividades potencialmente contaminantes, mas com o intuito de simplificar a categorização é conveniente a utilização de dois fatores (FOSTER et al., 2006):

- a probabilidade da presença de contaminantes, que, segundo se sabe ou se espera, são persistentes e móveis no subsolo;

- a existência de uma carga hidráulica associada (sobrecarga) capaz de gerar o transporte advectivo dos contaminantes para os sistemas aquíferos.

Por isso, o método de avaliação utilizado neste trabalho, e indicado por Foster et al. (2006), é o POSH (acrônimo em inglês de *Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*), que se baseia em duas características de fácil estimativa: a origem do poluente e sua sobrecarga hidráulica. O método produz três níveis qualitativos de “potencial para gerar uma carga contaminante”: reduzido, moderado e elevado, conforme critérios mostrados nas **Tabela 1** e **Tabela 2**.

Tabela 1 Classificação das fontes de contaminação difusas pelo método POSH.

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

Fonte: Foster et al. (2006).

Tabela 2. Classificação e ranqueamento das fontes de contaminação pontuais pelo método POSH.

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

Fonte: Foster et al. (2006).

3.3. VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

Segundo Foster et al. (2006), a vulnerabilidade do aquífero à contaminação é um conjunto de características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero saturado da superfície do solo, o que determina sua suscetibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante aplicada na superfície. Sendo função de:

- Acessibilidade ao aquífero saturado, no sentido hidráulico, à penetração dos contaminantes;
- Capacidade de atenuação dos estratos de cobertura da zona saturada, resultante da retenção físico-química ou das reações do meio.

A vulnerabilidade do aquífero é variável a cada contaminante (índices relativos), e isso torna a análise complexa e muito trabalhosa. Por isso, de forma a tornar a avaliação da vulnerabilidade mais genérica e prática, a solução foi produzir um mapa integrado de vulnerabilidade (índice absoluto). A recente revisão norte-americana NRC (1993), estabeleceu três leis de vulnerabilidade de água subterrânea alertando para as questões descritas anteriormente:

- Toda água subterrânea é vulnerável, em maior ou menor grau, à contaminação;
- A incerteza é inerente a qualquer avaliação de vulnerabilidade à contaminação;
- Os sistemas mais complexos de avaliação da vulnerabilidade apresentam o risco de obscurecer o óbvio e tornar indistintas as sutilezas.

Resumidamente, a vulnerabilidade do aquífero está associada aos aspectos naturais dos estratos presentes. As categorias de vulnerabilidade podem ser definidas como descrito na **Tabela 3**.

Tabela 3. Definições práticas das classes de vulnerabilidade do aquífero.

Classe de vulnerabilidade	Definição correspondente
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação
Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação
Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação)

Fonte: Foster et al., 2006.

3.3.1. Métodos de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos

3.3.1.1. *GOD*

Esse método é de simples aplicação e foi amplamente usado na América Latina e no Caribe durante a década de 1990 (FOSTER et al., 2006). Esse método considera dois fatores básicos (**Tabela 4**):

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

Esses quesitos são estimados por meio do levantamento de muitas características, que tornariam inviável o mapeamento de vulnerabilidade. Com o intuito de uma simplificação, o

índice de vulnerabilidade GOD (FOSTER, 1987; FOSTER e HIRATA, 1988) considera os seguintes parâmetros para a classificação da vulnerabilidade:

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

Tabela 4. Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

Componente de vulnerabilidade	Dados hidrogeológicos	
	<i>Idealmente necessários</i>	<i>Normalmente disponíveis</i>
Inacessibilidade Hidráulica	grau de confinamento do aquífero	tipo de confinamento da água subterrânea
	profundidade até o lençol freático ou a posição da água subterrânea	profundidade até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado
Capacidade de Atenuação	condutividade hidráulica vertical e teor de umidade da zona não saturada (zona vadosa) ou camada confinante	
	distribuição granulométrica dos sedimentos e fissuras na zona vadosa ou camada confinante	grau de consolidação/fissuração desses estratos
	mineralogia dos estratos na zona vadosa ou camada confinante	característica litológica desses estratos

Fonte: Foster et al. (2006).

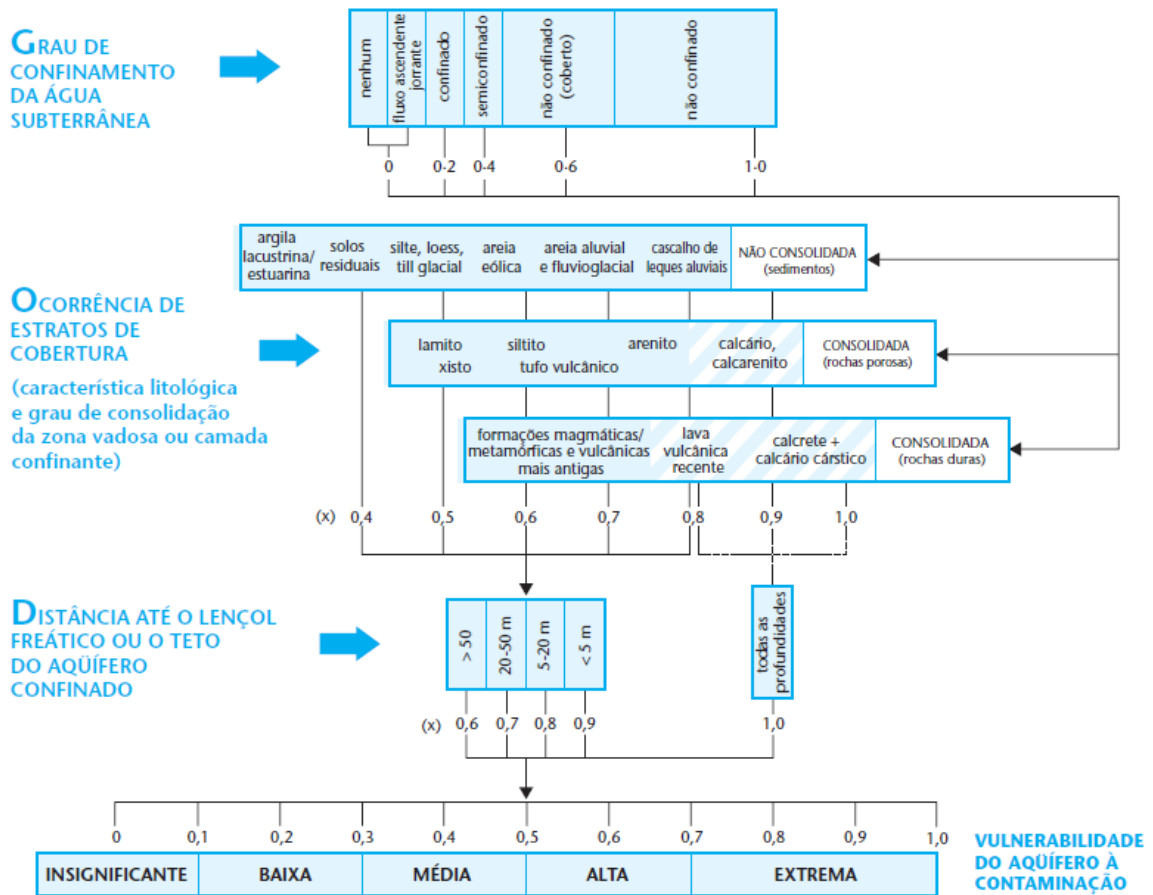
A metodologia empírica proposta para estimar-se a vulnerabilidade do aquífero à contaminação (FOSTER e HIRATA, 1988) envolve alguns estágios distintos:

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

- dinâmico-efetiva, permeabilidade da matriz e teor de umidade da zona não saturada ou retenção específica); isto leva a uma segunda pontuação, numa escala de 0,4–1,0
- terceiro, estimativa da profundidade até o lençol freático (de aquíferos não confinados) ou da profundidade do primeiro nível principal de água subterrânea (para aquíferos confinados), com posterior classificação na escala de 0,6–1,0.

O índice final de vulnerabilidade do aquífero é o produto dos três índices, esquematizado na **Figura 6**.

Figura 6. Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação



Fonte: Foster et al., 2006.

3.3.1.2. DRASTIC

O método DRASTIC foi desenvolvido por Aller et al. em 1987, para a EPA (*Environmental Protection Agency*) para ser um sistema padronizado de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos frente a eventos de poluição. O principal objetivo da metodologia

é auxiliar na alocação de recursos e na priorização das diversas atividades relacionadas às águas subterrâneas (GUIGUER e KOHNKE). O método segue as seguintes premissas:

- O contaminante é inserido na superfície;
- O contaminante atinge a água através da precipitação;
- O contaminante possui mobilidade na água;
- A área a ser avaliada precisa ter uma dimensão de no mínimo 40 hectares.

Cabe destacar que o método não foi desenvolvido para acessar casos em que o poluente é introduzido em profundidade no aquífero, como por exemplo casos de tanques enterrados, lagoas de resíduo ou poços de injeção.

O método consiste na avaliação de sete fatores considerados importantes para controle da poluição na água subterrânea. São eles: profundidade (D), recarga (R), meio aquífero (A), solos (S), topografia (T), influência da zona vadosa (I) e condutividade hidráulica (C). Cada fator tem um peso proposto pelo método que varia de 1 a 5. Os parâmetros são definidos resumidamente a seguir, e seus limites estão descritos na **Tabela 5**.

- A profundidade refere-se ao nível estático da água subterrânea, ou seja, a facilidade de o contaminante alcançar a zona saturada;
- A recarga consiste no volume de água que infiltra no solo e atinge o aquífero;
- O meio aquífero é o material que o compõe e sua capacidade de atenuação;
- Os solos estão associados a camada superficial, responsável pela infiltração da água;
- A topografia influi na facilidade de ocorrer recarga ou escoamento superficial;
- A influência da zona vadosa refere-se a camada não saturada, que é responsável por grande parte da atenuação dos contaminantes;
- Enquanto a condutividade hidráulica consiste no transporte dos contaminantes no interior do aquífero.

O índice é calculado pela soma da multiplicação dos parâmetros pelos seus pesos, podendo variar de 23 a 230. Quanto maior o valor maior será a vulnerabilidade do aquífero, que pode ser classificada como:

1. Vulnerabilidade baixa, se Índice $_{DRASTIC} < 120$
2. Vulnerabilidade intermediária, se entre Índice $_{DRASTIC}$ entre 120 e 159
3. Vulnerabilidade alta, se Índice $_{DRASTIC}$ entre 160 e 199
4. Vulnerabilidade muito alta, se Índice $_{DRASTIC} > 199$

O DRASTIC possui algumas derivações como:

- DRASTIC para pesticidas: aplicação do método para pesticidas (ALLER et. al. 1987).
- SINTACS: para estimar vulnerabilidade na Itália (CIVITA & MAIO, 1997).
- IS (Índice de Suscetibilidade): proposto por Francés et al. (2001) com objetivo de avaliar a vulnerabilidade de águas subterrâneas à poluição por contaminantes agrícolas em escalas intermediárias (1:50.000 – 1:200.000). Utiliza menos parâmetros, entretanto leva em consideração o uso do solo.

Tabela 5. Índices do DRASTIC e seus pesos.

D – Profundidade do nível estático (m) –Peso: 5	Índice DRASTIC
< 1,5	10
1,5 a 4,6	9
4,6 a 9,1	7
9,1 a 15,2	5
15,2 a 22,9	3
22,0 a 30,5	2
> 30,5	1
R – Recarga (mm/ano) – Peso: 4	Índice DRASTIC
< 51	1
51 a 102	3
102 a 178	6
178 a 254	8
> 254	9
A – Meio aquífero – Peso: 3	Índice DRASTIC
Xisto argiloso/argilito	1-3
Rocha metamórfica/ígnea	2-5
Rocha metamórfica/ígnea alterada	3-5
Arenito, calcário e argilito estratificado	5-9
Arenito maciço	4-9
Calcário maciço	4-9
Areia e cascalho	4-9
Basalto	2-10
Calcário carstificado	9-10
S – Solos – Peso: 2	Índice DRASTIC
Fino ou ausente	10
Cascalhoso	10
Areia	9
Turfa	8
Argila agregável e/ou expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
<i>Muck</i>	2
Argila não agregada e não expansível	1

T- Topografia – Peso: 1	Índice DRASTIC
< 2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
> 18	1
I – Influência da zona vadosa – Peso: 5	Índice DRASTIC
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 percentagem significativa	4-8
Rocha metamórfica/ígnea	2-8
Areia e cascalho	6-9
Basalto	2-10
Calcário carstificado	8-10
C - Condutividade hidráulica (cm/s) – Peso: 3	Índice DRASTIC
$4 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-3}$	1
$4 \times 10^{-3} - 1,2 \times 10^{-2}$	2
$1,2 \times 10^{-2} - 2,8 \times 10^{-2}$	4
$2,8 \times 10^{-2} - 4 \times 10^{-2}$	6
$4 \times 10^{-2} - 8 \times 10^{-2}$	8
$> 8 \times 10^{-2}$	10

Fonte: Aller et al. (1987).

3.3.1.3. AVI

O método AVI (*Aquifer Vulnerability Index*) foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisa Hidrológica Canadá (NHRI) por Van Stempvoort et al.(1992).

Nesta metodologia são utilizados para o cálculo do índice de vulnerabilidade os fatores hidrogeológicos potencial de recarga ao aquífero (que considera a condutividade hidráulica do meio, o gradiente hidráulico e a porosidade) e a profundidade do nível d'água. Fatores como a capacidade de atenuação natural do solo não são considerados. Nesta metodologia divide-se a profundidade do nível d'água pelo potencial de recarga, obtendo-se como resultado o tempo de percurso vertical. Este é um valor estimado de quanto tempo um contaminante dissolvido levará para atingir o aquífero. Estes tempos de percurso são divididos em 5 classes (**Tabela 6**). (GUIGUER e KOHNKE, 2002)

Tabela 6. Classes de Vulnerabilidade para Aquíferos, segundo AVI.

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

Fonte: Guiguer e Kohnke (2002).

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

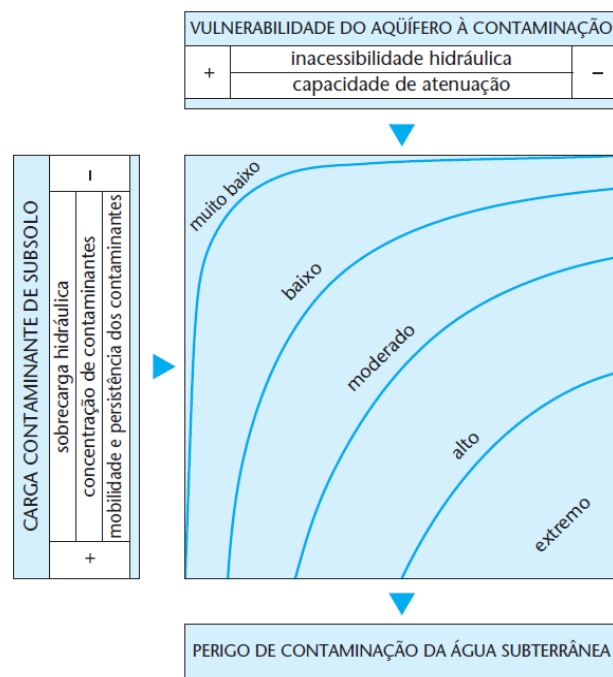
3.4. RISCO DE POLUIÇÃO DE AQUÍFEROS

O risco de poluição pode ser entendido como a probabilidade de as águas subterrâneas sofrerem impactos negativos devido a atividades humanas. O risco pode ser estimado considerando-se dois aspectos:

- a carga contaminante que é, será ou poderá ser aplicada ao subsolo como resultado de atividades humanas;
- a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, o que depende das características naturais dos estratos que o separam da superfície do solo.

Ou seja, é a interação dos dois componentes descritos nos capítulos anteriores, união das informações de vulnerabilidade e carga contaminantes potencialmente poluidoras. As áreas que devem chamar mais atenção são as que apresentam elevada carga de contaminante sobre alta ou extrema vulnerabilidade do aquífero. A **Figura 7** apresenta a análise do risco de contaminação por meio da interação da vulnerabilidade e carga contaminante.

Figura 7. Esquema conceitual para avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea



Fonte: Foster et.al. (2006)

A análise de risco de poluição deve ser um fator importante na gestão de recursos hídricos subterrâneos, nas medidas de controle de uso e ocupação do solo.

3.5. ESCOLHA DOS MÉTODOS

Para análise de vulnerabilidade das águas subterrâneas foi utilizado o método DRASTIC devido ao maior detalhamento do método e também da sua utilização por vários autores. Meneses (2007) avaliou a vulnerabilidade dos aquíferos superiores no município de João Pessoa. Monteiro et al. (2008) estimou a vulnerabilidade do aquífero Barreiras nos bairros de Ibura e Jordão, em Recife, Pernambuco. Borges (2017) analisou a vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no estado do Paraná. Reginato e Ahlert (2013) classificaram a vulnerabilidade do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do estado do RS.

Apesar de Foster et al. (2006) afirmar que o resultado do método pode ser vago, devido à interação de um excesso de parâmetros ponderados, alguns dos quais apresentam forte correlação e sobreposição, os trabalhos referidos indicaram que o DRASTIC apresenta bons resultados, o que fortaleceu a sua utilização neste trabalho.

O risco de poluição das águas subterrâneas foi obtido por meio do DRASTIC e do sistema de classificação de cargas contaminantes POSH, devido aos motivos descritos anteriormente e da simplicidade de classificação do sistema POSH. Cutrim e Campos (2010), aplicaram os métodos DRASTIC e POSH para a determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis, que demonstrou bons resultados, mas demandou tempo e recurso devido à quantidade de parâmetros.

Neste trabalho apenas as cargas potencialmente poluidoras difusas foram abordadas, visto que não seria viável para este trabalho a procura por todas as fontes pontuais da área da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.

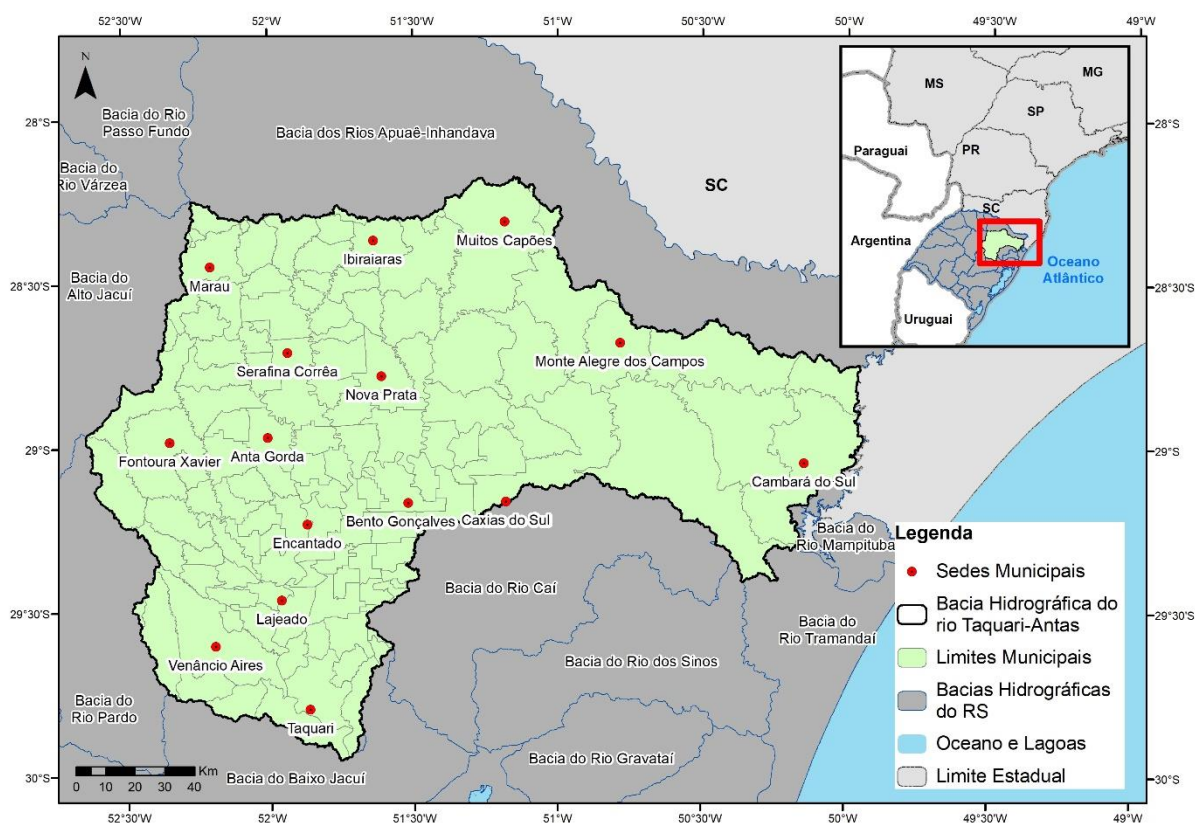
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1. Localização e hidrografia

A bacia hidrográfica do sistema Taquari-Antas, situa-se na região nordeste do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas de 28°10' a 29°57' de latitude sul e 49°56' a 52°38' de longitude oeste (**Figura 8**). Abrange uma área de 26.428 km², equivalente a 9% do território estadual (FEPAM, 2017b), e 122 municípios inseridos total ou parcialmente na bacia. Limita-se ao norte pela bacia do rio Pelotas, a oeste e ao sul pela bacia do rio Jacuí e a leste pelas bacias do rio Caí e Sinos. É o principal afluente do rio Jacuí, formador do Guaíba. (FEPAM, 2017a)

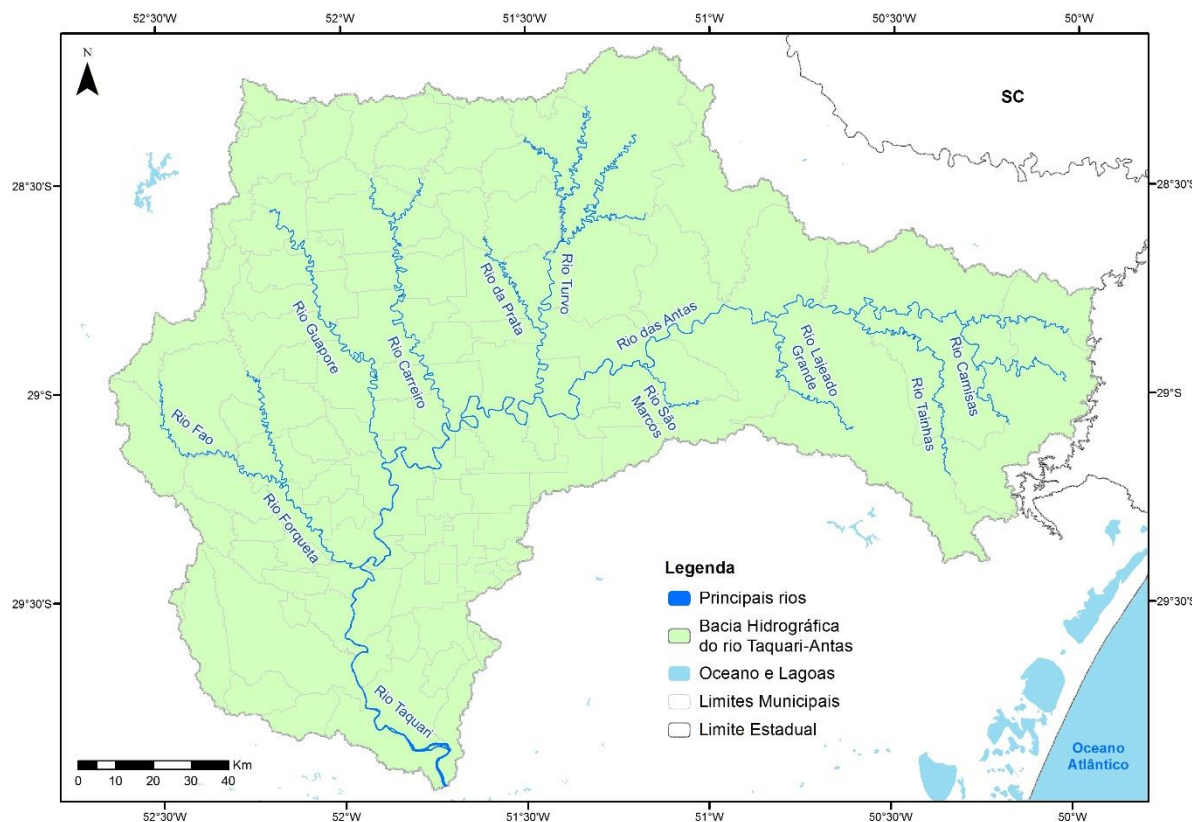
Figura 8. Localização da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.



O rio Taquari-Antas tem suas nascentes em São José dos Ausentes, com denominação de rio das Antas, percorrendo uma distância de 390 km, até a confluência com o rio Carreiro, no município de Cotiporã. A partir de então ele passa a ser denominado de rio Taquari, seguindo 140 km até sua foz no rio Jacuí, em Triunfo. Seus principais afluentes pela margem esquerda

são os rios Camisas, Tainhas, Lajeado Grande e São Marcos, e pela margem direita são os rios Quebra-Dentes, da Prata, Carreiro, Guaporé, Forqueta e Taquari-Mirim. A **Figura 9** mostra os principais rios da bacia hidrográfica.

Figura 9. Principais rios da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.

