

## **GEOPROCESSAMENTO APLICADO A ESTIMATIVA DA SUSCEPTIBILIDADE À CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO SERRA GERAL: ESCALA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DA VÁRZEA**

*GEOPROCESSING APPLIED TO THE ESTIMATION OF SUSCEPTIBILITY TO  
CONTAMINATION OF THE SERRA GERAL AQUIFER: SCALE OF THE VÁRZEA RIVER BASIN*

**Willian Fernando de BORBA<sup>1</sup>, Cristiano Niederauer da ROSA<sup>2</sup>, Jean Ricardo  
FAVARETTO<sup>3</sup>, Kananda Cabral MENEGAZZO<sup>1</sup>, Gabriela Martins PIMENTEL<sup>1</sup>,  
Ericklis Edson Boito de SOUZA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria. Linha 7 de Setembro, s/n, BR 386, km 40, Frederico Westphalen - RS.

E-mails: borbawf@gmail.com; kanandacabralmenegazzo@gmail.com; gabriela96pimentel@gmail.com;

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Maria. Avenida Roraima, 1000, Camobi, Santa Maria - RS.

E-mails: cristianoonrd@gmail.com; ericklisboito@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI). Avenida Sete de Setembro, 1621 - Fátima, Erechim - RS.

E-mail: jeanfavaretto@gmail.com

Introdução

Metodologia

Caracterização geral da área de estudo

Caracterização geológica e hidrogeológica

Estimativa do índice de susceptibilidade do aquífero à contaminação

Resultados e discussão

Conclusão

Referências

**RESUMO** - A bacia hidrográfica do Rio da Várzea, representa uma importante unidade hidrológica do Estado do Rio Grande do Sul. Localizada no noroeste do Estado, na divisa com Santa Catarina, abrange 55 municípios gaúchos. Assim, esse estudo tem como objetivo estimar a susceptibilidade a contaminação do Aquífero Serra Geral na escala da Bacia. Para isso, foram levantadas informações das variáveis necessárias para aplicação do índice de susceptibilidade, que variam desde geologia, hidrogeologia, uso do solo e topografia. Os resultados indicaram que a susceptibilidade na área variou entre muito baixa a muito elevada, com predomínio da classe moderada a alta, em 59 % da bacia. A Bacia do Rio da Várzea, destaca-se como um polo criador de suínos, onde essa atividade apresenta um alto risco contaminante ao meio. Assim, conclui-se que a área apresenta uma susceptibilidade moderada a alta na sua maior porção territorial, sendo que as maiores concentrações de atividades suínícolas estão presentes próxima a calha do Rio Uruguai. Destaca-se a importância de estudos desse cunho temático, que serve como importante fonte de informação para a preservação ambiental da região. **Palavras-chave:** Água subterrânea. Contaminação. Plano de Bacia Hidrográfica. Suinocultura.

**ABSTRACT** - The Rio da Várzea watershed represents an important hydrological unit in the State of Rio Grande do Sul. Located in the northwest of the state, on the border with Santa Catarina, it covers 55 municipalities in the state. Thus, this study aims to estimate the susceptibility to contamination of the Serra Geral Aquifer on the river basin scale. For this, information was collected on the variables necessary to apply the susceptibility index, which vary from geology, hydrogeology, land use and topography. The results indicated that the susceptibility in the area varied from very low to very high, with a predominance of the moderate to high class, in 59% of the watershed. The Rio da Várzea watershed stands out as a pig breeding center, where this activity presents a high risk of contaminating the environment. Thus, it is concluded that the area has a moderate to high susceptibility in its largest territorial portion, with the highest concentrations of pig activities being present close to the Rio Uruguay channel. The importance of studies of this thematic nature is highlighted, which serves as an important source of information for the environmental preservation of the region.

**Keywords:** Groundwater. Contamination. Watershed Plan. Pig farming.

### **INTRODUÇÃO**

A água subterrânea é uma das principais formas de abastecimento dos municípios brasileiros. Esse fato se deve, dentre outras questões, a contaminação dos recursos hídricos superficiais, ou ainda, as dificuldades de acesso à rede pública de abastecimento, principalmente em regiões distantes aos centros urbanos. No cenário Nacional, 38,65 % dos municípios brasileiros são abastecidos exclusivamente de água subterrânea, o que representa cerca de 12,55 % da população (ANA, 2015).

Conforme Decreto Estadual nº 53.885, de 16 de janeiro de 2018 (Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2018) no RS tem-se 25 bacias hidrográficas, distribuídas em três regiões hidrográficas (Guaíba, Uruguai E litorânea). Na região noroeste do Estado, encontra-se a Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (U - 100), a qual compreende 46 municípios e uma população de 328.057 habitantes (SEMA, 2020; FEPAM, 2020a). Nessa área, o Sistema de Informações de

Águas Subterrâneas (SIAGAS), apresenta 1.024 poços de abastecimento cadastrados (SIAGAS, 2019). Com base nisso, destaca-se a importância dos aquíferos na disponibilização de água potável para a população dessa região.

Nessa bacia desenvolvem-se atividades econômicas voltadas principalmente para a agropecuária, com ênfase no cultivo de grãos (soja, milho, trigo), além da suinocultura (SEMA, 2020; FEPAM, 2020a). Assim, com base no alto potencial contaminante gerado na região, estudos que visam estimar a capacidade de suporte do meio subterrâneo a essas atividades desempenham um papel importante, sendo o Sistema de Informação Geográfica (SIG), uma ferramenta amplamente utilizada (Han et al., 2016; Jmal et al., 2017; Jarra et al., 2017; Ferchichi et al., 2018; Shahab et al., 2019; Ndoziya et al., 2019) para

esse fim.

Em conjunto com um SIG, os métodos de estimativa da vulnerabilidade e susceptibilidade estão sendo amplamente utilizados. Dentre esses, o Índice de Susceptibilidade (IS), descrito por Ribeiro (2005) é um deles. Ghouli et al. (2021) destacam que o IS é considerado um método específico, levando em consideração o impacto do uso do solo de fertilizantes químicos, atividades antrópicas e fontes de contaminação das águas subterrâneas.

