

Meio Ambiente, Paisagem e Qualidade Ambiental

Índice de vulnerabilidade dos aquíferos da Folha de Camobi

Vulnerability index of the aquifers of the Camobi Sheet

Índice de vulnerabilidad de aquíferos de la hoja de Camobi

Juliane dos Santos Pinto¹ , **Andréa Valli Nummer¹ **,
Rinaldo José Barbosa Pinheiro¹ 

¹Universidade Federal de Santa Maria , Santa Maria, RS, Brasil

RESUMO

O fortalecimento do polo universitário na região central do estado promoveu a expansão urbana, intensificando a demanda sobre os recursos hídricos subterrâneos e ampliando o risco potencial de contaminação dos aquíferos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos na área da Folha de Camobi (RS), por meio da metodologia GOD (Groundwater Overall Depth). O método integrou informações relativas ao tipo de aquífero (G), à litologia da zona não saturada (O) e à profundidade do nível freático (D), com base em mapas hidrogeológicos e dados técnicos de poços tubulares cadastrados no SIAGAS e validados pelo GWDBRAZIL (2025), processados no software QGIS. Na área de estudo, foram identificados 201 poços tubulares, dos quais 61 atenderam aos critérios de validação, abrangendo aquíferos livres, semiconfinados e confinados. Os resultados indicam a predominância de classes de vulnerabilidade insignificante à baixa na porção norte da Folha de Camobi, associadas principalmente a aquíferos confinados e semiconfinados, caracterizados por maior profundidade do nível freático e maior proteção natural. As classes de vulnerabilidade média ocorrem com maior expressão nas porções central e sul da área, relacionadas a unidades geológicas de permeabilidade intermediária. As áreas de vulnerabilidade alta a extrema, embora pontuais, concentram-se principalmente no município de Santa Maria, em regiões próximas às redes de drenagens e em áreas urbanizadas. Essas zonas estão associadas a aquíferos livres, depósitos aluvionares, arenitos das Formações Botucatu e Caturrita e zonas fraturadas da Formação Serra Geral, onde a reduzida profundidade do nível estático intensifica a suscetibilidade à contaminação. O mapa de vulnerabilidade gerado constitui um importante instrumento para o planejamento territorial e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, subsidiando ações de monitoramento e proteção dos aquíferos em escala municipal.

Palavras-chave: Vulnerabilidade; Aquífero; Poços tubulares

ABSTRACT

The strengthening of the university hub in the central region of the state has driven urban expansion, intensifying pressure on groundwater resources and increasing the potential risk of aquifer contamination. In this context, the present study aimed to assess aquifer vulnerability to contamination in the Camobi Sheet (Rio Grande do Sul, Brazil) using the GOD (Groundwater Overall Depth) methodology. This method integrates information on aquifer type (G), lithology of the unsaturated zone (O), and depth to the water table (D), based on hydrogeological maps and technical data from tubular wells registered in the SIAGAS database and validated by GWDBRAZIL (2025). The data were processed using the QGIS geoprocessing software. Within the study area, 201 tubular wells were identified, of which 61 met the validation criteria, encompassing unconfined, semi-confined, and confined aquifers. The results indicate a predominance of insignificant to low vulnerability classes in the northern portion of the Camobi Sheet, mainly associated with confined and semi-confined aquifers characterized by greater water table depths and higher natural protection. Moderate vulnerability classes are more prominent in the central and southern sectors of the area and are related to geological units with intermediate permeability. High to extreme vulnerability areas, although spatially limited, are concentrated mainly in the municipality of Santa Maria, particularly near drainage networks and urbanized areas. These zones are associated with unconfined aquifers, alluvial deposits, sandstones of the Botucatu and Caturrita formations, and fractured zones of the Serra Geral Formation, where shallow water table depths increase susceptibility to contamination. The resulting vulnerability map represents an important tool for territorial planning and groundwater resource management, supporting monitoring actions and aquifer protection at the municipal scale.

Keywords: Vulnerability; Aquifer; Water well

RESUMEN

El fortalecimiento del polo universitario en la región central del estado ha impulsado la expansión urbana, intensificando la presión sobre los recursos hídricos subterráneos y aumentando el riesgo potencial de contaminación de los acuíferos. En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación en el área de la Hoja de Camobi (RS, Brasil) mediante la aplicación de la metodología GOD (Groundwater Overall Depth). El método integró información relativa al tipo de acuífero (G), a la litología de la zona no saturada (O) y a la profundidad del nivel freático (D), a partir de mapas hidrogeológicos y datos técnicos de pozos tubulares registrados en el SIAGAS y validados por GWDBRAZIL (2025), procesados en el software de geoprocésamiento QGIS. En el área de estudio se identificaron 201 pozos tubulares, de los cuales 61 cumplieron los criterios de validación, abarcando acuíferos libres, semiconfinados y confinados. Los resultados indican la predominancia de clases de vulnerabilidad insignificante a baja en la porción norte de la Hoja de Camobi, asociadas principalmente a acuíferos tipos y semiconfinados, caracterizados por una mayor profundidad del nivel freático y una mayor protección natural. Las clases de vulnerabilidad media se presentan con mayor expresión en los sectores central y sur del área, relacionadas con unidades geológicas de permeabilidad intermedia. Las áreas de vulnerabilidad alta a extrema, aunque puntuales, se concentran principalmente en el municipio de Santa Maria, en regiones próximas a la red de drenaje y en áreas urbanizadas, asociadas a acuíferos libres, depósitos aluviales, areniscas de las Formaciones Botucatu y Caturrita y zonas fracturadas de la Formación Serra Geral, donde la reducida profundidad del nivel estático incrementa la susceptibilidad a la contaminación. El mapa de vulnerabilidad generado constituye una herramienta relevante para la planificación territorial y la gestión de los recursos hídricos subterráneos, apoyando la definición de áreas prioritarias para el monitoreo y la protección de los acuíferos a escala municipal.

Palabras-clave: Vulnerabilidad; Acuífero; Pozo de agua

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea, em relação aos corpos de água superficiais, constitui a principal reserva de água doce líquida no planeta. No contexto brasileiro Rebouças (2008), afirma que a exploração das águas subterrâneas acarreta consequências nos fluxos naturais subterrâneos, tais como potenciais de riscos de contaminação e variações diferenciadas na pressão do subsolo.

As águas subterrâneas são essenciais para diversas atividades humanas, porém podem representar desafios. Elas servem como recursos para o abastecimento público, agricultura, indústria e lazer, por outro lado pode ser considerado um obstáculo em intervenções como construções civis, sistemas agrícolas e assentamentos residenciais (Albuquerque Filho, 1995).

As modificações antrópicas nos espaços naturais podem gerar impactos ambientais como a contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas, por exemplo. O grau de contaminação dos aquíferos está intimamente ligado à sua vulnerabilidade, conceito que está relacionado com o aumento da suscetibilidade do aquífero ao ser atingido com concentrações de contaminações nocivas (Foster & Hirata, 1993).

A vulnerabilidade de um aquífero refere-se à sua capacidade natural de proteção contra contaminações, influenciada pelas características geológicas e hidrogeológicas dos estratos que o separam das fontes poluidoras. Essa vulnerabilidade expressa a sensibilidade do sistema a impactos naturais e antrópicos, constituindo uma propriedade intrínseca da água subterrânea (Guiguer, 2002). A compreensão desses conceitos é fundamental para orientar estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos (Foster *et al.*, 2006; Witkowski, Kowalczyk & Vrba, 2014).

O crescimento contínuo da demanda por água no mundo tem ampliado o risco de contaminação das águas subterrâneas e superficiais (Guiguer & Kohnke, 2002). Nesse contexto, torna-se essencial que governos estaduais e municipais adotem planos estratégicos de gestão e conservação dos recursos hídricos. Entre as ferramentas disponíveis, os mapas de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos destacam-se como instrumentos relevantes de apoio à tomada de decisão em diferentes níveis de gestão.

Ao longo dos anos, diversos estudos sobre a vulnerabilidade dos aquíferos têm sido conduzidos por diferentes autores, destacando-se alguns modelos conhecidos, tais como: GOD, DRASTIC (D – Depth to Groundwater; R – Recharge rate; A – Aquifer media; S – Soil media; T – Topography; I – Impact of vadose zone; C – Hydraulic conductivity), AVI (Aquifer Vulnerability Index).

O modelo GOD, originalmente proposto por Foster e Hirata (1988) e posteriormente aperfeiçoado por Foster *et al.* (1993; 2002; 2006), avalia o tipo de aquífero a partir da integração de informações sobre a litologia da zona não saturada e a profundidade do lençol freático, permitindo estimar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos à contaminação.

O modelo DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), criado pela EPA (agência norte-americana de Proteção Ambiental), é amplamente usado para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos, embora apresente limitações, como a necessidade de adaptações regionais e validação com dados reais. Estudos de Colins *et al.* (2016), Mondal *et al.* (2017), Jang *et al.* (2017) e Boumaiza *et al.* (2021), e confirmam sua ampla utilização e relevância científica. No entanto, sua aplicação depende da qualidade dos dados hidrogeológicos e pode simplificar interações entre fatores, introduzir subjetividade e não considerar contaminantes específicos (Aller *et al.*, 1987).

A metodologia AVI (Van Stempvoort *et al.*, 1992) estima a vulnerabilidade com base na espessura e na condutividade das camadas de proteção. Pesquisas de George (2021) e de Ducci e Sellerino (2022) indicam que o AVI é uma alternativa mais simples à metodologia DRASTIC, eficaz sobretudo em aquíferos porosos, mas limitado por desconsiderar fatores como recarga e tipo de solo; em aquíferos fraturados, requer ajustes ou associação com outros métodos.

A utilização do Sistema de Informação Geográfica utiliza as tecnologias de geoprocessamento na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos. Integra e analisa os dados espaciais de maneira eficiente, facilitando a observação e interpretação das informações relacionadas à proteção dos recursos hídricos. Utiliza dados hidrogeológicos, geográficos e ambientais, características e uso do solo, geologia,

profundidade do nível de água e potenciais fontes poluidoras. A análise espacial, conforme demonstrado por Borges *et al.* (2017) e estudos mais recentes de Georg (2021) e Ducci e Sellerino (2022), permite identificar padrões e suas relações entre variáveis que podem influenciar na vulnerabilidade dos aquíferos.

Khan *et al.* (2014) aplicaram métodos de mapeamentos utilizando SIG para a avaliação de aquíferos no norte da Índia. Os autores obtiveram bons resultados com o uso de uma abordagem integrada GIS + Rough Sets, a qual promoveu uma classificação espacial eficiente da vulnerabilidade dos diferentes blocos do aquífero evidenciando em quais áreas existia maior risco de contaminação.

