

## A VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUIFEROS FRATURADOS: AVALIANDO OS MODELOS DRASTIC E GOD, ORIGINAIS E ADAPTADOS

*NATURAL VULNERABILITY OF FRACTURED AQUIFERS: ASSESSING THE DRASTIC,  
MODIFIED-DRASTIC, GOD AND MODIFIED-GOD METHODS*

**Manuela Gasparetto GOMES<sup>1</sup>, Tiago de VARGAS<sup>1</sup>, Rossano BELLADONA<sup>1</sup>, Volnei DALBOSCO<sup>1</sup>, Bruna de ARAUJO<sup>1</sup>, Taison Anderson BORTOLIN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>SAMAE Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul. Rua Pinheiro Machado, 1.615 – Centro. Caxias do Sul – RS. E-mails: manugasparetto@gmail.com; tvargas@samaecaxias.com.br; rbelladona@samaecaxias.com.br; vdalbosco@samaecaxias.com.br; baraujo@samaecaxias.com.br;

<sup>2</sup>Universidade de Caxias do Sul – Instituto de Saneamento Ambiental. Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130. Caxias do Sul – RS. E-mail: tabortol@ucs.br

Introdução  
Materiais e métodos  
Localização  
Geologia e hidrogeologia  
Método DRASTIC  
Método GOD  
Métodos DRASTIC vs GOD  
Resultados e discussões  
Parâmetros do método DRASTIC  
DRASTIC original vs DRASTIC adaptado  
Parâmetros do método GOD  
Métodos DRASTIC vs GOD, original e adaptado  
Considerações finais  
Agradecimentos  
Referências

**RESUMO** - Uma forma de conciliar atividades humanas com preservação da água subterrânea é estimar a vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos. Este estudo objetiva comparar quatro métodos de classificação da vulnerabilidade natural de aquíferos, visando determinar qual metodologia é a mais apropriada e quais são os contrastes analíticos entre elas. Os métodos selecionados foram o DRASTIC original, DRASTIC adaptado, GOD original e GOD adaptado, manipulados em software de geoprocessamento. Os métodos DRASTIC, original e adaptado, apresentaram as mesmas classes de vulnerabilidade (insignificante, muito baixa, baixa e moderada), entretanto a distribuição espacial e os valores de porcentagem das classes foram distintos entre os métodos. Os métodos GOD revelaram significativa diferença na classificação da vulnerabilidade. O GOD original demonstrou vulnerabilidade insignificante e baixa, respectivamente 0,96% e 99,04% da área. Enquanto o adaptado apresentou baixa e média, respectivamente 25,80% e 74,19% da área. O comparativo dos resultados normalizados indicou que o GOD original possui uma classificação incongruente aos demais métodos. Os métodos DRASTIC mostraram que os parâmetros Solos, Zona Vadosa, Recarga e Topografia podem ser responsáveis por resultados superestimados ou subestimados. Por fim, os métodos DRASTIC apresentaram melhores resultados devido ao maior detalhamento e grau de variabilidade de classes, mostrando-se mais conservadores e restritivos.

**Palavras-chave:** Água subterrânea. Geoprocessamento. Álgebra de mapas. Índices normalizados.

**ABSTRACT** - Anthropogenic activities have always been a major groundwater concern. The understanding of the natural vulnerability of aquifers can aid decision makers for a better land use planning. This paper compares four methods for the classification of aquifer natural vulnerability, searching for the most adequate methodology, and determines the analytical differences among them. The original DRASTIC, modified DRASTIC, original GOD and the modified GOD methods were assessed by using geoprocessing software. Both DRASTIC methods presented the same vulnerability classes (insignificant, very low, low and moderate), but their spatial distribution and the values within each class were distinct. The GOD methods have revealed substantial difference in the classification of the vulnerability. The original GOD has presented insignificant and low vulnerability, respectively 0.96% and 99.04% of the studied area. Conversely, when testing the modified GOD, the vulnerability in the same area was classified as low and median, 25.80% e 74.19% respectively. The normalized results indicated that the original GOD has an incongruent classification towards the remaining methods. Both DRASTIC methods have indicated that soil, vadose zone, recharge and topography may be the responsible parameters for the underestimated or overestimated results. Lastly, the DRASTIC methods have shown better results as they presented enhanced detail and higher class variability, being more conservative and restrictive.

**Keywords:** Groundwater. Geoprocessing. Map algebra. Standardization indexes.

### INTRODUÇÃO

O crescimento populacional não implica recursos hídricos, tanto superficiais quanto apenas no aumento da demanda por água potável, subterrâneos, determinam o desenvolvimento mas também no risco de contaminação das águas socioeconômico e populacional de uma região. subterrâneas. A quantidade e qualidade dos Deste modo, é necessário garantir a manutenção

e qualidade dos mesmos através de políticas públicas ou planos que sirvam como ferramentas para sua gestão.

Os maiores riscos de contaminação das águas subterrâneas estão relacionados ao lançamento de esgotos *in natura*, atividades agrícolas, infiltração de águas contaminadas provenientes de rios e as atividades industriais, especialmente as que realizam disposição de efluentes líquidos (Foster et al., 1987). A identificação dos índices de vulnerabilidade natural de um aquífero pode contribuir no desenvolvimento de medidas de planejamento e gestão territorial que minimizem os riscos de contaminação da água subterrânea.

A vulnerabilidade natural de aquíferos pode ser caracterizada por diferentes métodos cartográficos (Hirata & Fernandes, 2008), que possuem como objetivo classificar áreas com graus homogêneos de vulnerabilidade (Krebs, 2004). Entre as metodologias mais utilizadas na análise de vulnerabilidade geral destacam-se os métodos DRASTIC e GOD, que servem como referência a inúmeros trabalhos relacionados a esse tema (Silva et al., 2013). O GOD é considerado uma das técnicas de estimativa da vulnerabilidade de aquíferos mais utilizada na América Latina, enquanto que o DRASTIC tem sua aplicação favorecida nos Estados Unidos e Europa (Hirata & Fernandes, 2008).

A aplicação do método DRASTIC, ao redor do mundo, é bastante difundida e utilizada em diversos estudos, por exemplo, Pacheco (2015), Júnez-Ferreira et al. (2016), Abdeslam et al. (2017). No Brasil, algumas pesquisas realizadas por Maziero (2005), Melo Junior (2008),

Muradás (2011), Santos (2014) optaram pela utilização desse método.

Por outro lado, a utilização do método GOD, também, é empregada em estudos de vulnerabilidade da água subterrânea no território brasileiro, conforme trabalhos realizados por Ribeiro et al. (2011), Batista et al. (2016), Garcia et al. (2018) e, especificamente no sul do Brasil, em estudos abordando a vulnerabilidade natural dos Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral (Silva et al., 2013; Feldkircher et al. 2014) e do Sistema Aquífero Cristalino conforme Terra et al. (2016).

Relevantes pesquisas comparando os métodos GOD e DRASTIC realizadas por Guiguer & Kohnke (2002), Reginato & Ahlert (2013), Maia & Cruz (2013), Moura (2014) e Borges et al. (2017) identificaram, de forma geral, que o DRASTIC apresenta maior grau de detalhamento e melhor adaptação às escalas maiores, enquanto que o GOD se adequa melhor às escalas pequenas e a disponibilidade limitada de dados, demandando uma densidade de informações simplificada.

A proposta deste estudo é comparar a vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação utilizando os métodos DRASTIC original, DRASTIC adaptado, GOD original e GOD adaptado, através da normalização dos índices de vulnerabilidade obtidos em cada metodologia. Desta forma, identificando qual das ferramentas apresenta melhor adaptação ao aquífero fraturado localizado sob o município de Caxias do Sul, região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Por fim, o estudo ainda objetiva indicar os fatores definidores dos contrastes entre as quatro técnicas de análise.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para determinação dos índices de vulnerabilidade DRASTIC e GOD, originais e modificados.

