



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Urbana
Curso de Graduação em Engenharia Urbana



Júlia Moura de Oliveira

**ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE À EVENTOS CÁRSTICO-
GEOTÉCNICOS EM REGIÃO CENTRO-URBANA DO
MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS-MG**

Ouro Preto

2023

Análise de suscetibilidade à eventos cárstico-geotécnicos em região centro-urbana do município de Sete Lagoas-MG

Júlia Moura de Oliveira

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Urbana na Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 17 de março de 2023.

Áreas de concentração: Geotecnia e Planejamento Urbano

Orientadora: Prof. Ma. Camila S. Schuch – UFOP

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão – UFMG

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48a Oliveira, Julia Moura de.
Análise de suscetibilidade à eventos cárstico-geotécnicos em região centro-urbana do município de Sete Lagoas-MG. [manuscrito] / Julia Moura de Oliveira. - 2023.
80 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Ma. Camila Santos Schuch.
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Águas subterrâneas. 2. Recursos naturais - Exploração. 3. Solos - Abatimento. 4. Carste. I. Schuch, Camila Santos. II. Galvão, Paulo Henrique Ferreira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Júlia Moura de Oliveira

Análise de suscetibilidade à eventos cárstico-geotécnicos em região centro-urbana do município de Sete Lagoas - MG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Urbano

Aprovada em 17 de março de 2023

Membros da banca

Me. Camila Santos Schuch - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
Me. Pedro Henrique da Silva Assunção - Universidade Federal de Minas Gerais
Dra. Iraydes Tálita de Sena Nola - Universidade Federal de Ouro Preto

Camila Santos Schuch, orientador(a) do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Camila Santos Schuch, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/03/2023, às 14:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0497621** e o código CRC **D1C6CD42**.

*Dedico este trabalho aos meus pais e amigos
que foram refúgio nas horas difíceis.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado forças para concluir esse trabalho.

Aos meus pais e familiares por me apoiarem e serem amparo em todas as horas.

Aos meus amigos por serem a ‘válvula de escape’ e companheiros de ‘surto’.

A minha orientadora, Camila Schuch, por me guiar nesse caminho tortuoso e conduzir o trabalho de pesquisa de maneira leve e eficaz.

Ao meu coorientador Paulo Galvão por toda contribuição, ajuda e ensinamentos compartilhados durante a elaboração desse projeto.

A todos os meus professores do Departamento de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto pela colaboração e excelência no ato de ensinar.

Agradeço a todos os funcionários da Universidade Federal de Ouro Preto, bem como da Escola de Minas que fazem com que a universidade seja realidade.

Agradeço também a Fundação Gorceix pela oferta de diversos cursos de formação de maneira gratuita e pelas bolsas de mérito acadêmico. E, a PRACE, pelos programas de assistência estudantil, e à PROPPI pelas bolsas de iniciação científica.

RESUMO

Em regiões cársticas podem ocorrer diversos problemas atrelados à superexploração de água subterrânea, sendo um deles os abatimentos de solo, fenômeno que pode estar relacionado à dissolução de rochas carbonáticas. A cidade de Sete Lagoas (MG) teve seu primeiro grande abatimento registrado em 1988 e, a partir daí, houve novas ocorrências ao longo dos anos. Este trabalho fundamenta-se na investigação da evolução da suscetibilidade cárstica-geotécnica em Sete Lagoas, entre as décadas de 1940 a 2020, bem como na análise acerca da ocupação do espaço urbano nesse período. A análise foi realizada por meio da elaboração de mapas de suscetibilidade em intervalos de 20 anos, ponderando fatores de predisposição geológica e hidrogeológica locais. A partir da soma desses fatores, obteve-se o mapa final denominado risco cárstico-geotécnico. Por meio da reclassificação dos valores, definiu-se diferentes níveis de risco na área, em uma escala de 0 (zero) a 10, que vão de baixo a alto risco. Com a elaboração desses mapas, pode-se analisar que a suscetibilidade cárstica-geotécnica vem evoluindo, sendo a região associada ao alto risco cada vez maior na área estudada. Se tratando exclusivamente do alto risco cárstico geotécnico, observou-se que nos últimos 20 anos de análise tem-se que a área associada aproximadamente dobrou de dimensão. Além disso, desde seu aparecimento em 1980, houve um crescimento de aproximadamente 2800% em sua área até o ano de 2020. Outra constatação foi de que a exploração de água subterrânea sem um planejamento adequado, durante um longo período, influencia diretamente na evolução desse risco devido à concentração de poços em pequenas áreas. O agrupamento de poços na área urbana do município gera a sobreposição dos cones de rebaixamento, diminuindo ainda mais os níveis de água subterrânea. Esse fato torna o fator hidrogeológico o mais influente no mapa cárstico geotécnico quando comparado ao fator geológico, sendo que o risco ligado à hidrogeologia se altera significativamente no período de tempo analisado. Desde o aparecimento da zona de alto risco cárstico geotécnico, em 1980, essa área está integralmente dentro da mancha urbana relativa as décadas analisadas. Os pontos de abatimentos também estão em sua totalidade dentro das manchas urbanas referentes aos anos de 2000 e 2020. Conclui-se que suscetibilidade cárstica geotécnico está evoluindo no decorrer do tempo. Pode-se perceber também a influência direta da exploração de água subterrânea sem gerenciamento adequado na evolução desse problema, podendo influenciar na ocorrência dos abatimentos na área urbana de Sete Lagoas, principalmente em regiões onde se tem alta concentração de poços.

Palavras-chaves: água subterrânea, exploração, abatimento de solo, carste.

ABSTRACT

In karstic regions, several problems related to the overexploitation of groundwater can occur, one of them being soil subsidence, a phenomenon that may be related to the dissolution of carbonate rocks. The city of Sete Lagoas (MG) had its first major subsidence recorded in 1988 and, since then, there have been new occurrences over the years. This work is based on the investigation of the evolution of the karstic-geotechnical susceptibility in Sete Lagoas, between the 1940s and 2020s, as well as on the analysis of the occupation of urban space in this period. The analysis was carried out through the preparation of susceptibility maps at 20-year intervals, weighting local geological and hydrogeological predisposition factors. From the sum of these factors, the final map called karstic-geotechnical risk was obtained. Through the reclassification of the values, different risk levels were defined in the area, on a scale of 0 (zero) to 10, ranging from low to high risk. With the elaboration of these maps, one can analyze that the karst-geotechnical susceptibility has been evolving, with the region associated with high risk being increasingly larger in the area studied. When dealing exclusively with the high geotechnical karstic risk, it was observed that in the last 20 years of analysis the associated area has approximately doubled in size. In addition, since its appearance in 1980, there has been a growth of approximately 2800% in its area by the year 2020. Another finding was that the exploitation of groundwater without adequate planning, over a long period, directly influences the evolution of this risk due to the concentration of wells in small areas. The grouping of wells in the urban area of the municipality generates the overlapping of the lowering cones, further decreasing the groundwater levels. This fact makes the hydrogeological factor the most influential on the geotechnical karst map when compared to the geological factor, with the risk linked to hydrogeology changing significantly in the time period analyzed. Since the appearance of the zone of high geotechnical karstic risk in 1980, this area is entirely within the urban spot relative to the analyzed decades. The points of subsidence are also entirely within the urban patches for the years 2000 and 2020. We conclude that geotechnical karst susceptibility is evolving over time. One can also perceive the direct influence of groundwater exploitation without proper management in the evolution of this problem, which can influence the occurrence of subsidence in the urban area of Sete Lagoas, especially in regions where there is a high concentration of wells.

Keywords: groundwater, exploitation, soil subsidence, karst.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Apresentação	1
1.2. Contextualização da área de estudo	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo geral	2
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Justificativa	3
2. Caracterização da área de estudo	4
2.1. Geologia e hidrogeologia	4
2.1.1. Geologia local	4
2.1.2. Hidrogeologia local	6
2.2. Contexto da exploração de água	8
2.2.1. Águas superficiais e subterrâneas	9
2.2.2. Abastecimento de água em Sete Lagoas	11
2.2.3. Evolução da exploração de água ao longo dos anos	13
2.2.4. Riscos da superexploração	16
2.3. Geotecnia	17
2.3.1. Abatimentos	17
2.3.2. Risco geológico geotécnico	21
2.4. Uso e ocupação do solo	22
2.4.1. Expansão e crescimento urbano	23
3. Revisão bibliográfica	26
3.1. Água subterrânea	26
3.1.1. Tipos de aquífero	28
3.1.2. Sistema cárstico	30
3.1.3. Superexploração	33
3.1.4. Abatimentos e subsidências	34
3.2. Impactos humanos no cárste	36
3.2.1. Crescimento populacional e adensamento	37
3.3. Planejamento urbano	38
3.3.1. Gestão de águas subterrâneas	38
3.3.2. Gestão de risco de desastres	41
4. Materiais e métodos	43
4.1. Banco de dados	43
4.2. Suscetibilidade cárstico geotécnica	45
5. Resultados	48

5.1. Risco geológico	48
5.2. Risco hidrogeológico	49
5.3. Suscetibilidade cárstico geotécnica	51
5.4. Evolução da mancha urbana	55
6. Discussão	58
6.1. Risco geológico	58
6.2. Risco hidrogeológico	58
6.3. Suscetibilidade cárstico geotécnica e evolução da mancha urbana	59
7. Conclusão	62
REFERÊNCIAS	63

1. Introdução

1.1. Apresentação

Estudos hidrogeológicos são de extrema importância para o planejamento da ocupação de espaços urbanos, principalmente quando se trata de áreas cársticas, onde os aquíferos cársticos são caracterizados como excelentes reservatórios hídricos, podendo ser fonte principal do abastecimento local (PESSOA, 1996). Com isso, tem-se a preocupação quanto à exploração sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, sendo as altas taxas de bombeamento uma das principais causadoras das subsidências e abatimentos do solo, eventos diretamente atrelados ao rebaixamento excessivo da superfície freática (TUCCI; CABRAL, 2003). Além disso, tem-se o agravante natural de que o fluxo de água subterrânea em ambientes com rochas carbonáticas promove a dissolução dos minerais carbonáticos, resultando no aumento das cavidades e cavernas no subsolo através dos processos de carstificação (CABRAL *et al.*, 2006).

Sendo assim, ressalta-se os problemas enfrentados pelo município de Sete Lagoas - MG, que teve o primeiro grande abatimento de solo registrado em 1988, fenômeno intensamente divulgado pela mídia em conjunto com os acontecimentos de mesma natureza em Cajamar-SP e Mairinque-SP (SILVA, 1988). Ainda segundo Silva (1988), os fenômenos de colapsos urbanos não são casos isolados no estado de Minas Gerais, sendo esses eventos associados às feições cársticas provenientes de dissoluções em rochas carbonáticas, onde se tem o recobrimento por materiais não consolidados, muito comuns em regiões com presença de rochas do Grupo Bambuí. Desse modo, neste trabalho, delimita-se às discussões acerca da suscetibilidade ao acontecimento de eventos cárstico-geotécnicos associado à região centro-urbana do município de Sete Lagoas, entre as décadas de 1940 a 2020, e suas implicações quanto ao uso e ocupação do espaço urbano.

1.2. Contextualização da área de estudo

O objeto de estudo dessa pesquisa é definido pelo município de Sete Lagoas, cidade com aproximadamente 536 km² de extensão territorial, pertencente à Região Metropolitana de Belo Horizonte (IBGE, 2021). Sete Lagoas está localizada a cerca de 72 km da capital mineira, tendo uma população estimada para o ano de 2021 de 243.950 pessoas e uma densidade demográfica de 398,32 hab/km². Tem-se como municípios limítrofes as cidades de Araçáí, Paraopeba, Caetanópolis, Inhaúma, Esmeraldas, Capim Branco, Prudente de Moraes, Funilândia e Jequitibá. A subárea de estudo é representada na Figura 1 e se dá pelo limite gerado por meio

do modelamento da superfície potenciométrica, por Pereira (2022), via dados de poços existentes em cada intervalo de tempo analisado neste trabalho. Como a maior parcela dos poços encontram-se no centro do município, a subárea de estudo engloba toda a região central urbana de Sete Lagoas.

Com isso, no âmbito deste trabalho, torna-se importante caracterizar de forma hidrogeológica, geológica e geotécnica o local de estudo, ressaltando aspectos relacionados às águas subterrâneas e sua exploração, além de mencionar o contexto do uso e ocupação do solo no centro urbano analisado.

LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SETE LAGOAS-MG E SUBÁREA DE ESTUDO

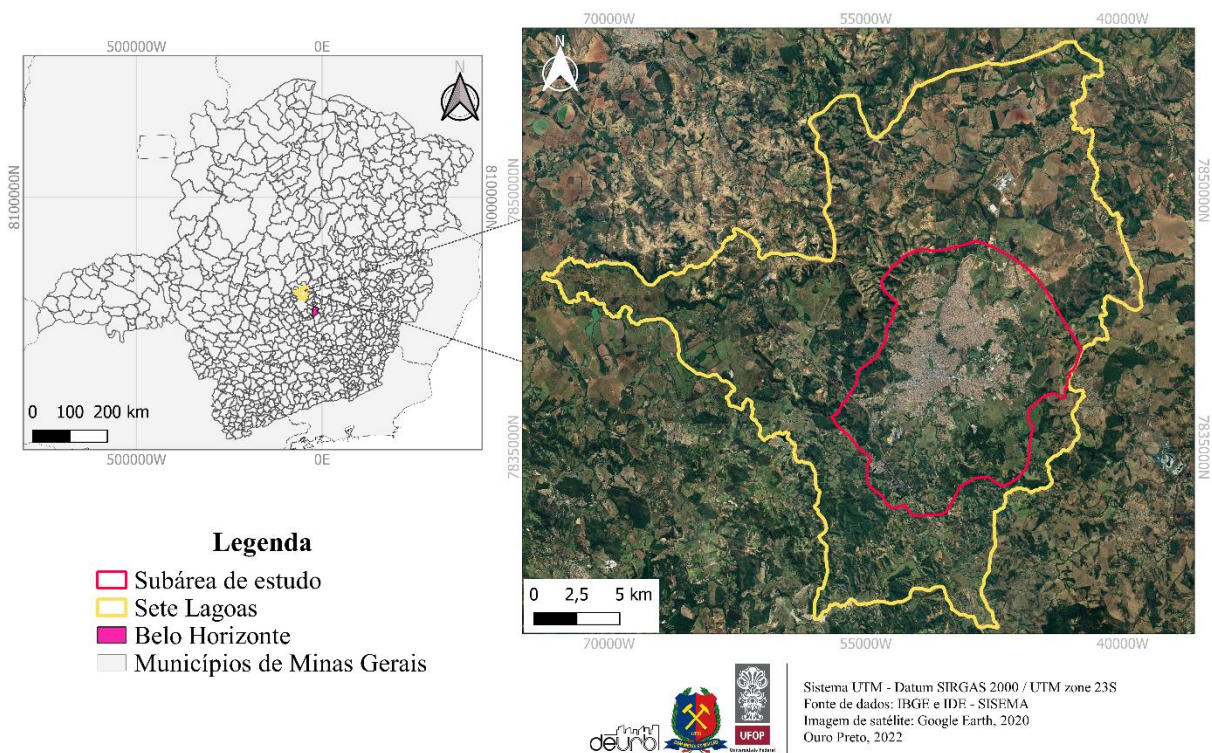


Figura 1 - Localização do município de Sete Lagoas/MG e subárea de estudo.
Fonte: a autora, 2022.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Avaliar a evolução da suscetibilidade à eventos geotécnicos no centro urbano do município de Sete Lagoas, entre as décadas de 1940 e 2020, associando a evolução da superfície potenciométrica aos eventos de abatimento e subsidência ocorridos nesse período, ponderando os aspectos do planejamento e zoneamento urbano da cidade.

1.3.2. Objetivos específicos

- Gerar um índice territorial associado a suscetibilidade cárstico-geotécnica na região centro-urbana do município, considerando os fatores de predisposição geológica e hidrogeológica locais relacionados;
- Produzir mapas de suscetibilidade cárstico-geotécnico da cidade, a cada 20 anos, demonstrando a evolução desse fator de 1940 a 2020.

1.4. Justificativa

Sabe-se que a extração de água subterrânea está diretamente associada a eventos geotécnicos quando relacionada às áreas cársticas (GALVÃO, 2015). Dessa maneira, tem-se que em Sete Lagoas a elevada exploração de água para o abastecimento da cidade faz com que ocorram eventos geotécnicos de grandes magnitudes no município (SCHUCH, 2022). Por sua vez, Botelho (2008) relata a provável relação entre os fenômenos de abatimentos e colapsos em Sete Lagoas e o rebaixamento do nível da água subterrânea, causado pela exploração descomedida nos pontos de captação, seja para consumo residencial e/ou industrial.

Desse modo, a presente pesquisa se justifica com base no cenário presente do município de Sete Lagoas quanto ao contínuo rebaixamento dos níveis de água subterrânea associado a colapsos de solo na localidade ao longo dos anos. Tendo-se por base a concepção do mapa de evolução da suscetibilidade geotécnica cárstico, será possível nortear orientações e cuidados para as futuras explorações de água, bem como contribuir de forma efetiva nas tomadas de decisões à cerca do planejamento e zoneamento urbano da cidade.

2. Caracterização da área de estudo

2.1. Geologia e hidrogeologia

Os conhecimentos geológicos-geotécnicos e hidrogeológicos são essenciais para o planejamento prévio territorial para implementação de diversas ações e atividades antrópicas, auxiliando em tomadas de decisão com embasamento técnico, que serão deliberadas de maneira mais segura e eficaz (ZUQUETTE, 1993). No contexto de águas subterrâneas, o aprimoramento da hidrogeologia teve início por meados da década de 60 no Brasil, sendo, portanto, uma prática moderadamente recente, e que deve estar associada à avaliação das condições da exploração, bem como à administração e conservação dos aquíferos (FEITOSA *et al.*, 2008). Ressalta-se a importância de dados geológicos nessas investigações, pois fatores litológicos são determinantes em relação aos parâmetros hidráulicos do aquífero, como permeabilidade, condutividade e porosidade (FEITOSA *et al.*, 2008).

2.1.1. Geologia local

Geologicamente, Sete Lagoas está inserida no contexto do Cráton São Francisco. Segundo Almeida (1977), o Cráton São Francisco é definido como uma porção da plataforma Sul-Americana, consolidada como segmento litosférico no arqueano e moldada pela orogênese Brasileira. As rochas ígneas e metamórficas/migmatíticas pertencentes ao complexo podem ser observadas principalmente na região sul do município, ocupando cerca de 20% do território (GALVÃO, 2015). Essas rochas apresentam fraturamentos preenchidos por calcita ou veios quartzo-feldspáticos (PESSOA, 1996).

Sotopostas ao embasamento cristalino estão as rochas pertencentes ao Grupo Bambuí (Figura 2), que fazem parte da Bacia do São Francisco. O Grupo Bambuí é uma unidade sedimentar composta, da base para o topo, pelas Formações Jequitaiá, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. Sendo que as rochas pelito-carbonáticas das Formações Serra de Santa Helena e Sete Lagoas, depositadas em ambientes marinhos, apresentam-se de forma majoritária no município.


Super-grupo	Grupo	Formação	Membro	Idade (Ma)	Espessura (m)	Local Tipo	Coluna Estratigráfica	Litologia	Ambiente Depositional
					0 - 40			Aluviões com areias de granulometria variada e cascalhos.	
					0 - 30			Cobertura detrítica areno-argilosa com camadas lateríticas delgadas.	
São Francisco	Bambuí	Serra de Santa Helena		600	200	Serra de Santa Helena		Metapelitos em camadas tabulares de espessura média a espessa, de cor cinza-esverdeado a preta. Apresentando marcas onduladas suaves, estruturas de carga e estratificação cruzada, se são. Intercalados por camadas tabulares de metassilitos calcíferos, de espessura delgada a média e de cor esverdeada a acinzentada.	Transgressão marinha, afogamento plataformar.
		Sete Lagoas	Lagoa Santa	800	80	Pedreira de Carvão		Metacalcissilitos em camadas tabulares de espessura delgada a média, coloração de cinza claro azulado e esverdeado, com intercalações, de camadas muito finas a delgadas de metargilitos. Lamitos algálicos.	Marinho, plataforma externa para plataforma rasa. No topo, marinho raso, borda de plataforma.
			Pedro Leopoldo						
					100	Pedreira Canaã e Ilcom	Metacalcarenitos, finos a grosseiros, em camadas tabulares de espessura média a espessa, coloração de preto a cinza no topo.		
		Complexo Gnáissico-Migmatítico (Embasamento cristalino)				Pedreira da Prefeitura	Gnaisses indiferenciados, migmatitos com estruturas dobradas, nebulíticos, dicioníticos, schilliren, estilolíticos e surreíticos. Poções graníticas com granulação média a grosseira.		