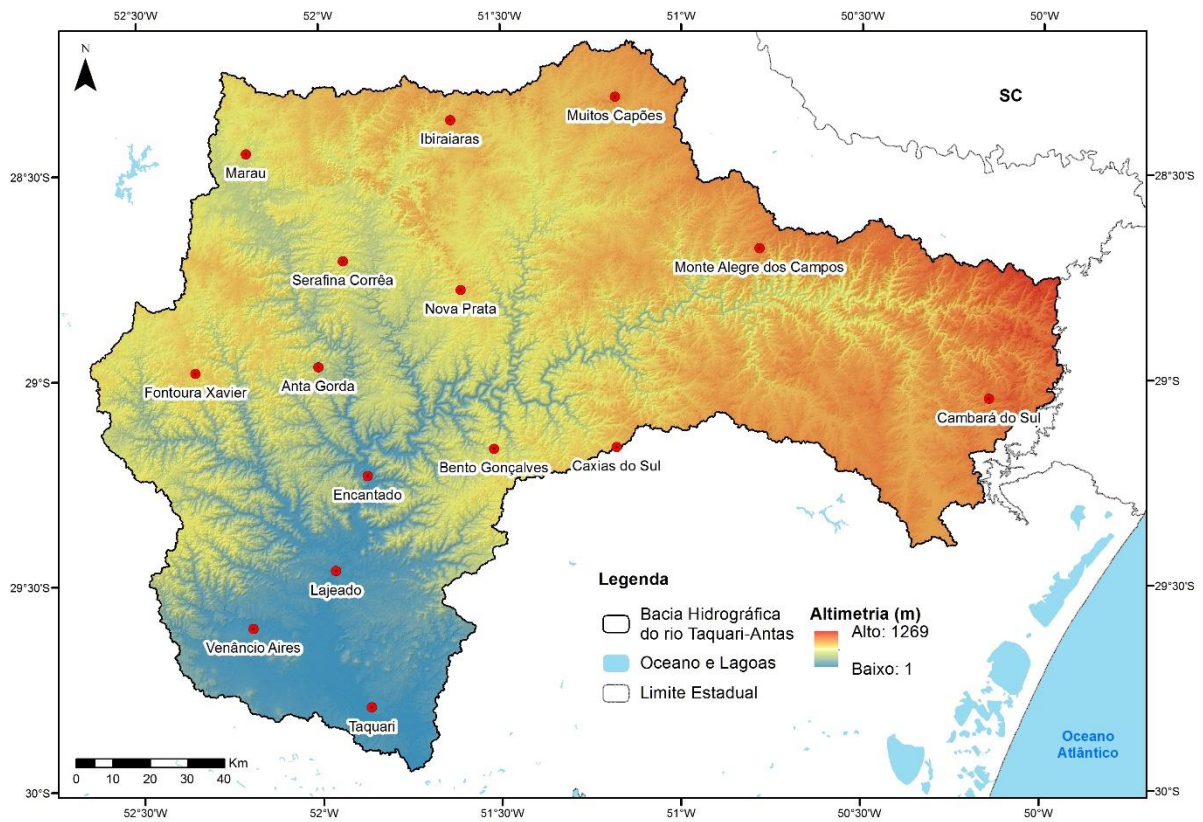


Devido à sua magnitude, esta bacia possui características físicas e antrópicas diferenciadas: áreas de alto índice de industrialização, áreas com predomínio de produção primária, zonas intensamente urbanizadas e riscos de ocorrência de enchentes, entre outras. Quanto ao uso agrícola, destacam-se em área cultivada as bacias de drenagem dos rios Carreiro, Forqueta e das Antas, predominando as culturas de milho e soja. Além destas culturas, o arroz também é cultivado nas partes mais planas, ao sul da bacia. (FEPAM, 2017a)

4.1.2. Altimetria

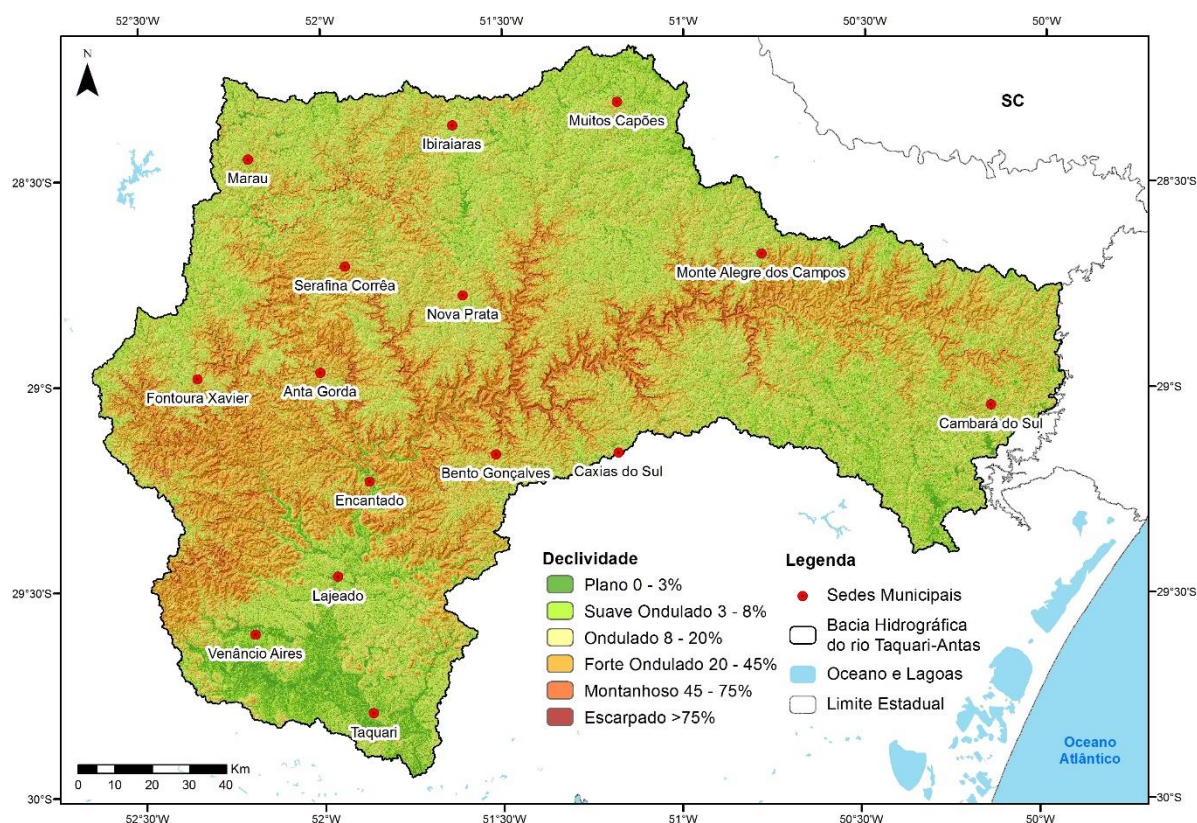
A altitude da bacia hidrográfica varia de 1 a 1.269 metros, sendo que as maiores altitudes são encontradas na nascente do rio das Antas, e as mais baixas na foz do rio Taquari. O mapa de altimetria, que pode ser visto na **Figura 10**, foi desenvolvido com o uso do Modelo Digital da SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (EARTH EXPLORER, 2017).

Figura 10. Mapa de altimetria da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.



A seguir, na **Figura 11**, é apresentado o mapa de declividades, feito a partir do Modelo Digital de Elevação da SRTM, e do programa ArcGis. As maiores declividades acontecem ao longo do curso do central do rio, enquanto na porção sul as declividades são baixas. A geomorfologia da bacia pode ser dividida em três componentes: a Depressão Central, Campos de Cima da Serra e Encosta e Serra do Nordeste.

Figura 11. Mapa de declividades da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.



4.1.3. Geologia e Hidrogeologia

A geologia da bacia hidrográfica é predominantemente formada pela unidade Serra Geral, e em menor proporção pelas unidades Rosário do Sul, Rio do Rastro, Pirambóia, Botucatu, Serra do Herval e os Depósitos Aluvionares, como mostra o Mapa Geológico da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas na **Figura 12**(WILDNER et al., 2007).

A Formação Serra Geral compreende o domínio do vulcanismo fissural do tipo plateau (DVM), que corresponde às fases finais de preenchimento da Bacia do Paraná, um dos maiores eventos vulcânicos ocorridos no planeta, há 135-120 milhões de anos. A formação Serra Geral é constituída principalmente de basaltos e basaltos-andesitos, e em menor quantidade de riolitos e riodacitos. O sistema de derrames em platô é alimentado por uma intensa atividade intrusiva, normalmente representada por diques e sills que acompanham, grosseiramente, as principais discontinuidades estruturais da bacia. (CPRM, 2010).

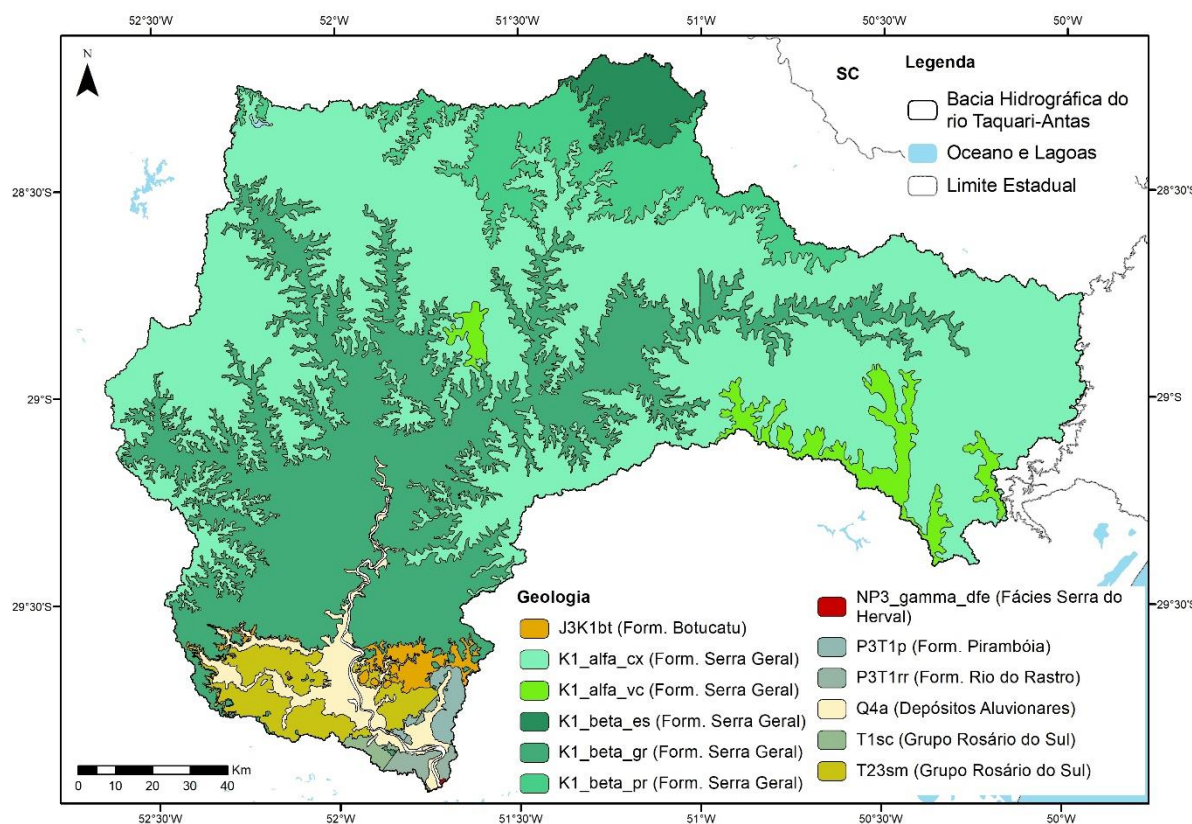
A Formação Rosário do Sul, que compreende as unidades Santa Maria e Sanga do Cabral, reúne arenitos de granulação média a fina, siltitos argilosos e lamitos, que mostram colorações vermelha, castanha-avermelhada, cinza-avermelhado e branca. Os arenitos são mal

selecionados, exibindo estratos descontínuos, lenticulares, com estratificação cruzada acanalada e tangencial. O ambiente de deposição é fluvial, localmente lacustre. (UFSM, 2017).

A Formação Rio do Rastro é composta por siltito, argilito síltico e argilito, e está presente no extremo sul da bacia do rio Taquari-Antas. A Formação Pirambóia compreende arenitos finos a médios, com geometria lenticular bem desenvolvida, depositados em ambiente continental eólico, com intercalações fluviais (CPRM, 2010).

A Formação Botucatu contém arenitos finos a grossos, de coloração avermelhada, com grãos bem arredondados e alta esfericidade, gerados em ambiente continental desértico; correspondem a depósitos de dunas eólicas. As Fácies Serra do Herval compreendem o domínio dos complexos granitoides não deformados, e estão presentes no sul da bacia, numa área muito pequena quando comparada à da bacia. Os Depósitos Aluvionares são formados por areia, e compreendem as planícies existentes ao longo dos rios e que são inundadas, periodicamente em épocas de cheia. (CPRM, 2010)

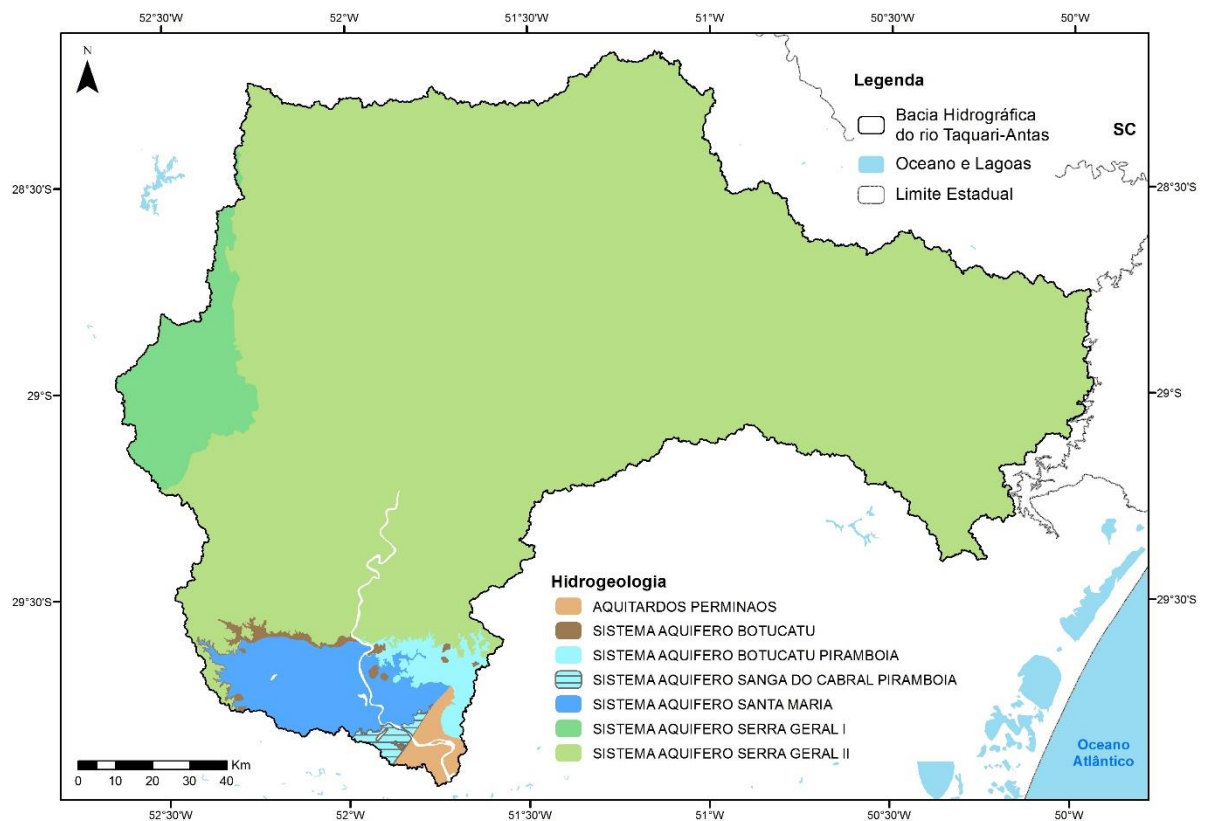
Figura 12. Mapa de Geologia da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.



O mapa dos sistemas aquíferos presentes na bacia hidrográfica é apresentado na **Figura 13** (MACHADO e FREITAS, 2005). O sistema aquífero Serra Geral I, predominante na bacia,

apresenta média a baixa possibilidade para águas subterrâneas, enquanto o sistema Serra Geral II apresenta alta a média possibilidade, ambos em rochas com porosidade por fraturas. Em rochas com porosidade intergranular, o sistema Santa Maria possui alta a média possibilidade para água subterrânea, já os sistemas Sanga do Cabral/Pirambóia e Botucatu/Pirambóia apresentam baixa a média possibilidade. O sistema aquífero Botucatu é praticamente improdutivo e os Aquitardos Permeanos são limitados de baixa possibilidade para água subterrânea, seja a porosidade por fraturas ou intergranular.

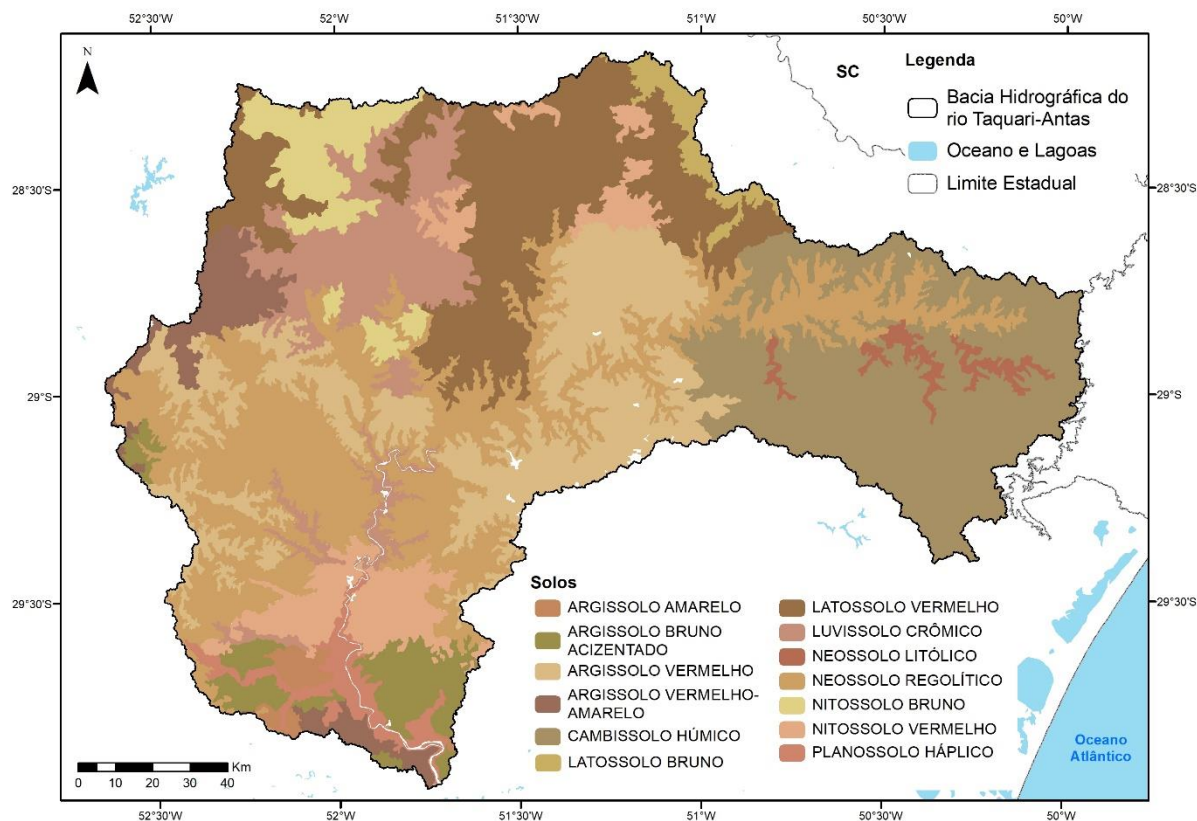
Figura 13. Mapa dos sistemas aquíferos da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.



4.1.4. Solos

O mapa de solos da bacia hidrográfica (CPRM, 2010) é mostrado na **Figura 14**. Predominam neossolos, cambissolos, latossolos e argissolos.

Figura 14. Mapa de Solos da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.



4.1.5. Clima e Vegetação

Segundo a classificação climática de Köppen, a bacia apresenta clima do tipo Cfa, caracterizado por ser temperado úmido com verão quente e sem estação seca. De acordo com as Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 (INMET, 2017), a precipitação média anual da região é cerca de 1.650 mm/ano e a evaporação total varia de 800 e 1.200 mm/ano. A temperatura média anual é aproximadamente 18°C, e as temperaturas máximas e mínimas anuais são de 23°C e 12°C, respectivamente.

Quanto à vegetação, a bacia do rio Taquari-Antas apresenta quatro tipologias associadas à Mata Atlântica e consideradas como zona de transição: Savana, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Decidual e Áreas de Tensão Ecológica. Ainda podem ser observados diversos ambientes onde a vegetação natural encontra-se em satisfatório nível de preservação, localizados nas encostas íngremes dos vales, de difícil acesso e impróprios a práticas agrícolas. Os locais mais preservados acham-se representados por dez unidades de conservação correspondentes a 16.000 ha, sendo a mais importante a do Parque Nacional dos Aparados da Serra, no município de Cambará do Sul. (FEPAM, 2017a)

4.2. GEOPROCESSAMENTO

Os mapas obtidos foram resultado da manipulação dos dados no *Software* ArcGis, versão 10.3, da ERSI. O sistema de referência utilizado foi SIRGAS 2000. A **Tabela 7** apresenta as ferramentas usadas para cada operação feita.

Tabela 7. Operações e respectivas ferramentas do programa ArcGis.

Operação	Ferramenta
União de imagens	<i>Composite Bands</i>
Operação entre <i>rasters</i>	<i>Raster Calculator</i>
Manipulação de projeção	<i>Define Projection e Projetc</i>
Interpolação	<i>Topo to Raster, IDW, Kriging</i>
Cálculo de densidade de lineamentos	<i>Line Density</i>
Classificação	<i>Reclassify</i>
Classificação do uso do solo	<i>Image Classification</i>
Conversão de polígono para <i>raster</i>	<i>To Raster</i>

A relação de mapas e *shapefiles* utilizados para classificação dos índices de acordo com o DRASTIC estão listados a seguir:

- Mapa de Solos do Rio Grande do Sul, do ano 2010, CPRM, escala 1:750.000;
- Mapa de Geodiversidade do Rio Grande do Sul, do ano 2010, CPRM, escala 1:750.000;
- Mapa de Hidrogeologia do Rio Grande do Sul, do ano 2010, CPRM, escala 1:750.000;
- *Shapefile* de estruturas do Rio Grande do Sul, do ano 2010, CPRM, escala 1:750.000;
- Mapa de volumes anuais explotados de água subterrânea no Brasil, do ano 2014, CPRM, escala 1: 1.000.000;
- Modelo Digital de Elevação da SRTM (EARTH EXPLORER, 2014), resolução de 30 metros.
- Uso do solo, elaborado pela autora, resolução de 30 metros.

Para a classificação do uso do solo, necessária para aplicação do método POSH, foram utilizadas as imagens Landsat 8 do sensor OLI de resolução 30 m, dos anos de 2017 e 2016 e a

imagem noturna DMSP –OLS, de resolução 0,55 km, de 2013, que auxiliou na identificação de áreas urbanizadas.

Outros *shapefiles* foram utilizados na elaboração dos mapas apresentados neste trabalho, são eles:

- Malha municipal, na escala 1:250.000, IBGE (2015);
- Malha estadual, na escala 1:250.000, IBGE (2015);
- Limite dos países, na escala 1:1.000.000, CDC;
- Hidrografia, na escala 1:50.000 (Hasenack, 2010);
- Lagos e lagoas, na escala 1:250.000, FEPAM (2005);
- Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, feita pela autora, com base no MDE da SRTM, na escala 1:150.000.

4.3. APLICAÇÃO DO MÉTODO DRASTIC

Para a aplicação do método DRASTIC e análise de vulnerabilidade foram elaborados os sete mapas correspondentes aos parâmetros do método. Posteriormente, os resultados foram multiplicados pelo peso atribuído a cada fator pelo método, de acordo com a **Tabela 8**, e somados conforme a Equação (1). Para o procedimento de multiplicação e soma foi utilizado o recurso *Raster Calculator*.

Tabela 8. Peso de cada parâmetro do DRASTIC.

Parâmetro	<i>D</i>	<i>R</i>	<i>A</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	<i>I</i>	<i>C</i>
Peso	5	4	3	2	1	5	3

Fonte: Aller et al., 1987.

$$DRASTIC = (Di \times Dp) + (Ri \times Rp) + (Ai \times Ap) + (Si \times Sp) + (Ti \times Tp) + (Ii \times Ip) + (Ci \times Cp) \quad (1)$$

Onde:

Di, *Ri*, *Ai*, *Si*, *Ti*, *Ii* e *Ci*: são os valores de cada fator;

Dp, *Rp*, *Ap*, *Sp*, *Tp*, *Ip* e *Cp*: são os pesos atribuídos a cada fator.

O resultado obtido foi classificado conforme a **Tabela 9**, que segue o método proposto, a fim de determinar a vulnerabilidade das águas subterrâneas na bacia do rio Taquari-Antas.

Tabela 9. Relação entre o índice DRASTIC e a vulnerabilidade das águas subterrâneas.

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade
Superior a 199	Muito elevada
160 a 199	Elevada
120 a 159	Moderada
Inferior a 120	Baixa

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

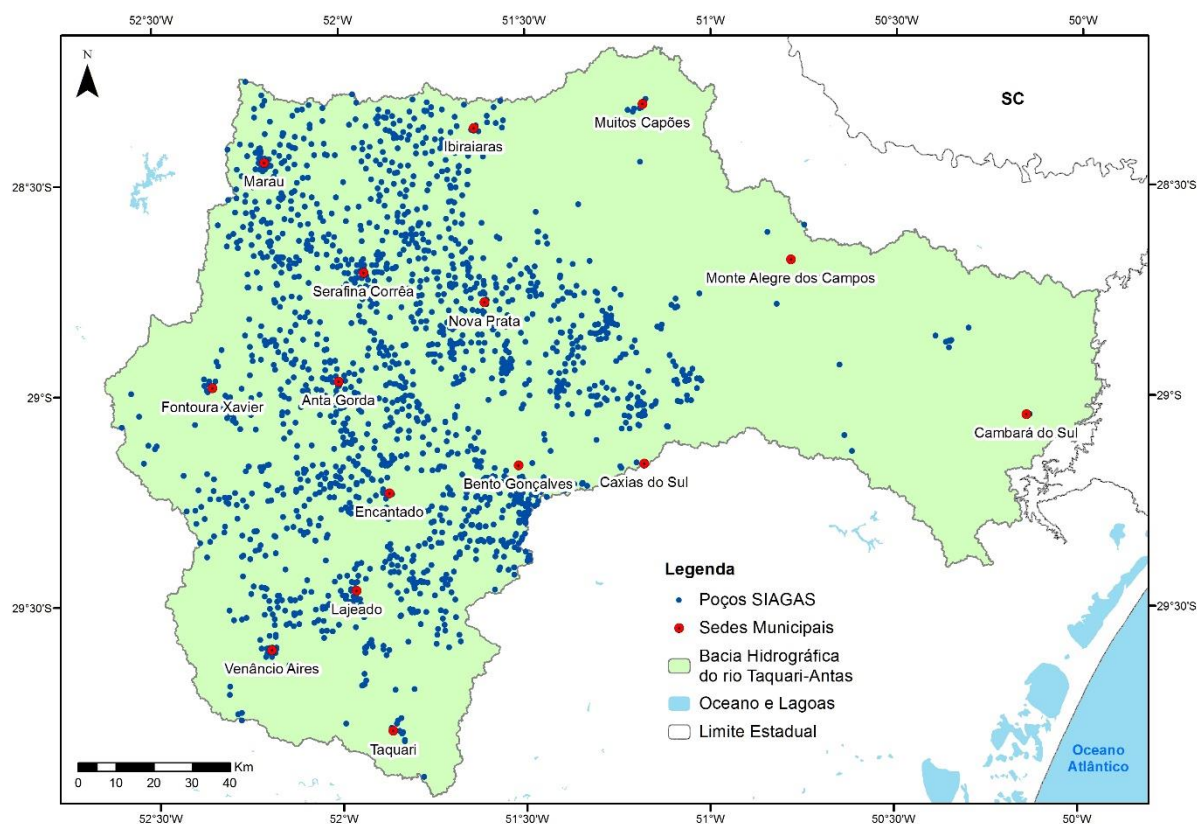
A seguir será descrita a metodologia para cada item do DRASTIC.