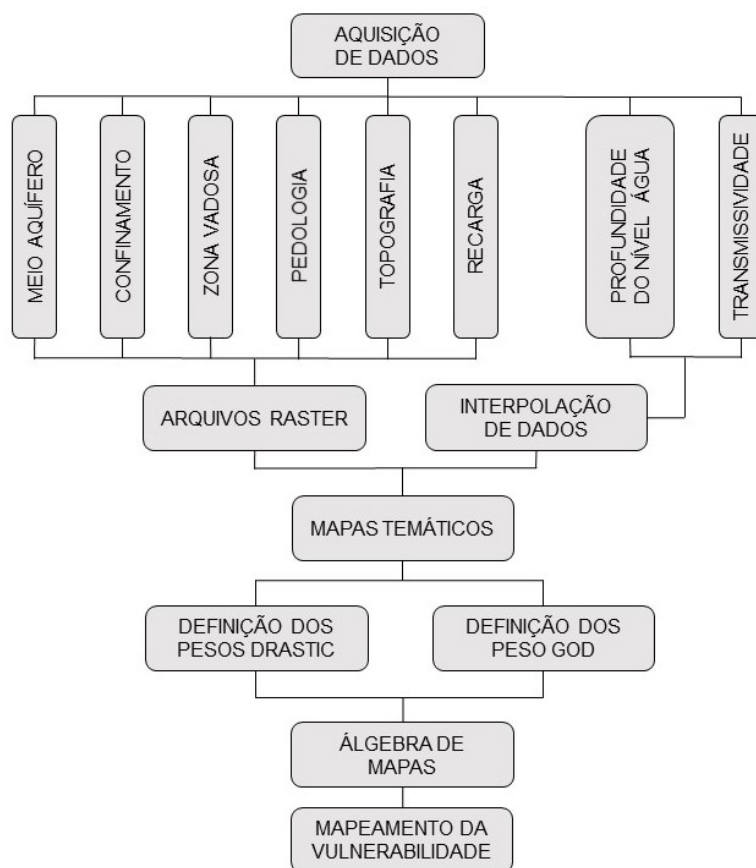
Para tanto, são descritas as etapas de levantamento de dados, caracterização física da área, confecção dos mapas temáticos e definição de peso dos parâmetros, utilizados na álgebra de mapas (Figura 1).

Foi utilizado um total de 760 poços tubulares, sendo 364 provenientes do Cadastro Municipal de Poços tubulares (CMP) de Caxias do Sul (banco de dados interno do Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto-SAMAE) e 396 do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas-SIAGAS (CPRM, 2018), externos ao território municipal de

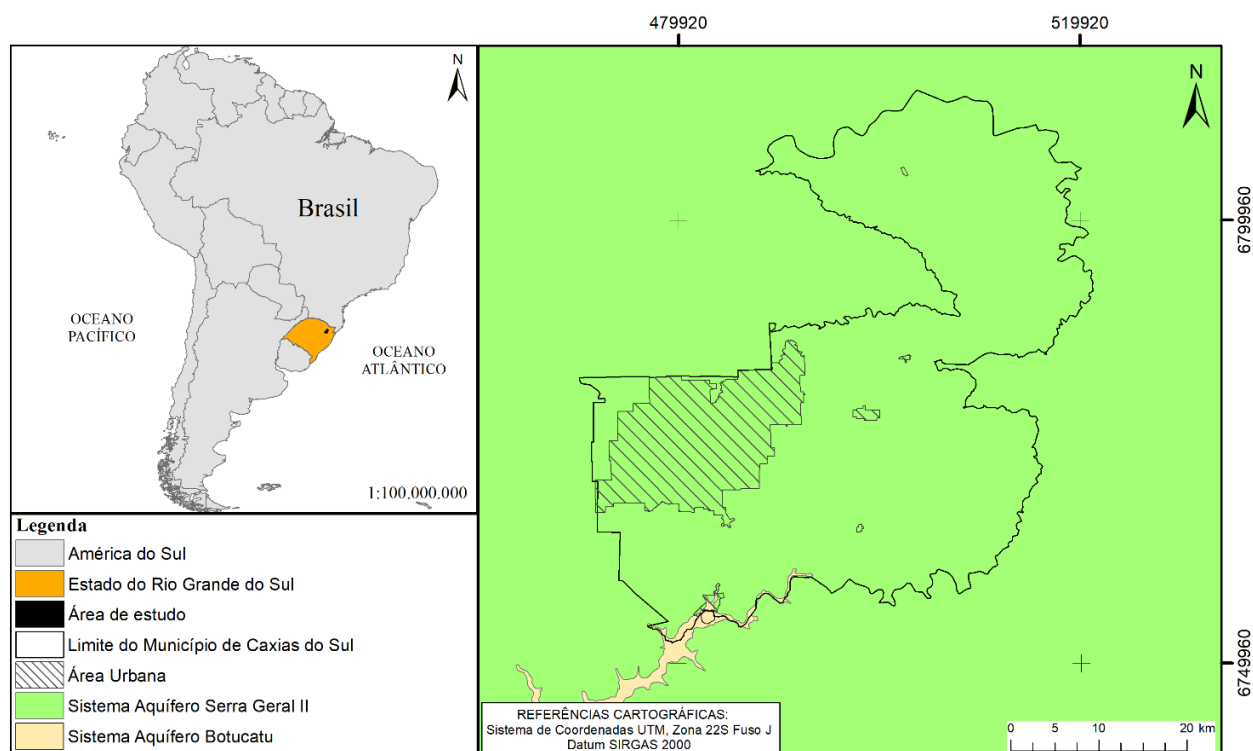
Caxias do Sul. A manipulação dos dados foi realizada a partir do *software* de geoprocessamento ArcGIS 10.4.1 (ESRI, 2018).

### Localização

A pesquisa abrangeu a área territorial do município de Caxias do Sul (RS), localizado na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 2). Esse município possui 1.652,3 km<sup>2</sup> de área e uma população de 517.451 habitantes (IBGE, 2020). O setor industrial representa 68% do produto interno bruto da economia municipal, sendo considerado um Polo Metal Mecânico no Estado do Rio Grande do Sul (IBGE, 2018). Caxias do Sul situa-se na Região Hidrográfica do Guaíba sob o divisor de águas das Bacias Hidrográficas do Rio Taquari-Antas (ao norte) e do Rio Caí (ao sul).



**Figura 1** - Fluxograma dos procedimentos metodológicos.



**Figura 2** – Mapa de localização da área de estudo.

### Geologia e hidrogeologia

A área de estudo está inserida na Bacia do Paraná, onde predominam afloramentos de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e, de forma pouco expressiva, os arenitos da Formação Botucatu. CPRM (1998), identificou na área de

pesquisa três unidades pertencentes à Formação Serra Geral: basaltos da Unidade Gramado, vulcânicas ácidas da Unidade Caxias e lavas vítreas da Unidade Várzea do Cedro.

A Unidade Gramado é formada por rochas basálticas e andesíticas com colorações variadas

de tons de cinza, enquanto que a Unidade Caxias é constituída por rochas riódacíticas, dacíticas e riolíticas, que ocorrem sobre as rochas básicas e apresentam colorações cinza e marrom avermelhadas (Reginato, 2003). A unidade Várzea do Cedro é caracterizada como uma rocha ácida com características vítreas, constituindo finos derrames, de cor preta e brilho graxo (Godoy et al., 2018).

O contexto hidrogeológico regional abrange os sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral. O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é do tipo granular e, regionalmente, sofre controle estrutural através dos principais depocentros da Bacia do Paraná, falhamentos regionais e locais, reativação dos arqueamentos e soerguimentos termiais (Lisboa et al., 2003), e está sotoposto ao Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). Por outro lado, o SASG é do tipo fraturado e está condicionado a Formação Serra Geral, apresentando circulação da água em estruturas tectônicas, que podem apresentar ou não influência das estruturas primárias.

A circulação e armazenamento da água subterrânea nas rochas da Formação Serra Geral ocorrem nas fraturas oriundas das disjunções horizontais, dos contatos entre derrames e nas zonas vesiculares e amigdaloides, sendo as zonas de fraturas abertas verticais e subverticais, que transpassam os diferentes derrames, a trajetória para percolação da água até a zona de saturação (Reginato et al., 2015).

O SASG é dividido em SASG I e SASG II, sendo que no SASG II, está localizado o município de Caxias do Sul (Figura 2). A recarga do SASG II pode ocorrer através do manto de alteração, que proporciona a infiltração das águas pluviais e alimenta os sistemas de fraturas. A capacidade específica em geral é inferior a 0,5 m<sup>3</sup>/h/m, no entanto em regiões de intenso fraturamento ou ocorrência de arenitos na base do sistema, esse valor pode chegar a mais de 2 m<sup>3</sup>/h/m (Silva et al., 2007).

Segundo Reginato (2003), esse sistema aquífero apresenta transmissividade média (Tm) de 0,493 m<sup>2</sup>/h e capacidade específica média (qm) de 0,395 m<sup>3</sup>/h/m, e que a variabilidade encontrada nos valores de transmissividade e capacidade específica estão de acordo com o tipo de aquífero (fraturado), pois esses parâmetros refletem a forte anisotropia.

A observação dos parâmetros hidrodinâmicos demonstra que a maioria das vazões analisadas no SASG (72.1%) apresentam valores abaixo de 10

m<sup>3</sup>/h, enquanto que 18,6% estão entre 10 e 20 m<sup>3</sup>/h e somente 9,3% possuem valores acima de 20 m<sup>3</sup>/h (Reginato, 2003). Vargas et al. (2018), obtiveram quantitativos de vazão semelhantes na cidade de Caxias do Sul, sendo que 71% estavam abaixo de 10 m<sup>3</sup>/h, 18% entre 10 e 20 m<sup>3</sup>/h e 11 % superior a 20 m<sup>3</sup>/h.