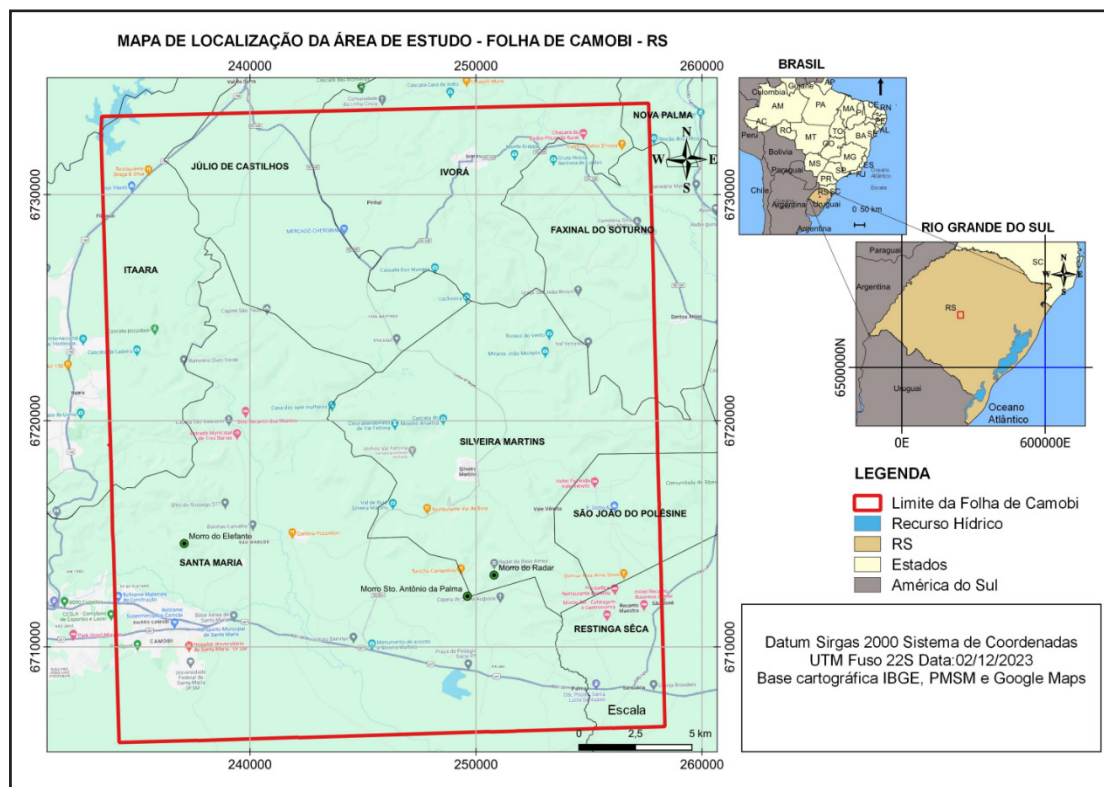
Este trabalho tem como objetivo apresentar o índice de vulnerabilidade dos aquíferos localizados na Folha de Camobi, escala 1:50.000, região centro do estado do Rio Grande do Sul, por meio do método GOD. Este método foi selecionado devido à simplicidade na definição dos parâmetros e a eficiente organização espacial das informações em um ambiente de SIG.

2 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada no âmbito da Folha de Camobi, na Escala 1:50.000, definida pelas coordenadas geográficas de 53°30'00" e 53°45'00" de longitude oeste e 29°30'00" e 29°45'00" de latitude sul (Figura 1). A denominação Folha de Camobi está associada à articulação da Folha SH.22-V-C-IV-2, MI – 2965/2, elaborada pelo Ministério do Exército – Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), Região Sul do Brasil, na escala 1:50.000.

Dentro dessa área, o município de Santa Maria se destaca como o maior em extensão territorial, abrangendo 1.780,194 Km² e com uma população de 271.633 habitantes, de acordo com o censo do IBGE de 2022 e onde se encontra o maior número de poços tubulares cadastrados no sistema SIAGAS. Santa Maria está localizada entre as encostas da Serra Geral e a Depressão Central Gaúcha, exibindo características topográficas e geográficas específicas que influenciaram seu desenvolvimento.

Figura 1 – Mapa de localização da Folha de Camobi – RS



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 1 apresenta as áreas territoriais e o número de habitantes dos nove municípios em estudo, conforme dados do censo do IBGE de 2022. Dos municípios que compõem a Folha de Camobi - RS, Santa Maria (município sede) destaca-se em termos de área, população e atividade econômica. Júlio de Castilhos possui a maior extensão territorial e é o segundo em número de habitantes, enquanto os demais municípios estão parcialmente inseridos nos limites da Folha de Camobi.

Tabela 1 – Municípios abrangidos pelo limite da Folha de Camobi – RS

(Continua...)

Municípios	Número de Habitantes	Área territorial total (km ²)
Faxinal do Soturno	6.702	169,514
Itaara	5.572	172,801
Ivorá	1.929	122,930
Júlio de Castilhos	18.226	1.929,544
Nova Palma	5.586	314,613
Restinga Sêca	14.939	968,620
Santa Maria	271.735	1.780,194
São João do Polêsine	2.649	78,320

Tabela 1 – Municípios abrangidos pelo limite da Folha de Camobi – RS (Conclusão)

Municípios	Número de Habitantes	Área territorial total (km²)
São Martinho da Serra	2.860	669,547
Silveira Martins	2.028	119,285

Fonte: IBGE - Censo (2022)

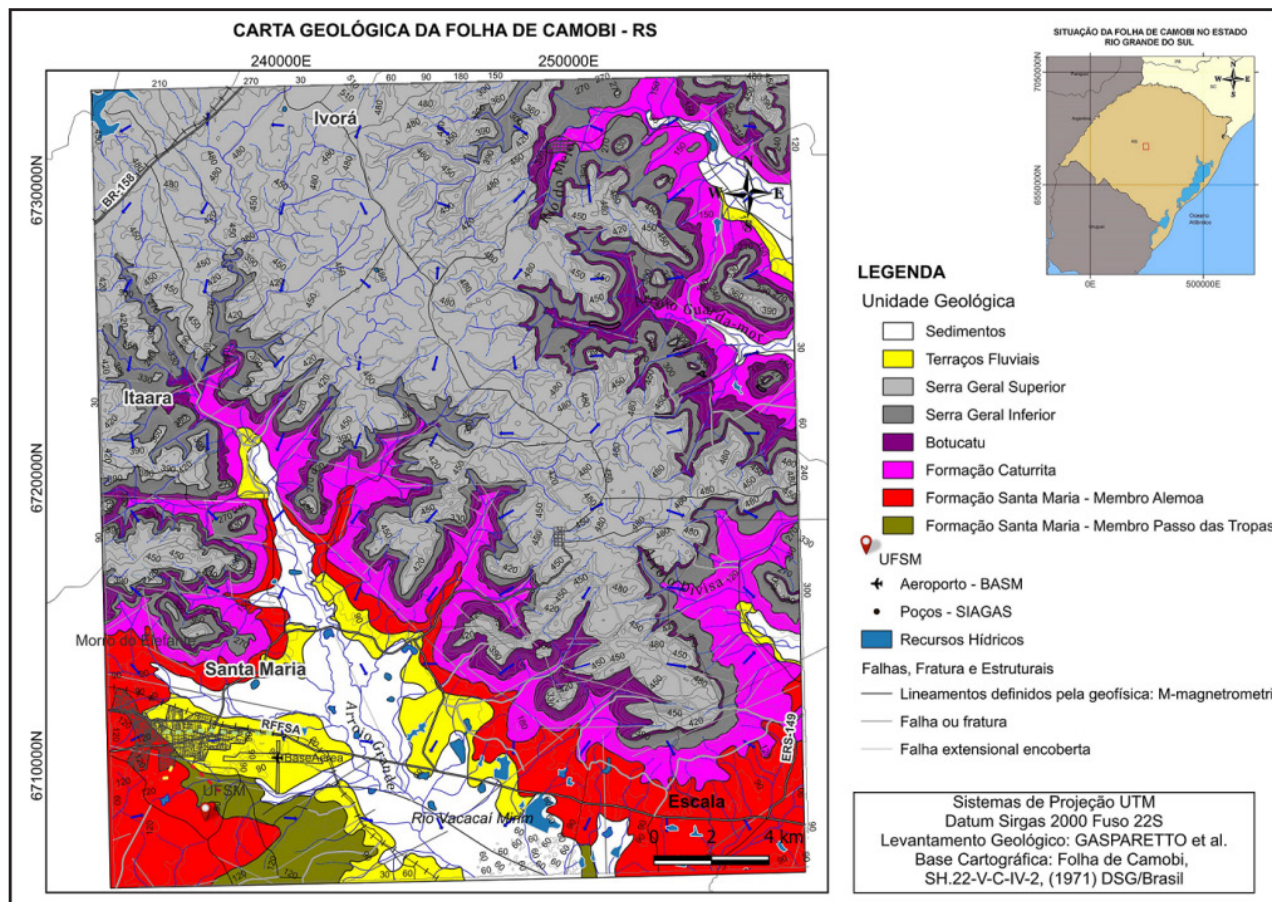
2.1 Geologia e hidrogeologia

Conforme Marchiori e Noal Filho (2009), a região se destaca pelo contraste entre suaves coxilhas, na Depressão Central, e o recortado dos taludes da Serra Geral, com sua densa floresta ao norte.

Durante o período Triássico, essa região estava localizada na parte meridional da Bacia Sedimentar Intracratônica do Paraná, originada por processos geotectônicos pós-orogênicos durante a era Paleozoica, no continente Gondwana (Sartori, 2009). A sedimentação continental que preencheu essa bacia é representada por uma sequência de camadas vermelhas depositadas em ambientes fluviais e lacustres alternados (Bortoluzzi, 1974). Após um longo período de erosão continental durante o Jurássico, o ambiente desértico estabelecido foi seguido por extensa atividade vulcânica no início do Cretáceo, relacionada à abertura do Atlântico Sul. Isso recobriu parcialmente a sequência sedimentar de forma transgressiva, inicialmente com derrames básicos e, posteriormente, com a ascensão dos derrames de lavas ácidas (Sartori, Maciel Filho e Menegotto, 1975; Maciel filho, 1990; Sartori, 2009).

As unidades estratigráficas que compõem a Folha de Camobi podem ser vistas no mapa Geológico da Figura 2 e são: Formação Sanga do Cabral; Formação Santa Maria (membros Passo das Tropas e Alemoa), seguidas pelas Formações Caturrita e Botucatu. Além disso, recobrendo essa sequência de rochas sedimentares ocorrem os derrames de lava da Formação Serra Geral. Os depósitos sedimentares mais recentes como terraços e aluviões encontram-se próximos aos principais cursos de água. Depósitos superficiais como colúvios e tálus recobrem as encostas (Sartori, Maciel Filho e Menegotto, 1975).

Figura 2 – Mapa Geológico da Folha de Camobi – RS



Fonte: Elaborado por Autor

As litologias descritas para a área de estudo constituem unidades hidroestratigráficas que podem formar aquíferos, aquíferos confinados e aquíferos não saturados. Na área de estudo encontra-se o sistema Aquífero Guarani (SAG), caracterizado como um sistema granular composto principalmente por camadas arenosas que regionalmente pode ser livre em sua porção aflorante, enquanto nas áreas cobertas por rochas basálticas, torna-se confinado (Oliveira *et al.*, 2019).

