



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

Janiele Diandra Kist

Mapeamento de zonas potenciais à ocorrência de água subterrânea nas rochas vulcânicas do Aquífero Serra Geral, a partir da análise multicritério, no município de Ipumirim, SC

Florianópolis

2022

Janiele Diandra Kist

Mapeamento de zonas potenciais à ocorrência de água subterrânea nas rochas vulcânicas do Aquífero Serra Geral, a partir da análise multicritério, no município de Ipumirim, SC

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Geologia pela Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Oliveira Vieira
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Luana Moreira Florisbal

Florianópolis

2022

Kist, Janiele Diandra

Mapeamento de zonas potenciais à ocorrência de água subterrânea nas rochas vulcânicas do Aquífero Serra Geral, a partir da análise multicritério, no município de Ipumirim, SC.

/ Janiele Diandra Kist; orientador, Carlos Antonio Oliveira Vieira, 2022.
81p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós Graduação em Geologia, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Águas subterrâneas. 3. Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). 4. Análise multicritério. 5. Geoprocessamento. I. Vieira, Carlos Antonio Oliveira. II. Universidade Federal de Santa Catarina. III. Programa de Pós Graduação em Geologia. III. Título.

Janiele Diandra Kist

Mapeamento de zonas potenciais à ocorrência de água subterrânea nas rochas vulcânicas do Aquífero Serra Geral, a partir da análise multicritério, no município de Ipumirim, SC.

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado no dia 30 de novembro de 2022, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Breno Leitão Waichel Universidade Federal
de Santa Catarina (UFSC)

Anderson Biancini da Silva Instituto
do Meio Ambiente (IMA)

Rodrigo de Almeida Heringer
Departamento de Geologia (UFSC)

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Geologia

Coordenação do Programa de Pós Graduação

Prof. Carlos Antonio Oliveira Vieira, Dr.
Orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que de forma tão singular, me conduziu até aqui, sem Ele, nada se concretizaria. Agradeço à minha família, por ser sempre o meu alicerce. Agradeço também aos meus orientadores, Prof. Dr. Carlos Antonio Oliveira Vieira e Prof. Dr^a. Luana Moreira Florisbal. Para mim foi uma imensa honra e respeito tê-los ao meu lado durante este período, jamais esquecerei seus ensinamentos, paciência e confiança em crer que eu seria capaz de realizar todos os desafios propostos. Aos membros da banca examinadora, meus respeitosos agradecimentos por terem aceito avaliar este projeto com tamanho apreço.

À FAPESC (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina) pelo auxílio financeiro de apoio através da bolsa de mestrado. À Unidade Federal de Santa Catarina por estes dois anos de aprendizado e pela estrutura disponibilizada, em especial aos membros do corpo docente do curso de Geologia por inspirar a educação acima de tudo.

Às pessoas que, direta ou indiretamente colaboraram para que este projeto se realizasse com um apoio incondicional e hoje seguramente compartilham da minha alegria, meu muito obrigada. O mestrado foi uma árdua jornada de conhecimento e amadurecimento. Sei que é apenas o começo.

RESUMO

A região oeste do estado de Santa Catarina, tem como principal fonte de abastecimento as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e o seu modo de ocorrência está condicionado tanto a fatores genéticos do pacote vulcânico (*intertraps*, zonas com amígdalas e/ou vesículas, morfologia dos corpos vulcânicos), quanto à presença de estruturas (disjunções, falhas, fraturas e diques) que condicionam a circulação e o armazenamento de água. A área de estudo abrange o município de Ipumirim, meio oeste do estado de Santa Catarina e está contida na Bacia do Rio Jacutinga, onde a exploração de água se dá através de poços tubulares relativamente rasos no SASG, e representam, portanto, uma reserva estratégica importante. Este estudo foi desenvolvido com a inserção do Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Para obtenção das características de forma mais fidedigna fez-se necessário a utilização do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Condicionado (MDEHC), ou seja, a correção do MDE inicial, visto que tal representação é a base para quaisquer estudos de natureza hidrológica. A partir do processamento inicial dos dados, foram então gerados mapas importantes de análise altimétrica, que ressaltaram os contrastes das estruturas presentes na área. Com o objetivo de integrar, a partir da análise multicritério, dados preexistentes sobre o meio físico, foi aplicada uma metodologia de estudo baseada no Processo Analítico Hierárquico (PAH). Esta metodologia permitiu a confecção destes mapas com potenciais probabilísticos, determinando quais áreas são mais propensas ou não à locação de poços tubulares. A aplicação do método PAH resultou numa ordenação de alternativas, confirmando que os poços tubulares que apresentaram o maior índice de vazão são os que se mostraram coerentes ao grau de potencialidade apresentado no mapa final, sendo a porção sul/sudoeste a mais indicada à exploração e a porção norte e central a menos indicada. Neste viés, os métodos aplicados e refinados neste projeto contribuiram na delimitação das áreas suscetíveis a prospecção de água subterrânea no município de Ipumirim, podendo ser replicados nas demais regiões que também apresentam alta demanda de recursos hídricos, otimizando tempo e recursos financeiros na exploração e perfuração de poços tubulares.

Palavras chaves: Água Subterrânea, Geoprocessamento, Poços Tubulares, Processo Analítico Hierárquico (PAH).

ABSTRACT

The western region of the state of Santa Catarina, has as main source of supply the groundwater of the Serra Geral Aquifer System (SASG) and its mode of occurrence is conditioned both to genetic factors of the volcanic, as to the presence of structures (disjunctions, faults, fractures and dikes) that condition the circulation and storage of water. The study area covers the municipality of Ipumirim, midwestern state of Santa Catarina and is contained in the Jacutinga River Basin, where water exploration takes place through relatively tube wells in the SASG, and therefore represents an important strategic reserve. This study was developed with the insertion of the Digital Elevation Model (MDE) from the *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). To obtain the characteristics more reliably it was necessary to use the Digital Model of Hydrologically Consisted Elevation (MDEHC), that is, the correction of the initial MDE, this representation is the basis for any studies of hydrological nature. From the initial processing of the data, important maps of altimetric analysis were generated, which highlighted the contrasts of the structures present in the area. In order to integrate, from the multicriteria analysis, preexisting data on the physical environment, a study methodology based on the Hierarchical Analytical Process (PAH) was applied. This methodology allowed the preparation of these maps with probabilistic potentials, determining which areas are most likely or not to lease tubular wells. The application of the PAH method resulted in an ordering of alternatives, confirming that the tubular wells that presented the highest flow rate were the ones that were consistent with the degree of potentiality presented in the final map, with the south/southwest part being the most indicated for exploration and the north and central part the least indicated. In this bias, the methods applied and refined in this project contributed to the delimitation of areas susceptible to prospecting groundwater in the municipality of Ipumirim, and can be replicated in other regions that also present high demand for water resources, optimizing time and financial resources in the exploration and drilling of tubular wells.

Keywords: Groundwater, Geoprocessing, Tube Wells, Multicriteria Analysis, Hierarchical Analytical Process (PAH).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.2 MOTIVAÇÃO DA PROPOSTA.....	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 HIDROGEOLOGIA E OCORRÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	14
2.1.1 Condicionamento Estrutural de Aquíferos.....	16
2.1.2 Aquífero Fraturado.....	18
2.1.3 Sistema Aquífero Serra Geral.....	20
2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO: A BACIA DO PARANÁ E O GRUPO SERRA GERAL.....	21
2.3 DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS DE SANTA CATARINA.....	23
2.3.1 Formações Cenozóicas (Aquífero Poroso).....	23
2.3.2 Bacias Sedimentares (Aquífero Poroso).....	23
2.3.3 Poroso-Fissural (Aquífero Misto).....	23
2.3.4 Metassedimentos/Metavulcânicas (Aquífero Fissural).....	24
2.3.5 Cristalino.....	24
2.3.6 Carbonatos/Metacarbonatos (aquífero fissural)	24
2.3.7 Vulcânicas (Aquífero Fissural).....	25
2.4 GEOTECNOLOGIAS EM ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS.....	26
2.4.1 Sensoriamento Remoto.....	26
2.4.2 Modelo Digital de Elevação (MDE), Modelo Digital do Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS).....	27
2.4.3 Sistema de Informação Geográfica (SIGs).....	31
2.4.4 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).....	36
2.4.5 Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC).....	37
2.5 ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO.....	38
2.5.1 Lógica Fuzzy.....	39
2.5.2 Processo Analítico Hierárquico (PAH).....	40
2.5.3 Variáveis.....	43
2.5.4 Metodologia Delphi.....	44
3. ARTIGO CIENTÍFICO.....	45
4. REFERÊNCIAS.....	72
ANEXO A - CARTA DE SUBMISSÃO DO ARTIGO.....	84

1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, as águas subterrâneas estão se tornando cada vez mais importantes, sendo fonte de abastecimento seguro quanto ao uso doméstico, industrial e agrícola. No Brasil, mais de 50% do abastecimento público é feito por água subterrânea, sendo que no estado de São Paulo cerca de 70% dos municípios são total ou parcialmente abastecidos por água subterrânea (Hirata *et al.*, 2019). Dentre as inúmeras vantagens desse recurso, se destaca o fato de ser uma fonte de água em períodos de seca, onde as águas superficiais ficam escassas, é menos vulnerável à contaminação, possui água de excelente qualidade natural e que, na maioria dos casos, dispensa qualquer tipo de tratamento, além disso, o aquífero apresenta uma gigantesca capacidade de armazenamento.

O aumento na demanda por água, essencialmente no oeste catarinense, onde a água subterrânea passou a ser a principal alternativa, acarretou, conseqüentemente, no grande crescimento no número de perfurações de poços tubulares, contrastando também com a deficiência no conhecimento do potencial e do estágio de exploração do recurso. Para tal, o presente trabalho busca apresentar a situação dos recursos hídricos subterrâneos no município de Ipumirim e, a partir da análise multicritério, baseada no Processo Analítico Hierárquico (PAH) e na metodologia Delphi, atribuir valores de importância às variáveis escolhidas mediante seu grau de influência na ocorrência de água subterrânea na área de estudos, bem como, trazer soluções práticas de auxílio na sustentabilidade do recurso hídrico.

A estruturação do trabalho se dá da seguinte maneira: (i) introdução, objetivos e justificativa do trabalho; (ii) referencial teórico com a abordagem de conceito como hidrogeologia, aquíferos e suas principais características, aquíferos fraturados e sua estruturação, Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e suas características; (iii) contexto geológico da área referente à Bacia do Paraná e Grupo Serra Geral; (iv) apresentação do artigo submetido ao periódico *Pesquisas em Geociências* contendo a metodologia de estudo, aplicada para a geração dos produtos de análise, os resultados alcançados, bem como as discussões e conclusões alcançadas.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral delimitar, através da análise multicritério, as zonas potenciais a ocorrência de águas subterrâneas no município de Ipumirim.

E, como objetivo específico apresentam-se:

- Identificar, através de ferramentas de geoprocessamento, integrados a dados de poços tubulares, quais são as condicionantes que caracterizam zonas em maior ou menor potencial de água subterrânea;
- Validar o método aplicado com informações físicas dos poços tubulares existentes na área de estudo.

1.2 MOTIVAÇÃO DA PROPOSTA

Muitos estudos têm sido realizados sobre os recursos hídricos das rochas constituintes do Grupo Serra Geral e suas características hidrogeológicas diversificadas (Freitas *et al.*, 2003; Scheibe e Hirata 2006; Portela Filho *et al.*, 2005; Nanni *et al.*, 2008), bem como os estudos de aquíferos fraturados (Vargas *et al.*, 2022; Sanferari *et al.*, 2022; Lisboa *et al.*, 2021) contudo, essa temática é pouco difundida para aquíferos fraturados. Estudos baseados nesta temática, capazes de integrar dados de poços tubulares com as suas características físicas, permitem não somente uma melhor compreensão do sistema aquífero, como também podem ser utilizados para aprimorar a identificação e a gestão de uso dos mesmos, evitando o consumo indevido e o escasseamento das águas.

Nesse viés, esta pesquisa motiva a investigação e a utilização de uma estratégia metodológica aplicada, onde as características físicas de um sistema aquífero possam ser abordadas de forma complementar com o apoio das geotecnologias, e também de forma assertiva no que diz respeito ao condicionamento de água subterrânea neste município e demais regiões.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo traz um panorama sobre as principais temáticas da hidrogeologia, com destaque para as águas subterrâneas, e evidencia, dentre outros, o termo aquífero e suas principais características. Aborda com maior especificidade o Sistema Aquífero Serra Geral, seus aspectos geológicos e hidrogeológicos. Contextualiza por fim, a metodologia aplicada para análise dos dados, bem como a relevância das ferramentas de geoprocessamento para a geração de produtos de análise em estudos hidrogeológicos.

2.1 HIDROGEOLOGIA E OCORRÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Manoel Filho (1997) define como água subterrânea aquela que ocorre abaixo do nível de saturação ou nível freático, presente nas formações geológicas profundas totalmente saturada. Sendo assim, o estudo dessas águas além de dedicar-se ao fluxo em formações saturadas, engloba a circulação da água em zonas não saturadas onde a distribuição da umidade exerce um papel fundamental no ciclo hidrológico em diversos outros processos geológicos.

Todd (1980) relata que a ocorrência da água no subsolo pode ser dividida em duas zonas bem-marcadas: zona de aeração e zona de saturação. A zona não saturada ou de aeração é constituída por interstícios parcialmente ocupados por água e ar, enquanto na zona de saturação todos os interstícios estão ocupados por água (Fig. 1).

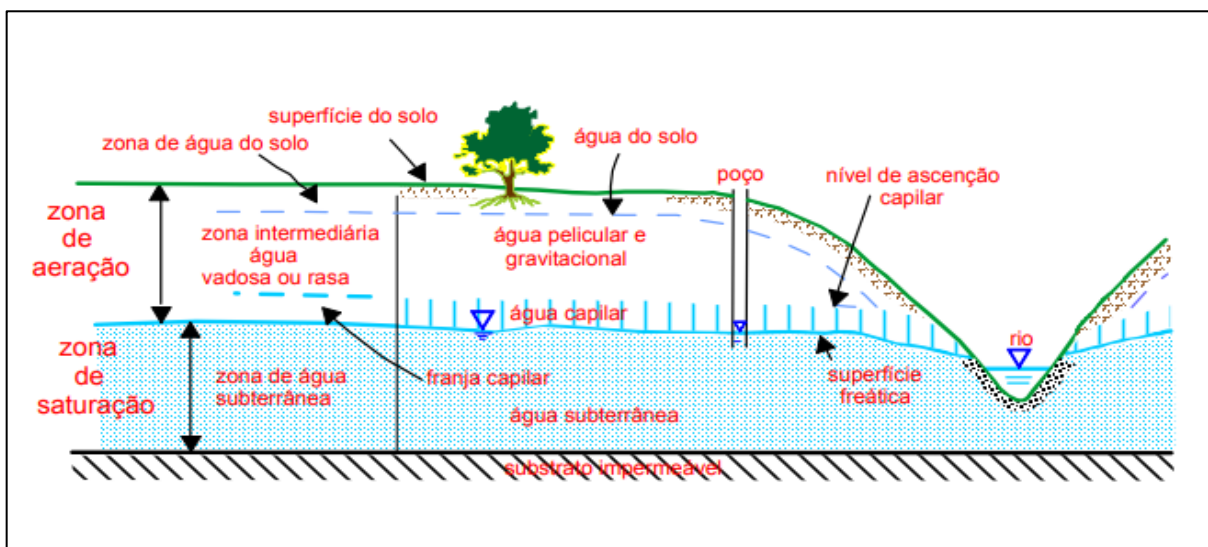


Fig. 1: Esquema de distribuição vertical da água no solo e subsolo, ilustrando as várias zonas de umidade. (Modificado de Feitosa 1997).

Para fins de aproveitamento hídrico, a zona de saturação é a mais importante. Ela pode ser considerada como um amplo reservatório, ou um conjunto de reservatórios naturais, cuja capacidade de armazenamento é definida pelo volume total dos poros existentes nas rochas, que, nesta zona, se encontram completamente cheios de águas.

A maior porção de água subterrânea encontrada na terra tem sua origem no ciclo hidrológico, ou seja, no sistema onde a água sai dos oceanos para a atmosfera, precipita nos continentes e de lá retorna por vias subterrâneas ou superficialmente aos oceanos (Feitosa 2000).

As unidades que controlam a movimentação dessas águas sob condições naturais são chamadas de aquíferos (Manoel Filho 2000). Lohaman *et al.* (1972) destaca que os aquíferos

são correspondentes a uma formação, grupo de formações ou parte de uma formação que contém material suficiente permeável para fornecer significativas quantidades de água aos poços e fontes. Dependendo da forma de como a água circula no interior do solo, existem três tipos primários de aquíferos, que são: poroso, cárstico e fissural. O aquífero poroso é aquele no qual a água circula nos poros dos solos e grãos constituintes das rochas sedimentares ou sedimentos. O aquífero cárstico é aquele no qual a água circula pelas aberturas ou cavidades causadas pela dissolução de rochas, principalmente nos calcários; e o aquífero fissural recebe essa denominação aqueles aquíferos em que a água circula pelas fraturas, fendas e falhas nas rochas.

Ainda, os aquíferos podem ser classificados por intermédio da pressão exercida sobre a água na superfície que os limitam, seja ela no topo do aquífero ou em sua base, e também podem ser classificados de acordo com a conectividade destas camadas limítrofes (Fig. 2) (Feitosa 2000).

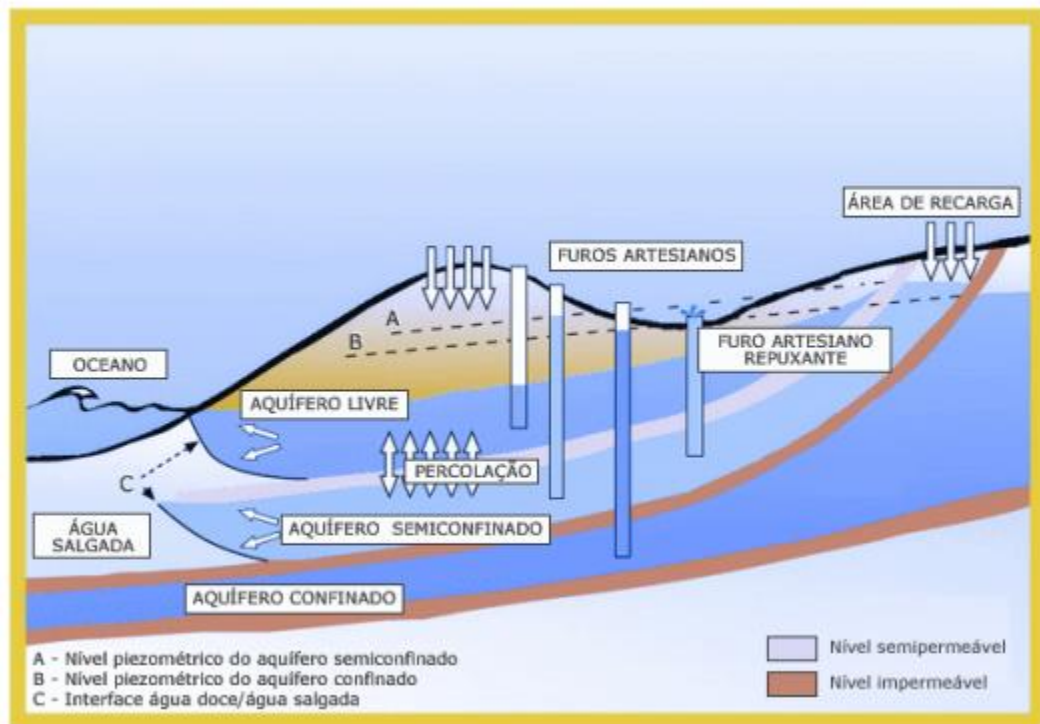


Fig. 2: Representação esquemática dos diferentes tipos de aquíferos, de acordo com o sistema de pressão das águas e com a natureza das camadas que as delimitam no topo e na base, com destaque para o aquífero confinado e livre (que aparece na interface da água doce com a água salgada). (Modificado de Bear e Verrujit 1987).

Dessa maneira, os aquíferos são separados em:

- **Aquíferos Confinados:** onde a pressão da água é superior à pressão vinda da atmosfera, podendo ainda estes serem separados de acordo com as camadas

limitrofes em: confinado não drenantes e confinados drenantes (Manoel Filho 1994)

- **Aquíferos Livres:** também chamados de aquíferos não confinados, são aqueles cuja camada limitrofe superior corresponde a superfície de saturação, a qual se encontra sob pressões iguais as da base da atmosfera. Esses aquíferos também podem ser subdivididos em aquíferos livres não drenantes e drenantes (Feitosa e Manoel Filho 1994).

Dentro de um sistema geológico, a distribuição espacial e origem dos aquíferos e aquíferos são governados por variáveis estratigráficas e estruturais específicas de cada local. Onde na primeira variável, trata-se da familiaridade geométrica e cronológica entre aspectos diversos dentro do sistema geológico, por exemplo, camadas, lentes e formações sedimentares. As estruturas determinam os tributos geométricos formados dentro de um sistema geológico por deformação, tais como juntas, fraturas, falhas e dobras (Manoel Filho 2000).

Quando formações geológicas de rochas pouco permeáveis estão intensamente fraturadas, como no caso dos basaltos, elas podem constituir aquíferos fraturados, como o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), presente na área de estudo.

2.1.1 Condicionamento Estrutural de Aquíferos

As águas subterrâneas ocorrem preenchendo e circulando nos espaços vazios existentes nos materiais de diferentes naturezas no subsolo, que constituem os solos (ou materiais inconsolidados em geral) ou rochas sedimentares e as rochas cristalinas (ígneas ou metamórficas). Os espaços vazios constituem a porosidade que é denominada de granular, para os dois primeiros casos ou de fratura (ou fissura ou fenda), para a segunda situação. Um caso particular diz respeito a porosidade cárstica ou de dissolução, típica de calcários sedimentares ou metamórficos.

A superfície dos continentes é formada, em grande parte, por rochas cristalinas. Essas rochas formam amplos cinturões pré-cambrianos em diferentes partes do mundo. De maneira mais restrita, apenas na porção mais superficial, constituída pelo solo ou outro material não consolidado, a água circula por entre os poros. A figura 3, ilustra um bloco diagrama onde se observa o comportamento geral da circulação das águas subterrâneas em contexto de rochas cristalinas fissuradas (Iritani e Ezaki 2009).

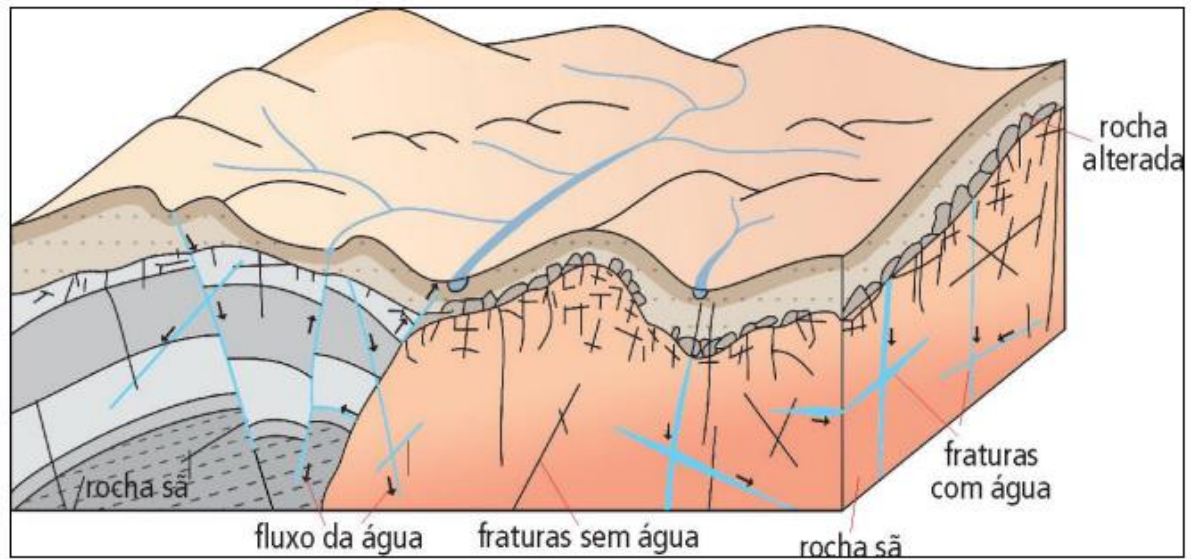


Fig. 3: Modelo hidrogeológico conceitual geral da circulação das águas em um sistema aquífero fraturado (Extraído de Iritani e Ezaki 2009).

No Brasil, as principais pesquisas em aquíferos fraturados são focadas em estudos voltados para a quantificação de reservas subterrâneas para atendimento de diferentes abastecimentos, ou seja, produção de poços com avaliação de vazão e capacidade específica utilizando-se fatores morfológicos e geológicos (Fernandes 2008). A capacidade de produção dos poços é avaliada por meio da vazão (m^3/h), mas, principalmente, da capacidade específica ($m^3/h/m$), que significa a relação entre a vazão do poço (m^3/h) e os respectivos rebaixamentos provocados no nível da água (m).

A maior capacidade de captação de águas subterrâneas em aquíferos fraturados está condicionada a maior densidade do fraturamento nas rochas cristalinas (Nascimento 2016). As feições geológicas lineares e curvilíneas de relevo e drenagem representam sistemas de fraturamento e são facilmente identificadas nas imagens de satélite de sensores ópticos e de radares (Gustafsson 1994; Mabee *et al.*, 1994; Sander *et al.*, 1996; Meijerink 2009; Ahlert 2011; Preeja *et al.*, 2011; Ghosh 2011). Após a identificação e extração dessas feições geológicas nos dados de sensoriamento remoto, por interpretação visual ou processos automáticos, são interpretados como lineamentos estruturais.

