

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
MESTRADO EM CIÊNCIA DO SOLO**

NOELLEN HALASTHER MENEGON

**VULNERABILIDADE NATURAL DOS PONTOS DE RECARGA DO AQUÍFERO
GUARANI NA ÁREA URBANA DE LAGES- SC**

LAGES

2022

NOELLEN HALASTHER MENEGON

**VULNERABILIDADE NATURAL DOS PONTOS DE RECARGA DO AQUÍFERO
GUARANI NA ÁREA URBANA DE LAGES- SC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.
Orientador: Prof^a. Mari Lucia Campos
Coorientador: Prof. Marcos Benedito Schimalski

**LAGES, SC
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Menegon, Noellen Halasther

Vulnerabilidade natural dos pontos de recarga do aquífero
guarani na área urbana de Lages - SC / Noellen Halasther
Menegon. -- 2022.
32 p.

Orientadora: Mari Lucia Campos

Coorientador: Marcos Benedito Schimalski

Coorientador: David José Miquelluti

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages,
2022.

1. Vulnerabilidade. 2. Águas subterrâneas. 3. Sistema
Aquífero Guarani. I. Campos, Mari Lucia. II. Schimalski,
Marcos Benedito. Miquelluti, David José. III. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do
Solo. IV. Título.

NOELLEN HALASTHER MENEGON

**VULNERABILIDADE NATURAL DOS PONTOS DE RECARGA DO AQUÍFERO
GUARANI NA ÁREA URBANA DE LAGES- SC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

BANCA EXAMINADORA



Orientador:

Prof.ª. Mari Lucia Campos

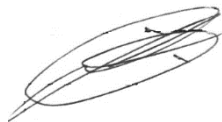
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC
Centro de Ciências Agroveterinárias - CAV



Membros:

Prof. Leonardo Josoé Biffi

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC
Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV



Dr. Ilton Agostini Júnior

Polícia Militar Ambiental - Lages, SC

Lages, 26 de agosto de 2022.

RESUMO

A importância da preservação das águas subterrâneas está cada vez maior devido a importância econômica e social através da crescente exploração dos aquíferos para abastecimento público, industrial e agrícola. Este trabalho visa fornecer subsídios para a gestão das águas do Sistema Aquífero Guarani (SAG) do município de Lages-SC, a partir da identificação de suas áreas de recarga acompanhado do mapeamento da vulnerabilidade natural do SAG, através do método GOD adaptado. A área de estudo é o perímetro urbano, situado na região norte do município de Lages-SC. As vulnerabilidades apresentadas foram insignificantes 40,62 km² (42,92%), baixa 40,16 km² (42,43%) e médio 13,87 km² (14,65%). Porém em quase a sua totalidade apenas duas classes foram apresentadas: insignificante e baixa. O predomínio dessas menores classes, é atribuído pelas formações geológicas, com rochas basálticas e seus produtos de intemperização, na constituição. E pela limitação do método, pois ao longo do mapa algumas dessas variáveis foram as mesmas. Por isso, sugere-se a execução de ensaios a campo objetivando a validação das informações encontradas para as classes de vulnerabilidade com a aplicação de diferentes métodos.

Palavras-chave: Águas subterrâneas; Vulnerabilidade; Sistema Aquífero Guarani.

ABSTRACT

The importance of preserving the industrial and economic measures is increasing importance and social exploitation of the increases, public and growing. This visa provides complements for the management of the waters of the Guarani Aquifer System (SAG) in the city of Lages-SC, from the identification of their recharge areas accompanied by the mapping of the natural vulnerability of the SAG, working through the adapted GOD method. The study area is the urban perimeters, located in the northern region of the city of Lages-SC. The vulnerabilities presented is insignificant 40,62 km² (42,92%), low 40,16 km² (42,43%), middle 13,87 km² (14,65%). However, almost all of them, only two classes were performed: insignificant and low. The predominance of these smaller ones is attributed by the geological formations, with basaltic rocks and their products of intemperation, to the extent. And for the long limitation of some methods, because at the same time several variables were the same. Therefore, it is suggested to carry out field tests aiming at the validation of information for the vulnerability classes with the application of different methods.

Keywords: Groundwater; Vulnerability; Sistema Aquífero Guarani.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Regiões Hidrográficas de Santa Catarina, suas respectivas sub-bacias e o perímetro do município de Lages (A) e a localização da área de estudo (B).	15
Figura 2 - Seção Hidrogeológica do SAG confinado	16
Figura 3 - Processo do mapa de vulnerabilidade natural.	20
Figura 4 - Localização da área de estudo (A), mapa geológico e afloramento do sistema aquífero guarani (B).	22
Figura 5 - Perímetro urbano de Lages-SC (A) e Zonas aquíferas da formação Serra Geral, sob o domínio do Aquífero Serra Geral no perímetro urbano (B).	24
Figura 6 - Mapa de vulnerabilidade a contaminação das águas subterrâneas do perímetro urbano de Lages-SC.	25
Figura 7 - Mapa de uso e ocupação do solo do perímetro urbano do município de Lages-SC.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICR	Índice de Concentração de Rugosidade
IDW	Inverse distance weighted
IR	Infravermelha
MDT	Modelo Digital de Terreno
NE	North-Eastern
NW	North-West
RH	Região Hidrográfica
RH4	Região Hidrográfica 4
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SASG	Sistema Aquífero Serra Geral
SG	Serra Geral
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIGSC	Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	13
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	13
3.2	VULNERABILIDADE NATURAL	13
3.3	GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA.....	14
4	MATERIAL E MÉTODOS	18
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
6	CONCLUSÃO	28
7	REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são de importância estratégica para o abastecimento público. Por esse motivo, o Sistema Aquífero Guarani (SAG) constitui uma das unidades hidroestratigráficas mais essenciais da porção meridional do continente sul-americano. A unidade ocupa uma área superior a 1.000.000 km² que se estende pela Argentina, Brasil, Uruguai e Paraguai (LUNARDI *et al.*, 2019). Sendo um aquífero confinado, coberto sobre cerca de 90% da sua área de ocorrência pelos mais extensos derrames de rochas vulcânicas do mundo, que ocorreram na região durante o Jurássico Superior e Cretáceo Inferior (DA CUNHA REBOUÇAS; AMORE, 2002).

Segundo os autores Almeida e Silva (2009), apesar da grande magnitude do Aquífero Guarani, as reservas de água subterrânea encontradas no estado de Santa Catarina não se restringem apenas a este complexo, outro importante reservatório de água subterrânea é o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) os dois sistemas apresentam vazões significativas que tornam economicamente viável a perfuração de poços e exploração das águas. Dessa maneira, é fundamental, levar em consideração que, ao contrário do caráter quase totalmente confinado do SAG, as águas do Serra Geral são exploradas através de poços relativamente rasos e normalmente têm ligação direta com as águas da superfície, isto as torna, como já mencionado, muito mais acessíveis. Porém, muito mais vulneráveis aos processos de contaminação, tanto pelas próprias fraturas das rochas como, frequentemente, devido a defeitos construtivos dos poços (SCHEIBE; HIRATA, 2008).

O SASG representa um aquífero fraturado associado às rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, condicionados por zonas de fraturas e estruturas primárias, enquanto o SAG está associado às rochas sedimentares, pertencentes principalmente à Formação Botucatu, podendo ser considerado um aquífero granular com porosidade primária, mas influenciado por estruturas tectônicas que dão origem a uma porosidade secundária e a possibilidade de conexão com o SASG (TOMASI; ROISENBERG 2019). Além do mais, a conectividade hidráulica entre esses sistemas, proporciona um aproveitamento das águas subterrâneas muito maior do que apenas do SAG (SCHEIBE e HIRATA, 2008).

O conhecimento a respeito das características hidrogeológicas das áreas de recarga desses sistemas é fundamental, dado que nas zonas de recarga direta a água

infiltra a partir dos afloramentos de rocha arenítica a partir da água da chuva ou por rios que atravessam estas rochas (ROCHA *et al.*, 2019).