4.3.1. Profundidade

O lençol freático é a expressão da superfície além do nível do solo onde todos os poros são preenchidos com água. Acima do nível de água, os espaços vazios são preenchidos com água e ar. A profundidade no nível d'água é importante, principalmente porque determina a profundidade pela qual o contaminante vai percorrer até chegar ao aquífero, e vai determinar por quanto tempo o contaminante vai permanecer em contato com o meio circundante. (ALLER et al., 1987)

A profundidade foi estimada com base nos dados de nível estático de poços tubulares da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, presentes no SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrânea). As informações foram gerenciadas a fim de descartar possíveis erros, que tornariam o mapa potenciométrico não representativo, resultando em 1.940 registros de nível estático, espacializados na **Figura 15**. Cabe destacar que as datas dos testes de bombeamento dos poços variam de 1957 a 2009.

Figura 15. Poços tubulares da plataforma SIAGAS, presentes na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.



Para gerar o *raster* de profundidade em toda a área da bacia foi utilizada a ferramenta *Topo to Raster*, e o resultado foi classificado, com a ferramenta *Reclassify*, de acordo com os valores propostos pelo método, presentes na **Tabela 10**.

Tabela 10. Relação entre profundidade e índice DRASTIC.

D – Profundidade do nível estático (m)	Índice DRASTIC
< 1,5	10
1,5 a 4,6	9
4,6 a 9,1	7
9,1 a 15,2	5
15,2 a 22,9	3
22,0 a 30,5	2
> 30,5	1

4.3.2. Recarga

A principal fonte de abastecimento da água subterrânea é a precipitação, a qual, através da infiltração em superfície, percola até alcançar o nível freático. Recarga corresponde à quantidade de água por unidade de área que penetra no solo e alcança o nível freático. Esta água de recarga pode viabilizar o transporte vertical do contaminante até o nível de água, e o transporte horizontal dentro do aquífero. Complementarmente, este parâmetro pode contribuir para a dispersão ou diluição dos contaminantes na zona não-saturada ou mesmo na zona saturada. (ALLER et al., 1987)

A recarga foi estimada a partir do balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas. Segundo COLLISCHONN e DORNELES (2013), o balanço de água no solo pode ser expressado pela equação (2):

$$\Delta V = P - Q - G - ET \quad (2)$$

Onde:

ΔV : Variação do volume de água armazenado na bacia;

P: Precipitação;

ET: Evapotranspiração;

Q: Escoamento superficial;

G: Percolação.

A percolação é a passagem de água da camada superficial do solo para camadas mais profundas. A evapotranspiração é a retirada de água por evaporação direta do solo e por transpiração das plantas.

Para aplicabilidade da fórmula neste trabalho, a equação foi modificada, como mostrado abaixo, mas ainda preservando os fundamentos da anterior.

$$R = P - E - Q_s - CWA \quad (3)$$

Onde:

R: Recarga em mm/ano;

P: Precipitação em mm/ano;

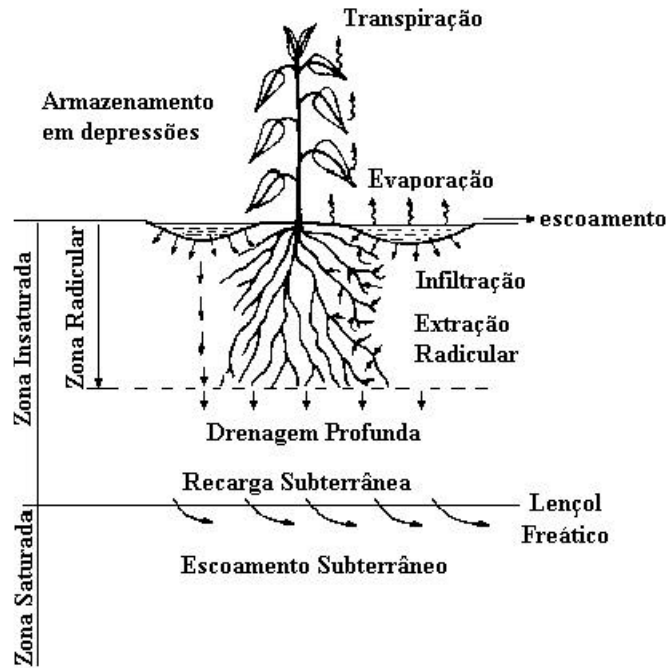
E: Evapotranspiração em mm/ano;

Qs: Escoamento superficial em mm/ano

CWA: Capacidade de armazenamento de água do solo em mm.

A **Figura 16** a seguir representa os componentes necessários para o balanço hídrico.

Figura 16. Componentes do balanço hídrico.



Fonte: Hillel, 1980.

Por fim, o mapa de recarga resultante foi classificado de acordo com a **Tabela 11**.

Tabela 11. Relação entre recarga e índice DRASTIC.

R – Recarga (mm/ano)	Índice DRASTIC
< 51	1
51 a 102	3
102 a 178	6
178 a 254	8
> 254	9

As variáveis necessárias para o cálculo da recarga serão descritas a seguir.

4.3.2.1. Precipitação

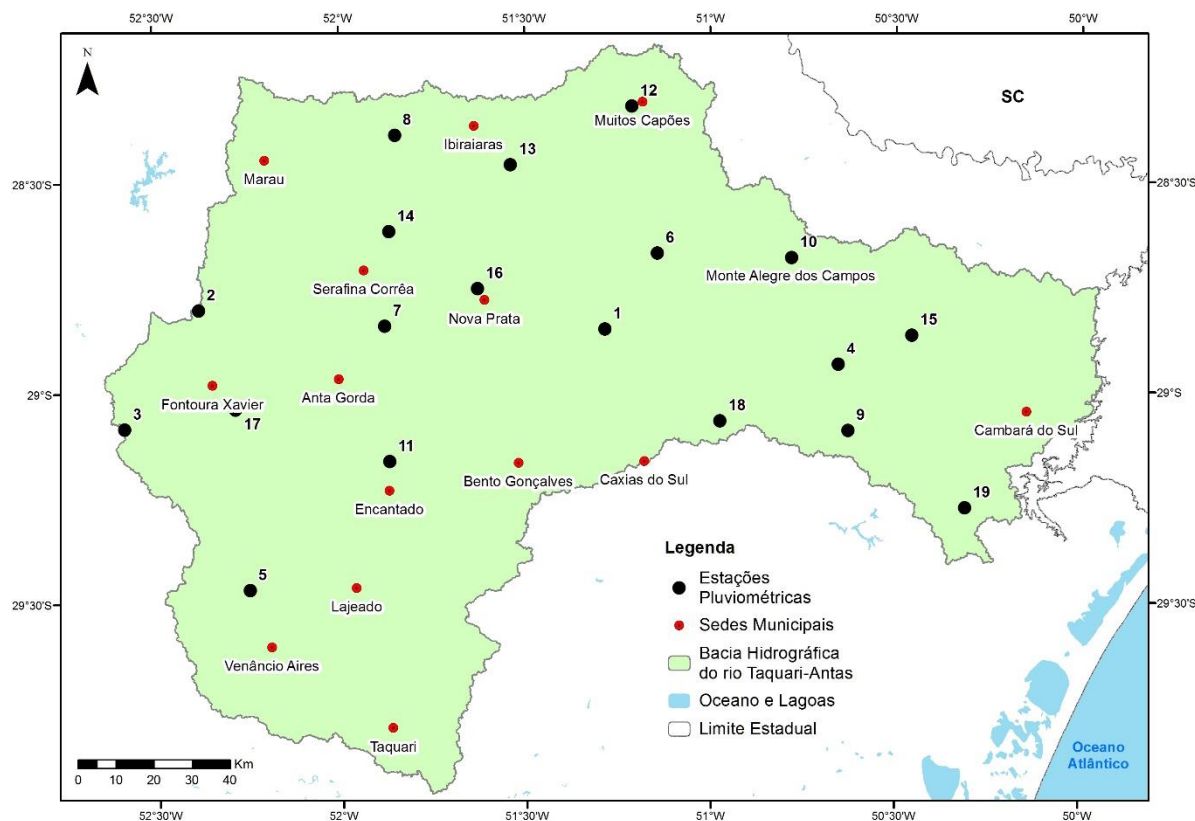
Para o cálculo da precipitação foram utilizados os dados das estações pluviométricas presentes na bacia, disponibilizadas no Hidroweb, programa da Agência Nacional das Águas (ANA). Foram utilizadas estações com no mínimo 10 anos de registros. A localização das estações é apresentada na **Figura 17** e a relação dessas, assim como o período de dados utilizados, são apresentados na **Tabela 12**.

Após o manejo dos dados foi utilizada a ferramenta de interpolação *Ponderação do Inverso da Distância (IDW)* para a espacialização dos dados em toda a área da bacia.

Tabela 12. Estações pluviométricas e dados utilizados.

ID	Estação	Precipitação (mm/ano)	Dados utilizados
1	Antônio Prado	1868	1986 - 2016
2	Auler	1804	1986 - 2016
3	Barros Cassal	1794	1986 - 2016
4	Cazuza FerreirA	1681	2002 - 2016
5	Deodoro	1883	2004 - 2016
6	Fazenda Roseira	1774	1986 - 2016
7	Guaporé	1784	1986 - 2016
8	Jansen	1573	1986 - 2016
9	Lajeado Grande	1608	1986 - 2016
10	Monte Alegre dos Capões	1667	2002 - 2016
11	Muçum	1682	1986 - 2016
12	Muitos Capões	1707	2002 - 2016
13	Nossa Senhora de Fátima	1671	2002 - 2016
14	Passo Migliavaca	1897	1986 - 2016
15	Passo Tainhas	1657	1986 - 2016
16	Prata	1788	1986 - 2016
17	São José do Herval	1685	2004 - 2016
18	Seca	1740	1986 - 2016
19	Vila Tainhas	1589	2000 - 2016

Figura 17. Estações pluviométricas presentes na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.



4.3.2.2. *Evapotranspiração*

A evapotranspiração anual potencial foi estimada com a equação de Thornthwaite (Equação (4)), que calcula a evapotranspiração em um intervalo de tempo mensal, a partir de dados de temperatura (COLLISCHONN e DORNELES, 2013).

$$E = 16 \left[\frac{10 * T}{I} \right]^a \quad (4)$$

Onde:

E: Evapotranspiração potencial (mm.mês⁻¹);

T: Temperatura média do mês (°C);

I e a: Coeficientes calculados segundo equações que seguem:

$$I = \sum_{j=1}^{12} \left[\frac{T_j}{5} \right]^{1,514} \quad (5)$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,792 * 10^{-2} * I + 0,49239 \quad (6)$$

Onde:

J: cada um dos 12 meses;

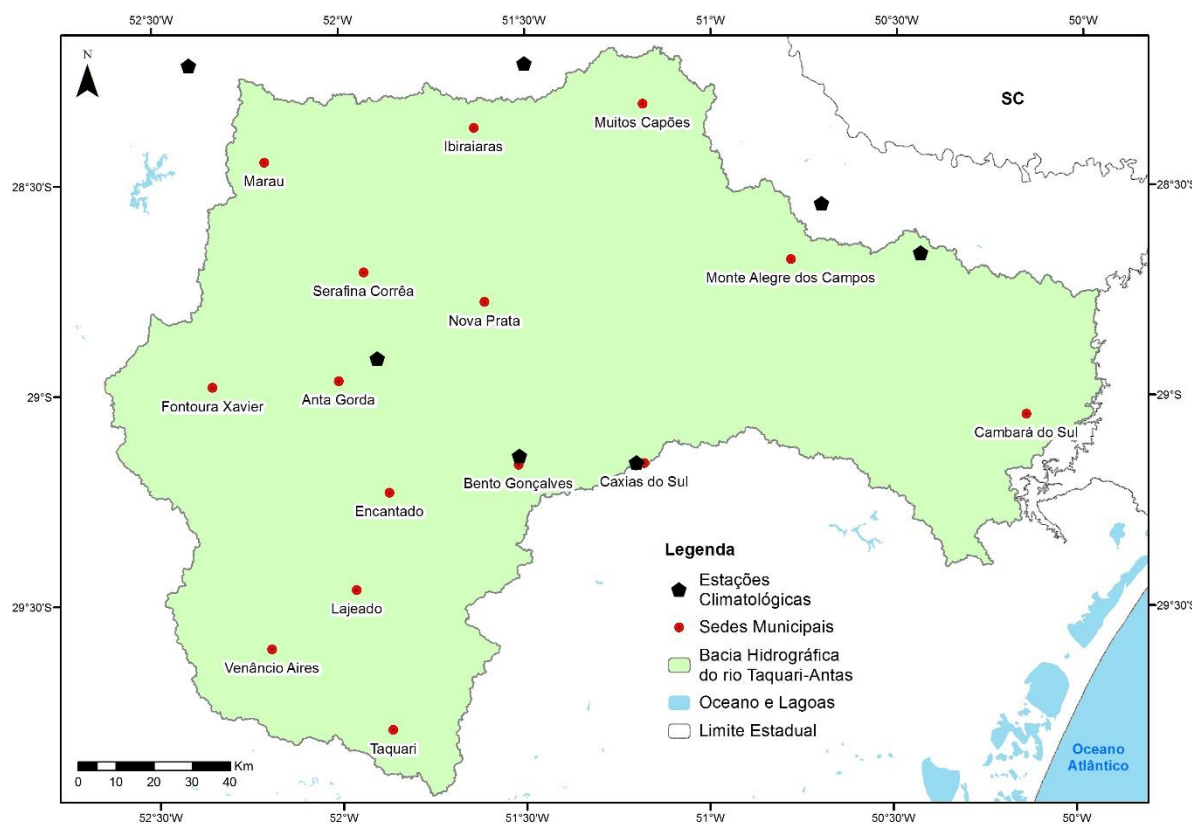
Tj: temperatura média de cada um dos 12 meses.

Por fim, os resultados mensais foram somados para obtenção dos resultados anuais.

Os registros de temperatura foram obtidos das Normais Climatológicas do Brasil de 1961 – 1990 do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), para as estações climatológicas presentes no Rio Grande do Sul. A **Figura 18** apresenta a localização das estações na bacia e as mais próximas.

Os dados de evapotranspiração foram interpolados com a ferramenta *Krigging*, abrangendo toda a extensão da bacia hidrográfica.

Figura 18. Estações climatológicas presentes na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas e ao seu redor.



4.3.2.3. *Escoamento superficial*

A variável escoamento superficial foi calculada realizando-se a multiplicação do coeficiente de escoamento (C) pela subtração entre a precipitação e a evapotranspiração, que caracteriza o escoamento total da bacia, como apresenta a equação (7).

$$Q_s = (P - E).C \quad (7)$$

Os valores de C foram obtidos com base nas análises dos valores recomendados pelo Soil Conservation Service (SCS – USDA), e por referências como Villela e Mattos (1980) e ASCE, apresentados nas tabelas a seguir. Para aplicação dos valores escolhidos foi utilizado o *raster* de uso do solo da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, feito pela autora.

Tabela 13. Valores de C recomendados pelo SCS – USDA (1972)

Declividade (%)	Solos arenosos	Solos francos	Solos argilosos
<i>Florestas</i>			
0 a 5	0,10	0,30	0,40
5 a 10	0,25	0,35	0,50
10 a 30	0,30	0,50	0,60
<i>Pastagens</i>			
0 a 5	0,10	0,30	0,40
5 a 10	0,15	0,35	0,55
10 a 30	0,20	0,40	0,60
<i>Terras cultivadas</i>			
0 a 5	0,30	0,50	0,60
5 a 10	0,40	0,60	0,70
10 a 30	0,50	0,70	0,80

Tabela 14. Valores de C baseados nas características detalhadas das diversas superfícies presentes na bacia

Telhados perfeitos sem fuga;	0,70 a 0,95
Superfícies asfaltadas em bom estado;	0,85 a 0,90
Pavimentação de paralelepípedos, ladrilhos ou blocos de madeira com juntas bem tomadas;	0,70 a 0,85
Para superfícies anteriores sem as juntas tomadas;	0,50 a 0,70
Pavimentação de blocos inferiores sem as juntas tomadas;	0,40 a 0,50
Estradas macadamizadas;	0,25 a 0,60
Estradas e passeios de pedregulho;	0,15 a 0,30
Superfícies não-revestidas, pátios de estradas de ferro e terrenos descampados, parques, jardins, dependendo da declividade;	0,10 a 0,30
Do solo na natureza e do subsolo.	0,01 a 0,20

Fonte: Villela e Mattos (1980).

Tabela 15. Valores de C recomendados pela ASCE (1969).

Superfície	C	
	Intervalo	Valor esperado
Pavimento		
Asfalto	0,70 - 0,95	0,83
Concreto	0,80 - 0,95	0,88
Calçados	0,75 - 0,85	0,80
Telhado	0,75 - 0,95	0,85
Cob.: grama solo arenoso		
Plano (2%)	0,05 - 0,10	0,08
Médio (2 a 7%)	0,10 - 0,15	0,13
alta (7%)	0,15 - 0,20	0,18
grama, solo pesado		
plano (2%)	0,13 - 0,17	0,15
Médio (2 a 7%)	0,18 - 0,22	0,20
alta (7%)	0,25 - 0,35	0,30

Fonte: Tucci, 1995.

4.3.2.4. Capacidade de armazenamento de água do solo

Esse parâmetro foi obtido a partir de ROSSATO (2001), que estima os valores de armazenamento de água no solo por meio da capacidade de campo e do ponto de murcha utilizando funções de pedo-transferência.

4.3.3. Meio aquífero

Este parâmetro corresponde ao material, consolidado ou não, que atua como aquífero. Um aquífero é definido como uma rocha capaz de armazenar água, que pode ser utilizada para fins diversos. A água fica armazenada nos poros existentes nas rochas sedimentares ou em fraturas em rochas metamórficas/ ígneas. (ALLER et. al., 1987)

O fluxo da água dentro do aquífero é afetado pelo material do mesmo, bem como, a rota e o percurso de um contaminante dentro do aquífero. O comprimento do percurso de um contaminante, no sistema aquífero, é importante para a determinação do tempo disponível para o processo de atenuação e dispersão do contaminante. A constituição do aquífero influencia, ainda, na superfície de contato entre o contaminante e o aquífero. (MENESES, 2007)

A classificação do meio aquífero foi baseada nos Mapas de Geodiversidade e de Hidrogeologia e o *shapefile* de Estruturas do Rio Grande do Sul, publicados em 2010 pela CPRM, na escala 1:750.000.

Os índices foram obtidos por meio das características composição, fraturamento, porosidade e média de densidade de lineamentos de cada unidade hidrogeológica. Para o cálculo da densidade foi utilizada a ferramenta *Line Density* com raio de busca de 10.000 metros, que apresentou melhor ajuste às áreas quando comparados com outros valores. A ferramenta *Topo to Raster* foi empregada para transformar o *shapefile* de polígono em *raster*, com tamanho de célula de 30 metros. A **Tabela 16** apresenta os índices para a classificação.

Tabela 16. Relação entre meio aquífero e índice DRASTIC.

A – Meio aquífero	Índice DRASTIC
Xisto argiloso/argilito	1-3
Rocha metamórfica/ígnea	2-5
Rocha metamórfica/ígnea alterada	3-5
Arenito, calcário e argilito estratificado	5-9
Arenito maciço	4-9
Calcário maciço	4-9
Areia e cascalho	4-9
Basalto	2-10
Calcário carstificado	9-10

4.3.4. Solo

O meio do solo refere-se a parte superficial da zona vadosa, caracterizada pela atividade biológica significativa. Para os propósitos do modelo DRASTIC, deve-se considerar como solo a zona que apresenta pouca umidade e que se apresenta a até 1,80 m ou menos de profundidade em relação à superfície do terreno. O solo tem um impacto importante na taxa de infiltração de água, o que reflete diretamente na recarga do aquífero. Tal infiltração pode influenciar no deslocamento vertical de um contaminante. (ALLER et. al., 1987)

A textura, ou granulometria, do solo pode ser responsável, tal como no parâmetro A (material do aquífero), por uma maior ou menor permeabilidade, aumentando ou reduzindo, respectivamente, a vulnerabilidade do aquífero. Outros elementos do solo que podem influenciar na vulnerabilidade são sua espessura e a presença de matéria orgânica (restos de plantas e animais mortos, compostos húmicos). (MENESES, 2007)

Para a classificação do solo foi utilizado o Mapa de Solos do Rio Grande do Sul da CPRM, publicado em 2010, na escala (1:750.000), que foi elaborado com base no Mapa de Classificação dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul Quanto à Resistência a Impactos Ambientais (KÄMPF et al., 2008).

A delimitação dos índices de acordo com o método DRASTIC (**Tabela 17**), levou em consideração a textura e a capacidade de drenagem do solo, considerando apenas uma camada superficial.

Tabela 17. Relação entre solos e índice DRASTIC.

S - Solos	Índice DRASTIC
Fino ou ausente	10
Cascalhoso	10
Areia	9
Turfa	8
Argila agregável e/ou expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
<i>Muck</i>	2
Argila não agregada e não expansível	1

4.3.5. Topografia

Esse parâmetro refere-se à declividade da superfície do solo e sua variação. A topografia ajuda a controlar o escoamento ou permanência do poluente na superfície tempo suficiente para infiltrar.

O parâmetro topografia foi adquirido a partir do Modelo Digital de Elevação da SRTM, resolução 30 metros, obtida em 11 de fevereiro de 2000 e publicada no dia 23 de setembro de 2014, do site Earth Explorer. Foram necessárias 8 imagens para cobertura completa da bacia estudada, são elas: SRTM1S29W050V3, SRTM1S29W051V3, SRTM1S29W052V3, SRTM1S29W053V3, SRTM1S30W050V3, SRTM1S30W051V3, SRTM1S30W052V3 e SRTM1S30W053V3.

A união das imagens foi feita pela ferramenta *Composite Bands*, e para obtenção da declividade foi utilizada a ferramenta *Slope*. Adicionalmente os valores foram classificados de acordo com o método utilizado (**Tabela 18**).

Tabela 18. Relação entre topografia e índice DRASTIC.

T- Topografia	Índice DRASTIC
< 2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
> 18	1

4.3.6. Influência da zona vadosa

A zona vadosa é definida como a zona não-saturada acima do nível d'água. A constituição dessa região determina as características de atenuação do material abaixo do solo e acima do nível freático. Diversos processos podem ocorrer na zona vadosa, dentre eles destacam-se: reações químicas, filtração mecânica, neutralização, biodegradação. Este parâmetro influencia, ainda, no tempo de deslocamento vertical do contaminante, possibilitando uma maior ou menor atenuação de seus efeitos (MENESES, 2007).

A determinação do substrato da zona não-saturada é difícil, principalmente para grandes áreas como a bacia hidrográfica estudada. Por isso, para classificação da influência da zona vadosa foram consideradas apenas as características do solo presente. Foi utilizado o Mapa de Solos da CPRM, que foi elaborado com base no Mapa de Classificação dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul Quanto à Resistência a Impactos Ambientais (KÄMPF et al., 2008).

A determinação dos índices de acordo com o método DRASTIC levou em consideração os valores de resistência a impactos ambientais, que abrange as características do solo (profundidade, textura, mineralogia, gradiente textural, drenagem natural, lençol freático, lençol suspenso, erodibilidade, pedregosidade e rochosidade) ou do terreno (relevo local e declividade), e também a análise da textura para a classificação.

Tabela 19. Relação entre influência da zona vadosa e índice DRASTIC

I – Influência da zona vadosa	Índice DRASTIC
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 percentagem significativa	4-8
Rocha metamórfica/ígnea	2-8
Areia e cascalho	6-9
Basalto	2-10
Calcário carstificado	8-10

4.3.7. Condutividade

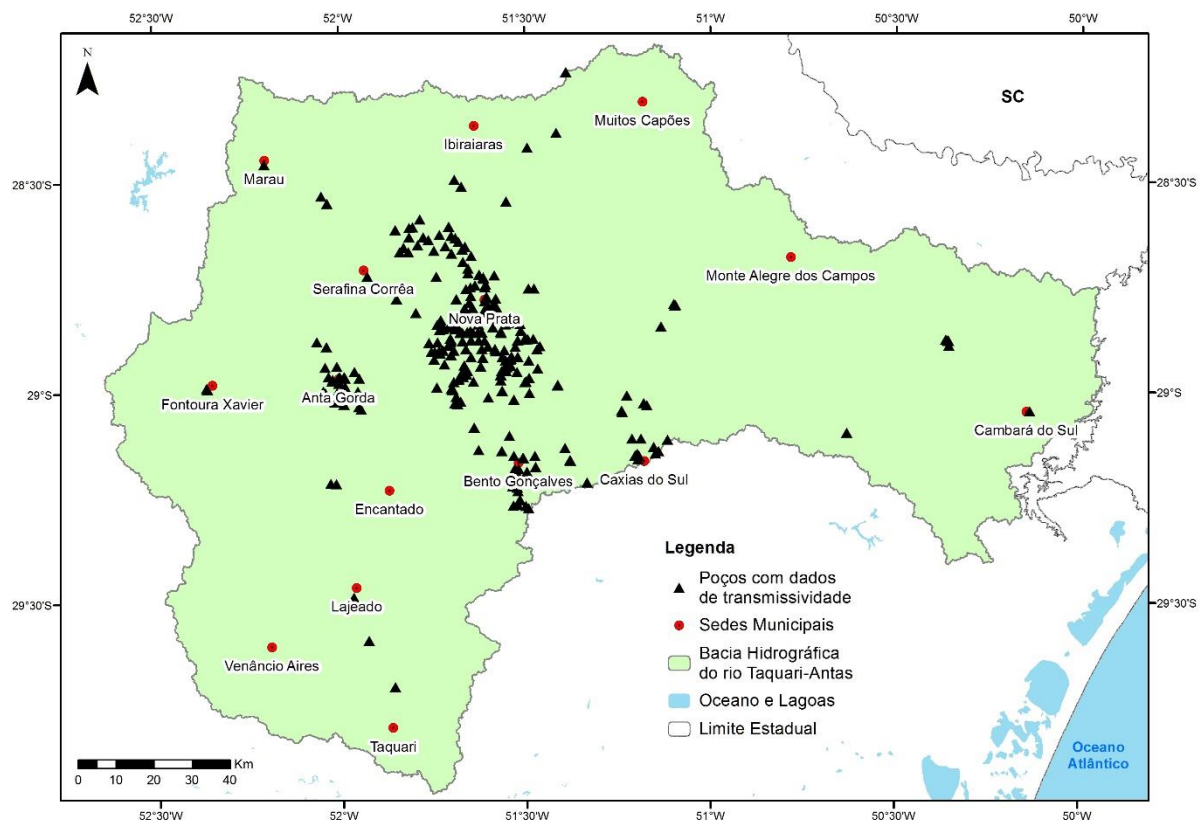
Este parâmetro representa a capacidade dos materiais do aquífero em transmitir água em seu interior. O fluxo da água subterrânea controla o grau de mobilidade de um contaminante no aquíferos. A condutividade hidráulica está intimamente relacionada com a interconexão de espaços vazios no aquíferos, espaços estes que podem ocorrer devido à porosidade da rocha, devido à sistemas de fraturamento ou pela presença de estratificações. (MENESES, 2007)

Segundo FEITOSA e MANOEL FILHO (2000), em aquíferos fraturados a porosidade ocorre em função das fissuras, assim, em uma zona de maciço, onde não ocorre nenhuma fratura, a porosidade é praticamente nula. Desta forma é difícil estimar a espessura do aquífero, visto que ocorrem zonas não saturadas. Por isso, para este parâmetro foi utilizado a transmissividade em substituição da condutividade.