Os lineamentos estruturais são alinhamentos geológicos unidimensionais (O'leary *et al.*, 1976) e são comumente avaliados com relação à sua densidade e comprimento, e interpretados como áreas de infiltração, percolação e armazenamento de água subterrânea em rochas cristalinas (Sander 1997). Os lineamentos representam as respostas das rochas aos processos endógenos e exógenos a que foram submetidas (Nascimento *et al.*, 2008). A análise dessa geodinâmica reflete a maior ou menor probabilidade de infiltração e escoamento de água

precipitada e seu provável acúmulo no interior do sistema de fraturas, formando os aquíferos fraturados.

O fluxo e o armazenamento de águas subterrâneas por porosidade fissural são resultantes das estruturas planares (Feijó e Campos 2016), que representam sistemas de fraturamento verticais que se estendem por até centenas de quilômetros e representam linhas de fraqueza crustal reativadas por processos distensivos (Madrucchi *et al.*, 2003). Dessa forma, as condições de infiltração, percolação e acumulação de água subterrânea são inferidas segundo áreas de maior densidade de lineamentos estruturais ou alinhamentos geológicos (Veneziani e Rocio 1991). A densidade de lineamentos estruturais pode ser estimada pelo estimador de Kernel.

O estimador Kernel é um interpolador que possibilita estimar o evento em toda a área, mesmo onde o processo não tenha gerado nenhuma ocorrência. A estimativa de densidade Kernel é uma forma não-paramétrica para estimar a função de probabilidade de uma variável aleatória (Wand e Jones 1995). As linhas dos lineamentos são transformadas em intensidades pontuais que definem curvas de valores ponderados pela distância em relação a um valor central. A estatística não paramétrica, por meio da função núcleo, é um interpolador em valor de intensidade para cada célula de uma grade (Barbosa *et al.*, 2014), em função do valor do comprimento de um alinhamento geológico (Landim 2003). Assim, os alinhamentos de relevo e drenagem são transformados em intensidades pontuais que definem curvas de valores ponderados pela distância em relação a um valor central (Hernandez *et al.*, 2020).

Nascimento *et al.* (2017) empregaram o interpolador Kernel para espacializar a densidade de lineamentos de drenagem e relevo para definir o grau de fraturamento das rochas cristalinas no semiárido do estado de Sergipe. Estes autores constataram que rochas cristalinas estão forte, mediana e/ou fracamente fraturadas, indicando diferentes probabilidades de ocorrência de acumulação de águas subterrâneas.

2.1.2 Aquífero Fraturado

A demanda de água para consumo nem sempre é compatível com a disponibilidade do recurso em superfície, tornando o uso de água subterrânea fundamental. Dado que determinadas regiões dispõem somente de sistemas aquíferos fraturados, onde a ocorrência de água está condicionada pelas descontinuidades rochosas, a compreensão e delimitação destes aquíferos é uma questão que demanda ser resolvida e entendida para suprir a escassez. A quantidade, ou mesmo a existência, de fluxo de água subterrânea através da rocha são de baixa porosidade

primária vai depender da densidade, conectividade e abertura das fraturas presentes (Domenico e Schwartz 1990).

Os aquíferos fraturados presentes em toda a extensão do Aquífero Serra Geral constituem uma importante unidade hidrogeológica, devido a sua abrangência e modo de ocorrência. Sua expressão regional, tanto em superfície como em profundidade, e suas condições de armazenamento e circulação da água subterrânea lhe conferem propriedades hidrogeológicas diferenciadas e de grande interesse social e econômico.

A presença de água subterrânea nas rochas vulcânicas da Bacia do Paraná está vinculada a fatores de origem genética e tectônica. O primeiro fator é condicionante intrínseco da permeabilidade horizontal e o segundo condiciona a permeabilidade vertical, as quais intercomunicam as estruturas por onde a água percola (descontinuidades) interderrames (Fraga 1986 *apud* Monteiro 2003).

O modo de como ocorrem as rochas vulcânicas, a distribuição espacial de suas estruturas intra e interderrames e, os estágios múltiplos de sua formação, imprimem a este aquífero uma notável e peculiar heterogeneidade física. As características deste sistema dependem da dimensão e do agrupamento das fraturas e de outras descontinuidades. A condutividade hidráulica é, portanto, muito variável e complexa, de difícil avaliação e previsão. Vem se observando, através de dados de ensaio de bombeamento dos poços cadastrados, que as condições hidrogeológicas são anisotrópicas e heterogêneas, com considerável variação lateral da permeabilidade do meio. No oeste catarinense, é muito comum a ocorrência de poços espaçados em dezena de metros, que apresentam comportamento hidrogeológico bem distinto, por exemplo, um com grande vazão e o outro seco (Proesc 2002).

Segundo Reginato e Strieder (2006), com relação ao fator relevo, as zonas que apresentam alto grau de dissecação são menos favoráveis à ocorrência de águas subterrâneas, visto que o armazenamento é menor e a descarga passa a ser maior em função da possibilidade de formação de fontes de encosta originadas pela quebra do relevo. O fator litologia, embora possua um grau de importância menor, tem sua relação principal associada à estruturação dos derrames de lavas, visto que as estruturas de resfriamento ou primárias podem influenciar na circulação de água, quando conectadas a um sistema de fraturas tectônicas. Outra relação ocorre com a hidroquímica, onde as rochas básicas e ácidas têm influência nas características químicas da água subterrânea. Ainda segundo esses autores, o fator solo, em função do tipo de espessura, também condiciona os aquíferos fraturados. Essas duas características têm influência nos processos de infiltração e, conseqüentemente, nos processos de recarga dos aquíferos.

Na região oeste de Santa Catarina existem basicamente dois grandes reservatórios de água subterrânea: o Aquífero Guarani (também conhecido como Botucatu) e o Aquífero Serra Geral, que, a exemplo de toda a região sul do país, é o aquífero mais utilizado do oeste catarinense (Fig. 4).

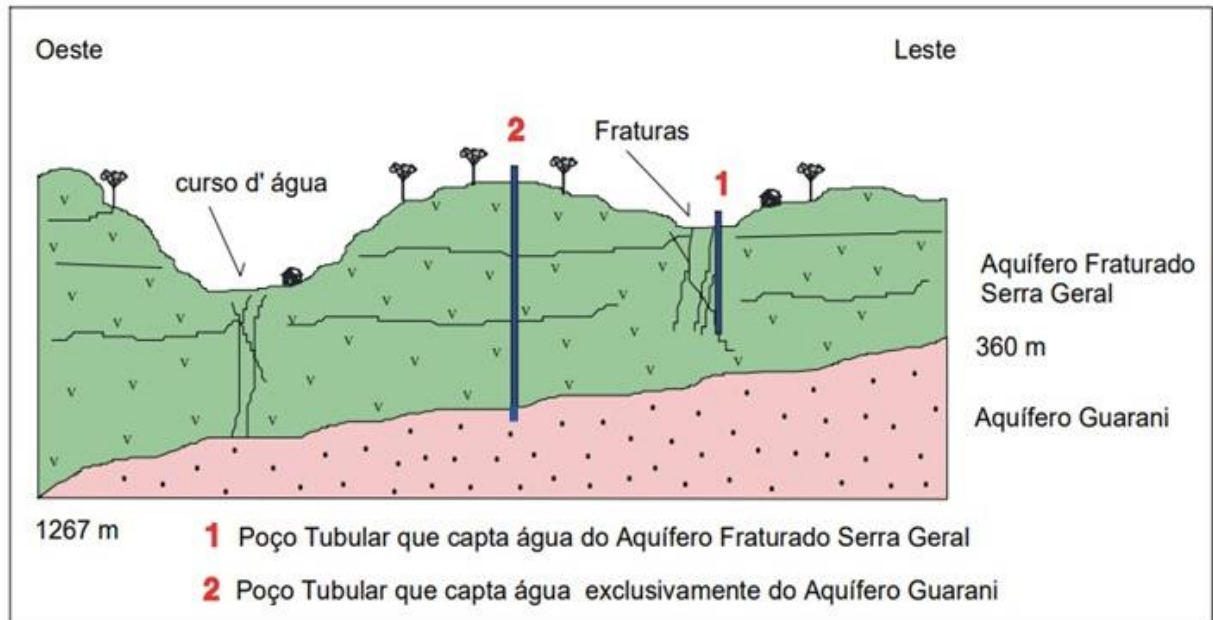


Fig. 4: Desenho esquemático de poços captados em diferentes formações geológicas (Modificado de PROESC 2002).

Na região de Ipumirim, área do presente estudo, a perfuração de poços se dá apenas no Sistema Aquífero Fraturado Serra Geral, nesse contexto, esse sistema será caracterizado com maior grau de detalhamento a seguir.

2.1.3 Sistema Aquífero Serra Geral

A área de afloramento do SASG no Brasil possui extensão estimada em 800.000 km² e espessuras de até 1.570 m. Este pacote de rochas vulcânicas apresenta falhas, fraturas e outras discontinuidades interderrames (não tectônicas), as quais de caracterizam como estruturas favoráveis a acumulação e fluxo de água subterrânea. Em uma abordagem regional Scheibe e Hirata (2008) descrevem os aspectos estruturais do SASG como importantes para a conectividade com o SAG. Relatam também a importância do SASG no abastecimento público e a qualidade das águas naturais.

O SASG abrange o eixo central da Bacia do Paraná, é fissural e apresenta condições hidrogeológicas anisotrópicas. O modo de ocorrência da água subterrânea do SASG está condicionado tanto a fatores genéticos do pacote vulcânico (*intertrap*, amígdalas, vesículas e

disjunções), quanto à presença de estruturas (falhas, fraturas e diques) que condicionam a circulação das águas nestas fácies ou rochas. O conjunto destes fatores aumenta a capacidade de armazenamento de água. A recarga principal ocorre por pluviometria, principalmente em áreas com desenvolvido manto de alteração e topografia pouco acidentada, através de grandes fraturas que interseccionam o SASG e os aquíferos subjacentes e permitem a ascensão das águas quando o nível potenciométrico é elevado. Localmente, onde há condições potenciométricas e estruturais favoráveis, pode ocorrer recarga ascendente a partir do SAG (Bitencourt *et al.*, 2003). De acordo com Fernandes *et al.* (2016), as zonas mais permeáveis são as fraturas sub-horizontais e próximas aos contatos interderrames, além das zonas de cisalhamento verticais. As disjunções colunares, apresentam menor permeabilidade e atuam como reservatórios na porção mais superficial do aquífero.

O SASG é constituído basicamente pelas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral. Esta é constituída por uma sequência de derrames de lavas de composição basáltica, intermediária e ácida. O SASG se desenvolve nos derrames com condição de armazenamento e circulação de água, ou seja, entre as fraturas ou outras descontinuidades, com fluxos de distribuição espacial distinta espacialmente, motivo pelo qual este sistema é anisotrópico.

O Aquífero Serra Geral tem suprido, em grande parte, as necessidades de abastecimento de diversas comunidades rurais, de indústrias e sedes municipais de todo o Oeste Catarinense. Por se localizar em menor profundidade, permite uma captação com custo inferior quando comparado à captação das águas do SAG (Freitas *et al.*, 2001; Freitas *et al.*, 2003; Scheibe e Hirata 2008). Contudo, seu caráter não confinado contribui para que suas águas estejam mais vulneráveis aos processos de contaminação.

2.2 CONTEXTO GEOLÓGICO: A BACIA DO PARANÁ E O GRUPO SERRA GERAL

A Bacia do Paraná, abrangendo aproximadamente 1.400.000 km², constitui uma bacia intracratônica depositada entre o Siluriano e o Cretáceo (Zalan *et al.*, 1990) que se estende pela porção meridional do Brasil, além de Argentina, Paraguai e Uruguai. Seu preenchimento sedimentar é predominantemente siliciclástico, sendo capeado pelas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral (GSG) (Rossetti *et al.*, 2017), constituinte vulcânica da Supersequência Gondwana III da Bacia do Paraná (Milani *et al.*, 2007). Trata-se de uma unidade constituída essencialmente por rochas vulcânicas básicas e intermediárias, com ocorrências menores de rochas ácidas, de idade Cretácea, e que pertence ao Supergrupo São Bento (White 1908).

No estado de Santa Catarina há ampla ocorrência de rochas vulcânicas, que constituem as regiões mais altas do estado e performam a região serrana, localizada na porção oeste (Fig.

5). A compartimentação litoestratigráfica mais recente para as rochas vulcânicas da Bacia do Paraná as reúne no Grupo Serra Geral (Rossetti *et al.*, 2017), formado por uma série de formações compartimentadas de acordo com suas características geoquímicas e morfológicas.

De acordo com Wildner *et al.* (2014), o Grupo Serra Geral abrange, em Santa Catarina, as seguintes formações: Gramado, Paranapanema, Campos Novos, Chapecó, Palmas, Cordilheira Alta e Campo Erê, todas pertencentes ao Cretáceo inferior.

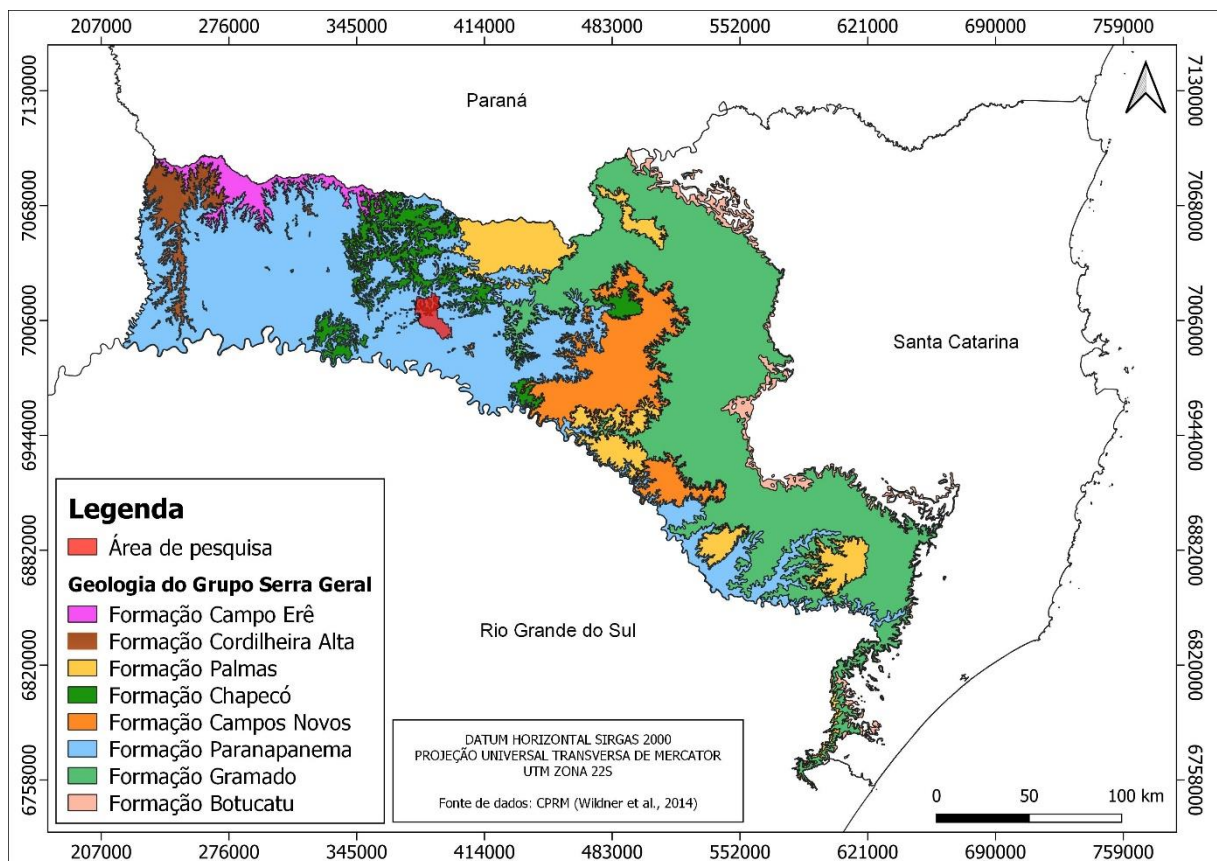


Fig. 5. Mapa geológico do Grupo Serra Geral e suas respectivas Formações, com enfoque para a área de pesquisa. Fonte: Modificado de Wildner *et al.*, 2014.

A região do presente estudo abrange as formações Paranapanema e Chapecó, sendo a última sobreposta a primeira. Constituem amplos derrames caracterizados por uma série de fraturas, disjunções colunares e limites de derrames com vesículas e amígdalas, o que permite a conexão e o fluxo das águas entre estas unidades, bem como seu armazenamento ao longo destas diferentes discontinuidades.

A Formação Paranapanema é composta por basaltos microgranulares cinza, alterações nas fácies de disjunção vermelho amarronzadas, horizontes vesiculares espessos preenchidos por quartzo, zeolitas, carbonatos, celadonita, cobre nativo e barita. Já a Formação Chapecó é

composta por rochas ácidas variando de riolitos a riolitos e matriz vítrea com pórfiros de feldspato.

2.3 DOMÍNIOS HIDROGEOLÓGICOS DE SANTA CATARINA

2.3.1 Formações Cenozóicas (Aquífero Poroso)

São definidas como pacotes de rochas sedimentares de naturezas e espessuras diversas, que recobrem as rochas mais antigas. Em termos hidrogeológicos, têm um comportamento de “aquífero poroso”, caracterizado por possuir uma porosidade primária, e nos terrenos arenosos uma elevada permeabilidade. A depender da espessura e da razão areia/argila dessas unidades, podem ser produzidas vazões significativas nos poços tubulares profundos, sendo, contudo, bastante comum que os poços localizados neste domínio, captem água dos aquíferos subjacentes. Este domínio está representado por depósitos relacionados temporalmente ao Quaternário e Terciário (aluviões, coluviões, depósitos eólicos, areias litorâneas, depósitos fluvio-lagunares, arenitos de praia, depósitos de leques aluviais, depósitos de pântanos e mangues, coberturas detríticas, detríticas-lateríticas diversas e coberturas residuais) (CPRM 2013).

2.3.2 Bacias Sedimentares (Aquífero Poroso)

O domínio das Bacias Sedimentares engloba as sequências de rochas sedimentares (muitas vezes associadas a vulcanismo, importante ou não) que compõem as entidades geotectônicas homônimas (Bacias Sedimentares). Na definição de domínio como aqui utilizado, enquadrar-se nesta unidade preferencialmente as bacias fanerozóicas onde os processos metamórficos não foram instalados. Em termos hidrogeológicos, estas bacias têm alto potencial, e constituem os mais importantes reservatórios de água subterrânea, em decorrência da grande espessura de sedimentos e da alta porosidade/permeabilidade de grande parte de suas litologias, o que permite a exploração de vazões significativas (CPRM 2013).

2.3.3 Poroso-Fissural (Aquífero Misto)

Este domínio hidrogeológico, envolve pacotes sedimentares (sem metamorfismo ou com muito baixo grau metamórfico) onde ocorrem litologias essencialmente arenosas com pelitos e carbonatos no geral subordinadas, e que tem como características gerais uma litificação acentuada, forte compactação e fraturamento acentuado, que lhe confere além do comportamento de aquífero granular com porosidade primária baixa a média, um

comportamento fissural acentuado (porosidade secundária de fendas e fraturas), motivo pelo qual prefere-se enquadrá-lo com mais propriedade como aquífero do tipo “misto”, com baixo a médio potencial hidrogeológico. Pode-se enquadrar neste domínio a maior parte das bacias proterozóicas de natureza eminentemente detrítica (CPRM 2013).

2.3.4 Metassedimentos/Metavulcânicas (Aquífero Fissural)

Os litotipos relacionados aos Metassedimento/Metavulcânicas, reúnem xistos, filitos, metarenitos, metassiltitos, anfibolitos, quartzitos, ardósias, metagrauvas, metavulcânicas diversas que estão relacionados ao denominado aquífero fissural. Como quase não existe uma porosidade primária nestes tipos de rochas, a ocorrência de água subterrânea é condicionada por uma porosidade secundária representada por fraturas e fendas, o que se traduz por reservatórios aleatórios, descontínuos e de pequena extensão. Dentro deste contexto, em geral, as vazões produzidas por poços são pequenas, e a água é na maior parte das vezes salinizada. Apesar deste domínio ter comportamento similar ao do Cristalino tradicional (granitos, migmatitos) uma separação entre eles é necessária, uma vez que suas rochas apresentam comportamento reológico distinto; isto é, como elas têm estruturação e competência diferente, vão reagir também diferentemente aos esforços causadores das fendas e fraturas, parâmetros fundamentais no acúmulo e fornecimento de água. Deve ser esperada, portanto, uma maior potencialidade hidrogeológica neste domínio do que o esperado para o Cristalino tradicional. Podem ser enquadrados neste domínio grande parte das supracrustais, incluídos os “*greensstonesbelts*” (CPRM 2013).

2.3.5 Cristalino

Cristalino (aquífero fissural): ocorrência de água subterrânea é condicionada predominantemente por uma porosidade secundária (fraturas e fendas), ocasionando reservatórios aleatórios, descontínuos e de pequena extensão, produzindo baixas vazões em poços e, geralmente, com água salinizada. Dentre os aquíferos fissurais, tende a ser o domínio de menor potencial hidrogeológico.

2.3.6 Carbonatos/Metacarbonatos (aquífero fissural)

Com superfícies fraturadas e alargadas, propiciam porosidade e permeabilidade secundárias, com acúmulo de volumes consideráveis de água. Contudo, são reservatórios

heterogêneos, com feições localizadas. Ademais, a água é do tipo carbonatada, com dureza bastante elevada.

2.3.7 Vulcânicas (Aquífero Fissural) cristalino e carbonatos e metacarbonatos

Este domínio reúne rochas vulcânicas e metavulcânicas de baixo grau metamórfico, de natureza ácida a básica, com comportamento tipicamente fissural (porosidade secundária de fendas e fraturas). Estas sequências rochosas tendem normalmente ao anisotropismo, com uma estruturação acentuada de foliação e/ou acamadamento (o que facilita o desenvolvimento da porosidade secundária), sendo que algumas delas apresentam uma porosidade primária relacionada a estruturas vesiculares (principalmente derrames básicos).

Espera-se, portanto, neste tipo de domínio um potencial hidrogeológico mais elevado do que o ocorrente no domínio dos metassedimentos/metavulcânicas. A área de estudo compreende este Domínio (Fig. 6) (CPRM 2013).

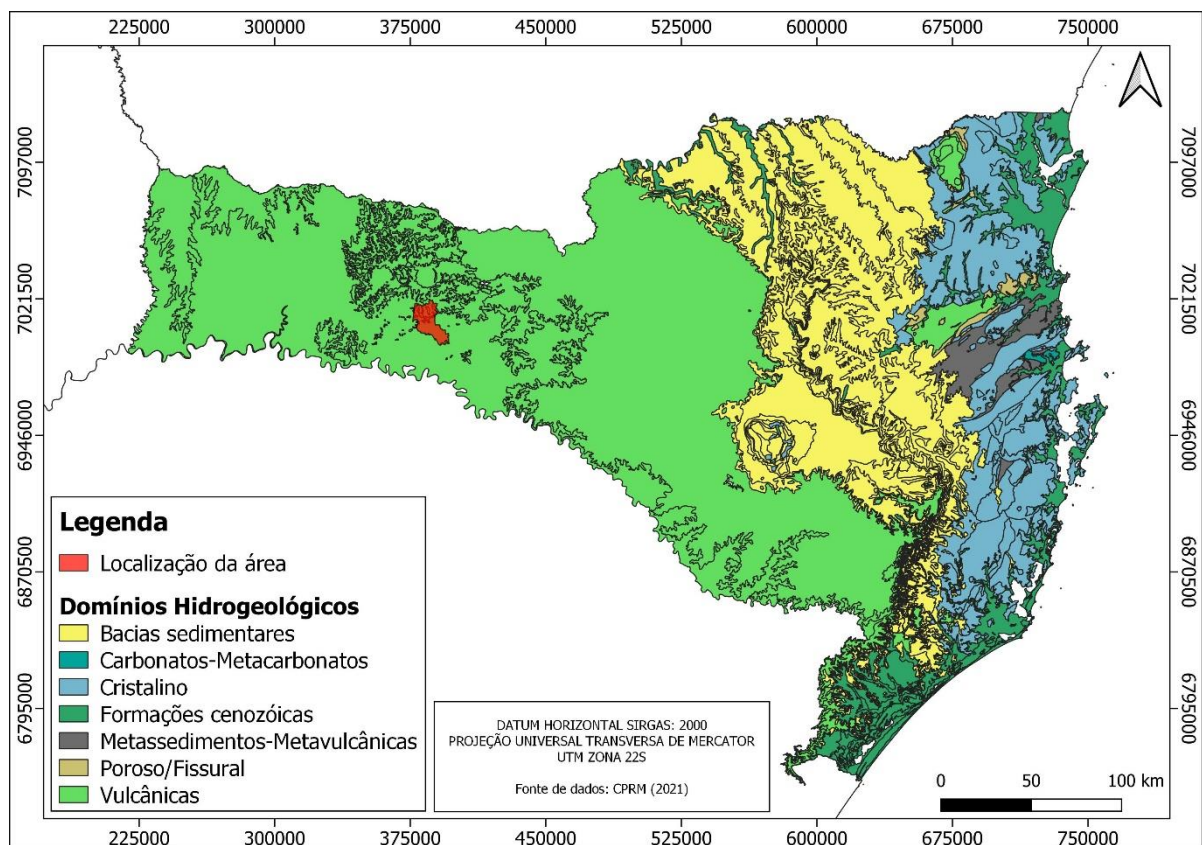


Fig. 6: Mapa dos Domínios Hidrogeológicos do estado de Santa Catarina, com destaque para a área de estudo. Fonte: Modificado de CPRM (2012).