Por esse motivo, as áreas de recarga necessitam de monitoramento e controle, pois as principais fontes poluidoras da Região Serrana são os esgotos urbanos, os despejos industriais e o assoreamento, resultado do desmatamento e do manejo inadequado do solo (ALMEIDA; SILVA, 2009).

Os Mapas de Vulnerabilidade dos pontos de recarga do aquífero Guarani refletem informações de conhecimento hidrogeológico, sendo destinado a fornecer informações sobre as águas subterrâneas e o meio ambiente, constituindo-se em um instrumento adequado para os recursos hídricos subterrâneos e o seu desenvolvimento social e político. A preservação de áreas de recarga de aquíferos está relacionada à proteção contra fontes poluentes e a manutenção dos mecanismos de recarga que dependem diretamente da integridade física do solo (ALMEIDA; SILVA, 2009).

Considerando o exposto, este trabalho visa fornecer subsídios para a gestão das águas do SAG do município de Lages, Santa Catarina, a partir da identificação das áreas de recarga do SAG seguido do mapeamento da vulnerabilidade natural do SAG, tornando possível indicar as áreas de alta, média e baixa vulnerabilidade natural à contaminação.

Essas informações poderão contribuir na gestão do uso das águas subterrâneas na cidade, assim como identificar possíveis conexões existentes entre os diferentes aquíferos explorados na região.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo localizar e caracterizar os pontos de recarga do Aquífero Guarani do município de Lages no Estado de Santa Catarina e fornecer subsídios para a gestão das águas do SAG do município, tornando possível indicar as áreas de alta, média, baixa e insignificante vulnerabilidade natural à contaminação.

2.2 Objetivos Específicos

Gerar um modelo para avaliação da vulnerabilidade dos pontos de recarga do aquífero do município de Lages/SC;

Mapear a vulnerabilidade natural à contaminação do município;

Contribuir na gestão do uso das águas subterrâneas na cidade, assim como identificar possíveis conexões existentes entre os diferentes aquíferos explorados na região.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Lages está inserida na Região Hidrográfica 4 (RH4) em Santa Catarina, a RH 4 é a maior Região Hidrográfica em extensão do estado, possui 22.766 km² também integra duas bacias, rio Canoas, que corresponde a área de 14.908 km² e do rio Pelotas com área de 7.277 km² em território catarinense. O rio Canoas tem a qualidade de suas águas comprometida em alguns trechos devido ao lançamento de efluentes domésticos e industriais, além dos resíduos resultantes das atividades agrícolas e pecuárias (SDS, 2018).

A área de estudo, é o perímetro urbano de Lages, o qual possui a extensão de 56 Km² e está situada na região norte do município de Lages e inserida na Bacia do Rio Canoas (Figura 1), sendo constituída por derrames basálticos da Formação Serra Geral que está sobreposto ao SAG, na Bacia do Paraná, o qual compõe-se predominantemente de arenitos das formações Piramboia e Botucatu (LEITE, *et al.*, 2021).

Segundo a classificação climatológica de Köppen, essa região apresenta clima mesotérmico úmido com predominância do tipo Cfb, temperado com verões amenos. A precipitação média anual é de 1.300 mm a 1.500 mm e os tipos de solos são Cambissolos, Argissolos e Latossolos com topografia predominantemente suave-ondulada, onde sua paisagem é na grande maioria ocupada por campos de altitude com fragmentos de floresta ombrófila mista, destacando-se as matas de araucária (SDR, 2003).

3.2 VULNERABILIDADE NATURAL

O termo vulnerabilidade natural se caracteriza como o menor ou maior nível de estabilidade/instabilidade dos elementos bióticos e físicos, juntamente com a dinâmica, intensidade e magnitude dos processos morfogênicos e pedogênicos, que

atuam em cada unidade ecodinâmica¹ (GRIGIO, 2003). Existem alguns parâmetros físicos relevantes ao estudo da vulnerabilidade, como a degradação e erosão do solo causados pela intervenção entre o uso, vegetação e forças erosivas (SERRÃO *et al.*, 2019). As atividades antrópicas na superfície do terreno modificam os mecanismos de recarga dos aquíferos e introduz outros, alterando a taxa, a frequência e a qualidade da recarga do aquífero (FOSTER *et al.*, 2006).

Por tanto, a vulnerabilidade natural consiste na análise integrada dos elementos do meio físico e à capacidade de manutenção de sua estabilidade ecodinâmica frente aos diferentes usos antrópicos do território, gerando zonas com diferentes vulnerabilidades que necessitam de diferentes ações de planejamento estratégico (GUERRERO *et al.*, 2021).

Deste modo, o mapeamento da vulnerabilidade em determinado território, possibilita a identificação de áreas suscetíveis a possíveis impactos ambientais, tornando-se uma ferramenta importante ao planejamento ambiental e ordenamento territorial (SERRÃO *et al.*, 2019).

3.3 GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

Segundo a CPRM (2012), o SAG está confinado pelas litologias resultantes dos derrames vulcânicos que compõem a Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral desde a região carbonífera próxima do litoral até a região da divisa norte com o Estado do Paraná (Figura 2).

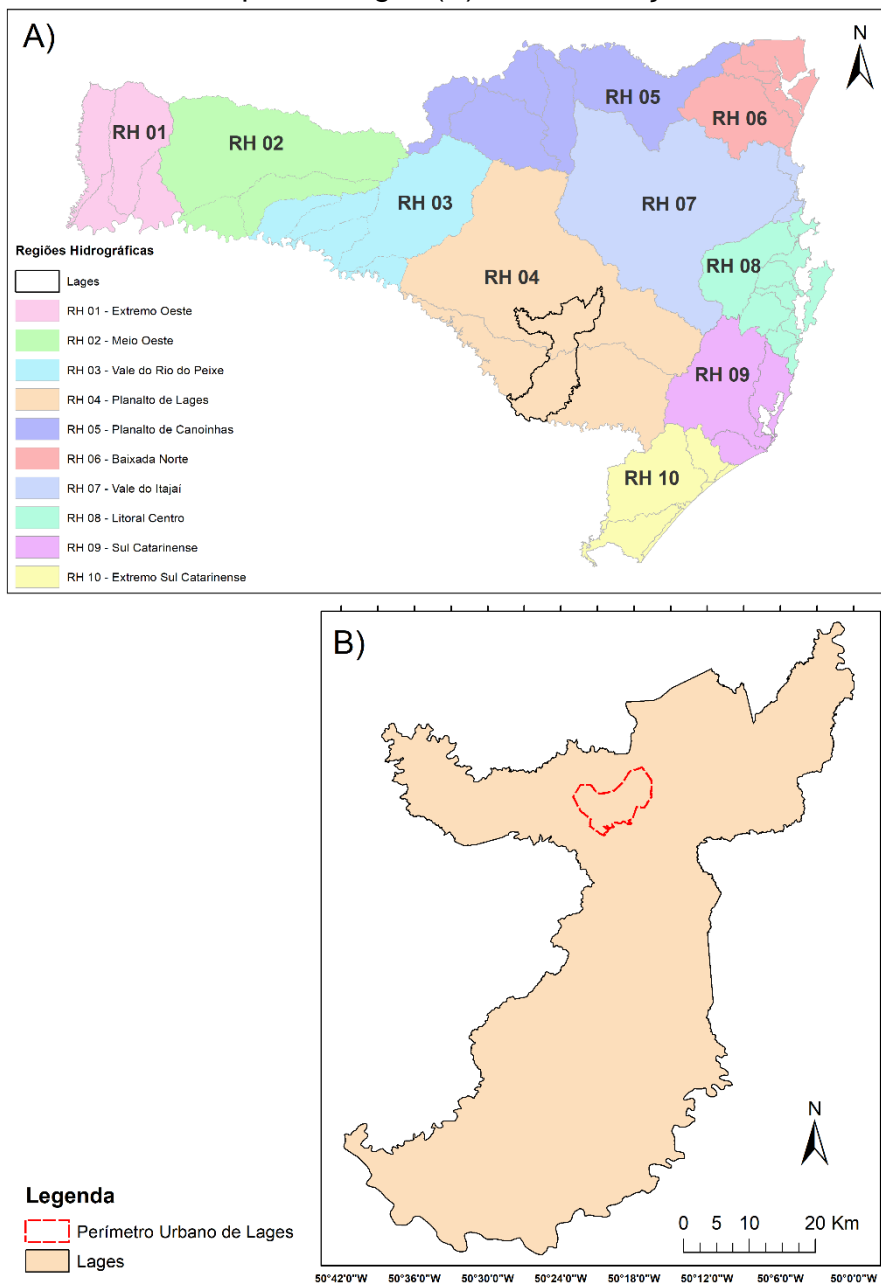
O SAG aflora em uma faixa estreita na região correspondente à borda dos derrames vulcânicos de Santa Catarina, entre a região carbonífera no sudeste e o norte do Estado. Este sistema aquífero é constituído por duas unidades hidroestratigráficas: Botucatu e Piramboia, sendo que nas áreas aflorantes ocorrem exclusivamente litologias correspondentes ao Botucatu (CPRM, 2012).