Foram utilizados 284 registros de transmissividade, provenientes da CORSAN e outras empresas, especializados na **Figura 19**. Foi utilizado para interpolação a ferramenta *Topo to Raster*.

Em relação à classificação do DRASTIC, como não há na literatura categorização para a transmissividade, a atribuição de índices foi feita a partir do intervalo de quartis, que receberam os valores 2, 3, 5 e 7.

Figura 19. Localização dos registros de transmissividade.



4.4. CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES DE POLUIÇÃO

4.4.1. Uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas foi feito utilizando como base as imagens do sensor Landsat 8 (EARTH EXPLORER). Foram necessárias quatro imagens para englobar a área da bacia, das órbitas 220, 221 e 222 e no ponto 80 e 81, em três datas diferentes. LC82220802016018 do dia 18 de janeiro de 2016, LC82200802016308 do dia 03 de novembro de 2016, LC82210802017013 e LC82210812017013 do dia 13 de janeiro de 2017.

As bandas utilizadas foram a 2 (blue), 3 (green), 4 (red), 5 (infravermelho próximo), 6 (infravermelho médio) e 7 (infravermelho médio). Todas as bandas apresentam resolução de 30 metros e projeção UTM, Datum WGS 84 N e foram reprojctadas para o hemisfério sul, com a ferramenta *Project*.

A classificação do uso do solo foi feita pelo recurso *Image Classification*, a partir da seleção de amostras que representassem as classes corpos hídricos, vegetação (florestas), campo, plantação, silvicultura, solo exposto e área urbana. A identificação das amostras foi feita com o auxílio do programa Google Earth. Posteriormente a ferramenta *Maximum Likelihood Classification* identificou as classes presentes em toda a área da bacia.

Com o intuito de melhorar a classificação das áreas urbanas, uma imagem tipo *stable lights* foi utilizada, a F182013 do satélite DMSP, de 2013. Imagens desse tipo são compostas por uma média anual das imagens noturnas colhidas pelo sensor OLS. Isso faz com que somente as fontes de iluminação permanente, característica de áreas urbanas, sejam mantidas nas imagens.

A partir da avaliação do *Basemap* do ArcGigs e da variação do valor de pixel correspondente às áreas urbanas de interesse, foram estabelecidas as manchas urbanas. A imagem foi então classificada, com a ferramenta *Reclassify*, para os valores 1 e 0 (manchas urbanas), e multiplicada pelo uso do solo já feito. Dessa forma obteve-se o mapa de uso do solo completo utilizado neste trabalho.

4.4.2. Aplicação do método POSH

A caracterização da carga contaminante difusa foi realizada utilizando-se do método POSH, conforme a **Tabela 20** e do mapa de uso do solo. Para classificação foram buscados dados de saneamento de 2015 do SNIS (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento)

e de densidade demográfica do Censo de 2010 do IBGE. Adicionalmente foram buscadas informações sobre a agricultura da região no IBGE, a partir da publicação Produção Agrícola Municipal de 2015.

O mapa de uso do solo foi classificado nos seguintes valores 0 (sem classificação), 1 (reduzido), 2 (moderado) e 3 (elevado).

Tabela 20. Classificação e mapeamento das fontes de contaminação difusas segundo o sistema POSH

Potencial de carga de contaminante de subsolo	Fonte de contaminação	
	<i>Saneamento in situ</i>	<i>Práticas agrícolas</i>
Elevado	Cobertura da rede de esgoto inferior a 25% e densidade populacional superior a 100 pessoas/ha	Culturas comerciais intensivas, geralmente monoculturas em solos bem drenados, em climas úmidos ou com baixa eficiência de irrigação, pasto intensivo em campos intensamente fertilizados
Moderado	Intermediário entre elevado e reduzido	
Reduzido	Cobertura de rede de esgoto superior a 75% e densidade populacional inferior a 550 pessoas/há	Rotação de culturas, terra para pasto extensivo, sistemas de cultivo ecológico, plantações com alta eficiência de irrigação em regiões áridas e semi-áridas

Fonte: Foster et al, 2006.

4.5. ANÁLISE DO RISCO DE POLUIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A união da vulnerabilidade das águas subterrâneas, obtida pelo método DRASTIC, com as fontes de contaminação difusas, categorizadas conforme o POSH, resultam na classificação do risco de poluição da água subterrânea.

O risco de poluição foi adquirido multiplicando-se os mapas de vulnerabilidade de fontes de contaminação com a ferramenta *Raster Calculator*. O procedimento de cálculo foi feito para que as classes de vulnerabilidade reduzida, moderada e elevada, recebessem os valores de 1, 10 e 100, respectivamente. Após a multiplicação resultaram valores entre 0 e 300, que foram identificados como mostrado na **Tabela 21**, conforme as diretrizes da **Tabela 22**.

Tabela 21. Valores obtidos para perigo de contaminação em relação a cargas difusas.

Perigo de contaminação em relação a cargas difusas		Potencial de contaminação			
		<i>Reduzido - 1</i>	<i>Moderado - 2</i>	<i>Elevado - 3</i>	<i>Sem classificação - 0</i>
Índice de vulnerabilidade	<i>Baixo - 1</i>	1	2	3	SC
	<i>Médio - 10</i>	10	20	30	SC
	<i>Alto - 100</i>	100	200	300	SC
	<i>Extremo</i>	-	-	-	SC

Tabela 22. Classificação do perigo de contaminação por cargas difusas.

Perigo de contaminação em relação a cargas difusas		Potencial de contaminação			<i>Sem classificação</i>
		<i>Reduzido</i>	<i>Moderado</i>	<i>Elevado</i>	
Índice de vulnerabilidade	<i>Baixo</i>	Desprezível	Baixo	Moderado	SC
	<i>Médio</i>	Baixo	Moderado	Alto	SC
	<i>Alto</i>	Moderado	Alto	Alto	SC
	<i>Extremo</i>	Moderado	Alto	Extremo	SC

Obs.: classificação de potencial de contaminação modificado de GOMES (2008) in ANA (2014) e classificação do perigo modificado de SMA-SP (2010) in ANA (2014).

A partir dos métodos descritos no presente capítulo foi possível avaliar uma estimativa do perigo de contaminação da água subterrânea da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas. Os resultados obtidos serão apresentados no capítulo seguinte.

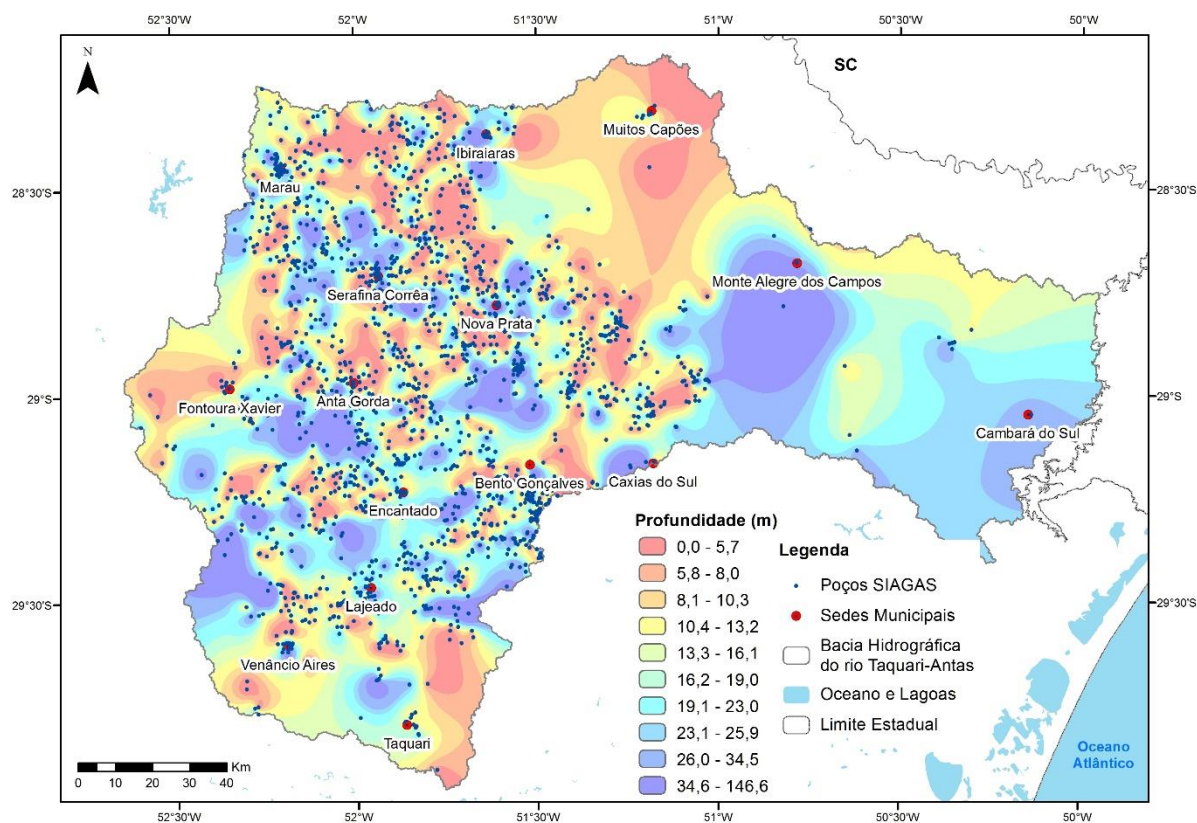
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. MAPAS DOS PARÂMETROS DRASTIC E VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

5.1.1. Profundidade do nível estático

O mapa de profundidade resultante da interpolação do nível estático dos poços do SIAGAS é apresentado na **Figura 20**.

Figura 20. Mapa de profundidade.



Os dados de nível estático dos poços do SIAGAS variam de 0 a 227,46 metros de profundidade, e possuem uma média de 18 metros.

A **Figura 21** apresenta o mapa de profundidade classificado de acordo com os índices DRASTIC. De acordo com o **Gráfico 2**, o índice predominante na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas é o 5, no qual a profundidade oscila entre 9,0 e 15,0 metros, correspondendo a aproximadamente 27% da área total da bacia. O índice 10 (0 a 1,5 metros), que caracteriza maior vulnerabilidade, abrange apenas 0,1% da área.

Figura 21. Parâmetro profundidade classificado com índices do DRASTIC.

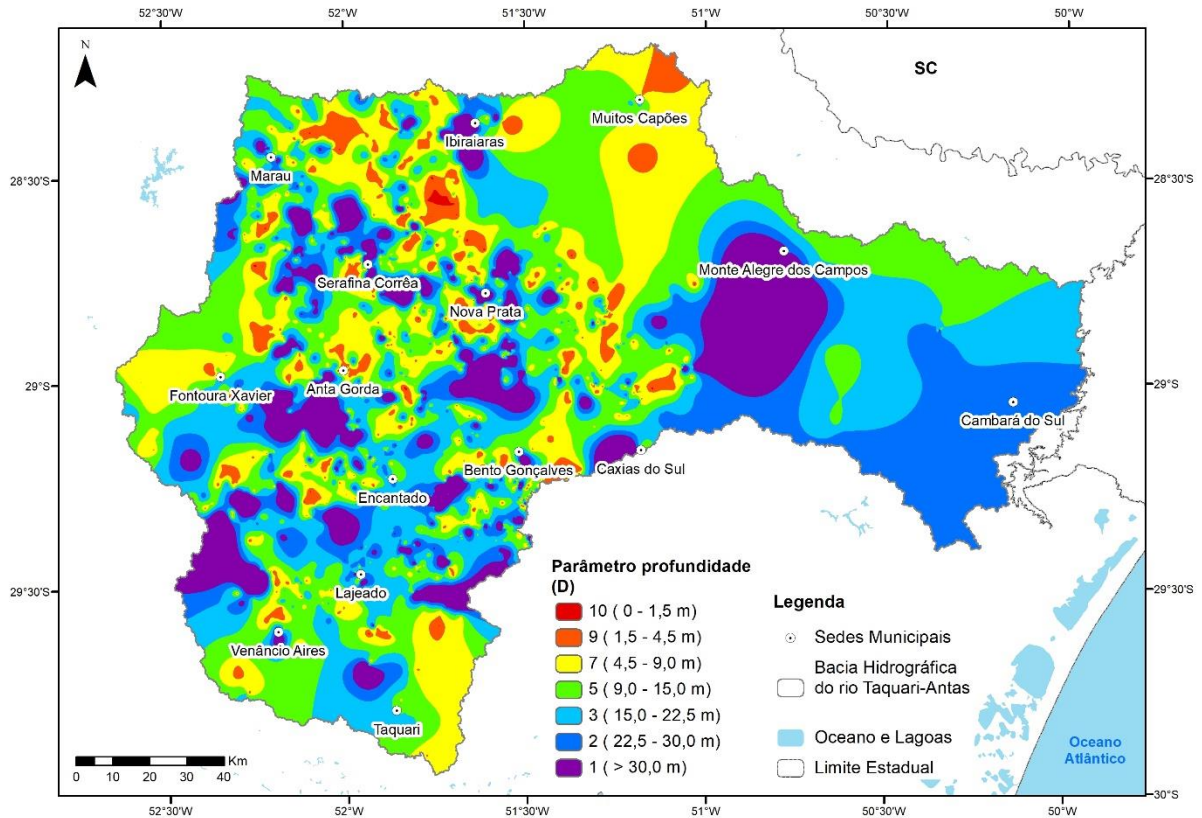
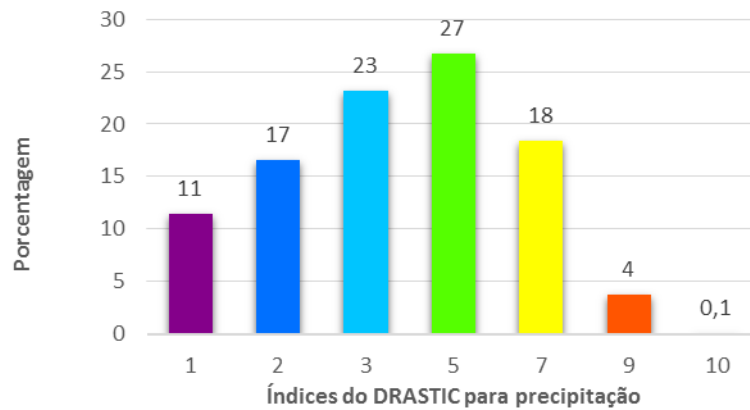


Gráfico 2. Distribuição dos índices DRASTIC para o parâmetro precipitação na bacia.



5.1.2. Recarga

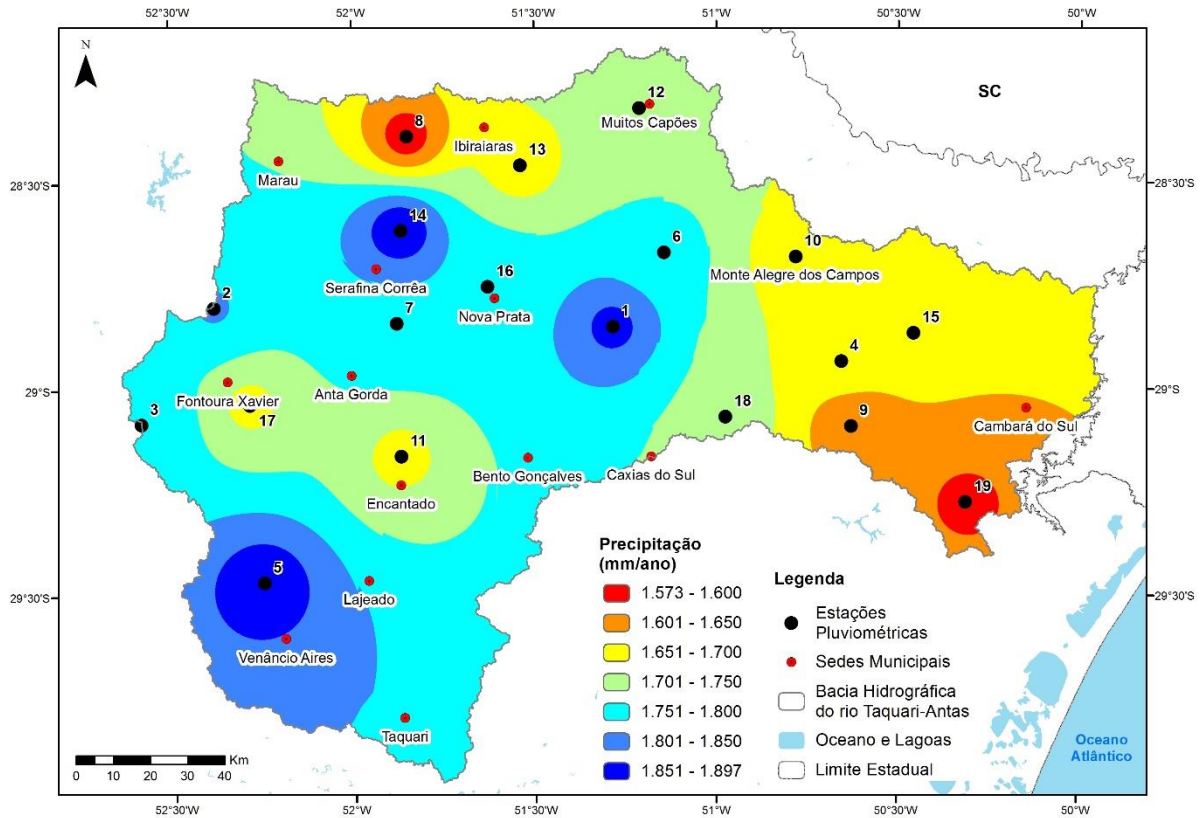
A recarga foi obtida com a metodologia descrita no capítulo 4.3.2, envolvendo as variáveis precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e armazenamento de água no solo.

A precipitação, obtida a partir da interpolação de registros de estações pluviométricas da ANA, é apresentada na **Figura 22**. A precipitação anual na bacia varia de 1.573 a 1.897 mm, e a média é de 1.740 mm. Analisando a imagem é possível observar que na região leste a

pluviometria é menor, em torno de 1.650 mm, enquanto na região sul os índices pluviométricos são maiores, ultrapassando 1.750 mm. A faixa de 1.750 a 1.800 mm é predominante na bacia, abrangendo as regiões central e sul.

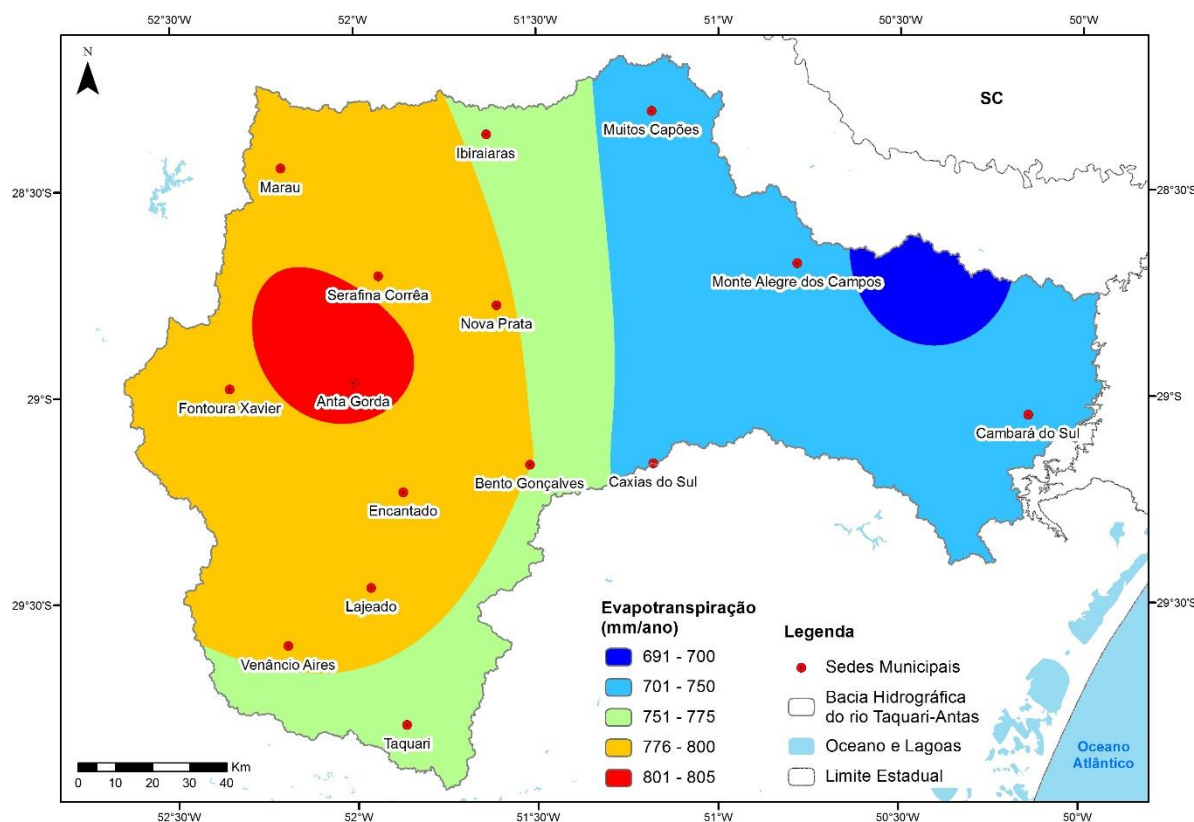
c

Figura 22. Mapa de precipitação da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.



A variável evapotranspiração anual foi obtida pelo método de Thornthwaite, utilizando dados de temperatura da bacia. A **Figura 23** apresenta o mapa de evapotranspiração anual da bacia, evidenciando que os valores variam de 691 a 805 mm, e tem média de 760 mm.

Figura 23. Mapa de evapotranspiração da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.

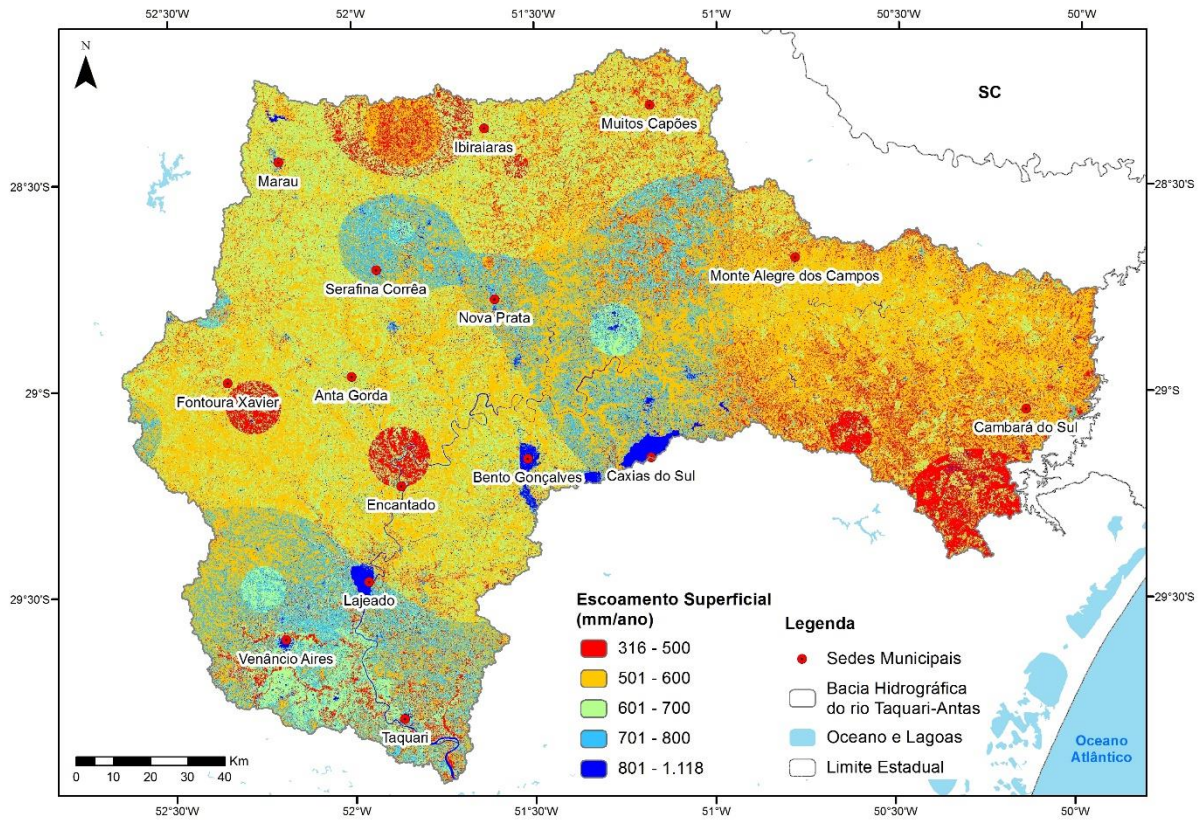


Para o escoamento superficial foi necessário estipular o valor do coeficiente de escoamento superficial C. Cada uso do solo, em conjunto com a declividade (baixa < 6% e alta > 6%), recebeu um valor de C com base na análise das **Tabela 13**, **Tabela 14** e **Tabela 15**. A seguir são apresentados os valores atribuídos a cada uso do solo (**Tabela 23**). O mapa de escoamento superficial resultante é apresentado na **Figura 24**.