Figura 2 - Coluna estratigráfica de Sete Lagoas/MG.

Fonte: Tuller *et al.*, 1992.

A Formação Sete Lagoas, que representa 25% das rochas aflorantes da cidade (Figura 3) é dividida em dois membros, um superior intitulado Membro Lagoa Santa e um inferior denominado Membro Pedro Leopoldo (TULLER *et al.*, 1992). A Formação Sete Lagoas é composta predominantemente por calcários, além de dolomitos e pelitos estromatolíticos, sendo o Membro Pedro Leopoldo composto por calcissilitos e o Membro Lagoa Santa por calcarenitos.

A Formação Serra de Santa Helena, composta por rochas pelíticas (silitos e argilitos), ocorre tipicamente na serra homônima, na porção centro meridional de Sete Lagoas (DARDENNE, 1978). Além disso, sua ocorrência predomina na região norte do município, ocupando 40% do território. Apesar de estratigraficamente estar sobreposta à Formação Sete Lagoas, principalmente nas bordas da bacia, devido as falhas de empurrão locais, pode ser encontrada diretamente sob o embasamento cristalino (TULLER *et al.*, 2010; GALVÃO, 2015).

No topo da coluna estratigráfica apresentam-se sedimentos inconsolidados cenozoicos, que podem ser divididos em três tipos: coberturas detrítico-lateríticas, terraços aluviais e aluviões. Esses sedimentos estão distribuídos majoritariamente na região centro-norte de Sete Lagoas cobrindo aproximadamente 15% do município. As coberturas detríticas tem caráter residual pois são resultantes de processos intempéricos que alteraram as rochas já existentes na região.

Os terraços aluviais estão relacionados às grandes drenagens e seus afluentes, sendo formados por materiais semi-consolidados argilo-arenosos. Os aluviões, compostos principalmente por areias finas e grossas, também estão associados às grandes drenagens, podendo ser observados nos meandros dos cursos d'água (TULLER *et al.*, 2010). Esses sedimentos inconsolidados aparecem geralmente cobertos por diversos tipos de solo, sendo predominantemente por latossolos (CARNEIRO, 2013; GALVÃO, 2015).

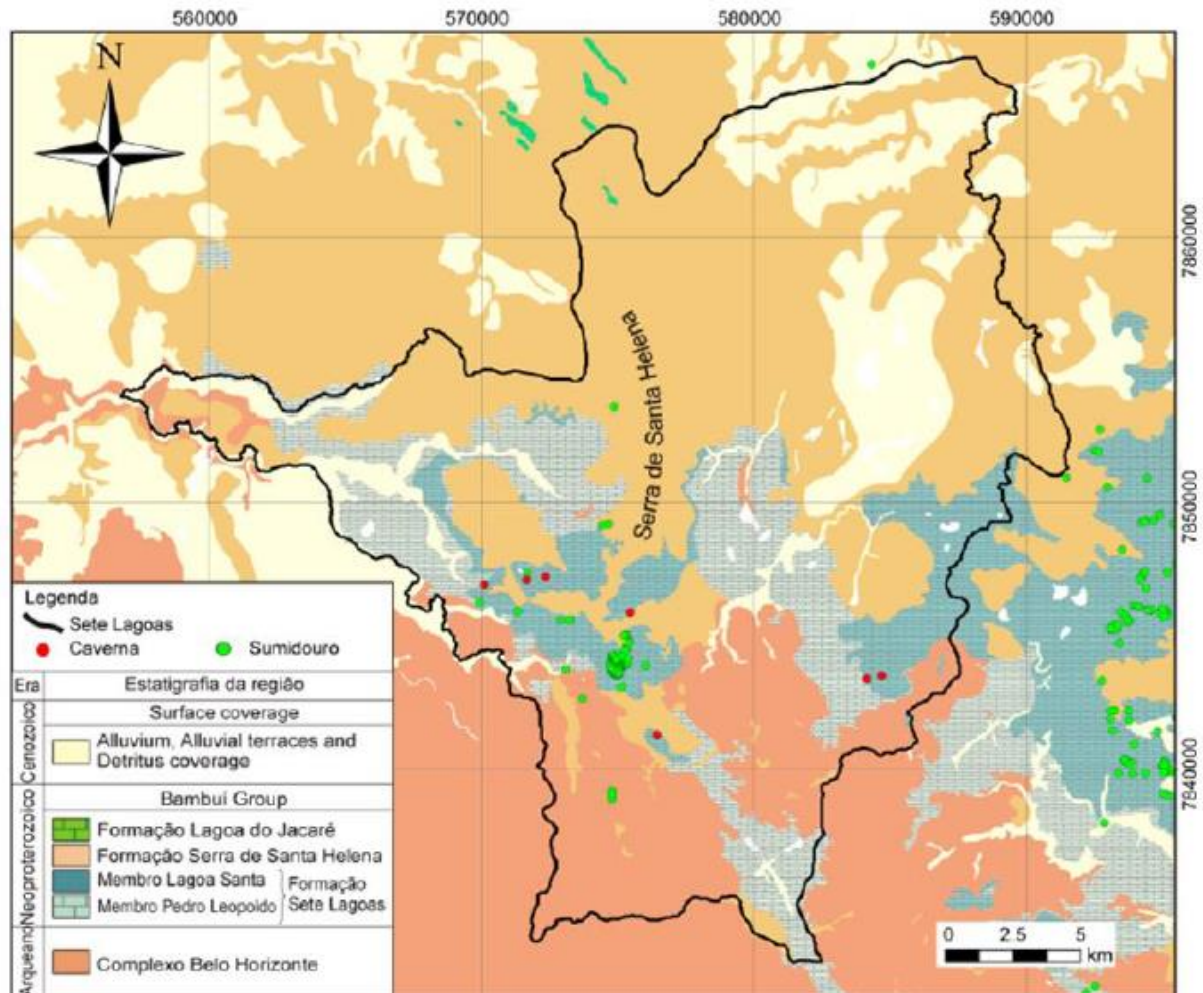


Figura 3 - Geologia do município de Sete Lagoas
Fonte: Galvão, 2015.

2.1.2. Hidrogeologia local

De acordo com Pessoa (1996), a hidrogeologia local do município de Sete Lagoas é caracterizada por três diferentes tipos de aquífero, sendo eles: cárstico, fraturado e o granular. As rochas do embasamento cristalino pertencentes ao Complexo Belo Horizonte constituem o aquífero fraturado, enquanto a formação Sete Lagoas abriga o aquífero cárstico desenvolvido a partir da dissolução de suas rochas. Já as regiões de sedimentos inconsolidados apresentam aquíferos granulares associados. As rochas da Formação Serra de Santa Helena atuam na região

como um aquítarde, sendo essa uma formação geológica que permite a acumulação de água, porém com transporte lento (ANA, 2019).

Os aquíferos granulares ou porosos apresentam porosidade primária, sendo a água armazenada nos espaços entre os grãos da rocha ou do solo. Além disso, essa porosidade primária é advinda da derivação de processos pedogenéticos locais que atuaram de forma a intemperizar as rochas da localidade (PESSOA, 1996). Os aquíferos fraturados se caracterizam por porosidade secundária e possuem capacidade de armazenamento e circulação da água subterrânea restringida às regiões que possuem conexões entre as fraturas. E os aquíferos cársticos possuem porosidade terciária bem desenvolvida, sendo essa a evolução da porosidade secundária, em que o fluxo de água está condicionado a condutos e cavernas geradas pela dissolução das rochas carbonáticas, o que é um fator complicador e dificulta o entendimento hidrodinâmico desse sistema (ASSUNÇÃO, 2019).

O sistema cárstico é o de maior expressão dentre os aquíferos presentes em Sete Lagoas, podendo estar associado aos demais tipos de aquíferos, como por exemplo, no caso de carbonatos em contato com fraturas do embasamento, permitindo assim a interligação com os condutos cársticos e formando sistemas aquíferos cársticos-fissurais (MAGNABOSCO, 2020), ou quando sedimentos cenozoicos estão depositados diretamente sobre os carbonatos, o que pode ser explicado por um hiato na deposição ou por erosão dos pelitos da Formação Serra de Santa Helena. Tais contextos ocasionam na ocorrência de fluxo principalmente pelos condutos interconectados aos planos de acamamento do Membro Pedro Leopoldo e pelas fraturas verticais que intensificam a permeabilidade do aquífero (MAGNABOSCO, 2020).

Segundo Pessoa (1996), a taxa de recarga referente ao aquífero era de cerca de 19,8% da precipitação média anual, em que a maior parcela é direcionada ao escoamento subterrâneo do sistema cárstico. Em segundo lugar tem-se a captação por poços tubulares e, por fim, a recarga do aquífero cárstico profundo. De acordo com Magnabosco (2020), a recarga associada corresponde a 18,2% da precipitação média, sendo 2,4% destinada à recarga profunda. Já conforme Schuch (2022), a recarga média do aquífero é da ordem de 12% da precipitação média da região. Baseando nesses dados, pode-se perceber que a taxa de recarga do aquífero em Sete Lagoas vem diminuindo ao longo dos anos.

A descarga artificial do aquífero cárstico de Sete Lagoas se dá principalmente por poços de captação de água subterrânea. Pessoa (1996) diz que das 36 nascentes da cidade, somente 4 provém deste aquífero, enquanto 80% dos poços tubulares são relacionados à essa descarga.

Magnabosco (2020) apresenta que um volume de $2,41 \times 10^7$ m³ de água é explotado anualmente, sendo equivalente à 15,8% da precipitação total. De acordo com Schuch (2022), dados associados à última década indicam uma explotação de $7,39 \times 10^7$ m³/ano por meio dos poços tubulares, sendo esse valor maior que a recarga máxima do aquífero, que é de $7,24 \times 10^7$ m³/ano.

As águas subterrâneas do município possuem um fluxo regional característico de sudoeste para nordeste, podendo ter variações locais para leste ou norte, a depender da rede de condutos locais (MAGNABOSCO, 2020). Esse fluxo subterrâneo acontece em condutos cársticos formados pela interconexão de fraturas subverticais, bem como em planos de acamamento sub-horizontais fraturados (GALVÃO, 2015; MAGNABOSCO, 2020). Ainda assim, sabe-se que a evolução do carste gera diferentes caminhos de fluxo para a água subterrânea, resultando em pontos de saída de ressurgências, sendo esses imprevisíveis e tomando como base a topografia local.

O aquífero fraturado da localidade apresenta percolação de água entre as fraturas subverticais, em que as condições de fluxo, armazenamento e permeabilidade, dependem da densidade, interconectividade e abertura das fraturas (MAGNABOSCO, 2020). Por outro lado, o aquífero poroso possui uma menor velocidade de fluxo, mas apresenta maior capacidade de armazenamento de água. Já no aquífero cárstico, tem-se fluxo turbulento nas cavidades e fraturas abertas, diferindo-o dos aquíferos poroso e fraturado, em que há a tendência de um fluxo mais laminar (MAGNABOSCO, 2020).

2.2. Contexto da explotação de água

A explotação de água subterrânea tem sido uma prática comum nos municípios e vem aumentando muito nas últimas décadas no Brasil (VILARIM *et al.*, 2020, CABRAL *et al.*, 2006). O uso das águas subterrâneas vem sendo uma alternativa recorrente nas cidades brasileiras no contexto do abastecimento populacional, principalmente em zonas rurais e mais distantes dos centros urbanos, onde não há, na maioria das vezes, o abastecimento pela rede pública municipal de água. Com isso, tem-se como motivos da acentuação dessa atividade o aumento da população, e conseqüentemente o aumento da demanda de água; a perda de águas superficiais e seus mananciais como fonte de abastecimento devido à poluição, de forma a ficar imprópria para o consumo humano; bem como o aprimoramento das tecnologias de perfuração de poços e melhor conhecimento dos aquíferos (CABRAL *et al.*, 2006).

Sendo assim, torna-se necessário definir as fontes de abastecimento na cidade de Sete Lagoas, considerando o panorama geral entre as águas superficiais e subterrâneas, além do contexto da evolução da exploração ao longo dos anos.

2.2.1. Águas superficiais e subterrâneas

As águas superficiais são definidas como recursos hídricos disponíveis em superfície, podendo ser em ambientes caracterizados como lagoas e lagos, ou em situações em que se existe água corrente, como rios e ribeirões (BOTELHO, 2008). Por outro lado, as águas subterrâneas não são facilmente vistas, fato que complexifica sua gestão e esconde a importância social, econômica e ambiental desse bem (HIRATA *et al.*, 2019). Sua visibilidade restrita dificulta o diagnóstico e monitoramento do aquífero, tornando complicada a consolidação de políticas públicas nessa conjuntura e propiciando a vulnerabilidade à contaminação e à superexploração.

Sendo assim, estudos referentes às conexões entre as águas subterrâneas e superficiais são necessários, principalmente em locais em que o abastecimento se dá predominantemente pelo sistema subterrâneo, em que se tem também um aumento dessa captação associada ao crescimento urbano e populacional das cidades (ALVES, 2020). Ainda de acordo com a autora, o município de Sete Lagoas/MG segue essas características, sendo de suma importância a integração do diagnóstico e planejamento das duas tipologias de recursos hídricos.

Se tratando das águas superficiais, Sete Lagoas possui inúmeros espelhos d'água, sendo q sua denominação provém de sete grandes lagoas que eram presentes no município. Segundo a Prefeitura Municipal de Sete Lagoas – PMSL (2007), a principal delas, localizada no centro da cidade, é a Lagoa Paulino, que integra o complexo turístico da cidade em conjunto com as outras seis que deram nome ao município: Boa Vista, José Félix, Cercadinho, Matadouro, Catarina e Chácara. Sendo que a Lagoa Chácara secou em meados da década de 1970 (ASSUNÇÃO, 2019), e a Lagoa Matadouro, tornou-se intermitente, segundo relatos de moradores, por volta de 2005 (ANDRADE, 2010). Com essa preocupação, a prefeitura de Sete Lagoas iniciou o processo de impermeabilização do fundo dessas lagoas com o objetivo de impedir a infiltração da água no solo e manter os espelhos d'água (SCHUCH, 2022).

Segundo estudos realizados pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente da cidade, tem-se que os lençóis subterrâneos que abastecem as lagoas não estão a grandes profundidades. E com o crescimento da cidade e o aumento da impermeabilização do solo, o volume de água que infiltra no subsolo diminui, resultando no desequilíbrio entre volume explorado e infiltrado. As lagoas normalmente estão localizadas nas porções mais baixas da superfície ondulada geradas por

processos de dolinamento. Portanto, mesmo quando as rochas carbonáticas estão cobertas por sedimentos siliciclásticos, os corpos d'água são influenciados pela carstificação (CPRM, 1994).

O município de Sete Lagoas situa-se na Bacia do Rio São Francisco e faz parte das sub-bacias do Rio das Velhas e do Paraopeba (LEÃO, 2008; CPRM, 1994). Ressalta-se que por se tratar de uma região cárstica, as drenagens se dão por poucos cursos d'água superficiais devido à maior relevância da circulação subterrânea (CABRAL, 1994; BOTELHO, 2008). Dessa maneira, os rios da cidade geralmente apresentam vazões pouco elevadas, sendo resultado desse conjunto de drenagens instaurado sobre rochas carbonáticas que formam sistemas de córregos dispersos com poucos afluentes subordinados (BOTELHO, 2008). Portanto, os rios locais não são fontes válidas para o abastecimento público em Sete Lagoas.

As duas principais drenagens de Sete Lagoas são os ribeirões São João e Jequitibá. Sendo a nascente do Ribeirão São João localizada no Morro do Peão, em Sete Lagoas, e seu curso desenvolvido sobre as rochas do Grupo Bambuí na direção norte/oeste, por cerca de 40 km, até encontrar o Rio Paraopeba. (AVELLAR; CASTRO; HADAD, 2008). O Ribeirão Jequitibá se origina nos limites dos municípios de Sete Lagoas e Capim Branco e possui uma extensão de aproximadamente 64 km, também percorre as cidades de Prudente de Moraes, Funilândia, e desagua no Rio das Velhas, no município de Jequitibá (CHAVES, 2005).

Retomando o que já foi dito anteriormente, tem-se o fluxo subterrâneo regional de sudoeste para nordeste no município, acompanhando a atitude das litologias que também mergulham nesse sentido. Ou seja, quanto mais à nordeste de Sete Lagoas maiores as profundidades necessárias para encontrar o aquífero cárstico, o que resulta em maiores investimentos e tecnologias para a perfuração dos poços de captação de água. Além disso, também devido a esse fato, tem-se na região central o maior número de perfurações de poços, dado que nessa área da cidade a profundidade para encontrar o aquífero é menor quando comparado às áreas mais à nordeste. E com isso, tem-se o desenvolvimento de um considerado cone de rebaixamento resultante da concentração de poços com alta taxa de bombeamento nessa região (GOMES *et al.*, 2018)

O fluxo subterrâneo acontece principalmente pelos condutos coincidentes aos planos de acamamento do Membro Pedro Leopoldo, além das fraturas verticais que aumentam a interconectividade e permeabilidade do aquífero (MAGNABOSCO, 2020). Já o membro Lagoa Santa apresenta paleocondutos em forma de cavernas e grutas secas, pelos quais ocorre o fluxo de água (GALVÃO *et al.*, 2015). A área central da cidade é mais carstificadas, pela presença

de sedimentos inconsolidados que estão diretamente sobre o calcário, propiciando a infiltração de águas acidificadas pelo ácido húmico carregado dos sedimentos (MAGNABOSCO, 2020).

2.2.2. Abastecimento de água em Sete Lagoas

Em Sete Lagoas, a gestão dos recursos hídricos é concedida ao SAAE - Serviço Autônomo de Águas e Esgoto desde 1969. O abastecimento de água da cidade é feito majoritariamente por meio de captação subterrânea, e uma parcela menor advinda do rio Das Velhas. Segundo Assunção (2019), tem-se cerca de 133 poços em propriedade do SAAE no município, sendo que 7 foram tamponados e 21 se encontram fora de funcionamento, seja por problemas de contaminação ou estão secos. Com isso, tem-se 105 poços tubulares profundos do SAAE ativos na cidade (Figura 4), além de 55 reservatórios de água, o que totaliza aproximadamente doze milhões de litros de água para abastecimento por mês (SAAE, 2013; SAAE, 2019). Além disso Sete Lagoas ainda possui 198 poços privados em seu território (SCHUCH, 2022). Ainda assim, pode-se inferir que as ocorrências das subsidências e abatimentos estão concentradas na região central do município, local onde se tem a maior quantidade de poços de captação de água subterrânea.