A Tabela 2 resume as unidades Estratigráficas, as litologias predominantes, as condições hidrogeológicas e as formas de relevo encontradas na área abrangida pela Folha de Camobi.

Tabela 2 – Atributos do mapa geológico da folha de Camobi – RS

Formação	Litologia	Comportamento hidrogeológico
Sedimentos	Cascalhos, areias, siltes e argilas fluviais	Aquífero
Terraços Fluviais	Conglomerados, arenitos med. argilosos com estratificação cruzada e planar e siltitos arenosos de cores cinza-claro, rosa e amarela, de ambiente fluvial	Aquífero de pouca importância
Serra Geral Superior	Seq. Inf. Rochas vulcânicas básicas. Basaltos e andesitos toleíticos de cor cinza escura, com intercalações de arenito eólico	Aquíferos com permeabilidade de fissura, de baixa produção
Serra Geral Inferior	Seq. Inf. Rochas vulcânicas básicas. Basaltos e andesitos toleíticos de cor cinza escura, com intercalações de arenito eólico	Aquíferos com permeabilidade de fissura, de baixa produção
Botucatu	Arenitos médios a finos, de cor rosa, com estratificação cruzada cuneiforme de grande porte de ambiente eólico	Aquífero
Caturrita	Arenitos médios e finos róseos, com estratificação cruzada acanalada e planar, intercalados com siltitos vermelhos de ambiente fluvial, troncos vegetais fósseis silicificados	Aquífero, aquitardos e aquicludos
Santa Maria - Membro Alemoa	Siltitos argilosos maciços, de cor vermelha, com níveis esbranquiçados de concreções calcárias. Sub-horizontais de ambiente continental	Aquiclado Impermeável
Santa Maria - Membro Passo das Tropas	Arenitos feldspáticos med. a grosseiros, por vezes conglomeráticos, com estratificação cruzada acanalada na base, seguido de siltitos arenosos roxo- avermelhados de ambiente fluvial. Além de arenitos finos e siltitos lamito, de cor rosa a lilás de ambiente fluviolacustre. Impressões de restos da flora dicroidium.	Aquífero

Fonte: Maciel Filho (1990)

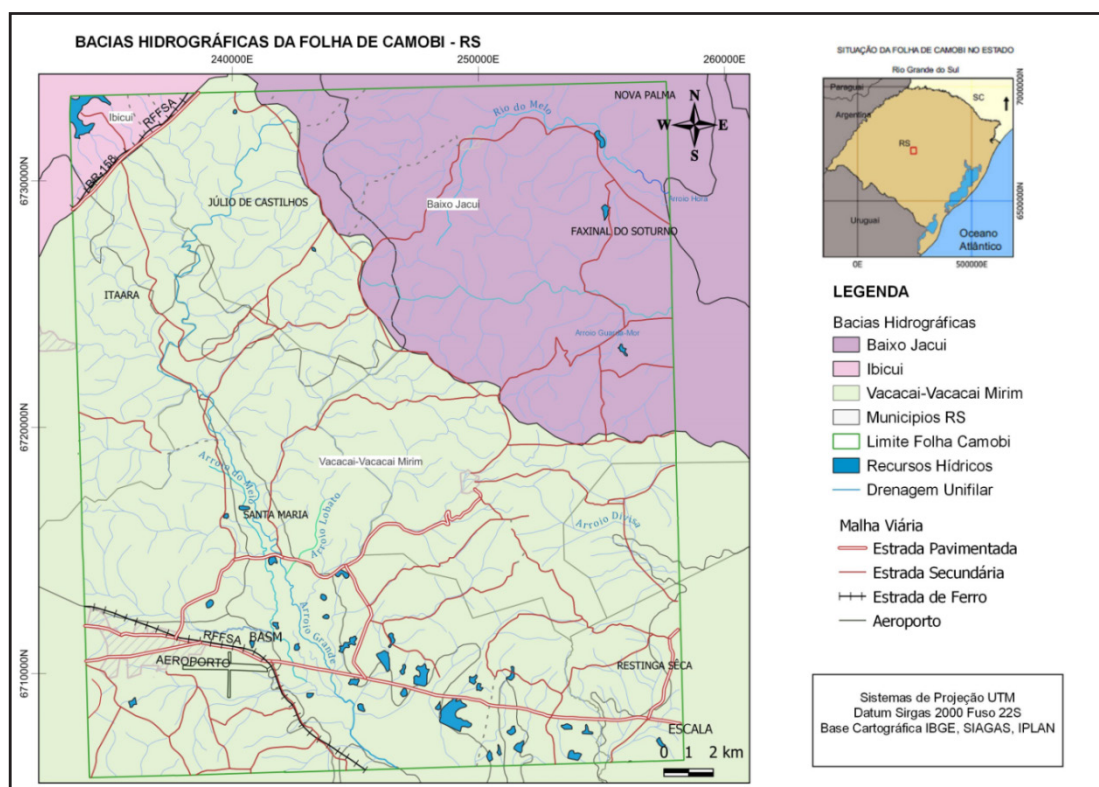
Na área de estudo predominam as Sub-bacias do rio Vacacaí-Mirim e do Baixo Jacuí, localizadas na sua porção nordeste, além de uma pequena porção que pertence à Sub-bacia do rio Ibicuí, a noroeste. A bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim abrange os municípios de Júlio de Castilhos, Itaara, Santa Maria, Silveira Martins, São João do Polêsine e Restinga Sêca (Maciel Filho *et al.*, 2013). Nessa área (Figura 3), estão presentes os cursos d'água Arroio Grande, Arroio do Meio e Arroio Lobato,

todos afluentes do Rio Vacacaí-Mirim. Além disso, próximo a Silveira Martins e São João do Polêsine, encontra-se o Arroio Divisa. Na porção nordeste da Folha de Camobi localiza-se a Bacia Hidrográfica do Baixo Jacuí, abrangendo parte dos municípios de Faxinal do Soturno, Nova Palma e porções de Júlio de Castilhos e Ivorá. Os principais corpos d'água nessa região são o Rio Melo, o Arroio Hora e o Arroio Guarda-Mor.

O município de Santa Maria está situado entre a Bacia Hidrográfica do Rio Guaíba, que drena para leste, e a Bacia do Rio Uruguai, que recebe contribuições dos rios que fluem para o oeste. Na região de Santa Maria, os principais cursos d'água pertencem às Sub-bacias do Arroio Cadena, Vacacaí-Mirim, Arroio Arenal, Arroio Sarandi e Arroio Ferreira (Robaina *et al.*, 2002).

Conforme Pinheiro *et al.* (2015) o abastecimento de água potável em Santa Maria, maior município da Folha de Camobi, provém do Rio Ibicuí-Mirim. Já as águas servidas, são direcionadas à bacia do Rio Jacuí sendo que somente uma parcela delas é devidamente tratada.

Figura 3 – Bacias Hidrográficas da Região Central do RS



Fonte: Autor

As captações de águas subterrâneas classificam-se conforme a carga hidráulica

do aquífero acessado. O poço freático (livre) explora aquíferos livres, onde o nível da água permanece em equilíbrio com a pressão atmosférica, sem ascensão natural. Em contraste, o poço artesiano (confinado) capta água de aquíferos confinados sob pressão, forçando a elevação do nível da água dentro da estrutura tubular. Esses poços subdividem-se em não jorrante, quando o nível estático situa-se abaixo da superfície do solo, e jorrante quando o fluxo emerge naturalmente para fora do poço tubular, sem a necessidade de bombeamento (Vasconcelos, 2017).

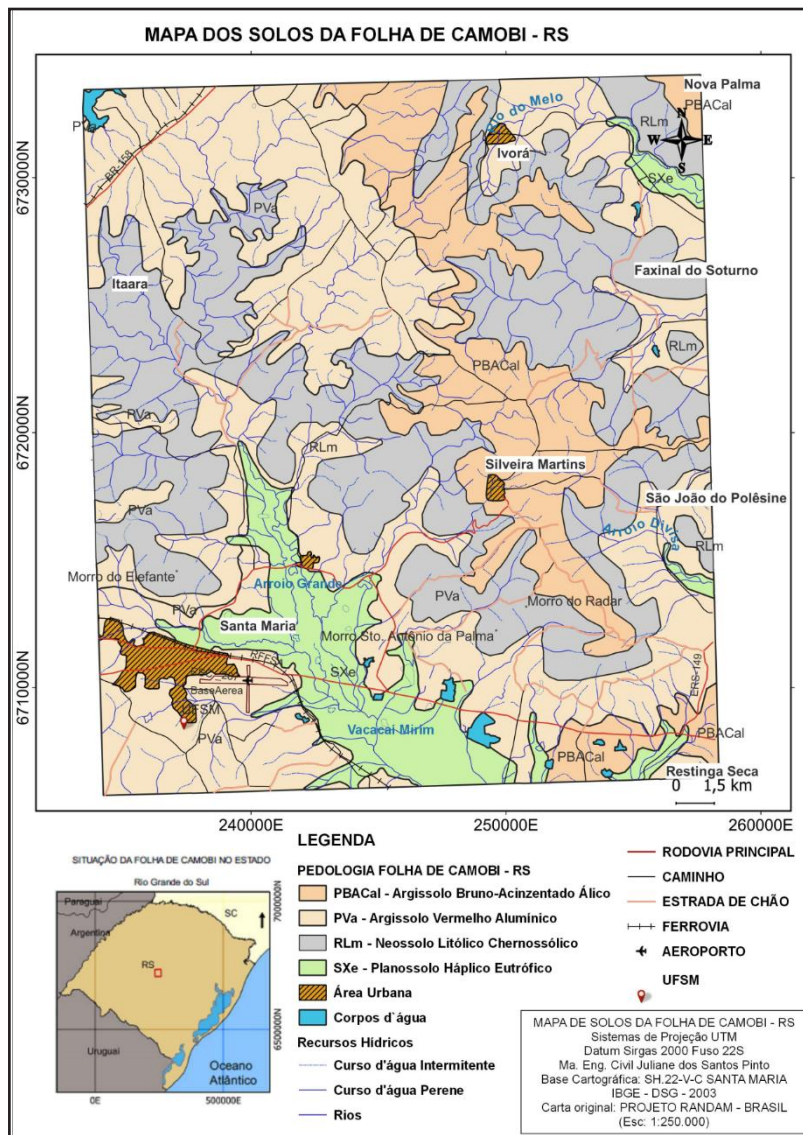
2.2 Solos

No rebordo do Planalto, encontram-se os Neossolos (Litólicos e Regolíticos) nas áreas de relevo ondulado e escarpado. No topo dos morros, onde as áreas são planas, ocorrem associações de Neossolos Litólicos Neossolos Regolíticos, Cambissolos, e Argissolos Vermelhos. Ainda no rebordo, em seu terço inferior, com relevo ondulado a suave ondulado, predominam os Argissolos (Dalmolin e Pedron, 2009). Na Figura 4 podem ser observadas as distribuições e predominância dos tipos de solos na área da Folha de Camobi.