Tabela 23. Valores de coeficiente de escoamento estimados

Uso do solo	C (coeficiente de escoamento)	
	Declividade	
	Baixa	Alta
Vegetação	40	55
Campo	40	55
Plantação	60	70
Silvicultura	80	70
Solo Exposto	60	75
Urbanização	80	90

Figura 24. Mapa de escoamento superficial para a bacia do rio Taquari-Antas.



Podemos observar que o escoamento superficial anual varia de 316 a 1.118 mm, e que a média é de 587 mm/ano. Predomina na bacia o intervalo de 501 a 600 mm/ano.

O valor de armazenamento de água no solo foi considerado 100 mm (ROSSATO (2001).

Com todas essas informações foi possível calcular a recarga, como mostra a **Figura 26**. Como é possível observar no mapa, a recarga anual varia de -100 a 571 mm, demonstrando que em alguns lugares, como no município de Bento Gonçalves há um déficit hídrico. A média de recarga é de 293 mm e o intervalo predominante é de 301 a 400 mm/ano.

A **Figura 25** apresenta a porcentagem da precipitação que se transforma em recarga. A média é de aproximadamente 17%, e o intervalo de 11 a 20% é predominante na bacia hidrográfica.

Figura 26. Mapa de recarga da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.

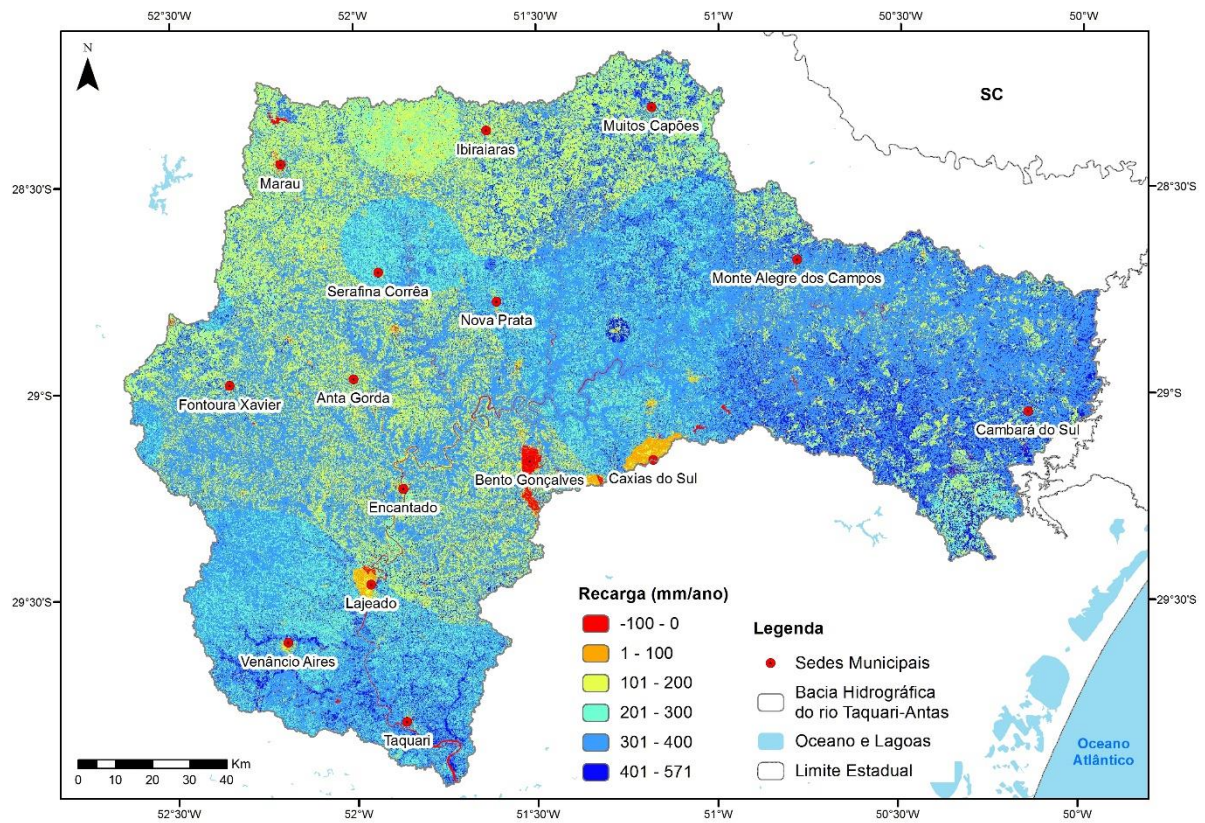
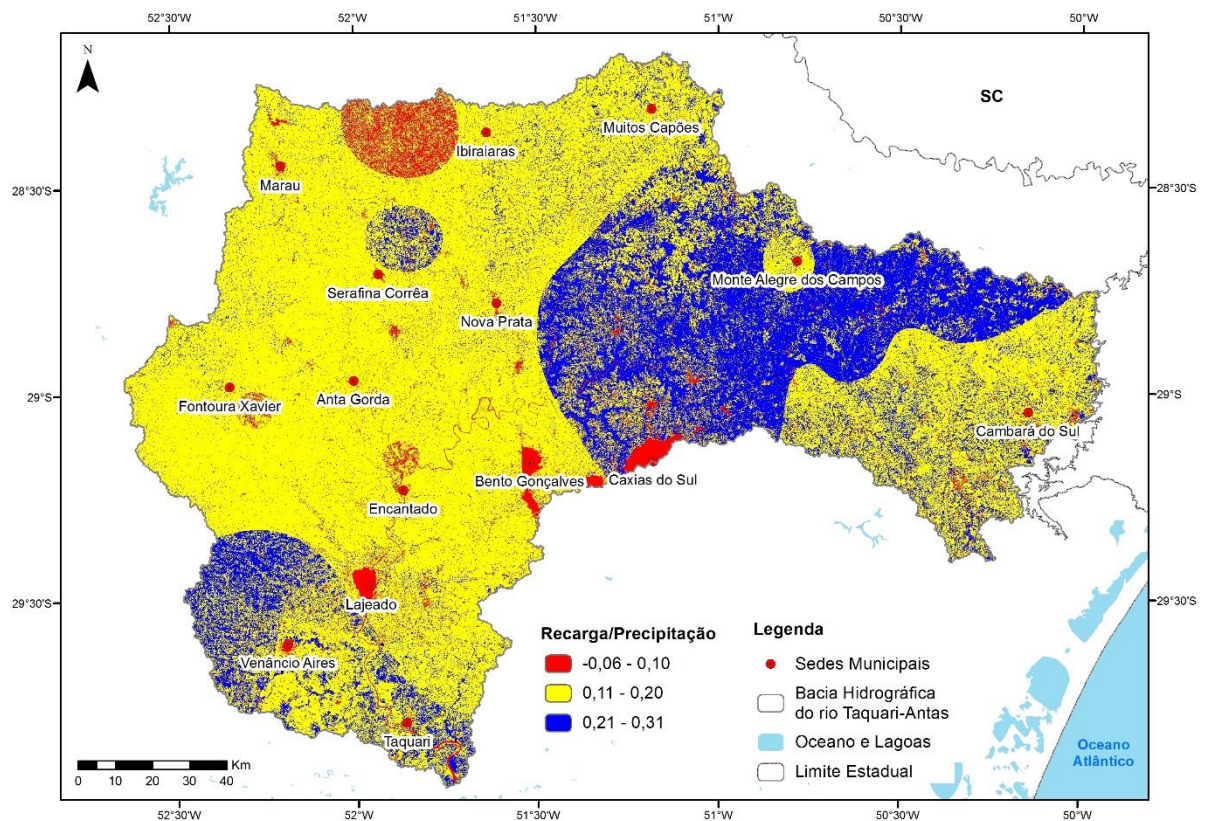


Figura 25. Mapa de recarga/precipitação



O mapa classificado de acordo com os índices DRASTIC é apresentado na **Figura 27**. Por meio dele e do **Gráfico 3** é possível observar que o índice 9 (> 254 mm/ano) é significativo na bacia, correspondendo à 65% da área. Importante salientar que os maiores índices, que representam maior vulnerabilidade, são mais frequentes na bacia hidrográfica.

Figura 27. Parâmetro recarga classificado com índices do DRASTIC.

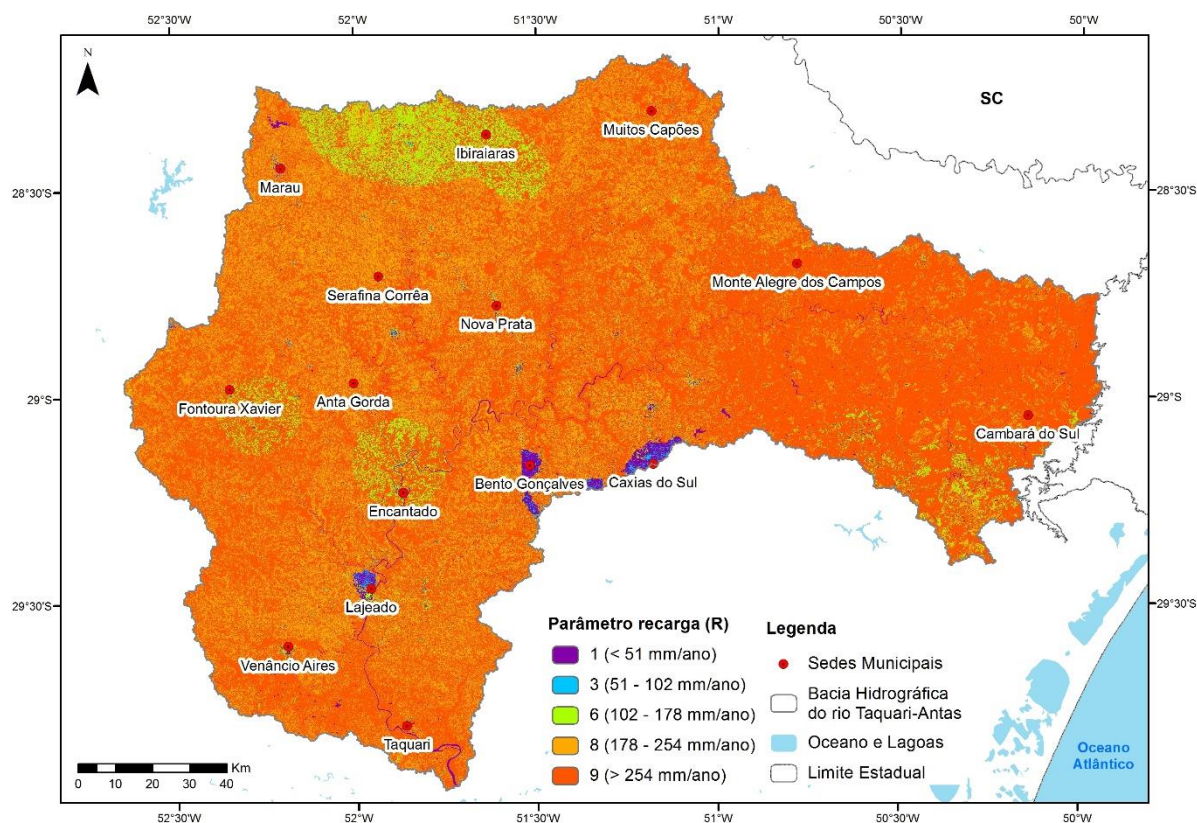
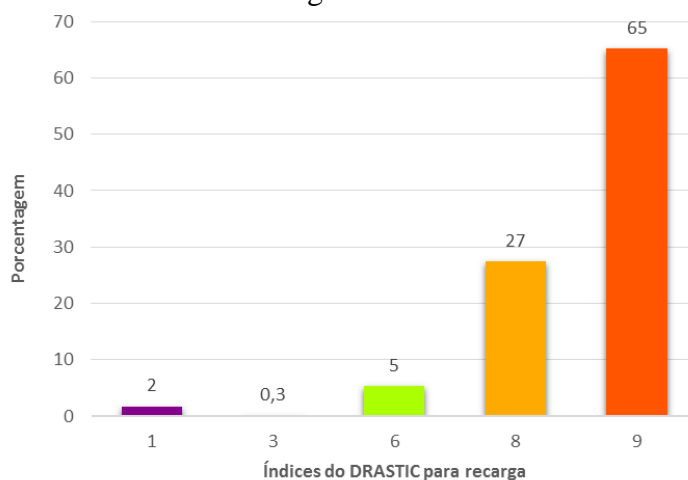


Gráfico 3. Distribuição dos índices DRASTIC para o parâmetro recarga na bacia.



5.1.3. Meio aquífero

A classificação do meio aquífero levou em consideração os fatores descritos na **Tabela 24** para determinação dos índices de acordo com o DRASTIC. O mapa de classificação do meio aquífero é mostrado na **Figura 28**. É possível verificar que o índice 9 é predominante na bacia, presente em cerca de 57% da área, principalmente na região leste. Os depósitos aluvionares não foram classificados, já que se acredita que essas formações não são utilizadas para extração de água subterrânea. Os basaltos receberam maiores valores devido à predominância espacial na região e pela maior presença de fraturas.

Figura 28. Parâmetro meio aquífero classificado com índices do DRASTIC

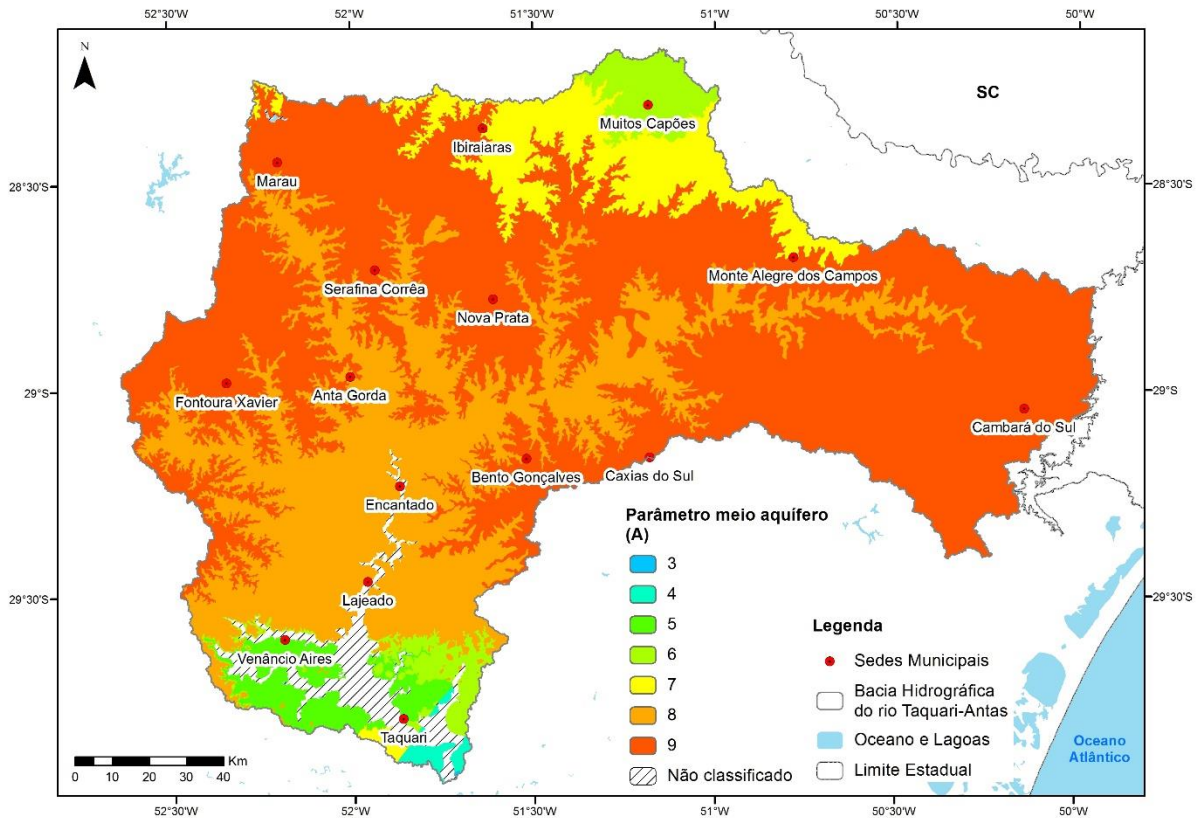


Gráfico 4. Distribuição dos índices DRASTIC para o meio aquífero.

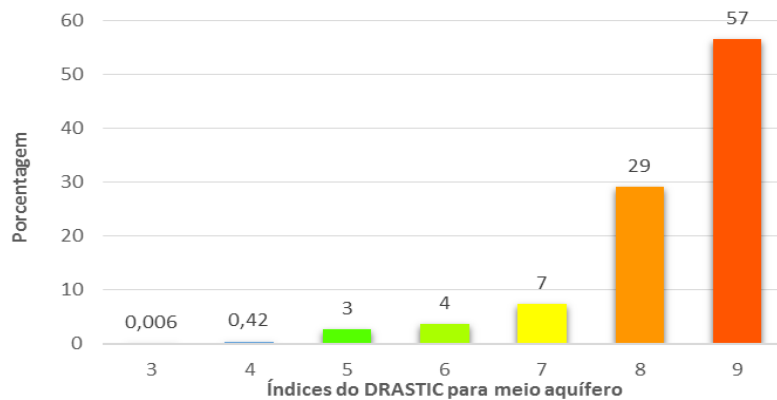


Tabela 24. Fatores usados na classificação do meio aquífero.

Unidade	Composição	Fraturamento	Porosidade	Média da densidade de lineamentos	DRASTIC
Fácies Esmeralda	Basalto	Intensamente Fraturada	Baixa	0,05	6
Fácies Paranapanema	Basalto	Intensamente Fraturada	Baixa	0,07	7
Fácies Caxias	Riodacito e riolitos	Intensamente Fraturada	Baixa	0,1	9
Fácies Várzea do Cedro	Riodacito e riolitos	Intensamente Fraturada	Baixa	0,1	9
Fácies Gramado	Basalto	Intensamente Fraturada	Baixa	0,08	8
Formação Botucatu	Arenito fino	Pouco a moderadamente fraturada	Moderada		6
Depósitos Aluvionares	Areia	Não fraturada	Alta		NÃO CLASSIFICADO
Formação Santa Maria	Siltico argilosos, com intercalações arenosas	Pouco a moderadamente fraturada	Variável		5
Formação Sanga do Cabral	Arenito, conglomerado	Pouco a moderadamente fraturada	Variável		7
Formação Pirambóia	Arenito fino	Pouco a moderadamente fraturada	Variável		6
Formação Rio do Rasto	Siltito, argiltio e folhelhos	Pouco a moderadamente fraturada	Alta porosidade		4
Fácies Serra do Herval	Sienogranito	Pouco a moderadamente fraturada	Baixa		3

5.1.4. Solos

Os solos foram classificados de acordo com a **Tabela 25**, resultando na **Figura 29**. A partir do mapa e do **Gráfico 5** é possível observar que os índices estão igualmente distribuídos na bacia, com pequena predominância do índice 5. O pior valor, 7, ocorre na região norte e sul da bacia.

Tabela 25. Fatores usados para classificação dos solos.

Solos EMBRAPA	Textura	Drenagem	DRASTIC
Argissolo Amarelo	Arenoso/Média	Imperfeita	5
Argissolo Bruno-acinzentado	Média/Argila	Moderada/Impe	5
Argissolo Bruno-Acinzentado	Média/Argila	Moderada	5
Argissolo Vermelho-amarelo	Argila	Bem	7
Argissolo Vermelho	Argila	Moderada	3
Cambissolo Húmico	Argila	Moderada	3
Latossolo Bruno	Argila	Bem	7
Latossolo Vermelho	Argila	Bem	7
Luvissolo Crômico	Média/Argila	Bem	5
Neossolo Litólico	Médio	Bem	5
Neossolo Regolítico	Médio	Bem	5
Nitossolo Bruno	Argila	Moderada/Bem	7
Nitossolo Vermelho	Argila	Bem	7
Planossolo Háptico	Arenosa/Argila	Imperfeita	5

Figura 29. Parâmetro solos classificado com índices do DRASTIC.

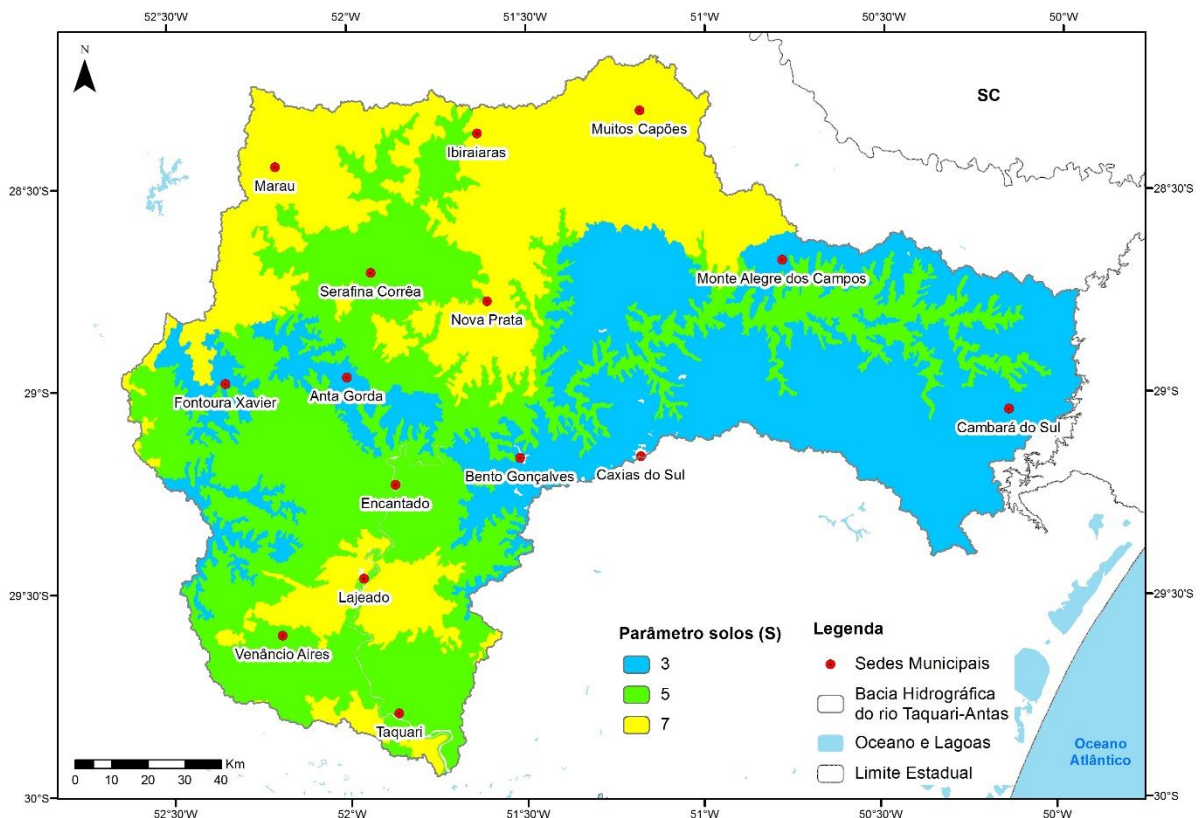
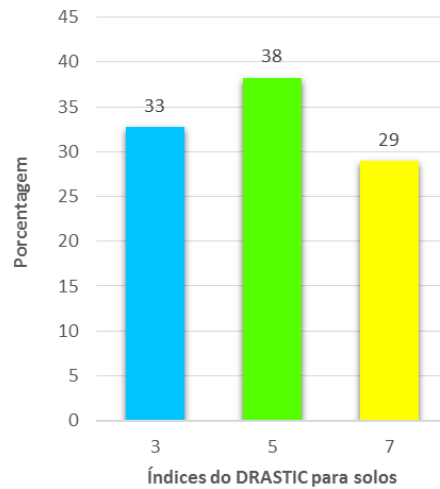


Gráfico 5. Distribuição dos índices DRASTIC para o solo.



5.1.5. Topografia

A espacialização do parâmetro topografia é mostrado na **Figura 30**. De acordo com o mapa e o **Gráfico 6**, o índice de menor vulnerabilidade é o mais significativo na área da bacia hidrográfica, correspondendo a 38% da área. Os maiores índices por sua vez, concentram-se na região sul.

Figura 30. Parâmetro topografia classificado com índices do DRASTIC.

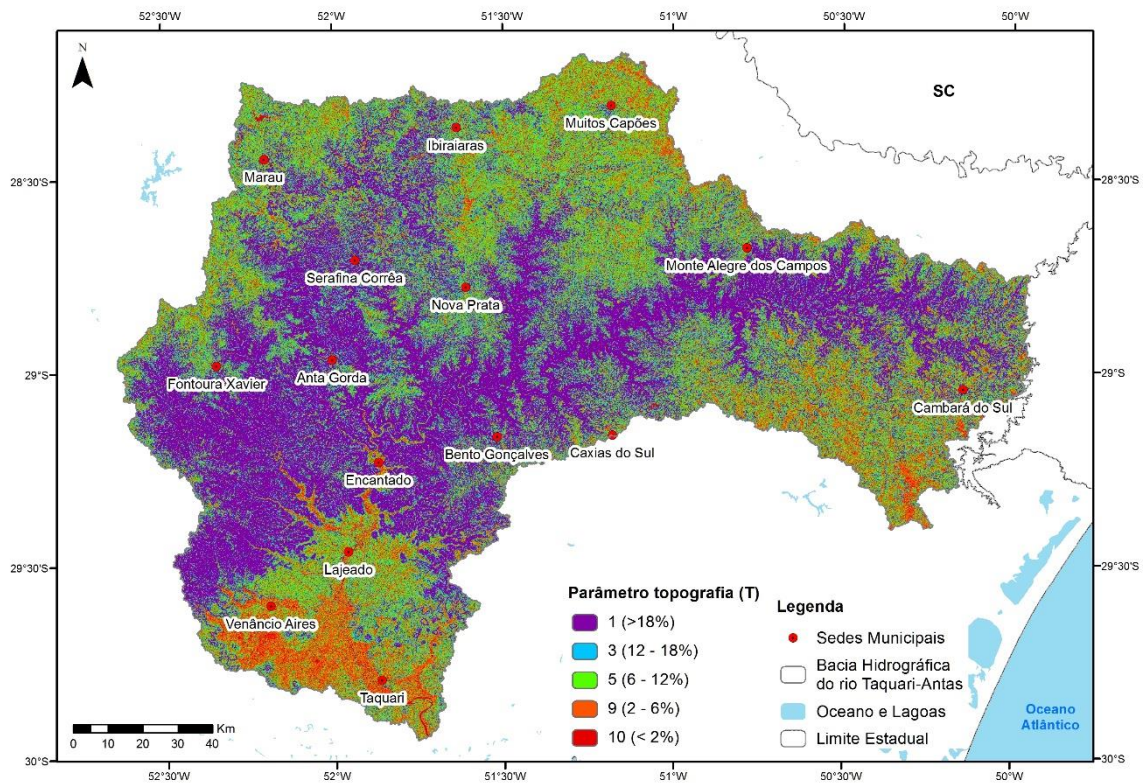
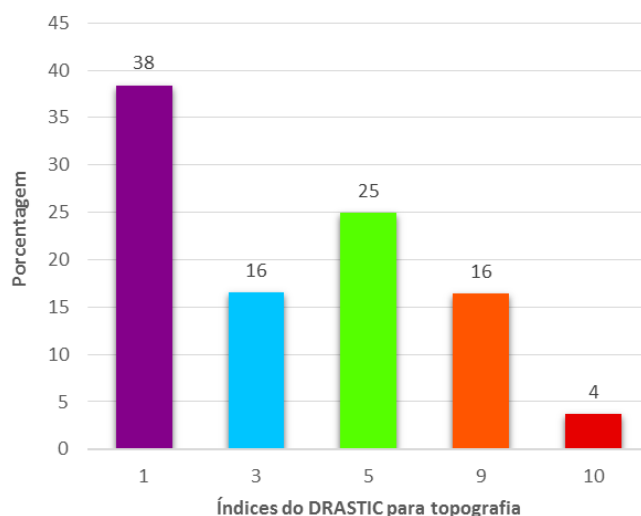


Gráfico 6. Distribuição dos índices DRASTIC para a topografia.