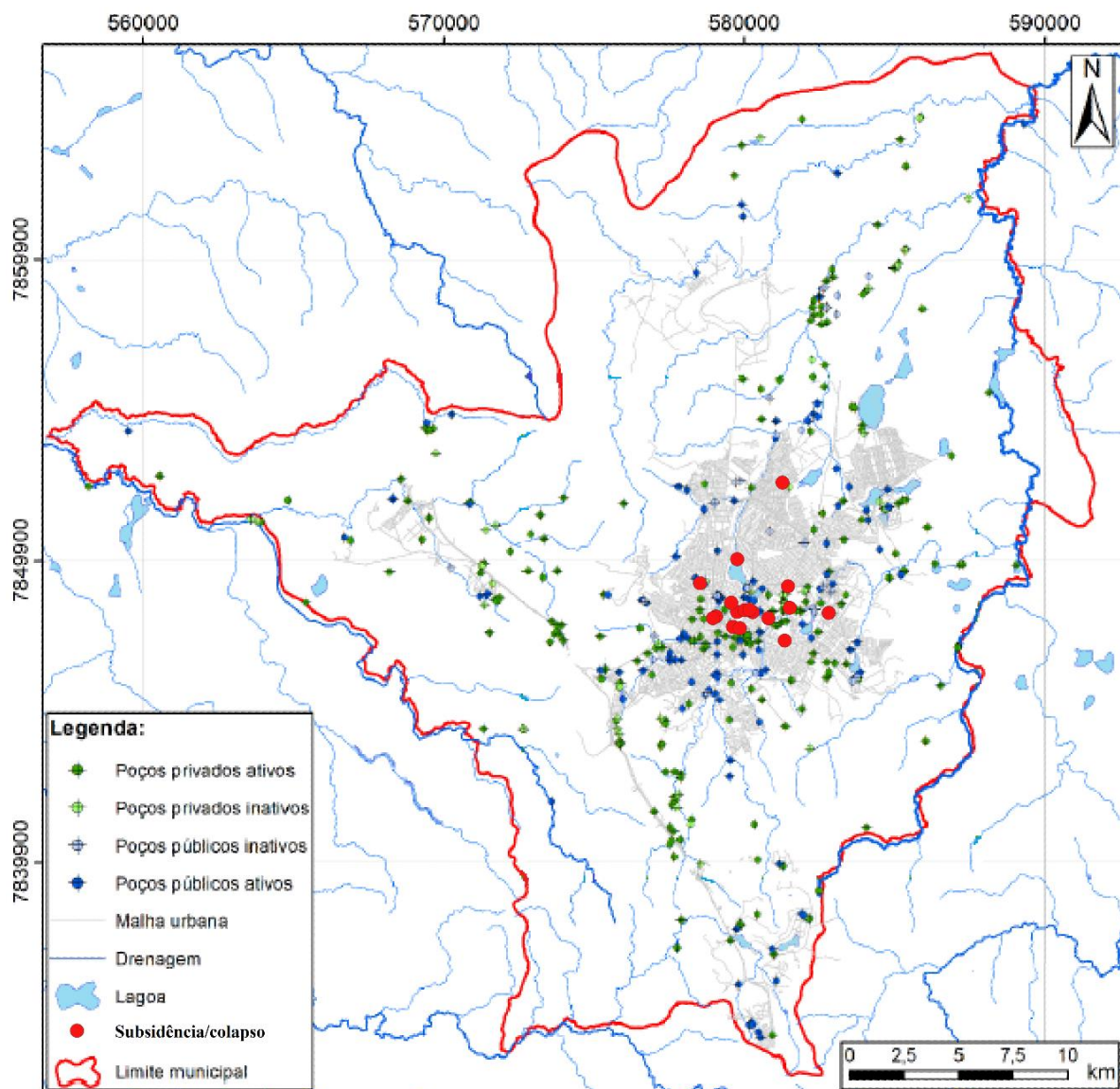


Figura 4 - Localização dos poços de bombeamento em Sete Lagoas, com destaque para os locais onde ocorreram subsidências/colapsos.

Fonte: modificado de Magnabosco, 2020.

As águas subterrâneas são consideradas de maior pureza, por passarem pelo processo de purificação executado pelo subsolo, e já apresentam flúor de origem geogênica (SAAE, 2019). Todavia, ainda assim necessitam de tratamento para assegurar sua qualidade e potabilidade. Esse processo de desinfecção simples consiste na injeção de cloro em dosagem regulamentada pela OMS - Organização Mundial de Saúde (SAAE, 2019). Após isso, a distribuição é realizada através de adutoras e redes de abastecimento que levam água potável para a população. Durante esse processo são coletadas amostras, para a confirmação de potabilidade e para a realização de análises físico-químicas e de qualidade, que posteriormente serão enviadas à Secretaria Municipal de Saúde (SAAE, 2019).

Ainda de acordo com o SAAE (2019), o sistema de captação subterrânea enfrenta dificuldades de abastecimento em determinadas épocas do ano, principalmente em períodos atrelados à falta

de chuvas, em que se tem o rebaixamento do nível dinâmico dos poços tubulares profundos. Visando a solução desse problema, a PMSL em parceria com o SAAE concebeu, em 2009, um projeto de execução de uma obra de captação de água do Rio das Velhas, no município de Funilândia.

Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas - CBH Rio das Velhas (2020), a Estação de Captação Rio da Velhas começou sua operação em 2016, direcionando a água captada para um reservatório com capacidade de cerca de 10 milhões de litros, atendendo aproximadamente 40% da população da cidade (CBH, 2020; PMSL, 2022). Essa iniciativa visa preservar o aquífero cárstico e mitigar os efeitos negativos causados pela exploração excessiva, além de solucionar os problemas sazonais de falta de água no município.

2.2.3. Evolução da exploração de água ao longo dos anos

Sete Lagoas, até meados do século XX, era uma cidade pequena com aproximadamente 8000 habitantes e sem abastecimento público de água. Seus moradores utilizavam água de captação direta dos pequenos ribeirões e de cisternas feitas nos fundos dos terrenos. A captação de água subterrânea para abastecimento público, proveniente do aquífero cárstico, vem sendo feita de maneira continuada desde a perfuração do primeiro poço, denominado poço Mucuri I. Essa perfuração ocorreu em meados de 1940, com uma profundidade de 110 metros e vazão de 150 mil litros de água por hora (BOTELHO, 2008).

Com a boa vazão do poço Mucuri I, somente foi necessário a perfuração de um novo poço em 1956, o Mucuri II. Este novo poço estava localizado a poucos metros do primeiro e apresentava uma vazão estimada de 70 m³ de água por hora. Os poços Mucuri I e II foram responsáveis exclusivamente pelo abastecimento municipal até o ano de 1960 (BOTELHO, 2008).

Ainda segundo Botelho (2008), o crescimento populacional na cidade fez com que houvesse a necessidade de perfuração de novos poços para o abastecimento de água, sendo que até o final da década de 1960 a cidade obtinha 6 poços profundos para abastecer a população. Durante esse período já se tinha a preocupação das autoridades quanto a resolução do problema de crescente demanda por água, dado que havia constantemente interrupções no abastecimento em locais periféricos de Sete Lagoas.

A partir de 1970 tem-se a intensificação da urbanização e industrialização, o que influenciou diretamente no aumento da população no município. E, com isso, teve-se a ampliação do número de poços perfurados. Na década de 1970, havia, então, 17 poços profundos perfurados.

Já na década seguinte, de 1980, o sistema de abastecimento possuía 34 poços (BOTELHO, 2008).

Houve a intensificação nas perfurações de poços durante a década de 1990, em que foram perfurados 31 poços, o que fez com que a quantidade de poços na cidade quase duplicasse. Além disso, no fim desta década o SAAE já dispunha de 65 poços de abastecimento. Seguindo, na década de 2000 foram adicionados mais 36 poços ao sistema, totalizando 101 poços de abastecimento público perfurados em Sete Lagoas até esse período (BOTELHO, 2008).

Durante o levantamento de dados de sua dissertação de mestrado, contabilizando tanto os poços de abastecimento público quanto os privados, Schuch (2022) destacou a presença de 3 poços de bombeamento em 1940 em Sete Lagoas, sendo destes 2 poços referentes ao abastecimento público. Em 1950, tem-se 6 perfurações de poços profundos, sendo 3 deles de caráter público. Na década de 1960, havia 14 poços de bombeamento. Enquanto 1970, houve mais 65 perfurações, totalizando 79 poços na cidade. Ressalta-se, ainda, a existência de 189 poços no fim da década de 1980, estando concentrados na área urbana de Sete Lagoas. Já na década de 1990, a autora afirma que existiam 271 poços de bombeamento distribuídos na área urbana, se expandindo para a região nordeste do município, onde futuramente seria implementado um polo industrial. Nos anos 2000, com a consolidação do polo industrial, tem-se 369 poços de captação de água, ainda em sua maioria localizados na região central urbana, porém também existindo uma concentração de poços de alta exploração na área industrial de Sete Lagoas (SCHUCH, 2022).

A comparação entre os dados levantados, por Botelho (2008) e Schuch (2022), acerca da quantidade de poços ao longo do tempo é demonstrada na Tabela 1. Vale ressaltar que a diferença no quantitativo de poços levantados pode ser explicada, possivelmente, por Botelho (2008) direcionar-se seu estudo apenas para informações associadas ao abastecimento público. Além disso, os autores podem ter utilizado diferentes fontes de obtenção de dados.

Tabela 1 – Comparação entre a quantidade de poços levantados por Botelho (2008) e Schuch (2022).

Ano/década	Schuch (2022)		Botelho (2008)
	Poços privados	Poços públicos	Poços públicos
1940	1	2	1
1950	3	3	2
1960	6	8	6
1970	33	46	17
1980	116	73	34
1990	166	105	65

2000	244	125	101
2010	282	185	-

Fonte: Botelho, 2008 e Schuch, 2022.

De acordo com Botelho (2008), de 1938 a 2008 houve um crescimento das perfurações de poços destinados ao abastecimento público de cerca de 1200%, o que indica o uso progressivo das águas subterrâneas no município. Em adição, já segundo Schuch (2022), de 1940 a 2010 houve um crescimento na quantidade de poços privados de 280 perfurações em Sete Lagoas. As perfurações ainda continuam sendo feitas sem critérios técnicos, já que não houve investimentos no planejamento da rede de captação e distribuição de água na cidade. Sendo que, ainda atualmente, são realizadas sem o conhecimento do potencial de vazão e, muitas vezes, de maneira improvisada (BOTELHO, 2008).

Os maiores problemas enfrentados pelo SAAE, ao longo desse período, é a falta de água para abastecimento concentrada nos meses de maio a outubro, sendo esses característicos da estiagem. Nessa época do ano, os níveis de água dos poços abaixam, o que dificulta o alcance da rede de abastecimento, principalmente em locais distantes da captação ou em cotas mais elevadas (BOTELHO, 2008).

Com isso, durante décadas Sete Lagoas teve sua captação de água integralmente advinda de águas subterrâneas, sendo que só recentemente passou a utilizar a captação de água superficial como alternativa para sanar os problemas de abastecimento hídrico na cidade (PMSL, 2022). Tem-se consequências negativas associadas a esse sistema, sendo comum adversidades acerca de falta de água para a população, e problemas geotécnicos relativos a abatimentos do solo e subsidências, sendo esses eventos mais presentes na região central urbana da cidade (BOTELHO, 2008; GALVÃO, 2015; ASSUNÇÃO, 2019; SCHUCH, 2022).

Em adição, o SAAE não possuía informações na época sobre seu sistema de abastecimento na cidade, sendo os dados inconsistentes e incompletos. Com isso, encontrou-se grandes problemas associados a manutenção de poços e ao acompanhamento sistemático das informações hidrogeológicas da região (BOTELHO, 2008). Ainda assim, além dos poços de abastecimento público relativos ao SAAE, tem-se os de característica privada e clandestinos, esses últimos não possuindo outorga ou nenhum monitoramento de maneira regulamentada e oficial (MAGNABOSCO, 2020; SCHUCH, 2022). Portanto não se tem o conhecimento de todos os poços presentes no município de Sete Lagoas, não sendo possível saber o volume total explorado, bem como a real situação do aquífero.

2.2.4. Riscos da superexploração

O bombeamento intensivo das águas subterrâneas em aquíferos cársticos pode resultar no esgotamento das reservas e em sua superexploração, causando consequências negativas (STEVANOVIĆ, 2018; SCHUCH, 2022). A superexploração é definida como a exploração excessiva, em que as consequências negativas geradas por essa extração de água são maiores que as vantagens geradas pela mesma, sendo assim um processo não-sustentável.

Como consequência da superexploração, tem-se o desenvolvimento de grandes cones de rebaixamento, diminuição do nível piezométrico, subsidência e colapso de solo, aumento nos custos de bombeamento, problemas com abastecimento, diminuição de fluxos superficiais, intrusões salinas, abandono de poços, desertificação, contaminação do aquífero e também conflitos (SCHUCH, 2022).

Schuch (2022), indica que o município se encontra em um quadro de superexploração desde a década de 2000, quando o volume explorado excedeu a recarga média do aquífero. Além disso, suspendeu-se o funcionamento de aproximadamente 30 poços por motivo de contaminação ou seca. Segundo Botelho (2008), em Sete Lagoas, o rápido crescimento urbano não planejado influenciou diretamente no aumento da demanda de água, o que ocasionou a superexploração e problemas como subsidências e contaminação do aquífero. De acordo com Galvão *et al.* (2015), existem condutos completamente inseridos em zona vadosa, como resultado das grandes extrações de água subterrânea que geraram um grande cone de rebaixamento, sendo esta consequência da sobreposição de diversos cones menores na região, associados aos inúmeros poços de captação. A ocorrência desse grande cone se dá principalmente na zona central da cidade, sendo o local de maior urbanização e demanda de água, o que está diretamente associado aos eventos recorrentes de subsidência e colapsos de terrenos em Sete Lagoas (GALVÃO *et al.*, 2015).

O processo de carstificação causa cavernas e redes de condutos que podem ceder, resultando em afundamentos cársticos que podem ser descritos como abatimentos/colapsos ou subsidências do solo (OLIVEIRA, 2010). Esses eventos podem ocorrer de forma natural ou podem ser influenciados pelas ações humanas, sendo a superexploração uma dessas ações. Em Sete Lagoas já foram documentados cerca de 17 casos de colapsos ou subsidências desde 1988, pelo menos (GALVÃO *et al.*, 2015; ASSUNÇÃO, 2019). Segundo Schuch (2022), o bombeamento de água subterrânea por mais de 50 anos deu-se em rebaixamentos do nível de

água subterrânea em aproximadamente 40 metros no centro da cidade e cerca de 100 metros na região industrial, além da mudança na situação de lagoas de perenes para intermitentes.

2.3. Geotecnia

Eventos geotécnicos relacionados às áreas cársticas, como colapsos e subsidências, são comuns no município de Sete Lagoas (OLIVEIRA; BACELLAR; ARANHA, 2020). Além disso, considerando a alta demanda de água subterrânea para o abastecimento da população, torna-se necessário a gestão adequada desses recursos hídricos avaliando as condições geotécnicas desfavoráveis (CABRAL; SANTOS; PONTES FILHO, 2006).

2.3.1. Abatimentos

Em regiões cársticas a exploração intensiva das águas subterrâneas podem causar subsidências e colapsos do solo. A ocorrência desses eventos está condicionada a dissolução dos compostos carbonáticos pelo fluxo de água, resultando no desenvolvimento das cavidades do subsolo, podendo gerar abatimento e subsidências capazes de atingir grandes profundidades (CABRAL; SANTOS; PONTES FILHO, 2006). Ainda segundo os autores, a superexploração das águas subterrâneas diminui a pressão de suporte realizada pela água nos poros e intensifica o esforço sobre os grãos, obrigando sua redistribuição, e dessa forma faz com que o processo de subsidência aconteça.

O primeiro abatimento de grande magnitude registrado no município de Sete Lagoas ocorreu em 1988 e motivou estudos geológicos e hidrogeológicos na região, com o intuito de avaliar os riscos geotécnicos e suas causas (SILVA, 1988). Anteriormente já havia ocorrido outros dois eventos, porém sem informações acerca de sua escala. Ainda segundo Silva (1988), neste primeiro grande evento, abriu-se uma cratera próximo ao centro da cidade de cerca de 22 metros de diâmetro e aproximadamente 6 metros de profundidade (Figuras 5 e 6), sendo preciso interditar um quarteirão e retirar os moradores ao redor (FERREIRA, 2019). Como efeito desse episódio, teve-se muros e paredes de edificações próximas danificadas, além de danos em parte das arquibancadas do Estádio Municipal. Foi possível observar mais evidências do colapso em um raio de 40 metros do local do abatimento (SILVA, 1988).



Figura 5 - Primeiro grande abatimento de terreno registrado em Sete Lagoas em 1988.
Fonte: Silva, 1988.

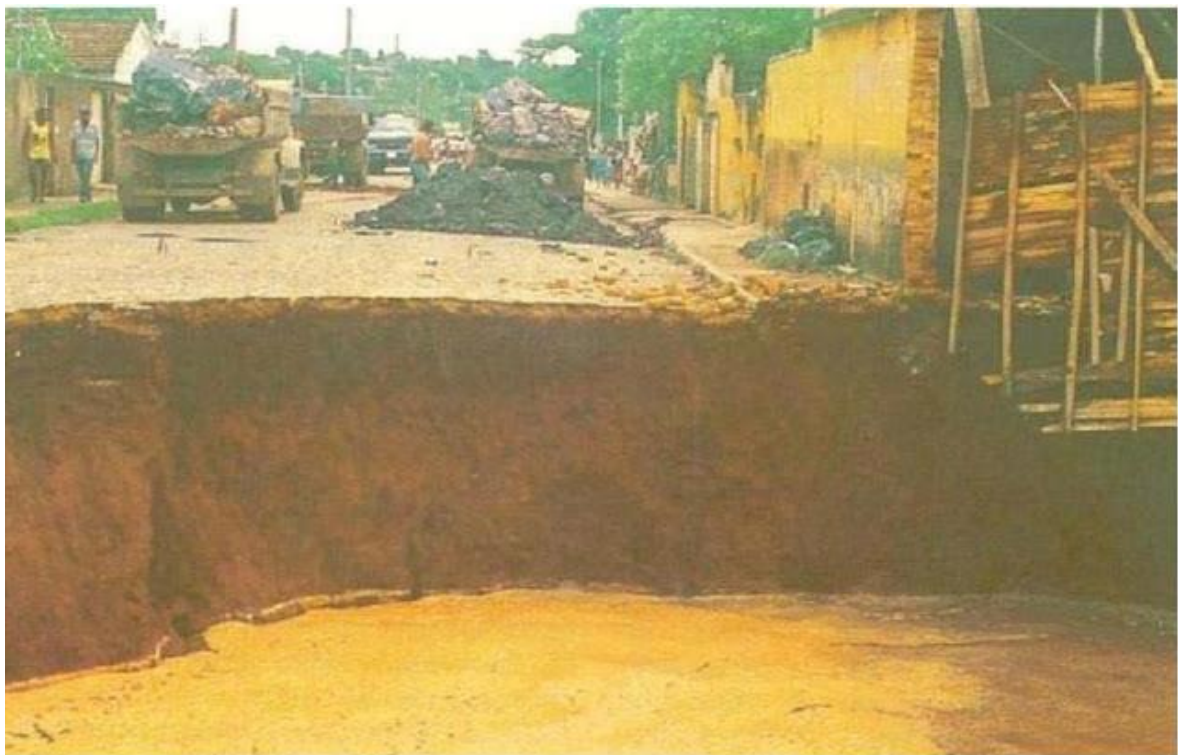


Figura 6 - Primeiro grande abatimento de terreno registrado em Sete Lagoas em 1988.
Fonte: Barros, 2009.

Em contrapartida, acredita-se que esse primeiro evento de grande proporção estava associado a um fenômeno natural ligado a áreas carstificadas, não tendo influência antrópica, sendo que

nessa época a exploração de água subterrânea ainda estava abaixo do volume de recarga mínima do aquífero e a região possuía um pequeno cone de rebaixamento (SILVA, 1988; SCHUCH, 2022). Tal fato evidencia a importância da investigação geológica-geotécnica da área, sendo que já existe a predisposição de ocorrência desses eventos naturais na região, e que podem ser acentuados por ações humanas.

De acordo com Ferreira (2019), outros 16 colapsos aconteceram no município e foram registrados pela prefeitura, todos eles localizados na região central de Sete Lagoas. Justificando-se pelo fato de a área apresentar o maior adensamento construtivo e de poços da cidade. Segundo Botelho (2008), o aumento da ocorrência de subsidências de solo na cidade cresce em relação ao aumento das perfurações de poços e da exploração de águas subterrâneas. Houve também grande crescimento populacional e industrial no município ao longo dos anos, implicando no aumento significativo de água explorada. Com isso tem-se a provável indução de acomodação do solo e de erosões subterrâneas, especialmente nas zonas de fraqueza do substrato rochoso (BOTELHO, 2008).