A Formação Botucatu é caracterizada por arenitos eólicos finos a médios, quartzosos a localmente feldspáticos, bem selecionados e com cores em tons avermelhados, uma vez que, no topo dessa porção, geralmente os arenitos se intercalam de forma concordante com as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral,

¹ A Ecodinâmica busca aliar os processos da morfogênese e pedogênese dos meios a fim de classificá-los dentro de uma faixa Estável, Intermediário e Instável, considerando todos os fatores que formam a paisagem, onde esta é considerada um produto das relações existentes (LIMA *et al.*, 2014).

dando origem aos corpos lenticulares de arenitos interderrames. (TOMASI; ROISENBERG, 2019). A Formação Serra Geral é constituída por rochas vulcânicas, resultado de sucessivos derrames continentais, que constitui o SASG, formado predominantemente por rochas basálticas da formação homônima (LOPES; SCHEIBE, 2008).

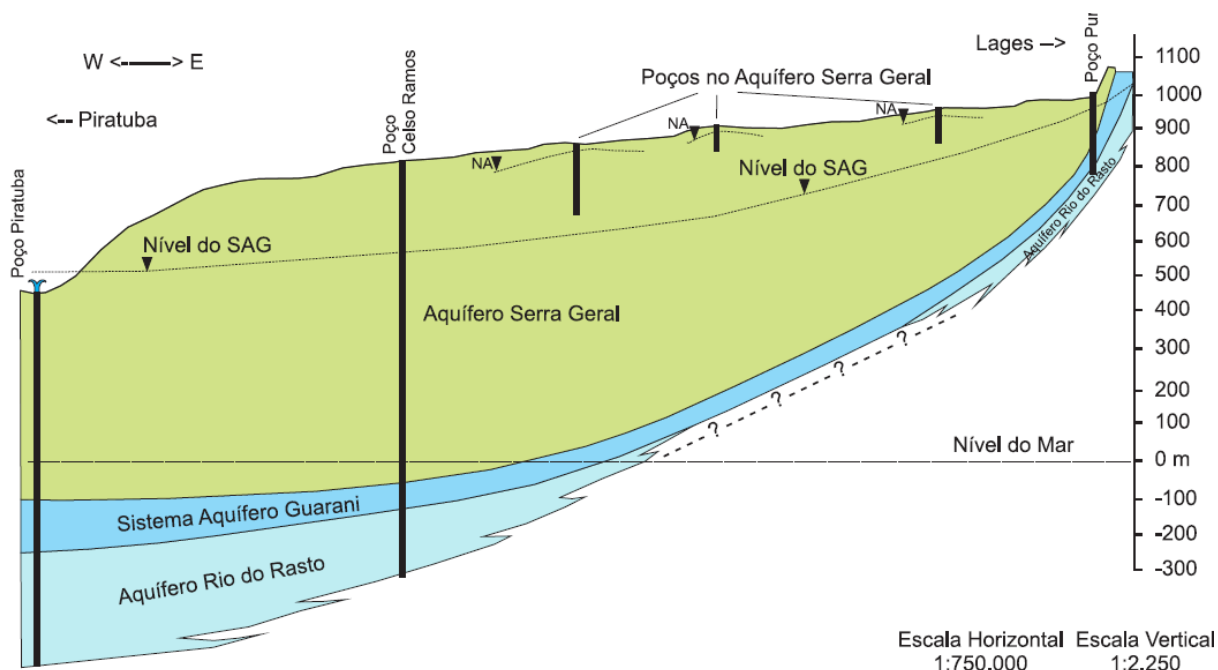
Figura 1 - Regiões Hidrográficas de Santa Catarina, suas respectivas sub-bacias e o perímetro do município de Lages (A) e a localização da área de estudo (B).



Fonte: Adaptado de Santa Catarina (2018).

A formação Piramboia é composta por arenitos de coloração esbranquiçada e de granulação fina a média, possuindo fração argilosa maior na parte inferior do que na parte superior, onde localmente ocorrem arenitos grossos (AMARAL, 2018).

Figura 2 - Seção Hidrogeologica do SAG confinado



Fonte: CPRM (2012).

A Unidade Hidroestratigráfica Rio do Rasto distribui-se ao longo da faixa de afloramentos das rochas sedimentares gonduânicas, assentando-se diretamente sobre a unidade Teresina, e na sua porção superior em contato exclusivamente com a formação Botucatu (CPRM, 2012).

Desse modo, geralmente, a melhor situação para a ocorrência de água subterrânea se dá quando há vários pequenos derrames empilhados, separados por brechas e arenitos intertrápicos, interceptados por fraturas tectônicas, em terrenos de topografia suavizada e pouco dissecada. As piores condições de ocorrência de água subterrânea acontecem em terrenos declivosos e dissecados, com derrames bastante espessos e maciços (FREITAS *et al.*, 2002).

Da mesma forma, os solos influenciam diretamente na infiltração de águas para aquíferos. Além disso, características como textura granulométrica, forma do relevo e espessura/profundidade dos solos influenciam diretamente na quantidade e rapidez de infiltração de águas advindas da superfície (GUARANI, 2020).

A profundidade do solo influencia diretamente a capacidade de armazenamento de água, assim, de acordo com Guarani, 2020 a profundidade do solo é outro importante descritor a ser utilizado no cálculo de vulnerabilidade, pois quanto maior sua espessura/profundidade, associada a presença de matéria orgânica, argilas e população bacteriana, maior será o tempo de percolação da água até o aquífero subjacente.

Outro indicador importante para o cálculo da vulnerabilidade é o Índice de Concentração de Rugosidade (ICR), ele representa as unidades homogêneas do relevo quanto à dissecação com base na distribuição espacial da declividade. Este índice permite delimitar, classificar e quantificar unidades de relevo, com base na distribuição espacial da declividade, que é entendida como padrões de rugosidade (HUBNER *et al.*, 2019).

Portanto, a qualidade das águas depende principalmente do controle de resíduos urbanos, agrícolas, industriais, que se não forem bem manejados, podem chegar até os corpos hídricos e contaminar as águas subterrâneas por infiltração, dependendo da textura, estrutura, estabilidade dos agregados e profundidade dos solos (CORDEIRO *et al.*, 2021).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados dos poços tubulares compõem a base na qual se apoiaram as interpretações das unidades hidroestratigráficas que compõem o SAG e o SASG, obtidos pelo SIAGAS. Juntamente com os limites das unidades hidrográficas de Santa Catarina foram adquiridos através da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), o perímetro urbano de Lages, foi adquirido no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e a base hidrográfica da região, onde sustentou-se a maioria da pesquisa, foi disponibilizada pela Agência Nacional das Águas (ANA). Todos os dados foram adquiridos gratuitamente pelos sites das referidas instituições em formato vetorial *shapefile*, e foram georreferenciados no DATUM SIRGAS 2000 UTM Zona 22s.

Deste modo, foi gerado um Modelo Digital de Terreno (MDT) com uma resolução de 1 metro/pixel proveniente do levantamento aerofotogramétrico do Estado de Santa Catarina, desenvolvido durante os anos de 2010 a 2012 foi feita a partir do site Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC), apesar das imagens não serem recentes, a precisão é maior, o qual foi priorizado neste estudo, para atingir um nível de detalhamento mais eficiente.