### Método DRASTIC

O método DRASTIC considera sete parâmetros para determinação da vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero: distância até o nível da água (D), peso 5; recarga (R), peso 4; meio aquífero (A), peso 3; solo (S), peso 2; topografia (T), peso 1; zona vadosa (I), peso 5; e condutividade hidráulica (C), peso 1. Cada um dos parâmetros é subdividido em classes que recebem cargas de 1 a 10. O índice DRASTIC é calculado a partir da ponderação dos parâmetros, e pode variar de 23 a 230, sendo que quanto mais alto o valor maior é a vulnerabilidade da área.

As classes de vulnerabilidade natural podem ser baixa (<120), moderada (120 – 159), elevada (160 – 199) e muito elevada (>199). Este método foi aplicado nas versões original (Aller et al., 1987) e adaptada (Borges et al., 2017). Na versão adaptada foram alterados os parâmetros solo (S) e zona vadosa (I), com o objetivo de obter resultados mais representativos à área de estudo.

**A Distância até o nível da água (D)** - A base de dados utilizada para determinar a profundidade do D é oriunda do CMP e do SIAGAS (CPRM, 2018). A estimativa de valores em locais não amostrados foi realizada através do método geoestatístico *Krigagem* (Yamamoto e Landim, 2013).

**A Recarga (R)** - A recarga foi determinada aplicando a equação do balanço hídrico (Equação 1). Os dados de precipitação foram obtidos através do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (Agritempo, 2018), utilizando uma série de dados de 2000 a 2012. A evapotranspiração real foi determinada pelo método de Thornthwaite (1948), enquanto que o escoamento superficial foi obtido através da Equação 2. O coeficiente de escoamento superficial “C” foi definido a partir do tipo de solo e da declividade (Tabela 1). As classes de declividade predominantes foram confeccionadas sobrepondo o mapa das unidades geomorfológicas (Lisboa et al., 2003) ao mapa de declividade. A partir desses dados, foi calculado o escoamento superficial e, posteriormente, os valores de recarga.

$$P = ESC + \Delta ARM + ETR + R \quad (1)$$

Onde, P: precipitação (mm); ESC: escoamento superficial (mm);  $\Delta$ ARM: variação do armazenamento de água na zona não-saturada (mm); ETR: evapotranspiração real (mm); R: recarga (mm).

$$ESC = \alpha \times C \times P \quad (2)$$

Onde, C: coeficiente de escoamento superficial, em função do litotipo;  $\alpha$ : função da declividade e estação do ano.

O **Meio aquífero (A)** - O parâmetro meio aquífero refere-se ao material que constitui o aquífero. A aquisição dessa informação foi baseada no mapeamento geológico elaborado pela CPRM (2010).

O **Solos (S)** - No método DRASTIC original, os solos da área de pesquisa foram classificados como

Franco Argilosos (Santos et al., 2011). Já no DRASTIC adaptado esse parâmetro foi modificado (Borges et al., 2017) para considerar a capacidade de infiltração do solo. Essa capacidade foi estimada conforme Sartori (2004), Tabela 2, que é uma adaptação da classificação proposta pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA).

**Tabela 1** - Valores de C e  $\alpha$  em função do tipo de solo (Adaptado de Conicelli, 2014).

Tipo de Solo	Declividade (%)	$\alpha$
Argiloso C=0,4	< 3	0,58
	3 a 7	0,70
	> 7	0,77

**Tabela 2** - Classificação dos solos quanto a capacidade de infiltração (extraído de Sartori, 2004).

Associação	Solo	Classe infiltração	Classe predominante
<b>CHd1</b>	Cambissolo Húmico Distrófico	C	C (baixa)
	Nitossolo Háplico Distrófico	B	
	Neossolo Litólico Distrófico	D	
<b>NXd4</b>	Nitossolo Háplico Distrófico	B	B (moderada)
	Nitossolo Háplico Alumínicos	B	
	Neossolo Litólico Distrófico	D	
<b>RLe23</b>	Neossolo Litólico Eutrófico	D	D (baixíssima)
	Cambissolo Háplico Tb Eutrófico	C	
	Chernossolo Argiluvicos Órticos	D	

A **Topografia (T)** - A elaboração desse parâmetro foi fundamentada na imagem do satélite ALOS/PALSAR (JAXA, 2011), com resolução espacial de 12,5 metros. A partir do modelo digital de elevação foi identificada a declividade na área pesquisada.

O método DRASTIC atribui os maiores pesos às menores declividades, uma vez que estas regiões apresentam alta taxa de recarga e baixo potencial para o escoamento. As regiões com maiores declividades recebem menor peso no cálculo do índice DRASTIC, pois permitem maior escoamento que reflete na diminuição do potencial de contaminação do aquífero.

A **Zona vadosa (I)** - O parâmetro zona vadosa representa a camada de solo não saturada sobre o aquífero. No método original, a classificação que melhor se adequa as características de solo da região é a Franco Argiloso (Santos et al., 2011). Essa classe pode receber valores de peso de 2 a 6, sendo adotado para o estudo peso 3. No método adaptado, a modificação do parâmetro foi baseada em Borges et al. (2017), que utiliza a descrição de

Streck et al. (2008) para classificar os solos conforme a aptidão para disposição de resíduos. Essa metodologia considera que o risco de danos ambientais cresce com o aumento do grau de limitação nas características do solo, levando em consideração peculiaridades como drenagem, profundidade, textura, mineralogia, declividade, erodibilidade e aptidão agrícola. A partir das tipologias de solo, pode-se classificar como adequado, regular, restrito e inadequado para disposição de resíduos (Tabela 3).

A **Condutividade hidráulica (C)** - O parâmetro condutividade hidráulica foi substituído pela transmissividade do aquífero em função das características de descontinuidade e anisotropia do aquífero fissural. Pois, esse tipo de aquífero apresenta dificuldade de determinação da espessura saturada do aquífero, parâmetro necessário para calcular a condutividade hidráulica. Assim, alguns autores realizaram estudos de vulnerabilidade adotando a transmissividade como parâmetro de cálculo, já que foi observada forte correlação entre transmissividade

e condutividade hidráulica (Maia & Cruz, 2011; Borges et al. 2017). O cálculo da transmissividade foi realizado através do método Cooper & Jacob (1946), utilizando ensaios de bombeamento obtidos no CMP. Os cálculos da transmissividade

foram realizados no *software* AquiferTest 2016.1 (Schlumberger, 2018) e a elaboração do mapa de transmissividade foi realizada pelo método geoespacial *Krigagem* (Yamamoto & Landim, 2013).

**Tabela 3** - Classificação dos solos quanto a aptidão para disposição de resíduos (Extraído de Streck, 2008).

Tipo de solo	Classe
Latossolos, Nitossolos e Argissolos	Adequada
Latossolos médios, Argissolos, Cambissolos	Regular
Argissolos arenosos, Chernossolos, Luvisolos, Neossolos Regolíticos	Restrita
Planossolos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Flúvicos, Gleissolos, Organossolos	Inadequada

**O Método God** - O método GOD considera 3 parâmetros: grau de confinamento da água subterrânea (G), ocorrência de estratos de cobertura (O) e distância até o lençol freático (D). A classificação do índice GOD é identificada como insignificante (0 – 0,1), baixa (0,1 – 0,3), média (0,3 – 0,5), alta (0,5 – 0,7) e extrema (0,7 – 1,0), sendo a classe extrema a maior vulnerabilidade. O método GOD foi desenvolvido nas versões original (Foster & Hirata, 1993) e adaptada (Borges et al., 2017). Na forma adaptada foram alterados os parâmetros G e O.

No método original, o parâmetro G foi classificado como semiconfinado, enquanto que no adaptado a espessura do solo foi considerada como camada de cobertura do aquífero. As associações de solo observadas nesta camada de cobertura foram identificadas no estudo realizado por Santos et al. (2011).

Os solos mais espessos, tais como os nitossolos, reduzem a infiltração de contaminantes para o

aquífero, assim atribui-se a eles uma carga menor no cálculo da vulnerabilidade. Por outro lado, aos solos mais rasos, como os neossolos, cargas mais altas foram atribuídas.

Para o parâmetro O, método original, considerou-se a classe Franco Argiloso (Santos et al., 2011) como cobertura para toda a área de estudo. Enquanto que para o método adaptado foi utilizada a proposta de Streck et al. (2008), Tabela 3. A relação de dados utilizada no parâmetro D, método original e adaptado, é a mesma que foi utilizada no parâmetro D do método DRASTIC.