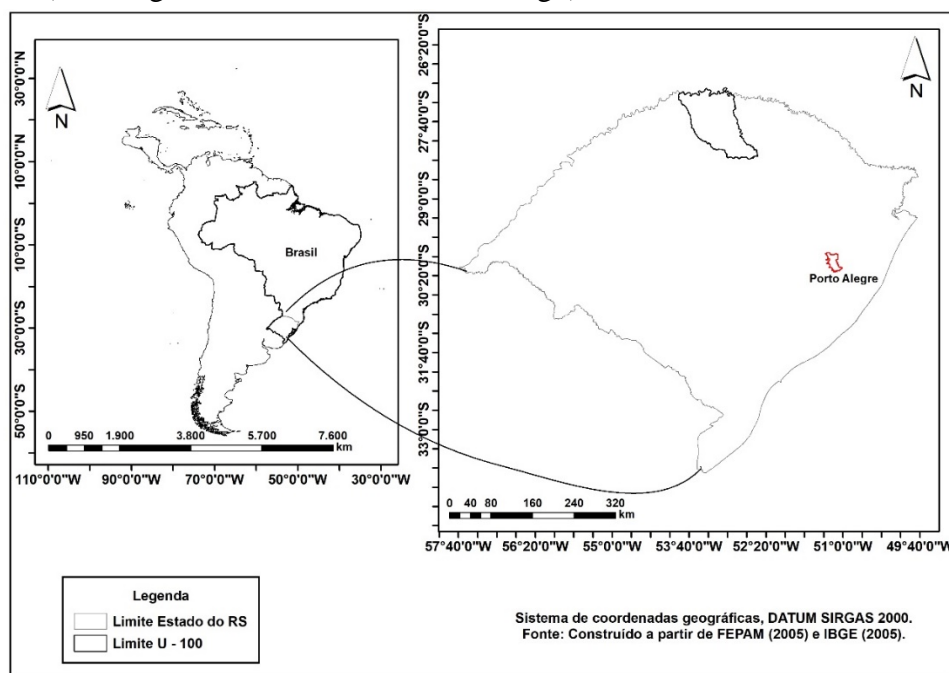
Devido a importância da manutenção da qualidade dos recursos hídricos e de sua ampla utilização como fonte de abastecimento por muitos municípios do Estado, esse estudo, visa a partir do uso de métodos de geoprocessamento, estimar a susceptibilidade à contaminação do aquífero na escala da Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea.

## METODOLOGIA

### Caracterização geral da região em estudo

A área de estudo (Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea - U 100) localiza-se no extremo norte do Estado do Rio Grande do Sul, na divisa com o Estado de Santa Catarina (SC), na região Hidrográfica do Uruguai (U), conforme figura 1. A área está inserida na província geomorfológica do Planalto Meridional (SEMA, 2020; FEPAM, 2020a), nas rochas vulcânicas do Planalto (FEPAM, 2014). O regime climático e hidro-

lógico da região é caracterizado pelo tipo Cfa (Subtropical úmido), conforme Moreno (1961), com índices pluviométricos médios anuais de 1.900 mm (Hausmann, 1995; Sotério et al., 2005). No que se refere a economia, o setor primário representa cerca de 53,00 % da economia regional (CODEMAU, 2010), com ênfase na agricultura, familiar e intensiva, principalmente cultivos de grãos (Soja, milho e trigo).



**Figura 1** - Localização da região em estudo (Fonte: Construído a partir de FEPAM, 2005, e IBGE, 2005).

Além das atividades agrícolas, a suinocultura desempenha um importante papel na economia, principalmente nos Municípios como Pinheirinho

do Vale, Palmitinho, Frederico Westphalen e Tenente Portela, os quais individualmente possuem mais de 100 unidades de criação de suínos (FEPAM,

2020b). No que se refere aos usos dos recursos hídricos, a bacia possui uma área de drenagem de 9.324 km<sup>2</sup>, sendo os principais afluentes os Rios da Várzea e Guarita, nos quais os principais usos da água são o aproveitamento hidrelétrico, a irrigação, a dessedentação animal e o abastecimento humano (SEMA, 2020; FEPAM, 2020a).

### Caracterização geológica e hidrogeológica

Segundo informações do Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul (CPRM, 2006), a área objeto desse estudo está inserida nos derrames basálticos da Formação Geológica Serra Geral (FSG), Fácies Parapanema (K1<sub>β</sub>\_pr), Fácies Chapecó (K1<sub>α</sub>\_ch) e Formação Tupanciretã (ENtp), os quais são distribuídos na área de estudo do seguinte modo (Figura 2):

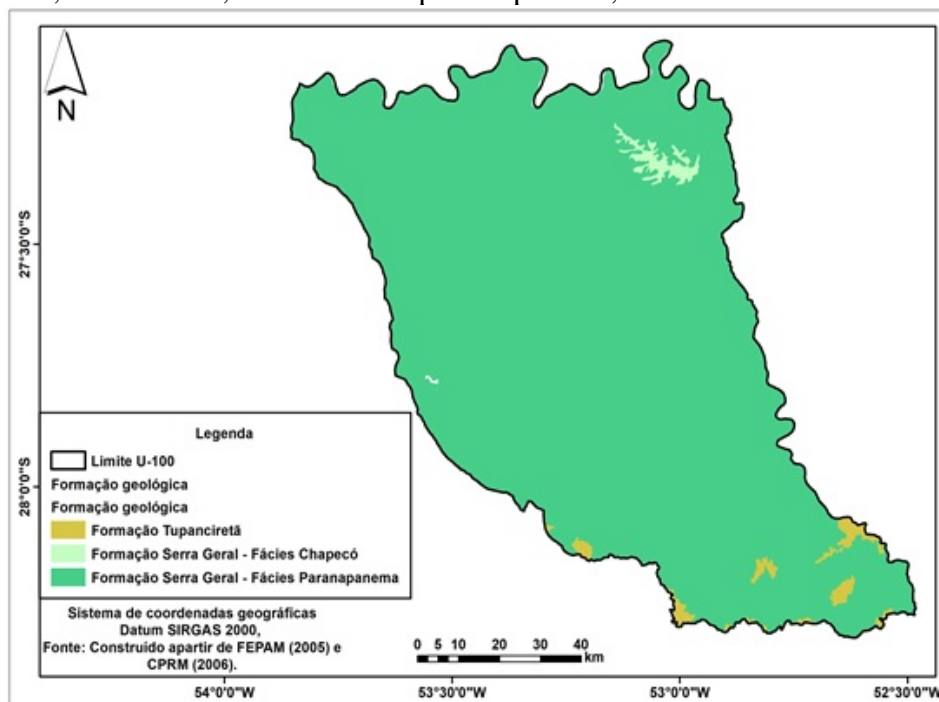
a) K1<sub>β</sub>\_pr: ocupa a maior parte da bacia, corresponde a 97,82 % da área, caracteriza-se por

derrames basálticos granulares finos, melanocráticos, contendo horizontes vesiculares espessos preenchidos por quartzo (ametista), zeólitas, carbonatos, celadonita, cobre nativo e barita, compreende a maior concentração de jazidas de ametista do estado;

b) K1<sub>α</sub>\_ch: representa 0,88 % da área, caracteriza-se por derrames ácidos variando entre riolitos a riolitos, matriz vitrofírica contendo pórfiros;

c) ENtp: presente em 1,30 % da área, essa formação é representada por arenito fino, quartzoso, paraconglomerado e arenito conglomerático, ambiente continental.

Como pode ser observado, na maioria da área estão presentes os derrames basálticos da FSG (98,70 %) e seus produtos de intemperização. Já os arenitos da Formação Tupanciretã representam apenas 1,30 % da área.