Utilizou-se como camada máscara o arquivo *shapefile* contendo a área de pesquisa acrescida de um *buffer* de 1 km, logo, a área total do *buffer* é aproximadamente 95 km², que buscou dar sobreposição lateral aos produtos interpretados a partir do MDT e melhor considerar aquelas estruturas que ocorrem próximas aos limites da área de estudo. A partir do MDT gerado, foi obtido o mapa de declividade da área, que envolve a determinação da inclinação do terreno em relação ao plano horizontal. Esse mapa foi construído com o *software* ArcGis v.10.8, utilizando ferramentas de análise espacial a partir do MDT.

A reprodução das estruturas foi realizada através de interpretação de modelos digitais de elevação feita com base na metodologia adotada por Nanni (2008). Dessa maneira, as interpretações foram subdivididas em 2 diferentes escalas de trabalho, 1:80.000 e 1:20.000, as imagens produzidas em pequenas escalas servem para a análise de grandes estruturas de cunho regional, e as de grande escala são apropriadas para detalhamentos estruturais.

Primeiramente, foi realizada a interpretação das estruturas lineares de tendência NW por escaneamento segundo iluminação de NE, seguido da interpretação de lineamentos de tendência NE a partir da iluminação por NW. As duas interpretações foram unidas em uma única camada vetorial e, finalmente foi feito um ajuste de posição para as estruturas segundo a iluminação de Norte.

Por meio da ferramenta *Inverse distance weighted* (IDW) presente no *software* ArcGis v.10.8, foram definidos intervalos de valores predefinidos pelo método estatístico “quantil”, obtendo-se assim os intervalos estatísticos de cada quartil para definir classe de densidade de fraturamento.

Posteriormente, o ICR foi produzido em ambiente SIG com base na análise do relevo, proposto primeiramente por Sampaio e Augustin (2014) e adaptado por Flores e Oliveira (2016) que sugerem que a variabilidade espacial da declividade, denominada de rugosidade, fornece indicativos acerca da variabilidade das estruturas geológicas subjacentes.

A utilização dessa técnica como ferramenta para o mapeamento geomorfológico tem como vantagem a inexistência de interpretação, já que o resultado depende exclusivamente da resolução do dado de entrada, que é o MDT (SAMPAIO e AUGUSTIN, 2014). Essas informações buscaram dar confiabilidade ao processo de interpretação das estruturas tectônicas, tanto da análise dos dados realizados a partir do MDT, quanto do banco de dados (GUARANI, 2020).

Assim como o estudo de Lopes e Scheibe (2015), usando como referência o método de caracterização da vulnerabilidade apresentado por Foster et al. (2006), chamado de GOD, que considera como descritores: Grau de confinamento da água subterrânea; Ocorrência de estratos de cobertura e Distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado, nesta pesquisa, considerando a insuficiência de informações e as características da área, foi necessária uma adaptação do método GOD. Por conseguinte, um quarto passo é acrescentado na adaptação da metodologia GOD, capaz de reduzir a pontuação geral em algumas áreas de alta vulnerabilidade, a densidade de fraturas ou lineamentos e as características de textura e profundidade dos solos, que fornecem informações sobre teor de argila e sobre a espessura dos solos (LOPES e SCHEIBE, 2015).

Estes ajustes no método foram os mesmos adotados no projeto Rede Guarani (2020), onde realizou-se o mapeamento geológico-estrutural e avaliação da

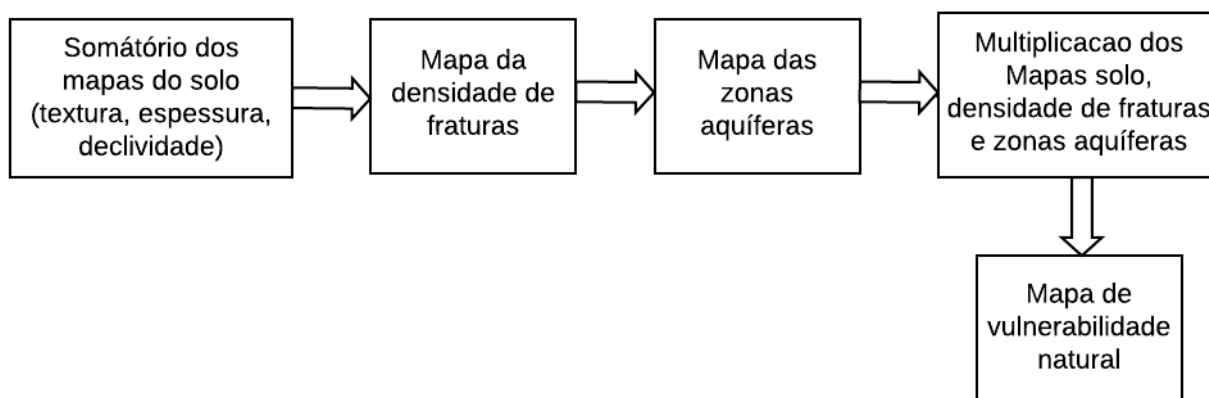
vulnerabilidade natural e do risco à contaminação da área de ocorrência do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral (SAIG/SG) no oeste de Santa Catarina. Os descritores com essa característica são: Água disponível nos solos, Espessura/profundidade da cobertura de materiais intemperizados, Declividade do terreno, Densidade de fraturas e a Classificação de zonas aquíferas segundo o Mapa Hidrogeológico do Estado de Santa Catarina (CPRM, 2012). Porém, como a área de estudo é muito menor, foi necessária uma adaptação dos descritores, o qual foi utilizado também por Lopes e Scheibe (2015), conforme a Tabela 1.

Para este descritor, foram utilizados os valores de profundidade de solo descritos no Mapa de Solos de Santa Catarina (EMBRAPA, 2004), tendo em vista que solos pouco profundos possuem maior vulnerabilidade e solos profundos, menor vulnerabilidade. Para a parte urbanizada, considerou-se solos com baixa profundidade (GUARANI, 2020).

Sendo assim, a classificação das zonas aquíferas foi definida pelo Mapa Hidrogeológico de Estado de Santa Catarina (CPRM, 2012), foi utilizada como descritor da vulnerabilidade natural, por se tratar de uma classificação com base na potencialidade aquífera das unidades geológicas presentes na área de estudo (GUARANI, 2020).

Logo, gerado todos os mapas foi necessário a conversão dos polígonos para o formato *raster* para finalmente, calcular o índice de vulnerabilidade, baseado nos trabalhos de Guarani, 2020 e de Lopes e Scheibe (2015), conforme a Figura 3.

Figura 3 - Processo do mapa de vulnerabilidade natural.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Por fim, realizou-se o mapeamento do uso do solo, este estudo seguiu as diretrizes recomendadas pelo Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013), que nesta área de estudo considera 5 categorias: áreas antrópicas não agrícolas, áreas antrópicas e agrícolas, área de vegetação natural, corpos d'água e outras áreas.

Para o mapeamento do uso do solo, foi utilizado o banco de dados do Aerolevante do Estado de Santa Catarina, formado por um mosaico de fotografias aéreas IR ortorretificadas, com resolução espacial de 0,39 metros, realizado entre os anos de 2010 e 2012, confeccionados pela Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico Sustentável (SANTA CATARINA, 2012). Para tratamento dos dados foram utilizadas técnicas de geoprocessamento por meio do software ArqGis 10.8.

Tabela 1 - Classes e índices de vulnerabilidade a contaminação.