**O Métodos Drastic e God** - A comparação entre os métodos DRASTIC e GOD foi realizada conforme Borges et al. (2017), onde, o índice DRASTIC é normalizado para que seus valores variem de 0,1 a 1, da mesma forma que o método GOD. Assim, quanto maior o índice, maior é a vulnerabilidade da área; a normalização foi realizada através de divisão dos pixels do mapa DRASTIC por 230.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características hidrogeológicas dos 364 poços compreendidos na área de estudo, provenientes do CMP, mostram elevada variação do nível estático e da transmissividade (Tabela

4). Essa heterogeneidade corrobora com as observações em Hausman (1965), Reginato (2003), Neves (2005), Costa (2008) & Fernandes (2008) sobre aquíferos fissurais.

**Tabela 4** - Características hidrogeológicas da área de estudo.

Característica	Valor mínimo	Valor máximo	Valor médio
Nível estático (m)	1	162	32
Nível dinâmico (m)	4,3	250	72
Profundidade (m)	20	350	130
Entrada de água (m)	7	260	62
Vazão (m <sup>3</sup> /h)	0,2	39	6,7
Transmissividade (m <sup>2</sup> /h)	0,005	22	1,44
Capacidade específica (m <sup>3</sup> /h/m)	0,001	14,4	0,7

## Parâmetros do Método Drastic

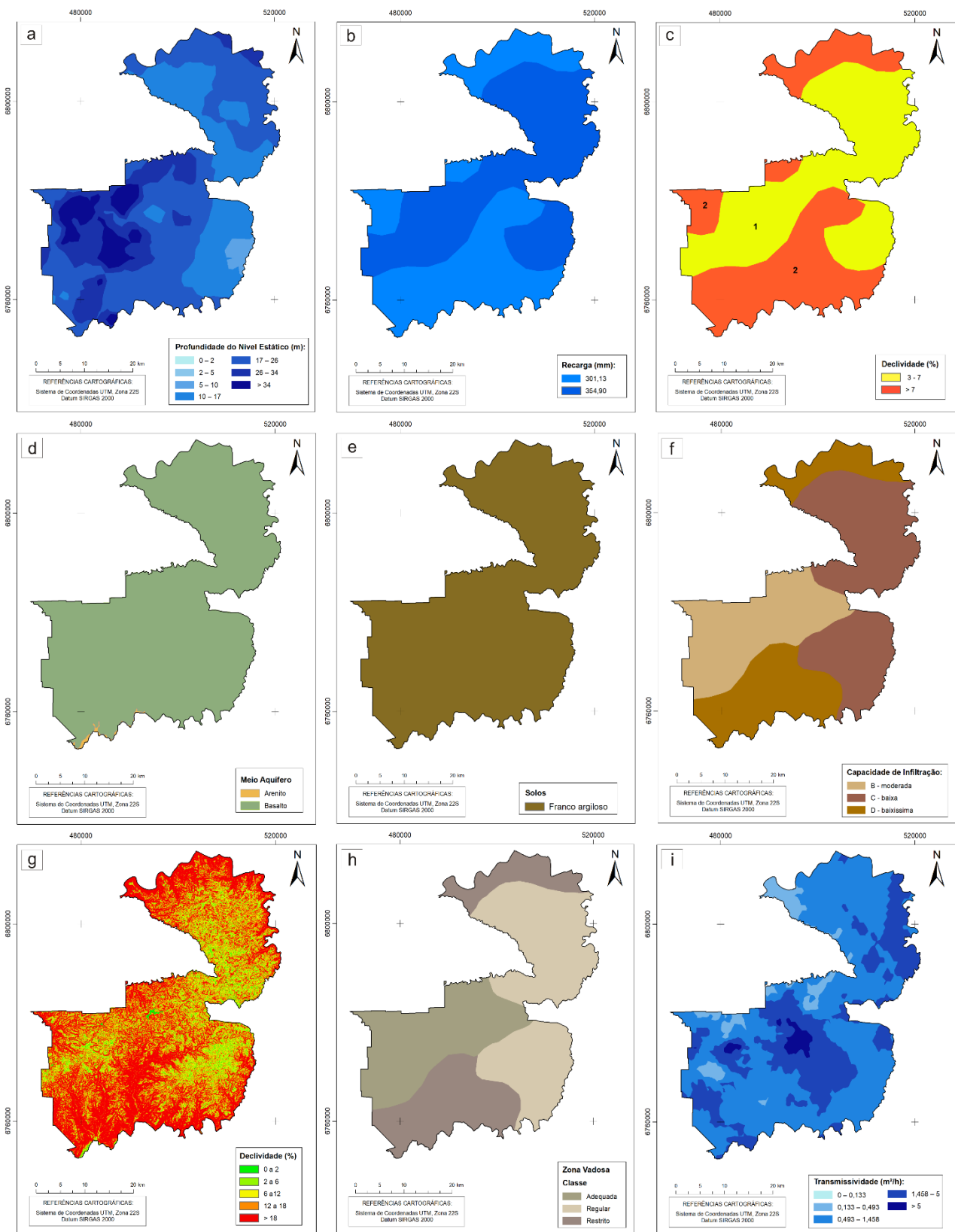
Os intervalos de classe, com as respectivas áreas de abrangência e os valores aplicados para os pesos e cargas de cada parâmetro estão representados na Tabela 5.

O **Nível estático** - As informações sobre o nível estático foram manipuladas utilizando a totalidade de poços selecionados (760). Nos dados observacionais existem poços com nível estático inferior a 5m, porém não são identificados valores inferiores a 5m na modelagem geoespacial. Essa diferença é produto das estimativas matemáticas (suavizadas) desenvolvidas pelo método

*krigagem*. Os valores interpolados foram separados em diferentes classes de intervalos de profundidade do nível estático, sendo que o intervalo entre 10 e 26m destacou-se por representar 60,5% da área de estudo, enquanto que as demais classes apresentam uma abrangência menos expressiva. A área urbana do município de Caxias do Sul concentra as maiores profundidades de nível estático (>26m), onde é observada uma geomorfologia com vales dissecados, enquanto que as profundidades menores (<10m) são observadas em ambiente rural, no setor sudeste da área de estudo (Figura 3a).

**Tabela 5** - Sumário dos intervalos utilizados nos índices DRASTIC com as respectivas áreas e porcentagens na área de estudo.

Classe	Peso	Carga	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>D - Profundidade do nível estático (m) (original e adaptado)</b>				
< 10	5	7	16,03	0,97
10-17		5	274,28	16,6
17-26		3	999,65	60,5
26-34		2	239,58	14,5
> 34		1	122,47	7,43
<b>R - Recarga (mm/ano) (original e adaptado)</b>				
301,13	4	7	749,35	46,70
354,90		8	855,26	53,30
<b>A - Meio aquífero (original e adaptado)</b>				
Arenito	3	6	82,57	0,5
Basalto		8	1.568,95	99,5
<b>S - Solo (original)</b>				
Franco argiloso	2	3	1.651,53	100
<b>S - Solo (adaptado)</b>				
Moderada	2	6	480,41	29,10
Baixa		3	697,37	42,24
Baixíssima		2	473,75	28,66
<b>T - Topografia - Declividade (%) (original e adaptado)</b>				
0 - 2	1	10	15,60	0,95
2 - 6		9	164,80	9,95
6 - 12		5	7,55	0,45
12 - 18		3	603,80	36,55
> 18		1	860,55	52,10
<b>I - Zona vadosa (original)</b>				
Franco argiloso	5	3	1.651,53	100
<b>I - Zona vadosa (adaptado)</b>				
Adequada	5	1	480,41	29,10
Regular		3	697,37	42,24
Restrita		6	473,75	28,66
<b>C - Transmissividade (m<sup>2</sup>/h) (original e adaptado)</b>				
0 - 1	3	1	689,68	41,74
1 - 3		2	826,76	50,02
3 - 5		4	82,09	4,97
5 - 10		6	43,75	2,65
10 - 22		8	10,27	0,62



**Figura 3** – Mapas paramétricos utilizados nos métodos DRASTIC original e adaptado.

A **Recarga** - A recarga da área de estudo foi obtida através do cálculo do balanço hídrico. Para tanto, foi necessária a determinação do escoamento superficial através da sobreposição das unidades geomorfológicas Planalto dos Campos Gerais e Serra Geral (Lisboa et al., 2003), ao mapa de declividade. Com base nessa

sobreposição observa-se que na unidade Planalto dos Campos Gerais predomina a classe de declividade entre 3 e 7%, enquanto que na Serra Geral prepondera a declividade maior que 7% (Figura 3c). Essas classes de declividade foram utilizadas no cálculo do escoamento superficial (Equação 2). Na região da unidade Planalto dos



Campos Gerais o escoamento superficial correspondeu a 538,16 mm/ano, ao mesmo tempo que nas regiões com unidade Serra Geral verificou-se 591,98 mm/ano. Portanto, a recarga anual calculada apresentou valores de 354,9 mm em 53,3% e 301,13 mm em 46,7% da área de pesquisa (Figura 3b).