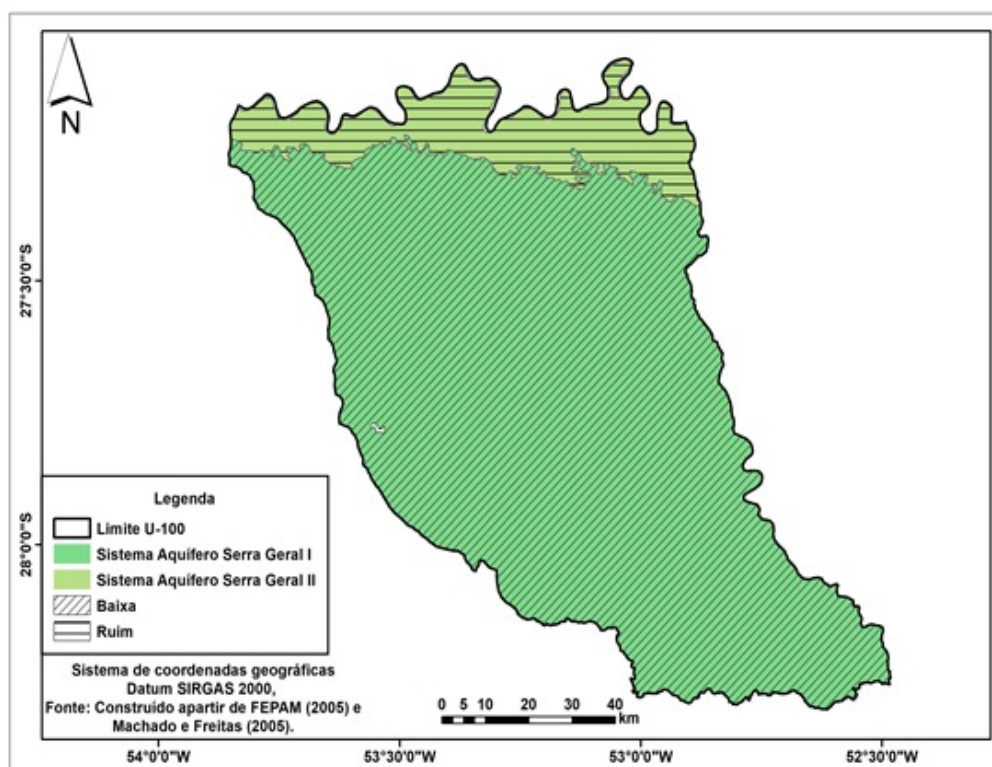
**Figura 2** - Formação geológica existente na bacia U-100 (Fonte: Construído a partir de FEPAM, 2005, e CPRM, 2006).

A hidrogeologia da área de estudo pertence aos Sistema Aquífero Serra Geral I (SASG I) e II (SASG II), segundo Machado & Freitas (2005) (Figura 3). Conforme os autores, esses sistemas aquíferos são do tipo fissural. Já a recarga ocorre pela fratura das rochas vulcânicas (Freitas et al., 2012). Neste contexto o SASG I, representa 87,84 % da área, é caracterizado por aquíferos com alta a média possibilidade de águas subterrâneas em rochas com porosidade por fraturas, já o SASG II, presente em 12,16 % da área, é caracterizado por aquíferos com média a baixa possibilidade de águas subterrâneas em rochas com porosidade por fraturas (Machado & Freitas, 2005).

### Estimativa do Índice de Susceptibilidade do aquífero à contaminação

A estimativa da susceptibilidade se deu por uso do IS (Ribeiro, 2005). Esse método leva em consideração os parâmetros: Distância até o nível da água (D), Recarga (R), Material do aquífero (A), Topografia (T) e o Land Use (LU).

O IS (Ribeiro, 2005) é amplamente utilizado em estudos Portugueses (Francés et al., 2001; Paralta et al. 2001 e Simas, 2014). No Brasil, foi utilizado com eficácia, em escala Municipal por Borba et al. (2016), Lunardi (2017) e Rosa et al. (2019) e em escala de Bacia Hidrográfica por Borba et al. (2020).



**Figura 3** - Hidrogeologia existente na bacia U-100, (Fonte: Construído a partir de FEPAM, 2005, e Machado & Freitas, 2005).

As informações hidrogeológicas (Parâmetros D e A) foram obtidas a partir de 780 poços (Que apresentavam as informações disponíveis para aplicação do método) distribuídos ao longo da bacia. Para isso, foi utilizado a base de dados do Sistema de Informações de águas Subterrâneas (SIAGAS), disponível em: [http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa\\_complexa.php](http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php).

Também se fez uso de informações contidas nos mapas hidrogeológico (Machado & Freitas, 2005) e geológico (CPRM, 2006) do Estado do Rio Grande do Sul.

Na variável D, foram utilizadas as seguintes pontuações apresentadas na tabela 1, conforme cada classe de profundidade. Já na variável A (Tabela 2), foi considerado o basalto como material predominante, conforme informações disponíveis pela (CPRM, 2006), com pontuação 9 e uma pequena parcela de arenito maciço (CPRM, 2006), com pontuação 6.

**Tabela 1** - Informações referentes a profundidade do nível freático (Variável D) (Adaptado de Ribeiro, 2005).

Profundidade(m)	Pontuação
< 1,5	100
1,5 - 4,6	90
4,6 - 9,1	70
9,1 - 15,1	50
15,2 - 22,9	30
22,9 - 30,5	20
> 30,5	10

**Tabela 2** - Informações referentes a natureza do aquífero (Variável A) (Adaptado de Ribeiro, 2005).

Natureza do aquífero	Pontuação	Usual
Xisto argiloso (Argilito)	1 - 3	2
Rocha metamórfica/ígnea	2 - 5	3
Rocha metamórfica/ígnea alterada	3 - 5	4
Till glacial	4 - 6	5
Arenito, calcário e argilitos estratificados	5 - 9	6
Arenito maciço	4 - 9	6
Calcário maciço	4 - 9	8
Areia e basalto	4 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Calcário carsificado	9 - 10	10

A classificação da recarga (Parâmetro R) está ilustrado na tabela 3. Para essa variável, utilizou-se o valor indicado por Hausman (1995), onde foi considerado a precipitação média anual de 1.800 mm e uma recarga média anual de 125 mm, obtendo assim, um valor de 6,95 % de recarga do aquífero oriunda da precipitação. Com isso, foi atribuída a esta variável a pontuação 6.

**Tabela 3** - Informações referentes a recarga do aquífero (Variável R) (Adaptado de Ribeiro, 2005).

Recarga (mm/ano)	Pontuação
< 51	1
21 - 102	3
102 - 178	6
178 - 254	8
> 254	9



Para a topografia (T) foram utilizadas as informações disponibilizadas por meio das imagens do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (USGS, 2004) com resolução espacial de 30 metros (USGS, 2004), sobre as quais foi gerado um mosaico entre as cenas identificadas SRTM1S28W053V3, SRTM1S28W054V3, SRTM1S29W053V3 e SRTM1S29W054V3. Sequencialmente foi realizado o cálculo das declividades e atribuídas as pontuações indicadas na tabela 4, no formato *raster*.