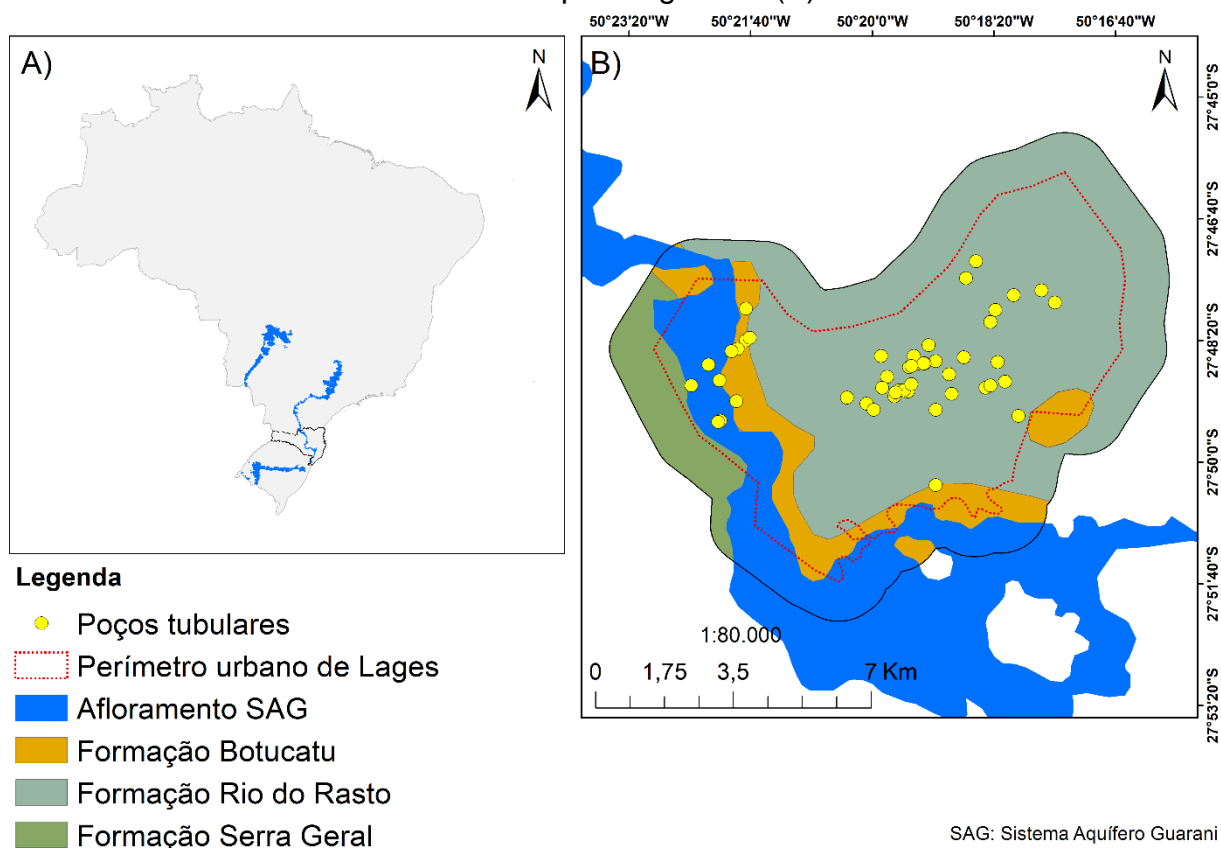
Descritor		Classe	Vulnerabilidade
Solo	Textura	Média	0,5
		Argilosa	0,3
		Muito argilosa	0,1
	Espessura	<60cm	1,0
		60 a 150cm	0,8
		>150cm	0,5
	Declividade	Plano (0% - 2%)	0,4
		Suave ondulado (2% - 8%)	0,35
		Ondulado (8% - 20%)	0,3
		Forte ondulado (20% - 45%)	0,2
		Montanhoso (45% - 75%)	0,15
		Escarpado (>75%)	0,1
Densidade de fraturas	Pouco fraturado	0,4	
	Moderadamente fraturado	0,6	
	Muito fraturado	0,8	
Zonas aquíferas	Intensamente fraturado	1,0	
	Não aquífera	0,4	
	Aquífero pouco produtivo	0,6	
	Aquíferos fraturados e sedimentares com média a baixa produtividade	0,8	

Fonte: Adaptado de GUARANI (2020)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo o Sistema de Informações de Água Subterrâneas (SIAGAS/CPRM) há 85 poços tubulares presentes no município de Lages-SC, esses poços são destinados ao uso doméstico e industrial, variando em sua profundidade de 70 m a 200 m. Apenas 46 poços tubulares estão localizados na área urbana e estão distribuídos nas diferentes unidades litoestratigráficas (Figura 4). Somente 5 estão em aquífero fissural, 40 estão em aquífero poroso e um não foi possível obter dados detalhados. Ao longo do estudo, constatou-se que 7 poços se encontram no afloramento da SAG, os quais são áreas de recarga direta do Aquífero Guarani.

Figura 4 - Localização da área de estudo (A), mapa geológico e afloramento do sistema aquífero guarani (B).



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A identificação de áreas, com maior capacidade de proporcionar recarga de forma direta do aquífero, foi feita através do uso de sistemas de informações geográficas. É importante ressaltar, que as áreas com maior vulnerabilidade são as áreas de recarga direta por exporem diretamente os pacotes de arenitos, permitindo assim a entrada direta de poluentes como lançamento de esgotos, agrotóxicos entre

outros. Áreas urbanas e industriais onde ocorrem o domínio de afloramentos de arenito representam riscos elevados à contaminação das águas que percolam para as reservas subterrâneas necessitando então de estudos detalhados para a regulação dos usos nestas áreas (BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004).

Embora a unidade hidrogeológica fundamental, os aquíferos são frequentemente subdivididos, uma determinada formação geológica frequentemente apresenta variações litológicas, locais ou regionais, alterando suas capacidades aquíferas (DINIZ *et al.*, 2014).

Segundo a CPRM (2012) na perspectiva dos recursos hídricos subterrâneos, a área de estudo encontra-se inserida na Unidade Hidroestratigráfica da Serra Geral, sob o domínio do Aquífero Serra Geral, apresentando as seguintes zonas aquíferas: (1) aquíferos fraturados com média a baixa produtividade, com vazões típicas de 2 a 15 m³.h⁻¹, e de grande a média importância hidrogeológica local; (2) aquíferos pouco produtivos, com vazão média de 3 m³.h⁻¹, de pequena importância hidrogeológica local; (3) aquíferos sedimentares com média a baixa produtividade, com vazões típicas de 1 a 3 m³.h⁻¹, com grande importância hidrogeológica local; e (4) não aquíferos de produtividade desprezível e pouca importância hidrogeológica local (Figura 5).

A determinação matricial do mapa final de vulnerabilidade a contaminação natural considerou o cruzamento das bases temáticas matriciais que constituem os 3 descritores considerados na matriz de cálculo apresentada o índice de vulnerabilidade (Figura 6). Sendo classificado como: até 0,1 - insignificante; 0,1 a 0,3 - baixa; 0,3 a 0,5 - média; 0,5 a 0,7 - alta; e 0,7 a 1,0 – extrema (GUARANI, 2020).