5.1.6. Influência da zona vadosa

A influência da zona vadosa foi classificada conforme a **Tabela 26**, levando em conta principalmente a resistência dos solos quanto a impactos ambientais. Foram atribuídos os valores 3, 4, 6 e 8 para alta, média, baixa e muito baixa resistência. A **Figura 31** apresenta a espacialização do parâmetro na bacia hidrográfica, e o **Gráfico 6** mostra a distribuição dos índices na bacia. O índice 6, que corresponde a baixa resistência, prevalece na bacia, abrangendo 37% da área.

Tabela 26. Fatores usados para classificar a influência da zona vadosa.

SOLO EMBRAPA	RESISTÊNCIA	TEXTURA	DRASTIC
Argissolo Vermelho-amarelo	A	argila	3
Latossolo Bruno	A	argila	3
Latossolo Vermelho	A	argila	3
Nitossolo Vermelho	A	argila	3
Latossolo Vermelho	B	argila	4
Luvissolo Crômico	B	média/argila	4
Nitossolo Bruno	B	argila	4
Nitossolo Vermelho	B	argila	4
Argissolo Amarelo	C	arenosa/média	6
Argissolo Bruno-acinzentado	C	arenosa/argila	6
Argissolo Bruno-Acinzentado	C	média/argila	6
Argissolo Vermelho	C	argila	6
Cambissolo Húmico	C	argila	6
Neossolo Litólico	D	média	8
Neossolo Regolítico	D	média	8
Planossolo Háplico	D	arenosa/argila	8

Figura 31. Parâmetro influência da zona vadosa classificado com índices do DRASTIC.

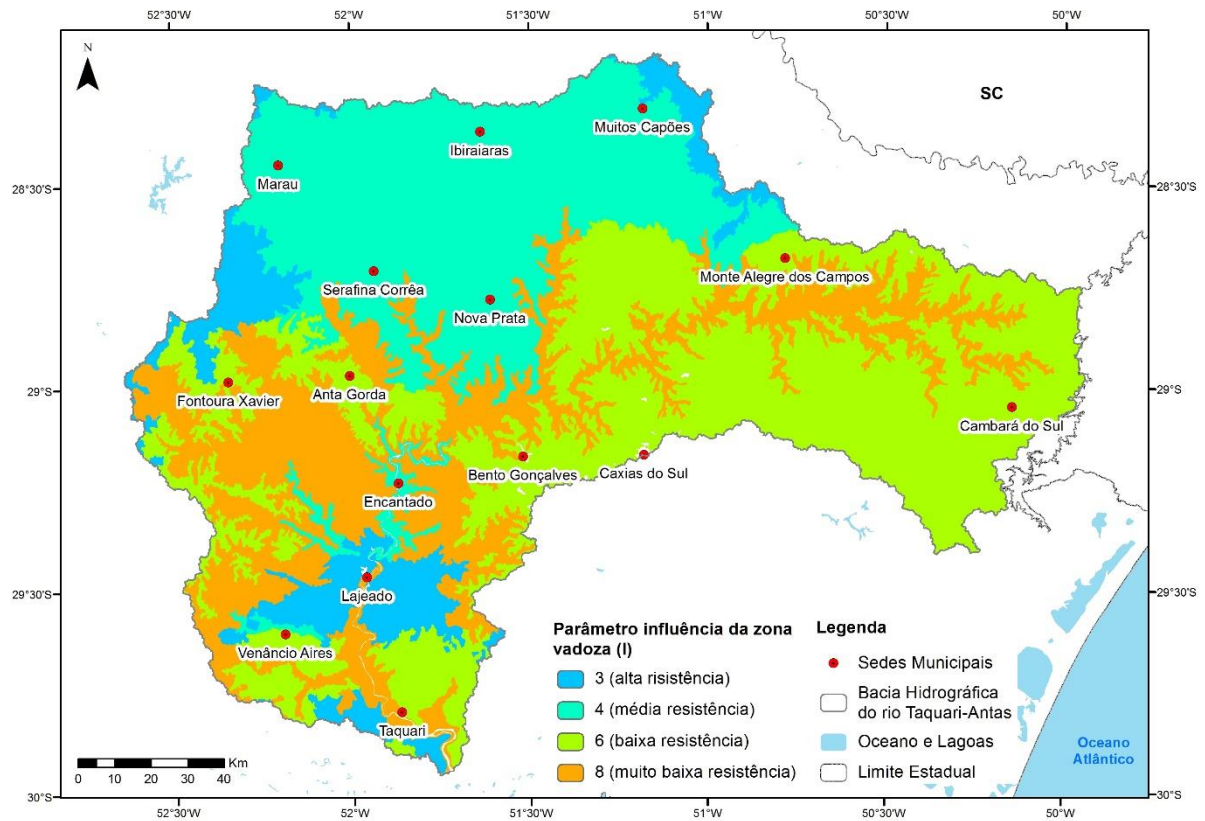
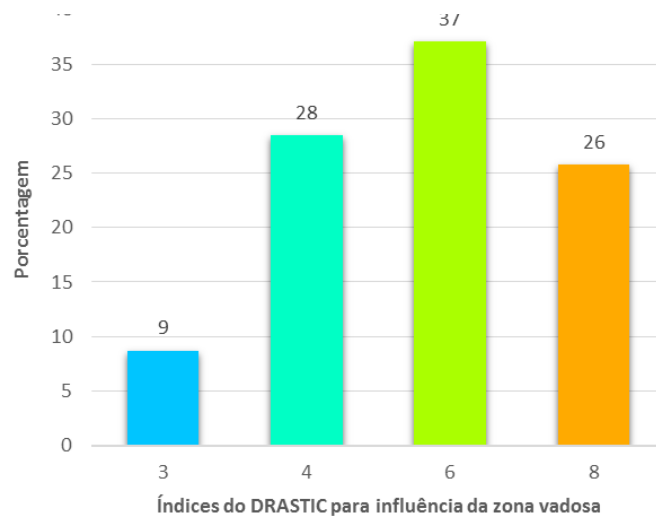


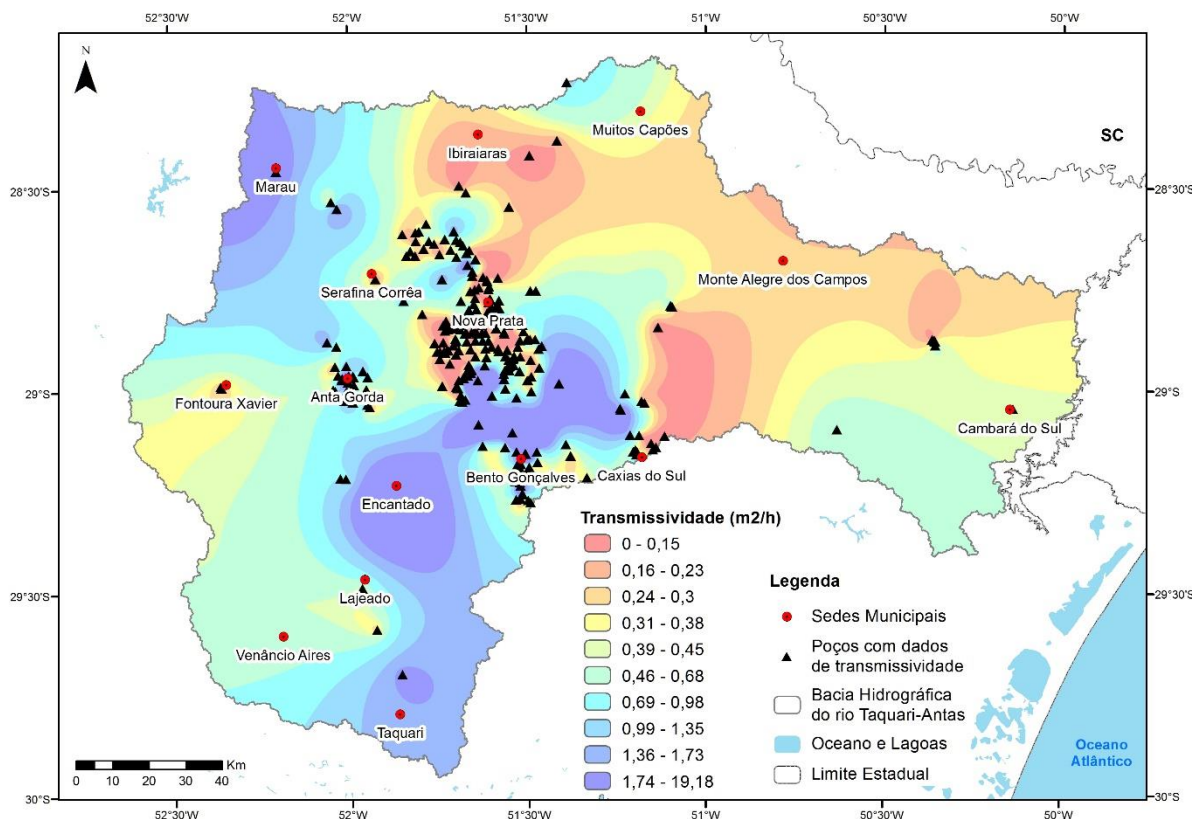
Gráfico 7. Distribuição dos índices DRASTIC para a influência da zona vadosa.



5.1.7. Transmissividade

Para esse parâmetro, como descrito no capítulo 4.3.7, substituiu-se a condutividade hidráulica pela transmissividade. A **Figura 32** apresenta o mapa de transmissividade resultante da interpolação dos poços. Os registros utilizados variam de 0 a 24,08 m²/h, e a média é de 0,70 m²/h.

Figura 32. Valores de transmissividade para a bacia hidrográfica, em m^2/h .



A **Figura 33** apresenta o mapa de transmissividade classificado de acordo com o DRASTIC, e no **Gráfico 8** a distribuição dos índices na bacia. O valor preponderante é o 5 ($0,46 - 1,05 m^2/h$) abrangendo 33% da bacia, e o pior índice (7) é majoritário na região oeste.

Gráfico 8. Distribuição dos índices DRASTIC para a transmissividade.

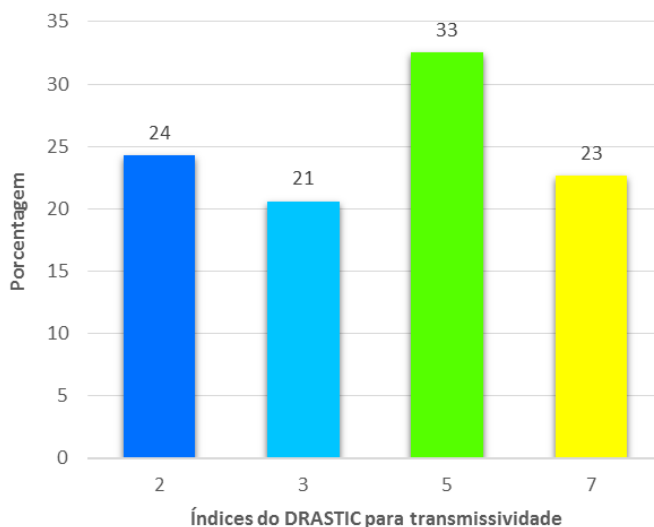
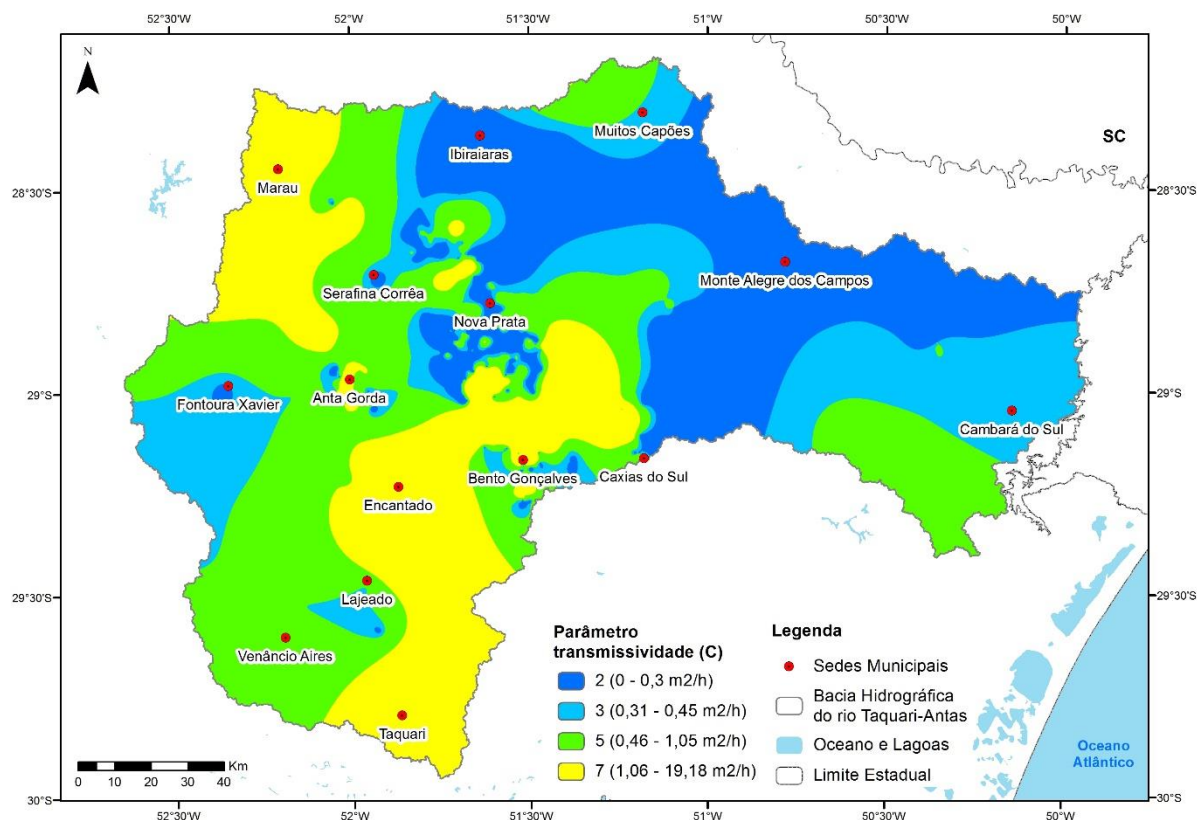


Figura 33. Parâmetro transmissividade classificado com índices do DRASTIC.



5.1.8. Vulnerabilidade das águas subterrâneas

A vulnerabilidade das águas subterrâneas da bacia do rio Taquari-Antas pode ser observada na **Figura 34**. É possível identificar que a vulnerabilidade média está presente em toda a área da bacia, e de acordo com o **Gráfico 9**, corresponde a 82% da área da bacia. A baixa vulnerabilidade abrange cerca de 14%, enquanto a alta 4%. A região não classificada corresponde a depósitos aluvionares, dos quais acredita-se que não há exploração de água, e grandes corpos hídricos. Como esperado, os parâmetros profundidade e influência da zona vadosa tiveram maior interferência no resultado.

É importante ressaltar que municípios como Soledade, Arvorezinha, Guaporé, Anta Gorda e Gentil apresentam grandes áreas de alta vulnerabilidade, assim como outros mostrados na **Figura 35** e **Tabela 27**. Outra informação importante é a presença de poços nessas áreas de alta vulnerabilidade, onde seria imprescindível o estabelecimento de perímetros de proteção. De acordo com a **Figura 36**, 285 poços registrados no SIAGAS estão nessas zonas, e 20 poços estão bombeando e são da CORSAN, responsável por abastecimento público. Flores da Cunha, Arvorezinha, Antônio Prado, São José do Herval detêm 5, 4, 2 e 2 poços, respectivamente.

Figura 34. Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas de acordo com o DRASTIC.

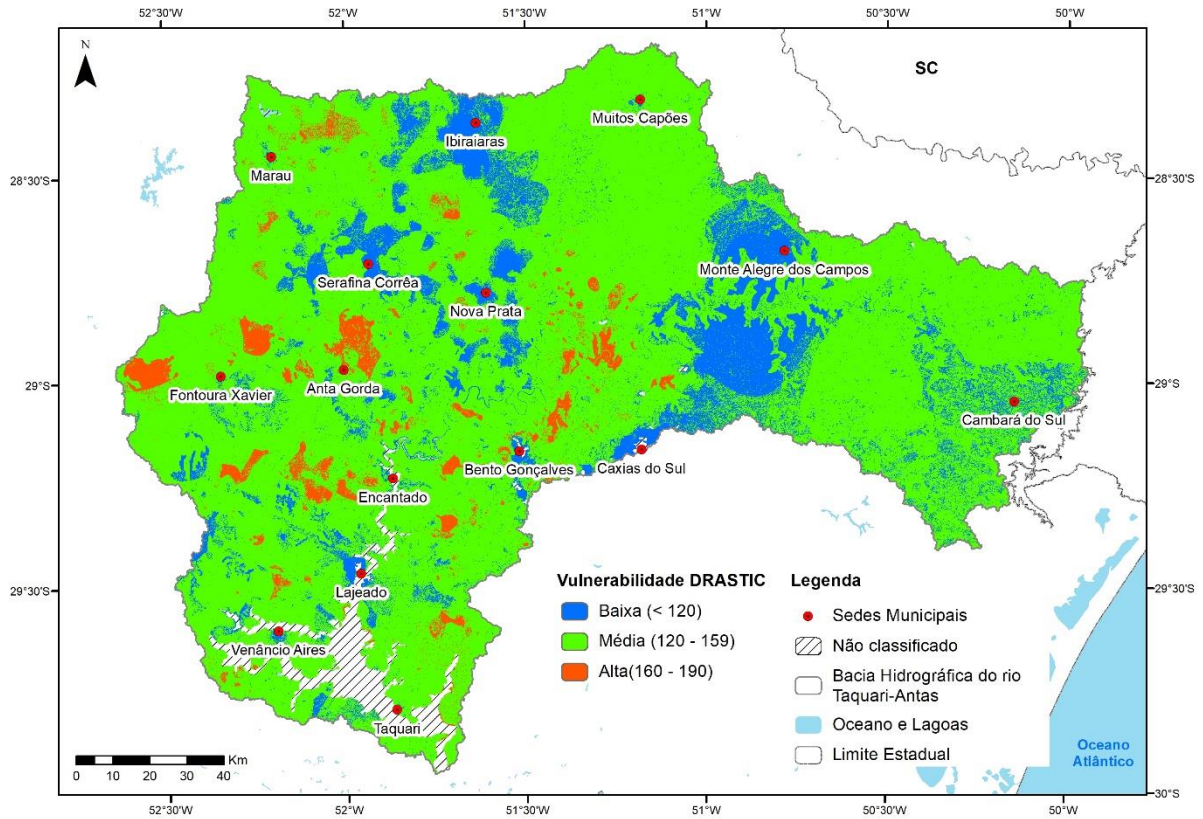


Gráfico 9. Distribuição dos índices DRASTIC para a vulnerabilidade.

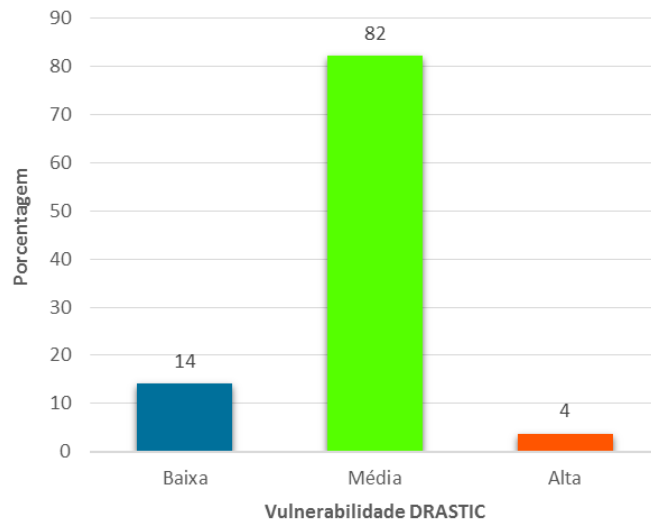


Figura 35. Municípios da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas que apresentam áreas significativas de alta vulnerabilidade.

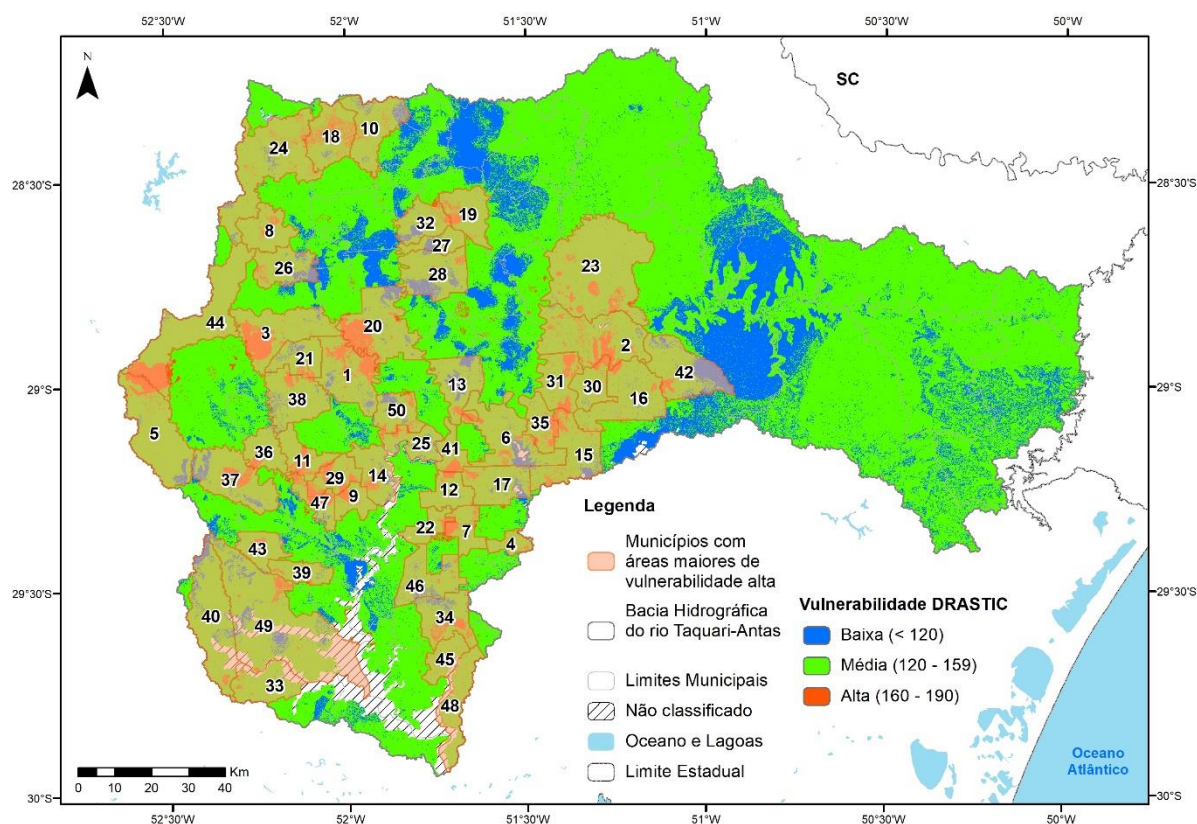
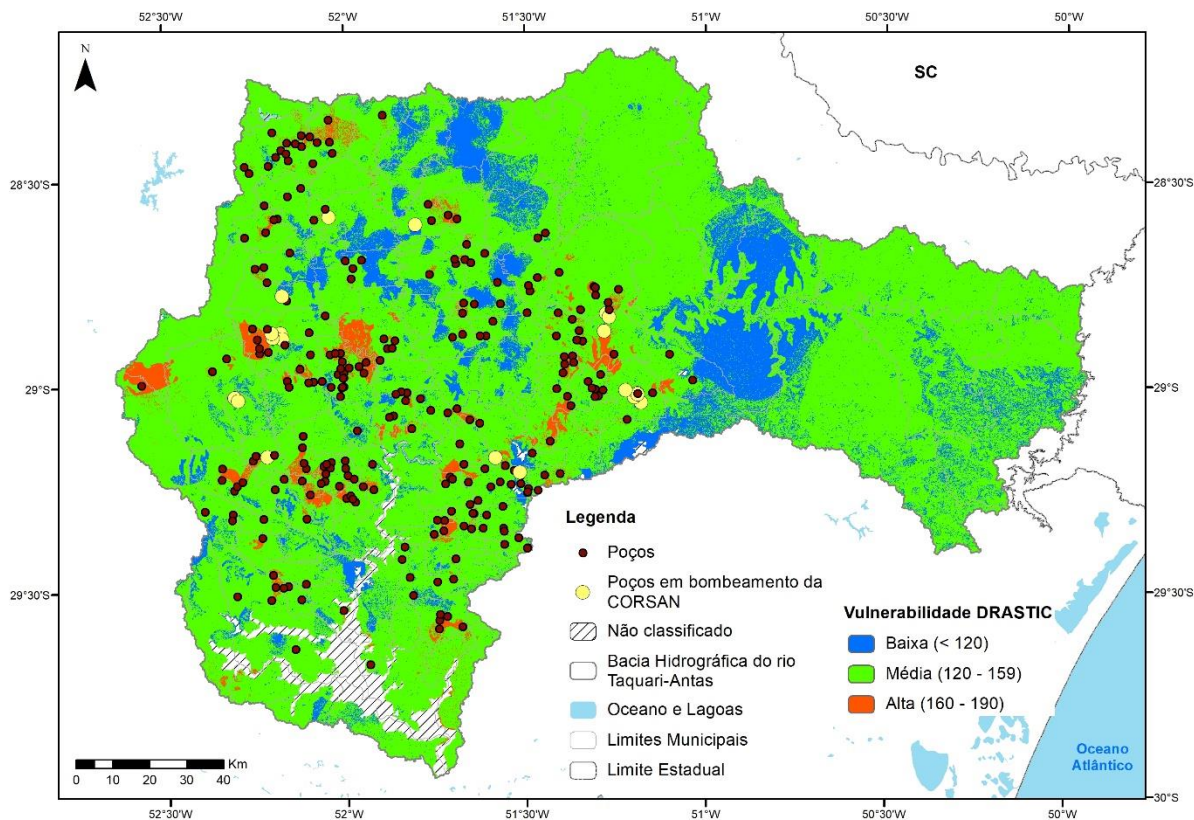


Tabela 27. Município com áreas de vulnerabilidade alta.