**Tabela 4** - Informações referentes a topografia (Variável T) (Adaptado de Ribeiro, 2005).

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

O parâmetro LU, foi obtido por meio das imagens datadas de 30/09/2019 e 23/09/2019 do sensor *Operation Land Image* (OLI), embarcado no satélite *Landsat 8*, disponíveis para download no site *Earth explorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov/com>) do *United States Geological Survey* (USGS), cuja resolução espacial é de 30 metros (NASA, 2019). Sobre as imagens foi gerado um mosaico e sequencialmente aplicado o algoritmo classificador supervisionado de máxima verossimilhança, no qual foram consideradas as classes e pontuações apresentadas na tabela 5.

$$IS = (0,186 \times D) + (0,212 \times R) + (0,256 \times A) + (0,121 \times T) + (0,222 \times LU) \quad \text{(Equação 1)}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A profundidade do aquífero (Figura 4), juntamente com o material geológico, desempenham um importante papel no processo de proteção do meio subterrâneo, em virtude da maior ou menor proteção do meio. Na região em estudo, a distância até o nível freático variou de 0,60 m a 170 m.

A recarga dos aquíferos do tipo fissural, como aqueles oriundos das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, ocorre por meio de suas fraturas (Freitas et al., 2012).

Bortolin et al. (2014) afirmam que o movimento das águas subterrâneas no SASG é condicionado pelo seu sistema de fraturas existentes. Aliado a isso, a porosidade primária (Condutividade Hidráulica), desses materiais são extremamente baixas ( $10^{-11}$  a  $10^{-13}$  m.s<sup>-1</sup>), ocorrendo a presença de

**Tabela 5** - Informações referentes a ao uso do solo (Variável LU) (Adaptado de Ribeiro, 2005).

Uso e ocupação do solo	Pontuação
<b>Áreas agrícolas</b>	
Pastagens e áreas agro-florestais, áreas agrícolas heterogêneas	50
<b>Áreas artificiais</b>	
Áreas urbanas contínuas, aeroportos	75
<b>Áreas naturais</b>	
Ambientes aquáticos	50
Florestas e zonas semi-naturais	0

As pontuações dos parâmetros D, R, A e T foram extrapoladas 10 vezes dos valores originais do IS (Ribeiro, 2005). Essa extrapolação representa uma melhor visualização dos parâmetros quando comparados ao método LU (Veríssimo, 2010). Para estimativa do IS (Ribeiro, 2005), foi aplicada a equação 1, na calculadora *raster* do SIG. Posteriormente o IS foi classificado conforme exposto na tabela 6.

**Tabela 6** - Classificação da susceptibilidade do aquífero à contaminação (Adaptado de Stigter et al., 2006).

Valores	Susceptibilidade
> 90	Extremamente vulnerável
80 - 90	Muito elevada
70 - 80	Elevada
60 - 70	Moderada a alta
50 - 60	Moderada a baixa
40 - 50	Baixa
30 - 40	Muito baixa
< 30	Extremamente baixa

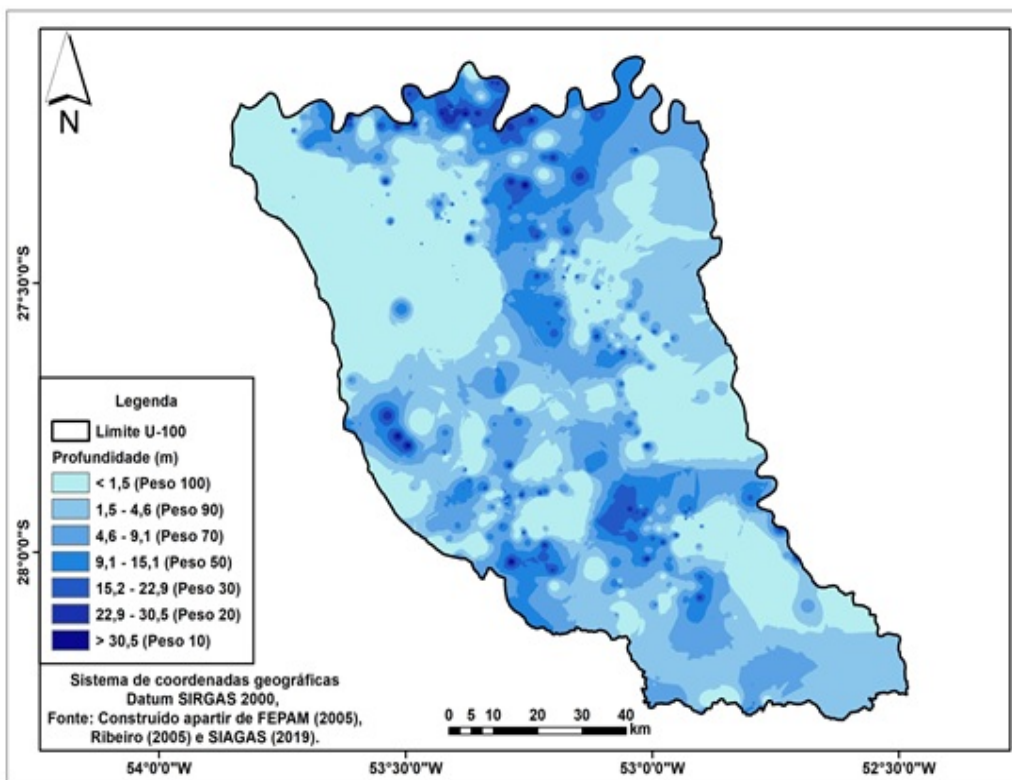
uma porosidade secundária, criadas pelas fraturas, que por sua vez são as responsáveis pela circulação da água subterrânea (Manuel Filho, 2008). Na área em estudo (Figura 5A), foi considerada uma recarga média anual de 125 mm, sendo que, quanto maior a recarga do aquífero, maior será sua contaminação, em virtude da entrada de contaminantes (Lima et al., 2017).

No que se refere ao material do aquífero (Figura 5B), o basalto apresenta uma elevada susceptibilidade, em virtude do faturamento das rochas e sua consequente migração dos contaminantes por essas fraturas, conforme já descrito anteriormente.