Nesse contexto, relatórios técnicos desenvolvidos acerca das subsidências em Sete Lagoas concluíram que não é indicado a exploração do aquífero cárstico na região central do município (GALVÃO *et al.*, 2015; BOTELHO, 2008). Os autores afirmam que a concentração de poços de exploração contínua nessa área da cidade faz com que haja oscilação periódica do nível freático da localidade, favorecendo a ocorrência de eventos de solapamento e carreamento nas fraturas. Botelho (2008) levantou o ano e local de ocorrência das subsidências catalogadas no município de Sete Lagoas entre os anos de 1940 e 2008, essas informações são apresentadas na Figura 7.

SUBSIDÊNCIAS REGISTRADAS EM SETE LAGOAS - 1940 A 2008



Figura 7 - Subsidências registradas em Sete Lagoas entre 1940 a 2008.
Fonte: modificado de Botelho (2008).

2.3.2. Risco geológico geotécnico

Entende-se por risco a possibilidade de perigo, perda ou dano, seja do ponto de vista social ou econômico da população, caso aconteça escorregamentos ou processos correlatos à geologia/geotecnia (RECKZIEGEL; ROBAINA, 2005). Ainda pode-se pensar em relação às perdas associadas ao homem e suas propriedades sendo atrelado às dinâmicas externas em área ocupadas. Já a suscetibilidade é caracterizada pelo o quão provável um determinado fenômeno pode ocorrer (GIRÃO; RABELO; ZANELLA, 2018), ainda assim, segundo a Defesa Civil (2017), são analisados diferentes parâmetros e predisposições em conjunto para determinar a suscetibilidade. Neste trabalho, a palavra “risco” será utilizada em diversos momentos, evidenciando a possibilidade de danos que os eventos cárstico-geotécnicos podem causar. Porém é importante salientar que em nenhum momento o estudo propôs a avaliação dos efeitos danosos gerados por abatimentos e subsidências do solo.

Galvão *et al.* (2015) mapearam o risco potencial de colapso em Sete Lagoas, considerando 5 níveis de classes de risco, subdivididas em negligenciável, baixo, moderado, considerável e alto risco (Figura 8). Seu estudo evidenciou a influência antrópica sobre o aquífero Sete Lagoas, incluindo mapeamento geológico e localização de feições cársticas. Além disso, interpretou fotografias aéreas, analisou perfis litoconstrutivos e perfilagem ótica de poços, mapeou estruturas em profundidade e elaborou mapas de superfície potenciométrica.

Com essa pesquisa, estabeleceu-se dois principais fatores naturais, sendo o geológico e o hidrogeológico. Também determinou-se pesos específicos para cada fator, ponderando as estruturas geológicas, feições cársticas, litologia, nível potenciométrico e zona de influência dos poços de bombeamento. Esse estudo auxiliou para o entendimento de que apesar do perigo geotécnico estar naturalmente associado aos terrenos cársticos, existe influência antrópica relacionada à superexploração de água nos eventos geotécnicos de Sete Lagoas (MAGNABOSCO, 2020).

A maior parcela do centro urbano de Sete Lagoas se localiza em uma região de alto risco, sendo ela introduzida em um *gráben* preenchido por rochas carbonáticas e cobertos por uma camada de sedimentos inconsolidados (GALVÃO *et al.*, 2015). Além do mais, o autor ainda afirma que esse contato direto entre a camada de materiais inconsolidados e o calcário pode propiciar o intemperismo das rochas, acelerando a ocorrência de colapsos.

Portanto, para a exploração em aquíferos cársticos é necessário a realização de estudos prospectivos com o objetivo de mapear as áreas suscetíveis ao acontecimento de colapsos e

subsidiências. E em Sete Lagoas é essencial a adoção de um planejamento quanto ao manejo da captação das águas subterrâneas (BOTELHO, 2008).

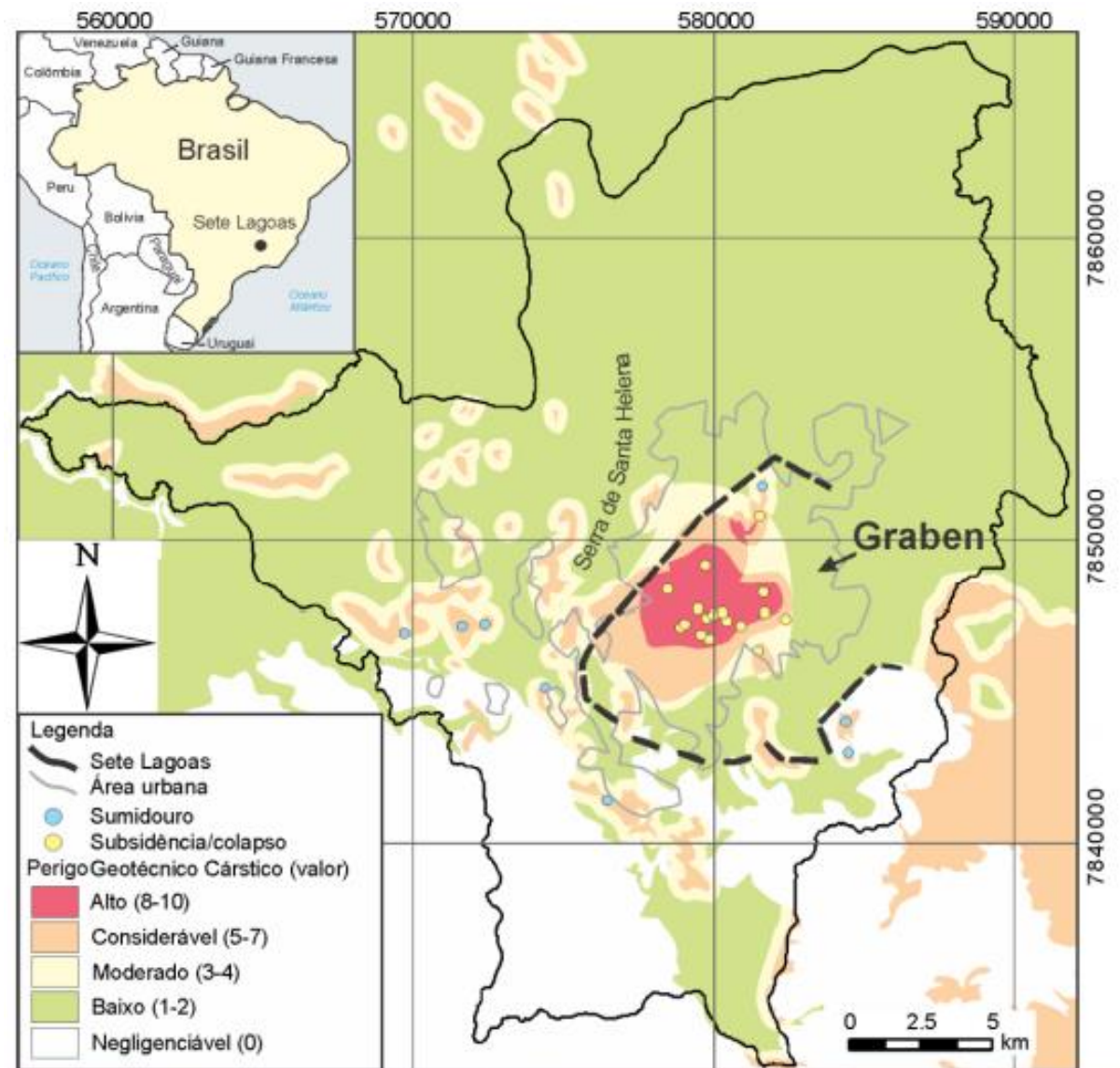


Figura 8 - Risco geotécnico para o carste de Sete Lagoas.

Fonte: Galvão *et al*, 2015.

2.4. Uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo é um fator que influencia diretamente em várias áreas de planejamento das cidades. A ocupação urbana altera as condições naturais e transforma-as em um novo sistema, fortemente influenciado pelas atividades antrópicas (MACHADO; CARMO; JARDIM, 2012).

O processo de urbanização está diretamente relacionado à alteração do regime hidrológico local, gerando grandes desafios de gestão nas áreas urbanas (SERAPHIM, 2018). Em contrapartida, ainda de acordo com a autora, observa-se que muitas vezes esse planejamento

fica em segundo plano nas estratégias de planejamento urbano e ordenamento territorial das cidades brasileiras, não apresentando o uso de técnicas urbanísticas visando a preservação das águas nas cidades. Esse fato é ainda mais evidenciado quando se trata das águas subterrâneas, já que por serem um bem não visível, seu gerenciamento fica mais complicado e inacessível.

Se tratando da área em estudo, Sete Lagoas vem enfrentando um forte crescimento populacional e econômico, aumentando a demanda por água e conseqüentemente os problemas atrelados a exploração do sistema cárstico, sendo associados à restrição no abastecimento público, à contaminação do solo e do aquífero e às reduções de vazão aos cursos de água superficial (GALVÃO *et al.*, 2012).

2.4.1. Expansão e crescimento urbano

Uma das primeiras atividades econômicas em Sete Lagoas foi a agropecuária, sendo esta bastante presente desde o início do século XX, com a criação de pequenos centros de pesquisa, que hoje se dá pelo Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS) da Embrapa (ALVES, 2020). Em 1923, Sete Lagoas foi considerada município, sendo consequência principalmente da chegada da ferrovia na cidade em 1872.

Além disso, dentre os efeitos da chegada dos trilhos, teve-se a ampliação do comércio e das atividades industriais, o aumento populacional, o crescimento urbano, o progresso na agricultura e na pecuária (AZEVEDO, 1963). Também, a construção de Belo Horizonte, capital do estado, em 1897, influenciou diretamente no crescimento das atividades econômicas do município. Sete Lagoas abastecia o mercado da capital mineira com os principais produtos agropecuários da época, sendo: café, açúcar, algodão, mandioca e cereais (NOGUEIRA, 1999; BOTELHO, 2008).

Por volta da década de 50, a cidade começou a integrar a zona metalúrgica de Minas Gerais, tornando-se polo de produção de ferro-gusa com a vinda da Sidersete, primeira siderúrgica do município. A partir dos anos 60, diversas indústrias foram transferidas para a Região de Sete Lagoas, criando-se um parque industrial na localidade. Além disso, outras empresas impulsionaram o crescimento urbano na cidade, como: Itambé, Bombril, Elma Chips e, mais recentemente, Fiat-Iveco (em 2000) e a AmBev (em 2008) (LANDAU *et al.*, 2011).

Recentemente, Sete Lagoas representa um dos principais polos de concentração industrial de Minas Gerais, tendo altas taxas de crescimento econômico. O município apresenta um crescimento médio populacional de 2,44% ao ano, sendo esse índice superior ao da região metropolitana de Belo Horizonte (2,09%) (LANDAU *et al.*, 2011). Se tratando de região, Sete

Lagoas possui um papel fundamental acerca do desenvolvimento das atividades industriais do estado, sendo que sua localização geográfica favorece o transporte eficiente das matérias primas e o escoamento da produção pelas rodovias BR-040 e MG-424 (LANDAU *et al.*, 2011).

O desenvolvimento econômico do município tem influenciado no aumento populacional e no crescimento urbano da cidade. Sete Lagoas possui uma tendência contínua de aumento na população, alcançando cerca de 390.0000 habitantes em 2030 (BOTELHO, 2008), demandando cada vez mais políticas ligadas ao saneamento, moradia, educação, trânsito, e, principalmente, ao abastecimento público de água e a gestão do aquífero cárstico local. A Figura 9 demonstra a expansão da área urbanizada da cidade entre os anos de 1949 e 2010.

EXPANSÃO URBANA DA CIDADE DE SETE LAGOAS/MG ENTRE 1949 E 2010

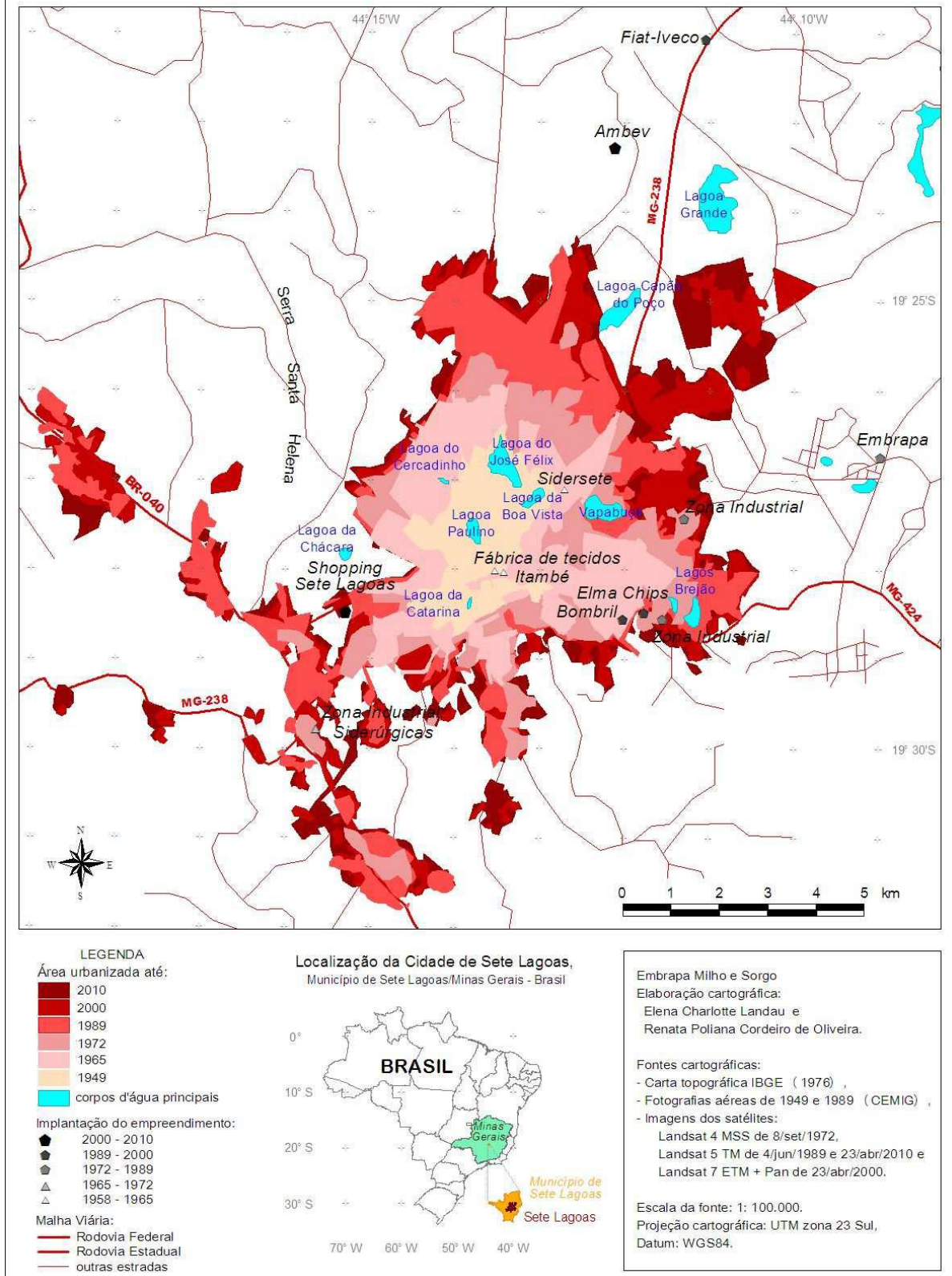


Figura 9 - Evolução espaço-temporal da área urbana da cidade de Sete Lagoas.
Fonte: Landau *et al.*, 2011.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Água subterrânea

As águas subterrâneas são caracterizadas como a parcela da hidrosfera que ocorre na subsuperfície da Terra (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). De maneira geral, em comparação com as águas superficiais, a água subterrânea movimenta-se de forma muito lenta, muitas vezes não perceptível, caracterizando-se por um fluxo laminar (CLEARY, 1989). Além disso, as águas subterrâneas podem alimentar os rios, lagos e mares, bem como emergir à superfície formando nascentes e fontes (CAPUCCI *et al.*, 2001).

O foco principal da ciência das águas, até meados de 1900, foi desenvolver recursos de exploração das águas subterrâneas, sendo este um bem hídrico fundamental no planeta. Ainda se ressalta que as águas subterrâneas vem sendo progressivamente explotadas no país, seja para abastecimento dos centros urbanos, como também para usos industriais, para irrigação e turismo (HIRATA, ZOBY, OLIVEIRA, 2010).

As águas subterrâneas ocupam os poros, fraturas, fissuras e outras formas de vazios das rochas e solos (GIAMPÁ; GONÇALES, 2013). Ainda segundo os autores, apesar das dimensões milimétricas desses elementos, 97% das reservas de água doce líquida associadas aos continentes são estocadas dessa maneira. Os demais 3% constituem os rios e lagos, além de auxiliar na umidade do solo.

As águas subterrâneas são divididas em duas diferentes zonas, sendo a insaturada ou vadosa, localizada próximo à superfície, e a zona saturada ou freática à maior profundidade (Figura 10). A zona vadosa é a ligação entre as águas da chuva, as subterrâneas e as superficiais (FEITOSA *et al.*, 2008). A delimitação entre essas zonas é caracterizada pela presença do lençol de água, denominada superfície freática, que se define como a superfície sobre a qual a pressão de água porosa é igual à pressão atmosférica (KARMANN, 2000). Ainda segundo o autor, a zona vadosa ou zona de aeração está localizada acima do lençol freático, em que se tem os espaços dos poros ocupados por ar e também por água. Abaixo do lençol freático tem-se a zona saturada, local onde os vazios são integralmente preenchidos por água.

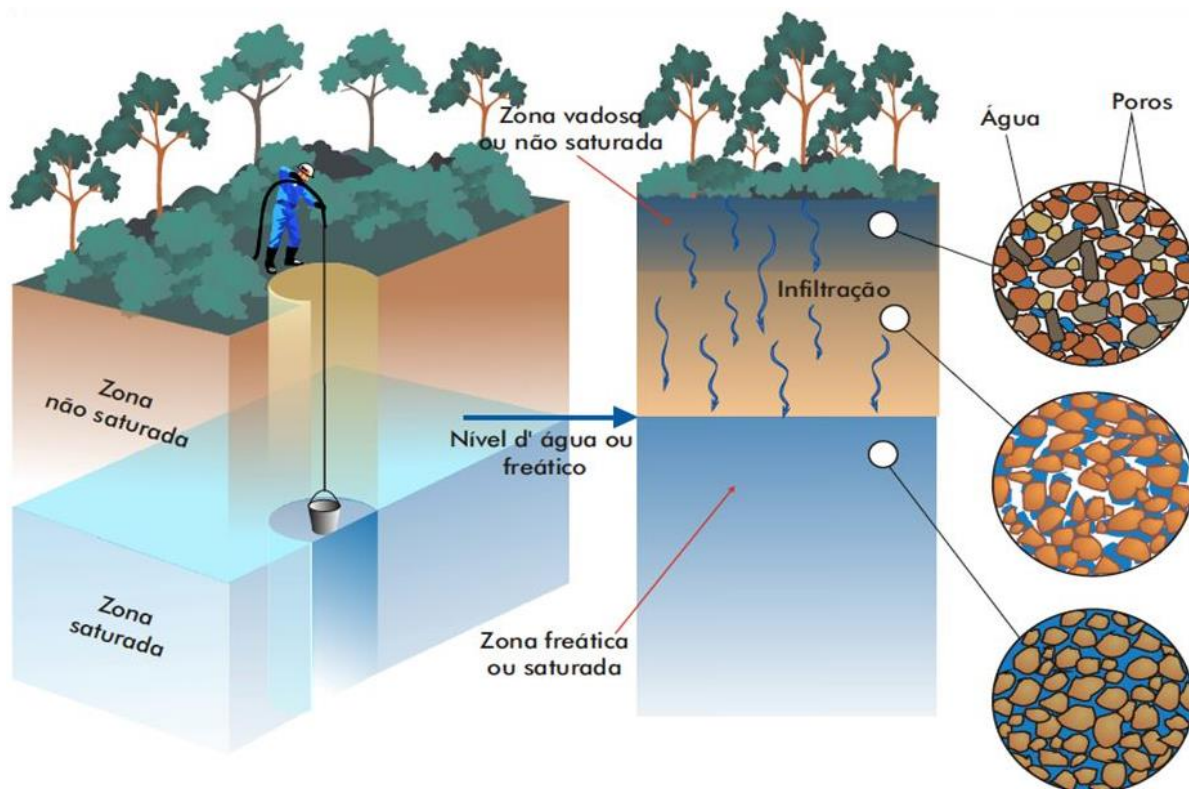


Figura 10 – Divisão entre zona vadosa e zona saturada.
 Fonte: Teixeira *et al.*, 2003.