2.4 GEOTECNOLOGIAS EM ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS

2.4.1 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto possui como definição básica a obtenção de informações sobre um objeto ou alvo, sem que haja contato físico entre o sensor e o objeto (Mather 2003). Essas informações podem ser adquiridas de várias fontes diferentes, desde levantamentos fotográficos aéreos até imagens geradas por satélites orbitais (Rosa 1992). Moreira (2003) afirma que a obtenção das imagens varia de acordo com a fonte de energia que é utilizada para a detecção, diferenciando os sensores em passivos ou ativos (Fig.7).

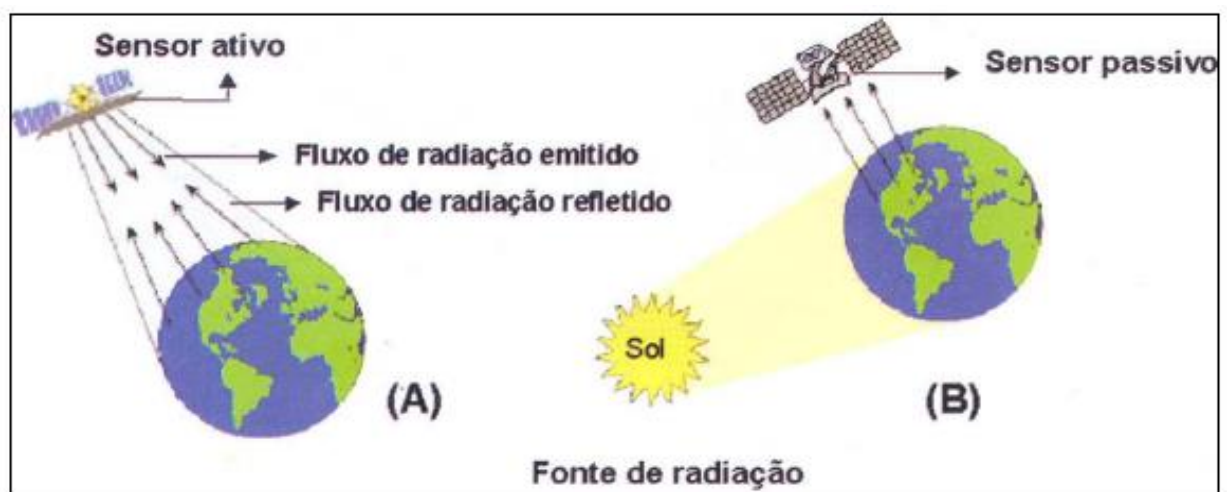


Fig. 7: Esquema de um sensor ativo (A) e passivo (B). Fonte: Moreira (2003).

Os sensores ativos (A) possuem uma fonte própria de irradiação, ou seja, não dependem de uma fonte externa de energia para irradiar o alvo. O sensor emite energia numa faixa determinada do espectro, que acaba interagindo com o alvo e que é parcialmente refletida de volta e captada por ele. Os radares, o laser, e as câmeras fotográficas que usam *flash* são exemplos de sensores ativos. Já os sensores passivos (B) detectam a radiação de uma fonte externa (normalmente o sol), refletida e/ou emitida a partir da terra, em diversos comprimentos de onda do espectro eletromagnético. A maioria desses sensores são sistemas de varredura, que reúnem muitas bandas espectrais simultaneamente, resultando nas chamadas imagens multiespectrais (Moreira 2003).

Os sensores geralmente são descritos por seus componentes de resolução, ou seja, espacial ou geométrica, espectral, radiométrica e temporal.

A *resolução espacial* corresponde à área do terreno representada por um pixel na imagem. O tamanho do pixel está diretamente relacionado à informação contida na imagem, quanto menor o pixel, mais detalhes podem ser extraídos da imagem, logo melhor a resolução.

A *resolução espectral* refere-se a espessura de um intervalo específico de comprimento de onda do espectro eletromagnético armazenado pelo sensor. Neste caso, a resolução indica a quantidade de regiões do espectro eletromagnético e pela espessura do intervalo de comprimento de onda. A *resolução radiométrica* é a medida da intensidade de energia refletida, emitida ou retro espalhada pela matéria ou objeto na superfície terrestre. Quanto maior a resolução radiométrica de um sensor, maior será a capacidade do detector para medir as diferenças de intensidades do sinal. Em função da intensidade do sinal de entrada no sensor, a resposta de saída dos detectores é convertida eletronicamente em um número digital discreto, o qual é expresso em termos de números de dígitos binários (bits). A *resolução temporal* refere-se à frequência de passagem do sensor num mesmo local, num determinado intervalo de tempo. Este ciclo está relacionado às características orbitais da plataforma (altura, velocidade, inclinação), e ao ângulo total de abertura do sensor. A resolução temporal é de grande interesse especialmente em estudos relacionados a mudanças na superfície terrestre e no seu monitoramento (Moreira 2003).

Um fator importante a favorecer a inclusão do relevo na identificação e na análise de sistemas terrestres advém de recentes coletas de dados topográficas por técnicas de sensoriamento remoto. A utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE) obtidos por sensores orbitais representa uma alternativa de grande interesse para suprir a carência de mapeamentos. Os modelos digitais de elevação (MDE) ASTER (*NASA – National Aeronautics and Space Administration*) e SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) são exemplos de produtos obtidos através de diferentes técnicas de sensoriamento remoto ativo, em escala compatível para aplicação no planejamento do uso do espaço agrícola, gestão ambiental, manejo de bacias hidrográficas, zoneamentos ecológicos, dentre outros.

Além dos modelos diretamente resultantes do processamento das informações obtidas pelos diferentes sensores remotos, há também os MDEs derivados destes. É o caso do modelo resultante do Projeto Topodata (INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais), gerado através de processamentos digitais do MDE do SRTM, dado utilizado nesta pesquisa e que será abordado com maior detalhamento nos próximos tópicos.

2.4.2 Modelo Digital de Elevação (MDE), Modelo Digital do Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS)

Existe uma necessidade crescente de obter modelos tridimensionais para várias aplicações, como no planejamento de cidades, investigação de microclima, planejamento de transmissores de telecomunicações, simulação de ruído, cidades virtuais realistas, etc.

Tradicionalmente, a fotogrametria é uma importante ferramenta na aquisição de dados 3D, e durante a última década, os métodos fotogramétricos digitais para o fornecimento de Modelo Digital de Superfície digital (MDS), e Modelo Digital do Terreno digital (MDT) têm se tornado amplamente utilizados devido a eficiência e rentabilidade do processo de produção (Zhou *et al.*, 1999).

São vários os termos utilizados para definição de um modelo digital tridimensional para representar a superfície do terreno. O primeiro termo, Modelo Digital do Terreno (MDT) é uma representação estatística da superfície contínua do terreno, a partir de um grande número de pontos selecionados com coordenadas tridimensionais conhecidas, num sistema de coordenadas arbitrário, originalmente proposto por Miller e Laflamme (1958).

Vários outros termos, como o Modelo Digital de Elevação (MDE), Modelo Digital de Altura (MDA), Modelo Digital de Superfície (MDS) e Dados de Elevação Digital do Terreno (DEDT) foram combinados para descrever e representar o terreno (Petrie e Kennie 1990). Não existe uma terminologia padronizada para se referir aos diferentes modelos, cada país ou organização se refere aos termos de diferentes formas. Assim, são apresentadas abaixo, as terminologias adotadas neste trabalho:

- **Modelo Digital de Terreno (MDT):** o termo ‘terreno’ pode apresentar diferentes significados e diferentes interpretações. Do ponto de vista de agrimensores e cartógrafos o estudo do MDT visa à interpretação do relevo e dos objetos localizados sobre este. O termo MDT é utilizado em outras áreas das ciências, pois emprega informações topográficas e não topográficas para sua construção de acordo com o enfoque de seu estudo, podendo conter informações de solos, clima, temperatura, dentre outras (Oliveira 2011). Li *et al.* (2005) propõem uma definição geral de MDT como: “*Um MDT é um conjunto ordenado de pontos amostrais que representam a distribuição espacial de diferentes tipos de informação sobre o terreno*”. Importante ressaltar que o MDT com 1 metro de resolução inicialmente aplicado não pode ser utilizado devido à dificuldade no tratamento de dados e correção de erros, optando-se assim pelo MDT com 30 metros de resolução.
- **Modelo Digital de Elevação (MDE):** é uma particularização do MDT, onde o único atributo utilizado é a elevação do relevo (Li *et al.*, 2005). Segundo Maune *et al.* (2001), é um modelo para representação digital de superfícies topográficas ou batimétricas do terreno, sem quaisquer edificações ou cobertura vegetal, e é utilizado como sinônimo de MDT em alguns países.

- **Modelo Digital de Superfície (MDS):** segundo Correia (2008) um MDS corresponde ao modelo utilizado para descrever a superfície topográfica representada pelas elevações do terreno e de qualquer objeto existente sobre ela, como cobertura vegetal, edificações e outras estruturas (Fig. 8).

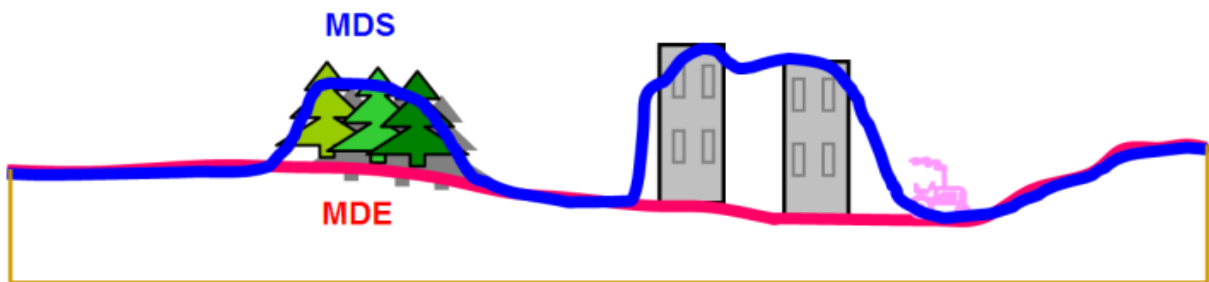


Fig. 8: Modelo Digital de Superfície (MDS) em azul e o Modelo Digital de Elevação (MDE) em vermelho. Fonte: Adaptado de SPOT IMAGE (2004).

Li (1990) apresentou uma análise comparativa entre essas diferenças conceituais, onde é apresentado que MDT tem um sentido mais amplo que MDE, e normalmente irá incorporar outros atributos específicos do terreno para determinada localização, tais como: temperatura, profundidade de uma camada, dentre outros, para o modelo. Assim, na área de Geociências esse termo MDT combina informações topográficas e não topográficas, para construir o MDT de acordo com especificidades de suas áreas: Geologia, Meteorologia, por exemplo. Li *et al.* (2005) apresenta a conceituação e formaliza o MDT como um conjunto ordenado de pontos de dados amostrados que representam a distribuição espacial de vários tipos de informação do terreno.

De modo geral, o processo para obtenção de uma modelagem digital é custoso e demorado. Muitos estudos nos campos da fotogrametria e visão computacional já foram realizados para desenvolver um sistema abrangente e de alta confiabilidade, com automação completa ou semiautomática para facilitar a interação homem-computador. No entanto, a extração automática de informações ainda é um problema não resolvido. Muitos esforços para solucionar os problemas acima mencionados ainda são necessários (Zhou *et al.*, 2004).

Geralmente, a qualidade do modelo diminui à medida que a distância entre os pontos amostrais aumenta, levando em conta que os pontos têm a mesma qualidade posicional. Isso ocorre, porque o interpolador utiliza as informações dos pontos mais próximos para inferir sobre os demais pontos que não contém dados amostrais. Segundo a “Primeira Lei da Geografia” (Tobler 1970) “Tudo está relacionado com tudo, mas as coisas mais próximas estão mais relacionadas entre si do que as mais distantes”, ou seja, quanto maior a distância entre os pontos

amostras e os pontos onde o interpolador precisará inferir sobre sua posição altimétrica, menor será a correlação entre eles, aumentando a incerteza da coordenada altimétrica estimada.

Um MDE pode ser construído digitalizando mapas topográficos existentes (Gao 1995), usando fotografias aéreas estereoscópicas (Smith e Smith 1996), imagens orbitais ou através da interpolação de pontos amostrados no terreno por diferentes técnicas de coleta de dados posicionais.

A modelagem digital de elevação pode ser resumida em quatro etapas (Li *et al.*, 2005): 1) Aquisição de dados, 2) computação e modelagem dos dados brutos, 3) reconstrução da superfície através de interpolações, e 4) Aplicação dos modelos gerados. Na primeira fase da aquisição de dados para geração de um MDE, são efetuados levantamentos de “pontos característicos” do terreno, por meio de técnicas pontuais de aquisição de dados, digitalização de mapas com informações de relevo ou então se levanta a área por meio de sensores ou radares (Santos *et al.*, 2008). Os pontos são coletados para representar feições topográficas importantes, normalmente representativas de discontinuidades na inclinação do terreno. Em cada ponto levantado, são coletados dados para se obter as informações planimétricas (X , Y) e as altimétricas (Z) (Santos *et al.*, 2008).

A segunda etapa consiste em selecionar a estrutura de dados da amostra para toda a área de interesse, ou seja, recriação digital da superfície. A terceira etapa consiste na reconstrução da superfície através dos métodos de interpolação para melhor atender a finalidade para a qual o modelo foi gerado. E a última etapa consiste na utilização dos modelos e aplicações em diversas finalidades (Li *et al.*, 2005). Pode-se acrescentar outra etapa que é a análise da qualidade cartográfica do modelo gerado para se determinar em quais aplicações o mesmo poderá ser aplicado.

Deve-se coletar uma amostra de dados ajustada em número e distribuição espacial com a precisão solicitada para a modelagem do terreno, no levantamento. Segundo Santos *et al.* (2008), quanto maior a complexidade da topografia, maior deve ser o número de pontos notáveis (ou característicos) levantados no terreno. Os maiores problemas na interpolação são ocasionados por erros observacionais, subamostragem (amostragem insuficiente) e superamostragem (amostragem redundante). A subamostragem, por ausência de informação, origina modelos pobres, com tendência de suavizar o terreno. A superamostragem, por excesso de informação, sobrecarrega o sistema e encarece desnecessariamente o levantamento (Santos *et al.*, 2008).

Os dados com distribuição espacial podem ser modelados de duas maneiras: em malha, com espaçamento regular, geometria e origem definidas, ou, aleatoriamente, sem um arranjo

geométrico preferencial. De acordo com Yamamoto (1998), os dados podem ser submetidos a processos determinísticos de interpolação (triangulação com interpolação linear, inverso ponderado da distância, curvatura mínima, etc.) ou probabilísticos (estimadores krigagem). Ao realizar a interpolação, os dados que eram pontuais servem como base para o cálculo do modelo (superfície) digital de elevação. O MDE gerado está sujeito aos erros de amostragem e incertezas geradas no processo de interpolação. Como todo modelo sujeito a erros faz-se necessário a avaliação da qualidade cartográfica do modelo gerado.

2.4.3 Sistema de Informação Geográfica (SIGs)

Câmara e Davis Jr (2011) define SIG como um conjunto de ferramentas computacionais, que permitem realizar análises espaciais complexas, quando incorporadas distintas fontes de dados e ao criar banco de dados georreferenciados, tornando possível a geração de produtos cartográficos.

A palavra sistema dentro do SIG é referente aos vários componentes interligados com distintas finalidades, como manipulação de dados preexistentes, aquisição de novos dados, transformações, combinações, análises, modelagem e exportação de dados (Freitas 1998). Já o termo informação implica que os dados de um SIG são organizados para alimentar o conhecimento do operador através de mapas, gráficos e tabelas. (Tomlinsson 2007). O termo geográfico implica indispensavelmente que, todos dados dentro de uma plataforma de SIG, devem ter sua localização conhecidas e referenciadas a um sistema de coordenadas geográficas ou qualquer sistema de projeção (Tomlinsson 2007).

Um SIG é composto por cinco componentes que interagem entre si: operador, dados, métodos, programas de computador (*softwares*) e equipamentos de informática (Brandão e Gomes 2003) (Fig. 9).



Fig. 9: Principais componentes de um SIG. Extraído de Feitosa (2003).

O operador desempenha as funções mais importantes em um ambiente de SIG, a experiência e qualificação do operador determina, no sucesso ou fracasso de um projeto em andamento. Desta maneira, é de suma importância o envolvimento de profissionais sobre o tema estudado, e de especialistas nas áreas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para que possa se garantir uma qualidade nos produtos finais realidades dentro da plataforma SIG (Borges *et al.*, 2005).

A geração do banco de dados espaciais a ser modelado em um SIG, é a etapa mais onerosa e demorada no desenvolvimento de um projeto. A inserção de dados em uma plataforma de SIG, podem ser pela digitalização de mapas analógicos, digitação de dados pontuais do tipo x , y e z , importação de produtos de sensoriamento remoto, inserção de dados provenientes de levantamentos topográficos, geofísicos e por diferentes dispositivos de importação e transformação de arquivos digitais e de conteúdo gráfico, textual e gráfico (Câmara 2005).

Os tipos de dados geográficos podem ser agrupados em duas componentes fundamentais e estritamente inter-relacionadas: a componente espacial ou cartográfica, com suas localizações, geometrias e os componentes atributos. Na componente espacial os dados podem ser divididos em dois modelos de dados para representar a geometria do fenômeno estudado, o *modelo vetorial* e o *modelo matricial* ou comumente chamado *Raster*. No primeiro modelo, os

elementos gráficos são derivados das primitivas pontos, linhas e polígonos. No segundo modelo, as células contíguas de uma matriz são as unidades básicas de representação, tendo como atributo o fenômeno observado. A figura 10 apresenta como é a representação de ambos modelos de dados e no Quadro 2 mostra as principais diferenças entre os mesmos (Câmara 2005).

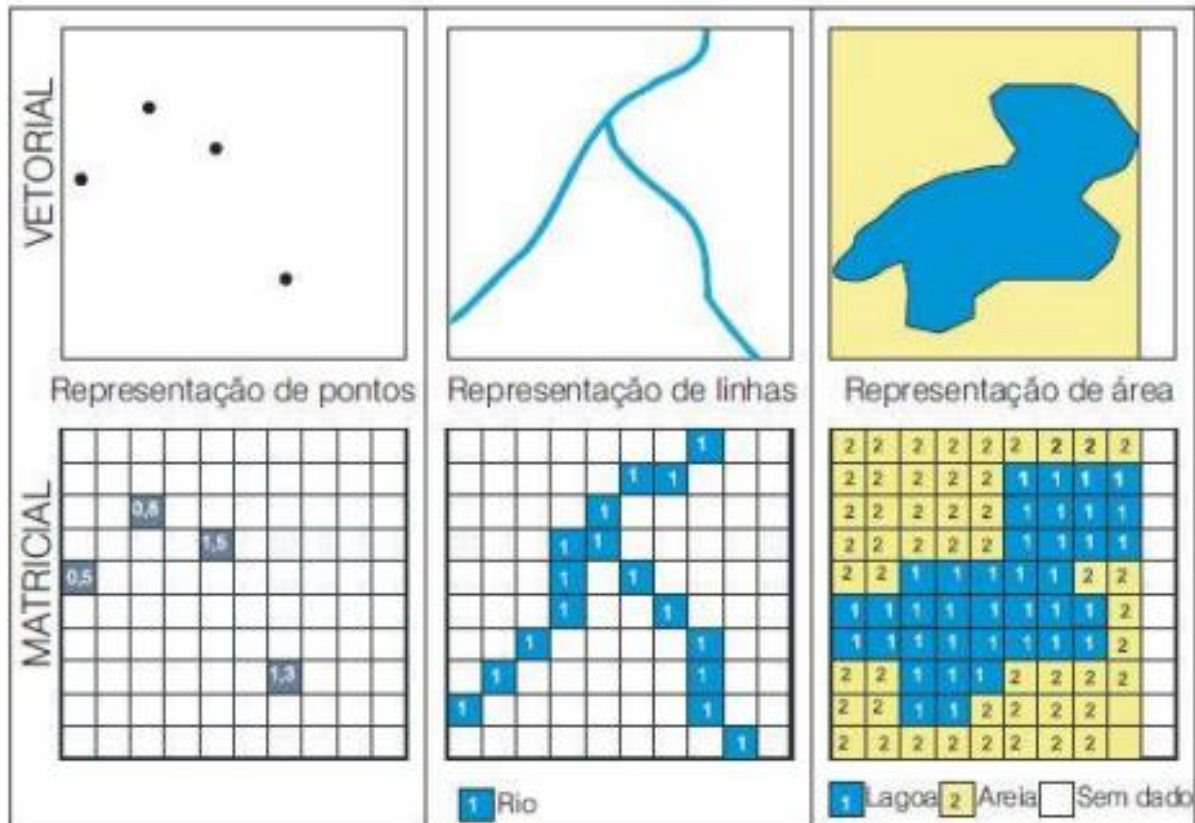


Fig. 10: Representação de pontos, linhas e polígonos nos modelos vetorial e matricial. Fonte: extraído de Feitosa (2003).

Quadro 1. Principais características dos modelos vetorial e matricial. Fonte: adaptado de Feitosa (2005).

MODELO VETORIAL	MODELO MATRICIAL
Melhor indicados para descrever fenômenos discretos	Adequado para representar fenômenos que são alterados com o tempo
Permite relacionamentos topológicos, operações estatísticas e de consultas	Modelagem e simulação mais fáceis
Estrutura de dados complexa	Estruturação simples em seus dados
Inadequado para álgebra de mapas	Adequado par álgebra de mapas
Não perde qualidade quando se altera a escala	Indicado para representar objetos em pequenas escalas
Definição gráfica nítida dos limites dos objetos	Os limites entre as regiões do espaço têm aparência serrilhada

A componente “atributos” corresponde à descrição dos dados geográficos e são armazenados, comumente em tabelas. Nessas tabelas, os atributos que descrevem as propriedades de um projeto ou fenômeno podem ser classificados de acordo com Stevens (1969) em quatro níveis de escada de medição: escala nominal, escala ordinal, escala intervalar e escala de razão. A figura 11 apresenta a etapa de aquisição de um SIG, onde cada camada ou *Layer* temático, tomado como individualmente, corresponde a um nível de informação que representa diferentes aspectos e propriedades de um objeto ou fenômeno da realidade (Borges 2005).

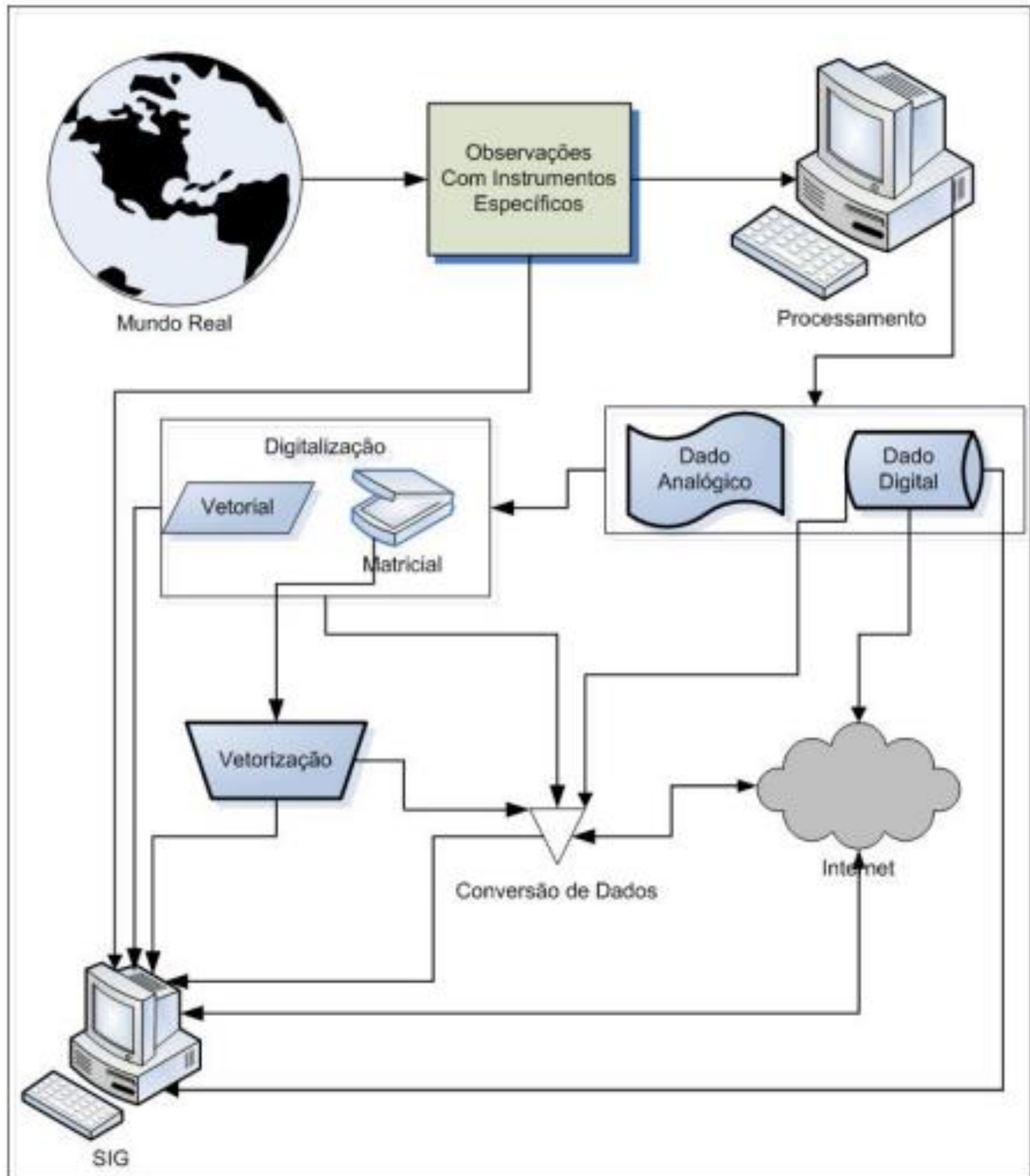


Fig. 11: Aquisição de dados geográficos para serem utilizados em Sistemas de Informações Geográficas (SIGs).