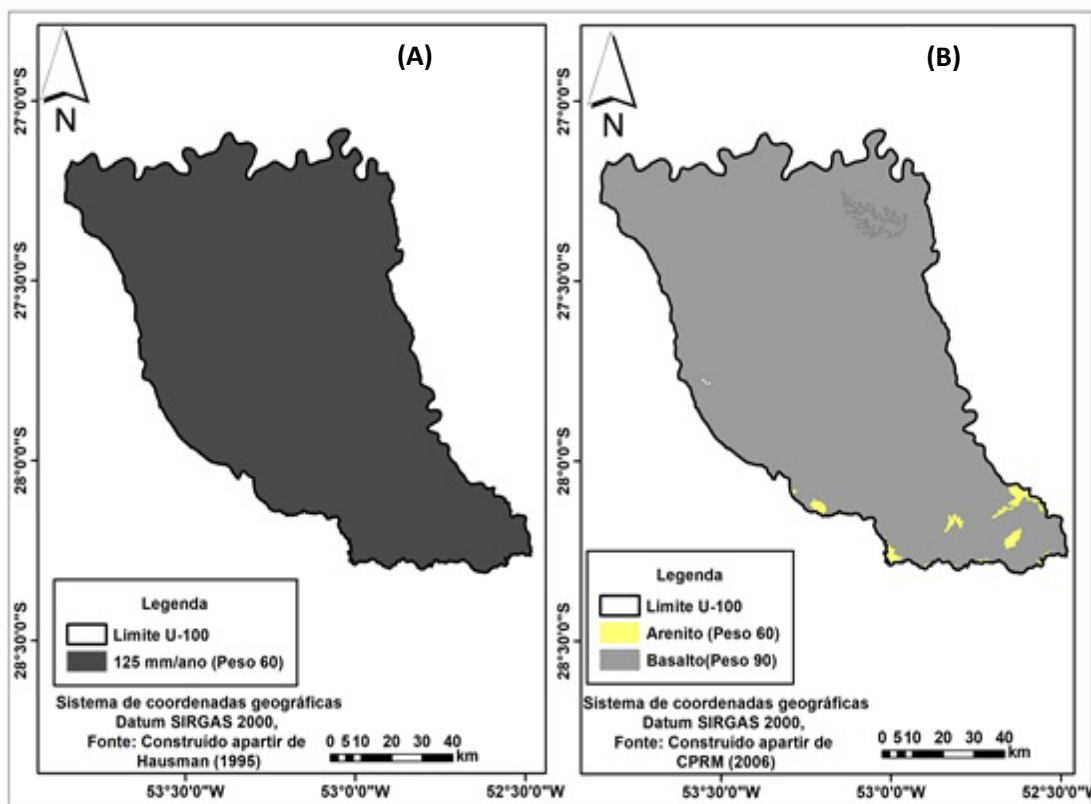
Já os arenitos, apresentam uma menor susceptibilidade, em virtude dos constituintes dos mate-

riais, que podem auxiliar no processo de adsorção dos contaminantes. A variável topografia, indicou

a presença de um relevo com cotas topográficas entre 224 m e 707 m (Figura 6).



**Figura 4** - Profundidade do aquífero na bacia U – 100 (Construído a partir de FEPAM, 2005, Ribeiro, 2005, e SIAGAS, 2019).



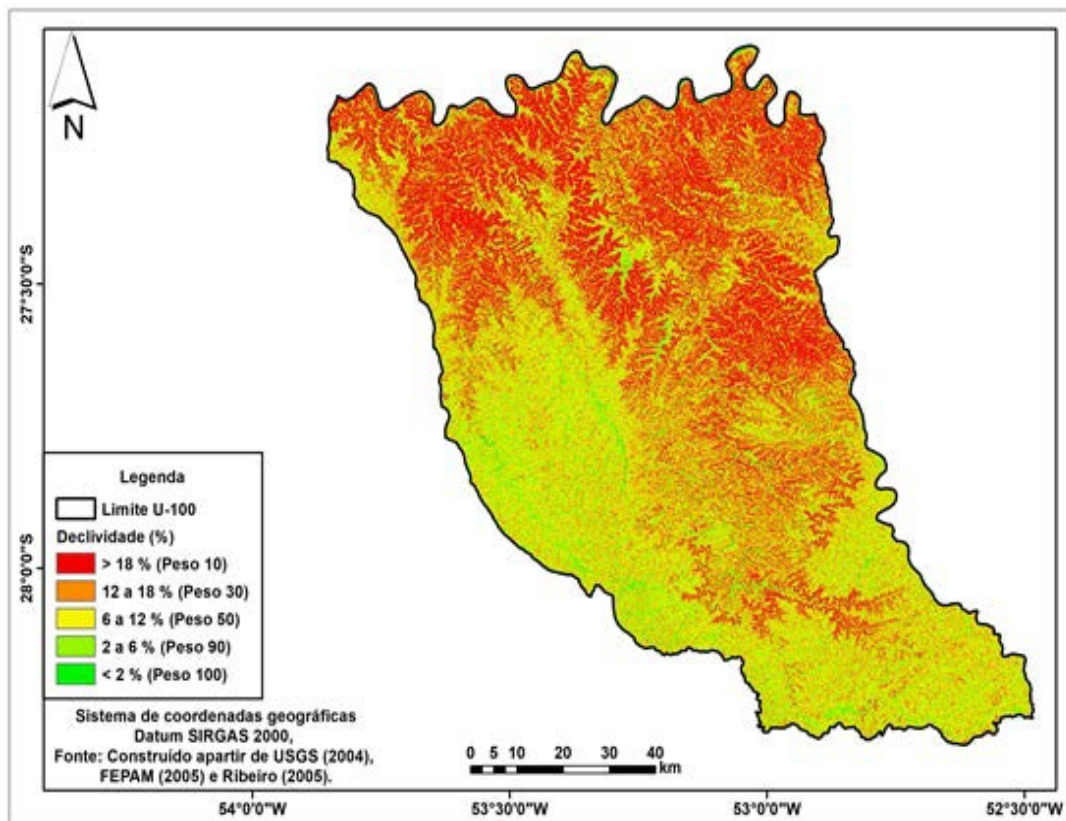
**Figura 5** - Recarga (A) e material do aquífero (B) na bacia U – 100 (Construído a partir de Hausman, 1995, FEPAM, 2005, e Ribeiro, 2005 (A); e FEPAM, 2005, Ribeiro, 2005, CPRM, 2006, e SIAGAS, 2019, (B).

Em relação ao *Land Use* (Variável LU), a área em estudo apresentou as classes de uso do

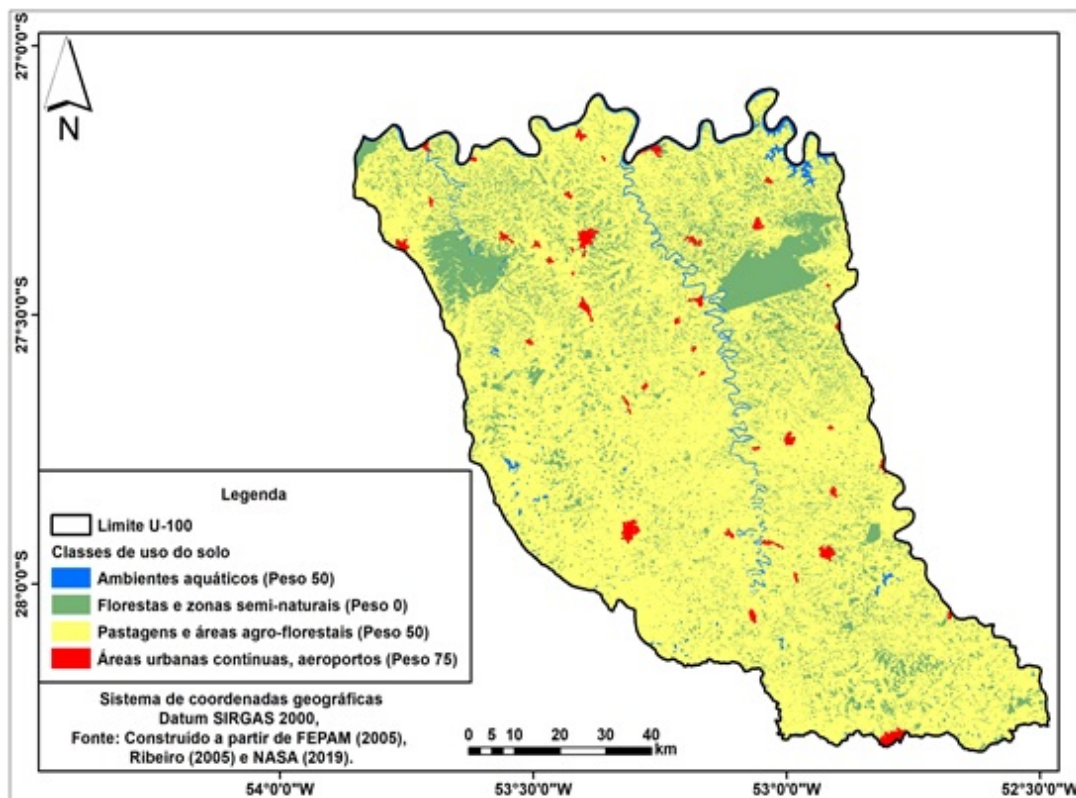
solo, conforme tabela 7 e figura 7. Como pode ser observado, ocorreu um predomínio do uso