Na área da Depressão Central, ocorrem os Argissolos Vermelhos e Argissolos Vermelho-Amarelos no terço superior, bem drenados. Já no terço inferior das coxilhas aparecem os Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Argilo Bruno-Acinzentados. Nas áreas de várzeas, surgem os Planossolos, muitas vezes associados aos Gleissolos e Neossolos Flúvicos (Dalmolin e Pedron, 2009).

A topografia e a litologia da região exercem influência na espessura do solo, resultando em solos mais espessos em áreas de cotas mais baixas, especialmente onde o nível freático está próximo à superfície. Além disso, a presença de materiais arenosos contribui para a ocorrência de solos mais profundos, enquanto os solos rasos são encontrados em perfis mais argilosos (Damo, 2016).

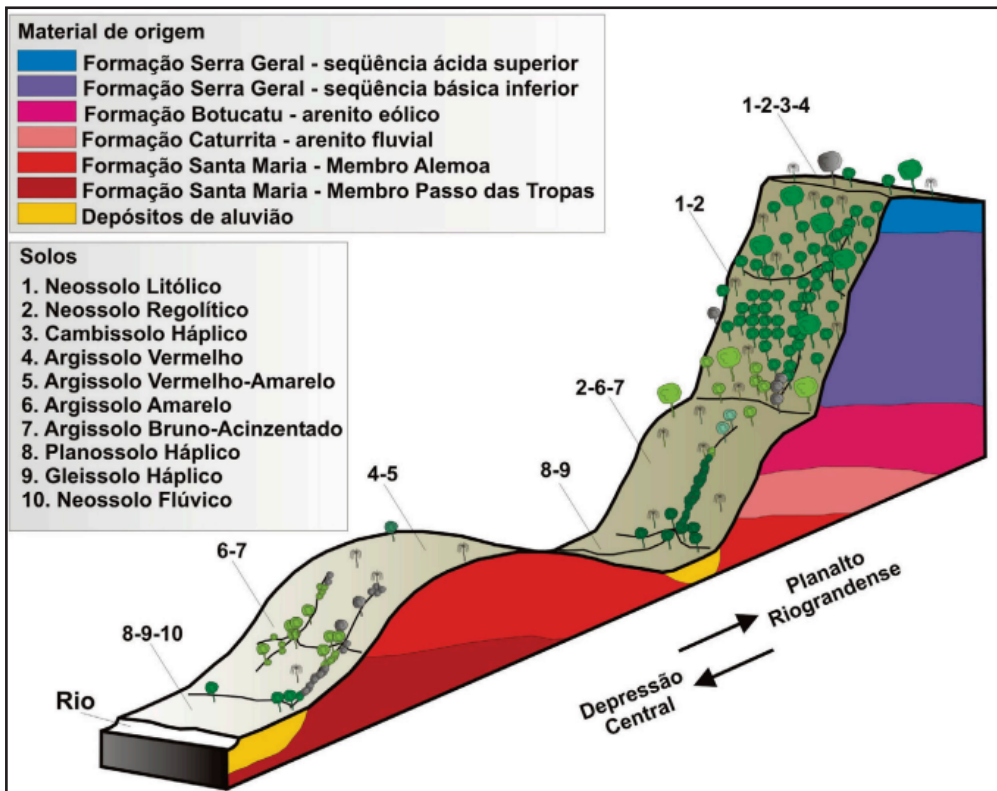
Figura 4 – Mapa de solos da Folha de Camobi – RS



Fonte: IBGE (2003)

A relação solo-paisagem das áreas de transição entre a Depressão Central e o Planalto tem sido apresentada por Klamt *et al.* (1997), Dalmolin e Pedron (2004) e Streck *et al.* (2018). Pedron *et al.* (2009) apresentam a relação solo-paisagem no município de Santa Maria de forma esquemática (Figura 5), correlacionando o material de origem e os solos presentes na região.

Figura 5 – Relação solo-paisagem no município de Santa Maria



Fonte: Pedron *et al.* (2008)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinar o índice de Vulnerabilidade da Folha de Camobi, aplicou-se o método GOD (Foster *et al.* 2002; 2006) integrado a um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). A análise do cenário regional fundamentou-se no cruzamento de dados geoespaciais no software QGIS (versão 3.40) provenientes dos mapas geológico e pedológico da Folha Camobi, além do mapeamento das bacias hidrográficas da região central do Rio Grande do Sul. A distribuição espacial de poços tubulares e a modelagem dos vetores de fluxo superficial foram processadas no software Surfer® (versão 13.6), permitindo a interpretação da hidrodinâmica local.

Os dados dos poços, categorizados conforme o regime de confinamento (livre, confinado, semiconfinado), foram submetidos a análises de estatística descritiva.

Adicionalmente, foram elaboradas representações gráficas para as variáveis: Nível Estático (NE), Nível Dinâmico (ND), profundidade total e Rebaixamento (ND – NE).

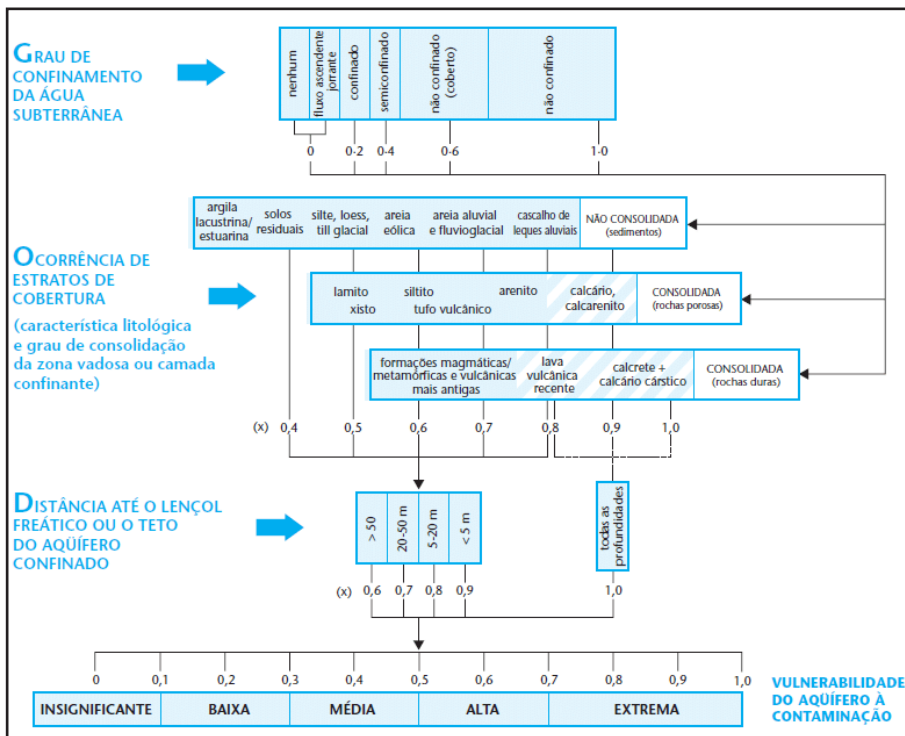
3.1 Metodologia GOD para determinação da vulnerabilidade do aquífero

A seleção dos poços utilizados para compor a avaliação da vulnerabilidade foi realizada por meio de um polígono abrangendo uma área maior que o limite da Folha de Camobi. Os 201 poços tubulares foram georreferenciados e os dados referentes a cada um deles foram obtidos do sistema SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), disponível em https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/visualizar_mapa.php. Dos 201 poços cadastrados para a área de estudo, foram utilizados os dados de 61 poços, os quais foram validados pela GWDBRAZIL (2025), que avalia a qualidade e padroniza as informações do Banco de dados de Poços de Água Subterrânea do Brasil (<https://zenodo.org/records/16755455>).

Para este trabalho, foram utilizados os seguintes atributos de informações dos poços: i) número do poço; ii) cidade, iii) coordenadas UTM; iv) profundidade do terreno; v) litologia; vi) tipo de poço/aquífero; vii) nível dinâmico e estático. Os dados dos 61 poços tubulares foram organizados em três tipos: confinado, semiconfinado e livre.

No método GOD, as letras que compõem a metodologia representam: G (ocorrência de água subterrânea), O (litologia geral da zona não saturada) e D (profundidade do lençol freático). A Figura 6 ilustra o método GOD onde a vulnerabilidade à contaminação (I) é o resultado da multiplicação dos fatores G, O e D mencionados anteriormente.

Figura 6 – Sistema GOD de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação



Fonte: Foster et al. (2006)

3.2 Parâmetros do método GOD

Os dados de cada poço foram convertidos em uma tabela no software QGIS. O geoprocessamento foi realizado utilizando a calculadora de campo da tabela de atributos para criar cinco novas colunas: G, O, D, I e Classes GOD. Na coluna “G”, os dados dos poços foram relacionados com o grau de confinamento do poço sendo que as classificações ocorreram nas seguintes categorias: nenhum (G=0), confinado (G=0,2), semiconfinado (G=0,4), não confinado coberto (G entre 0,6 e 1,0) e não confinado (G=1,0).

Para a coluna “O” (ocorrência litológica), os dados litológicos dos poços foram correlacionados em classes, com base no mapa geológico da Folha de Camobi, resultando em valores que variaram de 0,4 a 1,0. O mapa da variação do índice “O”, conforme o método GOD, foi construído a partir dessa tabela de atributos, integrando a localização de cada poço com sua respectiva ocorrência litológica.

No mapa, os parâmetros de litologia foram estabelecidos por meio de uma análise litológica dos perfis dos poços tubulares, onde cada poço recebeu uma numeração de acordo com a litologia correspondente a Formação geológica e local na área da folha de Camobi. A informação da litologia foi confirmada ao observar a posição do poço no mapa geológico, com algumas correções na tabela de atributos e o restante da classificação realizada com auxílio do software de geoprocessamento QGIS. Esses valores correspondem às seguintes formações: Formação Serra Geral Superior e Inferior (O = 0,8), Formação Caturrita (O = 0,7), Formação Botucatu (O = 0,9), Formação Santa Maria – Membro Alemoa (O = 0,5), Formação Santa Maria – Membro Passo das Tropas (O = 0,8), e Terraços Fluviais e Sedimentos Atuais/ Aluviões (O = 0,9).

As propriedades do mapa foram configuradas utilizando uma banda simples em falsa cor, com inversão da escala e variação interna entre 0,4 e 1,0. Para a classificação, aplicou-se o método discreto, organizado em sete classes de intervalos iguais, representadas por um gradiente de azul a verde e precisão de uma casa decimal.