Após o processamento dos dados de observação do mundo real, podem ser produzidos dados armazenados em meio analógico (mapas, relatórios e tabelas), ou em meio digital. Se o dado armazenado em meio digital estiver em estrutura e formato compatível com os programas SIG, eles podem ser utilizados diretamente nesses programas. No caso do programa computacional de SIG não ser compatível com o formato e/ou a estrutura do dado geográfico armazenado em meio digital, será necessário realizar a conversão do formato e/ou estrutura de dados para um formato/estrutura compatível com o programa computacional de SIG.

Existe uma grande disponibilidade de programas computacionais, tanto gratuitos como proprietários, para manipular e integrar dados georreferenciados (Freitas 1998). Tais programas apresentam e incorporam centenas de propriedades funcionais que, auxiliam com agilidade na produção cartográfica, modelamentos, gerenciamento de dados, dentre outros. Hoje, mais que nunca, são incrementadas novas ferramentas aos programas computacionais voltados para SIG, visto diferente de décadas anteriores, onde os *softwares* eram essencialmente corporativos, agora são amplamente difundidos no espaço e operam pela infraestrutura lógica de servidores de internet conhecidos como *Web Mapping* (Leite 2003).

2.4.4 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

A Missão Topográfica Radar Shuttle (*Shuttle Radar Topography Mission - SRTM*) foi uma missão espacial da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) do *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) e da *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI), que teve como objetivo obter um Modelo Digital do Terreno (MDT) da superfície terrestre, para gerar uma base de cartas topográficas, a partir de plataformas orbitais, com alta resolução.

A SRTM constituiu um sistema de mapeamento por radar especialmente modificado que voou a bordo do ônibus espacial *Endeavour* durante 11 dias em fevereiro de 2000. Para o levantamento de dados topográficos (elevação), a SRTM utilizou a técnica de interferometria, onde duas imagens obtidas de pontos de vista diferentes (distantes 60m) permitem a determinação da altitude da superfície (NASA 2013) (Fig.12).

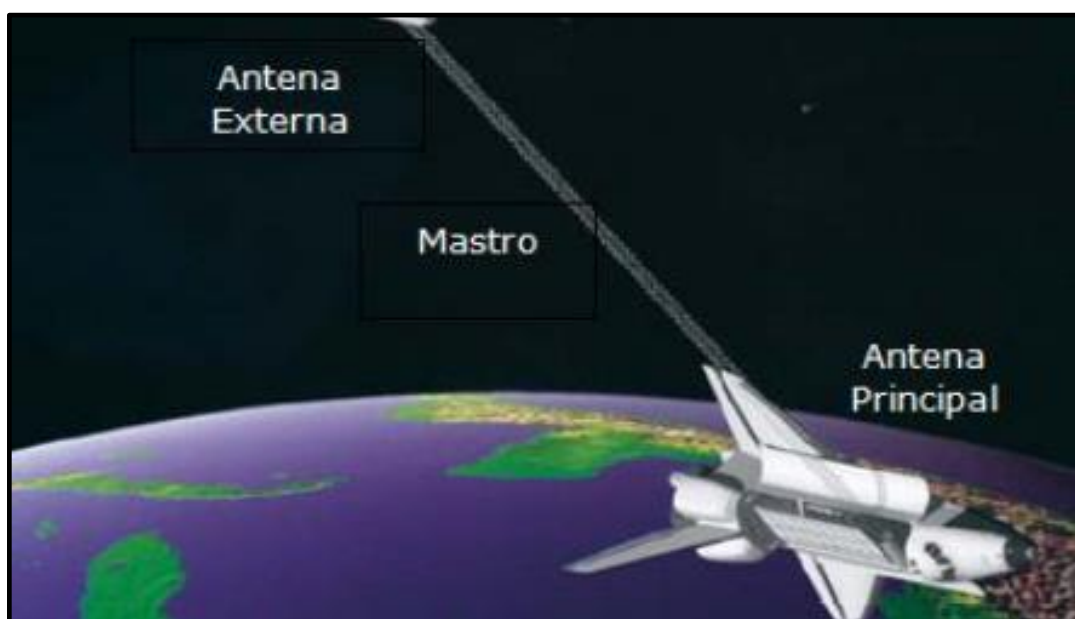


Fig. 12: Esquema de aquisição de dados do SRTM. Detalhe para o mastro que permitiu a interferometria na mesma órbita. Fonte: Barros 2004.

Em ambientes GIS as imagens SRTM podem ser usadas, como exemplo deste estudo, para gerar curvas de nível, mapas hipsométricos, mapas de relevo sombreado, mapas de declividade, mapas de rugosidade, dentre outros produtos. Tais imagens podem ser obtidas no site da NASA (sem nenhum tipo de tratamento), no site da Embrapa (imagens pré-processadas com resolução espacial de 90 metros) e através do site do INPE (Projeto Topodata - imagens pré-processadas com resolução de 30 metros) escolhida para a elaboração do presente estudo.

O Projeto Topodata oferece o Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas derivações locais básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados SRTM. Os dados disponíveis sofreram correções, incluindo informações em pontos/áreas anteriormente com ausência de dados. Estes passaram por um processamento computacional para refinamento no tamanho da célula (pixel) para 30 m. O refinamento foi realizado a partir de interpolação de todo o universo de dados pelo método de krigagem, embasado na análise geoestatística da variabilidade dos dados, onde se definem coeficientes que respondem melhor ao modelo de superfície real (Valeriano 2008).

2.4.5 Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC)

A demanda por ferramentas de predição hidrológica capazes de aperfeiçoar o uso de informações a respeito de características da superfície terrestre conduziu a evolução dos modelos hidrológicos digitais (Kenward *et al.*, 2000).

A superfície representada no MDE possibilita, além da visualização tridimensional, também a extração de informações empregadas na modelagem hidrológica, como direção de fluxo do escoamento superficial, rede de drenagem, divisores da bacia hidrográfica, declividade e orientação das vertentes (Jenson e Domingue 1988; Fairfield e Leymarie 1991; ANA 2007). A direção de fluxo define a trajetória de fluxo, tanto de água como de sedimentos e nutrientes, em áreas adjacentes aos pontos de menor altitude em todas as posições na bacia hidrográfica (Nardi *et al.*, 2008).

Por meio de modelo matemático e de dados de altitude adquiridos em mapas topográficos, técnicas de aerofotogrametria ou em imagens de satélite, é possível modelar digitalmente uma superfície. No entanto, costuma-se verificar a presença de depressões espúrias após a geração do modelo, que se caracterizam por células cercadas por outras com maiores valores de elevação. A presença dessas depressões, pode acarretar sério comprometimento do estudo hidrológico, gerando descontinuidade do escoamento. Desta forma, justifica-se o uso de um modelo digital de elevação hidrograficamente condicionado (MDEHC) (Verdin e Jenson 1996).

Os modelos digitais de elevação hidrograficamente condicionados são isentos de depressões espúrias, assegurando-se que o escoamento superficial originado a partir de qualquer ponto da bacia hidrográfica convergirá para a hidrografia e, esta, para a respectiva foz (Galati 2006). As depressões espúrias são problemáticas para estudos ambientais pois elas geram descontinuidades da drenagem, interrompendo o escoamento superficial, e a segmentação da área de contribuição, impedindo a sua correta delimitação. Logo, é necessário fazer a remoção das depressões espúrias (Fig.13).

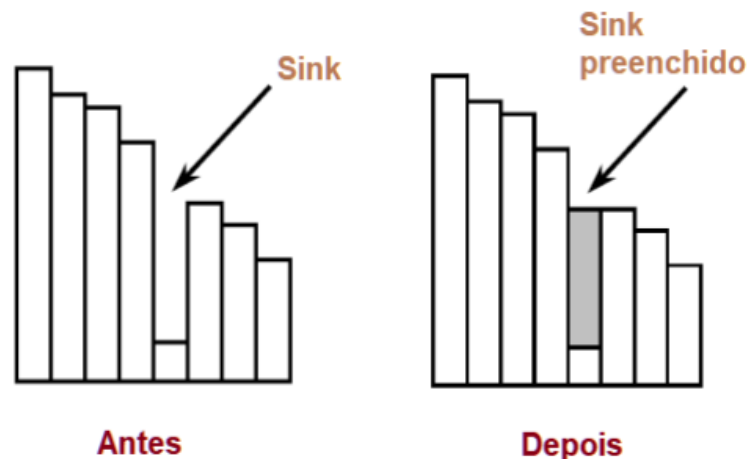


Fig. 13: Caracterização de uma depressão espúria (Santos 2020).

2.5 ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

A análise de decisão multicritério consiste em um conjunto de abordagens formais que tem como finalidade auxiliar na determinação de uma decisão importante individual ou em grupo, esclarecendo o problema e avaliando as alternativas através de múltiplos critérios (Belton e Stewart 2002).

Essa abordagem visa fornecer aos gestores ferramentas que lhe permitam progredir na resolução de problemas de decisão, onde vários objetivos nem sempre são consensuais, devem ser levados em consideração (López e Almeida 2014).

A metodologia multicritério caracteriza-se em construir modelos nos quais os múltiplos critérios relacionados à avaliação estão explícitos e sujeitos à análise crítica dos decisores, ajudando-os a moldar suas preferências, não buscando uma solução ótima para um determinado problema, mas uma solução de compromisso, em que deve prevalecer o consenso, visando apoiar o processo decisório com a recomendação de ações que estejam de acordo com as preferências dos agentes de decisão (Almeida 2011).

Os problemas de decisão envolvem a busca pela melhor solução, normalmente por meio de programação matemática, permitindo a comparação de diferentes alternativas com diferentes critérios para a tomada de decisão, cuja a principal distinção se baseia no número de alternativas em avaliação (Kahraman 2008).

A avaliação ambiental constitui um processo de tomada de decisão envolvendo objetivos e critérios, dessa maneira utiliza as técnicas e metodologias de análise multicritério para a estruturação das avaliações. É também considerada uma ferramenta útil para a simplificação de situações complexas e incentiva o trabalho multidisciplinar, por isso tem sido frequentemente usado na situação de tomada de decisão no campo dos recursos hídricos (Alvarado *et al.*, 2016).

Foram identificadas oito áreas de aplicação de análise multicritério em recursos hídricos: gestão de bacias hidrográficas; gestão de água subterrânea; infraestrutura e seleção; avaliação de projetos; alocação de água, política e planejamento da oferta de água; qualidade da água; gestão de qualidade; e gestão de áreas marinhas protegidas (Hajkowicz e Collins 2007).

2.5.1 Lógica Fuzzy

Os conceitos de conjuntos *fuzzy* (ou nebulosos) e lógica *fuzzy* (ou nebulosa) foram introduzidos por Lotfi Zadeh nas décadas de 1960 e 1970. Desde então, a lógica fuzzy tem sido utilizada em várias aplicações. De acordo com Zadeh (1973), quando a complexidade do sistema aumenta, a capacidade dos seres humanos para descrever o comportamento do sistema diminui. Ele argumenta que os problemas complexos não podem ser traduzidos em números, mas sim em rótulos de conjuntos *fuzzy*.

Gomes e Gomes (2014) apresentam a lógica *fuzzy* da seguinte forma: “A teoria é uma extensão da lógica convencional (booleana), para introduzir o conceito de verdade não absoluta, e funciona como ferramenta para tratar imprecisões na linguagem natural. A matemática nebulosa é uma tentativa de aproximar a precisão característica da matemática à inerente imprecisão do mundo real. O número nebuloso não surge, normalmente de observações reais, mas de conceitos ou concepções mais ou menos conhecidos”.

Para Yager (1977), a usabilidade de conjuntos fuzzy deriva do fato de que nós podemos representar ambos os modos, muito vagos ou objetivos *fuzzy*, bem como objetivos precisamente definidos. Ademais, nos permite lidar com objetivos que são muito subjetivos, assim como aqueles muito objetivos. Ainda segundo Yager (1977), deve ser enfatizado que os conjuntos *fuzzy* não eliminam a subjetividade, que é um fenômeno real humano, porém, na maioria das tomadas de decisão, o analista estaria ciente da sua subjetividade. O que os conjuntos fazem é

permitir manipular o fenômeno subjetivo. Gomes e Gomes (2014) esclarecem que, na matemática clássica, um subconjunto U de um conjunto S aos elementos do conjunto $[0,1]$.

Essa aplicação pode ser representada como um conjunto de pares ordenados; o primeiro é elemento de S , e o segundo é elemento do conjunto $[0, 1]$. Essa função é denominada função de pertinência. A função de pertinência é o fator caracterizador do conjunto nebuloso. Ela associa a um elemento do universo um número real do intervalo $[0, 1]$. O grau de pertinência 1 equivale ao clássico símbolo de pertencimento \in , e o grau de pertencimento 0 equivale ao símbolo \notin (Braga, Barreto e Soares 1995).

A teoria dos conjuntos nebulosos (*fuzzy*) indica com que grau cada elemento pertence ao conjunto. O valor 0, ou valor nulo, indica que não pertence, representa a “total não pertinência”; e o valor 1 indica “total pertinência”. Outro tipo de pertinência é dado pelos valores intermediários entre 0 e 1. Esses valores representam os “graus de pertinência”, também interpretados como “grau de veracidade” da afirmativa, ou seja, essa teoria transforma o conceito de Falso e Verdadeiro em números reais, no intervalo 0 a 1, em que 0 é Falso e 1, Verdadeiro (Kaufmann 1975).

As características da lógica fuzzy que merecem destaque são :

- **Modelagem de problemas complexos:** capazes de lidar com problemas complexos, com propriedades não-lineares;
- **Modelagem cognitiva:** Têm habilidade de codificar o conhecimento de forma similar ao modo como os especialistas expressam o processo de decisão. Dessa maneira a aquisição de conhecimento se torna mais fácil, mais confiável e menos sujeita a erros;
- **Complexidade reduzida:** Sistemas Fuzzy possuem menos regras, similares às expressas por especialistas; o Modelagem de sistemas envolvendo múltiplos especialistas: capazes de conciliar informações de especialistas consistentes ou conflitantes;
- **Manipulação de incertezas:** tratam as incertezas de forma consistente e matemática.

2.5.2 Processo Analítico Hierárquico (PAH)

De acordo com Shimizu (2010), o método PAH (Processo Analítico Hierárquico) foi criado por Saaty, na década de 70, nos EUA. Trata-se de um método de apoio ao processo de tomada de decisão, que utiliza de múltiplos critérios ou múltiplos objetivos. De forma complementar, Gomes, Araya e Carignano (2004) destacam que, neste método, o problema de

decisão é dividido em níveis hierárquicos, facilitando, assim, sua compreensão e avaliação. Ele determina uma medida global para cada uma das alternativas, priorizando-as ou classificando-as, ao finalizar o método.

Para Colin (2011), o PAH é um método que utiliza a matemática para processar as preferências subjetivas dos tomadores de decisão, construindo hierarquias e realizando julgamentos, apropriado para tratar problemas com uma definição ou formulação menos clara. Por outro lado, Almeida (2013) destaca o PAH como um método de agregação aditiva, com ênfase em um procedimento próprio para a modelagem das preferências do decisor, dos objetivos e critérios em forma hierárquica e da envolvimento com independência preferencial.

Conforme Zopounidis e Pardalos (2010), o Processo Analítico Hierárquico fornece uma estrutura qualificada e um modelo matemático, ambos envolvem critérios tangíveis e intangíveis, assim permitem a melhor escolha em uma decisão, além de lidar com os benefícios, oportunidades, custos e riscos separadamente e reuni-los para determinar o melhor resultado global. Adicionando as ideias deste conceito, Iaães e Cunha (2006) expressam que a lógica unifica os aspectos quantitativos e qualitativos, expressa as considerações do responsável pela tomada de decisão e expõe as preferências hierarquicamente de forma efetiva.

O método PAH determina, de forma clara e por meio de síntese dos valores dos agentes de decisão, uma medida global para cada uma das alternativas, priorizando-as ou classificando-as (Gomes, Araya e Carignano 2004). Nesse sentido, Yu (2011) acrescenta o conceito de subjetividade e complexidade, aplicado em um processo matemático sofisticado e que utiliza de comparações paritárias para chegar no resultado.

Conforme Colin (2011), para maior facilidade de entendimento, a aplicação do PAH pode ser dividida em quatro pares:

- Representação da hierarquia;
- Comparação dos pares;
- Método do autovalor;
- Agregação das prioridades

Para a facilidade no entendimento e aplicabilidade do método, apresentam-se as etapas a serem seguidas, bem como as suas características principais:

- **Construir hierarquias:** de acordo com Colin (2007), a hierarquia de um problema é representada por um objetivo, pelos seus fatores de decisão e pelas suas alternativas de decisão. Nesta etapa, é necessário modelar o problema de acordo com uma hierarquia de elementos de decisão inter-relacionados.

- **Definir as prioridades:** Saaty (1991) propõe uma escala de julgamento para a comparação par a par, onde cada comparação tem seu grau de importância, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Escala fundamental de julgamento em grau de importância.

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição entre duas definições.

Fonte. Adaptado de Saaty (1991).

- **Construir as matrizes pareadas:** neste passo, é imprescindível a construção a partir das comparações par a par.
- **Obter o autovetor:** depois da construção da matriz pareada é realizada a fase de obtenção do autovetor. Ele será a média de cada coluna, sendo calculado por meio da soma dos elementos de cada linha da matriz normalizada e da divisão desta soma pelo número de elementos da linha.
- **Realizar a análise de consistência:** para conseguir diminuir as incertezas e analisar os desvios, é necessário realizar um teste neste método, chamado de análise de consistência. A sua execução está

baseada nas seguintes etapas: gerar um novo vetor coluna, obter o autovalor máximo, calcular o índice de consistência e calcular a razão de consistência.

- **Avaliar as alternativas:** a última etapa compreende a análise das alternativas e consideração dos resultados. Nesta, deverão ser avaliados as respostas em cada passo do método, considerando a melhor alternativa viável de decisão para a empresa.

O método PAH possui aplicabilidade em diversas áreas, incluindo na prospecção de águas subterrâneas, onde o método é aplicado levando em consideração tanto parâmetros da superfície como também dados de subsuperfície, que são extraídos de poços de água (Razandi 2015; Mogaji 2017; Fashae *et al.*, 2014). Nesse viés, a aplicação do método está baseada nas seguintes variáveis: geologia, presença de lineamentos, declividade, tipo de solo e ocupação de solo.

2.5.3 Variáveis

A *litologia* é um dos principais fatores controladores da qualidade e quantidade de ocorrências de águas subterrâneas em um determinado local (Adiat 2012). Uma vez que, a litologia reflete diretamente nas características propícias para a infiltração da água no meio assim como seu armazenamento, considerando o grau de porosidade de uma rocha e sua permeabilidade, assim como os constituintes químicos presentes na composição mineralógica desta, podendo tornar a água presente em um aquífero não potável a depender dos íons dissolvidos através do aquífero. O mapa geológico é feito a partir da disponibilidade do arquivo vetorial extraído da CPRM, em uma escala de 1:200.000.

Os *lineamentos* podem ser identificados em fotografias aéreas ou imagens de sensoriamento remoto pelas seguintes feições: linhas de diferentes tonalidades no solo, alinhamento da vegetação, vales retilíneos encaixados e cumes alinhados (Bradbury e Muldoon 1992). Mais precisamente, tais feições geralmente refletem a geologia da subsuperfície, e podem denotar a presença de falhas ou grandes faturas (Bradbury e Muldoon, 1992; Dae, 2005; Fernandes *et al.*, 2008). Segundo Fashae (2014), a presença de lineamentos estruturais tem a função de atenuar canais para a movimentação das águas subterrâneas, o que pode resultar no aumento da porosidade secundária das rochas do local, sendo assim, pode ser considerado com um grande fator para determinar zonas potenciais de recursos hídricos subterrâneos (Fashae *et al.*, 2014). Assim, lineamentos foram detectados segundo a metodologia aplicada por Chiang (1984), onde a identificação das estruturas lineares é feita na combinação de elementos

retilíneos do relevo observáveis na imagem (Hernandez 2016). Tais elementos podem ser: linhas ou segmentos de escarpas, alinhamentos de cristas, vales e trechos de rios, depressões alongadas ou diferenças texturais e de tonalidade (Chiang 1984).

O *solo*, bem como seu uso e cobertura, desempenham um papel de influência na potencialidade às ocorrências de águas subterrâneas, devido as características do escoamento superficial proveniente de cada tipo de solo (Dantas *et al.*, 2010). A taxa de infiltração é governada pelas características hidráulicas do solo que, é o resultado em grande parte pelo tamanho de grão, que determina a porosidade do meio (Fashae *et al.*, 2014). A classificação de imagens de sensoriamento remoto é a identificação de feições na imagem, isto é, a tradução dos diversos padrões de energia eletromagnética refletida em classes de cobertura terrestre.

A *classificação supervisionada* é o procedimento utilizado com maior frequência para a análise quantitativa de dados de imagens de sensoriamento remoto. Nesse processo, são utilizados algoritmos para nomear os pixels em uma imagem de forma a representar tipos específicos de cobertura terrestre (Lillesand e Kiefer 1994).

2.5.4 Metodologia Delphi

A metodologia Delphi consiste, em termos práticos, na coleta de opinião de especialistas, de forma anônima, mediante questionário, e por rondas, que permite a análise e exploração dos resultados da informação recebida, de modo a poderem ser reenviados e modificados, no sentido de se alcançarem consensos, procurando atingir a convergência das respostas e percepções sobre os problemas apresentados (Kaynak 1994; Häder e Häder 1995 e Cuhls 2005).

As pesquisas obtidas apoiam-se, em grande medida, nas expectativas pessoais, aproveitando as experiências e os conhecimentos do grupo de especialistas selecionado, com uma visão multidisciplinar que permita estabelecer objetivos e intervenções. A metodologia é aplicável quando se torna necessário contrastar e combinar argumentos e opiniões individuais para chegar a decisões dificilmente assumíveis unilateralmente, obtendo-se desta forma informação qualificada, assim, o sucesso fica dependente do grau de envolvimento do grupo de da profundidade das opiniões. As características fundamentais desta metodologia são, segundo Monfort (1999), as seguintes:

- Técnica de grupo que substitui a interação por um questionário que é enviado aos especialistas, que o interpretam particularmente, participando à distância na discussão e formulação de opiniões;

- Seleção prévia dos especialistas, de acordo com o seu conhecimento e capacidade de formulação de opiniões;
- Realimentação controlada através do reenvio dos resultados obtidos aos membros, de modo a obter convergência, isto é, partindo de os dados transmitidos e considerados proceder as reconsiderações ou revisões;
- Tratamento quantitativo das informações, que permita gerar respostas representativas e reveladores de homogeneidade ou dispersão de opiniões;

3. ARTIGO CIENTÍFICO

Mapeamento de zonas potenciais a ocorrência de água subterrânea nas rochas vulcânicas do Aquífero Serra Geral, a partir da análise multicritério no município de Ipumirim, SC.

Mapping of potential zones for the occurrence of groundwater in volcanic rocks of the Serra Geral Aquifer, based on multi-criteria analysis, in the municipality of Ipumirim, SC.

Janiele Diandra KIST¹, Carlos Antonio VIEIRA^{1,2} & Luana Moreira FLORISBAL³

⁽¹⁾ Programa de Pós Graduação em Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina. R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n, CEP 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil. (Janiele.geo@gmail.com).

Resumo. A região oeste do estado de Santa Catarina, tem como principal fonte de abastecimento as águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e o seu modo de ocorrência está condicionado tanto a fatores genéticos do pacote vulcânico, quanto à presença de estruturas que condicionam a circulação e o armazenamento de água. A área de pesquisa abrange o município de Ipumirim, meio oeste do estado e está contida na Bacia do Rio Jacutinga, onde a exploração de água se dá através de poços tubulares relativamente rasos no SASG, e representam, portanto, uma reserva estratégica importante, não somente para o uso do abastecimento público. Com o objetivo de integrar a partir da tecnologia do geoprocessamento, dados preexistentes sobre o meio físico, foi aplicada uma metodologia de estudo com base na análise multicritério e o processo analítico hierárquico (PAH). A partir da entrada de dados, foram então gerados produtos importantes de análise altimétrica, bem como a geração de mapas convencionais, que visam melhorar os contrastes que caracterizam as estruturas presentes na área. Assim, esta metodologia permitiu a confecção de mapas com potenciais probabilísticos, determinando as áreas sul/sudeste como as mais propensas à locação de poços tubulares, e a porção extremo norte como a menos propensa. Doravante, este trabalho contribui na delimitação das áreas suscetíveis a prospecção de água subterrânea, otimizando tempo e recursos financeiros nas futuras locações de poços na região.

Palavras chaves. Água Subterrânea, Geotecnologias, Poços Tubulares, Processo Analítico Hierárquico (PAH).