do solo com pastagens e áreas agrícolas, em 80,71 %. Isso se deve a base econômica da região ser fundamentada na agricultura (Intensiva e familiar) juntamente com a pecuária (CODEMAU, 2010; FEPAM, 2020a; SEMA,

2020;). Além disso, ocorre a criação intensiva de suínos, com cerca de 1.232 unidades (FEPAM, 2020 b), a qual utiliza a fertirrigação das áreas de cultivos com o efluente gerado no processo produtivo.



**Figura 6** - Topografia da bacia U – 100 (Construído a partir USGS, 2004, FEPAM, 2005, e Ribeiro, 2005).



**Figura 7** - Classes de uso do solo presentes na Bacia U – 100 (Construído a partir FEPAM, 2005; Ribeiro, 2005; e NASA, 2019).

**Tabela 7** - Classes de uso do solo presentes na Bacia U – 100 (Construído a partir Ribeiro, 2005, e NASA, 2019).

Uso e ocupação do solo	Porcentagens (%)
<b>Áreas agrícolas</b>	
Pastagens e áreas agroflorestais, áreas agrícolas heterogêneas	80,71
<b>Áreas artificiais</b>	
Áreas urbanas contínuas, aeroportos	0,75
<b>Áreas naturais</b>	
Ambientes aquáticos	01,15
Florestas e zonas seminaturais	17,40
<b>Total</b>	<b>100,00</b>

A figura 8, juntamente com a tabela 8, ilustram o IS (Ribeiro, 2005) na área da Bacia U-100 e a porcentagem de cada classe (Em relação ao total), respectivamente.

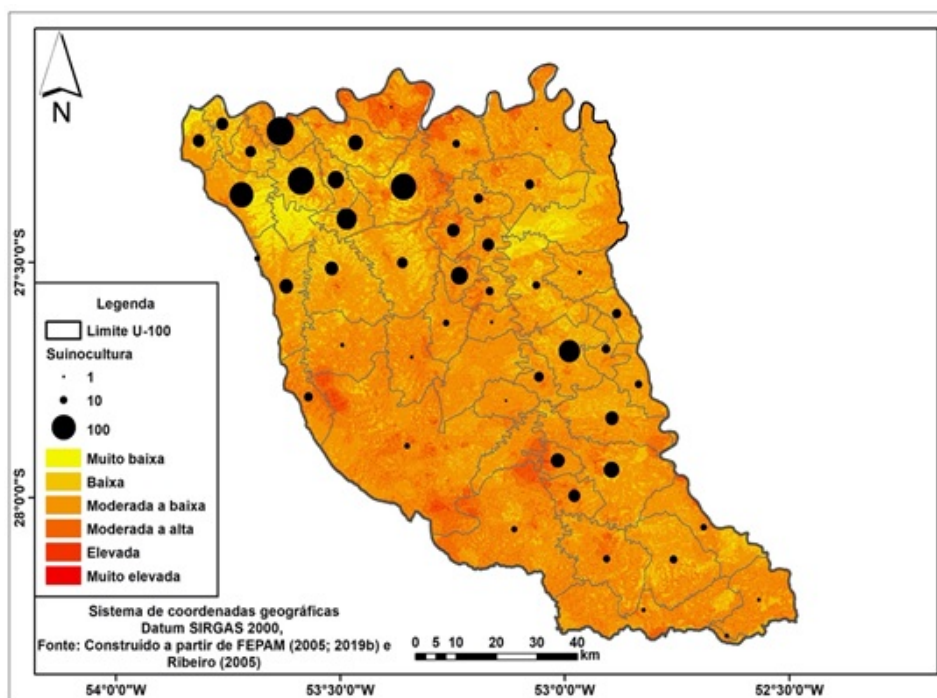
Como pode ser observado, ocorreu um predomínio das classes, que representam uma significativa susceptibilidade, com ênfase na classe moderada a alta, com 59,02 % da área. Já as classes de menor representatividade na susceptibilidade a contaminação, representaram 40,21 % da área.

**Tabela 8** - Porcentagens das classes de IS (Ribeiro, 2005) presentes na Bacia U – 100 (Adaptado de Stigter et al., 2006).

Susceptibilidade	Porcentagens (%)
Extremamente vulnerável	00,00
Muito elevada	00,01
Elevada	00,76
Moderada a alta	59,02
Moderada a baixa	04,07
Baixa	18,69
Muito baixa	17,51
Extremamente baixa	00,00
<b>Total</b>	<b>100,00</b>

Estudos realizados no cenário nacional, nessa mesma formação geológica (Basáltica) e aquífero (Tipo fissural - SASG), em escala municipal, de Frederico Westphalen - RS (Borba et al., 2016) ocorreu o predomínio da classe moderada a baixa (55 % da área) e moderado a alta (30 %), com o uso do solo de pastagens e áreas agroflorestais em 80 % da área. Em Sarandi - RS, Lunardi (2018) encontrou susceptibilidade alta em 44 % da área, seguido da classe baixa, em 17,60 %, com predomínio do uso do solo de pastagens e áreas agroflorestais (52,58 % do Município).

Em escala de bacia hidrográfica, Borba et al. (2020) em estudo realizado na bacia hidrográfica dos rios Turvo / Santa Rosa / Santo Cristo encontraram predomínio da classe baixa (56,01 %), seguido da classe elevada (21,80 %). Em relação ao uso do solo, a classe de pastagens e áreas agroflorestais esteve presente em 78,20 % da área, além da presença de 1.428 atividades suinícolas cadastradas.



**Figura 8** - Índice de susceptibilidade (Ribeiro, 2005) da bacia hidrográfica do Rio da Várzea U-100 (Construído a partir de FEPAM, 2005, 2019b, Ribeiro, 2005, e Stigter et al. 2006).