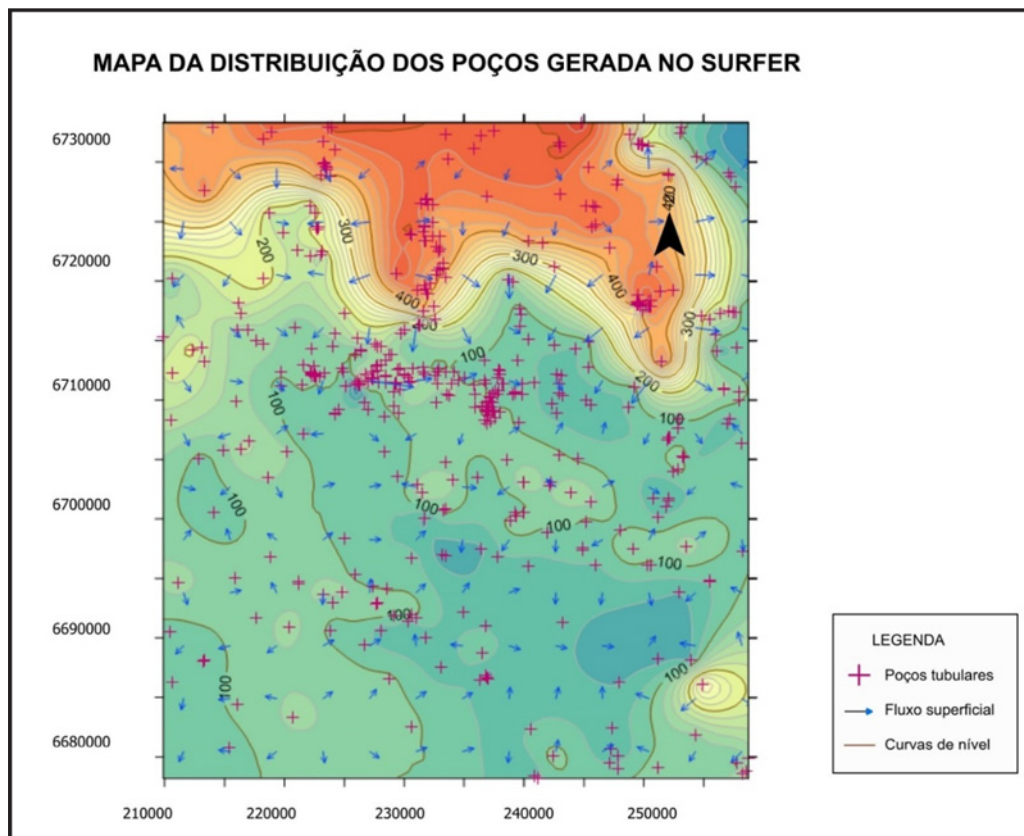
Na coluna “D” os dados correspondem à distância entre o nível estático e o freático de cada poço. A coluna “I” resultou da multiplicação entre os valores das colunas “G”, “O” e “D”, representando o parâmetro de vulnerabilidade do aquífero à contaminação. Por fim, na coluna de Classes GOD, os valores de “I” foram relacionados com faixas que representam as classes de vulnerabilidade da seguinte forma: Vulnerabilidade insignificante (0 a 0,1), vulnerabilidade baixa (0,1 a 0,3), vulnerabilidade média (0,3 a 0,5), vulnerabilidade alta (0,5 a 0,7) e vulnerabilidade extrema (0,7 a 1,0).

O software Surfer® permitiu a elaboração de mapas que representam a distribuição espacial dos dados em 2D, além de indicar o fluxo das águas superficiais por meio de setas. Também foram geradas curvas de nível e cotas que auxiliam na compreensão da topografia local.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 7, apresenta a distribuição espacial de poços tubulares e vetores de fluxo superficial para a região de estudo, destacando uma maior concentração nas zonas urbanizadas do município de Santa Maria.

Figura 7 – Mapa de distribuição espacial de poços tubulares e vetores de fluxo superficial na região de estudo



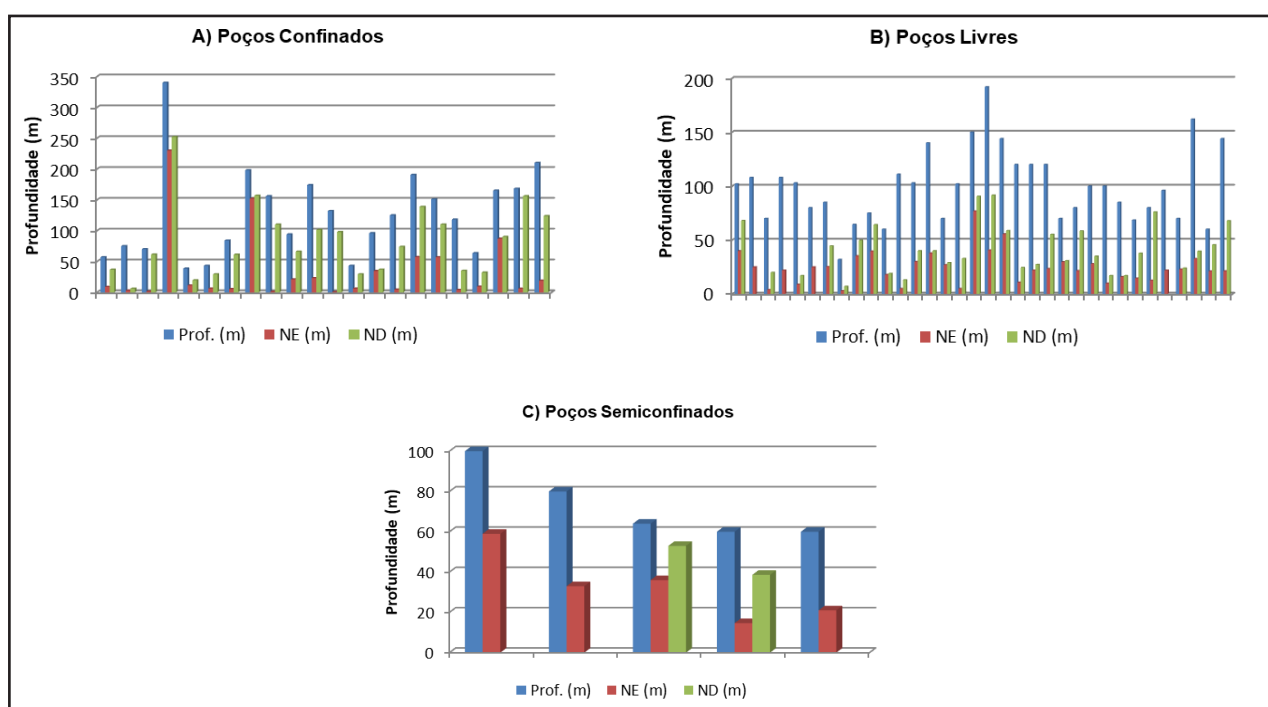
Fonte: Autor

A análise espacial realizada no software Surfer® revelou uma correlação direta entre a mancha urbana e a concentração de poços tubulares na zona central da área de estudo. O adensamento urbano sobre os recursos hídricos subterrâneos ocorre predominantemente em cotas potenciométricas intermediárias (entre 100 e 200 m), evidenciando a dependência de captações individuais em complemento às redes públicas de abastecimento. O comportamento dos vetores de fluxo, que convergem das zonas de recarga mais elevadas (Norte) para o centro do mapa, indica um cenário de vulnerabilidade: eventuais focos de contaminação a montante podem comprometer a

qualidade da água na região a jusante, ressaltando a fragilidade ambiental do aquífero diante do crescimento urbano desordenado.

Foram elaborados três gráficos (Figura 8) com os dados dos 61 poços, separados por tipo (confinado, livre e semiconfinado), representando o processo de bombeamento de água subterrânea e uma estatística descritiva (Figura 9).

Figura 8 – Variação do rebaixamento do nível freático de poços em uso e repouso. A ordenada do gráfico representa a profundidade dos poços (m) e a cada um dos poços avaliados. A) Poços Confinados, B) Poços Livres e C) Poços Semiconfinados



Fonte: Autor

A Figura 8 apresenta a amplitude do rebaixamento do nível freático de dos diferentes poços em uso e em repouso, bem como a capacidade de produção e de recuperação após a retirada de água para consumo.

O nível estático (NE) é representado pelas colunas de cor vermelho, o nível dinâmico (ND) pelas colunas de cor verde e a profundidade de cada poço pelas colunas de cor azul.

Figura 9 – Estatística básica descritiva dos poços confinados, livres e semiconfinados

	Confinado			Livres			Semiconfinados		
	Prof. (m)	NE (m)	ND (m)	Prof. (m)	NE (m)	ND (m)	Prof. (m)	NE (m)	ND (m)
Média	130,21	35,23	85,09	99,26	24,53	41,37	72,80	32,73	45,80
Mínimo	38,60	0,65	6,00	32,00	3,00	7,00	60,00	14,65	38,61
Máximo	340,00	230,00	252,00	192,00	76,85	91,56	100,00	59,00	52,99
Desvio Padrão	72,04	57,89	59,22	33,80	15,15	22,63	17,30	17,07	10,17

Fonte: Autor

A análise litoestratigráfica e hidrodinâmica dos 61 poços mostrou que os aquíferos livres, semiconfinados e confinados apresentam comportamento bem distintos. Os aquíferos confinados se destacam pela maior profundidade média (130,21 m) e pela resposta mais acentuada ao bombeamento, com um rebaixamento médio aproximado de 49,86 m. Esse comportamento é evidenciado pela diferença entre o Nível Estático (NE) médio de 35,23 m e o Nível Dinâmico (ND) de 85,09 m. Esse rebaixamento mais acentuado é típico de sistemas confinados, onde a baixa compressibilidade da matriz e da água provoca quedas na pressão piezométrica durante retirada de água. Além disso, o elevado desvio padrão observado ND (59,22 m) indica uma acentuada heterogeneidade hidrogeológica, sugerindo que a recarga lateral varia de forma significativa dependendo da conectividade entre fraturas ou lentes sedimentares. Observa-se que as diferenças significativas no nível dinâmico ocorreram nos poços confinados localizados na área da Formação Serra Geral.

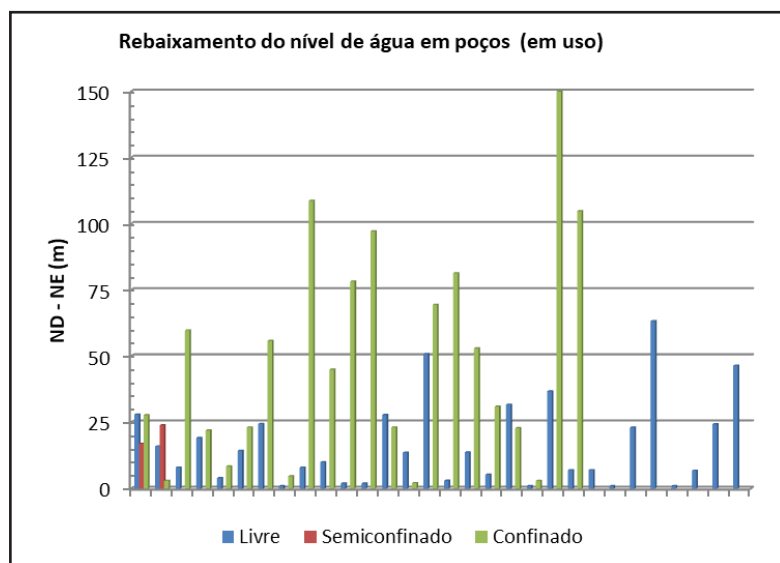
Em contraste, os poços instalados em aquíferos livres apresentaram maior estabilidade hidrodinâmica, localizados nos Depósitos Fluviais de Terraço e na Formação Santa Maria – Membro Passo das Tropas, com o menor rebaixamento médio entre os grupos (16,84 m). O NE médio de 24,53 m e o ND médio de 41,37 m indicam uma maior capacidade de armazenamento, já que a água é liberada pela drenagem gravitacional dos poros, ajudando na manutenção dos níveis superficiais mesmo durante o consumo. Já os aquíferos semiconfinados exibiram um comportamento intermediário, com profundidade média de 72,80 m e um ND médio de 45,80 m.