Sendo assim, os sistemas hidrogeológicos são divididos de acordo com sua capacidade de armazenamento, percolação de água e possibilidade de exploração em aquícludes, aquícludes, aquícludes, aquícludes e aquícludes. O aquíclude é caracterizado como sendo uma unidade geológica saturada que não é capaz de transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos comuns, ou seja, praticamente não existe permeabilidade nesta formação, sendo o fluxo de água inexistente ou muito reduzido (FEITOSA *et al.*, 2008; FREEZE; CHERRY, 2017).

O termo aquíclude ou aquícludo é utilizado para descrever as camadas semipermeáveis da coluna estratigráfica, sendo delimitado no topo e/ou em sua base por camadas de permeabilidade muito maior (FEITOSA *et al.*, 2008). O aquíclude pode ser capaz de transmitir água de maneira lenta, funcionando como uma membrana semipermeável, porém sua permeabilidade não é suficiente para produção de água para poços (FEITOSA *et al.*, 2008; FREEZE; CHERRY, 2017; ALMEIDA; MASINI; MALTA, 2017). Por outro lado, os aquícludes são formações impermeáveis que não são capazes de armazenar nem transmitir água (FEITOSA *et al.*, 2008).

O conceito de aquífero se dá por uma camada ou região geológica permeável na zona saturada, que possibilita o armazenamento e a transmissão significativa da água subterrânea, sendo então um reservatório de água sob a superfície (FEITOSA *et al.*, 2008; GIAMPÁ; GONÇALES,

2013; ALMEIDA; MASINI; MALTA, 2017). Segundo Freeze e Cherry (2017), os estratos geológicos em sua maioria são dados como aquíferos e aquitardes, sendo que poucas formações se caracterizam na definição de aquíclude.

3.1.1. Tipos de aquífero

Os aquíferos são unidades rochosas ou sedimentares, que armazenam e transmitem volumes significativos de águas subterrâneas que podem ser exploradas pela sociedade (CLEARY, 1989; KARMANN, 2000; BORN et al., 2021). Segundo Born et al. (2021), o estudo quanto à exploração e à proteção dos aquíferos é um dos objetivos mais importantes do ramo da hidrogeologia.

Se tratando da classificação dos aquíferos quanto à pressão hidrostática, tem-se aquíferos livres, confinados, semiconfinados e suspensos (Figura 11). Os aquíferos livres ou freáticos são constituídos pelo nível freático como limite superior, ocorrendo mais próximos da superfície, onde a unidade geológica aflora (CLEARY, 1989; KARMANN, 2000; FREEZE; CHERRY, 2017; ALMEIDA; MASINI; MALTA, 2017). Além disso, os aquíferos livres se definem por ter pressão da água na superfície freática igual a pressão atmosférica, por não ter camada limitante impermeável na face superior, sendo isso fator facilitador para possíveis vulnerabilidades e contaminações (CLEARY, 1989; FEITOSA *et al.*, 2008; ALMEIDA, 2016; ALMEIDA; MASINI; MALTA, 2017). Porém, ainda segundo os autores, os aquíferos livres possuem maiores recargas e de forma mais rápida, por estarem mais próximos à superfície, além de apresentarem águas mais jovens, por possuírem pequenos tempos de residência. Ainda, tem-se maiores interações com as águas superficiais e no contexto das perfurações de poços, apresenta-se poços mais rasos e conseqüentemente de menores custos.

Por outro lado, os aquíferos confinados ocorrem em profundidade, sendo delimitados nas partes superior e inferior por sistemas hidrogeológicos de muito baixa ou nenhuma permeabilidade (KARMANN, 2000; FREEZE; CHERRY, 2017; ALMEIDA; MASINI; MALTA, 2017). Com isso, a pressão no nível d'água é maior que a pressão atmosférica, podendo esse nível de água estar em uma posição superior ao seu topo, o que ocasiona maior possibilidade de poços artesianos ou jorrantes (CLEARY, 1989; KARMANN, 2000; FREEZE; CHERRY, 2017). Além disso, essa separação impermeável faz com que esses aquíferos tenham menor vulnerabilidade natural, maior tempo de residência e recarga mais lenta, realizada somente em porções aflorantes ou por infiltração de unidades geológicas sobrepostas (ALMEIDA;

MASINI; MALTA, 2017). Se tratando das perfurações, tem-se poços tubulares mais profundos e, com isso, atrelados a maiores custos (BORN et al., 2021).

Os aquíferos semiconfinados são semelhantes aos confinados, sendo a diferença que uma das camadas delimitadoras do aquífero apresenta permeabilidade, permitindo infiltração (ALMEIDA; MASINI; MALTA, 2017).

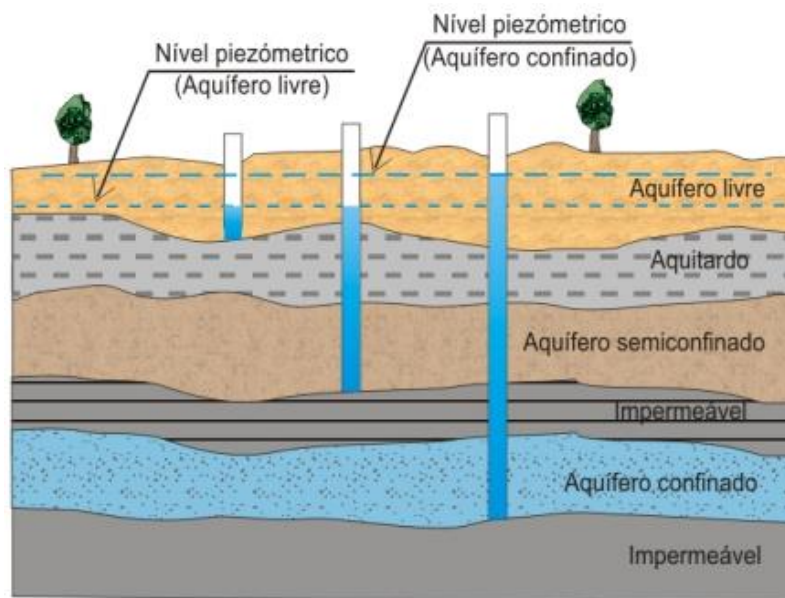


Figura 11 – Classificação dos aquíferos quanto a pressão hidrostática.
Fonte: Costa, 2007.

A formação da água subterrânea se dá por meio da infiltração de água no solo, penetrando nos vazios das rochas e sedimentos, e constituindo os aquíferos (HIRATA *et al.*, 2019). A determinação do fluxo dessas águas através do solo é dada pelos poros e fraturas presentes nesse meio, sempre respeitando o sentido da maior para a menor carga hidráulica. Com isso, tem-se que todo tipo de rocha e solo tem poros, sendo esses diferenciados pelo tamanho e quantidade desses espaços vazios (GROTZINGER; JORDAN, 2013).

Portanto, a porosidade é definida como a fração relativa ao volume de vazios uma rocha ou solo estando diretamente relacionada com a capacidade de armazenamento de fluidos (KARMANN, 2000; SANSONE, 2014). A porosidade primária se desenvolve no processo de litificação, e de acordo com Freeze e Cherry (2017) está relacionada à matriz do solo ou da rocha. Já a porosidade secundária pode ser chamada de “porosidade de fraturas” e é caracterizada por processos que ocorrem após a formação da rocha, sendo resultado da atuação de forças tectônicas que podem provocar fraturas ou fissuras, aumentando sua porosidade (KARMANN, 2000; SANSONE, 2014). A porosidade terciária é definida como uma evolução da porosidade

secundária, conforme Ford e Williams (2007) essa porosidade é toda feição de alargamento por dissolução da rocha, podendo gerar fendas, condutos e cavernas subterrâneas.

Quanto aos aquíferos, tem-se a classificação relacionada ao tipo de porosidade onde se armazena água, podendo ser um aquífero poroso, fissural ou cárstico (Figura 12) (FEITOSA et al., 2008). Os aquíferos porosos ou granulares são caracterizados por porosidade primária, em que a água é armazenada nos espaços entre os grãos da rocha ou solo, podendo ser mais comumente encontrados em rochas sedimentares e solos (KARMANN, 2000; BORN et al., 2021). Os aquíferos faturados ou fissurais apresentam porosidade secundária, em que a água é armazenada nas fraturas interconectadas da rocha, podendo ser mais identificados em rochas ígneas e metamórficas (ALMEIDA, 2016). Já os aquíferos cársticos ou aquíferos de condutos são caracterizados pela porosidade terciária, em que a água subterrânea é armazenada e transmitida por condutos e canais gerados pela dissolução das rochas, mais comumente carbonáticas (KARMANN, 2000).

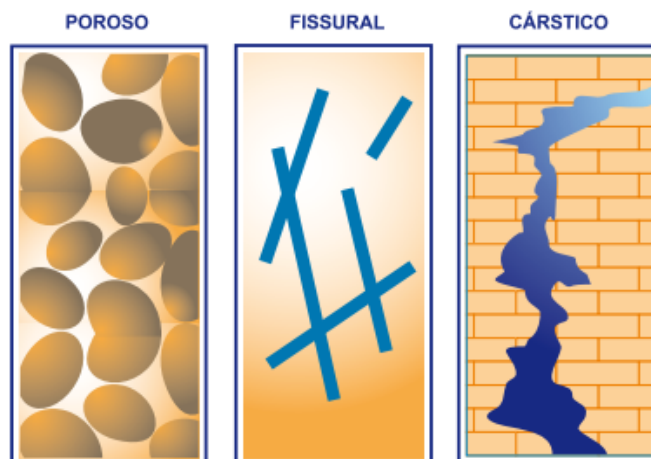


Figura 12 – Classificação dos aquíferos quanto a porosidade.
Fonte: Borghetti; Borghetti; Rosa Filho, 2011.

3.1.2. Sistema cárstico

O carste é um estilo especial de paisagem composto por formas de relevo características, contendo cavernas, dolinas, sumidouros, paredões e depressões, gerados através da dissolução de rochas, processo esse denominado carstificação. Tal processo ocorre principalmente em rochas carbonáticas, por serem mais solúveis (KARMANN, 2000; FORD; WILLIAMS, 2007), que geram diferentes hidrologias e porosidades secundárias evoluídas. Além disso, no contexto hidrológico e geomorfológico, o sistema cárstico é estabelecido pelo desenvolvimento de três elementos básicos: sistemas de cavernas, aquíferos e relevo cársticos (KARMANN, 2000)

Nos aquíferos cársticos, a circulação da água subterrânea ocorre através de fraturas ou descontinuidades resultantes da dissolução do carbonato pela água (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011; BORN et al., 2021). Esses condutos podem atingir grandes dimensões, criando cavernas e rios subterrâneos (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011). Sendo assim, nessas regiões o volume de circulação subterrânea pode superar o volume dos cursos d'água superficiais, (BORN et al., 2021). Além disso, segundo Borghetti, Borghetti e Rosa Filho (2011), são caracterizados como aquíferos heterogêneos, anisotrópicos e com águas duras, sendo essa terminologia definida por águas com grandes concentrações de bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloretos de cálcio ou magnésio dissolvidos.

A recarga de um aquífero cárstico pode ocorrer de duas maneiras: autogênica, quando a recarga tem origem dentro do próprio sistema cárstico, e alogênica, quando possui procedência de regiões não cársticas, como sedimentos inconsolidados e fraturas do embasamento (FORD; WILLIAMS, 2007; GOLDSCHIEDER; DREW, 2007). Quanto ao tipo de infiltração, pode-se ter a ocorrência desse processo de maneira concentrada em pontos de recarga, como sumidouros e dolinas, bem como infiltração difusa, por meio dos solos e fratura/matriz das rochas (FORD; WILLIAMS, 2007; GOLDSCHIEDER; DREW, 2007).

Segundo Feitosa *et al.* (2008) existem basicamente três grupos de formas cársticas. As primeiras são as formas de absorção epigênicas, por onde ocorre a infiltração das águas no carste que esculpem a morfologia cárstica. As formas de condução hipogênicas, são por onde circulam as águas no subsolo através das cavernas e outros condutos subterrâneos. Por fim, as formas de emissão são por onde a circulação hipogênica retorna a forma epigênicas através de surgências. As formas cársticas mais recorrentes, de acordo com Goldscheider e Drew (2007) são: os sumidouros, as dolinas e cavernas (Figura 13). Sendo as dolinas e as cavernas diretamente associadas aos processos de colapsos e subsidências dos solos.

As dolinas são depressões subcirculares ou cônicas, que podem variar de metros a quilômetros, formadas por dissolução, colapso, erosão por piping, subsidência ou uma combinação desses processos (KARMANN, 2000; GOLDSCHIEDER; DREW, 2007). São as formas morfológicas mais comuns no carste, sendo o local onde duas ou mais falhas se encontram, gerando um ponto propício para a carstificação e desenvolvimento das dolinas e sumidouros. Além disso, o fundo dessas formações é normalmente coberto por sedimentos transportados pela água.

Já as cavernas são como aberturas subterrâneas naturais, sendo grandes o suficiente para entrar uma pessoa (KARMANN, 2000). Os condutos são definidos como uma abertura ampliada por

dissolução a um diâmetro suficiente para que o fluxo passe de laminar para turbulento, normalmente com um diâmetro entre 5 a 15 mm. A ampliação desses condutos acentua gradualmente a permeabilidade secundária de uma determinada rocha, influenciando para que um aquífero originalmente fraturado se transforme em parte em um aquífero de conduto ou cárstico (KARMANN, 2000).

Essas duas formações são tidas como as mais complexas, pelo fato de terem a possibilidade de se ramificar de várias formas nas três dimensões (FORD; WILLIAMS, 2007).

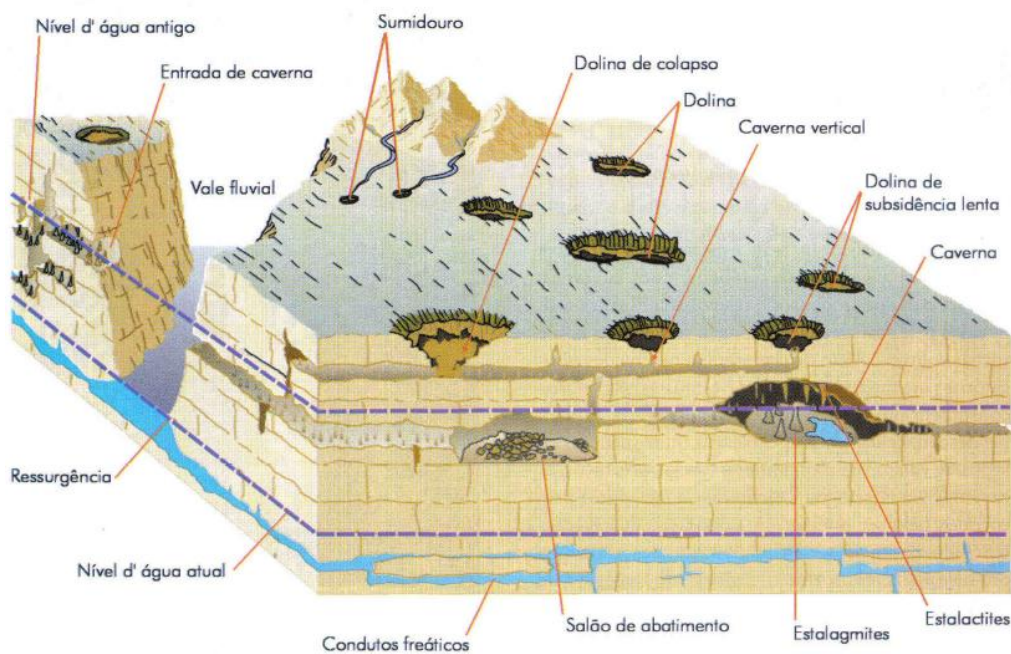


Figura 13 – Componentes principais do sistema cárstico.
Fonte: Karmann, 2000.

A drenagem do sistema cárstico, na maioria das vezes não é compreendida. Sendo a elevação regional e o aprofundamento dos vales fatores que influenciam o nível de base hidrológico, desse modo os condutos da zona freática passam para zona vadosa, enquanto uma nova geração de condutos se desenvolve em profundidade (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007). Em caso de eventos de inundação, os condutos mais antigos e superiores podem ser reativados, dando origem a nascentes de transbordamento ou temporárias. Segundo os autores, nessas regiões as redes de drenagem superficial não são bem desenvolvidas, sendo que vários tipos de vales, gargantas e cânions estão presentes em áreas cársticas, formados por erosão fluvial do passado e secando devido à crescente carstificação. (GOLDSCHIEDER; DREW, 2007).

No contexto do fluxo regional, tem-se que no aquífero cárstico se caracteriza pela direção do gradiente hidráulico. Porém, a direção do fluxo local pode sofrer alterações de acordo com a direção das fraturas e dos condutos. A velocidade das águas subterrâneas também pode variar

bruscamente, de laminar, se tratando dos poros e pequenas fraturas, a muito rápido e turbulento nos condutos e cavernas (FORD; WILLIAMS, 2007).

3.1.3. Superexploração

O conceito de superexploração vem se tornando cada vez mais utilizado no âmbito acadêmico, sendo comum entre pesquisadores, gestores e comunicadores (BATISTA, 2015). Inicialmente, essa concepção se dizia respeito apenas aos valores quantitativos do aquífero, relacionada à carga e recarga desses sistemas, em que o saldo final entre o volume explorado e a recarga resulta em um déficit. Segundo Batista (2015), a superexploração se define quando o aquífero está sendo utilizado em quantidade maior que deveria, porém não propicia nenhuma informação sobre o real estado do aquífero. Com isso, Llamas (2011) desencoraja o uso do termo superexploração, considerando-o insignificante.

De acordo com Custodio (2002), a superexploração se define como a extração de água do aquífero em uma quantidade superior a correspondente à sua recarga, em um dado período de tempo suficientemente grande para que se possa diferenciar de períodos anômalos de estiagem. O autor ainda ressalta que o termo não só se refere à diferença quantitativa, bem como se define à aquíferos sob estresse ou em situações onde ocorrem conflitos pela água subterrânea.

Levando em consideração o social e a qualidade da água, tem-se que a superexploração é toda exploração de água subterrânea que produz efeitos indesejados, em que as consequências negativas geradas por essa extração de água são maiores que as vantagens causadas, caracterizando-se por um processo não-sustentável. Segundo Schuch (2022), entre os autores há um consenso que a superexploração é resultado de uma má gestão das águas subterrâneas ao longo do tempo, no qual os malefícios superam os benefícios gerados.

Com o pouco interesse do poder público, a expansão das atividades de exploração de água por meio de perfurações de poços desordenadas e sem planejamento, levou a efeitos colaterais que influenciam negativamente os espaços urbanos até os dias atuais. O primeiro efeito se dá pelo conhecimento limitado dos gestores de recursos hídricos acerca dos sistemas subterrâneos, dado que por muito tempo não houve um interesse real no assunto (LLAMAS, 2011). Ainda segundo o autor, esse desenvolvimento desordenado e desregulamentado causou grandes rebaixamentos do nível de água, bem como a degradação da qualidade dessa água, aumento nos custos de perfuração e bombeamento, subsidência de terrenos e interferência em rios e corpos d'água.

Além das consequências citadas acima, tem-se o abandono de poços devido à condutos secos, contaminação e compartimentação do aquífero, compactação da terra, problemas geotécnicos,

salinização de solos e desertificação progressiva, desaparecimento de fauna e flora, mudança de paisagens, problemas no abastecimento de água, e em casos de aquíferos costeiros, a intrusão de água do mar (CAPUCCI *et al.*, 2001; FREEZE; CHERRY, 2017; STEVANOVIĆ, 2018; SCHUCH, 2022). Entretanto, esses resultados negativos não requerem necessariamente que a exploração seja maior que a recarga do aquífero. Assim, é necessário um estudo de todas as condições do sistema, considerando um longo período de tempo, antes que a superexploração de um aquífero seja definida.