**O Meio aquífero** - O meio aquífero da área de estudo foi definido através do mapeamento geológico (CPRM, 2010). Esse mapeamento identificou 99,5% da área pesquisada como Formação Serra Geral e somente 0,5% como Formação Botucatu (Figura 3d).

**O Solos** - O peso (valor 2) e a carga (valor 3) atribuídos ao solo no método DRASTIC original estão demonstrados na Tabela 5 e na Figura 3e. Por outro lado, o método DRASTIC adaptado utilizou como base a Tabela 2, na classificação dos solos quanto à capacidade de infiltração (Figura 3f). Como resultado, pode ser observada baixa capacidade de infiltração em 42,24% da área, moderada capacidade de infiltração em 29,1% e baixíssima capacidade de infiltração em 28,66%.

**A Topografia** - Na área de estudo foram identificadas declividades de 0 a 18% (Figura 3g). As maiores porcentagens ocorreram nos intervalos 12-18 (36,55%) e >18 (52,10%), mostrando que na maior parte da área avaliada foram aplicadas as cargas 1 e 3.

**A Zona vadosa** - O peso (valor 5) e a carga (valor 3) atribuídos a zona vadosa no método DRASTIC original estão demonstrados na Tabela 5. Enquanto que o DRASTIC adaptado (Figura 3h) apresentou na aptidão para disposição de resíduos as seguintes classes: regular em

42,24% (carga 3) da área de estudo, adequada em 29,1% (carga 1) e restrita em 28,66% (carga 6).

**A Transmissividade** - Para a elaboração do mapa da transmissividade foram selecionados 129 poços do CMP, que possuem ensaio de bombeamento conforme a NBR 12.244. A interpolação dos valores observados gerou a representação geoespacial com 5 classes de transmissividade: 0-1m<sup>2</sup>/h (41,74%), 1-3m<sup>2</sup>/h (50,02%), 3-5m<sup>2</sup>/h (4,97%), 5-10m<sup>2</sup>/h (2,65%) e 10-22m<sup>2</sup>/h (2,65%). Os valores mais elevados de transmissividade são identificados na área urbanizada (3-22m<sup>2</sup>/h), porém são menos representativos na extensão total da área de pesquisa (Figura 3i).

### Análise Comparativa Drastic Original e Adaptado

Aplicando álgebra de mapas nos sete parâmetros do índice DRASTIC, demonstrados na Figura 3, foi possível determinar os mapas de vulnerabilidade natural.

O método DRASTIC original resultou em quatro classes de vulnerabilidade: muito baixa em 55,78% da área de estudo, baixa em 41,85%, moderada em 2,36% e insignificante em apenas 0,01% (Tabela 6).

Nas regiões onde a vulnerabilidade foi identificada como moderada o nível estático está mais próximo à superfície do solo. Também, nessas regiões a recarga do aquífero é mais elevada (Figura 4a). Esses dois parâmetros, profundidade do nível estático e recarga do aquífero, possuem elevado peso na ponderação do método, influenciando diretamente no resultado da vulnerabilidade.

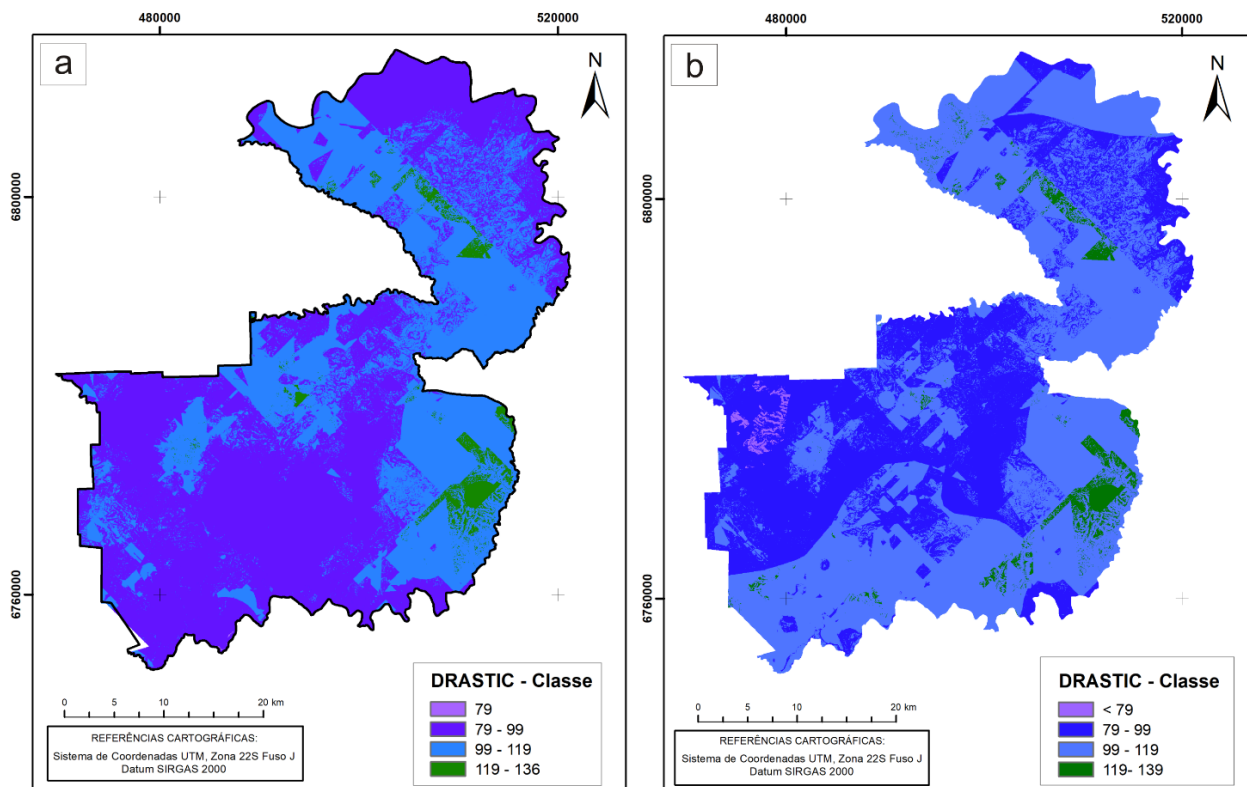
**Tabela 6** - Classes de vulnerabilidade DRASTIC.

Método/Classe	Insignificante <79	Muito Baixa 79 - 99	Baixa 99 - 119	Moderada 119 - 139
DRASTIC original	0,17 km <sup>2</sup>	921,65 km <sup>2</sup>	691,49 km <sup>2</sup>	39,00 km <sup>2</sup>
	0,01%	55,78%	41,85%	2,36%
DRASTIC adaptado	8,10 km <sup>2</sup>	648,69 km <sup>2</sup>	950,90 km <sup>2</sup>	44,61 km <sup>2</sup>
	0,49%	39,26%	57,55%	2,70%

O DRASTIC adaptado também resultou em quatro classes de vulnerabilidade, as mesmas do mapa gerado pelo método original. No entanto, as porcentagens de cada classe são diferentes: muito baixa em 39,26% da área de estudo, baixa em 57,55%, moderada em 2,7% e insignificante em 0,49% (Tabela 6). O parâmetro zona vadosa possui elevado peso na ponderação, desta maneira, esse parâmetro influenciou de forma bastante evidente na configuração final do mapa

de vulnerabilidade (Figura 4b). A classe moderada, da mesma forma como ocorreu no mapeamento do DRASTIC original, foi identificada nas regiões onde o nível estático está mais próximo à superfície do terreno, e nas áreas onde a recarga do aquífero é maior.

Ambos os métodos DRASTIC, original e adaptado, apresentaram as mesmas classes de vulnerabilidade (Figura 4), porém com variação na distribuição espacial e nos valores de porcentagem.



**Figura 4** – Mapa de vulnerabilidade método DRASTIC. Em (a) GRASTIC original e em (b) DRASTIC adaptado.

No método original a classe de vulnerabilidade predominante é a muito baixa, já no método adaptado prevalece a baixa.