Localizado na Formação Santa Maria – Membro Alemoa. A menor variação entre os valores máximos e mínimos de ND nesse grupo sugere um regime de bombeamento mais controlado ou uma resposta aquífera mais homogênea em comparação aos sistemas confinados.

A análise conjunta dos gráficos de bombeamento e recarga confirma que a recuperação dos níveis estáticos ocorre de forma mais rápida nos poços em aquíferos livres, enquanto nos confinados, a recarga lateral depende fortemente do gradiente hidráulico regional, o que os torna mais vulneráveis a retiradas intensas de água, quando o tempo de repouso não é insuficiente para a recomposição das pressões.

A Figura 10 mostra a representação gráfica do processo de rebaixamento do nível de água subterrânea nos poços em uso.

Figura 10 – Variação do rebaixamento do nível de água em poços em uso. A ordenada do gráfico representa a profundidade dos poços (m) e a cada um dos poços avaliados



Fonte: Autor

O gráfico de rebaixamento (ND – NE) destaca diferenças marcantes na resposta hidrodinâmica entre os três tipos de poços avaliados. Os poços instalados em aquíferos confinados apresentaram os maiores rebaixamentos durante o bombeamento, com valores frequentemente superiores a 50 m e picos que alcançaram até 150 m. Esse comportamento está diretamente relacionado ao baixo coeficiente de armazenamento característico desses sistemas e a localização geológica na Formação

Serra Geral Superior, o que resulta em respostas mais sensíveis à retirada de água. Em contrapartida, os poços instalados em aquíferos livres exibiram maior estabilidade, com rebaixamentos predominantemente inferiores a 25 m, o que indica uma recarga lateral e vertical mais eficiente.

Os poços avaliados encontram-se predominantemente em duas Formações geológicas: Formação Santa Maria - Membro Passo das Tropas e Depósitos Fluviais de Terraço. A distribuição dos dados no gráfico reforça os resultados estatísticos, evidenciando que os aquíferos confinados apresentam maior heterogeneidade e são mais suscetíveis às variações no regime de bombeamento no campo de poços analisado.

4.1 Grau de confinamento da água subterrânea (G)

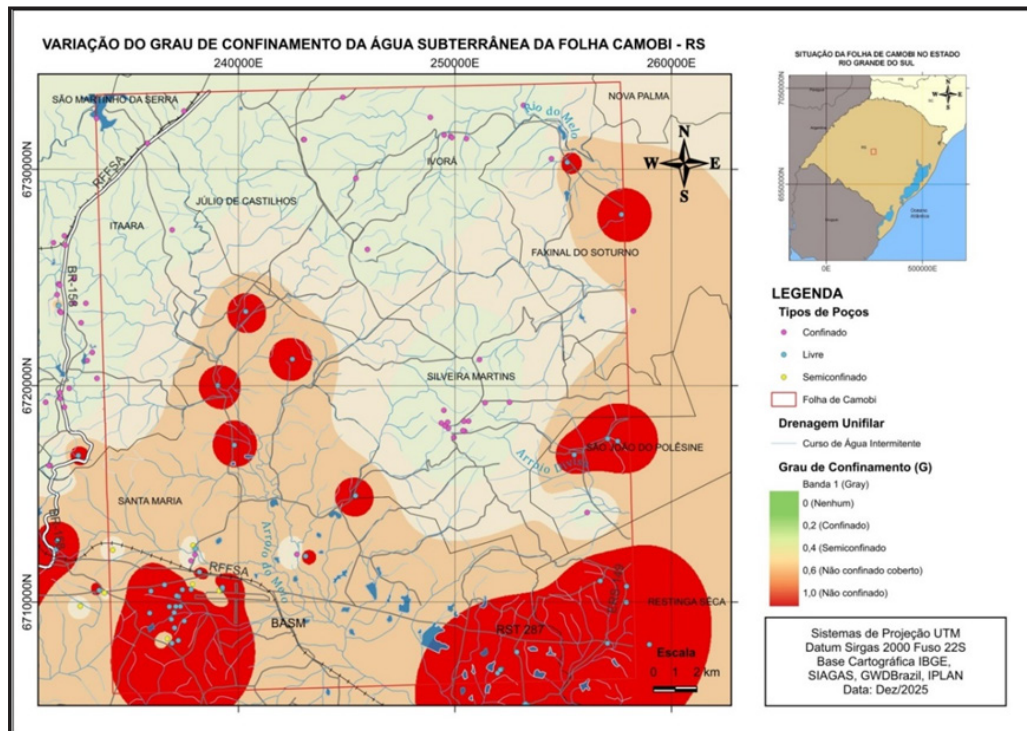
A distribuição espacial do grau de confinamento (G) reflete a transição geológica e geomorfológica da região central do Rio Grande do Sul, conforme indicado no mapa da Figura 11. Em Silveira Martins, Faxinal do Soturno e Ivorá, os baixos valores de "G" (0 a 0,2) coincidem com as cotas elevadas do rebordo do Planalto Meridional. Nesses locais, as rochas da Formação Serra Geral atuam como camada confinante para as unidades sedimentares subjacentes, indicando áreas onde o aquífero apresenta maior proteção natural e baixa vulnerabilidade intrínseca.

A porção central da Folha de Camobi apresenta valores intermediários do parâmetro "G" (0,4), que representaram a transição litoestratigráfica. Nessa área, o confinamento varia conforme o espessamento do solo e a presença de lentes argilosas, sugerindo condições de semiconfinamento e proteção moderada.

Por outro lado, o extremo leste (São João do Polêsine e Nova Palma) e o sul da área (Restinga Sêca e sudoeste de Santa Maria) apresentam índices elevados de "G" (1,0), os quais segundo o método GOD indicam aquíferos livres (não confinados). Essa configuração está relacionada a unidades sedimentares das Formações Santa Maria - Membro Alemoa e Caturrita, que afloram ou encontram-se sob depósitos aluvionares na Depressão Central. Nessas zonas de relevo suave, a ausência de

camadas impermeáveis subjacentes favorece infiltração direta, aumentando a vulnerabilidade intrínseca à contaminação.

Figura 11 – Mapa do grau de confinamento da água subterrânea (G)

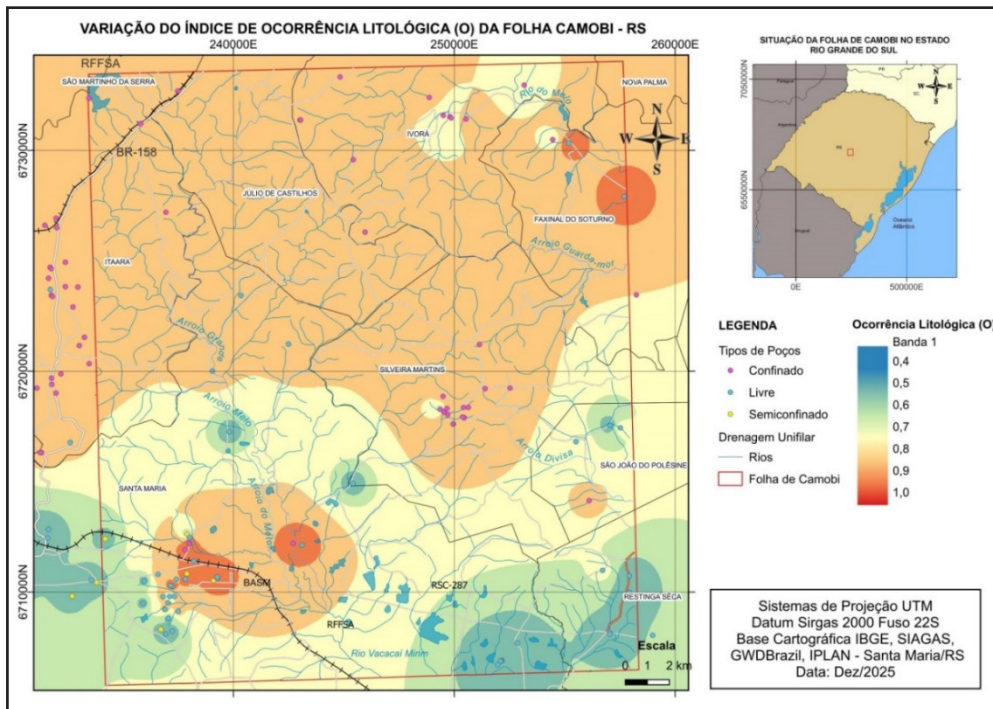


Fonte: Autor

4.2 Litologia da zona não saturada (O)

A distribuição dos valores do parâmetro “O” na Folha de Camobi, identificada na Figura 12, mostra que a maioria apresenta valores entre 0,7 a 0,9, refletindo a diversidade litoestratigráfica da região. Os maiores índices ($\geq 0,8$) concentram-se principalmente nas porções sul e sudeste da área, abrangendo setores do bairro Camobi (Santa Maria) e o município de Restinga Sêca. Esses valores estão associados às Formações Botucatu, Santa Maria – Membro Passo das Tropas e aos Depósitos Fluviais de Terraço, cujas litologias apresentam elevada porosidade primária ou secundária, sendo compatíveis com maiores infiltração e a circulação da água subterrânea.

Figura 12 – Mapa de variação do parâmetro “O”



Fonte: Autor

Na porção central e norte da área de estudo, valores entre 0,6 e 0,7 estão relacionados às Formações Serra Geral e Caturrita, onde o potencial aquífero está condicionado principalmente ao grau de fraturamento das rochas, uma vez que a matriz rochosa apresenta baixa porosidade. De modo geral, a distribuição do parâmetro “O” evidencia a influência direta da litologia na ocorrência da água subterrânea.