A título de exemplificação, tem-se países como China, Estados Unidos, México e Espanha passando por problemas associados à superexploração. Esses países apresentam o desenvolvimento de grandes cones de rebaixamento advindo da diminuição do nível piezométrico do aquífero, além de subsidências de solo, aumento no custo econômico do bombeamento, abandono de poços, diminuição do fluxo de corpos d'água superficiais e intrusões de água salina (CAPUCCI *et al.*, 2001; ESCOLERO *et al.*, 2002; ESTELLER; DIAZ, 2002; MOLINA *et al.*, 2009; RODRÍGUEZ-ESTRELLA, 2012; FREEZE; CHERRY, 2017).

3.1.4. Abatimentos e subsidências

Os colapsos e subsidências de terrenos, sejam eles naturais ou induzidas, são frequentes em regiões cársticas (BEYNEN, 2011). Esses eventos são os principais causadores de acidentes associados ao solo, gerando prejuízos econômicos, atrelados ao desmoronamento das construções, como também a ocorrência de vítimas fatais. A subsidência é caracterizada pelo rebaixamento da superfície devido a remoção do suporte, em áreas cársticas se dá pela dissolução subterrânea ou colapso de cavernas. As subsidências acontecem de forma lenta podendo causar recalque de fundações e consequências nas suas estruturas, como trincas e rachaduras (OLIVEIRA, 2010). Já o colapso do solo é quando a subsidência acontece de forma aguda (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009).

Dentre as causas desses acontecimentos tem-se os processos naturais, influenciados pela carstificação e dissolução das rochas, como calcários e dolomitos. Além da acomodação de camadas no substrato, devido ao seu peso ou a deslocamentos segundo planos de falhas (CPRM, 2018). Entretanto, tem-se também esses processos acelerados pela ação antrópica, que estão associados pelo bombeamento excessivo de águas subterrâneas e o acréscimo de peso advindos de obras e construções nessas regiões (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009; OLIVEIRA, 2010). Portanto, segundo a CPRM (2018), afundamentos da superfície por

subsidência e colapso são feições típicas de terrenos cársticos. Sendo esses eventos agravados por diversos fatores e relacionados principalmente pelo desenvolvimento dos dolinamentos.

Os processos de dolinamentos são complexos, sendo que segundo Travassos (2019) existem cerca de 35 tipos de dolinas, classificadas de acordo com seus estágios de evolução, processos de gênese, tipo de sedimento de cobertura, fatores climáticos, depósitos internos e forma. Já conforme Williams (2004) existem seis tipos principais de dolinas, sendo as de dissolução, colapso, encobertas ou enterradas (*buried*), encobertas por rocha (*caprock doline*) e as de subsidência (de abandono ou sufusão), que serão descritas a seguir, segundo Travassos (2019).

As dolinas de dissolução são formadas pelo processo de dissolução ou corrosão da rocha, sendo este envolvido em sua gênese e evolução. Essas dolinas são amplamente encontradas em paisagem cársticas em que a dissolução é um processo fundamental na escala de tempo geológico. As dolinas de abatimento ou colapsos são caracterizadas pelo rápido colapso da rocha ou solo, podendo apresentar inicialmente aberturas abruptas que, muitas vezes, são entradas de cavernas (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). As dolinas encobertas são dolinas de dissolução que apresentam preenchimento total por sedimentos. Enquanto as dolinas encobertas por rocha são um subtipo das dolinas de abatimento, sendo cobertas por rochas não carbonáticas (TRAVASSOS, 2019). E por fim, as dolinas de subsidência, consideradas mais suaves que as de colapso, se assemelham as dolinas de dissolução, porém, são encobertas por sedimentos (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). Essas dolinas podem ser desenvolvidas por meio do carreamento dos sedimentos da subsuperfície pelo fluxo em condutos na rocha, podendo ser rápida ou gradual. A Figura 14 apresenta a comparação entre o processo de dolinamento por subsidência lenta e colapso, sendo essas as feições de relevo mais frequentes em ambientes cársticos e estando associadas diretamente aos abatimentos e subsidências dos solos em áreas urbanas.

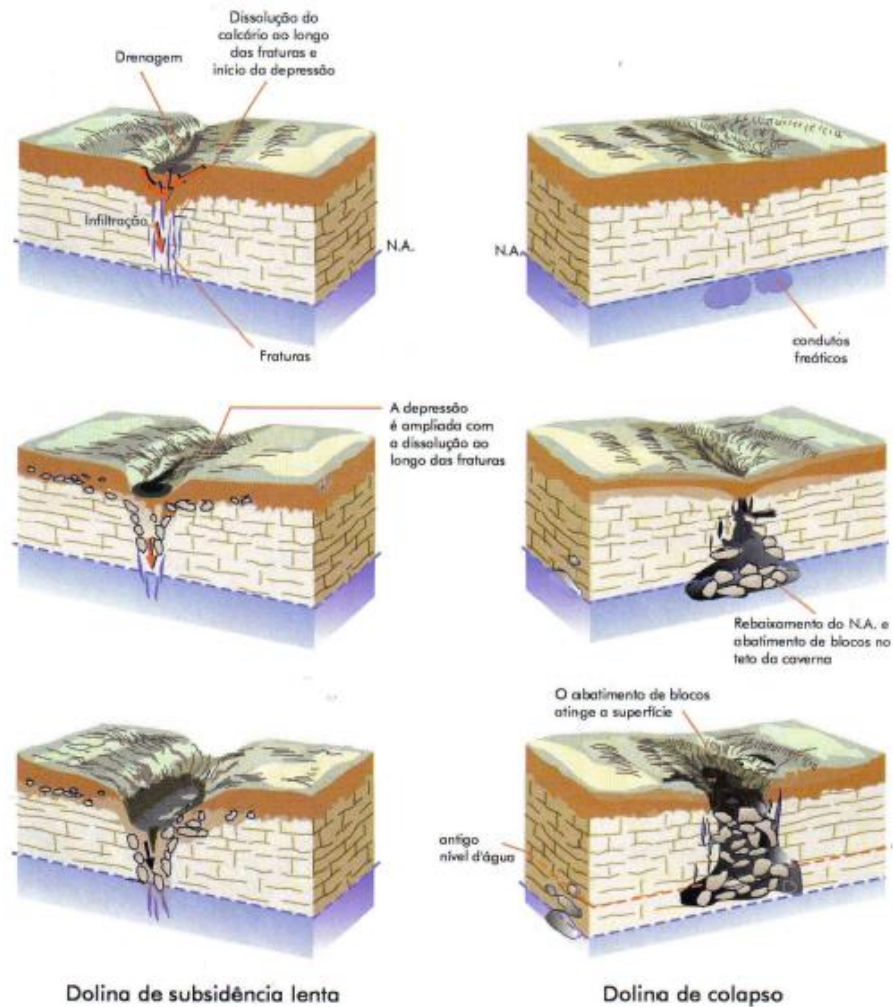


Figura 14 – Comparação entre a ocorrência de subsidências e colapsos.
 Fonte: Karmann, 2000.

3.2. Impactos humanos no cárste

As áreas de aquíferos cársticos, como definidas anteriormente, são o conjunto de formas condicionadas pela dissolução de rochas, principalmente carbonáticas e calcárias, além de serem caracterizadas por depressões fechadas, drenagens subterrâneas e cavernas (HARDT, 2008). Segundo Cruz e Piló (2019), as regiões brasileiras onde se tem a ocorrência de cavernas, historicamente vêm sofrendo com a falta de planejamento e controle das atividades antrópicas. Além disso, essas áreas frequentemente estão situadas nas mesmas regiões onde se tem intensa produção agrícola e industrial, o que pode influenciar negativamente acerca de contaminações e vulnerabilidades desse sistema (CRUZ; PILÓ, 2019).

Além desses processos associados à contaminações, tem-se também atividades que atraem uma série de intervenções humanas, como a construção de infraestruturas de diversos tipos, aberturas de estradas, expansão de cidades, adensamento populacional e outros. Essa ocupação das regiões cársticas acentua os riscos associados ao acontecimento dos abatimentos de solo,

relacionados diretamente com a sobrecarga desses terrenos (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). Ainda segundo os autores, a alteração do nível de água subterrânea é um dos fatores mais regulares na aceleração dos processos de subsidência. Além disso, em regiões urbanizadas, essas edificações e a pavimentação exacerbada impedem a infiltração efetiva de água no solo, aumentando o escoamento superficial e diminuindo o potencial de recarga dos aquíferos (KARMANN, 2000).

Com isso, surge a preocupação quanto à proteção do sistema cárstico, porém já existem grandes danos associados a esse conjunto, principalmente em regiões densamente ocupadas que utilizam o bombeamento de água como fonte primordial para o abastecimento, como é o caso de algumas regiões metropolitanas brasileiras, como Curitiba e Belo Horizonte (CRUZ; PILÓ, 2019).

3.2.1. Crescimento populacional e adensamento

O aumento da população nas cidades, em consequência da urbanização, causa diretamente a acentuação da demanda por recursos naturais. Assim, a partir dos anos 1950, atrelado a degradação das reservas superficiais e dos avanços no âmbito das técnicas da hidrogeologia, incentivou-se a ampliação do uso das águas subterrâneas no Brasil (ANA, 2022). Em regiões cársticas este processo fez com que áreas vulneráveis e suscetíveis às subsidências e colapsos fossem ocupadas, gerando perigo para as estruturas urbanas, bem como para as vidas humanas (CRUZ; PILÓ, 2019). Os processos de afundamentos, colapsos e subsidências em regiões de carste são agravados e acelerados por essa ocupação e uso do solo indevidos (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009).

A ocupação humana dessas áreas de carste alteram o processo hidrogeológico do local. Atividades como impermeabilização por estradas, edificações e calçamentos, faz com que ocorra a canalização sobrecarregada de água em determinados pontos no carste, aumentando sua vulnerabilidade de sustentação (FERREIRA, 2019). Além disso, áreas urbanas fortemente adensadas e impermeabilizadas possuem maiores chances de acontecimentos de enchentes e inundações, e com isso essas águas, por excesso de peso na superfície, podem colaborar com o pressionamento das possíveis cavidades do subsolo, favorecendo a ocorrência de abatimentos (CRUZ; PILÓ, 2019).

As alterações antrópicas no meio urbano influenciam diretamente na variação do nível do aquífero cárstico e, por consequência, na indução dos afundamentos dos solos e das coberturas no carste. O crescimento urbano e populacional aumenta a demanda por água para o abastecimento (FEITOSA *et al.*, 2008), sendo isso, em municípios de hidrogeologia cárstica,

um problema atrelado a ampliação da exploração de água subterrânea, gerando maior estresse associado ao aquífero e o possível rebaixamento do nível freático. Essa redução no lençol freático, pela exploração de água, está diretamente ligada aos processos de colapsos ou subsidência recorrentes nas regiões cársticas.

Segundo Gutiérrez *et al.* (2014), com o rebaixamento do nível de água em um aquífero cárstico ocorre a perda de sustentação por fluviabilidade dos sedimentos anteriormente embebidos na água. Além de aumentar a velocidade da água subterrânea, substituindo os fluxos freáticos lentos por fluxos vadosos descendentes que induzem a erosão subsuperficial (*piping*), através do novo gradiente estabelecido (GUTIÉRREZ *et al.*, 2014). Essa condição é importante especialmente quando o nível do lençol baixa além do contato entre o topo da rocha e o material de recobrimento (VENI *et al.*, 2001). Esses processos podem ser fortemente acelerados pela presença de construções e edificações sobre as áreas cársticas suscetíveis às subsidências e colapsos atrelados à exploração de água (CRUZ; PILÓ, 2019).

Além disso, a ocupação sem planejamento nessas áreas acentua os riscos de contaminação dos aquíferos cársticos, sendo associado a lançamentos de esgotos e percolação de resíduos contaminantes que podem chegar rapidamente aos lençóis subterrâneos (OLIVEIRA, 2010).

3.3. Planejamento urbano

O planejamento é essencial em todos os âmbitos da gestão urbana, bem como é fundamental para o uso consciente da água nos municípios, de maneira segura, com qualidade e visando a garantia do direito universal de acesso à água potável (DONATO, 2018). Além disso, tem-se também o planejamento associado à gestão de risco com a função de assegurar a ordem e antecipar a ocorrência de possíveis problemas na cidade (RUPPENTHAL, 2013).

3.3.1. Gestão de águas subterrâneas

A gestão das águas subterrâneas não tem tido devida importância no país, e além disso, na maioria das vezes, é delegada sob patamares inferiores aos associados às águas superficiais (HAGER *et al.*, 2002). Com uma gestão marcada por conflitos de diferentes ordens, com a urbanização e o crescimento populacional, a demanda por água vem aumentando consideravelmente e com isso houve a diminuição da disponibilidade de águas superficiais em determinadas regiões. Assim, tem-se destacado a relevância das águas subterrâneas nos municípios brasileiros, sendo a demanda variável para cada região, o que ressalta a necessidade da gestão efetiva desse recurso natural (HAGER *et al.*, 2002).

No sentido legislativo, tem-se a Lei Federal Nº 9.433, de 1997, conhecida como Lei das Águas, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos no Brasil, definindo a água como um bem de domínio público. Além de organizar o gerenciamento por bacias hidrográficas, a lei destaca a necessidade de outorga para direito de uso das águas, estabelecendo que qualquer uso que altere a qualidade, quantidade e regime das águas, sejam elas superficiais e subterrâneas, necessitam de outorga.

Segundo o Instituto Mineiro de Gestão de Águas – IGAM (2021), a outorga se define como um instrumento que certifica o direito de uso dos recursos hídricos ao usuário de maneira legal. Essa permissão se aplica tanto para águas superficiais quanto subterrâneas, sendo concedida apenas a autorização para a utilização dessas águas, não dando a propriedade desses recursos ao usuário. Por isso, a outorga de uso de água pode sofrer modificações e até ser suspensa em situações de extrema escassez e/ou descumprimento das ressalvas dadas na outorga (IGAM, 2021). Portanto, a outorga é uma ferramenta regulatória essencial para a gestão dos recursos hídricos a respeito da qualidade e quantidade das águas (MENDES, 2015), principalmente associada as águas subterrâneas, e que deve ser solicitada às instituições competentes antes mesmo de qualquer tipo de intervenção.

De acordo com a Constituição Federal, o gerenciamento e autorização quanto aos usos das águas subterrâneas são de competência dos estados. Todavia, a União fica responsável, por intermédio da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, pela permissão do direito de uso das águas quando os rios, lagos, represas e aquíferos dividem ou interpassam por dois ou mais estados, além dos que passam pela fronteira do Brasil com outros países (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018). Ainda segundo o autor, se tratando das águas subterrâneas, a ANA possui a função de realizar estudos que coletem dados e informações que incentivem uma gestão mais sustentável e integrada dos recursos hídricos.

Com relação à natureza jurídica das águas subterrâneas, a gestão sofre impasses acerca das atribuições políticas e conseqüentemente cortes orçamentários, bem como problemas associados ao não entendimento sobre o seu papel e importância dentro do contexto dos recursos hídricos, sendo administrada em segundo plano (HAGER *et al.*, 2002).

Existe no Brasil mais um fator dificultador, sendo este a utilização da água subterrânea de maneira clandestina. Essa extração, comumente realizada através de poços tubulares, necessita obrigatoriamente de registro e/ou autorização (HIRATA *et al.*, 2019), como já mencionado anteriormente. Apesar disso, muitos dos poços em funcionamento no Brasil não possuem

outorga, utilizando essas águas de forma clandestina, o que dificulta a contabilização do real número de poços no país e conseqüentemente impede uma boa gestão das águas subterrâneas (ANA, 2019).

Segundo a ANA (2019), em 2016 foram contabilizados cerca de 278 mil poços no país, porém, com base em projeções, eram indicados a existência de aproximadamente 1,2 milhão de poços na totalidade. Além disso, de acordo com o Instituto Trata Brasil (2019), 88% dos poços existentes no país são clandestinos, sendo estes desconhecidos e não considerados nas bases de dados do governo. Sendo assim, percebe-se a magnitude da irregularidade do uso das águas subterrâneas no país, em que a quantidade real de água explorada é mascarada pela clandestinidade e ainda implica na falta de dados oficiais para estudos nesse contexto (HIRATA *et al.*, 2019). Segundo Conicelli (2014), essa carência de informações técnicas, associada ao alto índice de poços clandestinos, auxilia na vulnerabilidade dos aquíferos, impossibilitando o traçado de diagnósticos e soluções eficazes para a gestão das águas subterrâneas.

A falta de planejamento quanto aos aquíferos influencia também na preservação dos mananciais subterrâneos, na qualidade das águas e na sua disponibilidade hídrica (LINS *et al.*, 2020). De acordo com Setti *et al.* (2001), é essencial o entendimento das características dos sistemas aquíferos para a implantação de uma política de gestão de águas subterrâneas realmente efetiva. Esse gerenciamento também deve considerar as demandas, os conhecimentos sobre os principais setores usuários da água, bem como o sistema de abastecimento instalado (HAGER *et al.*, 2002; AGÊNCIA PEIXE VIVO, 2012). Dessa forma, é necessário a implementação de medidas que fiscalizem o uso da água subterrânea de maneira efetiva, com o objetivo de manter os dados sempre atualizados quanto aos usuários que possuem a outorga e também visando a identificação de poços de captação irregulares (CONICELLI, 2014).

A gestão de águas subterrâneas deve acontecer de maneira sistêmica, integrada e participativa, dependendo de aspectos políticos, técnicos e sociais. Além disso, a estratégia de gerenciamento deve ponderar de forma efetiva as disponibilidades dos aquíferos, sejam quantitativos, qualitativos e também fatores associados à interação com as águas superficiais e uso e ocupação dos solos (HAGER *et al.*, 2002). Essa gestão integrada de águas surge como uma maneira de lidar com o equilíbrio entre a exploração de um recurso complexo subterrâneo, e o aumento das demandas de água e dos usuários do solo (AGÊNCIA PEIXE VIVO, 2012).

De maneira geral, o gerenciamento das águas subterrâneas nas cidades é feito de forma corretiva, ou seja, após o acontecimento dos problemas (BOLDRIN; CUTRIM, 2011). Ainda

segundo os autores, a maioria desses impasses urbanos poderiam ser evitados caso houvesse um planejamento eficaz e adequado as particularidades da localidade. A gestão urbana deve ponderar elementos associados a água, ao uso e ocupação do solo, aos vetores de expansão urbana e todos os subsistemas que integram uma cidade (TUCCI, 2008). Dessa maneira, tem-se uma grande dificuldade para executar um planejamento integrado no Brasil, decorrente da falta de capacitação e competência limitada dos municípios para o enfrentamento de adversidades tão heterogêneas e intersetoriais da gestão das cidades.

3.3.2. Gestão de risco de desastres

A gestão de risco é tida como um conjunto de atividades coordenadas que possuem o objetivo de identificar, gerenciar, controlar e monitorar um acontecimento associado a potenciais ameaças em qualquer que seja suas manifestações (BRASIL, 2018). Dessa maneira, as sociedades de todo o mundo possuem serviços públicos que visam a proteção e defesa de suas populações. Em território brasileiro, essa função é associada ao Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (Sinpdec), que possui a finalidade de garantir os direitos à vida, à saúde, à segurança, à propriedade e à incolumidade a todos os brasileiros e aos estrangeiros que residem no Brasil, em circunstâncias de desastres (MIGUEZ; GREGÓRIO; VERÓL, 2018).

Os desastres podem ser descritos como resultados de eventos adversos, naturais ou provocados e influenciados pela ação antrópica, sendo eles quantificados de acordo com os danos gerados em termos de intensidade (CASTRO, 1999). Além disso, conforme o autor, os desastres ocorrem sobre um ecossistema vulnerável, causando prejuízos humanos, materiais, ambientais, econômicos e sociais.

Já a gestão de riscos de desastres é um processo complexo, em que se objetiva a redução, previsão ou controle de riscos e danos na sociedade (FURTADO, 2012). Para que essa gestão de risco de desastres seja realizada de maneira efetiva, deve-se contar com a participação das pessoas e articulações de recursos dentro do período da normalidade, sistematizando e monitorando os riscos para que os danos sejam minimizados potencialmente caso o desastre aconteça (DEFESA CIVIL, 2022).