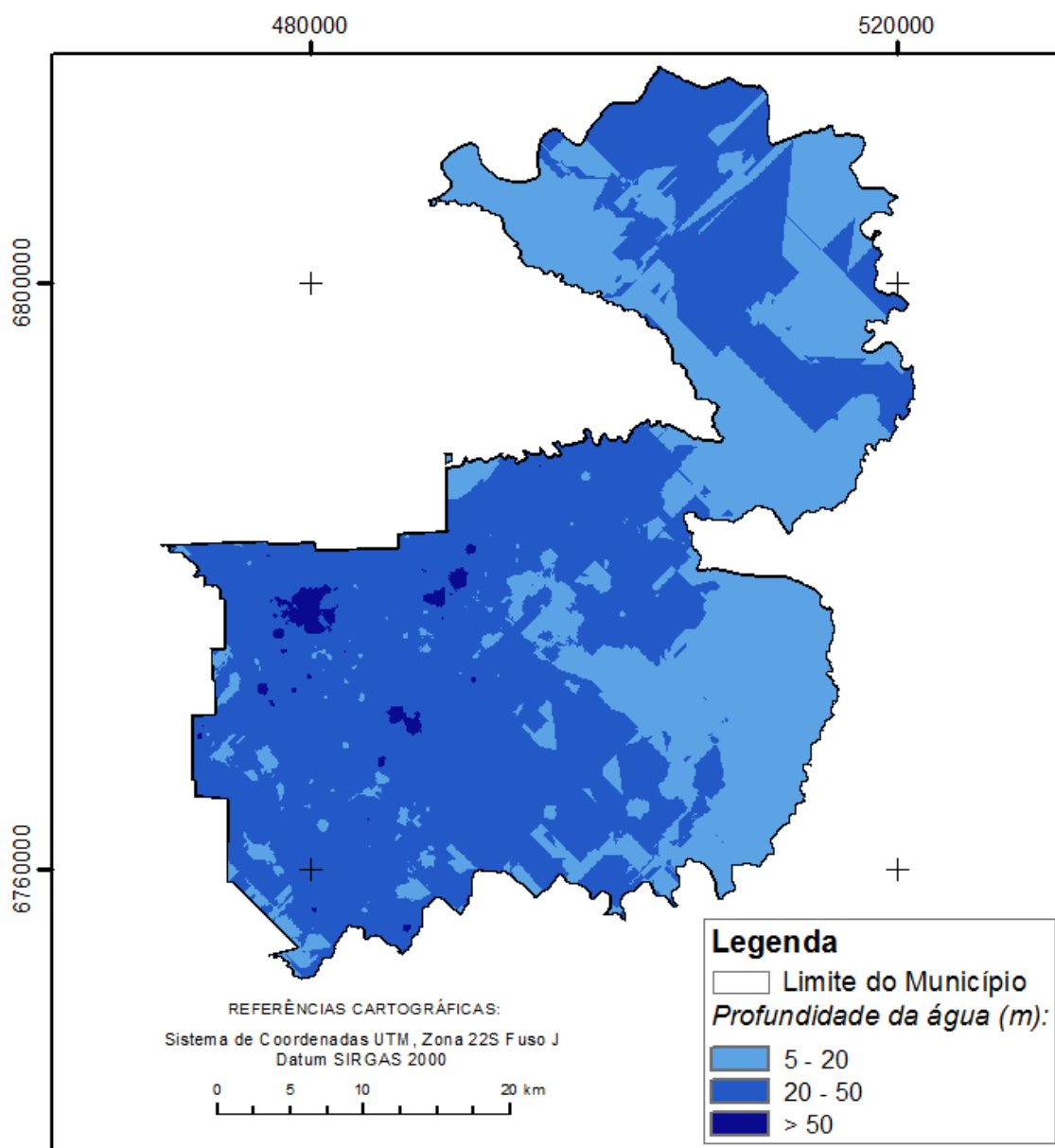
#### Parâmetros do Método GOD

As classes e pesos dos métodos GOD original e GOD adaptado, com as respectivas áreas de abrangência, identificados em cada parâmetro utilizado na álgebra de mapas podem ser observados na Tabela 7. A predominância entre 20 e 50 m

(62,8%) do nível estático pode ser identificada nas áreas sul, oeste, central e parcialmente ao norte, enquanto que os níveis mais rasos do NE ao leste e norte (Figura 5). As bases cartográficas utilizadas nos parâmetros G e O (adaptado) correspondem as características das bases aplicadas aos parâmetros S e I (adaptado) do método DRASTIC, respectivamente. No entanto, as cargas e pesos atribuídos na álgebra de mapas é distinta.

**Tabela 7** - Sumário dos intervalos utilizados nos índices GOD com as respectivas áreas e porcentagens na área de estudo.

Classe	Peso	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>G – Grau de confinamento (original)</b>			
Semiconfinado	0,4	1.651,53	100
<b>G – Grau de confinamento (adaptado)</b>			
RLe23	0,6	473,75	28,66
CHd1	0,8	697,37	42,24
NXd4	1	480,41	29,10
<b>O – Ocorrência de estratos de cobertura (original)</b>			
Franco argiloso	0,4	1.651,53	100
<b>O – Ocorrência de estratos de cobertura (adaptado)</b>			
Adequada	0,4	480,41	29,10
Regular	0,6	697,37	42,24
Restrita	0,8	473,75	28,66
<b>D – Distância até nível estático (m) (original e adaptado)</b>			
5-20	0,8	589	35,7
20-50	0,7	1037	62,8
>50	0,6	25	1,5



**Figura 5** – Representação dos intervalos de profundidade de água, parâmetro D.

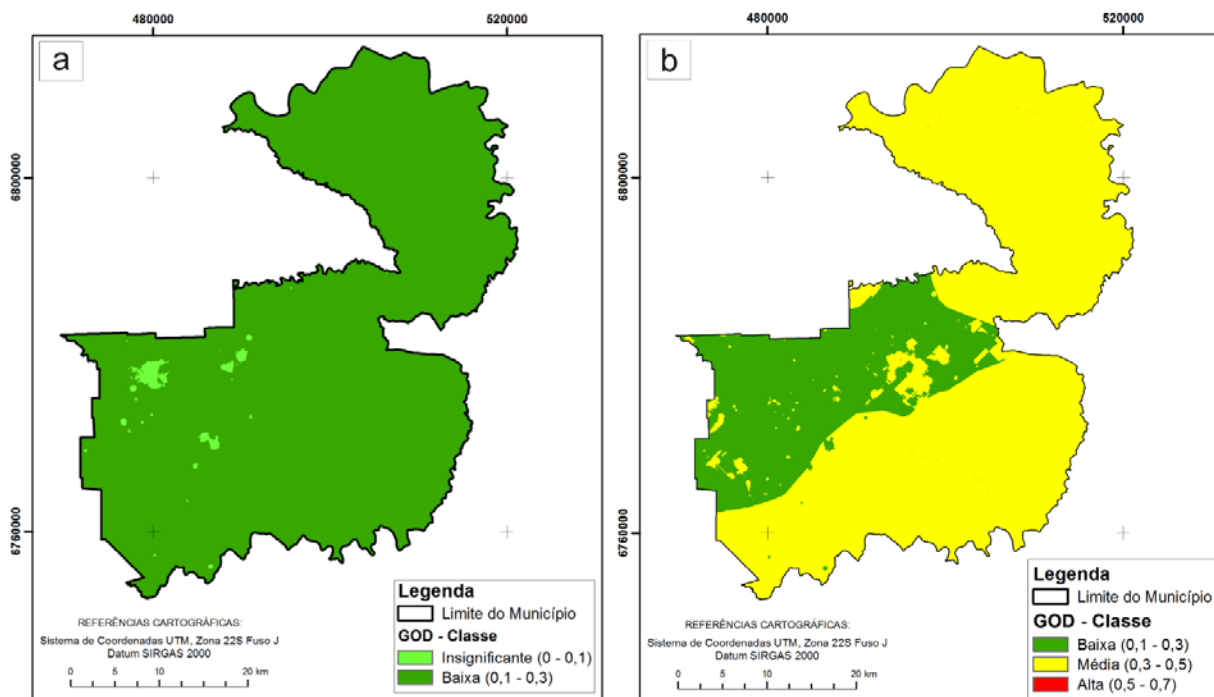
A Tabela 8 mostra que o método original apresentou vulnerabilidade baixa em 99,04% e insignificante em 0,96% do território avaliado (Figura 6a). A vulnerabilidade insignificante foi identificada nas regiões onde a profundidade do nível estático é superior a 50 m. Por outro lado, o método adaptado apresentou vulnerabilidade média em 74,19% da área, baixa em 25,80% e alta em 0,002% (Tabela 8). A alteração dos parâmetros G e O no método adaptado, utilizando as associações pedológicas, mostrou forte

influência na configuração final do mapa (Figura 6b).

Essa influência é observada no delineamento das classes, que é semelhante as demarcações identificadas no mapa de associações pedológicas. A elevada discrepância entre as estimativas dos métodos original e adaptado é reflexo do grau de detalhamento dos parâmetros G e O, já que no método original esses dois parâmetros receberam valores constantes em toda a área de estudo.