Abstract. The western region of the state of Santa Catarina, has as its main source of supply the groundwater of the Serra Geral Aquifer System (SASG) and its mode of occurrence is conditioned both to genetic factors of the volcanic package, as well as the presence of structures that condition circulation and storage of water. The research area covers the municipality of Ipumirim, the middle west of the state and is contained in the Jacutinga River Basin, where the exploration of water takes place through relatively shallow tubular wells in the SASG, and therefore represents an important strategic reserve, not only for the use of public supply. In order to integrate from the technology of geoprocessing, preexisting data on the physical environment, a study methodology was applied based on multicriteria analysis and hierarchical analytical process (PAH). From the data entry, important products of altimetric analysis were generated, as well as the generation of conventional maps, which aim to improve the contrasts that characterize the structures present in the area. Thus, this methodology allowed the preparation of maps with probabilistic potentials, determining the south/southeast areas as the mostlikely to lease tubular wells, and the extreme northern part as the least prone. From now on, this work contributes to the delimitation of areas susceptible to groundwater prospecting, optimizing time and financial resources in future well leases in the region.

Keywords. Groundwater, Geotechnologies, Tube Wells, Analytical Hierarchical Process (AHP).

1 Introdução

O Brasil ocupa uma posição de destaque no cenário mundial no que diz respeito à disponibilidade de recursos hídricos. Porém, essa situação privilegiada contrasta com o desequilíbrio existente no território nacional, quanto à distribuição desses recursos. A utilização de recursos finitos, como a água, se deu sem a conservação e preservação adequadas a sua manutenção para as gerações futuras. Assim, passou-se então a debater a demanda de água, tanto de maneira qualitativa quanto quantitativa. Nas últimas décadas, com o aumento dos conflitos existentes entre os diversos usuários dos recursos hídricos, a demanda por água subterrânea vem crescendo de forma acelerada e as previsões são de que essa tendência continuará. Somado a isso, é preciso considerar as mudanças climáticas, onde as alternâncias de períodos de estiagem com períodos de chuvas volumosas têm se tornado uma tendência onde não é verificado um balanço equilibrado, predominando a estiagem e escassez de água.

João Manoel Filho (2008) definiu água subterrânea como aquela que ocorre abaixo do nível freático, presente nas formações geológicas aflorantes e parcialmente saturadas, e nas formações profundas totalmente saturadas. O armazenamento e a circulação das águas subterrâneas estão intrinsecamente relacionados com os corpos rochosos denominados aquíferos, estes ambientes são de dimensões, extensões e características das mais variadas (Rebouças, 2006).

A utilização de água subterrânea no Brasil tem sido uma alternativa para diversos setores, estimando-se hoje em cerca de 100.000 poços para abastecimento. Em Santa Catarina, um dos mais importantes aquíferos existentes é o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). Este aquífero é do tipo fissural, e se desenvolve ao longo de fraturas e discontinuidades, tendo sua recarga direta através das chuvas anuais, principalmente em áreas com manto de alteração pouco desenvolvido. O sistema de percolação compreende zonas vesiculares e amigdaloidais de topo de derrame e zonas de disjunção horizontal, feições essas que, quando interceptadas por zonas de fraturas, interconectam-se e podem armazenar grandes volumes de água (Nanni, 2008). As águas do SASG propiciam o abastecimento de milhares de habitantes, situados em sua região de ocorrência e, em muitos casos, constitui fonte exclusiva de abastecimento, como no caso específico da área de estudo. Suas águas são exploradas através de poços relativamente rasos e geralmente tem ligação direta com as águas da superfície. Isto as torna muito mais acessíveis, mas também muito mais vulneráveis aos processos de contaminação, tanto pelas próprias fraturas das rochas como, muitas vezes, devido a defeitos construtivos dos poços.

Dentre os sistemas de informações existentes, as geotecnologias vêm sendo largamente utilizadas como instrumento de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. O referido sistema constitui o ambiente de inteligência que dá suporte de forma lógica e estruturante à gestão e ao processo decisório das diferentes esferas de aplicação, permitindo, inclusive, a construção de indicadores, baseados em análises geográficas, além de coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados. Esta tecnologia tem sido alvo de crescente utilização no planejamento ambiental com forte adesão na gestão dos recursos hídricos.

De forma mais específica, o Sistema de Informações Geográficas (SIG) oferece subsídios que maximizam o manuseio de grandes quantidades de dados complexos espaciais na gestão destes recursos (Burrough, 1986). Prasad *et al.* (2018) ainda menciona que uma integração entre SIG e Sensoriamento Remoto pode ser uma ferramenta eficaz, rápida e rentável que produz de forma confiável aspectos fundamentais em relação as águas subterrâneas como: geologia, lineamentos, declividade e utilização de solos.

Da mesma forma, a complexidade verificada nas últimas décadas decorrente do aumento do número de informações e da necessidade de utilizá-las no processo decisório fez com que surgissem novos métodos para localização de instalações na tentativa de alcançar maior assertividade nas tomadas de decisão. Neste sentido, métodos multicritérios de tomada de decisão surgiram como métodos de apoio que são vistos como ferramentas matemáticas, eficazes para resolução de problemas em que existem critérios conflitantes (Brans & Mareschal,

2005). O Processo Analítico Hierárquico (PAH) é um padrão internacionalmente aceito quando o estudo em questão necessita de uma análise de decisão multicritério, como a avaliação de potencial hídrico subterrâneo.

O PAH é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão que permite identificar a melhor alternativa em um grupo de candidatos, tendo em vista critérios pré-definidos de seleção. O PAH é baseado em algumas etapas básicas: (i) organização do problema em uma estrutura hierárquica que reflita as relações existentes entre os critérios de decisão e as alternativas candidatas; (ii) comparação pareada entre elementos posicionados em um nível hierárquico com relação a elementos no nível superior adjacente; e (iii) análise das matrizes de comparações geradas em (ii) através do cálculo de autovetores e autovalores principais, e de indicadores de desempenho deles derivados, tais como os índices de consistência das avaliações; (iv) normalização dos pesos e (v) ponderação dos critérios. O PAH foi originalmente proposto por Saaty (1977, 1980) tendo seus fundamentos matemáticos aprofundados e ampliados em Zahedi (1984) e Saaty & Vargas (1987). Assim, optou-se pela adoção do PAH como técnica multicritério por possuir atributos desejáveis para a realização do presente estudo, tais como (Steiguer *et al.*, 2005): (i) é um processo de decisão estruturado que pode ser documentado e repetido; (ii) é aplicável a situações que envolvem julgamentos subjetivos; (iii) utiliza tanto dados quantitativos quanto qualitativos; (iv) provê medidas de consistência das preferências; (v) há uma ampla documentação sobre suas aplicações práticas na literatura e (vi) seu uso é apropriado para grupos de decisão.

A área de estudo, localizada no município de Ipumirim (SC), está contida na Sub-Bacia do Rio Engano, onde a demanda de água subterrânea é suprida integralmente a partir SASG, com cerca de aproximadamente 110 poços perfurados, de acordo com os dados obtidos com o setor público do município. Trata-se de uma bacia em que se observa um crescimento populacional com intenso processo de urbanização, desenvolvimento de atividades agropecuárias e implantação de indústrias que, conjuntamente, são apontadas como principais responsáveis pelo aumento da demanda de água na região.

2 Área, materiais e métodos

2.1 Localização da área

A área de estudo compreende ao município de Ipumirim, com cerca de 247,1 Km² e localizada no oeste do estado de Santa Catarina. O acesso principal se dá a partir da SC-473 por

Lindóia do Sul e SC-154 por Arabutã (Fig. 1). Os acessos secundários para o interior do município são em sua maioria por estradas não pavimentadas.

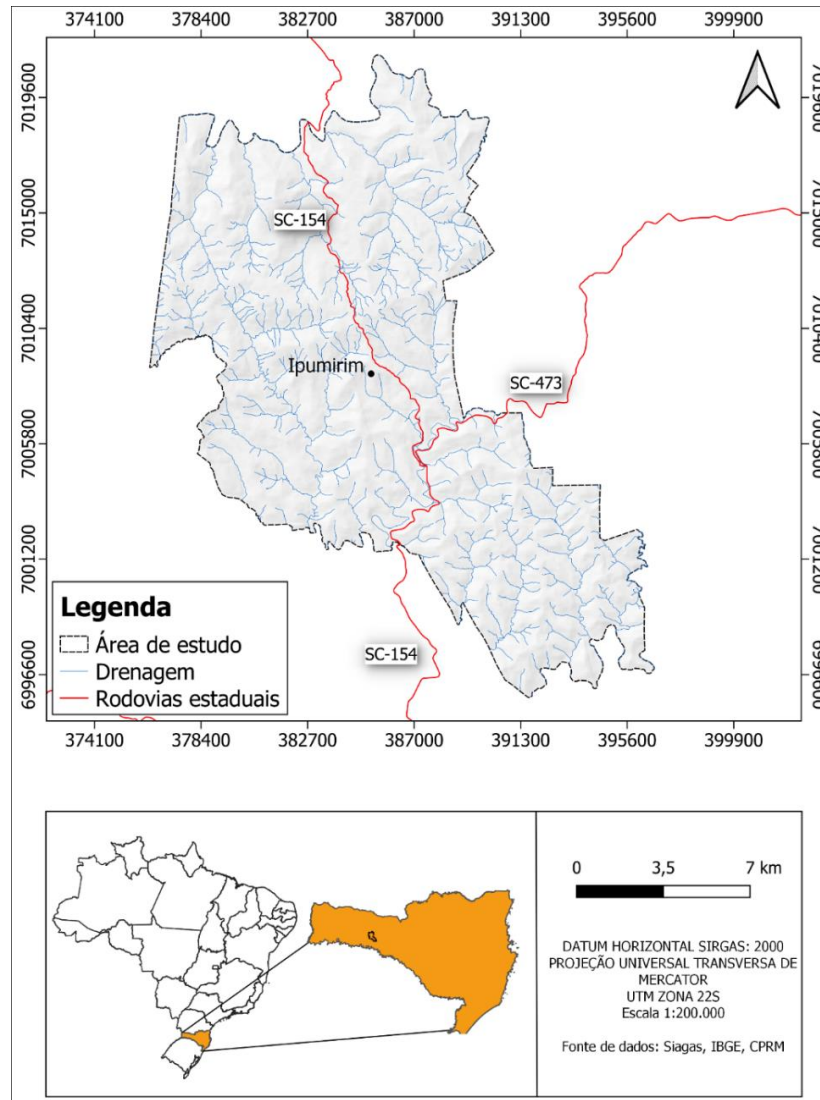


Figura 1. Mapa de localização da área de estudos.

Figure 1. Location of the studied area.

O estado de Santa Catarina, apesar de possuir pouco distanciamento latitudinal, especialmente no Oeste, apresenta expressivas variações espaciais no seu clima. Em Ipumirim, o clima classifica-se como mesotérmico úmido, sem estação seca, com verões frescos e temperatura média anual de 18°C (Epagri, 2002).

É constituído de um planalto de superfícies montanhosas e onduladas fortemente dissecadas de formação basáltica, cujo solo possui fertilidade média, situado em relevo forte, ondulado e montanhoso, dificultando e restringindo o manejo da terra.

De acordo com a regionalização estadual, a área do presente estudo está inserida na Região Hidrográfica 3 (RH3), pertencente ao Vale do Rio do Peixe, e Região Hidrográfica 2 (RH2) de acordo com Santa Catarina (1997). A RH3 compreende a uma área de 2.712,2 Km² e corresponde a 2,9% da área do Estado, onde estão inseridos 19 municípios. Seu território é subdividido em 7 sub-bacias hidrográficas (Sub-Bacias dos Rios Rancho Grande, Suruvi, Dos Queimados, Jacutinga, Engano, Ariranha e Ariranhazinho), e mais uma sub-bacia, formada pelo agrupamento de pequenas áreas contíguas ao Rio Uruguai. Trata-se de uma região em que se observa um crescimento populacional com intenso processo de urbanização, desenvolvimento de atividades agropecuárias e implantação de indústrias que, conjuntamente, são apontadas como principais responsáveis pelo aumento da demanda de água na região. As duas principais bacias hidrográficas que compõe a RH 2 são a do rio Chapecó e a do rio Irani. A bacia do rio Chapecó, com 236 mil pessoas, drena 42 sedes urbanas, onde vivem cerca de 138.000 habitantes. Na bacia do rio Irani, que reúne cerca de 109.000 habitantes, existem 8 núcleos urbanos, onde residem em torno de 87.000 habitantes. (Fig. 2).

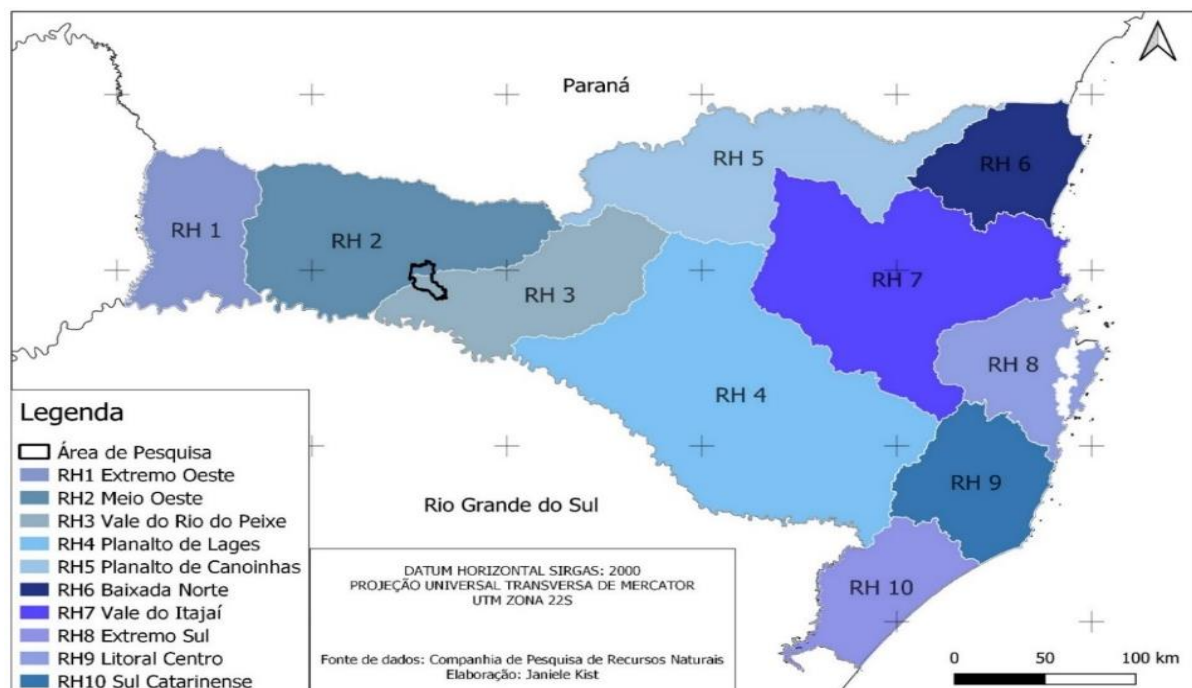


Figura 2. Mapa das regiões hidrográficas (RH) do estado de Santa Catarina, destacando a área de estudos.

Figure 2. Map of the hydrographic regions (HR) of the state of Santa Catarina, highlighting the study area.

De acordo com o Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM, 1986), a Região Hidrográfica 3 abrange as seguintes unidades litoestratigráficas em sua área: (1) Formação Chapecó; (2) Formação Esmeralda e (3) Formação Paranapanema. Ainda com relação as bacias hidrográficas que a compõe, na Bacia Hidrográfica do Rio Jacutinga predomina a ocorrência da Formação Paranapanema, com 80,32% da área desta bacia (808 km²).

As unidades geológicas da região, que envolve o território da Bacia do Rio Jacutinga como em outras regiões do meio oeste de Santa Catarina, apresentam extensos lineamentos estruturais, que constituem fatores de extrema importância para a recarga e a vulnerabilidade dos aquíferos.

2.2 Materiais

O estudo Delphi desenvolvido e aplicado nesta investigação apoia-se num painel de especialistas selecionados, em virtude do seu conhecimento sobre o tema, bem como a capacidade de gerar opiniões. Assim, o grupo definido foi constituído por professores da Universidade Federal de Santa Catarina, geólogos e representantes de organismos/instituições públicas ligados à área da hidrogeologia. A elaboração do questionário foi uma das etapas fundamentais, visando um questionário claro, objetivo e que incentivasse, em simultâneo, a reflexão sobre o tema. A redação, foi também redigida de forma a facilitar o seu preenchimento e consequente tratamento informático, pelo que se optou maioritariamente por questões de carácter múltiplo referentes à análise multicritério e o método PAH (Processo Analítico Hierárquico). Nesse contexto, o questionário foi elaborado levando em consideração os pesos atribuídos às variáveis: declividade, geologia, solo, ocupação do solo; bem como questões de carácter múltiplo: importância de influência das variáveis relacionadas à geologia (riolitos e basaltos), solo (cambissolo e neossolo) e declividade (em grau de porcentagem), e por fim, a hierarquização por ordem de influência na ocorrência de água subterrânea na área de estudos.

O levantamento dos poços tubulares, bem como a obtenção das informações sobre algumas características técnicas (vazão, profundidade, localização), foram elaborados através do contato com o setor público do município em complementação com dados cadastrados do Sistema de Informações de Águas subterrâneas/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SIAGAS/CPRM). No referido levantamento, foi formulado um banco de dados composto por informações básicas já citadas, bem como a situação atual do poço (em uso ou seco) e profundidade (m). No total, são 118 poços perfurados no Sistema Aquífero Serra Geral.

Foram utilizadas as imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), onde foi possível tratar e gerar o Modelo Digital de Elevação (MDE) inicial. Importante ressaltar que as imagens com resolução de 1 metro mostraram algumas inconsistências dentro da plataforma utilizada, optando-se assim em utilizar a resolução de 30 m. A partir da sua correção e eliminação das depressões espúrias, o MDEHC derivado, gerou produtos importantes para análise altimétrica, bem como para a geração de mapas temáticos (geológico e de solo), que visam melhorar os contrastes que caracterizam as estruturas presentes na área e que influenciam diretamente na circulação de água. Todos os produtos foram gerados a partir do *software* Qgis 3.14.

Para a construção da Matriz de Comparação Pareada para o estudo do potencial hidrogeológico da área, inicialmente, estabeleceu-se a ordem de importância das variáveis para hierarquiza-las na tabela, de maior para menor susceptibilidade de acordo com os critérios de Dantas *et al.*, (2010), Fashae *et al.*, (2014) e Oliveira (2017). Portanto, para a definição dos pesos, adotou-se o método de comparação par a par proposto no Processo Analítico Hierárquico (Saaty, 1980). Foram então desenvolvidas matrizes de comparação par a par, utilizando a escala de nove níveis de Saaty. A comparação par a par, entre os n critérios, é realizada a partir de uma matriz quadrada $n \times n$, onde os critérios estão dispostos na mesma ordem ao longo das linhas e das colunas. Portanto, o valor a_{ij} representa a importância do critério da linha i em relação ao critério da coluna j , conforme a Equação 1.

$$A_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, \text{ para } i \neq j \quad e \quad a_{ij} = 1, \text{ para } i = j$$

(1)

Onde: a = elementos da matriz; i = linha; j = coluna.

Da mesma forma, as comparações também devem obedecer ao requisito, conforme a equação 2:

$$A_{ij} = \frac{P_i}{P_j}$$

(2)

Onde: P_i = grau de importância do fator da linha i sobre o fator da coluna j ; P_j = grau de importância do fator da linha j sobre o fator da coluna i . Considera-se como critério adotado para estabelecimento do grau de importância, as características superficiais dos terrenos que influenciam na recarga dos aquíferos. Todos os cálculos foram elaborados dentro do programa *Excel*.

Tabela 1. Matriz de comparação pareada com base na hierarquização das variáveis.

Table 1. Paired comparison matrix based on the hierarchy of variables.

Variáveis	Densidade de Lineamentos	Declividade	Geologia	Solo	Ocupação de Solo
Densidade Lineamentos	1	2	5	7	7
Declividade	0,5	1	5	7	5
Geologia	0,2	0,2	1	2	3
Solo	0,15	0,15	0,5	1	2
Ocupação Solo	0,15	0,3	0,4	0,5	1

2.3 Métodos

A figura 3 apresenta um fluxograma de elaboração dos mapas temáticos, delimitada e separada a partir de critérios qualitativos e quantitativos, de acordo com as características e os parâmetros de cada variável escolhida.

Inicialmente foram extraídos os lineamentos e a declividade a partir do MDEHC com resolução de 30 metros. Em seguida, após correção do MDE inicial e eliminação das depressões espúrias, foram gerados os seguintes mapas temáticos: mapa litológico, mapa de solos e o mapa de cobertura de superfície a partir da classificação supervisionada do solo para a área de estudos, a partir do banco de dados da CPRM, EMBRAPA, IBGE, ANA e INPE. Com os mapas caracterizados, iniciou-se a preparação dos dados de acordo com a categorização e atribuição dos pesos a partir da metodologia do Processo Analítico Hierárquico (PAH). Com a integração dos mapas temáticos e o cálculo aplicado no ambiente QGIS 3.16, gerou-se então o mapa final de potencialidade para o município de Ipumirim, com a validação das áreas a partir da vazão dos poços tubulares.

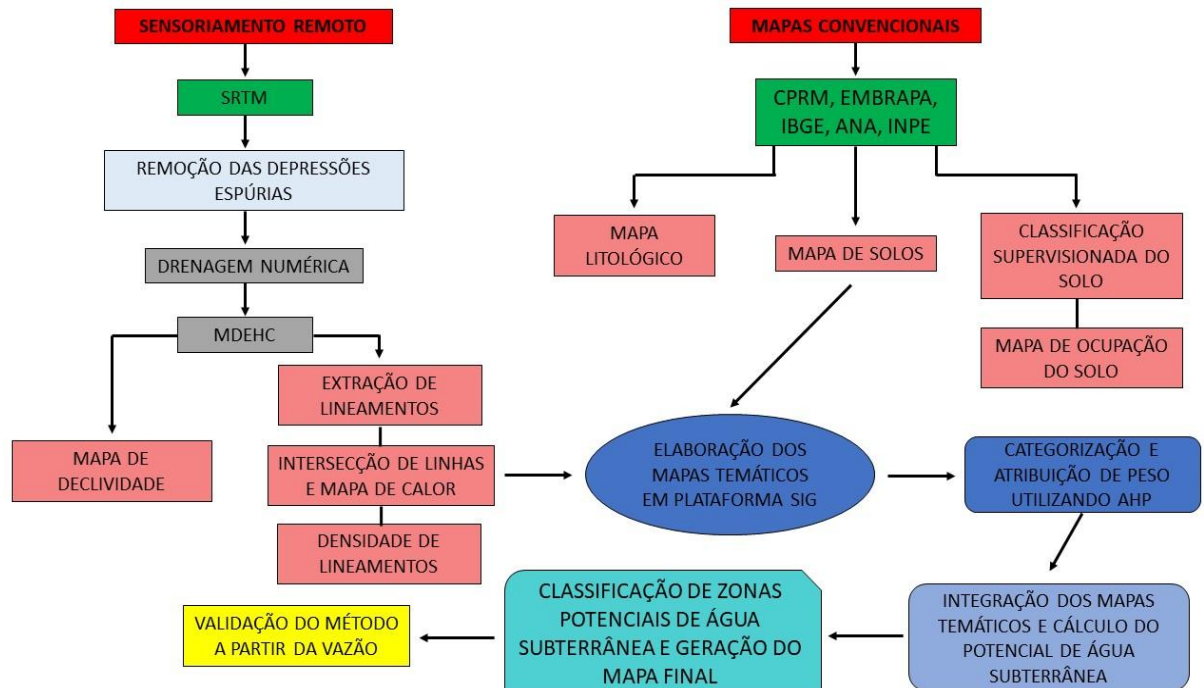


Figura 3. Fluxograma para delinear zonas potenciais de águas subterrâneas utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, SIG e metodologia PAH.

Figure 3. Flowchart to delineate potential groundwater zones using Remote Sensing techniques, GIS and AHP methodology.

Dentro dos critérios qualitativos, o Mapa Geológico e o Mapa de Solos foram elaborados e adaptados a partir da disponibilidade dos arquivos vetoriais extraídos da CPRM, em uma escala de 1:200.000 para o município de Ipumirim.

Para a elaboração do mapa de ocupação de solo foram utilizadas imagens de satélite do tipo *Landsat 8 (Operational Land Imager – OLI)* com resolução equivalente a 30 metros e suas respectivas bandas correspondentes: Banda 02 (Azul), Banda 03 (Verde), Banda 04 (Vermelho) e Banda 5 (*Near Infrared*), Banda 06 (*SWIR 1*) e Banda 07 (*SWIR 2*). O *Semi Automatic Classification Plugin (SCP)* é um *plugin* do QGIS desenvolvido e utilizado para a classificação semiautomática de imagens de sensoriamento remoto (Congedo, 2015). Para a elaboração da classificação supervisionada, foi necessário a instalação do complemento *Semi Automatic Classification Plugin (software corretor de efeitos atmosféricos)*, que permitiu a seleção de amostragem para a cobertura e ocupação do solo a partir da ferramenta *SCP Dock*, ao partir do classificador *maximum likelihood*, segundo as classes informacionais escolhidas: vegetação e solo exposto, levando em consideração que são os atributos com a melhor representação e realce. Assim, foram selecionadas as regiões de interesse, com cerca 100 amostras e

posteriormente compilados ao final da caracterização da área. Optou-se por uma imagem Landsat8 que permitisse uma visualização completa da área de estudos, sem cobertura de nuvens que pudessem comprometer a amostragem final.

Os lineamentos foram detectados segundo a metodologia aplicada por Chiang (1984), onde a identificação das estruturas lineares é feita na combinação de elementos retilíneos do relevo observáveis na imagem. Para a geração da densidade, utilizou-se pontos de intersecção entre linhas (centróides), que representam boa influência quanto à capacidade de armazenamento de água subterrânea, gerando assim o mapa de calor com as respectivas zonas de maior e menor densidade.