A avaliação de riscos de desastres se dá em três diferentes etapas: estudo das ameaças de desastres, estudo do grau de vulnerabilidade e síntese conclusiva. Seu objetivo é avaliar e definir a hierarquização dos riscos de desastres, além de identificar áreas de maior risco (MIGUEZ; GREGÓRIO; VERÓL, 2018). Esse estudo das áreas de risco permite a confecção de um banco de dados e de mapas temáticos acerca de ameaças, vulnerabilidades e riscos de desastres, que

podem ser utilizados em vários âmbitos do planejamento urbano, sendo o intuito principal deste trabalho.

O mapa de risco é a representação gráfica e escrita das condições de risco definida pelas vulnerabilidades e ameaças existentes na região (FURTADO, 2012). Além disso, segundo a Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária - FAPEU (2020), os mapas de riscos podem ter como características a probabilidade espacial e temporal, a tipologia do fenômeno, a exposição e vulnerabilidade dos elementos sobre risco. Dessa maneira, os mapas de riscos são de extrema importância no contexto do gerenciamento de riscos, tendo o objetivo de auxiliar na identificação de áreas com risco iminente, delimitar áreas seguras e espacializar a evolução do risco ao longo do tempo, por exemplo (FERREIRA; ALBINO; FREITAS, 2017). Por fim, temos as atividades de redução de riscos de desastres, que visam a minimização da magnitude das ameaças, bem como a mitigação da vulnerabilidade dos cenários e das áreas de risco (MIGUEZ; GREGÓRIO; VERÓL, 2018). Sendo assim, ainda segundo os autores, em ambos os casos se tem medidas preventivas estruturais e não-estruturais. Entre as ações não estruturais, pode-se destacar o planejamento da ocupação e da utilização dos territórios, ponderando efetivamente as áreas de risco, o que também está diretamente ligado à elaboração dos mapas de riscos.

4. Materiais e métodos

4.1. Banco de dados

A avaliação da suscetibilidade cárstico-geotécnica foi realizada a partir do método proposto por Galvão *et al.* (2015). O método consiste na ponderação de fatores geológicos e hidrogeológicos que influenciam na ocorrência de eventos geotécnicos associados às áreas cársticas, podendo favorecer o acontecimento de colapsos e subsidências do solo, com o objetivo de subdividir a área de estudo em diferentes níveis de risco. A delimitação da área da sub-bacia analisada, sendo esta de cerca de 146 km², foi realizada por Pereira (2022) levando em consideração as regiões de contato da Formação Sete Lagoas com o Complexo Belo Horizonte, os divisores de sub-bacias hidrográficas locais e os cursos d'água, além de considerar a potencial continuidade do fluxo de água subterrânea.

Para este estudo utilizou-se como ferramenta principal o software QGIS em sua versão 3.16.14. Foi utilizado também o mapa geológico proposto por Schuch (2022) como condicionante geológico, e os mapas potenciométricos regressivos desenvolvidos por Pereira (2022) através de modelagens numéricas como fatores hidrogeológicos influenciadores.

Se tratando do mapa de risco geológico, os fatores considerados no índice baseiam-se nas litologias presentes na região analisada, em que cada categoria dessas litologias recebeu valores numéricos correspondentes ao risco associado a elas. Sendo os locais onde se apresentam afloramentos de calcário e calcários cobertos por sedimentos inconsolidados os de maiores riscos, recebendo um valor de risco 5. Tomando como base a localização dos calcários aflorados e cobertos apenas por sedimentos, realizou-se um buffer de 500 metros de distância, sendo esse definido como uma possível zona de influência a partir de um determinado raio, que caracteriza regiões de calcário coberto por rochas competentes. Com isso, as localidades identificadas dentro dessas áreas foram categorizadas com valor de risco 3. Fora dos limites do buffer gerado associou-se valor de risco 1, sendo característico dos locais onde se tem a presença da Formação Serra de Santa Helena. Por fim, no caso dos afloramentos do embasamento, foi atribuído um valor de risco de 0 (zero), uma vez que não ocorrem processos de carstificação nessas rochas. Ressalta-se que essa categorização geológica se mantém para todos os anos em análise nesse estudo, sendo esses fatores imutáveis em um curto espaço de tempo geológico. A escala de valores referentes ao risco geológico é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz de apresentação da escala de valores para o risco geológico.

Embasamento litológico	Calcário coberto por rochas competentes		Calcário (afloramentos ou mantos)
	>500m	<500m	
0	1	3	5

Fonte: a autora, 2023.

Já os elementos de risco hidrogeológico fundamentam-se na variação do nível de água decorrente do uso da água subterrânea, o que faz com que o mapa de predisposição em questão se modifique com o passar do tempo. A extração de água subterrânea na área de estudo é suficiente para gerar uma zona de captura (ZC), sendo essa caracterizada por ser uma área em superfície que tem correspondência com a área influenciada pela captação das águas subterrâneas (FEITOSA *et al.*, 2008). Fatores como taxa de retirada, localizações de poços e dimensões da ZC foram avaliados. Para a delimitação dessa ZC ponderou-se os mapas potenciométricos e as linhas de fluxo geradas através da interpolação de dados referentes a localização dos poços e suas respectivas cargas hidráulicas. Sendo feito um ajuste manual no software CorelDRAW, após realizada a interpolação matemática das informações através do método de krigagem no software Surfer, em sua 13ª versão, visando uma interpretação mais realista da superfície potenciométrica associada à cada ano analisado. Com isso, definiu-se cada ZC com base nos direcionamentos e desvios observados nas linhas de fluxos e equipotenciais geradas nos mapas potenciométricos.

Dentro dessa ZC, atribuiu-se áreas de risco correspondentes à magnitude do rebaixamento do nível de água. Com isso, áreas dentro da ZC e com cargas hidráulicas menores que 720 metros, correspondem ao maior peso, sendo este 5. Entre 720 e 740 metros, o valor de risco adotado foi 3. Entre 741 e 760 metros, o valor correspondente foi 2, enquanto para elevações de níveis maiores que 760 metros, o valor foi 1. Em áreas fora da ZC, o valor de risco foi 0 (zero), correspondendo a nenhum fator de risco hidrológico significativo. Esses valores referentes ao risco hidrogeológico são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz de apresentação da escala de valores para o risco hidrogeológico.

	Elevação do lençol freático	Valor
Fora da zona de captura (ZC)	Não se aplica	0
	>760	1

Dentro da zona de captura (ZC)	741-760	2
	720-740	3
	<720	5

Fonte: a autora, 2023.

4.2. Suscetibilidade cárstico geotécnica

Após as reclassificações serem feitas, tanto para a categorização do risco geológico quanto para o risco hidrogeológico, somou-se e sobrepôs-se os mapas de fatores de risco raster geológico e hidrogeológico, por meio da ferramenta calculadora raster presente no QGis, obtendo um mapa de suscetibilidade cárstico-geotécnica para cada ano analisado (1940, 1960, 1980, 2000 e 2020) na área de estudo. Esse método é demonstrado na Figura 15. E o fluxograma que exemplifica essa metodologia, bem como as principais ferramentas utilizadas é apresentado na Figura 16.

O somatório resultou em valores de risco cárstico-geotécnico que variaram de zero a dez, sendo necessária a recodificação em uma nova escala de risco, em que valores de 8 a 10 foram considerados como “alto risco”, de 5 a 7 relativos ao “risco considerável”, 3 a 4 associados ao “risco moderado”, 1 a 2 consideradas áreas de “baixo risco” e valor 0 (zero) como “risco desprezível”.

Além disso, visando ponderar o fator de planejamento urbano na cidade, realizou-se a análise da evolução da mancha urbana ao longo do tempo considerado nesse estudo, comparando-a com o desenvolvimento do risco cárstico geotécnico. Utilizou-se como base para a elaboração desses mapas imagens de satélite disponíveis no *Google Earth* referentes ao fim de cada década observada, e com isso fez-se o desenho manual via QGis do espraiamento urbano no decorrer do tempo.

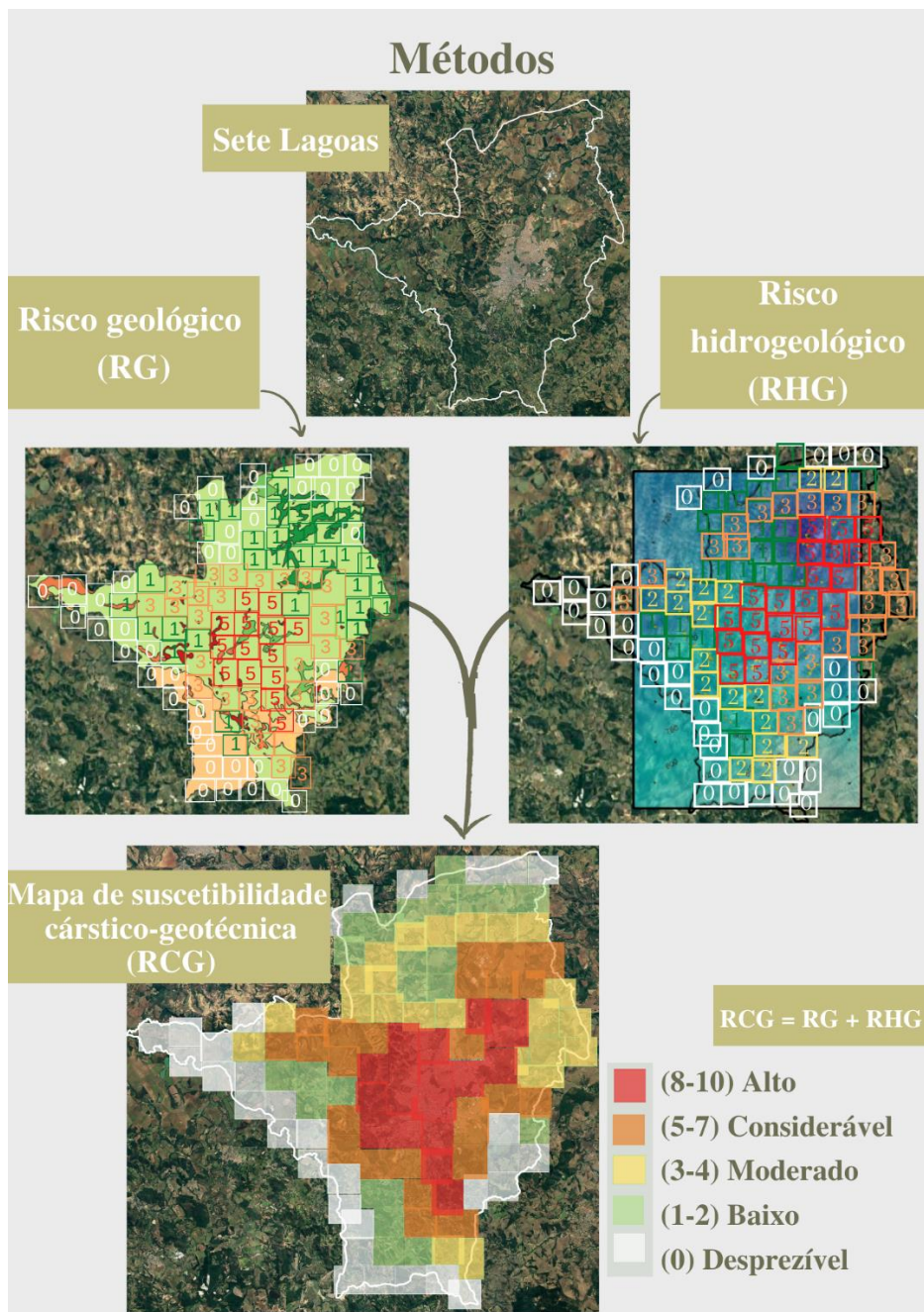


Figura 15 – Método utilizado para a elaboração dos mapas de suscetibilidade cárstico-geotécnica.
 Fonte: a autora, 2023.

Metodologia

Elaboração de mapa de suscetibilidade cárstico geotécnica

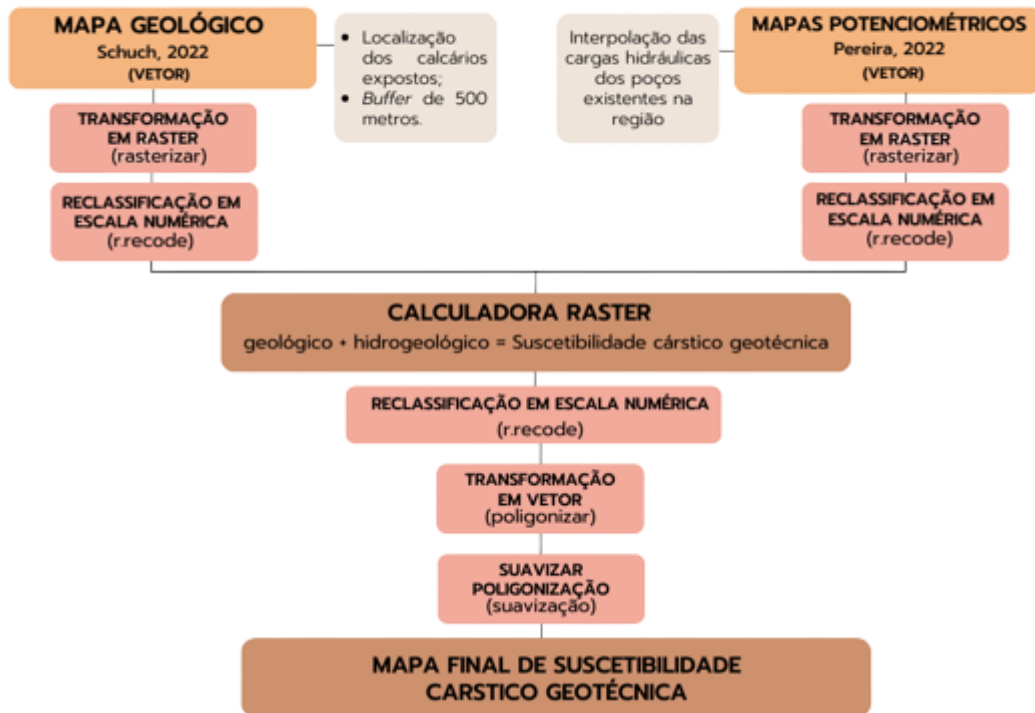


Figura 16 – Metodologia e ferramentas utilizadas para a elaboração dos mapas de suscetibilidade cárstico-geotécnica.

Fonte: a autora, 2023.

5. Resultados

5.1. Risco geológico

No contexto do risco geológico associado à área de estudo, teve-se presente quatro diferentes categorias de coberturas superficiais (Figura 17). A região de maior risco geológico, caracterizada pela presença dos calcários aflorantes e cobertos por sedimentos, corresponde à aproximadamente 30,46 km², o que diz respeito à cerca de 20,87% da área analisada. Se tratando do risco geológico de categoria 3, associado aos calcários cobertos por rochas competentes em um raio de influência de 500 metros do maior risco, tem-se perto de 45,64% (66,62 km²) da área de estudo. Referente ao risco geológico 1, locais onde se encontra a Formação Serra de Santa Helena sobrepondo os calcários, tem-se aproximadamente 28,25% da área de estudo, cerca de 41,24 km². Por fim, apresenta-se o embasamento aflorante em cerca de 7,64 km², ou seja, 5,23% da região analisada. A representação das áreas de risco geológico calculadas, bem como suas respectivas porcentagens da área de estudo, é demonstrada na Tabela 4.

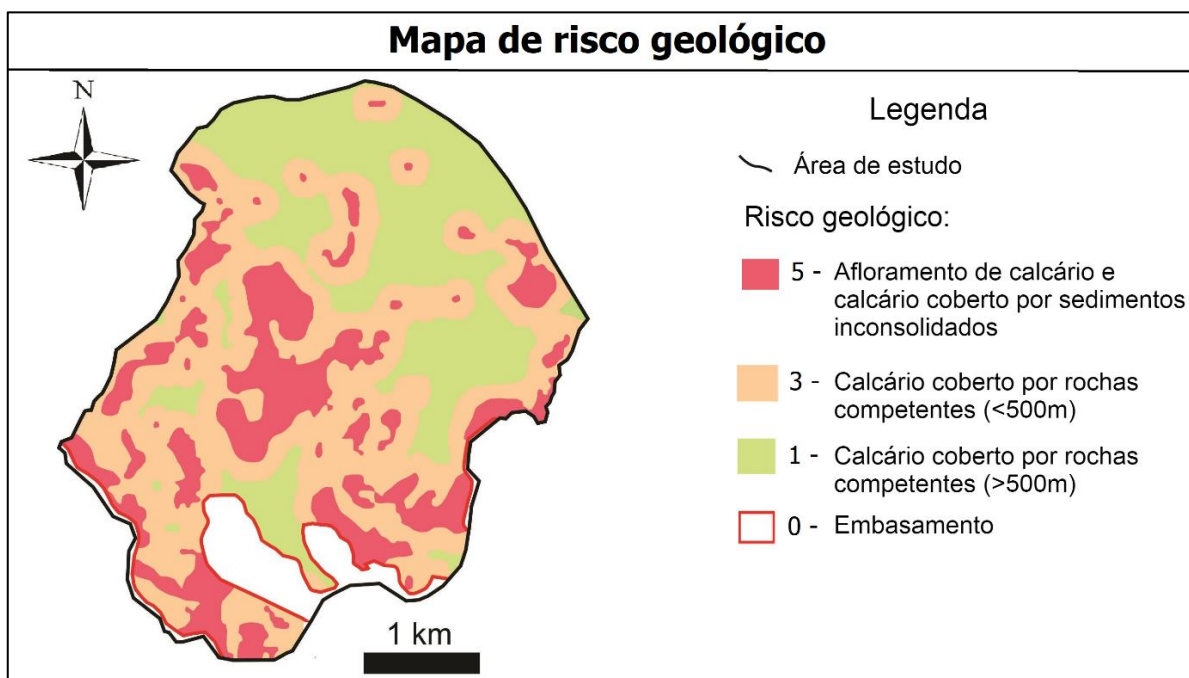


Figura 17 – Risco geológico da área de estudo.

Fonte: a autora, 2023

Tabela 4 – Representação das áreas de risco geológico e porcentagens da área de estudo.

Categoria de risco geológico	Área (km ²)	Porcentagem da área de estudo (%)
5	30,46	20,87
3	66,62	45,64
1	41,24	28,25

0	7,64	5,23
---	------	------

Fonte: a autora, 2023.

5.2. Risco hidrogeológico

Com a elaboração dos mapas de risco hidrogeológico (Figura 18) pode-se observar que, apesar do fluxo regional se manter de sudoeste para nordeste, com o passar dos anos parte das linhas de fluxo vão se redirecionando para o local onde existe uma concentração de poços tubulares. Na parte central da área de estudo houve um rebaixamento de nível de água de 40 metros, saindo de uma carga hidráulica de 760 metros em 1940 para 720 metros em 2020.