ANTA GORDA	1	ENCANTADO	14	NOVA ARAÇÁ	27	SANTA CRUZ DO SUL	40
ANTÔNIO PRADO	2	FARROUPILHA	15	NOVA BASSANO	28	SANTA TEREZA	41
ARVOREZINHA	3	FLORES DA CUNHA	16	NOVA BRÉSCIA	29	SÃO MARCOS	42
BARÃO	4	GARIBALDI	17	NOVA PÁDUA	30	SÉRIO	43
BARROS CASSAL	5	GENTIL	18	NOVA ROMA DO SUL	31	SOLEDADE	44
BENTO GONÇALVES	6	GUABIJU	19	PARÁÍ	32	TABAÍ	45
BOA VISTA DO SUL	7	GUAPORÉ	20	PASSO DO SOBRADO	33	TEUTÔNIA	46
CAMARGO	8	ILÓPOLIS	21	PAVERAMA	34	TRAVESSEIRO	47
CAPITÃO	9	IMIGRANTE	22	PINTO BANDEIRA	35	TRIUNFO	48
CIRÍACO	10	IPÊ	23	POUSO NOVO	36	VENÂNCIO AIRES	49
COQUEIRO BAIXO	11	MARAU	24	PROGRESSO	37	VESPASIANO CORREA	50
CORONEL PILAR	12	MUÇUM	25	PUTINGA	38		
COTIPORÃ	13	NOVA ALVORADA	26	SANTA CLARA DO SUL	39		

Figura 36. Poços presentes em áreas de vulnerabilidade alta.



Os dados de vazão específica presentes no SIAGAS, variam de 0,011 a 24,000 m³/h/m e possuem média de 1,045 m³/h/m. A partir da **Figura 37**, é possível verificar que 12 poços de maior produtividade da bacia estão em áreas de risco elevado. Esses poços pertencem aos municípios Teutônia, Vila Fores, Vila Maria, Antônio Prado (2), Bento Gonçalves, Cruzeiro do Sul, Imigrante, Relvado, Itapuca, Ipê e Nova Bassano. Tais poços tem como finalidade abastecimento doméstico/animal e urbano, e pecuária.

Reunindo as informações ditas e o Mapa do Volume Anual de Água Explotada, da CPRM (2014) (**Figura 38**), é possível verificar que os municípios Venâncio Aires, Santa Clara do Sul, Antônio Prado, Paraí, Ipê, Flores da Cunha, Bento Gonçalves, Garibaldi, Santa Tereza, Boa vista do Sul, Coronel Pilar, Teutônia, Vespasiano Corrêa, Imigrante e Encantado, possuem poços e maiores áreas de vulnerabilidade alta em zonas de volume anual de água explotada maior que 5 milhões de m³. Carlos Barbosa e Serafina Corrêa não apresentam áreas significativas de alta vulnerabilidade, entretanto possuem poços nessa condição e também estão sobre regiões de maior exploração.

Figura 38. Poços com dados de vazão específica presentes nas áreas de alta vulnerabilidade.

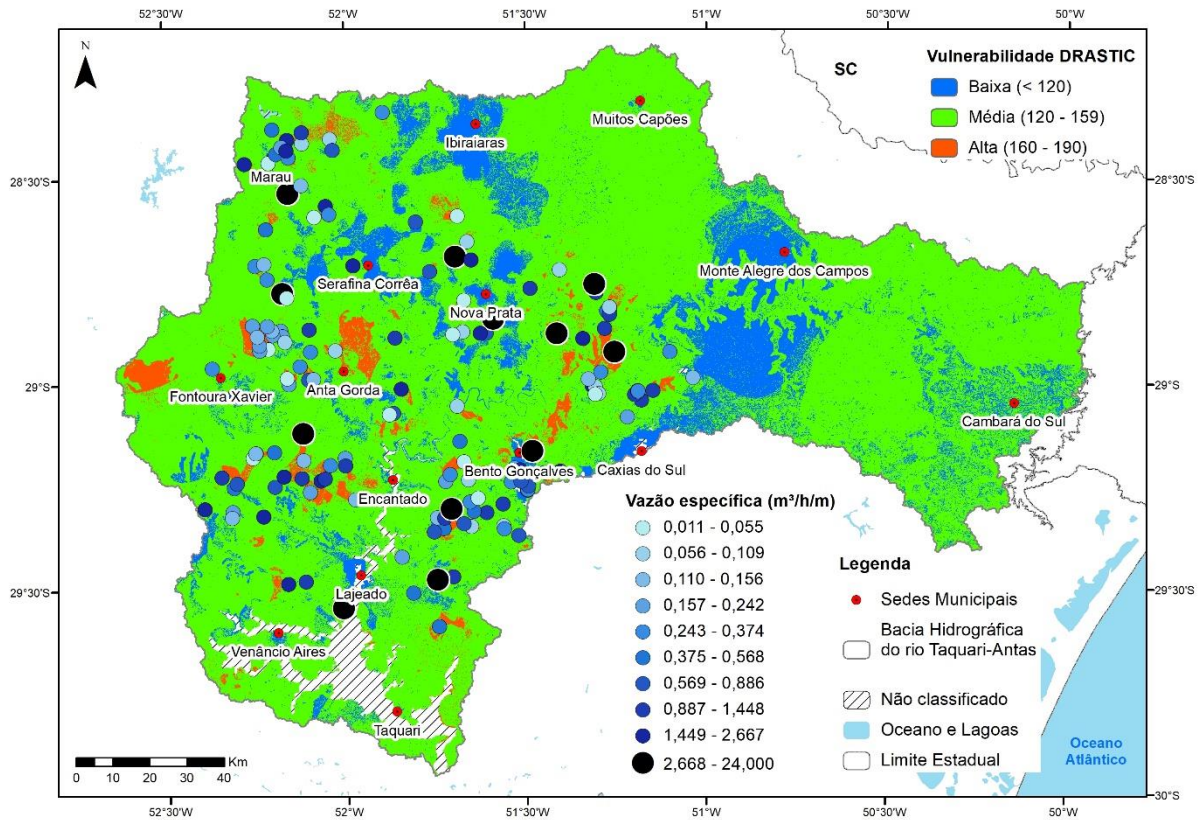
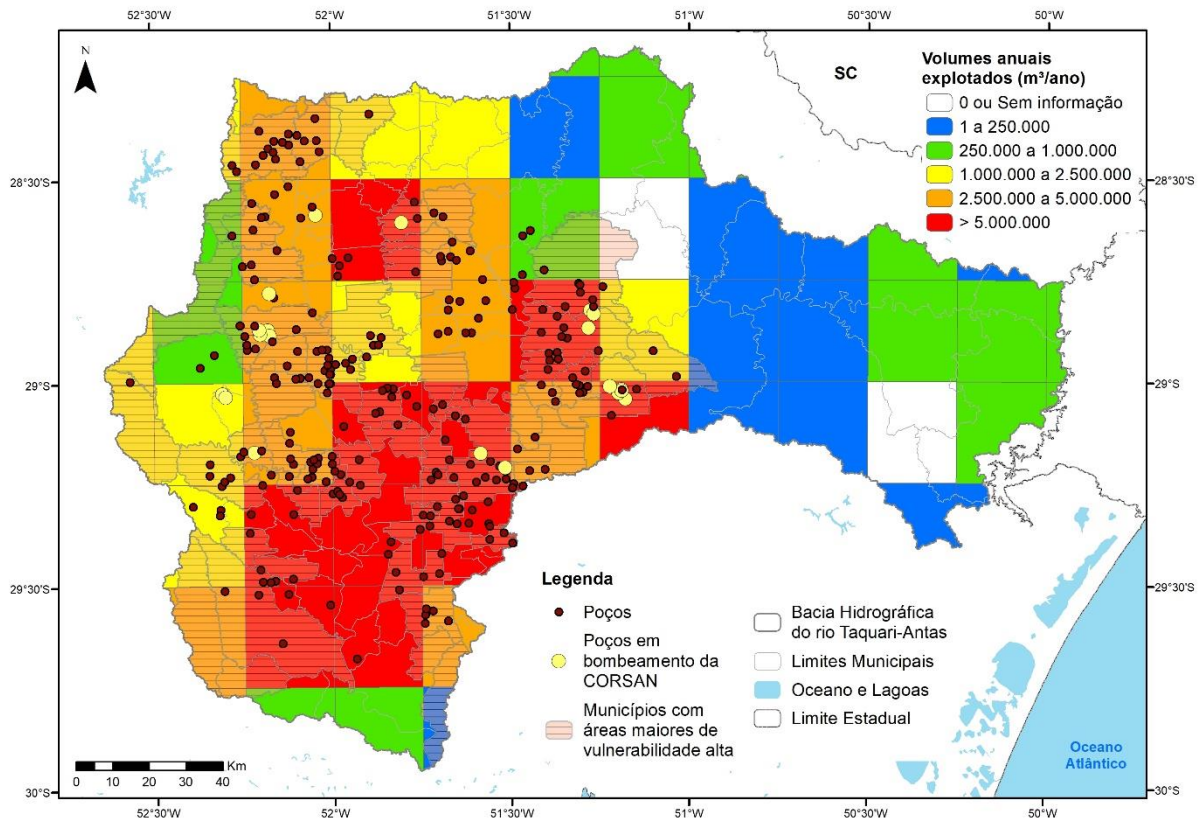


Figura 37. Municípios com maiores áreas de alta vulnerabilidade, poços em áreas de alta vulnerabilidade e volumes anuais de exploração.



5.2. MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E CLASSIFICAÇÃO POSH

O mapa de uso e ocupação do solo é apresentado na **Figura 39**. Conforme o **Gráfico 10**, vegetação e plantação predominam na bacia. Enquanto as classes urbanização e solo exposto correspondem a 1% e 2% da área, respectivamente. É possível observar a partir do mapa que os campos são significativos na região leste, em Cambará do Sul.

Figura 39. Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas.

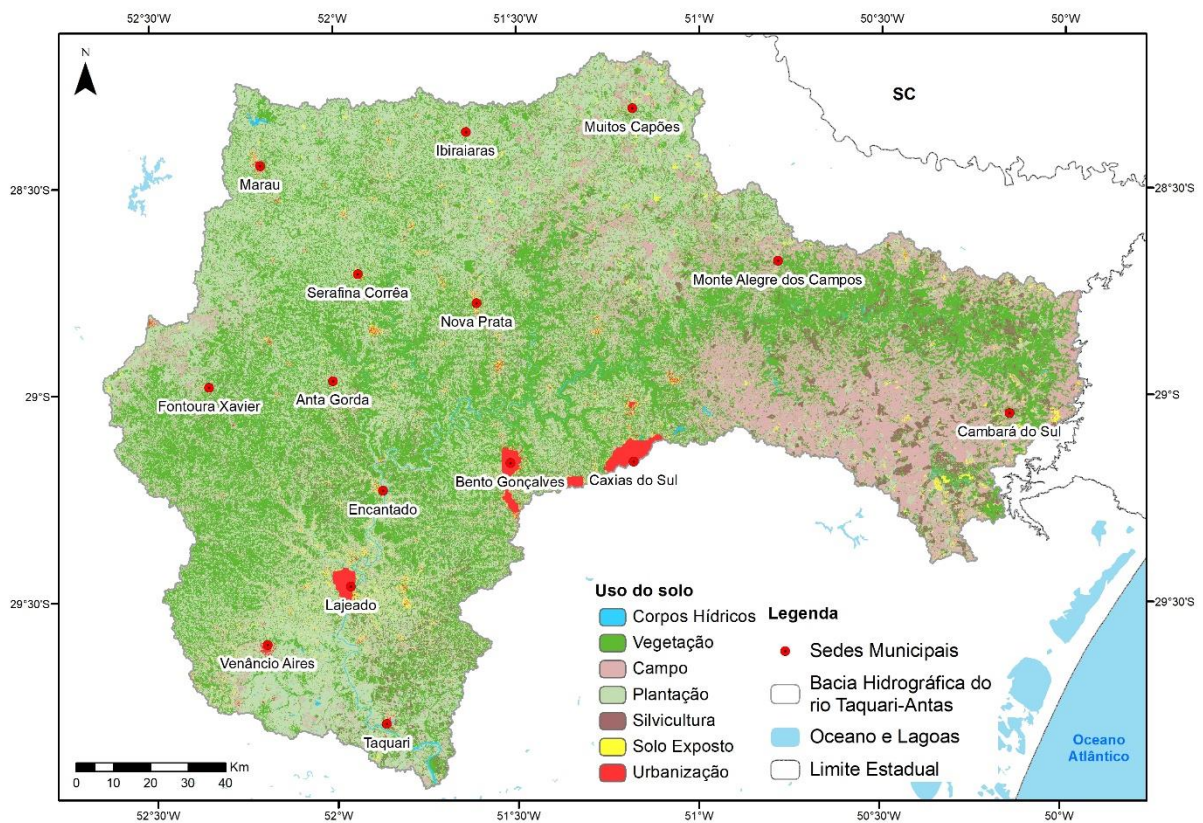
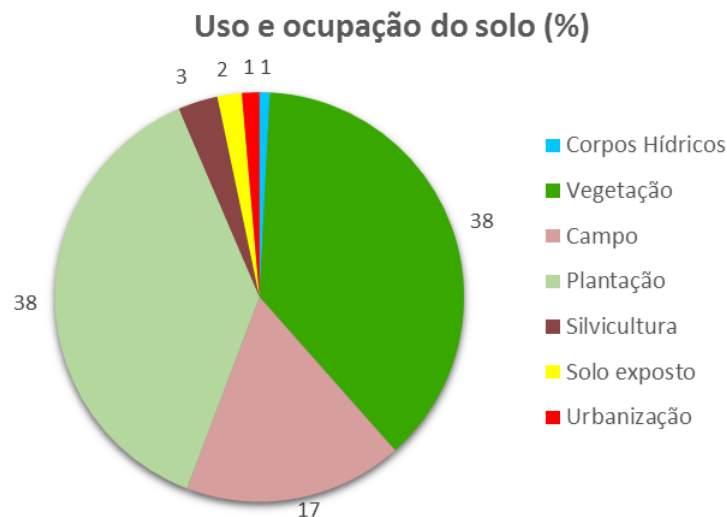


Gráfico 10. Distribuição de uso e ocupação do solo na bacia.



A classificação do potencial de poluição por cargas difusas, que foi feita com base no uso do solo, é apresentada na **Figura 40**. A urbanização foi classificada de como baixa e moderada, de acordo com a densidade demográfica e porcentagem da rede coletora de esgotos. As classes plantação e campo foram enquadradas como moderadas, visto que é a caracterização do solo não pôde ser tão precisa, e apesar de a agricultura predominante na região ser milho e soja, há bastante agricultura familiar de subsistência, ou terras que são plantadas só na época de safra. A silvicultura foi categorizada como elevada, visto que a aplicação de herbicidas e fertilizantes é contínua durante todos os anos de plantação.

A análise do **Gráfico 11** mostra que quase metade da área da bacia não é classificada, isso se deve a grande parte da bacia ser vegetação (38%). Como pode ser observado o potencial de poluição moderado é majoritário na bacia.

Figura 40. Classificação do potencial de poluição por cargas difusas.

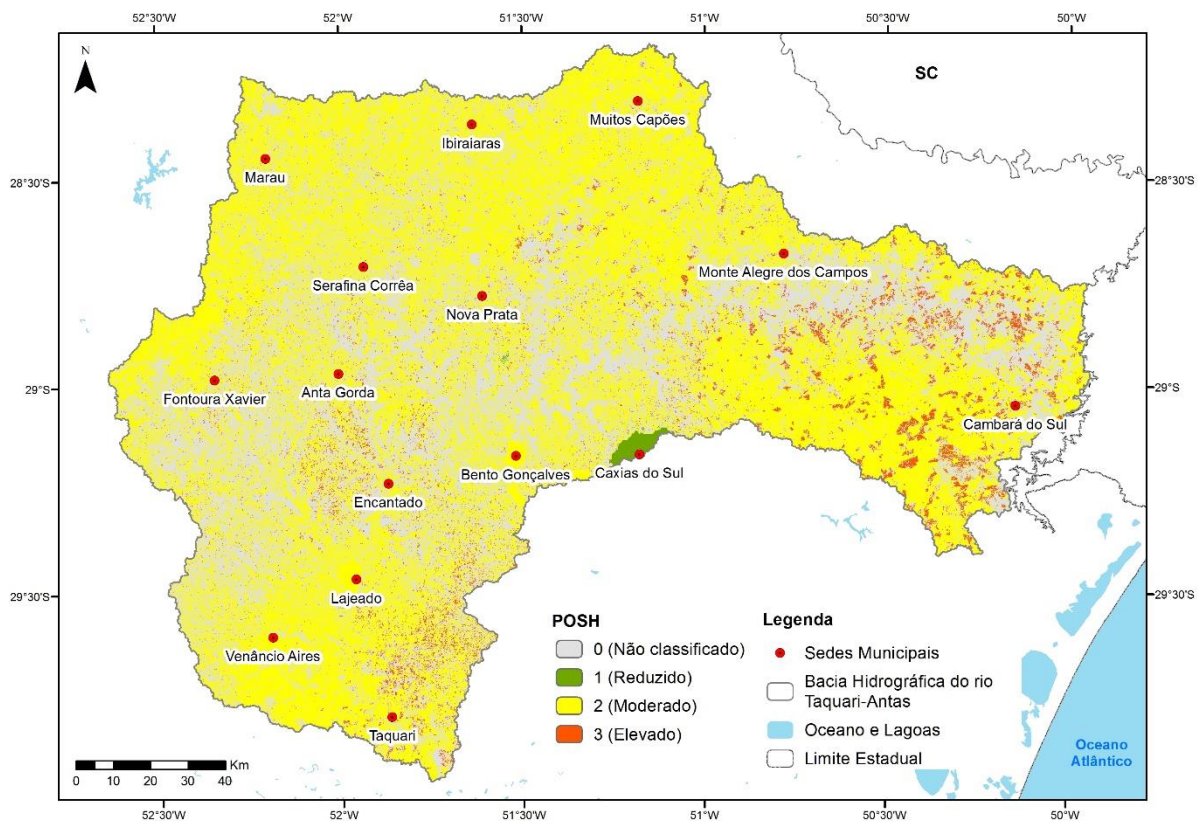
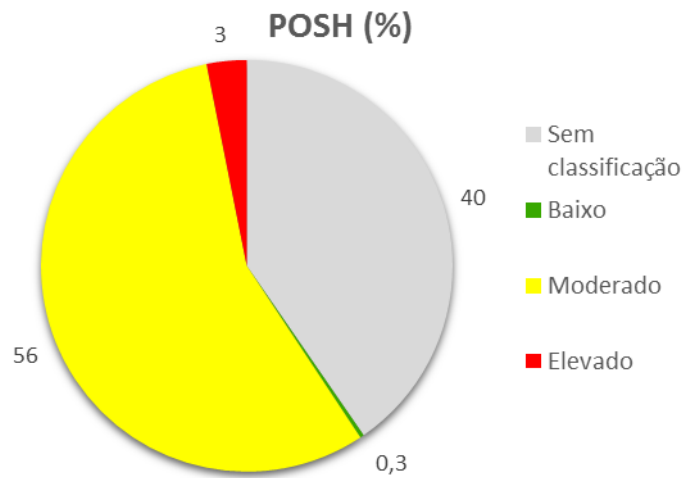


Gráfico 11. Distribuição da classificação do potencial de poluição por POSH.



5.3. MAPA DE AVALIAÇÃO DE RISCO DE POLUIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A união dos mapas de vulnerabilidade e de potencial de poluição por cargas difusas resultou no mapa de avaliação de risco de poluição da água subterrânea, **Figura 41**. De acordo com o mapa, as áreas de risco elevado são pequenas, mas estão espalhadas pela bacia, compreendendo uma área de 4% da bacia. O risco moderado predomina com 47% de abrangência. Enquanto o risco reduzido engloba 9% da área, presente significativamente nos municípios Ibiraiaras, Monte Alegre do Campos, Serafina Corrêa, Lajeado e Bento Gonçalves.

Figura 41. Risco de poluição da água subterrânea da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas.

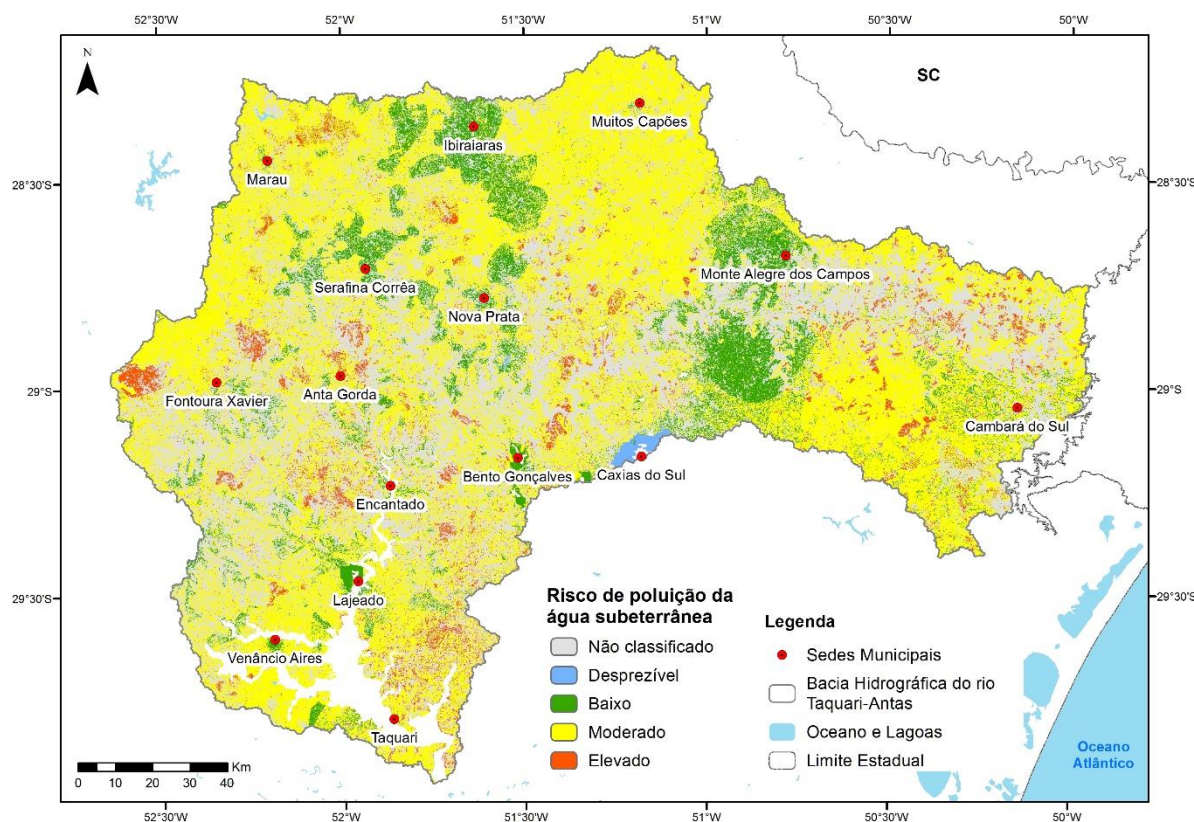
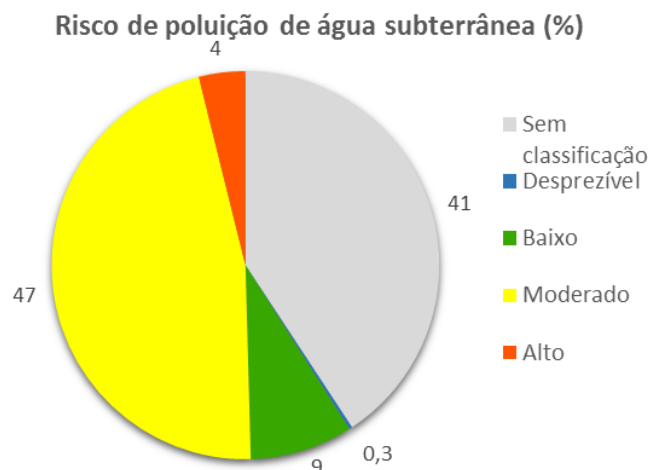
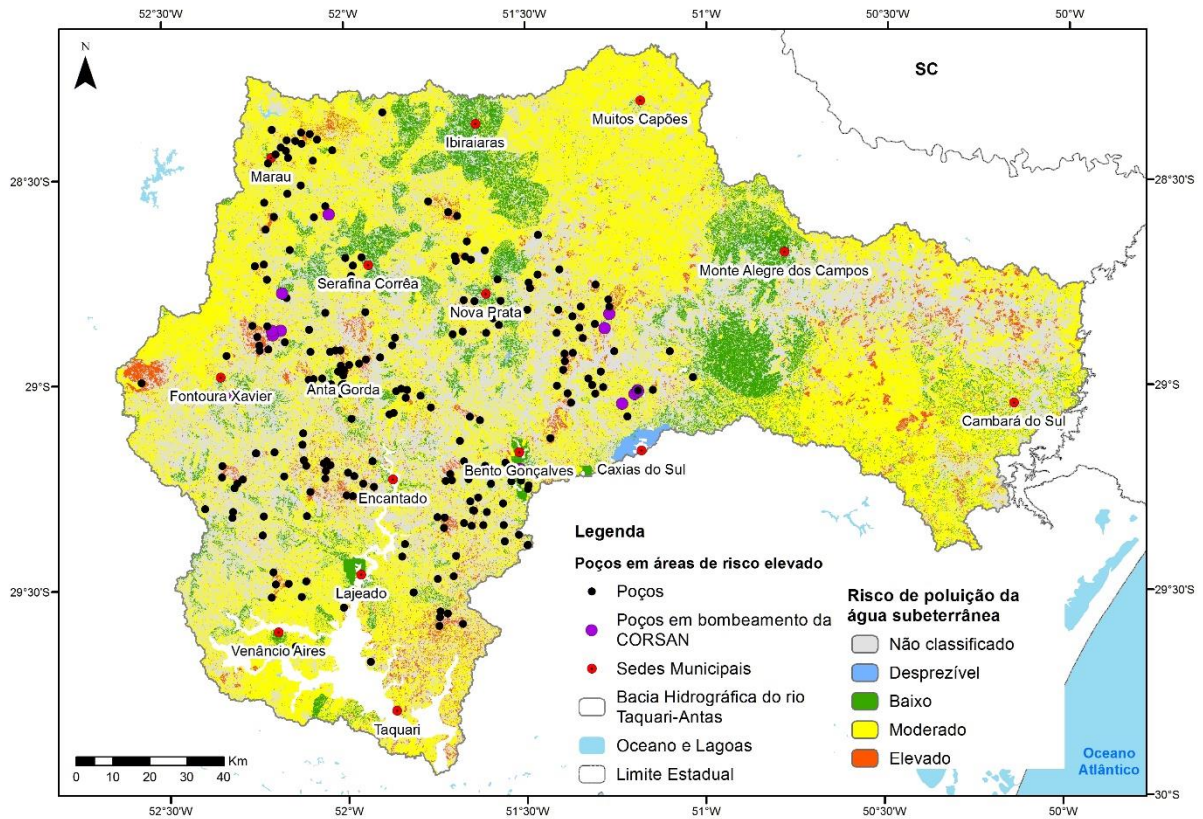


Gráfico 12. Distribuição do risco de poluição da água subterrânea na bacia.