Para a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) foi utilizado o raster proveniente do *Shuttle Radar Topography Mission* (STRM) Projeto Topodata com 30 metros de resolução. A obtenção das imagens MDE foi feita a partir do site *Webmapit* (Topodata), no qual utilizou como camada máscara o arquivo *shapefile* contendo a área de pesquisa. Uma vez que as cartas foram unidas em uma imagem única (mosaico), procurou-se reduzir o tamanho desta, através de um recorte abrangente de toda a área de estudo. O sistema de projeção das imagens disponibilizadas no site Topodata é o de Coordenadas Geográficas (WGS84), sendo assim, procedeu-se a conversão do sistema de projeção original para UTM SIRGAS 2000 zona 22S. A partir do MDE inicial foram eliminadas as depressões espúrias através da ferramenta SAGA e algoritmo *Fill sinks* (Wang & Liu, 2006). Essa etapa visa eliminar as depressões espúrias remanescentes no MDE gerado na etapa inicial, garantindo a consistência do escoamento superficial ao longo da drenagem numérica, gerando-se assim o MDEHC. No processo de transformação do MDE para MDEHC o primeiro procedimento adotado foi a verificação de depressões espúrias (célula cujo valor de elevação é menor que das células vizinhas), fazendo-se uso do algoritmo *Sink*, o preenchimento das depressões espúrias se sucedeu pelo algoritmo *Fill*, visto que depressões espúrias ocasionam descontinuidade do escoamento superficial descendente para uma célula vizinha (Wang & Liu, 2006).

Dentro de cada um destes temas abordados, existem diversas classes que também influenciam de um modo específico a ocorrência de águas subterrâneas. Para auxiliar na tomada de decisões e para a determinação dos pesos (valores) dos critérios e subcritérios dos temas, utilizou-se o método do Processo Analítico Hierárquico (PAH), introduzido por Saaty (1980) (Fig. 4). Utilizando o método PAH é possível criar uma estruturação multicritério em níveis hierárquicos, obtendo como resultado uma ordem das alternativas mais influentes nos processos estudados (Berhanu *et al.*, 2013).

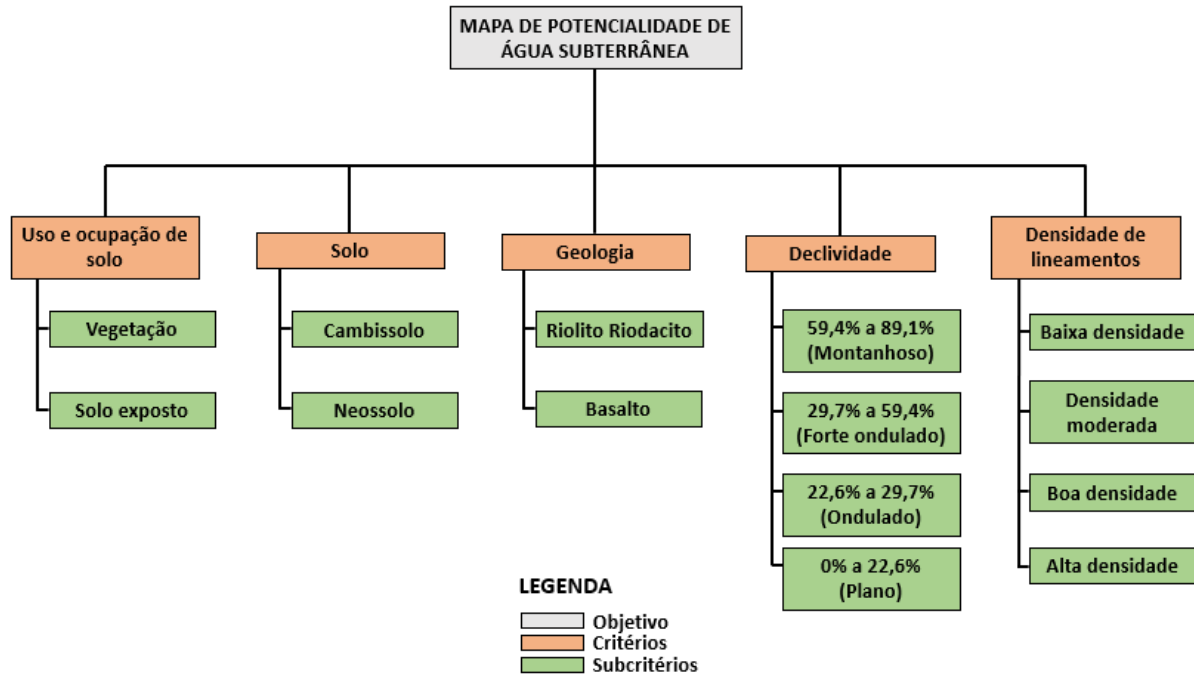


Figura 4. Níveis hierárquicos utilizados na aplicação do método PAH.

Figure 4. Hierarchical levels used in the application of the PAH method.

Dentro deste contexto, o mapa de solo, litológico e de ocupação de solo foram reclassificados a partir da ordem hierárquica arbitrária, enquanto que nos critérios quantitativos, os mapas foram gerados a partir da Função Linear *Fuzzy*. Para definir quanto um elemento pertence a um conjunto, utiliza-se a função de pertinência. A função de pertinência é uma função que associa um ponto no conjunto X a um número real, normalmente compreendido entre o intervalo $[0,1]$ (Zadeh, 1965). A característica especial da Lógica *Fuzzy* é a de representar uma forma inovadora de manuseio de informações imprecisas, provendo um método de traduzir os seus atributos em valores numéricos.

Desta forma, aplicou-se a lógica *fuzzy* nos critérios quantitativos “declividade e densidade de lineamentos” normalizando os valores com uma variação de escala comum de máximo e mínimo entre 0 e 1, preservando as suas características existentes (Fig. 5).



Figura 5. Fluxograma da elaboração do mapa de critérios para delinear zonas potenciais de águas subterrâneas utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, SIG e metodologia AHP.

Figure 5. Flowchart of the elaboration of the criteria map to delineate potential groundwater zones using Remote Sensing techniques, GIS and AHP methodology.

O método Delphi, aplicado neste estudo, permite atuar de forma independente e adapta sua dinâmica aos objetivos da investigação. Esse método ajuda a tomar decisões estratégicas, uma vez que a opinião objetiva ou baseada na experiência de um grupo de especialistas será sempre de melhor qualidade em comparação com a opinião de um único indivíduo. Neste viés, tal metodologia foi aplicada a partir da resposta de 8 especialistas, que atribuíram pesos e estabeleceram a ordem hierárquica das variáveis (densidade de lineamentos, geologia, solo, declividade e ocupação de solo) de acordo com o seu respectivo grau de influência na potencialidade de água subterrânea na área de estudos.

3 Resultados

No total, são 118 poços perfurados no Sistema Aquífero Serra Geral, dentre estes, 35 foram desconsiderados devido à falta de algumas das informações básicas necessárias para a análise dos dados, destes, 5 encontram-se secos.

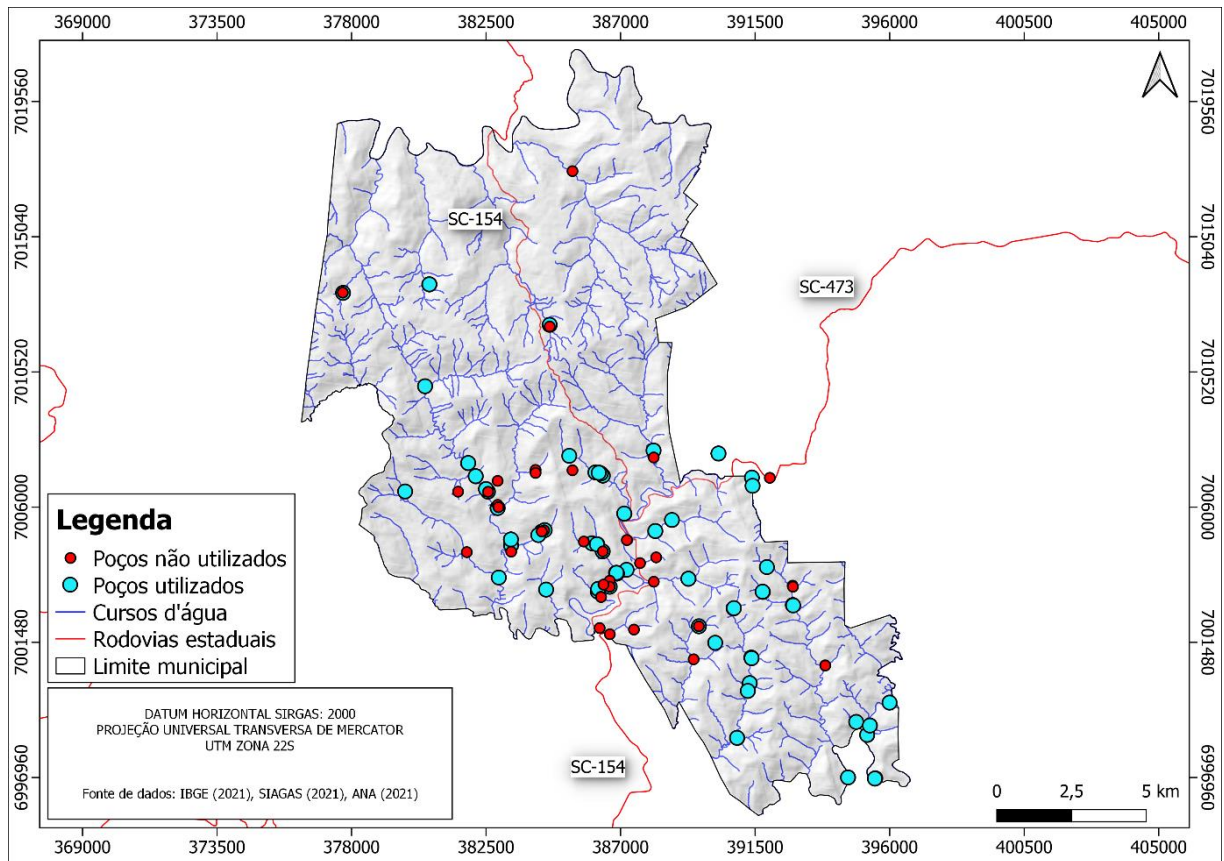


Figura 6. Mapa de espacialização dos 118 poços artesianos do Sistema Aquífero Serra Geral inseridos na área de estudo com detalhe para os poços utilizados neste projeto.

Figure 6. Spatialization map of the 118 artesian wells of the Serra Geral Aquifer System inserted in the study area with details for the wells used in this project.

A fim de estabelecer uma comparação e de tentar reverter possíveis limitações no MDE inicial, optou-se por gerar o MDEHC, com o objetivo de corrigir diferenças altimétricas. (Fig. 7).

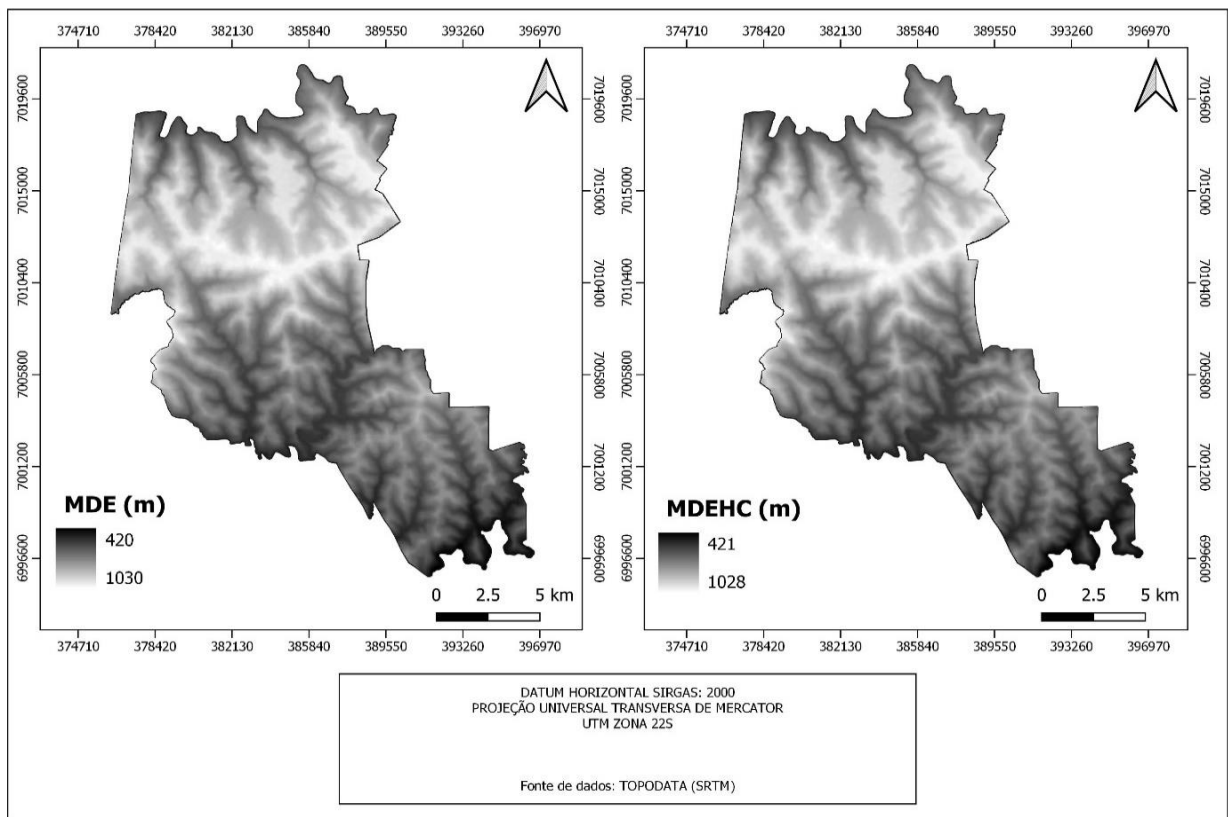


Figura 7. Comparação do MDE inicial e MDEHC após a correção das depressões espúrias.

Figure 7. Comparison of initial MDE and MDEHC after correction of spurious depressions.

Os mapas temáticos deste trabalho, receberam pesos que variam entre 1 e 4, relacionados ao quanto o tema contribui para a ocorrência e movimentação das águas subterrâneas (Ahmad & Verma, 2018). Em termos de potencialidade, o fator de ponderação 1 designa grau baixo, 2 representa moderado, 3 implica em bom e 4 representa alta potencialidade de água subterrânea.

O mapa de declividade atingiu valores entre 0% e 89,1%, onde os valores de declividade entre 0% a 22,6% receberam o maior peso (4), pois declividades baixas influenciam no tempo de escoamento superficial e concentração de chuva no subsolo, enquanto que os demais valores de declividade foram distribuídos pesos de 1 a 3 mediante a influência que exerce para a infiltração e permanência da água no substrato (Dantas *et al.*, 2010) (Fig. 8).

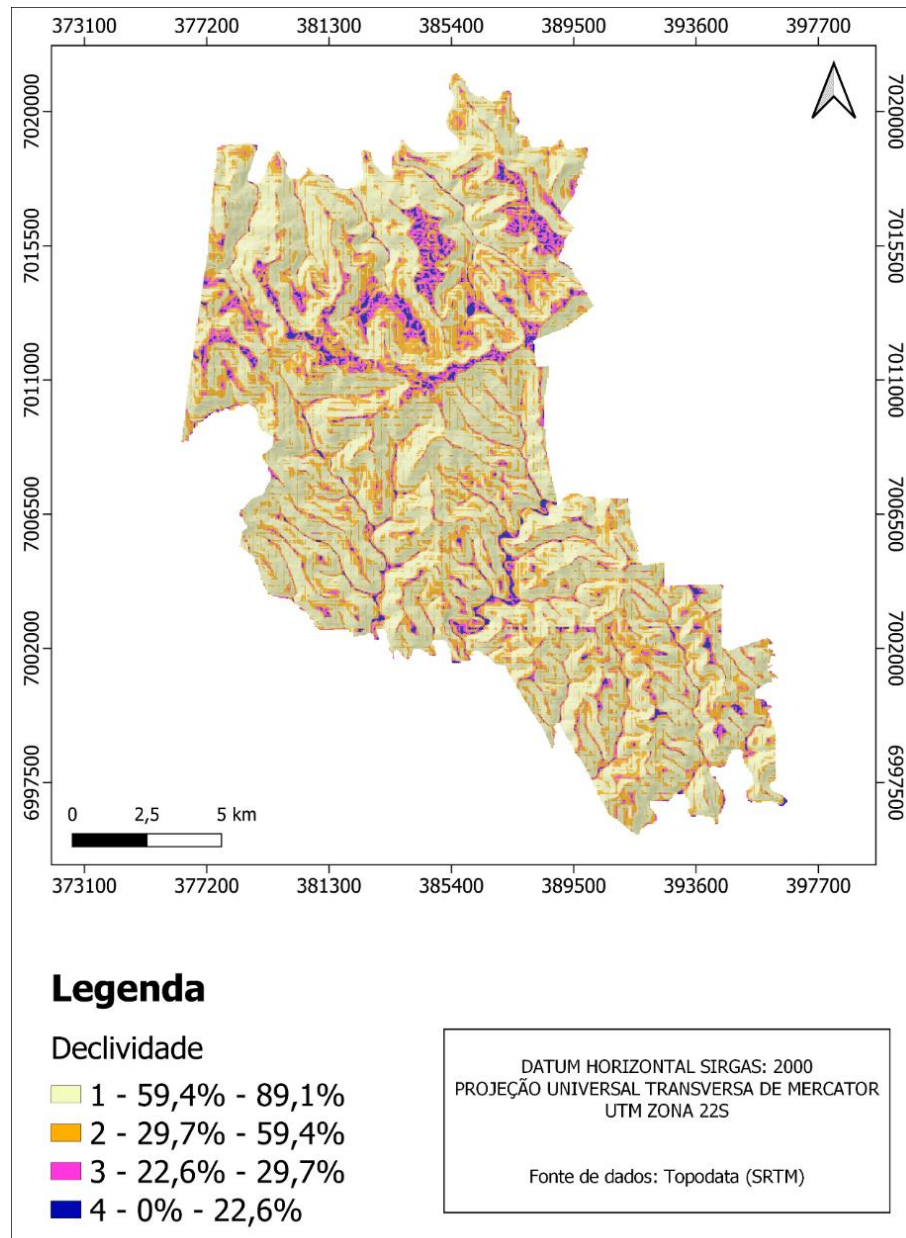


Figura 8. Mapa de declividade da área de pesquisa.

Figure 8. Slope map of the research area.

Para uma melhor compreensão e distinção das litologias em relação ao potencial hidrogeológico, foi necessária à sua separação baseando-se, primeiramente, no respectivo domínio hidrogeológico que a área está contida. Nesse contexto, as Formações Paranapanema e Chapecó aparecem contidas dentro do domínio Vulcânicas, sendo assim necessário um estudo particular das principais estruturas condicionantes dentro de ambas as litologias e seu grau de importância no potencial hidrogeológico da área para a devida atribuição dos pesos.

As estruturas primárias que são consideradas como condicionantes de aquíferos do Grupo Serra Geral, segundo o grau de importância são, primeiramente, o contato entre rochas maciças e zonas vesiculares a amigdalóides e/ou brechadas das rochas básicas da Formação Paranapanema, e, estruturas horizontais, essencialmente dos riolacitos, pertencentes à Formação Chapecó. Considerando que o domínio Vulcânicas possui um caráter hidrológico acentuado, foi atribuído peso 1 para os riolitos e riolacitos, e peso 3 para os basaltos (Fig. 9).

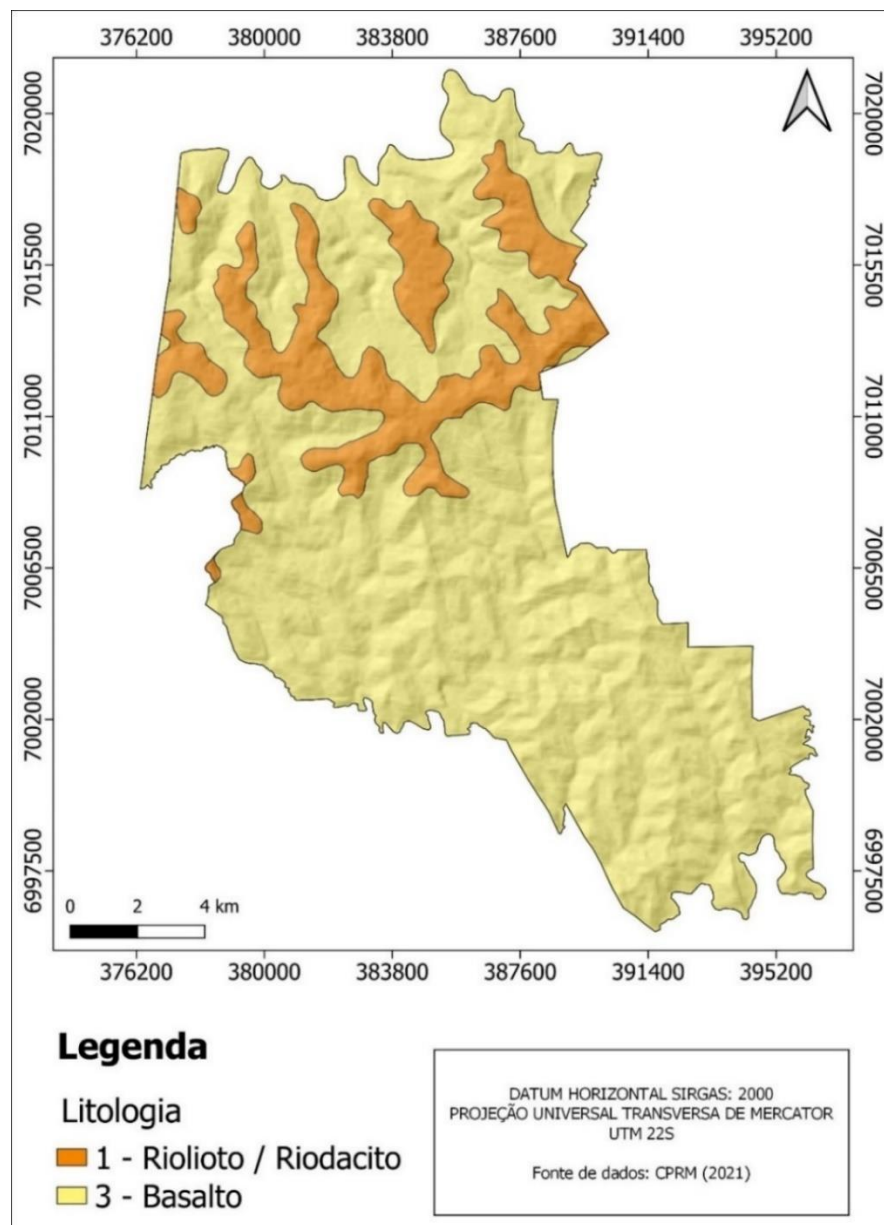


Figura 9. Mapa Litológico da área de pesquisa.

Figure 9. Lithological map of the research area.

O mapa de solos é composto por 2 tipos dominantes dentro da área de estudo: Cambissolo Háplico Eutrófico e Neossolo Litólico Eutrófico. O Cambissolo Háplico Eutrófico é identificado normalmente em relevos fortes e ondulados a montanhosos, apresentando solo com argila de alta atividade e de alta fertilidade, e o Neossolo Litólico Eutrófico é representado por solos rasos, estando associados normalmente a relevos declivosos e de alta fertilidade. Para classifica-los em termos de potencialidade hídrica, foi necessário avaliar os tipos de solos em relação a sua permeabilidade e também declividade dominante, foram atribuídos, dentre os valores entre 1 e 4, mediante o grau de importância. Levando em consideração as características dos solos, foi atribuído peso (2) para ambos (Fig. 10).