**Tabela 8** - Classes de vulnerabilidade GOD.

Método/Classe	Insignificante	Baixa	Média	Alta
GOD original	15,86 km <sup>2</sup>	1636,45 km <sup>2</sup>	-	-
	0,96%	99,04%	-	-
GOD adaptado	-	426,30 km <sup>2</sup>	1225,85 km <sup>2</sup>	0,03 km <sup>2</sup>
	-	25,8%	74,19%	0,002%



**Figura 6** – Mapa de vulnerabilidade método GOD. Em (a) GOD original e em (b) GOD adaptado.

### Comparativo entre os Métodos DRASTIC e GOD, Original e Adaptado

A normalização dos índices dos métodos DRASTIC, original e adaptado, entre 0 e 1 possibilitou a comparação com os índices observados no GOD original e adaptado. Esse comparativo mostra uma elevada disparidade entre o GOD original e os demais métodos, ocupando as classes normalizadas 0 – 0,1 e 0,1 – 0,2 (Tabela 9) (Figura 7c). Por outro lado, o GOD adaptado apresenta similaridade com o DRASTIC no intervalo normalizado 0,3 – 0,4 (Tabela 9). Como descrito no capítulo de metodologia, o método GOD classifica como média vulnerabilidade o intervalo 0,3 – 0,5. Sendo assim, agrupando os índices normalizados aos mesmos intervalos de classe GOD, observa-se que 93,55% (DRASTIC original), 91,71% (DRASTIC adaptado) e 74,05% (GOD adaptado) integram a classe de vulnerabilidade média. A influência dos parâmetros G e O é marcante na definição da classe média, no GOD adaptado. No entanto, a distribuição espacial dessa classe é díspar entre os métodos DRASTIC e GOD (Figura 7).

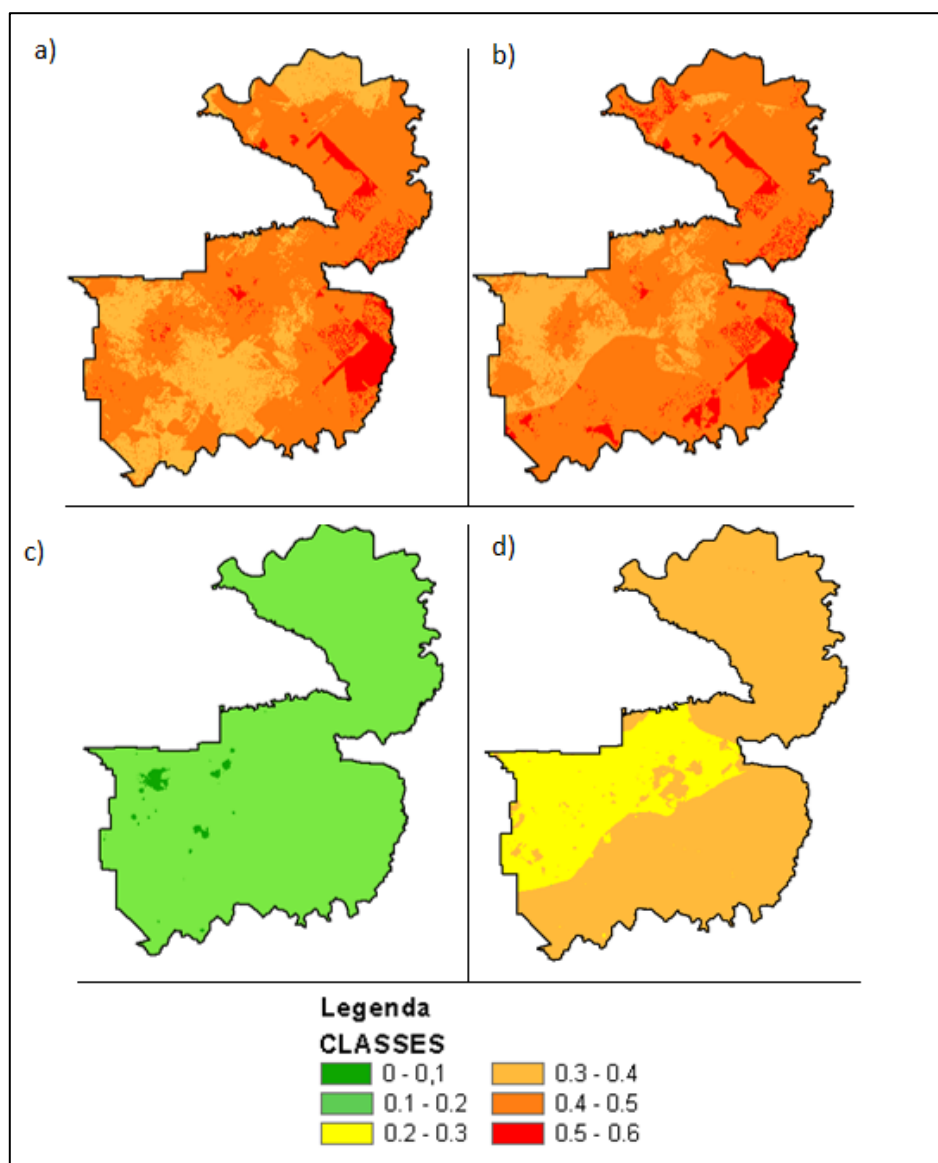
O método DRASTIC foi considerado como

melhor ajustado a área de estudo do que o GOD devido a robusta parametrização dos 7 parâmetros, que resulta na maior variabilidade de classes, desta forma, corroborando aos estudos realizados por Guiguer & Kohnke (2002), Reginato & Ahlert (2013) e Borges et al. (2017). No entanto, esse método apresenta superposição entre os parâmetros S e I, e também entre as variáveis R e T (DRASTIC adaptado). Essa circunstância pode subestimar ou superestimar a vulnerabilidade em determinadas regiões. Segundo Maia (2011), essas recorrências podem desenvolver uma tendência de índices repetidos ou valores muito próximos, em áreas com o mesmo tipo litológico.

Outro fator que deve ser considerado no comparativo entre os métodos DRASTIC e GOD é a forma de ponderação dos índices. O primeiro método utiliza a soma ponderada, enquanto o segundo realiza multiplicação entre os parâmetros. Borges et al. (2017), descreve que essa diferença do método de ponderação reflete em respostas matemáticas distintas, com produtos complexos para comparação.

**Tabela 9** – Índices de vulnerabilidade DRASTIC e GOD, normalizados.

Classe GOD		Insignificante	Baixa	Média	Alta		
Classe normalizada		0 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,3	0,3 – 0,4	0,4 – 0,5	0,5 – 0,6
DRASTIC	original	-	-	-	25,93%	67,62%	6,45%
	adaptado	-	-	-	16,42%	75,29%	8,29%
GOD	original	0,95%	99,05%	-	-	-	-
	adaptado	-	-	25,94%	74,05%	-	-



**Figura 7** – Comparativo cartográfico dos índices DRASTIC e GOD normalizados. Em (a) DRASTIC original, (b) DRASTIC adaptado, (c) GOD original e (d) GOD adaptado.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estimativas dos métodos DRASTIC indicaram detalhamento refinado, maior grau de variabilidade de classes e índices com valores mais elevados do que as estimativas observadas nas metodologias GOD, mostrando-se mais conservador e restritivo. Os métodos adaptados apresentaram marcante influência dos parâmetros Solos e Zona vadosa, no DRASTIC, e Grau de confinamento e Ocorrência de estratos de cobertura, no GOD, demonstrando a necessidade de uma avaliação criteriosa na determinação dos valores das cargas que são atribuídas ao cálculo de ponderação. A falta de um sistema mais detalhado na determinação da carga, considerando superposição de parâmetros e os tipos de litologia, pode refletir em um produto final superestimado ou subestimado.

A simplificação paramétrica do GOD em

relação ao DRASTIC, torna-se vantajosa em situações onde não é possível definir parâmetros com precisão, ou ainda, quando não existe disponibilidade de tempo, recursos financeiros e equipe apta para adquirir as informações que seriam necessárias em métodos mais complexos.