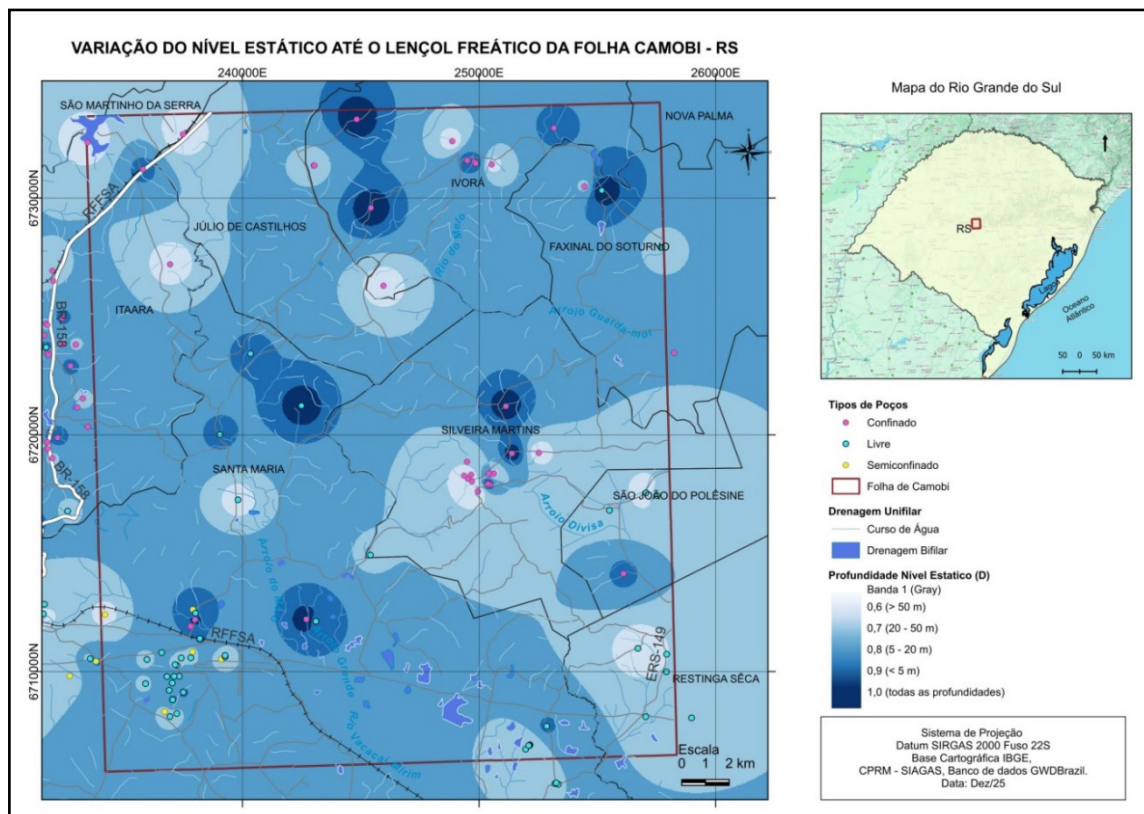
Na porção superior do mapa os valores elevados de “O” (0,7 a 0,9) são compatíveis com as Formações Serra Geral, Formação Caturrita e Botucatu, que possuem características geológicas que favorecem a circulação da água subterrânea. Já a porção inferior, os maiores valores do parâmetro “O” ($\geq 0,8$) estão associados aos Depósitos Fluviais de Terraço e à Formação Santa Maria – Membro Passo das Tropas, constituídos por materiais mais permeáveis.

Os valores intermediários, entre 0,5 e 0,7 são observados predominantemente no terço inferior do mapa, relacionados à Formação Santa Maria – Membro Alemoa e a Formação Caturrita, nos quais as litologias menos permeáveis devido à presença de solos mais argilosos e refletindo condições menos favoráveis à circulação da água subterrânea.

4.3 Distância até o lençol freático (D)

Os resultados do parâmetro “D” dos poços tubulares (confinado, livre e semiconfinado), em relação à superfície do terreno foram separados em três faixas: i) $D > 0,9$; ii) $D: 0,7$ a $0,8$ e iii) $D: 0,6$ a $0,7$. O valor médio para os poços avaliados ficou em $D=0,72$, conforme os resultados apresentados na Figura 13.

Figura 13 – Mapa da distância até o lençol freático (D)



Fonte: Autor

Os valores do parâmetro “D” $> 0,9$ (tons azul-escuro no mapa) representam poços com nível estático menor que 5 metros de profundidade o que, devido à proximidade com a superfície, aumenta os riscos de contaminação nas regiões que possuem estruturas geológicas de maior condutividade hidráulica. Nesta área, encontram-se poços confinados em Formações geológicas como Serra Geral, Caturrita e Depósitos Fluviais de Terraço que apresentam comportamento hidrogeológico de aquíferos. Nas porções com tons intermediárias de azul encontram-se os poços confinados com valores “D” (0,8), cobrindo boa parte da área

e representando regiões de menor risco de contaminação devido à profundidade do nível estático ser entre 5 e 20 m.

Nas regiões com tons de azul-claro no mapa os valores de "D" são de 0,6 para as zonas com profundidades do nível estático maiores que 50 m e a presença de poços livres (azul-ciano no mapa) que coincidem com áreas urbanizadas. Já os valores "D" (0,7) para profundidade entre 20 e 50 m, encontra-se em regiões com menor risco à contaminação devido à profundidade do nível estático ser maior. Observa-se um maior número de poços confinados na região central e norte do mapa e de poços livres na parte inferior da área, em solos impermeáveis, como os da Formação Santa Maria - Membro Alemoa.

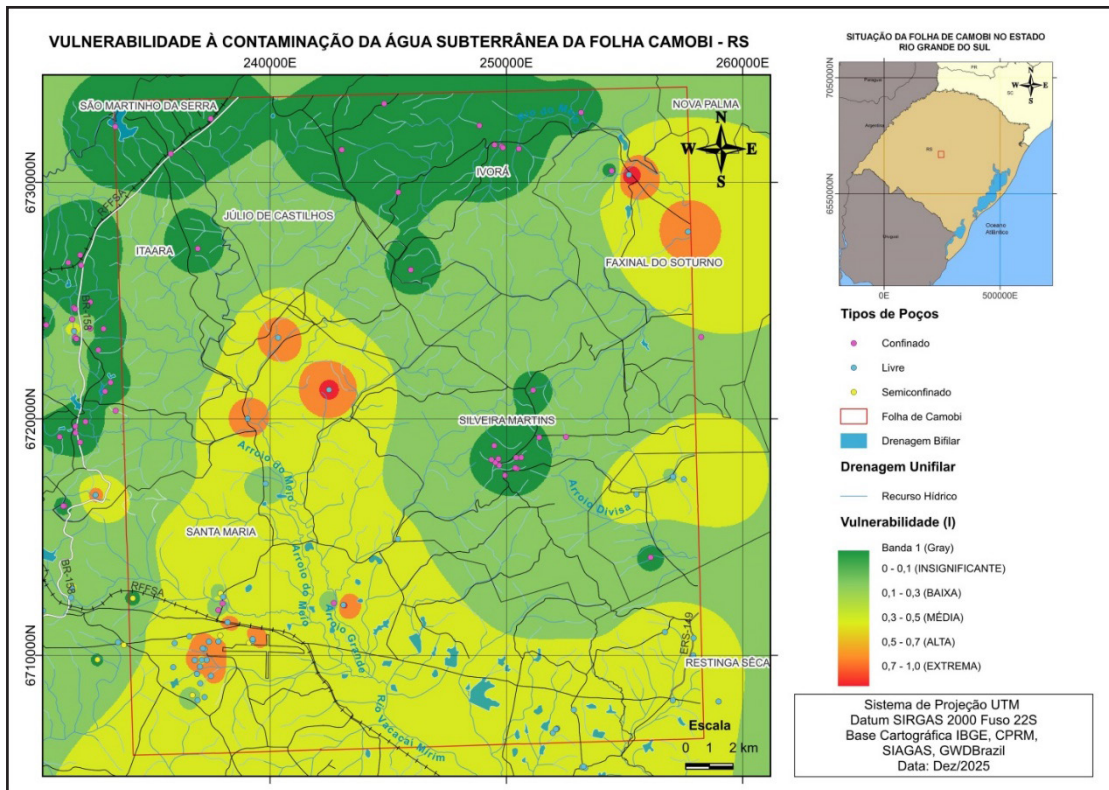
As análises espaciais do parâmetro "D" podem servir como diretrizes para o Plano Diretor municipal, orientando o zoneamento de áreas onde o saneamento básico deve ser priorizado, e a instalação de postos de combustíveis e outras atividades de risco devem ser evitada ou rigorosamente monitoradas para garantir a segurança hídrica das gerações futuras.

4.4 Vulnerabilidade do aquífero à contaminação (I)

O mapa do índice de vulnerabilidade do aquífero à contaminação da água subterrânea pode ser observado na Figura 14. Foram identificadas 7 classes de vulnerabilidade: Insignificante (0,0 a 0,1); Baixa (0,1 a 0,3); Média (0,3 a 0,5); Alta (0,5 a 0,7); Extrema (0,7 a 1,0), seguindo a recomendação do índice GOD.

O índice de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos subterrâneos da folha de Camobi variou de 0,10 a 0,81. Nessa área, predomina valores de vulnerabilidade baixa (0,12 a 0,25) a média ($0,3 \leq I \leq 0,49$), com maior ocorrência de poços confinados e semiconfinados. Além disso, a ocorrência de núcleos pontuais com índice de vulnerabilidade alta (0,56 a 0,64) e extrema (0,72 a 0,81), coincidem com zonas de maior densidade de drenagem e presença de poços livres, indicando maior conectividade entre a superfície (possíveis contaminantes) e o aquífero. A heterogeneidade espacial observada confirma a influência conjunta de fatores hidrogeológicos e antrópicos da região.

Figura 14 – Mapa do índice de vulnerabilidade do aquífero à contaminação (I)



Fonte: Autor

O Índice de Vulnerabilidade dos Aquíferos à Contaminação (I) indicou que 25% dos poços apresentam vulnerabilidade muito baixa, localizados em áreas onde o aquífero é confinado e possui maior profundidade do lençol freático, regiões naturalmente protegidas. Essas zonas estão localizadas na metade superior da Carta de Camobi, em parte dos municípios de Santa Maria, São Martinho da Serra, Júlio de Castilhos, Itaara e Silveira Martins, onde os poços encontram-se nas Formações geológicas Serra Geral Superior (em maior predominância), Serra Geral Inferior e Caturrita.

Já as classes de vulnerabilidade moderada a alta abrangem 25% dos poços, no entanto os pontos de extrema vulnerabilidade são pontuais em Santa Maria (UFSM e Arroio Grande), e próximos à Nova Palma e Faxinal do Soturno (RSC-348), em regiões urbanizadas ou em propriedades rurais, concentrando-se em regiões com poços majoritariamente livres (não confinados), com nível estático mais raso e permeabilidade elevada.