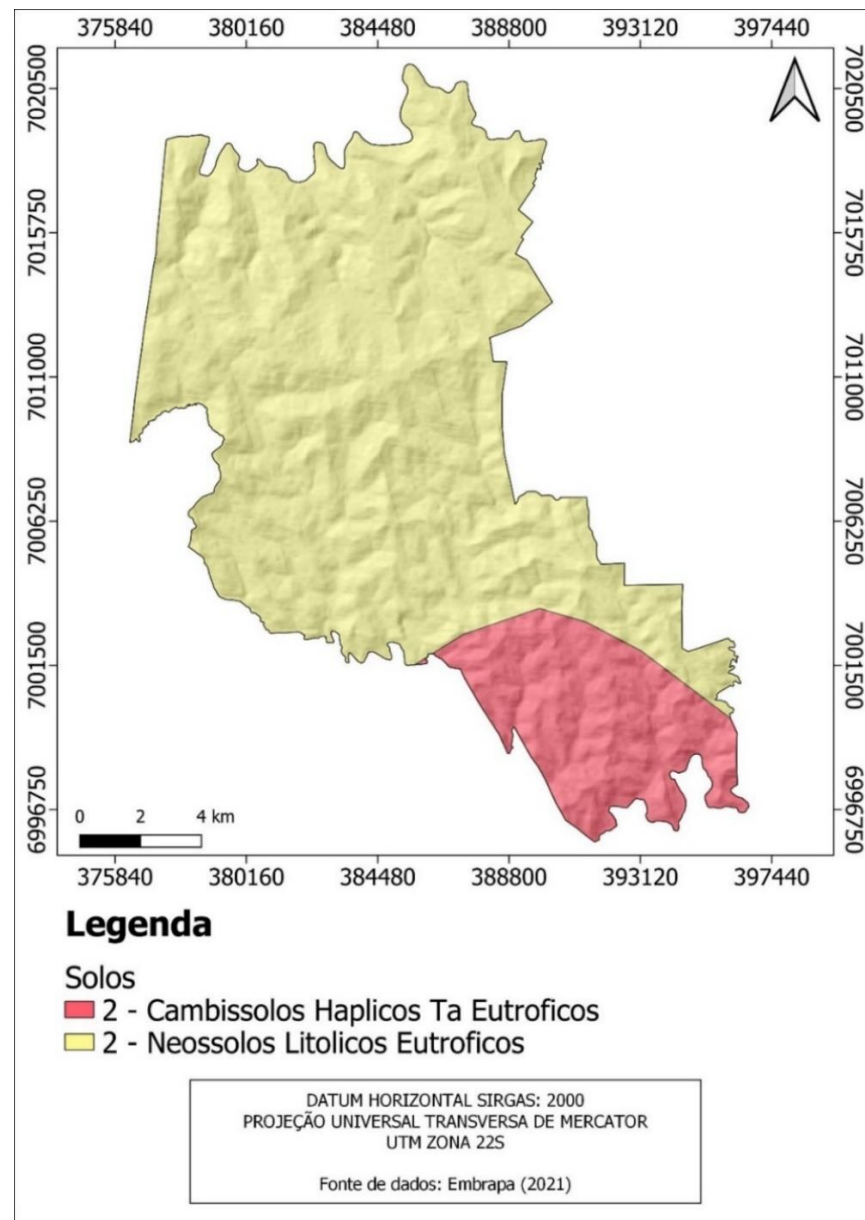


Figura 10. Mapa de Solos reclassificado pelo seu potencial hidrogeológico.

Figure 10. Soil map reclassified by its hydrogeological potential.

No mapa de densidade de lineamentos, foi possível notar a dominância da orientação dos principais lineamentos na direção NW/SE e subordinariamente NE/SW. Os lineamentos com maiores pesos (4) são representados pelas zonas de maior ocorrência de intersecção (centróides), e a partir desse mesmo critério, foram determinadas as demais zonas (Fig. 11).

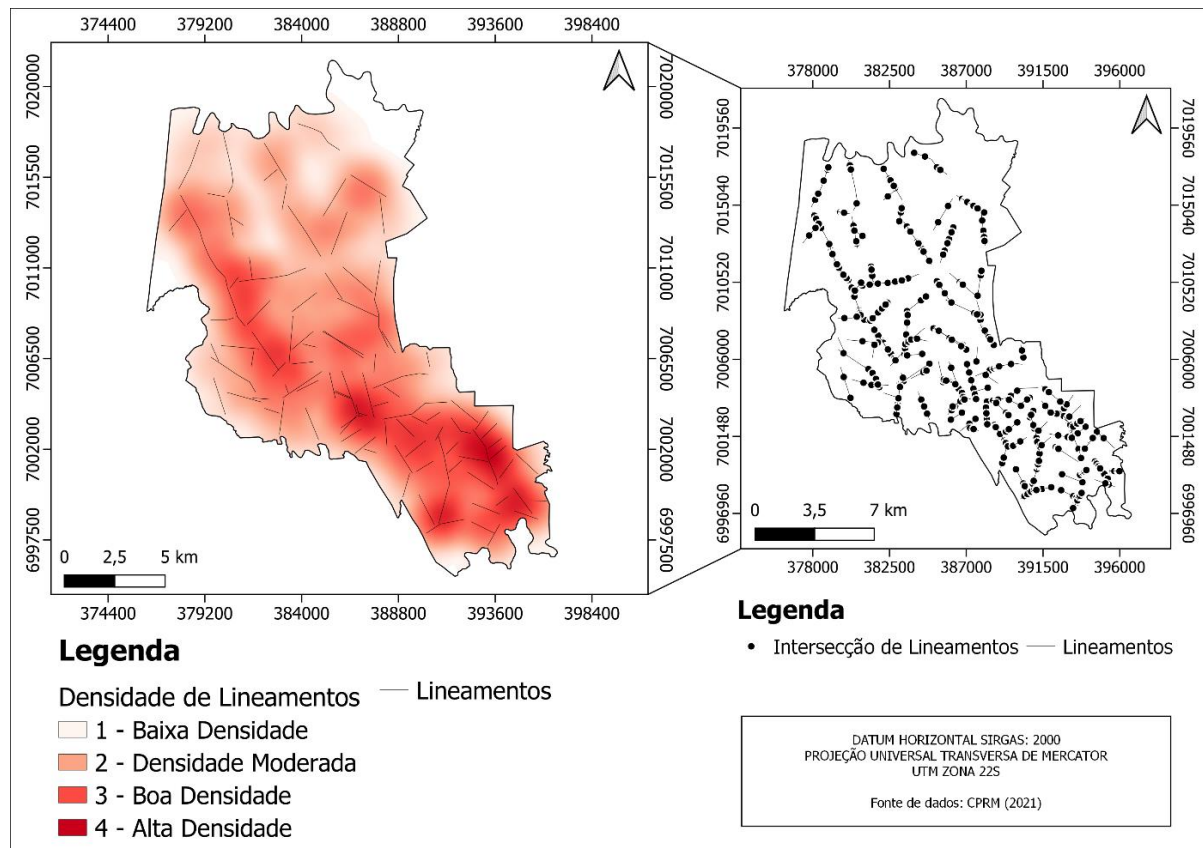


Figura 11. Mapa de densidade de lineamentos reclassificado a partir das zonas de intersecção.

Figure 11. Density map of lineaments reclassified from the intersection zones.

No mapa de uso de solos, a classificação supervisionada (vegetação e solo exposto) e os pesos envolvidos para definir o potencial hidrogeológico foram baseadas na metodologia apresentada por Dantas *et al.* (2010). A classificação de imagens consiste no estabelecimento de um processo de decisão no qual o grupo de pixels é definido como pertencente a uma determinada classe. O SCP permite a rápida criação de Regiões de Interesse (*ROIs*) que são armazenadas em um *shapefile* e classificadas posteriormente. Para este projeto, o classificador utilizado foi o *maximum likelihood*, considerando cerca de 100 amostragens para cada variável escolhida.

Nesse contexto, para a área de estudo, foram classificadas 2 classes, sendo considerada a classe *solo exposto* como sendo de maior importância, atribuindo-o peso 4, enquanto a classe *vegetação* recebeu peso 3. A figura 12 faz uma comparação da classificação supervisionada com a Imagem *Landsat 8* para validação da consistência do método.

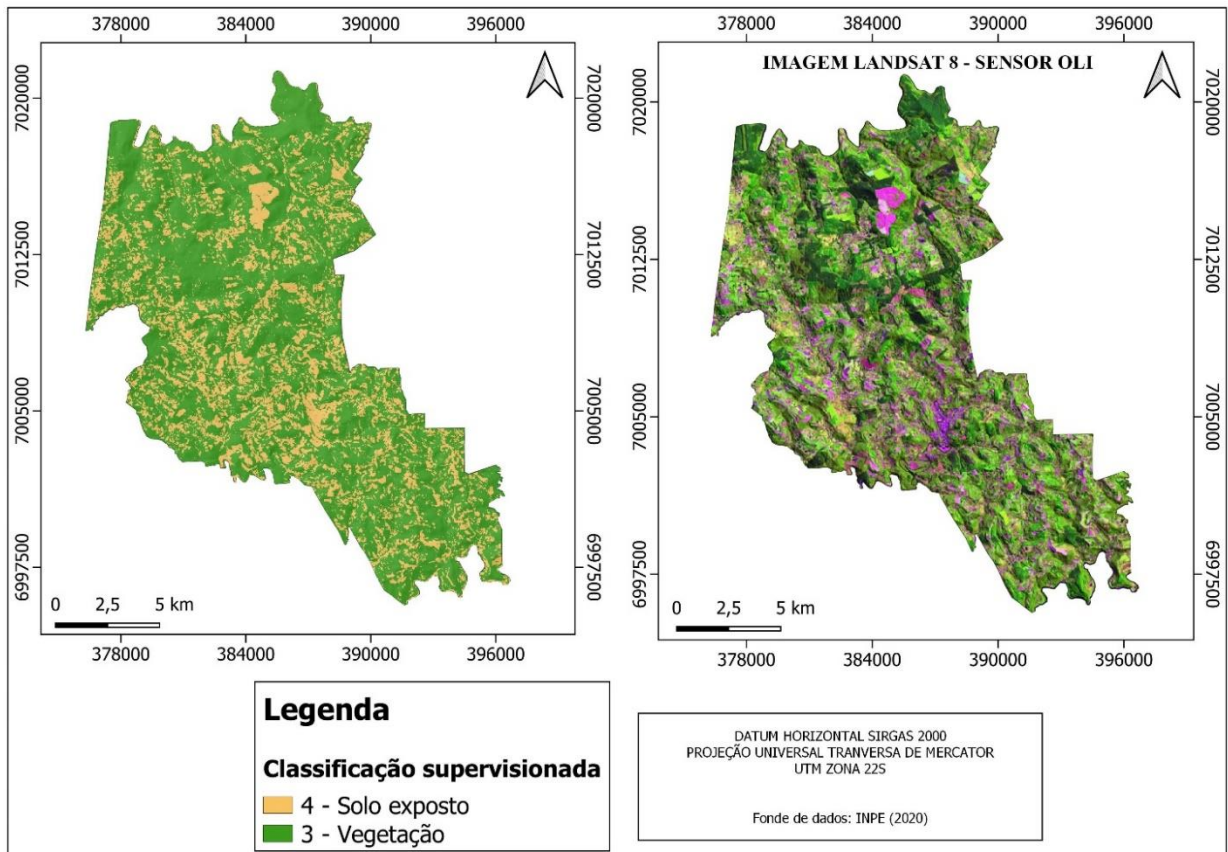


Figura 12. Mapa de classificação supervisionada de uso de solos.

Figure 12. Supervised land use classification map.

A partir da aplicação do Processo Analítico Hierárquico, os pesos normalizados foram calculados e estão representados na tabela 2. Os resultados indicaram que o valor calculado para λ (5,25) foi próximo do número de variáveis analisadas (5), como recomenda Saaty, 2006. Em relação ao Índice de Consistência (IC), foi obtido um valor de 0,062, valor este que deve ser próximo a zero para atender ao método escolhido, bem como, a Taxa de Consistência, resultou no valor equivalente à 0,055 ou 5,58%, índice que precisa ser inferior a 0,10 ou 10% (Saaty, 2012). Ressalta-se que os valores resultantes atenderam fielmente à recomendação metodológica detalhada por Saaty (2012).

Tabela 2. Detalhamento do cálculo aplicado às variáveis após aplicação da matriz de comparação pareada.

Table 2. Details of the calculation applied to the variables after applying the paired comparison matrix.

MATRIZ DE COMPARAÇÃO PAREADA					
VARIÁVEIS	DENSIDADE DE LINEAMENTOS	DECLIVIDADE	GEOLOGIA	SOLO	OCUPAÇÃO DE SOLO
DENSIDADE LINEAMENTOS	1	2	5	7	7
DECLIVIDADE	0,5	1	5	7	5
GEOLOGIA	0,2	0,2	1	2	3
SOLO	0,15	0,15	0,5	1	2
OCUPAÇÃO SOLO	0,15	0,3	0,4	0,5	1
SOMA	2	3,65	11,9	17,5	18

CALCULO DE MATRIZ DE COMPARAÇÃO PAREADA NORMALIZADA					
VARIÁVEIS	DENSIDADE DE LINEAMENTOS	DECLIVIDADE	GEOLOGIA	SOLO	OCUPAÇÃO DE SOLO
DENSIDADE LINEAMENTOS	0,5	0,55	0,42	0,4	0,39
DECLIVIDADE	0,25	0,27	0,42	0,4	0,28
GEOLOGIA	0,1	0,05	0,08	0,12	0,17
SOLO	0,075	0,04	0,04	0,06	0,11
OCUPAÇÃO SOLO	0,075	0,08	0,03	0,03	0,05

PESO PONDERADO					
VARIÁVEIS	DENSIDADE DE LINEAMENTOS	DECLIVIDADE	GEOLOGIA	SOLO	OCUPAÇÃO DE SOLO
DENSIDADE LINEAMENTOS	1	2	5	7	7
DECLIVIDADE	0,5	1	5	5	5
GEOLOGIA	0,2	0,2	1	2	3
SOLO	0,15	0,15	0,5	1	2
OCUPAÇÃO SOLO	0,15	0,3	0,4	0,5	1

CALCULO DO VALOR DE CONSISTÊNCIA					
VARIÁVEIS	DENSIDADE DE LINEAMENTOS	DECLIVIDADE	GEOLOGIA	SOLO	OCUPAÇÃO DE SOLO
DENSIDADE LINEAMENTOS	0,452	0,65	0,52	0,455	0,37
DECLIVIDADE	0,23	0,324	0,52	0,325	0,265
GEOLOGIA	0,09	0,06	0,104	0,13	0,16
SOLO	0,07	0,04	0,052	0,065	0,106
OCUPAÇÃO SOLO	0,07	0,09	0,04	0,032	0,053

SOMA	PESO	CONSISTÊNCIA	
2,447	0,452	5,41	IC: 0,0625
1,664	0,324	5,13	IA: 1,12
0,544	0,104	5,23	TC: 0,0558
0,333	0,065	5,12	TC: 5,58%
0,285	0,053	5,37	

Para a elaboração do mapa do potencial hidrogeológico da área, foram multiplicados todos os mapas temáticos, no formato raster, pelos seus respectivos pesos e, posteriormente, somados através da ferramenta *Raster Calculator* do Qgis 3.16. O mapa densidade de lineamento, não houve extrapolação, devido às especificidades do interpolador, resultando em locais dentro do mapa onde houve campos sem valores, e para não comprometer o resultado final do cálculo, optou-se por manter a camada resultante (Fig.13).

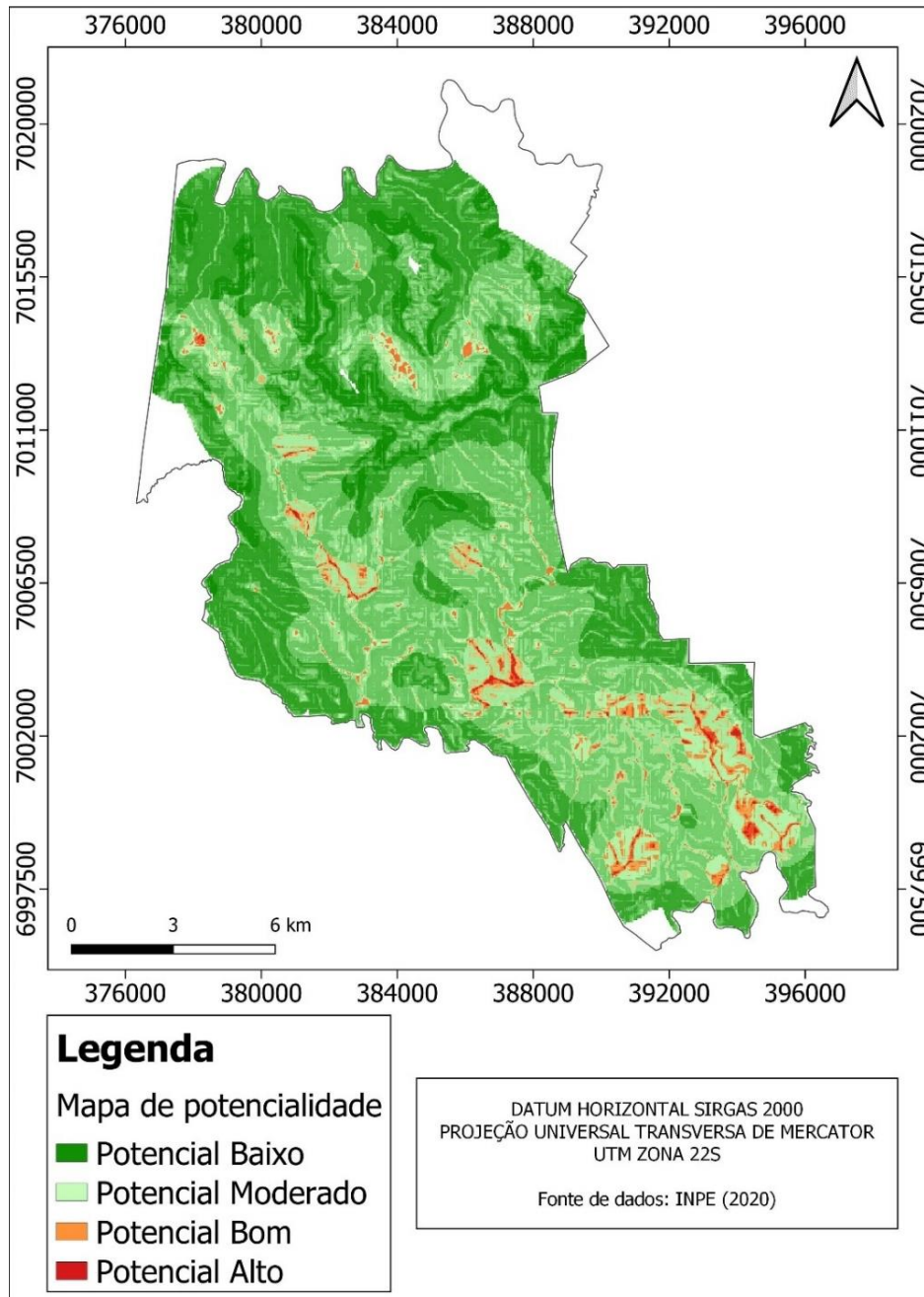


Figura 13. Áreas potenciais à ocorrência de água subterrânea no município de Ipumirim, área de estudo.

Figure 13. Potential areas for the occurrence of groundwater in the municipality of Ipumirim, study area.

O Mapa de Potencialidade para a área de estudo foi classificado em 4 classes, de acordo com a metodologia aplicada: potencial baixo; potencial moderado; potencial bom e potencial alto.

4 Discussão dos resultados

A partir deste estudo foi possível comparar os mapas temáticos da área com o seu respectivo domínio hidrogeológico, estabelecendo assim uma correspondência entre as categorias de potencial e as unidades mapeadas. Considerando a ordem hierárquica atribuída às variáveis a partir do método PAH, a densidade de lineamentos, por apresentar peso maior, teve também um maior grau de influência quanto à ocorrência de água subterrânea, correspondendo à consistência das estruturas lineares contidas em determinadas porções da área.

Assim, verificou-se, que a porção S do mapa da potencialidade hidrogeológica da área, foi classificado como sendo o de mais alto potencial, e, visando as características do domínio Vulcânicas, está condicionado tanto a fatores genéticos do pacote vulcânico, quanto à presença de estruturas que condicionam a circulação das águas nestas fácies ou rochas, aumentando a capacidade de armazenamento de água, podendo atingir vazões superiores a 20.000 l/h. A sua ordem de potencialidade foi classificada em virtude dos parâmetros se concentrarem nesta região específica, como a maior densidade de lineamentos, especialmente, litologias mais propícias, terrenos relativamente mais planos, e melhores condições na classificação e uso do solo.

Na porção central do mapa, a predominância da potencialidade está entre grau baixo e moderado, excepcionalmente em algumas regiões, o que se demonstrou satisfatório tendo em vista que é uma região com menor densidade de lineamentos, presença de área urbana, alta declividade, bem como as características heterogêneas do tipo de solo, que varia muito de um local para o outro, comportando desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos. Apesar da baixa produtividade, a região central do mapa é a porção com maior predominância de poços tubulares perfurados no município.

A porção norte da área é a que apresenta o menor número de poços tubulares perfurados. A baixa exploração pode ser justificada pelo baixo grau de lineamentos e alta declividade em algumas porções. Contudo, o mapa final de potencialidade demonstra boas condições à ocorrência do recurso subterrâneo em determinadas regiões.

A vazão específica remete a transmissividade e condutividade elétrica, podendo ser utilizada como um parâmetro avaliativo de produtividade de um aquífero em uma determinada área. A figura 14 mostra alguns dos dados de vazão específica dos poços que se localizam na área de forma especializada e a sua classificação. Optou-se por selecionar, de forma aleatória, os poços que ocupassem todas as regiões da área estudada para aplicar de forma mais efetiva a metodologia utilizada.

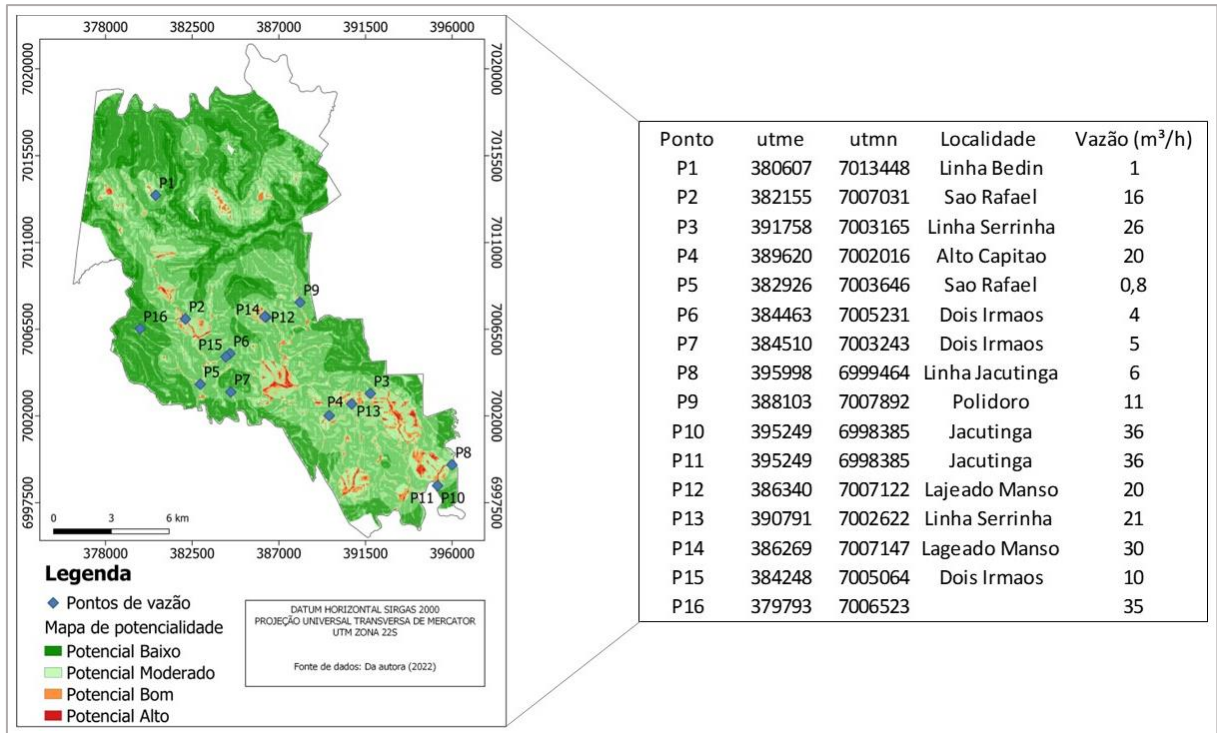


Figura 14. Áreas potenciais à ocorrência de água subterrânea no município de Ipumirim, com os respectivos pontos e vazões representados na tabela.

Figure 14. Potential areas for the occurrence of groundwater in the municipality of Ipumirim, study area.

A classificação de produtividade através dos valores de vazão específica é importante para a obtenção de uma relação positiva com o mapa de potencial hidrogeológico, onde a grande maioria dos dados se enquadrou no contexto e na análise multicritério escolhida. Os poços concentrados na porção sul refletem o alto grau de lineamentos e características litológicas, acentuando a porosidade secundária e o melhor potencial focalizado.

A suscetibilidade das águas subterrâneas, sob a perspectiva do apoio multicritério à tomada de decisão, propôs um modelo de avaliação que resultou na ordenação das regiões que estão mais vulneráveis nos aspectos intrínsecos à ocorrência de água. A aplicação do método PAH resultou numa ordenação de alternativas, demonstrando que a porção norte e central é a menos favorável à exploração e a porção sul/sudeste é a mais indicada à exploração.

Com a avaliação dos sistemas produtivos através dos parâmetros analisados neste estudo e comparando a susceptibilidade a ocorrência de água subterrânea no município de Ipumirim, os poços tubulares que apresentam maior índice de vazão são os que se mostraram coerentes ao

grau de potencialidade apresentado no mapa final. Portanto se for realizado o acompanhamento e aplicação do método PAH tem-se uma ferramenta muito útil para tomada de decisão frente ao controle de exploração das fontes subterrâneas.

5 Conclusões

Com a conclusão deste projeto, foi possível alcançar os objetivos propostos inicialmente:

- delimitar, através da análise multicritério as zonas potenciais a ocorrência de águas subterrâneas;
- caracterizar as zonas de maior ou menor potencial a partir da metodologia aplicada;
- validar o método a partir das informações físicas dos poços tubulares no município de Ipumirim, mostrando-se coerentes aos dados gerados no mapa final de potencialidade.

A porção sul da área representou o maior grau de potencialidade de água subterrânea; a porção central, apesar do grande número de perfurações, apresentou potencialidade moderada, e a região norte se mostrou a de menor potencialidade à ocorrência.

O método do Processo Analítico Hierárquico (PAH) contribuiu para a confirmação da efetividade do modelo final, pois os maiores valores de capacidade específica se situaram em locais de favorabilidade média e, especialmente, alta, mantendo também um padrão para as regiões com menor potencial.