Apesar do método DRASTIC adaptado abranger uma elevada quantidade de parâmetros, entende-se que a estimativa da vulnerabilidade natural à contaminação poderia ser aperfeiçoada com a inserção do parâmetro Densidade de Lineamentos no cálculo de ponderação dos índices. Existe a aspiração de aprimorar essa pesquisa comparando as valiosas informações fornecidas nesse primeiro estudo, com estimativas futuras que considerarão a densidade de lineamentos na classificação da vulnerabilidade de aquíferos fraturados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul pela estrutura física e financeira disponibilizada para realização dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ABDESLAM, I.; CHEMSEDDINE, F.; DJABRI, L. Application of Drastic Method for Determining the Vulnerability of an Alluvial Aquifer: Morsott - El Aouinet North East of Algeria: Using for Arcgis Environment. **Energy Procedia**, v. 119, p. 308-317, 2017.
- AGRITEMPO. **Sistema de Monitoramento Agrometeorológico**. Embrapa e Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, Unicamp. Disp. em: <<https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/PesquisaClima/index.jsp?siglaUF=RS>>. Acessado em: 10mai2018.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETY, R.J.; HACKET, G. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution hydrological settings**. Preparado por National water well association para US-EPA Office of Research and Development, Ada, USA, 1987. 621 p.
- BATISTA, C.S.P.; GESUALDO, G.C.; LEITE, P.C.C.; LASTORIA, G.; GABAS, S.G.; CAVAZZANA, G. H.; DE SOUZA AZOIA, T. Aplicação do Método GOD para Avaliação de Vulnerabilidade de Aquífero Livre em Bacia Hidrográfica. 2005. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19, 2016. Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABAS, 2005.
- BORGES, V.M.; ATHAYDE, G.B.; REGINATO, P.A.R. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná – Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 327-337, 2017.
- CONICELLI, B. P. Gestão das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (SP). São Paulo, 2014. 163 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2014.
- COOPER, H.H. & JACOB, C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. **Transactions American Geophysical Union**, v. 27, p. 526-534, 1946.
- COSTA, W.D. Hidrogeologia dos meios fissurados. In: FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro, CPRM: LABHID, 2008. 812 p.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acessado em: 04abr2018.
- CPRM. **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**: Programa Geologia do Brasil. Brasília: CPRM, 2010. CD-ROM.
- CPRM. **Mapeamento geológico integrado da bacia hidrográfica do Guaíba**: carta geológica. Folha SH22-V-D-Caxias do Sul. Porto Alegre, 1998. Mapa, Escala 1:250.000.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS 10.4.1**. California, 2018.
- FELDKIRCHER, T.; LÖBLER, C.A.; DA SILVA, J.L.S. Aplicação do sistema GOD para determinar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do município de Teutônia (RS). **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 1137-1145, 2014.
- FERNANDES, A. J. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 29, n. 1/2, p. 49-72, 2008.
- FOSTER, S.S.D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 1987. **Actas...** Noordwijk Aan Zee, the Netherlands, 1987, p. 69-86.
- FOSTER, S.S.D. & HIRATA, R. Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes. São Paulo: **Instituto Geológico**, n. 10. v. 1. 92, p. 1993.
- GARCIA, C.; CONCEIÇÃO, F.T.; PEIXOTO, A.S.P. Vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos no município de Piracicaba, através do método GOD. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, p. 218-227, 2018.
- GODOY, M.M.; BINOTTO, R.B.; WILDNER, W. Projeto Geoparques: Geoparque Caminhos dos Cânions do Sul - Proposta. Porto Alegre: CPRM, 2011.
- GUIGUER, N & KOHNKE, M. W. Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12, São Paulo. 2002. **Anais...**São Paulo: ABAS, 2002.
- HAUSMAN, A. **Esboço hidrogeológico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, p. 37-71, 1965. (SEDEGEO).
- HIRATA, R. & FERNANDES, A.J. Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. In: FEITOSA, F.A.C.; FILHO, J.M.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro, CPRM: LABHID, 2008. 812 p.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativa de Censo Demográfico 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rs/caxias-do-sul.html>>. Acessado em: 17dez2020.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. Produto Interno Bruto dos Municípios de 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/caxias-do-sul/pesquisa/38/47001?indicador=47006>>. Acesso em: 17/12/2020.
- JAXA, Imagem Satélite LOS/PALSAR: Radar de abertura Sintética (SAR); Polarização (FBS): HH; ângulo de Nadir: 34,3°. 2011.
- JÚNEZ-FERREIRA, H.; GONZÁLEZ, J.; REYES, E.; HERRERA, G.S. A Geostatistical Methodology to Evaluate the Performance of Groundwater Quality Monitoring Networks Using a Vulnerability Index. **Mathematical Geosciences**, v. 48, n. 1, p. 25-44, 28 ago. 2015.
- KREBS, A.S.J. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC**. Florianópolis, 2004. 375 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina.
- LISBOA, N.A.; REMUS, M.V.D.; DANI, N.; CASTRO, J.W.; NETO, F.T. **Estudo geológico e hidrogeológico para o aproveitamento de água do aquífero Guarani no município de Caxias do Sul**. Relatório Final. Caxias do Sul, 2003. p.72.
- MAIA, P.H.P. & CRUZ, M.J.M. A new method for evaluating the vulnerability of aquifers. **Science Journal of Environmental Engineering Research**, [S.L.], p. 1-14, 2013. Disp. em: <<https://www.sjpub.org/sjeer/sjeer-250.pdf>>. Acessado em: 10jan2021.
- MAIA, P.H.P.; MOREIRA, M.J. Um novo método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 15, n. 2, p. 29-40, 2011.
- MAZIERO, L. **Levantamento da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos no município de Dona Francisca - RS**. Santa Maria. 2005. 115 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria.
- MELO JUNIOR, H.R. Método DRASTIC: uma proposta de escala para normatização dos índices finais de vulnerabilidade. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15. Natal. 2008. **Anais...**Natal: ABAS, 2008. p. 1-14.

- MOURA, P. **Vulnerabilidade de aquíferos: uso dos métodos DRASTIC e GOD na porção norte do complexo industrial e portuário do Pecém, Estado do Ceará**. Fortaleza, 2014. 128 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará.
- MURADÁS, K. **Análise de parâmetros para mapeamento de vulnerabilidade de contaminação das águas subterrâneas do aquífero Guarani nos municípios de Portão e Estância Velha/RS**. Dissertação de mestrado. São Leopoldo. 2011. 121 p. Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale dos Sinos.
- NEVES, M. A. **Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na bacia do rio Jundiá (SP)**. Rio Claro, 2005. 182 p. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- PACHECO, F.A.L.; PIRES, L.M.G.R.; SANTOS, R.M.B.; FERNANDES, L.F. Sanches. Factor weighting in DRASTIC modeling. *Science of the Total Environment*, v. 505, p. 474-486, 2015.
- REGINATO, P.A.R. **Integração de dados para prospecção de aquíferos fraturados em trecho da bacia hidrográfica Taquari-Antas (RS)**. Porto Alegre, 2003. 254 p. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- REGINATO, P.A.R.; LEÃO, M.I.; BORTOLIN, T.A.; DUTRA, T.O.; ATHAYDE, G.B.; ATHAYDE, C.V.M. Circulação da água subterrânea nas rochas vulcânicas da formação serra geral na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 15. Bento Gonsalves, 2018. **Anais...**Bento Gonsalves: ABGE 2015.
- REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. *Águas Subterrâneas*, v. 27, n. 2, P. 32-46, 2013.
- RIBEIRO, D. M.; ROCHA, W. F.; GARCIA, A. J. V. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do Rio Siriri, Sergipe. *Águas Subterrâneas*, v. 25, n. 1, p. 91-102, 2011.
- SANTOS, H.G.; CARVALHO JUNIOR, W.; DART, R.O.; AGLIO, M.L. D.; SOUSA, J.S.; PARES, J.G.; FONTANA, A.; MARTINS, A.L.S.; OLIVEIRA, A.P. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.
- SANTOS, R.G. **Geoprocessamento aplicado ao mapeamento do índice de vulnerabilidade DRASTIC, no Sistema Aquífero Guarani em Ribeirão Bonito - SP**. Rio Claro. 2014. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos**. Campinas, 2004. 189 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.
- SCHLUMBERGER. AquiferTest 2016.1. Texas, 2018.
- SILVA, F. & SILVÉRIO DA SILVA, J. L. **Estudo da Vulnerabilidade Natural das Águas Subterrâneas do Município de Bento Gonçalves - RS**. São Mateus. 2007. 67 p. Monografia (Graduação do LABHIDROGEO). UFSM.
- SILVA, J.L.S.; FILHO, L.L.V..D.; LORENSI, R.P.; CRUZ, J.C.; ELTZ, F.L.F. Vulnerabilidade do Aquífero Serra Geral à contaminação no município de Erechim - Rio Grande do Sul-Brasil. *Ciência e Natureza*, v. 35, n. 1, p. 10-23. 2013.
- STRECK, E.V; KAMPF, N., DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON E.; PINTO, LFS. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.
- TERRA, L.G.; SCHIAVO, B.N.V.; FERNANDES, G.D.; BORBA, W.F. & SILVA, J.L.S. Estimativa da vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero no município de São Sepé-RS. *Revista Monografias Ambientais – REMOA*, v. 15, n.1, p. 85-93, 2016.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, v. 38, n. 1, 55-94, 1948
- VARGAS, T. DE, GASPARETTO, M. G., BELLADONA, R., ADAMI, M. V. D. Aplicação do Interpolador IDW para Elaboração de Mapas Hidrogeológicos Paramétricos na Região da Serra Gaúcha. *Sci. cum Ind.* v. 6, p. 38–43, 2018.
- YAMAMOTO, J.K. & LANDIM, P.M.B. **Geostatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 215 p., 2013.

*Submetido em 5 de maio de 2021*

*Aceito para publicação em 15 de setembro de 2021*