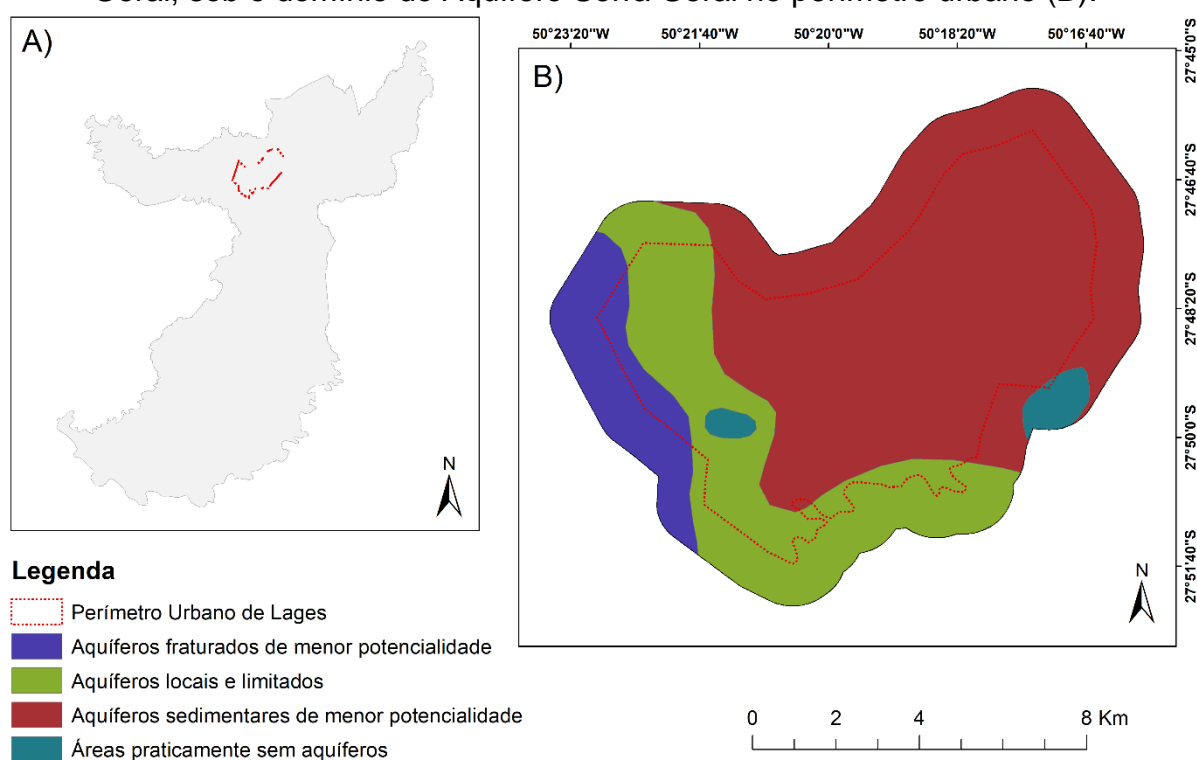
Diante disso, pode-se observar que o índice de vulnerabilidade variou de baixo para insignificante, sendo um total de e 40,62 km² (42,92) e 40,16 km² (42,43%), respectivamente. E somente 13,87 km² (14,65%) para vulnerabilidade média no *buffer* da área de estudo.

Entretanto, esperava-se uma vulnerabilidade maior nas áreas de afloramento do SAG (Tabela 2). Uma vez que, nestas regiões existem áreas de relevo plano e suave ondulado, sustentadas por espessos solos arenosos, muito friáveis, permeáveis e com baixa capacidade de retenção de poluente (DE OLIVEIRA BRAGA *et al.*, 2018)

Ao considerar técnicas de caracterização da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, recomenda-se considerar que, em maior ou menor grau, toda

água subterrânea é vulnerável à contaminação (FOSTER *et al.* 2006). As áreas com média vulnerabilidade representam que a área é vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados (CANOVA e SALAZAR, 2018). Levando em conta o ponto de vista científico, os resultados seriam mais consistentes quando se avaliam a vulnerabilidade para cada tipo de contaminante, ou, sendo isso inacessível, para cada classe de contaminante ou para cada grupo de atividades separadamente (LOPES e SCHEIBE, 2015).

Figura 5 - Perímetro urbano de Lages-SC (A) e Zonas aquíferas da formação Serra Geral, sob o domínio do Aquífero Serra Geral no perímetro urbano (B).



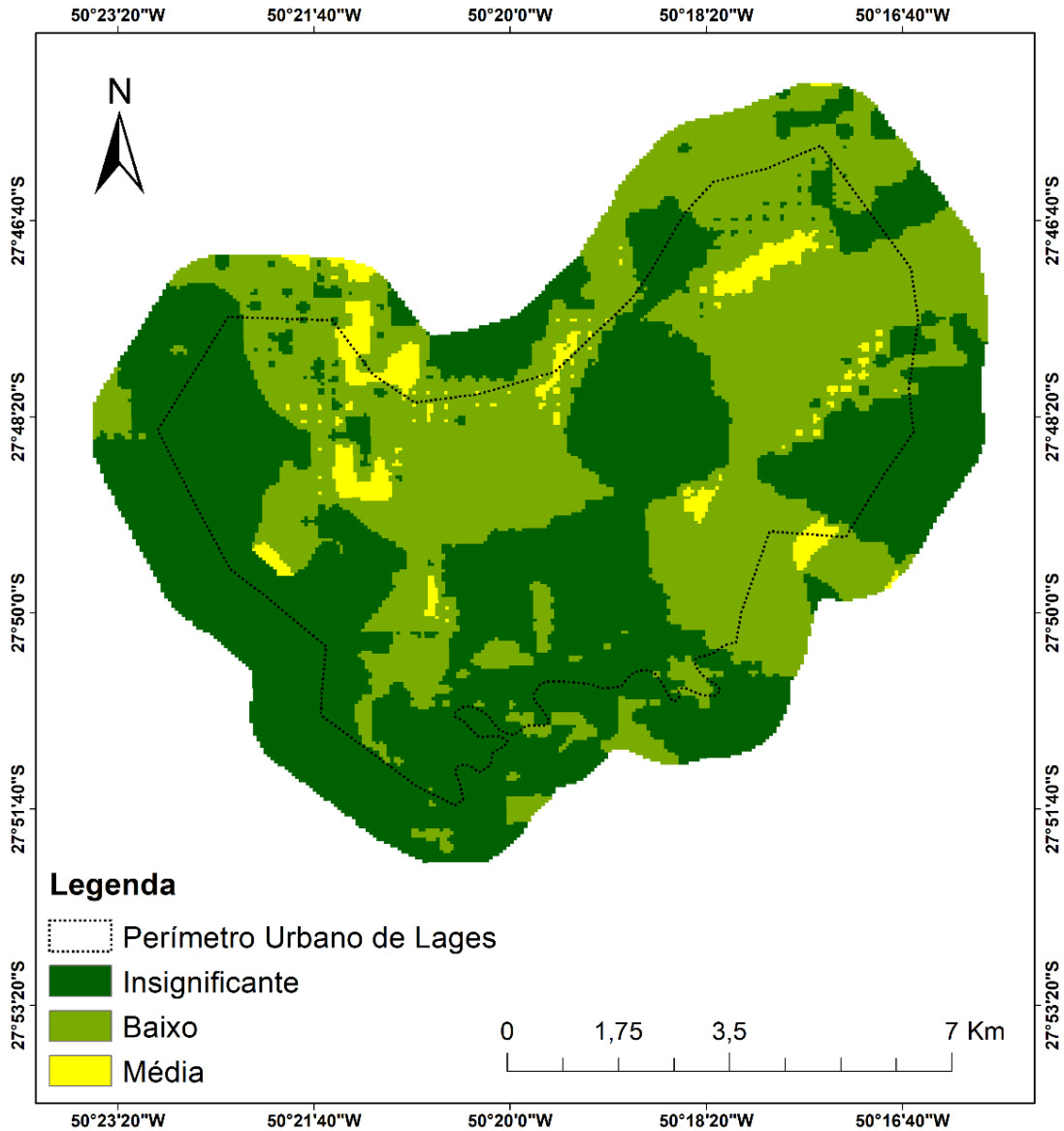
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Tabela 2 - Resultado da vulnerabilidade a contaminação dos poços tubulares que estão no afloramento do SAG em coordenadas geográficas latitude e longitude.

Cadastro CPRM nº:	Vulnerabilidade	Coordenadas X	Coordenadas Y
4300019121	insignificante	-50,3747	-27,8158
4300019126	insignificante	-50,3683	-27,8147
4300019127	Baixo	-50,3644	-27,8194
4300024228	insignificante	-50,3656	-27,8081
4300024231	insignificante	-50,3708	-27,8111
4300024237	Média	-50,3681	-27,8239
4300024240	Média	-50,3686	-27,8242

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 6 - Mapa de vulnerabilidade a contaminação das águas subterrâneas do perímetro urbano de Lages-SC.



Entretanto, como citam os autores Lopes e Scheibe (2015), fazer mapas de vulnerabilidade para cada tipo específico de contaminante ou grupo de contaminantes geram uma infinidade de representações para cada área, o que impediria a análise. Contudo, ainda deve-se levar em consideração aspectos tais como a quantidade e qualidade dos dados, e os recursos humanos e financeiros, para a avaliação da vulnerabilidade de um aquífero (FOSTER *et al.*, 2006).