De forma geral, as áreas com maior vulnerabilidade à contaminação concentram-se próximas às redes de drenagens e apresentam menor espessura da

zona não saturada, o que favorece maior conectividade entre a superfície e o aquífero e, conseqüentemente, maior risco de transporte de contaminantes. Nessas áreas, predominam poços que captam aquíferos livres, associados a menor proteção natural. Em contraste, os poços confinados e semiconfinados ocorrem majoritariamente nas áreas classificadas com vulnerabilidade insignificante a baixa, onde a maior proteção natural do aquífero reduz a suscetibilidade à contaminação.

5 CONCLUSÃO

A aplicação do método GOD permitiu avaliar de forma integrada a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação na área da Folha de Camobi, evidenciando heterogeneidade espacial do índice de vulnerabilidade. Os resultados indicam a predominância de classes de vulnerabilidade insignificante a média, associadas principalmente a aquíferos confinados e semiconfinados, que apresentam maior profundidade do nível freático e maior proteção natural conferida pela cobertura geológica. Em contraste, as áreas com vulnerabilidade alta a extrema, embora pontuais, concentram-se em regiões próximas às redes de drenagens, em zonas urbanizadas e áreas rurais, onde predominam aquíferos livres, com níveis estáticos mais rasos e maior conectividade entre a superfície e o aquífero.

A distribuição espacial das classes de vulnerabilidade reflete a influência conjunta dos condicionantes hidrogeológicos, especialmente a profundidade do nível freático, a permeabilidade das rochas e o seu grau de confinamento em como do uso e ocupação do solo. As classes mais críticas estão associadas à litologias mais permeáveis ou fraturadas, como os arenitos das Formações Botucatu e Caturrita, depósitos aluvionares e zonas fraturadas da Formação Serra Geral, nas quais a reduzida profundidade do nível estático intensifica a vulnerabilidade à contaminação.

Nesse contexto, áreas do município de Santa Maria destacam-se como o mais vulnerável à contaminação, em função da maior densidade de poços livres, intensa urbanização e presença predominante de unidades litológicas mais permeáveis. O

mapa de vulnerabilidade elaborado constitui, assim, uma ferramenta relevante para o planejamento territorial e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, subsidiando a definição de áreas prioritárias para monitoramento, controle do uso do solo e proteção dos aquíferos, especialmente quando analisado em escala municipal.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE FILHO, J. L. **Oscilações Induzidas no Freático e as Repercussões ao uso do solo.** In: Curso de Geologia Aplicada do Meio Ambiente. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. ABGE, p. 135-149, 1995.

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETRY, R.J.; HACKET, G. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater using hydrological settings.** US EP, Report 600/2-85/018, USA, 1987. Disponível em: <<http://info.ngwa.org/gwol/pdf/860138698.PDF>>. Acesso 04 maio 2023.

BRASIL. SERVIÇO DE INFORMAÇÕES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA – **SIAGAS. 2021.** Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>> Acesso em: 05 Maio 2021.

BORTOLUZZI, C. A. **Contribuição à geologia da região de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.** Pesquisas, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 7-86, 1974.

BORGES, V. M.; ATHAYDE, G. B.; REGINATO, P. A. R. **Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná - Brasil.** Revista Águas Subterrâneas, v. 31, n. 4, p. 385-397, 2017.

BOUMAIZA, L.; WALTER, J.; CHESNAUX, BRINDHA, R. K.; ELANGO, ROULEAU, L. A.; WACHNIEW, P.; STUMPP, C. **An operational methodology for determining relevant DRASTIC factors and their relative weights in the assessment of aquifer vulnerability to contamination** Springer Science+ Business Media; v. 80; 2021.

COLINS, J.; SASHIKKUMAR, M. C.; ANAS, P.A.; KURUBAKARAN, M. **GIS-based assessment of Aquifer vulnerability using DRASTIC model: A case study on Kodaganar basin.** National University of Colombia, Earth Sciences Research Journal. n.1, v. 20, 2016.

DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A. Solos do município de Santa Maria. p. 59-77, 2009. In: **História Natural de Santa Maria.** Revista Ciência&Ambiente (UFSM), Santa Maria, n.38 (jan./jun.), 2009.

DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A. **Distribuição dos solos no ambiente.** Solos&Ambiente – I Fórum. Santa Maria: Palotti, p. 23-39, 2004.

DAMO, T. P. **Classificação dos Solos e Rochas Sedimentares da Região de Santa Maria/RS Segundo a Metodologia MCT.** 2016. 121 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO (DSG). Ministério do Exército. Brasil. **CAMOBÍ**. FOLHA SH.22-V-C-IV-2. MI-2965/2. Escala 1:50.000. 1975.

DUCCI, D.; SELLERINO, M. **A Modified AVI Model for Groundwater Vulnerability Mapping: Case Studies in Southern Italy**. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. v. 14, 2022.

EYANKWARE, M. O.; AKAKURU, O. C.; EYANKWARE, O. E. **Hydrogeophysical delineation of aquifer vulnerability in parts of Nkalagu area of Abakaliki, se. Nigeria**. Springer Science+Business Media. n. 39, v. 8, p. 1-19, 2022.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data**. Lima: CEPIS-PAHO/WHO, 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Determinação de Riscos de Contaminação das Águas Subterrâneas: um método baseado em dados existentes**. Boletim nº 10. São Paulo: Instituto Geológico, 87 p. 1993.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da Qualidade da água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. São Paulo: SEVMAR, 114 p. 2006.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection**. A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. GWMate, World Bank, Washington, 103 p. 2002.

GEORG, G. K. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC and AVI methods: a case study from the Pothwar Plateau, Pakistan. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 13, n. 4, p. 331-345, 2021.

GEORGE, N. J. **Integrating hydrogeological and second-order geo-electric indices in groundwater vulnerability mapping: A case study of alluvial environments**. Springer Nature. v. 11, 2021.

GUINGUER, N.; KOHNKE, M. W. **Método para determinação da vulnerabilidade de aquíferos**. Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22314>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo 2022**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/>> Acesso em: 21 Dez. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Diretoria de Geociências (DSG). **Pedologia do Rio Grande do Sul**. 2002. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/unidades_da_federacao/rs_pedologia.pdf> Acesso em: 05 out. 2023

JANG, W. S.; ENGEL, B. A.; HARBOR, J.; THELLER, L. **Aquifer Vulnerability Assessment for Sustainable Groundwater Management Using DRASTIC**. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. v. 9, 2017.

KHAN, A.; KHAN H. H.; UMAR, R.; KHAN, M. H. **An integrated approach for Aquifer vulnerability mapping usins GIS and rough sets: study from na aluvial Aquifer in north India.** Springer Science+Business Media, Hydrogeology Jornal. v. 22, 2014.

KLAMT, E.; DALMOLIN, R. S. D.; CABRAL, D. R. **Solos do Município de São João do Polêsine: classificação, distribuição geográfica e aptidão de uso.** Santa Maria: CCR, Departamento de Solos, 93 p. 1997.

MACIEL FILHO, C. L. **Carta geotécnica de Santa Maria.** Imprensa Universitária, FINEP/UFSM, Santa Maria, 21 p. 1990.

MACIEL FILHO, C. L.; SILVA, R. L. L.; HENTEGES, S. C. **Geologia e Geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim – RS.** Santa Maria, RS: Centro Universitário Franciscano, 28 p. 2013.

MARCHIORI, J. N.; NOAL Filho, V. A. **A Paisagem de Santa Maria na Perspectiva dos Antigos Viajantes.** Ciência & Natura – História Natural de Santa Maria, v. 38, p. 4-18. 2009.

MONDAL, N. C.; ADIKE, S. A.; SINGH, V.; AHMED, S.; JAYAKUMAN, K. **Determining shallow Aquifer vulnerability by the drastic model and hydrochemistry in granitic terrain, Southern India.** Springer Science+ Business Media; v. 126. 2017.

OLIVEIRA, E.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; CARDOSO, D. **Águas Subterrâneas Olhando para o Futuro. In:** A Geologia na construção e desenvolvimento sustentável do Brasil. São Paulo, SP. p.109-122. 2019.

PEDRON, F. de A.; DALMOLIN, R. S. D.; AZEVEDO, A. C. **Solos do Perímetro Urbano de Santa Maria: características, classificação e potencial de uso.** Santa Maria: Orium, v. 1, 143 p. 2008.

PINHEIRO, J. B.; RAUBER, A. C. C.; NUMMER, A. V.; SILVEIRO DA SILVA, J. L. **Aplicação dos Métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria-RS.** Revista REGA, Porto Alegre – v. 12, no. 2, p. 61-79, jul./dez. 2015.

REBOUÇAS, A. C. **Importância da água subterrânea.** In: Hid, no. rologia: Conceitos e aplicações. Rio de Janeiro. p. 13-29. 2008.

ROBAINA, L.E. S.; OLIVEIRA, E. L. A.; PIRES, C. A. F. **Estudo para instalação de aterro sanitário no município de Santa Maria – RS.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 10º CBGE, Ouro Preto, Minas Gerais, 13 p. 2002.

SARTORI, P. L.; MACIEL FILHO, C.; MENEGOTTO, E. **Contribuição para o estudo de rochas vulcânicas da Bacia do Paraná na região de Santa Maria, RS.** Revista Brasileira de Geociências, v. 5, p. 141-159. 1975.

SARTORI, P. L. P. **Geologia e Geomorfologia de Santa Maria.** Ciência & Ambiente/Universidade Federal de Santa Maria. UFSM – v. 1, no. 1 (jul.1990) – Santa Maria: Semestral n.38, jan./jun. 184 p. 2009.

STRECK, E. D.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Editora UFRGS. 254 p. 2018.

THOMAS, R.; DURAISAMY, V. **Delineamento hidrogeológico da vulnerabilidade das águas subterrâneas à Sêca em áreas semiáridas do distrito ocidental de Ahmednagar**. Revista Egípsia de Sensoriamento Remoto e Ciência Espacial. V. 21, Ed. 2. (set.2018). p. 121-137. 2018.

VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. **Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping**. Canadian Water Resources Journal, 18: p. 25-37. 1993.

VASCONCELOS, M. B. O que são poços? Um panorama das terminologias utilizadas para captações de águas subterrâneas. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 2, p. 44-57, 2017.

WITKOWSKI, A.J.; KOWALCZYK, A.; VRBA, J. **Groundwater Vulnerability Assessment and mapping**. CRC Press, 43 p. 2014.

Contribuições de autoria

1 – Juliane dos Santos Pintoves

Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria

<https://orcid.org/0000-0001-8061-4990> • julianepintopinto@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Metodologia, Validação, Tabelas, Gráficos e Mapas, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

2 – Andréa Valli Nummer

Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<https://orcid.org/0000-0001-9271-442X> • a.nummer@gmail.com

Contribuição: Supervisão, Escrita – revisão e edição

3 – Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<https://orcid.org/0000-0002-9789-3786> • rinaldo@ufsm.br

Contribuição: Supervisão e revisão

Como citar este artigo

Pinto, J. S., Nummer, A. V., & Pinheiro, R. J. B. Índice de vulnerabilidade dos aquíferos da Folha de Camobi. **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 30, e86197, 2026. Disponível em: 10.5902/2236499489167. Acesso em: dia mês abreviado. ano.