Analisando a **Figura 42**, é possível observar que há vários poços em áreas de risco elevado, são 229 poços, sendo que 14 poços estão bombeando e são da CORSAN, responsável pelo abastecimento público. Arvorezinha e Flores da Cunha possuem 3 e 4 poços, respectivamente, nessa categoria.

Figura 42. Poços em áreas de risco de poluição elevado.



É possível observar que 36 municípios possuem maior concentração de áreas com risco elevado de poluição, mostrados na **Figura 43**. Nesses municípios deve haver enfoque na gestão dos recursos hídricos e uso e ocupação do solo, principalmente na escolha de lugares para novas perfurações e para delimitação de perímetros de proteção.

A **Figura 44** apresenta os poços do SIAGAS que possuem dados de vazão específica e que estão em áreas de risco elevado. Desses poços, dez estão entre os poços de maior produtividade, e pertencem aos municípios Teutônia, Vila Flores, Nova Bassano, Vila Maria, Coronel Pilar, Antônio Prado (2), Cruzeiro do Sul, Relvado e Itapuca.

Figura 43. Municípios com maiores concentrações de áreas de risco elevado

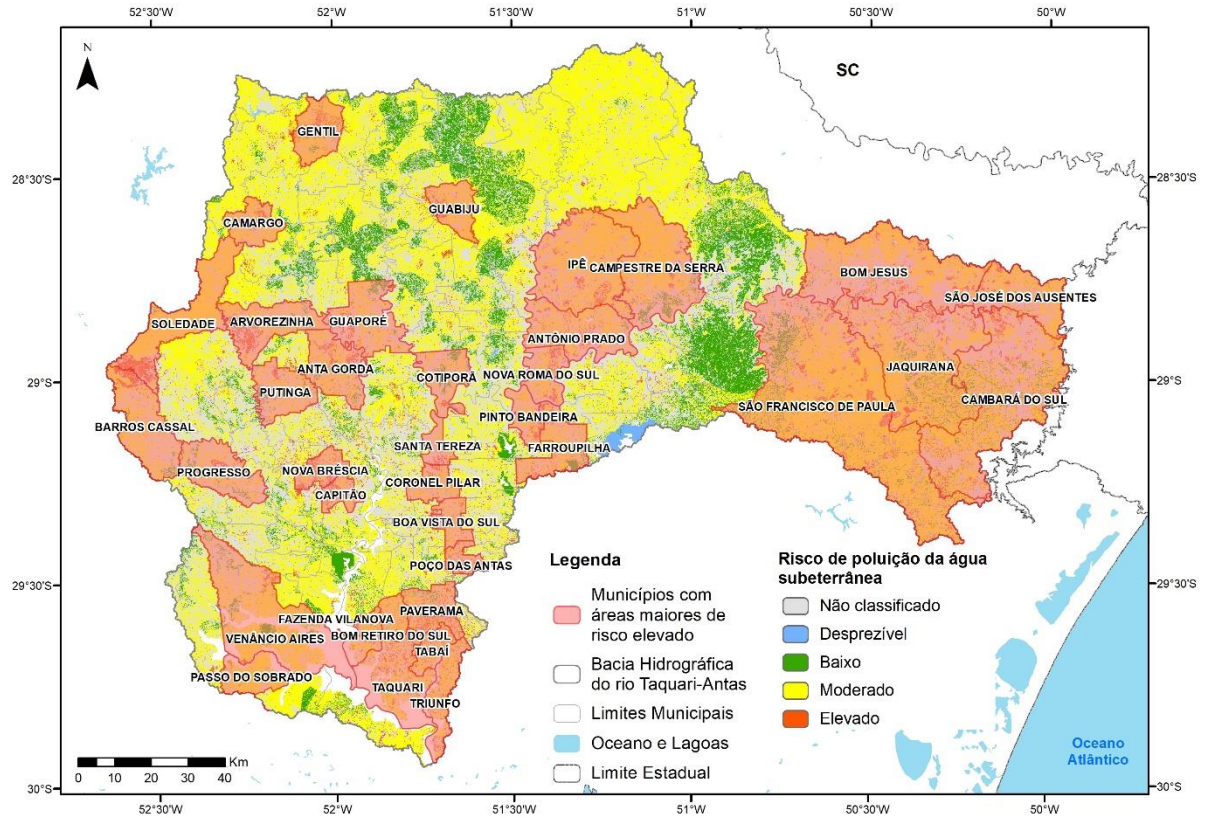
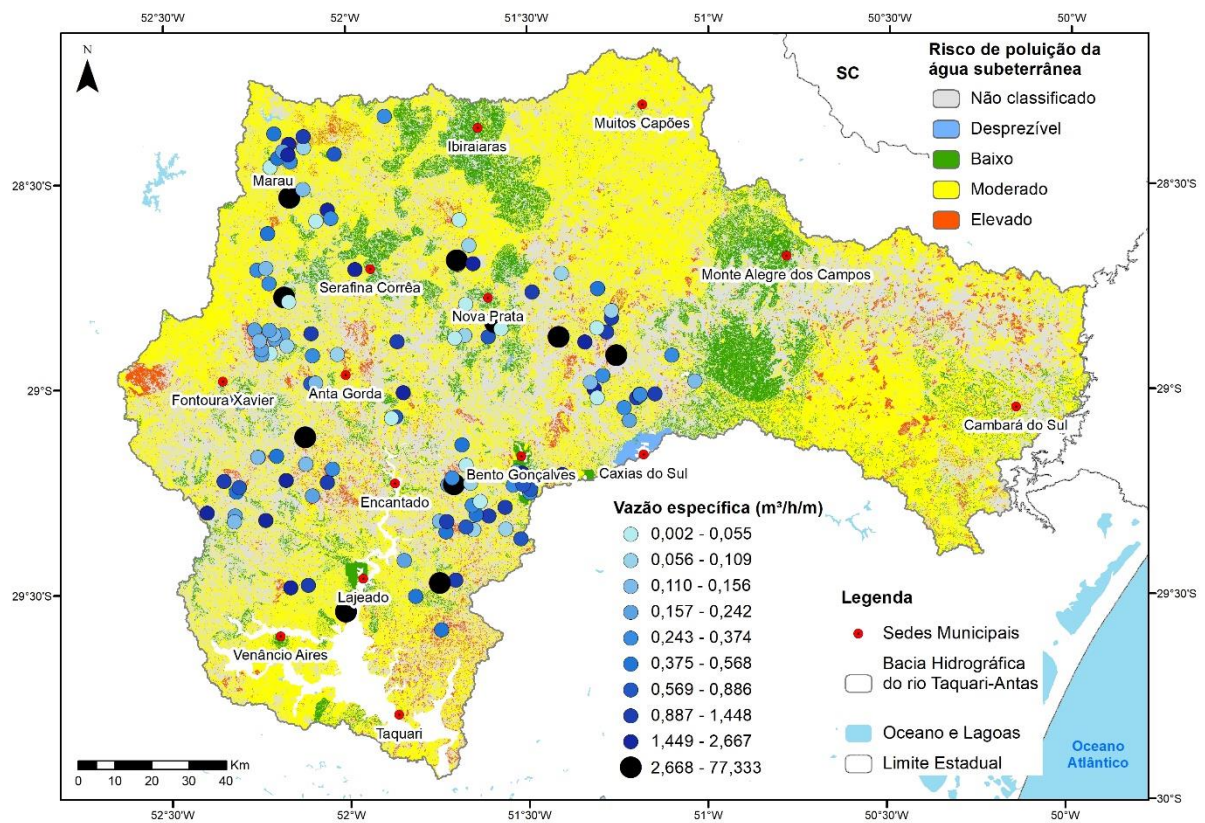


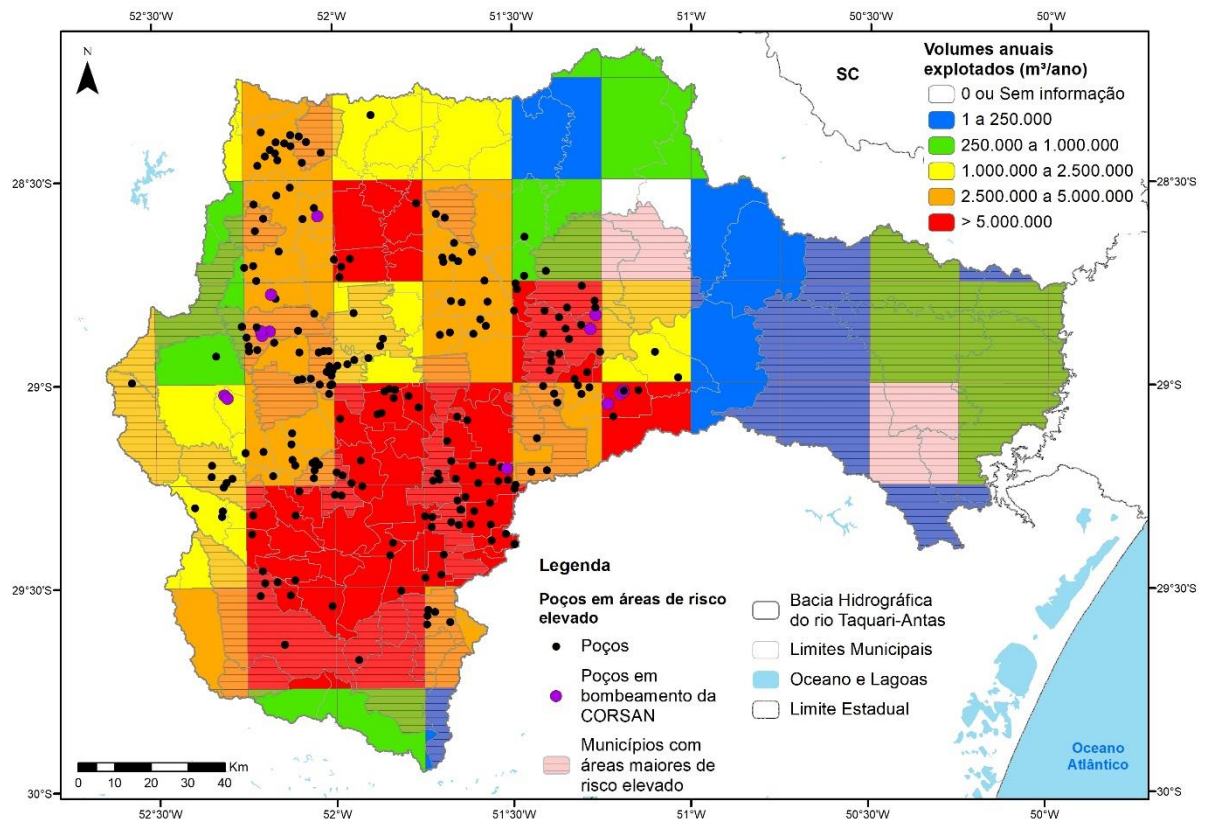
Figura 44. Poços com dados de vazão específica presentes nas áreas de alta vulnerabilidade.



A **Figura 45** apresenta a relação dos poços e municípios presentes em áreas de risco elevado, e também dos volumes anuais explorados. A partir da imagem percebe-se que algumas cidades estão nas regiões de maiores volumes explorados (> 5 milhões m³/ano), e inclusive seus poços, são elas Ipê, Antônio Prado, Venâncio Aires, Bom Retiro do Sul, Boa Vista do Sul, Coronel Pilar e Santa Tereza.

Há também outros poços, sobre áreas mais locais de elevado risco, que estão em regiões de maiores volumes explorados, principalmente nas cidades Flores da Cunha, Vespasiano Corrêa, Serafina Corrêa, Garibaldi, Carlos Barbosa, Barão, Teutônia e Imigrante.

Figura 45. Municípios com maiores áreas de risco elevado, poços em áreas de risco elevado e volumes anuais de exploração.



6. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou avaliar a o risco de poluição das águas subterrâneas da bacia do Rio Taquari-Antas, por meio da análise da vulnerabilidade dos aquíferos presentes e também das fontes potenciais de poluição por cargas difusas.

Os resultados de vulnerabilidade mostraram que 82% da área da bacia é classificada como vulnerabilidade média, enquanto 14% como baixa e 4% como alta. Além disso 285 poços, registrados no SIAGAS, estão presentes nas áreas de risco elevado, sendo que Anta Gorda, Arvorezinha, Garibaldi, Marau e Nova Bréscia possuem mais de 10 poços nessa categoria. Municípios como Soledade, Arvorezinha, Guaporé, Anta Gorda e Gentil estão sobre áreas significativas de maior vulnerabilidade, e, portanto, devem ter mais atenção quanto ao uso do solo e suas áreas de exploração de água subterrânea.

Outro aspecto observado foi a presença de 12 poços de maior produtividade da bacia hidrográfica nas áreas de vulnerabilidade alta, nos municípios Teutônia, Vila Fores, Vila Maria, Antônio Prado (2), Bento Gonçalves, Cruzeiro do Sul, Imigrante, Relvado, Itapuca, Ipê e Nova Bassano. Esses poços por serem importantes para as cidades, devem ser olhados cuidadosamente, a fim de evitar contaminação.

Adicionalmente foi observado o Mapa de Volumes Anuais Explotados em conjunto com as informações de poços e municípios presentes em áreas de vulnerabilidade, e foi verificado que Garibaldi, Antônio Prado e Flores da Cunha possuem 13, 9 e 8 poços, respectivamente, em zonas de volume de exploração maiores que 5 milhões de m³, representando os piores casos.

Os estudos feitos evidenciaram que os municípios mencionados acima, de alguma forma são relevantes para a proteção das águas subterrâneas, visto que estão em áreas mais suscetíveis à poluição caso haja alguma fonte desta na superfície.

A análise das cargas potenciais de contaminação mostraram que 56% da área da bacia se enquadra na classe moderada de potencial de contaminação, 0,3% em reduzido e 3% em elevado.

Por fim a análise do risco de poluição da água subterrânea da bacia do Rio-Taquari mostrou que 47% da área é categorizada como risco moderado, 9% em baixa, 4% em alta e 0,3% em desprezível. Também foram observados 229 poços nas áreas de risco elevado, sendo que Anta Gorda, Arvorezinha, Garibaldi e Marau possuem 10 poços ou mais. Cerca de 36 municípios possuem maior concentração de áreas nessa categoria, mais significativas em São Francisco de Paula, Arvorezinha, Gentil e Soledade.

Além disso, dos poços que possuem dados de vazão específica, 10 poços de maior produtividade da bacia estão em regiões de risco elevado, nos municípios de Teutônia, Vila Flores, Nova Bassano, Vila Maria, Coronel Pilar, Antônio Prado (2), Cruzeiro do Sul, Relvado e Itapuca. O Mapa de Volumes Anuais Explotados também foi relacionado aos resultados de risco de poluição, e foi verificado que Garibaldi, Antônio Prado e Flores da Cunha possuem 10, 9 e 7 poços, respectivamente, em zonas de risco elevado e volumes de exploração maiores que 5 milhões de m³.

As análises feitas demonstram que os municípios citados, por motivos diversos, devem ter mais controle do uso e ocupação do solo e dos locais de exploração da água subterrânea, delimitando perímetros de proteção dos poços e fiscalizando essas áreas, a fim de proteger a água subterrânea.

É importante ressaltar que devido a escala ser pequena, há imprecisão nos resultados, entretanto este projeto já serve como base para estudos mais aprofundados, principalmente para as áreas de maior risco.

Espera-se que este trabalho sirva de auxílio na gestão de recursos hídricos e uso e ocupação do solo para os municípios da bacia, como um alerta para melhor caracterização da área de possível extração de água subterrânea e também de instalação de indústrias, aterros e outras fontes potencialmente poluidoras. Com isso evitando custos elevado de tratamento de água e também mantendo a integridade das águas, visto que o ser humano faz parte de um ecossistema maior, no qual ele não é o único usuário da água.

7. BIBLIOGRAFIA

ALLER, Linda; LEHR, Jay H.; PETTY, Rebecca. **DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potencial using hydrogeologic settings**. 1987. 20 f, Ohio, 1987.

AMBIENTE, Ministério do Meio. **Águas Subterrâneas: Um recurso a ser conhecido e protegido**. Brasília: 2007. 40 p.

ANA – Agência Nacional das águas, ENGEORPS. **Estudo de Vulnerabilidade Natural à Contaminação e Estratégias de Proteção do Sistema Aquífero Guarani nas Áreas de Afloramento**, Relatório Final – Tomo I. 2014.

BARBOSA, Marina Costa et al. Avaliação do perigo de contaminação do sistema aquífero guarani em sua área de afloramento do estado de São Paulo decorrente das atividades agrícolas. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 25, n. 1, p.1-14, 2011.

BERNARDES, Jr. C., R. HIRATA, J. MENDES, e R. CLEARY. Remedial action for an industrial open dump-proposed activities and prospectives. **Water Science and Technology** 24(11): 271–281. 1991.

BIANCHINI, Cleberton Diego. **Determinação de áreas mais indicadas para implantação de unidades de conservação no Vale do Taquari - RS**. 2015. 133 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2015.

BORGES, Vinícius Menezes. **Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral, estado do Paraná**. 2017. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BRITO, Daniel Oliveira. **Avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea por fontes pontuais na macrozona cidade radiocêntrica de Porto Alegre, Rio Grande do Sul**. 2013. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CHEREMISINOFF, P. **A guide to underground storage tanks evaluation, site assessment and remediation**. New Jersey: Prentice- Hall. 1992.

CIVITA, M. and De MAIO, M. - **SINTACS Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento**, Metodologia e automazione, Pitagora Ed., Bologna. 1997.

Collischonn, W.; Dornelles, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Editora ABRH. 2013.

COLLISCHONN, Walter; TASSI, Rutinéia. **Introduzindo Hidrologia**. Porto Alegre: IPH - UFRGS, 2008.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Mapas de Geodiversidade Estaduais**. 2010. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geodiversidade/Mapas-de-Geodiversidade-Estaduais-1339.html>. Acesso em maio de 2017.

CUTRIM, Alterêdo Oliveira; CAMPOS, José Eloi Guimarães. Aplicação dos Métodos Drastic e Posh para a Determinação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis-MT. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p.127-142, 2010.

DINIZ, João Alberto Oliveira. **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo**: Nota técnica. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014.

FEIX, Rodrigo Daniel; LEUSIN JÚNIOR, Sérgio. **Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul — 2015**. Porto Alegre: FEE, 2015.

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS. **Qualidade Ambiental - Região Hidrográfica do Guaíba**: Qualidade das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio das Antas e Rio Taquari. Disponível em: http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_taquari_antas/taquariantas.asp>. Acesso em: junho de 2017. 2017a.

FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS. **CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/Taquari-Antas/pag11.html>>. Acesso em: junho de 2017. 2017b.

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

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

FOSTER, S. S. D. **Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proceedings of International Conference: Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants**. Noordwijk, Países Baixos. 1987.

FOSTER, Stephen et al. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais.** 2006. 144 p.

FRANCÉS, A.; PARALTA, E.; FERNANDES, J. e RIBEIRO, L. **Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: the susceptibility index.** 3rd Internacional Conference on Future Groundwater Resources at Risk, Lisbon, Portugal, IAH, 25 – 27 June, 2001.

GAROTTI, Leonardo Monteiro; BARBASSA, Ademir Paceli. Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial. **Eng. Sanit. Ambiental**, v. 15, n. 1, p.19-28, 2010.

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

GUIGUER, Nilson; KOHNKE, Michael Wolfgang. **Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos.** Xii Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p.13, 2002.

HASENACK, H.; WEBER, E.(org.) **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul** - escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto) e ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia.** 3. ed. Rio de Janeiro. 2015. 430 p.

KÄMPF, N.; GIASSON, E.; INDA JUNIOR, A. V.; NASCIMENTO, P. C. do; RODRIGUES, A. L. M.; ANGHINONI, M. C. M.; FERRARO, L. W.; BINOTTO, R. B.; SANBERG, J. R. D. **Metodologia para classificação de solos quanto à resistência a impactos ambientais decorrentes da disposição final de resíduos.** FEPAM em Revista, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 11-17, 2008.

LIMA, Diego Reginatto de. **Avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas do sistema aquífero serra geral no município de Bento Gonçalves.** 2014. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Cap. 2014.

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. **Projeto mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul:** escala 1:750.000. Porto Alegre: CPRM, 2005. Relatório final. CD-ROM.

MAGALHÃES, Ivo Augusto Lopes et al. **Análise de métodos de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na região Norte do estado do Espírito Santo, Brasil.** XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Sbrsr, Foz do Iguaçu, abr. 2013.

MARINHO, A. M. C. P. **Contaminação de aquíferos por instalação de cemitérios. Estudo de caso do Cemitério São João Batista, Fortaleza,** 88 p., (Dissertação – Mestrado) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará. 1998.

MATOS, A.B. **Avaliação da ocorrência e do transporte de microorganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo.** Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. 172p. 2001.

MELO JUNIOR, Homero Reis de. **Método DRASTIC: uma proposta de escala para normatização dos índices finais de vulnerabilidade.** XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Natal, p 14, 2008.

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

MIGLIORINI, R. B. **Cemitérios como fonte de poluição em aquíferos.** Estudo do Cemitério Vila Formosa na bacia sedimentar de São Paulo, São Paulo, 74 p., (Dissertação – Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 1994.

MILEK, Cristiano Bernardo; KISHI, Regina Tiemy; GOMES, Júlio. **Avaliação do Risco de Contaminação da Água Subterrânea do Aquífero Cárstico no Município de Almirante Tamandaré/PR com o Uso de Mapa de Índices de Risco.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p.89-100, Abr/Jun 2014.

NRC (National Research Council). **Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty.** Washington, D.C.: National Academy Press. 1993.

PACHECO, A., MATOS, B. A. **Cemitérios e meio ambiente.** Revista Tecnologias do Ambiente. Lisboa, Ano 7, n. 33, p. 13-15. 2000.

PACHECO, A., MENDES, J. M. B., MARTINS, T., HASSUDA, S., KIMMELMANN, A. A. **Cemeteries - a potential risk to groundwater.** *Water Science and Technology*, v. 24, n. 11, p. 97-104. 1991.

PANKOW, J., R. JOHNSON, J. HOUCK, S. BRILLANTE, e W. BRYAN. **Migration of chlorophenolic compounds at the chemical waste disposal site at Alkali Lake, Oregon.** Site description and groundwater flow. *Ground Water* 22(5): 593–601. 1984

PONTES, Cristine Hortência Coutinho et al. Determinação da vulnerabilidade do aquífero basáltico no campus da UFMS, em Campo Grande – ms. **Águas Subterrâneas**, v. 23, n. 01, p.105-120, 2009.

REGINATO, Pedro Antonio Roehé; AHLERT, Siclério. Vulnerabilidade do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**, v. 27, n. 2, p.32-46, 2013.

ROSSATO, Luciana. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do brasil.** 2002. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia, Inpe, São José dos Campos, 2002.

SILVEIRA, Vinicius Melgarejo Montenegro. **Geração de subsídios técnicos para o monitoramento de áreas urbanas a partir e técnicas de sensoriamento remoto e modelagem espacial.** 2015. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SIQUEIRA, Vinícius Alencar. **Ferramenta de apoio computacional aplicada ao dimensionamento de galerias pluviais.** 2012. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo. (2010). **Diagnóstico ambiental para subsídio ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.** São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. Relatório técnico 117.017-205 SMA/CPLA. São Paulo. 2010. 384p.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Dados sobre saneamento.** 2015- Disponível em <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em maio de 2017.

TUCCI, CARLOS E. M.; PORTO, RUBEM LARAINHA; BARROS, MARIO T. DE; Associação Brasileira de Recursos Hídricos; **Drenagem Urbana.** Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 428p.

UFMS – Universidade Federal de Santa Maria. **Geologia.** Disponível em: <<http://coralx.ufsm.br/ifcrs/geologia.htm>>. Acesso em: junho de 2017.

USGS - U.S. Geological Survey. **Earth Explorer.** Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: junho de. 2017

VAN STEMPOORT, D., EWERT, L., WASSENAAR, L. **AVI: A method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada**, Canada, PPWB Report No. 114, Saskatoon Saskatchewan: National Hydrogeology Research Institute, 1992.

VIERO, Ana Cláudia. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Organização Ana Cláudia Viero [e] Diogo Rodrigues Andrade da Silva. – Porto Alegre: CPRM, 2010.

WILDNER, W.; RAMGRAB, G.; LOPES, R. da C.; IGLESIAS, C. M. F. **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul**: escala 1:750.000. Porto Alegre: CPRM, 2008. 1 DVD-ROM. Programa Geologia do Brasil. Mapas geológicos estaduais.

XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2008, Natal. **DRASTIC: vulnerabilidade do aquífero Barreiras nos bairros de Ibura e Jordão – Recife – Pernambuco**. Natal: 20 p.