Outra possibilidade de a maior parte do mapa ter dado resultado da vulnerabilidade insignificante e baixo, pode ser a mesma ocorrência da pesquisa de Canova e Salazar (2018), ou seja, devido à repetição dos valores das variáveis. Sendo

pouca a variação dos descritores do solo, a textura e espessura, sendo argilosa (0,3) e 60 a 150cm (0,8), respectivamente.

Os autores Fernandes *et al.* (2019), Bandeira *et al.* (2021) e Pereira (2021), também encontraram em seus estudos na região sob a Formação Serra Geral um predomínio das classes de vulnerabilidade de insignificante a baixa para os municípios do estado do Rio Grande do Sul. O predomínio dessas menores classes, é atribuído pelas formações geológicas, com rochas basálticas e seus produtos de intemperização, na constituição. Isso, na maioria das vezes proporciona uma maior proteção do meio subterrâneo, com aquífero confinado e níveis profundos de água (FERNANDES *et al.*, 2019).

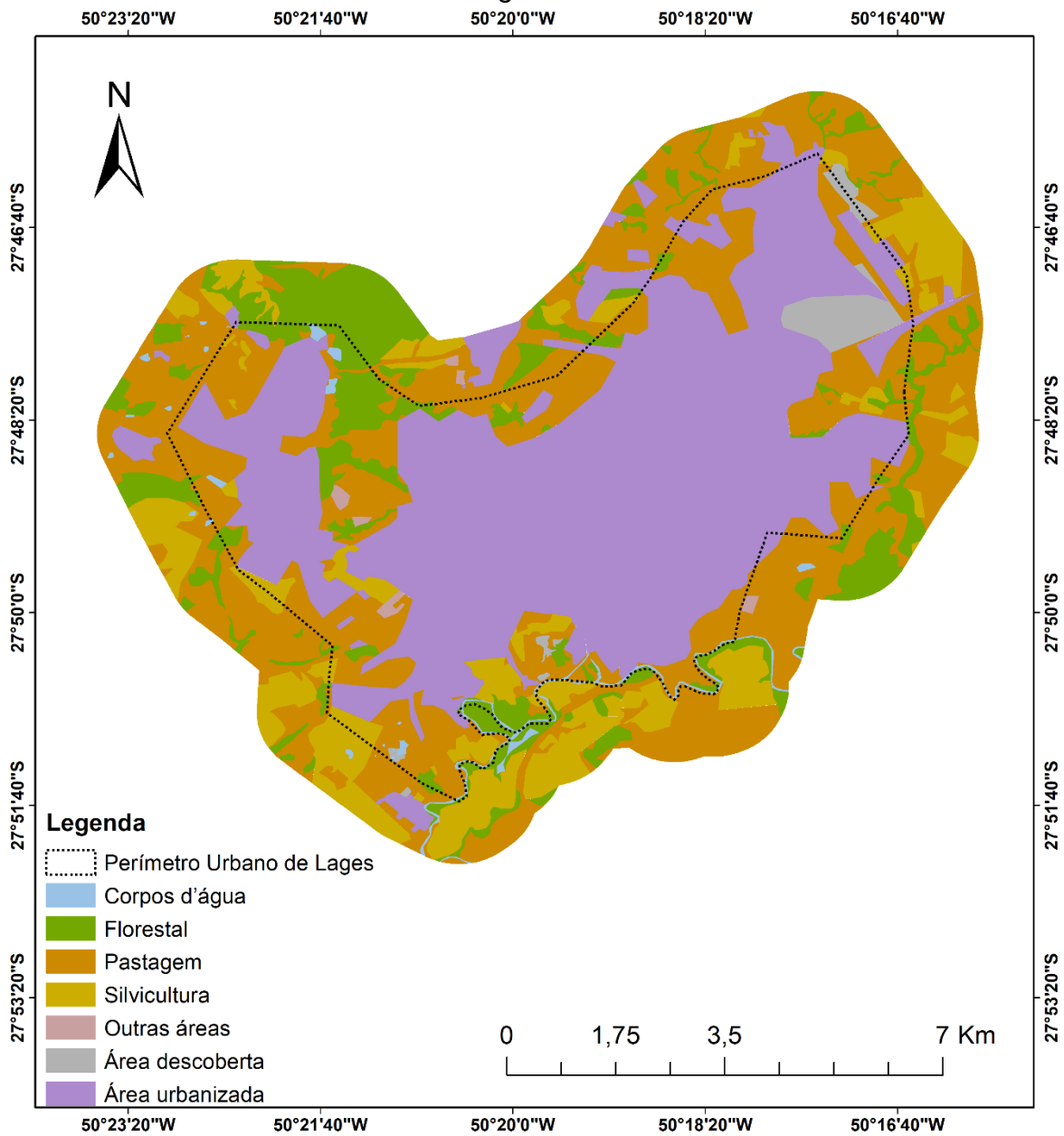
É importante ressaltar que o poço tubular não é o que torna a área onde ele está instalado vulnerável, porém ele é uma via direta entre o contaminante e o aquífero (CANOVA e SALAZAR, 2018). Portanto, mesmo não havendo altos riscos de vulnerabilidade das águas subterrâneas no perímetro urbano de Lages, é importante o constante monitoramento da região de estudo, a fim de reduzir impactos antrópicos que possam favorecer o contato de poluentes às águas dos aquíferos (BACKES e MIGLIORINI, 2022).

Entretanto, vale destacar que até a publicação deste estudo, não foi possível encontrar dados de vulnerabilidade natural da unidade hidroestratigráfica Rio do Rasto, para comparação dos resultados. Sendo que, segundo o SIAGAS/CPRM, 37 dos poços tubulares presentes na área de estudos, são oriundos da formação Rio do Rasto.

Por fim, através das fotografias aéreas IR ortorretificadas do SIGSC e do software ArqGis 10.8, foi construído manualmente o mapa do uso e ocupação do solo do perímetro urbano de Lages-SC (Figura 7). Assim, observando a Figura 7 e 6, nota-se que grande parte onde foi classificado como área urbanizada, há baixo e médio grau de vulnerabilidade, entretanto algumas áreas foram classificadas como vulnerabilidade insignificante, isso ocorre devido aos valores utilizados nessas áreas para o mapa de vulnerabilidade foram extremamente escassos, não havendo muita variação nas variáveis dos descritores do solo. Então para trabalhos futuro, sugere-se coleta de solo em pontos estratégicos para um maior aprofundamento, sendo que, apenas os dados dos poços também não foram suficientes para um maior detalhamento no estudo.

Vale ressaltar que os estudos de vulnerabilidade a contaminação não tratam diretamente a questão dos parâmetros físicos, químicos e bacteriológicos da água, que são os principais parâmetros de qualidade de água a serem destacados na potabilidade da água portanto esse tipo de estudo poderá ser utilizado como instrumento prévio para a gestão e o planejamento dos recursos hídricos.

Figura 7 - Mapa de uso e ocupação do solo do perímetro urbano do município de Lages-SC.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

6 CONCLUSÃO

Com a aplicação das metodologias GOD adaptada foi possível estimar a vulnerabilidade natural do SAG à contaminação no município de Lages-SC, porém em quase a sua totalidade apenas 2 classes de vulnerabilidade, insignificante e baixa. Isso se dá, pela limitação do método as variáveis, pois ao longo do mapa algumas classes foram as mesmas. Por isso, sugere-se a execução de ensaios a campo objetivando a validação das informações encontradas para as classes de vulnerabilidade com a aplicação de diferentes métodos.

Para pesquisas futuras, sugere-se a melhoria da qualidade e controle das informações obtidas através da perfuração de poços tubulares, para estudos em escalas de maior detalhe. Recomenda-se elaboração de bases de sistema de informação geográfica mais detalhadas para a área de estudo principalmente em relação ao tipo de solo e as zonas de recarga direta, assim como aquisição de dados mais aprofundados quanto ao uso e ocupação de solo e as fontes de contaminação.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Ronaldo Bento Gonçalves; SILVA, Daniel José. Análise de áreas mais propícias à recarga do Sistema Aquífero Guarani na região hidrográfica do Planalto de Lages (SC): subsídios para a gestão das águas subterrâneas. 2009. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis.