A metodologia utilizada apresentou flexibilidade, permitindo modificar a estrutura hierárquica que foi desenvolvida, no instante que se pretende retirar ou adicionar algum critério de decisão. A importância atribuída a cada um dos critérios também pode ser reconsiderada, dependendo da região de interesse, e de suas características geológicas, pedológicas e geomorfológicas, em que os métodos sejam aplicados e novas opiniões podem sejam atribuídas.

Da mesma forma, algumas limitações devem ser consideradas:

- Não foi possível calcular a densidade de drenagem a partir do comprimento médio das linhas da bacia por unidade de área (km/km^2) devido à dificuldade de replicar esta metodologia dentro da plataforma Qgis;
- Da mesma forma, a densidade de lineamentos foi calculada a partir de pontos de intersecção (centróides), que, também representam zonas importantes de

influência na ocorrência de água subterrânea, não englobando assim as direções das linhas (comprimento por unidade de área - km/km²).

- Para a obtenção de um bom resultado com a classificação supervisionada do solo foi necessária a escolha de um número razoavelmente elevado de pixels para cada amostra de treinamento (100), assim, a vegetação e o solo exposto foram as variáveis que representaram uma distribuição estatística mais próxima da distribuição normal, apesar de haver demais atributos a serem considerados dentro da área de estudos, a quantidade de pixels incluídos na amostragem de ambas mostrou-se mais precisa, limitando a aplicabilidade para atributos com menor ou com mistura de pixels.

Do ponto de vista instrumental, este estudo pode assumir formato de utilização prática, tal como auxiliar órgãos públicos que tem a função de avaliar e planejar a exploração de água subterrânea.

Agradecimentos: Esta pesquisa recebeu apoio financeiro da FAPESC (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina) através de bolsa de mestrado concedido à primeira autora do manuscrito.

Referências bibliográficas

- Ahmad, I.; Verma, M. K. 2018. Application of Analytic Hierarchy Process in Water Resources Planning: A GIS Based Approach in the Identification of Suitable Site for Water Storage. *Water Resources Management*. (32): 5093– 5114.
- Brans, J. P., & Mareschal, B. 2005. *Multiple criteria decision analysis - state of the art*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Berhanu, B.; Melesse, A.M. e Seleshi, Y. 2013. *GIS-based hydrological zones and soil geo-database of Ethiopia*. *Catena*, 104:21–31.
- Chiang, L.C. 1984. *Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação aos estados do Rio de Janeiro*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 157 p.
- Congedo, L. 2015. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*.
- Dantas., et al. 2010. *Definição de áreas potenciais para a ocorrência de água subterrânea na Sub-Bacia Do Rio Siriri - Sergipe com o auxílio do AHP (Método Analítico Hierárquico)*. (75):1-16.

- Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). 1986. *Mapa geológico do Estado de Santa Catarina*. Florianópolis: DNPM.
- Fashae, O. A., et al. 2014. *Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW - Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach*. p. 19-38.
- Filho, J. M. 2008. *Ocorrência das Águas Subterrâneas*. Hidrogeologia: Conceitos e aplicações. Rio de Janeiro. CPRM: LABHID, cap 2.1.
- Nanni, A.S. 2008. *O Flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre.
- PROESC, 2002. *Diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do estado de Santa Catarina*. Florianópolis.
- Rebouças, A. C. 2006. *Águas Subterrâneas*. Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos. São Paulo: Signus Editora.
- Saaty, T. L. 1977. *A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures*. Journal of Math. Psychology, (15): 234-281.
- Saaty, T. L. 1980. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. & Vargas, L. G. 1987. *Uncertainty and Rank Order in the Analytic Hierarchy Process*. European Journal of Operational Research. (32): 107-117.
- Saaty R.W. 2012. *The Analytic Hierarchy Process - What and how It is used It is*. International Journal of Advanced Science and Technology. (11):19-24.
- Santa Catarina. 1997. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. *Bacias Hidrográficas de Santa Catarina: Diagnóstico Geral*. Florianópolis.
- Steiguer, J.; Duberstein, J. & Lopes, V. 2005. *The Analytic Hierarchy Process as a Means for Integrated Watershed Management*.
- Wang, L. & Liu, H., 2006. *An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling*. International Journal of Geographical Information Science. (20): 193- 213.
- Zadeh, L.A. 1965. *A característica especial da Lógica Fuzzy é a de representar uma forma inovadora de manuseio de informações imprecisas, provendo um método de traduzir os seus atributos em valores numéricos*.
- Zahedi, F. 1984. *Estimation Techniques and their Statistical Properties in the Analytic Hierarchy Process*. University of Massachusetts Working Paper.

4. REFERÊNCIAS

Adiat, K. A. N.; Nawawi, M. N. M. e Abdullah, K. 2012. Assessing the accuracy of GISbased elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool – A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. *Journal of Hydrology*, p. 75–89.

Agência Nacional De Águas (ANA). 2007. Manual de construção da base hidrográfica otocodificada: construção da base topológica de hidrografia e ottobacias conforme a codificação de bacias hidrográficas de Otto Pfafstetter: Versão 2.0. Brasília, ANA/SGI, 144p.

Ahmad, I., Verma, M. K. 2018. Application of Analytic Hierarchy Process in Water Resources Planning: A GIS Based Approach in the Identification of Suitable Site for Water Storage. *Water Resources Management*. **32 (15)**: 5093– 5114.

Almeida, J. A. 2012. Modelo multicritério para seleção de portfólio de projetos de sistema de informação. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE., 115p.

Almeida, A. T. 2013. Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério. São Paulo: Atlas.

Alvarado, A.; Esteller, M.V.; Quentin, E., Expósito, J. L. 2016. Multi-Criteria Decision Analysis and GIS Approach for Prioritization of Drinking Water Utilities Protection Based on their Vulnerability to Contamination. *Water Resources Management*. **30(4)**: 1549-1566.

Barbosa, N. F. M.; Stosic, B. D.; Stosic, T.; Lopes, P. M. O.; Moura, G. B. A., Melo, J. S. P. 2014. Kernel smoothing dos dados de chuva no Nordeste. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **18(7)**:742-747.

Belton, V., Stewart, T. 2002. Multiple criteria decision analysis: an integrated approach. New York: Springer Science & Business Media.

Belton, V., Stewart, T. J. 2002. Multiple criteria decision analysis. Kluwer Academic Publishers.

Berhanu, B.; Melesse, A. M., Seleshi, Y. 2013. GIS based hydrological zones and soil geo-database of Ethiopia. *Catena*, **104**:21–31.

Bittencourt, A. V. L.; Rosa, F. E. F.; Hindi, E. C., Buchmann, F. A. C. 2003. A influência dos Basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral na Bacia do Rio Piquiri, Paraná, *Águas Subterrâneas*, **17**:67-75.

Braga, M. J. E.; Barreto, J. M.; Soares, M. A. 1995. Conceitos da matemática nebulosa na análise de risco. Rio de Janeiro: Artes e Rabiskus.

Brandã, R. L., Gomes, F. E. M. 2003. Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas na avaliação potencial hidrogeológico da folha Irauçuba. *Revista de Geologia, Fortaleza*, **16**:(1).

Bradbury, K. R., Muldoon M. A. 1992. Hydrogeology and Groundwater Monitoring of Fractured Dolomite in the Upper Door Priority Watershed, Door Country, Wisconsin. Report final, Wisconsin, Wisconsin Geological and Natural History Survey, University of Wisconsin Madison. 83p.

Brans, J. P., Mareschal, B. 2005. Multiple criteria decision analysis – state of the art. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Borges, K. A. V; Davis J. R, Clodoveu A.; Laender, Alberto H. F. 2005. Modelagem conceitual de dados geográficos. CASANOVA, et. al. Banco de Dados Geográfico. *Mundo GEO: Curitiba*, p. 83-136.

Câmara, G. 2005. Representação computacional de dados geográficos. In: CASANOVA, M. A., et al. Banco de dados geográficos. Curitiba: *Mundo geo*. p. 11-52.

Chiang, L. C. 1984. Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação aos estados do Rio de Janeiro. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 157 p.

Colin, E. C. 2011. Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégias, finanças, logística, produção, marketing e vendas. Rio de Janeiro.

Cuhls, K. (2005). Delphi surveys. Teaching material for UNIDO Foresight Seminars.

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica). 2005. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000. Nota explicativa, São Paulo, DAEE (Departamento de Águas Trabalho de Conclusão de Curso, n. 374 2020 108 e Energia Elétrica), IG (Instituto Geológico), IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), CPRM (Serviço Geológico do Brasil), 119p.

Dantas., et al. 2010. Definição de áreas potenciais para a ocorrência de água subterrânea na Sub-Bacia Do Rio Siriri - Sergipe com o auxílio do AHP (Método Analítico Hierárquico). **75**:1-16.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). 1986. Mapa geológico do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: DNPM.

Domenico, P. A., Schwartz, F. W. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. Wiley and Sons. 824 p.

Fairfield, J., Leymarie, P. 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Res*, 27:709-717.

Fashae, O. A., et al. 2014. Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW - Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach. p. 19-38.

Feijó, R. T., Campos, J. E. G. 2016. Aquíferos com fluxos controlados simultaneamente por porosidade intergranular e planar: aplicação a rochas metassedimentares do Alto Paraguai, MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. **21(1)**:11-24.

Feitosa, F. A. C., Manoel, F. J. 1997. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Brasil. Universidade Federal de Pernambuco. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza, CPRM; Recife, UFPE, LABHID. 389p.

Feitosa, F. A. C., Manoel, F. J. (Coord.). 2000. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 2. ed. Recife, CPRM, LABHID-UFPE.

Felicísimo, A. M. 1994. Modelos digitales del terreno: Introducción aplicaciones en las ciencias ambientales. Oviedo: Universidad de Oviedo.

Fernandes, A. J. 2008. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. Revista do Instituto Geológico. **(29)**:49-72.

Fraga, C.G. 1986. Introdução ao zoneamento do Sistema Aquífero Serra Geral no Estado do Paraná. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional e de Aplicação), Instituto de Geociências, Universidade São Paulo, São Paulo. Citado por Monteiro, R.C. Estimativa Espaço-Temporal da Superfície Potenciométrica do Sistema Aquífero Guarani na Cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil. 2003. 212 f. Tese (Doutorado em Geociências na Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

Freitas, M. A.; Eckert, R. M.; Caye, B. R. 2001. Captações de água subterrânea no oeste do estado de Santa Catarina, Porto Alegre: CPRM, 24p.

Freitas, M.A. 2003. PROESC: Diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do Estado de Santa Catarina. Projeto Oeste de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM/SDM-SC/SDA-SC/EPAGRI.

Galati, S. R. 2006. Geographic Information Systems Demystified. Norwood: Artech House.

Gomes, L. F. A. M.; Araya, M. C. G., Carignano, C. 2004. Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão. São Paulo: Pioneira Thomson Learning.

Gomes, L. F. A. M.; Gomes, C. F. S. 2014. Tomada de decisão gerencial, enfoque multicritério. São Paulo: Editora Atlas S. A.

Gustafsson, P. 1994. Spot satellite data for exploration of fractured aquifers in a semiarid area in southeastern Botswana. *Applied Hydrogeology*. **2(2)**:9-18.

Häder, M., & Häder, S. (1995). Delphi und kognitionspsychologie: Ein zugang zur theoretischen fundierung der Delphi-Methode. *ZUMA Nachrichten*, **37(19)**, 12.

Hajkowicz, S., Collins, K. 2007. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resources Management*. **21(9)**:553-1566.

Huang, M. H., et al. 2004. Value-added ERP information into information goods: an economic analysis. *Industrial Management and Data Systems*. **104**:689-697.

Iañes, M. M., Cunha, C. B. 2006. Uma metodologia para a seleção de um provedor de serviços logísticos. *Revista Produção*, São Paulo, **16(3)**: 394-412.

Jenson, S. K., Domingue, J. O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogr. Eng. Rem. Sens.* **54**:1593-1600.

Kaynak, E. (1994). Using the Delphi technique to predict future tourism potential. *Marketing Intelligence & Planning*, **12(7)**, 18-29.

Kaufmann, A. 1975. Introduction to theory of fuzzy subsets: fundamental theoretical elements. New York: Academic Press.

Kahraman, C. 2008. Fuzzy Multicriteria Decision Making - Theory and Applications with Recent Developments. Turkey: Springer Science.

Kenward, T. et al. 2000. Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions. *Remote Sensing of Environment*. **74**:432-444.

Landim, P. M. B. 2003. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo: Editora UNESP, 253p.

Li, Z. L. 1990. Sampling strategy and accuracy assessment for digital terrain modeling. PhD Thesis, The University of Glasgow.

Li, Z.; Zhu, Q., Gold, C. 2005. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. Boca Raton, CRC Press.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. 1994. Remote sensing and image interpretation. New York: John Wiley e Sons Inc., 708p.

López, H. M. L., Almeida, A. T. 2014. Utilizando PROMETHEE V para seleção de portfólio de projetos de uma empresa de energia elétrica. Production. **24(3)**: 559-571.

Mabee, S. B., Hardcastle C. H., Wise D. U. 1994. A method of collecting and analyzing lineaments for regional scale fractured-bedrock aquifer studies. Ground Water. **32**: 884-894.

Madrucci, V.; Araújo, C. C., Taioli, F. 2003. Sensoriamento remoto, aerogeofísica e geoprocessamento aplicados ao estudo de aquífero fraturado em terreno cristalino, leste do estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências. **33**: 43-52.

Manoel, J. 2008. Ocorrência das águas subterrâneas. In: Feitosa, Fernando A. C., et al (Org.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p.53-75.

Mather, P. M. 1999. Computer processing of remotely-sensed imagens: an introduction. 2. ed. Chichester: Jonh Wiley and Sons.

Maune, D. F.; Huff, L. C., Guenther, G. C. 2001. DEM User Applications. In: Maune, D.F. (Ed.) Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM User's Manual. Bethesda: The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, p. 367-394.

Meijerink, A. M. J.; Bannert, D.; Batelaan, O.; Lubczynnsky, M. W., Pointent, T. 2007. Remote sensing applications to groundwater. Paris: UNESCO, 304p.

Milani, E. J.; Melo, J. H. G.; Souza, P. A.; Fernandes, L. A., França, A. B. 2007. Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, **15(2)**:265-287.

Mogaji, K. A., Lim, H. S. 2017. Application of a GIS-/remote sensingbased approach for predicting groundwater potential zones using a multi-criteria data mining methodology. Environmental Monitoring and Assessment. **189**:7.

Moreira, M. 2003. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação, Viçosa. UFV, **2**:307.

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

Nardi, F.; Grimaldi, S.; Santini, M.; Petroselli, A., Ubertini, L. 2008. Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using digital elevation models: the flat area issue. Hydrol. Sci. J. **53**:1176-1193.

Nascimento, P. S. R. 2016. Geoprocessamento aplicado à gestão de aquíferos fissurais: uma proposta metodológica para o semiárido sergipano. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 13, Aracaju. Anais... Aracaju: ABRH, p.1- 10.

Nascimento, P. S. R.; Petta, R. A., Garcia, G. J. 2019. Confecção do mapa de densidade de drenagem através de geotecnologias visando definir a vulnerabilidade aos R. bras. Geom., Curitiba, 7(4): 204-222, out/dez. Processos erosivos na Sub-bacia do Baixo Piracicaba (SP). Estudos Geográficos, **6(1)**: 19-35. 2008.

Nascimento, P. S. R.; Nascimento Filho, J. C. B.; Mendonça, A. K. F., Wallacuela, G. J. 2017. Análise da capacidade de armazenamento de águas subterrâneas em aquíferos fissurais por técnicas de sensoriamento remoto. In: SEABRA, G. Educação ambiental: sustentabilidade dos ambientes rurais e urbanos. Ed. Barlavento, Ituiutaba-SP, p. 724-735.

National aeronautics and Space Administration. 2013. Shuttle Radar Topography Mission: Mission to Map the World. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Acesso em: set.

Neto, J. G. C.; Srinivasan, V. S.; Rufino., Alvez, I. A. 2011. Simulação Hidrosedimentológica, analisando dois MDEs de duas pequenas sub-bacias no Cariri Paraibano utilizando o modelo SWAT, Goiânia. *Revista Geográfica Acadêmica*, **5(1)**:48-58.

O'leary, D. W.; Friedman, J. D.; Pohn, H. A. 1976. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. *Geological Society of America Bulletin*, **87(10)**: 1463-1469.

Oksanen, J. 2006. Digital Elevation Model Error in Terrain Analysis. Helsinki. Dissertação Acadêmica em Geografia, Faculdade de Ciência, Universidade de Helsinki. 51p.

Pinto, D., et al. 2017. Delineation of groundwater potential zones in the Comoro watershed, Timor Leste using GIS, remote sensing and analytic hierarchy process (AHP) technique. *Applied Water Science*.**7**:503-519.

Preeja, K. A.; Joseph, S.; Thomas, T., Vitith, H. 2011. Identification of groundwater potencial zonas of a Tropical Basin River (Kerala, India) using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **39(1)**: 83- 94.

PROESC, 2002. Diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do estado de Santa Catarina. Florianópolis.

Razandi, Y; Pourchaseemi, H. R., Neisani, N. S. 2015. Application of analytical hierarchy process, frequency ratio, and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS.

Reginato, P. A. R., Strieder, A. J. 2006. Integração de Dados Geológicos na Prospecção de Aquíferos Fraturados na Formação Serra Geral. *Águas Subterrâneas*, São Paulo. **20(1)**:114.

Rezende, P. S.; Marques, D. V., Oliveira, L. A. 2017. Construção de modelo no Qgis e utilização do Método de Processo Analítico Hierárquico – AHP para Mapeamento de riscos à inundação na área urbana de Paracatu – Mg. *Caminhos de Geografia*, [s. l.], **18(61)**: 1–18.

Rosa, R. 1992. *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. 2ª ed. rev, Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia.

Rosa, A. S., Scherer, B. U. 2006. Geração de um MDT a partir de cotas levantadas por gps para uso na empresa Juliana Florestal Ltda, Caçador. VII Seminário em atualização em sensoriamento remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados à engenharia florestal.

Rossetti, L., et al. 2017. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework.

Saaty, T. L. 1977. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Math. Psychology*, **15**: 234-281.

Saaty, T. L. 1980. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill.

Saaty, T. L., Vargas, L. G. 1987. Uncertainty and Rank Order in the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*. **32**: 107-117.

Saaty, T. L. 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational*.

Saaty, T. L. 1991. *Método de Análise Hierárquica*, Tradução de Wainer da Silveira e Silva, McGraw-Hill, Makron, São Paulo, SP.

Saaty R.W. 2012. The Analytic Hierarchy Process - What and how It is used It is. *International Journal of Advanced Science and Technology*. **11**:19-24.

Sander, P. 1997. Water-well sitting in hard-rock areas: identifying promising targets using a probabilistic approach. *Hydrogeology Journal*, **5(3)**: 32-43.

Santa Catarina. 1997. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Bacias Hidrográficas de Santa Catarina: Diagnóstico Geral. Florianópolis.

Santos, P. A. 2020. Geração de Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistido. Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica (PPGMEG) da UFRRJ, Departamento de Geociências. Geoprocessamento.

Scheibe, L. F., Hirata, R. C. A. 2008. O contexto tectônico dos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral em Santa Catarina: uma revisão. Águas Subterrâneas.

Steiguer, J.; Duberstein, J., Lopes, V. 2005. The Analytic Hierarchy Process as a Means for Integrated Watershed Management.

Todd, D. K. 1980. Ground-water hidrology. 2.ed. New York: John Willey and Sons, 535 p.

Tomlinson, R. F. 1988. The impact of the transition from analogue to digital cartographic representation. American Cartographer, **15**: 249-262.

Valeriano, M. M. 2004. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul, São José dos Campos, SP. INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais, 72 p.

Valeriano, M. M., Rossetti, D. F. 2008. Topographic modeling of Marajó Island with SRTM data. Revista Brasileira de Geomorfologia, **9**:53-63.

Valeriano, M. M. 2008a. Dados Topográficos. In: Florenzano, T. G. (org). Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, **3**:72-103.

Veneziani, P., Rocio, M. A. R. 1991. Critérios de prospecção de água subterrânea com o emprego de dados de sensores remotos na região de Paraibuna-Taubaté Jambreiro (São Paulo). In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HIDRÍCOS, 5, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, p. 27-41.

Verdin, K.L., Jenson, S. K. 1996. Development of Continental Scale Digital Elevation Models and Extraction of Hydrologic Features. In: International Conference, 3, Workshop on integrating GIS and environmental modeling, Santa Fé. NM: NCGIA.

Wang, L., Liu, H., 2006. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*. **20**: 193- 213.

Wildner, W., et al. 2014. Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina. CPRM. Escala 1:5000.000.

Yager, R. R. 1977. Fuzzy Decision Making Including Unequal Objectives. *Fuzzy Sets and Systems*. p. 87-95.

Zadeh, L. A. 1973. "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes". *IEEE Trans. on Systems Man & Cybernetics*. **3**: 28-44.

Zahedi, F. 1984. Estimation Techniques and their Statistical Properties in the Analytic Hierarchy Process. University of Massachusetts Working Paper.

Zalan, P. V., et al. 1990. The Paraná Basin, Brazil, In: Leighton, M. W.; Kolata, D. R.; Oltz, D. F. e Eidel, J. J. (eds.): Interior cratonic basins. American Association of Petroleum Geologists. *Memoir*, **51**: 681-708.

Zopounidis, C.; Pardalos, P. 2010. Handbook of multicriteria analysis. Springer Science & Business Media.

ANEXO A – CARTA DE SUBMISSÃO DO ARTIGO

09/11/22, 14:18

Gmail - [PG] Agradecimento pela submissão



Janiele Kist Jani <janiele.geo@gmail.com>

[PG] Agradecimento pela submissão

1 mensagem

naoresponda@ufrgs.br <naoresponda@ufrgs.br>

9 de novembro de 2022 às 14:12

Responder a: Pesquisas em Geociências - Comissão Editorial <pesqgeoc@ufrgs.br>

Para: Janiele Kist <janiele.geo@gmail.com>

Janiele Kist:

Obrigado por submeter o manuscrito, "Mapeamento de zonas potenciais a ocorrência de água subterrânea nas rochas vulcânicas do Aquífero Serra Geral, a partir da análise multicritério no município de Ipumirim, SC." ao periódico Pesquisas em Geociências. Com o sistema de gerenciamento de periódicos on-line que estamos usando, você poderá acompanhar seu progresso através do processo editorial efetuando login no site do periódico:

URL da Submissão: <https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/authorDashboard/submission/128387>

Usuário: jani1

Se você tiver alguma dúvida, entre em contato conosco. Agradecemos por considerar este periódico para publicar o seu trabalho.

Pesquisas em Geociências - Comissão Editorial

Pesquisas em

Geociências <http://www.seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

APÊNDICE I

27/03/23, 14:36

Pesquisa Dinâmica - Delphi

Pesquisa Dinâmica - Delphi

Meu nome é Janiele Kist, sou mestrandia em Geologia pela Universidade Federal de Santa Catarina, com orientação, neste projeto, do Prof. Dr. Carlos Antonio Vieira e da Prof. Dra. Luana Moreira Florisbal.

A análise de decisão multicritério consiste em um conjunto de abordagens formais que tem como finalidade auxiliar na determinação de uma decisão importante individual ou em grupo, esclarecendo o problema e avaliando as alternativas através de múltiplos critérios.

Portanto, para a definição dos pesos, adotou-se o método de comparação par a par proposto no Processo Analítico Hierárquico (Saaty 1980). Por meio desta técnica, pesos e prioridades são derivados a partir de um conjunto de julgamentos subjetivos.

Para a construção da Matriz de Comparação Pareada para um estudo do potencial hidrogeológico, inicialmente, se faz necessário estabelecer uma ordem de importância das variáveis para hierarquiza-las, de maior para menor susceptibilidade.

Assim, essa pesquisa tem como objetivo esclarecer a ordem de importância destas variáveis a partir da pesquisa com especialistas na área da geologia.

Neste contexto, qual peso entre 1 e 4 você atribuiria as variáveis abaixo, considerando 1 (menor influência) e 4 (maior influência).

***Obrigatório**

1. *Marcar apenas uma oval.*

Opção 1

2. **Declividade - Baixa (0% - 22%)**

Marcar apenas uma oval.

Peso 1

Peso 2

Peso 3

Peso 4

27/03/23, 14:36

Pesquisa Dinâmica - Delphi

3. Declividade - Moderada (22% a 29%)

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
 Peso 2
 Peso 3
 Peso 4

4. Declividade Relativamente Alta (29% - 45%)

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
 Peso 2
 Peso 3
 Peso 4

5. Declividade Muito Alta (Acima de 45%)

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
 Peso 2
 Peso 3
 Peso 4

6. Geologia - Riolito/Riodacito

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
 Peso 2
 Peso 3
 Peso 4

27/03/23, 14:36

Pesquisa Clínica - Delphi

7. Geologia - Basalto

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
- Peso 2
- Peso 3
- Peso 4

8. Solos - Cambissolo

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
- Peso 2
- Peso 3
- Peso 4

9. Solos - Neossolo

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
- Peso 2
- Peso 3
- Peso 4

10. Cobertura de Solo - Vegetação

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
- Peso 2
- Peso 3
- Peso 4

27/03/23, 14:38

Pesquisa Dinâmica - Delphi

11. Cobertura do Solo - Área urbana

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
 Peso 2
 Peso 3
 Peso 4

12. Cobertura de Solo - Solo exposto

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
 Peso 2
 Peso 3
 Peso 4

13. Cobertura de Solo - Corpos d'água

Marcar apenas uma oval.

- Peso 1
 Peso 2
 Peso 3
 Peso 4

14. De maior para menor, para você qual a ordem de influência das variáveis na potencialidade de água subterrânea? (Geologia - G; Densidade de Lineamentos - DL; Declividade - D; Solos - S e Ocupação de solos - OS) *