Aliado a isso, Anane et al. (2013) enfatizam que a avaliação da vulnerabilidade da água subterrânea é de grande importância, principalmente quando esse recurso está sujeito a várias fontes de contaminação.

No caso da área em estudo, predominam as atividades agrícolas e agropecuárias, principalmente. Srivastav (2020) e Ncibi et al. (2020) afirmam que a adição de fertilizantes químicos e pesticidas se tornou fundamental aos sistemas agrícolas, porém o uso excessivo está deteriorando a qualidade do solo e das águas subterrâneas.

Nesse sentido, Foster et al. (2002; 2006) afirmam que em áreas agrícolas, os casos mais graves de contaminação das águas subterrâneas referem-se a atividades de monocultura extensiva, sendo os principais contaminantes o nitrato, o amônio, os pesticidas e os organismos fecais. Os autores ainda afirmam que as principais restrições para essa atividade, seriam o controle de fertilizantes e agrotóxicos para atender às necessidades do plantio; controle da taxa e do tempo de aplicação; proibição ao uso de agrotóxicos selecionados; regulamentação do despejo de recipientes usados.

Na região em estudo, já foi constatado a presença de agrotóxicos e medicamentos veterinários em águas oriundas de nascentes para

abastecimento humano (Seben, 2020). Com isso, destaca-se a importância de estudos dessa temática para a gestão e planejamento das atividades a serem desenvolvidas, seja em escala de município ou de bacia hidrográfica, visto das atividades desenvolvidas e do uso do solo predominante (Áreas agrícolas) além das atividades como a fertirrigação do solo com efluentes suínos.

Destaca-se que a maior concentração de atividades suínícolas (potencialmente contaminantes), estão alocadas nas classes de susceptibilidade mais elevadas, e próximo a calha do Rio Uruguai. Isso pode acarretar um maior risco de contaminação, seja dos recursos hídricos superficiais ou subterrâneos. Além disso, se destacam como principais usos na área da bacia, o abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação (SEMA, 2020). Assim, representa um fator de risco à saúde pública, em virtude ao grau de susceptibilidade moderado a alta na área como um todo, em virtude do abastecimento humano, seja por fontes hídricas superficiais ou subterrâneas. Ademais, segundo informações da FEPAM (2020b), Municípios como Pinheirinho do Vale (135 unidades), Palmitinho (118 unidades), Frederico Westphalen (111 unidades) e Tenente Portela (101 unidades), representam cerca de 35 % das unidades de criação de suínos localizadas na bacia.

## CONCLUSÃO

Os resultados indicam que índice de susceptibilidade é capaz de identificar as classes de susceptibilidade à contaminação com mais eficácia, pois apresenta classes mais detalhadas, além de uma maior amplitude de variáveis. A área em estudo, apresentou susceptibilidade à contaminação entre muito baixa a muito elevada, com predomínio da classe moderada a alta, além de uma grande concentração de atividades suínícolas.

Estudos envolvendo o mapeamento da susceptibilidade à contaminação dos recursos hídricos, desempenham um papel primordial no planejamento, principalmente em escala de bacias hidrográficas.

No caso da bacia do Rio da Várzea, uma importante fonte hídrica do Estado, representa uma importante ferramenta de gestão e planejamento hídrico, com vista a elaboração de estudos técnicos e específicos na área.

## REFERÊNCIAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Brasil:** Abastecimento urbano de água. 2010. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Atlas.aspx>. Acessado em: 02 de janeiro de 2020.
- ANANE, M.; ABIDI, B.; LACHAAL, F.; LIMAM, A.; JELLALI, S. GIS-based DRASTIC, Pesticide DRASTIC and the Susceptibility Index (SI): comparative study for evaluation of pollution potential in the Nabeul-Hammamet shallow aquifer, Tunisia. **Hydrogeology Journal**, v. 21, p. 715 - 731, 2013.
- BORBA, W.F.; RUCHEL, B.; MENEGAZZO, K.; PEIL, L.Z.; ROSA, C.N. Aplicação do método índice de susceptibilidade para estimativa da susceptibilidade à contaminação na Bacia hidrográfica dos rios Turvo, Santa Rosa e Santo Cristo. **Geologia USP Série Científica**, v. 20, n. 1, p. 125 - 136, 2020.
- BORBA, W.F.; SILVÉRIO DA SILVA, J.L.; ALLASIA, D.G.; ROSA, C. N.; FAVARETTO, J.R.; RIBEIRO, L.F.T. Geoprocessamento Aplicado à Determinação do Índice de Susceptibilidade das Captações por Poços Tubulares do Sistema Aquífero Serra Geral em Frederico Westphalen - Rio Grande do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ. Impresso)**, v. 39, n. 3, p. 79 - 88, 2016.
- BORTOLIN, T. A.; REGINATO, P. A. R.; LEO, M. I.; SCHNEIDER, V. A. Hidrogeologia e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS). **Revista Ambiente & Água**, v. 9, p. 55 - 67, 2014.
- CODEMAU - CONSELHO REGIONAL DE DESENVOLVIMENTO DO MÉDIO ALTO URUGUAI. **Plano estratégico**