AMARAL, Leila Carolina Martoni et al. Blocos hidrogeológicos do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral em Santa Catarina. 2018.

BACKES, Elizete Marley; MIGLIORINI, Renato Blat. SISTEMA AQUÍFERO PARECIS: VULNERABILIDADE NATURAL E RISCO À CONTAMINAÇÃO. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 93-117, 2022.

BANDEIRA, Nantýara; CENTENO, Luana; CECCONELLO, Samanta. Mapeamento da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do município de Jaguarão/RS. **Revista Ambientale**, v. 13, n. 4, p. 58-72, 2021.

BORGHETTI, Nádia; BORGHETTI, José; DA ROSA FILHO, Ernani. Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul. 2004.

CANOVA, Ângelo Vianeí; SALAZAR, Rodrigo Fernando dos Santos. Avaliação da vulnerabilidade á contaminação das águas subterrâneas do município de Ibirubá-RS. **OS DESAFIOS DA CIÊNCIA E EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA BRASILEIRA**, 2018.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Mapa hidrogeológico do estado de Santa Catarina. 2012.

CORDEIRO, Ana; REZENDE, Giana; MAGALHÃES, Ana; HOFFART Márcia; JUNIOR, Ricardo; Vagner Paz MENGUE, SILVA, Tatiana; TORQUINST, ALVES, Carlos; IESCHECK, Rita; SOUZA, Sergio. Mapeamento do Potencial de Contaminação das Águas Superficiais e Subterrâneas na Região de Candiota e Entorno, RS, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021.

DA CUNHA REBOUÇAS, Aldo; AMORE, Luiz. O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI-SAG. **Águas Subterrâneas**, v. 16, n. 1, 2002.

DE OLIVEIRA BRAGA, Antonio Celso; FRANCISCO, Richard Fonseca; BIRELLI, Carlos Alberto; BLANCO, Régis Gonçalves. Aplicação da condutância longitudinal na estimativa da vulnerabilidade natural do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. **Geosciences= Geociências**, v. 37, n. 4, p. 807-822, 2018.

DE SANTA, PROGNOSTICO DAS DEMANDAS HÍDRICAS. PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE SANTA CATARINA-PERH/SC, 2017. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Plano%20Estadual/etapa_c/PERH_SC_Cenario_tendencial_CERTI-CEV_2017_final.pdf. Acesso em: 25 jul. 2022.

DA SILVA PEREIRA, Ândria; CECCONELLO, Samanta Tolentino; CENTENO, Luana Nunes. Mapeamento da vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas do município de Herval/RS. **Revista Thema**, v. 19, n. 2, p. 179-191, 2021.

DINIZ, João; PAULA, Thiago; MONTEIRO, Adson; FEITOSA, Fernando; CARDOSO, Amilton. Taxonomia hidrogeológica-unidades básicas de referência. 2014.

EMBRAPA SOLOS. Solos do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro, 2004. 726p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 46).

FLORES, Diego Moraes; DE OLIVEIRA, Déborah. Aplicação do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) para análise de bacias hidrográficas e para traçado de lineamentos estruturais. **Geografia Ensino e Pesquisa, UFSM**, v. 20, n. 3, p. 125-139, 2016.

FOSTER, Stephen; HIRATA, Ricardo; GOMES, Daniel; D'ELIA, Monica; PARIS, Marta. 2006. Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies. World Bank, GWMATE, Washington, 104 p.

FERNANDES, Gabriel; BORBA, William; TERRA, Lueni; SILVÉRIO da SILVA, José; SOUZA, Éricklis; PETRY, Mirta. Uso do sistema GOD para determinação da vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação em Marau –RS. InAplicação do Conhecimento Científico nas Engenharias 2.2 ed. Ponta Grossa: Editora Atena, 2019. 135 p.

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

GRIGIO, Alfredo Marcelo. **Aplicação de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do Município de Guamaré (RN): simulação de risco às atividades da indústria petrolífera**. 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

GUARANI, REDE. Blocos hidrogeológicos, vulnerabilidade natural e risco à contaminação do Sistema Aquífero Integrado Guarani/Serra Geral em santa catarina. 2020.

GUERRERO, João; PESTANA, Luís, SOARES, Jéssica; RUIZ, Isadora; MOSCHIN, Luiz. Carta de vulnerabilidade natural como instrumento de apoio ao Zoneamento Ecológico-Econômico do município de Pirassununga (São Paulo). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 2, n. 2, 2021.

HUBNER, Lilian; NEVES, Mirna; CALEGARI Salomão; OLIVEIRA. Fabricia. Delimitação de Domínios Hidrogeológicos em Terrenos Cristalinos e Sedimentares Utilizando Índice de Concentração de Rugosidade. **Águas Subterrâneas**, 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de uso da terra**. 3ª edição, Rio de Janeiro, 2013.

LEITE, Camila Marcon de Carvalho; WENDLAND, Edson; GASTMANS, Didier. Caracterização hidrogeoquímica de águas subterrâneas utilizadas para abastecimento público na porção nordeste do Sistema Aquífero Guarani. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, p. 29-43, 2021.

LIMA, Maria Niedja Silva et al. Classificação ecodinâmica das unidades de paisagem na área de preservação ambiental das onças, no município de São João do Tigre/PB. 2014.

LOPES, Andréa Regina de Britto Costa; SCHEIBE, Luiz Fernando. Vulnerabilidade e risco de contaminação das águas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do Rio do Peixe/SC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 30, n. 3, p. 560-570, 2015.

LUNARDI, Willia; SIEGLOCH, Ana; RECH, Angela; MAFRA, Marli; KEMPKA, Aniela. Concentration of Aluminum, Iron and Manganese in urban rivers located in a coverage area of the Guarani Aquifer in Lages-SC. **Periódico Tchê Química**, v. 16, n. 31, p. 622-631, 2019.

NANNI, A. S. **O Flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico**. Tese (Doutorado)—Porto Alegre: Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

ROCHA, Rodrigo Esteves; GASTMANS, Didier; SACCHI, Marcelo; OLIVEIRA, Marcelo. Variações espaciais na condutividade hidráulica do solo em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. *Revista do Instituto Geológico*, v. 40, n. 2, p. 35-51, 2019.

SAMPAIO, Tony Vinicius Moreira; AUGUSTIN, Cristina Helena Ribeiro Rocha. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional - Lages. **Caracterização Regional - Lages**. Disponível em: http://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepa/publicacoes/diagnostico/LAGES.pdf. Acesso em: 19 maio 2022.

SANTA CATARINA. Sistema de Informações Geográficas - SIGSC. **Levantamento Aerofotogramétrico**. Publicado em 2012. Disponível em: <http://sigsc.sds.sc.gov.br/>. Acesso em: 9 set. 2021.

SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL - SDR. **Caracterização Regional Lages**. p. 36, 2003. Disponível em: http://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepa/publicacoes/diagnostico/LAGES.pdf. Acesso em: 24 out. 2022.

SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE SANTA CATARINA - SDS. Recursos hídricos de Santa Catarina - **Rede Hidrográfica Catarinense**. p. 31, 2018.

SERRÃO, Sérgio Luis Cardoso; DE SOUZA BELATO, Leoni; DIAS, Rafael Pompeu. A vulnerabilidade natural e ambiental do município de Belém (PA). **Nature and Conservation**, v. 12, n. 1, p. 36-45, 2019.

SCHEIBE, Luiz Fernando; HIRATA, Ricardo César Aoki. O contexto tectônico dos sistemas aquíferos guarani e Serra Geral em Santa Catarina: uma revisão. 2008.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (SIAGAS). Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 27 jul. 2022.

TOMASI, Leonardo Cassol; ROISENBERG, Arí. Contexto Hidrogeológico e sua Relação com a Tectônica do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí, RS. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 2, p. 40-49, 2019.1