- de desenvolvimento regional.** Frederico Westphalen: Grafimax, 2010. 219 p.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul, Escala 1:750.000.** Porto Alegre: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2006.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **SIAGAS: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas.** Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acessado em: 20 de maio 2019.
- FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER. **U - 100, Várzea.** Disponível em: [http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/bacia\\_uru\\_varzea.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/bacia_uru_varzea.asp). Acessado em: 02 de janeiro de 2020a.
- FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER. **Licenciamento ambiental.** Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/licenciamento/Area1/default.asp>. Acesso em: 02 de janeiro de 2020b.
- FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL LUIZ CARLOS ROESSLER. **Arquivo digital para uso em SIG - Base cartográfica digital do RS 1:250.000.** Disponível em: [http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases\\_geo.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp). Acesso em: 02 janeiro de 2020.
- FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL LUIZ CARLOS ROESSLER. **Portaria FEPAM N.º 85/2014 - Dispõe sobre o estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade (VRQ) dos solos para 09 (nove) elementos químicos naturalmente presentes nas diferentes províncias geomorfológicas/geológicas do Estado do Rio Grande do Sul.** Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/legislacao/arcq/Portaria085-2014.pdf>. Acesso em: 23 março de 2021.
- FERCHICHI, H.; BEN HAMOUDA, M.F.; FARHAT, B.; MAMMOU, A.B. Assessment of groundwater salinity using GIS and multivariate statistics in a coastal Mediterranean aquifer. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v.15, p. 2473 - 2492, 2018.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.C.A.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection: A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies.** Washington: World Bank, 2002.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.C.A.; GOMES, 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.** Washington: Banco Mundial, 2006.
- FRANCÉS, A.; PARALTA, E.; FERNANDES, J.; 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. In: RIBEIRO, L. (Coord). **International Conference on Future Groundwater Resources at Risk (FRG'01), 3, Proceedings.** Lisbon: CVRM/IST, p. 35 - 44, 2001.
- FREITAS, M.A.; BINOTTO, R.B.; NANNI, A.S.; RODRIGUEZ, A.L.M.; BORTOLI, C.R. Avaliação do potencial hidrogeológico, vulnerabilidade intrínseca e hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 31 - 41, 2012.
- GHOULI, N.; JARRAYA-HORRICHE, F.; HAMZAOU-AZAZA, F.; ZAGHRARNI, M.F.; RIBEIRO, L.; ZAMMOURI, M. Groundwater vulnerability mapping using the Susceptibility Index (SI) method: Case study of Takelsa aquifer, Northeastern Tunisia. **Journal of African Earth Sciences**, v. 173, 2021.
- GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Decreto nº 53.885, de 16 de janeiro de 2018. Institui subdivisão das Regiões Hidrográficas do Estado do Rio Grande do Sul em Bacias Hidrográficas.** Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201803/08095109-decreto-53885-2017.pdf>. Acessado em: 02jan2020.
- HAN, Z.; MAA, M.; SHI, G.; HE, L.; WEI, L.; SHI, Q. A review of groundwater contamination near municipal solid waste landfill sites in China. **Science of The Total Environment**, v. 569/570, n. 1, p. 1255 - 1264, 2016.
- HAUSMAN, A. Esboço Hidrogeológico do Rio Grande do Sul - Brasil. **Acta Geologica Leopoldensia**, p. 37 - 71, 1995.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha digital municipal.** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acessado em: 02 de janeiro de 2020.
- JARRA, H.; ZAMMOURI, M.; OUESSAR, M.; ZERRIM, A.; YAHYAOU, H. GIS based DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment: Case study of the shallow mio-plio-quadernary aquifer (Southeastern Tunisia). **Water Resources**, v. 44, n. 4, p. 595 - 603, 2017.
- JMAL, I.; AYED, B.; BOUGHARIOU, E.; ALLOUCHE, N.; SAIDI, S.; HAMD, M.; BOURI, S. Assessing groundwater vulnerability to nitrate pollution using statistical approaches: a case study of Sidi Bouzid shallow aquifer, Central Tunisia. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 10, n. 364, 2017.
- LIMA, L.A.; SILVA JÚNIOR, G.C. da.; MENEZES, J.M.; COSTA, M.C.O. Uso de sistema de informação geográfica para a determinação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos fraturados: Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos - São José de Ubá/RJ. **Águas Subterrâneas (São Paulo)**, v. 31, p. 181 - 206, 2017.
- LUNARDI, S. **Susceptibilidade à contaminação do aquífero Serra Geral no município de Sarandi - RS.** Frederico Westphalen, 2018. Trabalho (Conclusão de Curso e Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária), Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen.
- MACHADO, J.L.F. & FREITAS, M.A. **Projeto mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul, relatório final, Escala 1:750.000.** Porto Alegre: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2005.
- MANUEL FILHO, J. Ocorrência de águas subterrâneas. In: FEITOSA, F.A.C.; MANUEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. (Coordenadores). **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações.** Rio de Janeiro: CPRM, p. 53 - 77, 2008.
- MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul.** Seção de Geografia. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42 p.
- NASA - LANDSAT PROGRAM. **Landsat ETM+ cena LC82230792013112LGN01, LIT, USGS, Sioux Falls, 2019.** Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acessado em: 20mai2019.
- NCIBI, K.; CHAAR, H.; HADJI, R.; BACCARI, N.; SEBEI, A.; KHELIFI, F.; ABBES, M.; HAMED, Y. A GIS-based statistical model for assessing groundwater susceptibility index in shallow aquifer in Central Tunisia (Sidi Bouzid basin). **Arabian Journal Geosciences**, v. 13, n. 98, 2020.
- NDOZIYA, A.T.; HOKO, Z.; GUMINDOGA, W. Assessment of the impact of pit latrines on groundwater contamination in Hopley Settlement, Harare, Zimbabwe. **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, v. 9, n. 3, p. 464 - 476, 2019.
- PARALTA, E.; OLIVEIRA, M.; BATISTA, S.; FRANCÉS, A.; RIBEIRO, L.; CEREJEIRA, M.J. Aplicação de SIG na avaliação da vulnerabilidade aquífera e cartografia da contaminação agrícola por pesticidas e nitratos na região do Ribatejo. In: SEMINÁRIO A HIDROINFORMÁTICA EM PORTUGAL, 2001, Lisboa, **Anais...** Lisboa: LNEC, 2001.
- RIBEIRO, L.F. Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos – formulações e aplicações. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 7, 2005, Évora, PT. **Anais...** Évora, PT: APRH, 2005.
- ROSA, C. N.; TASSI, R.; BORBA, W.F.; FAVARETTO, J.R.; FERNANDES, G.D.A.; SILVÉRIO DA SILVA, J.L. Relação entre aquíferos susceptíveis à contaminação e Áreas de

- Preservação Permanente Hídrica em Ijuí, RS. **Pesquisas em Geociências**, v. 46, n. 3, 2019. doi.org/10.22456/1807-9806.97674
- SEBEN, D. **Avaliação de variáveis de qualidade da água e contaminantes ambientais emergentes em águas de consumo humano no Rio Grande do Sul**. Frederico Westphalen, 2020, 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen.
- SEMA - SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **U-100, Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea**. Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/u100-bacia-hidrografica-do-rio-da-varzea>>. Acessado em: 02 de janeiro de 2020.
- SHAHAB, A.; SHIHUA, Q.; RAD, S.; KEITA, S.; KHAN, M.; ADNAN, S. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC method in the irrigated and coastal region of Sindh province, Pakistan. **Hydrology Research**, v. 50, n. 1, p. 319 - 338, 2019.
- SIMAS, L.S.B. **Índices de vulnerabilidade à contaminação de massas de água subterrânea: aplicação à delimitação da Rede Ecológica Nacional no Concelho de Almada (Portugal)**. Lisboa, 2014. 80 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Lisboa.
- SOTÉRIO, P.W.; PEDROLLO, M. C. R.; ANDRIOTTI, J. L. Mapa de isoietas do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16, 2005, João Pessoa, PB. **Anais...** João Pessoa, PB: ABRH, 2005.
- SRIVASTAV, A.L. **Chemical fertilizers and pesticides: role in groundwater contamination**. In: PRASAD, M. N. V. **Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation: Pesticides and Chemical fertilizers**. Elsevier: Amsterdã, 2020. Chapter 6, p. 143 - 159.
- STIGTER, T.Y.; RIBEIRO, L.; CARVALHO DILL, A.M.M. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. **Hydrogeology Journal**, v. 14, n. 1, p. 79 - 99, 2006.
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Shuttle Radar Topography Mission, 1 Arc Second Scene Srtm1s28w054v3, Unfilled Unfinished 2.0, Global Land Cover Facility**. Maryland: University Of Maryland, 2004.
- VERÍSSIMO, A.C.F. **Hidroquímica, vulnerabilidade e proteção do aquífero de torres vedras**. Lisboa, 2010, 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica), Universidade de Lisboa.

Submetido em 14 de abril de 2021

Aceito para publicação em 22 de julho de 2022