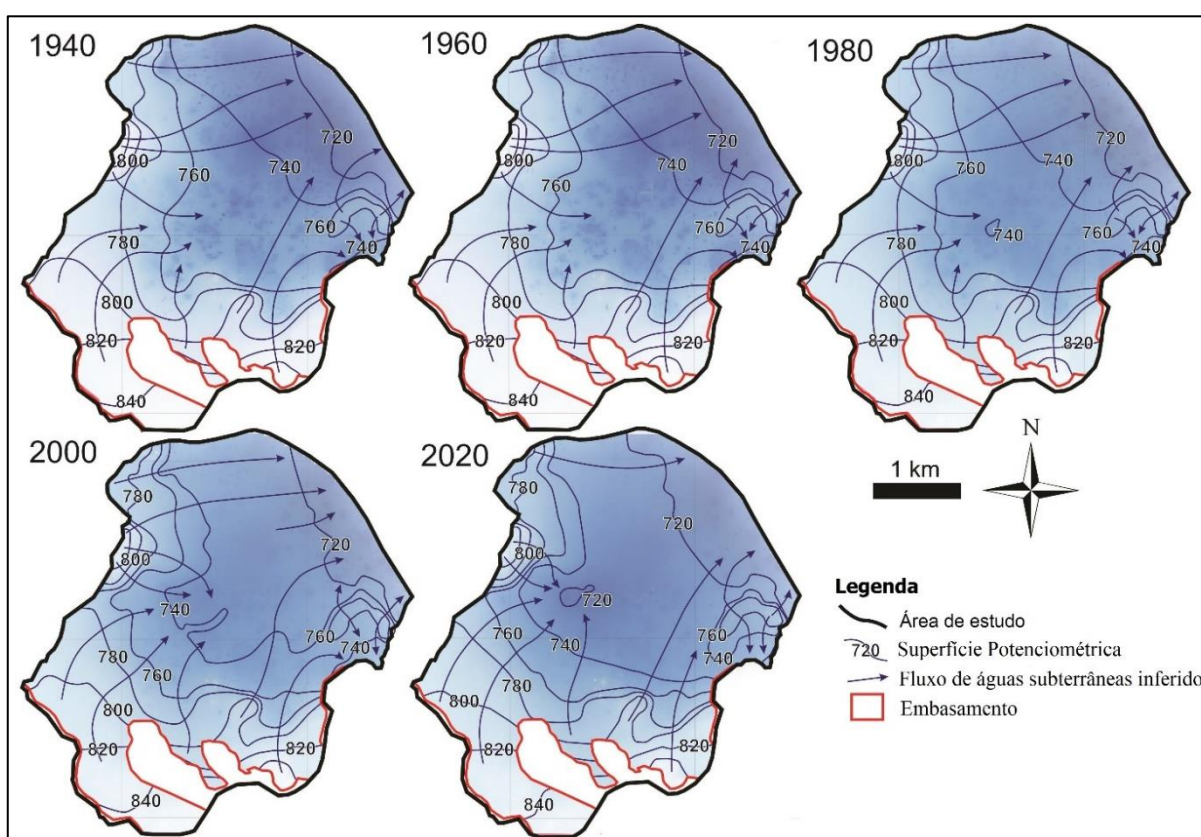


Figura 18 – Mapas potenciométricos da área de estudo para cada ano analisado.

Fonte: a autora, 2023.

Com relação à ZC, é possível mensurar sua evolução espacial. Para o ano de 1940 não se identificou ZC, sendo que não foi detectada presença considerável de poços tubulares capazes de alterar as cargas hidráulicas e redirecionar as linhas de fluxo de forma significativa. Em 1960 identificou-se uma ZC de aproximadamente 29,55 km², correspondente à aproximadamente 20,25% da área modelada (Tabela 5) e com riscos hidrogeológicos moderado (2) e baixo (1). Já em 1980 tem-se o aparecimento de uma área associada ao risco considerável (3), sendo a ZC de cerca de 29,86 km², o que equivale a 20,47% da área de estudo. Em 2000, definiu-se uma ZC de 40,07 km², correlacionado à 27,47% da área total analisada e ainda com a permanência

de apenas riscos hidrogeológicos baixo, moderado e considerável. Por fim, em 2020, tem-se o surgimento do alto risco hidrogeológico (5), correspondente aos mais baixos níveis de água subterrânea. Além disso, neste ano delimitou-se uma ZC em torno de 42,17 km², o que diz respeito a cerca de 28,91% da área total. A evolução do risco hidrogeológico ao longo do tempo é demonstrada na Figura 19.

Tabela 5 – Representação das áreas de risco hidrogeológico e porcentagens da área de estudo.

Ano	Área de ZC (km ²)	Porcentagem da área de estudo (%)
1940	-	0
1960	29,55	20,25
1980	29,86	20,47
2000	40,07	27,47
2020	42,17	28,91

Fonte: a autora, 2023.

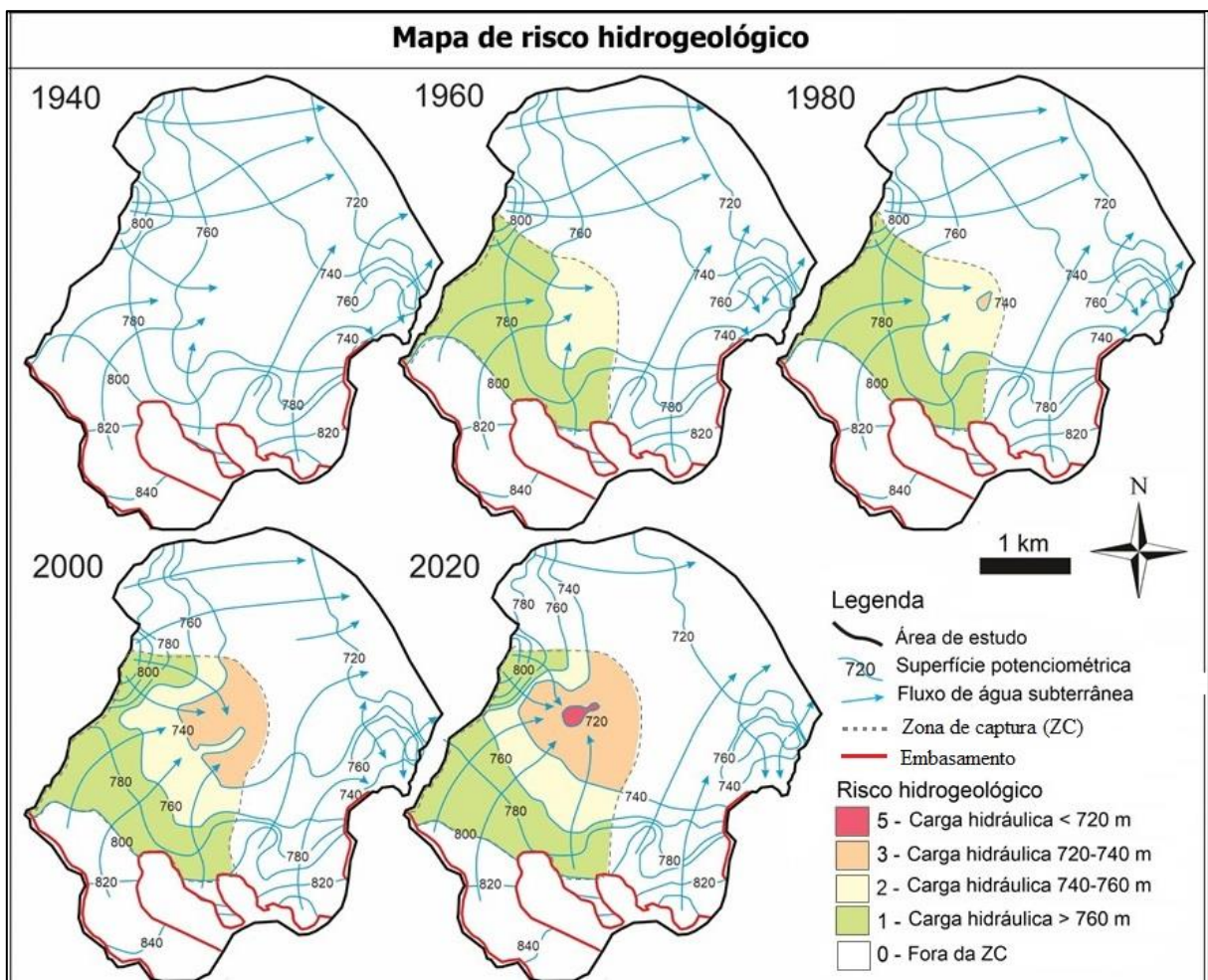


Figura 19 – Evolução do risco hidrogeológico na área de estudo para cada ano analisado.

Fonte: a autora, 2023.

Pode-se perceber a expansão da área associada ao risco considerável (3) a partir de 1980, bem como o aparecimento de uma região de alto risco (5) somente em 2020. Em contrapartida, a

área atrelada ao risco moderado (2) apresenta crescimento entre os anos de 1960 e 2000, porém de 2000 a 2020 existe um decréscimo dessa área. Já a área de baixo risco hidrogeológico (1) apresenta redução ao longo de todos os anos analisados. Essas informações são demonstradas de maneira numérica na Tabela 6.

Tabela 6 – Evolução do risco hidrogeológico na zona de captura.

Categoria de risco hidrogeológico		Área dentro da ZC (km ²)				
		1940	1960	1980	2000	2020
Baixo	1	-	21,81	21,09	20,59	19,38
Moderado	2	-	7,74	8,56	11,55	9,71
Considerável	3	-	-	0,21	7,93	12,53
Alto	5	-	-	-	-	0,56

Fonte: a autora, 2023.

5.3. Suscetibilidade cárstico geotécnica

Para a execução dos mapas de suscetibilidade cárstico geotécnica, considerou-se a junção do risco geológico e hidrogeológico relativo a cada ano estudado demonstrados anteriormente. Como dito previamente (vide materiais e métodos), o mapa de risco se subdivide em cinco diferentes categorias. O risco considerado desprezível (0) está sempre atrelado à região referente ao embasamento litológico, sendo essa área de aproximadamente 7,43 km² em todos os anos, o que corresponde à cerca de 5% da área modelada. As demais categorias são resultado da soma dos riscos analisados, sendo elas: baixo (1-2), moderado (3-4), considerável (4-7) e alto (8-10).

Para o ano de 1940, apresenta-se quatro diferentes categorias de risco cárstico geotécnico, indo de desprezível à considerável. O baixo risco estava presente em torno de 40,78 km² (27,96%), enquanto 65,77 km² (45,08%) de área apresentava moderado risco cárstico geotécnico e 30,02 km² (20,58%) indicava risco considerável. Em 1960, ainda há quatro classes de risco, sendo o risco baixo associado à 41,37 km² (28,36%) da área de estudo, ao passo que 64,31 km² (44,08%) da região indicava risco moderado e 32,40 km² (22,21%) era relativo ao risco cárstico geotécnico considerável.

Em 1980, tem-se o aparecimento do alto risco cárstico geotécnico em cerca de 0,21 km² (0,14%) da região estudada, mantendo o aparecimento das demais categorias. Sendo que 41,01 km² (28,11%) da área modelada apresentava baixo risco, já em 63,14 km² (43,28%) da área era indicado risco moderado, enquanto 32,90 km² (22,55%) do território analisado mostrou valores

de risco considerável. No ano de 2000 houve um crescimento na região de alto risco cárstico geotécnico, sendo esta de aproximadamente 3,78 km², o que corresponde à 2,59% da área total. Ainda neste ano houve a presença do baixo risco em 39,70 km² (27,21%) da região, enquanto 58,53 km² (40,12%) apresentou risco moderado, e por fim, a indicação de risco considerável se deu em cerca de 35,23 km² (24,15%) da área modelada.

Em 2020, aumentou-se a proporção de área considerada de alto risco, sendo de 6,07 km² (4,16%). Para o baixo risco cárstico geotécnico tem-se uma área em torno de 39,47 km² (27,06%) e se tratando do risco moderado apresentou-se uma área de 56,63 km² (38,82%), enquanto uma região de 35,10 km² (24,06%) indicou risco considerável. O mapa que apresenta essa evolução, bem como a comparação numérica, é apresentado na Figura 20 e Tabela 7.

Se tratando exclusivamente do alto risco cárstico geotécnico, observou-se que nos últimos 20 anos de análise tem-se que a área associada a esse risco aproximadamente dobrou de dimensão. Além disso, tem-se que desde seu aparecimento em 1980 houve um crescimento de aproximadamente 2800% na área atrelada a esse risco até o ano de 2020.

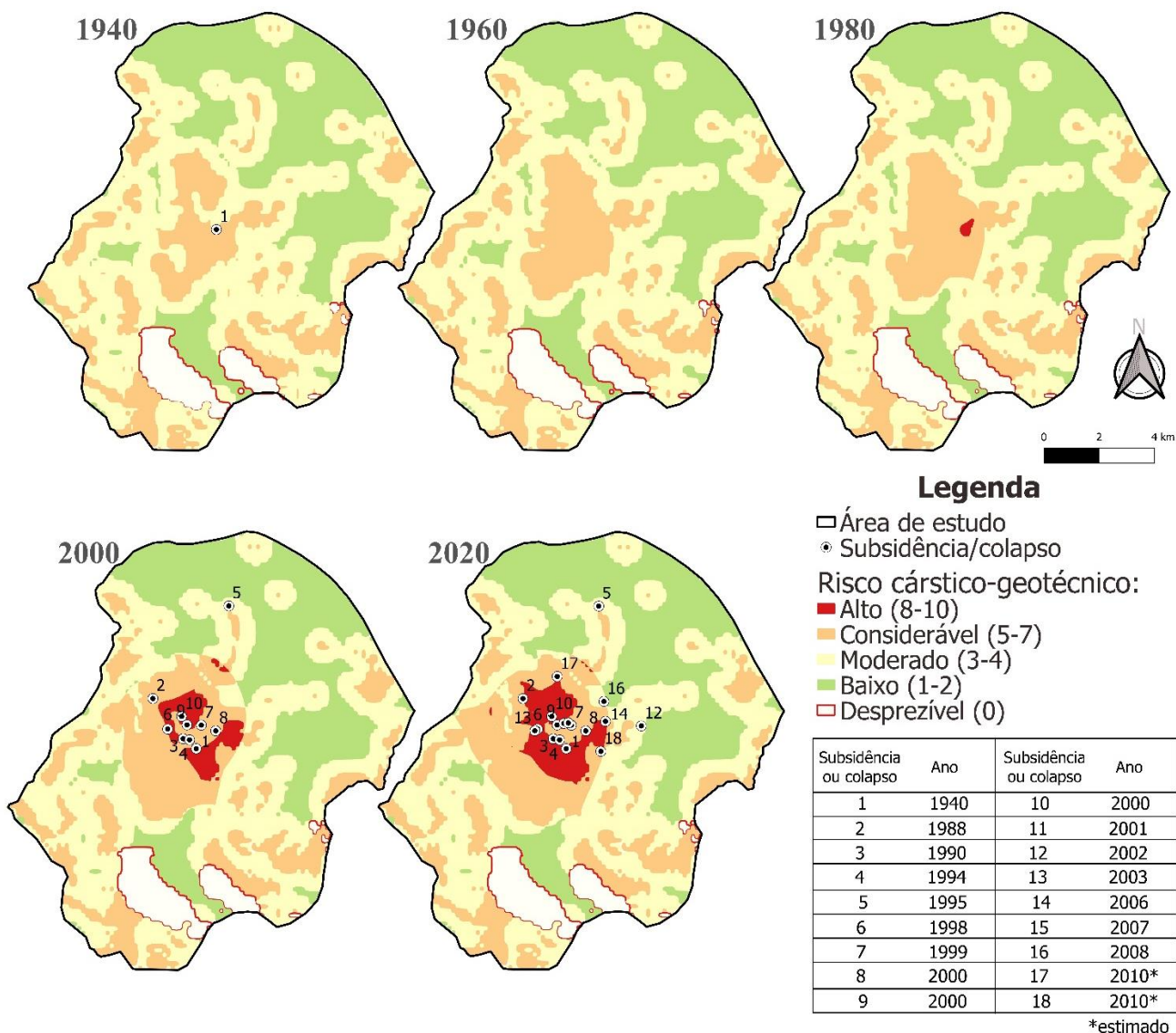


Figura 20 – Evolução da suscetibilidade cárstico geotécnica na área de estudo para cada ano analisado e localização das subsidências e colapsos ocorridos ao longo do tempo.

Fonte: a autora, 2023

Tabela 7 – Evolução da suscetibilidade cárstico geotécnica na área de estudo.

Categoria de risco cárstico geotécnico		Área (km ²)				
		1940	1960	1980	2000	2020
Desprezível	0	7,38	7,40	7,47	7,47	7,44
Baixo	1-2	40,78	41,37	41,01	39,70	39,47
Moderado	3-4	65,77	64,31	63,14	58,53	56,63
Considerável	5-7	30,02	32,40	32,90	35,23	35,10
Alto	8-10	-	-	0,21	3,78	6,07

Fonte: a autora, 2023.

O primeiro evento de subsidência/colapso foi catalogado por volta de 1940, sendo este localizado na região com risco cárstico-geotécnico considerável para a década. Outros 9 eventos aconteceram entre 1980 e 2000, totalizando 10 ocorrências até essa data. Desses processos de

subsidiência/colapso, 5 deles se localizavam em região de alto risco no mapa da década de 2000, o que corresponde à 50% dos abatimentos acontecidos (Figura 21). Outras 4 ocorrências (40%) são apresentadas em uma área classificada com risco considerável, enquanto 1 (10%) delas se localiza em região de moderado risco cárstico geotécnico.

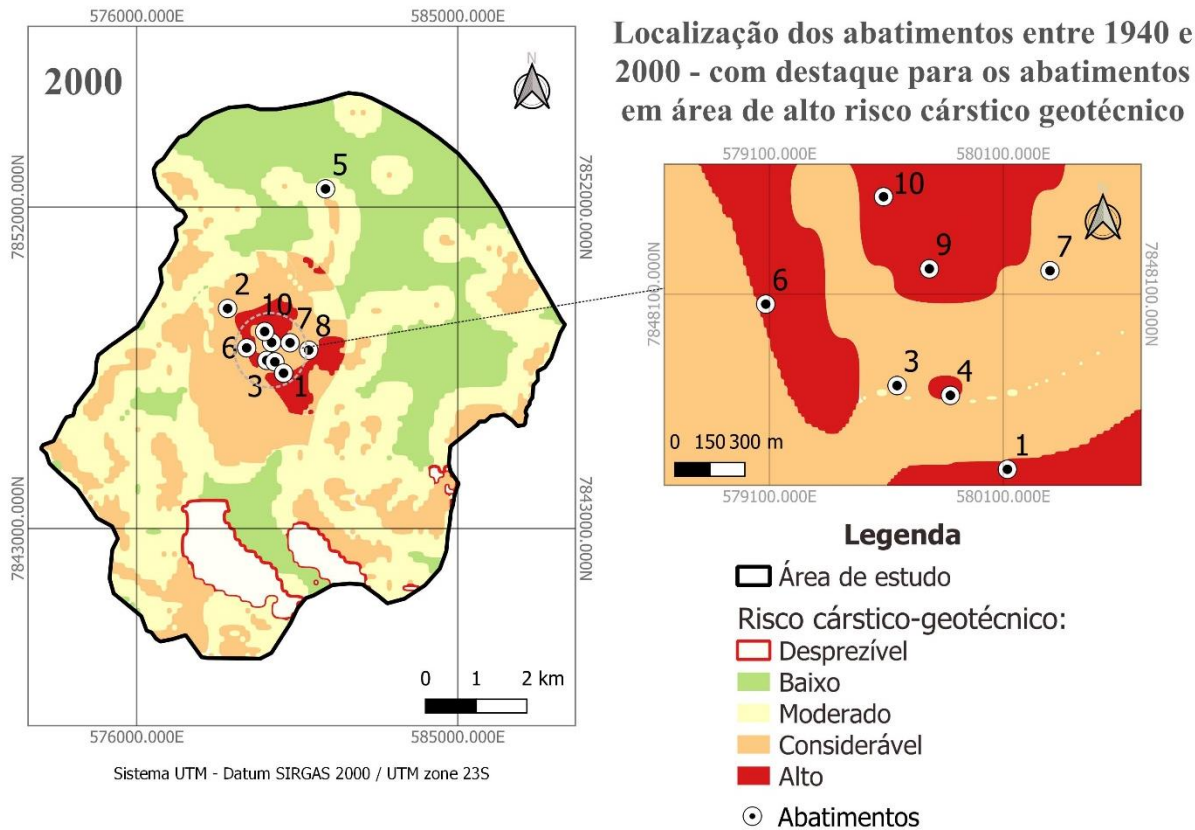


Figura 21 – Localização dos abatimentos entre 1940 e 2000, com destaque para localização de abatimentos na zona de alto risco.

Fonte: a autora, 2023.

Já nos últimos 20 anos de análise, tem-se mais 8 abatimentos na região de estudo, totalizando 18 eventos. Desse total, 9 acontecimentos estão na área de risco cárstico geotécnico alto (Figura 22), o que corresponde à 50% dos abatimentos ocorridos. Além disso, 6 abatimentos (33,33%) estão situados na área de risco considerável, bem como 3 (16,66%) deles em área de moderado risco.

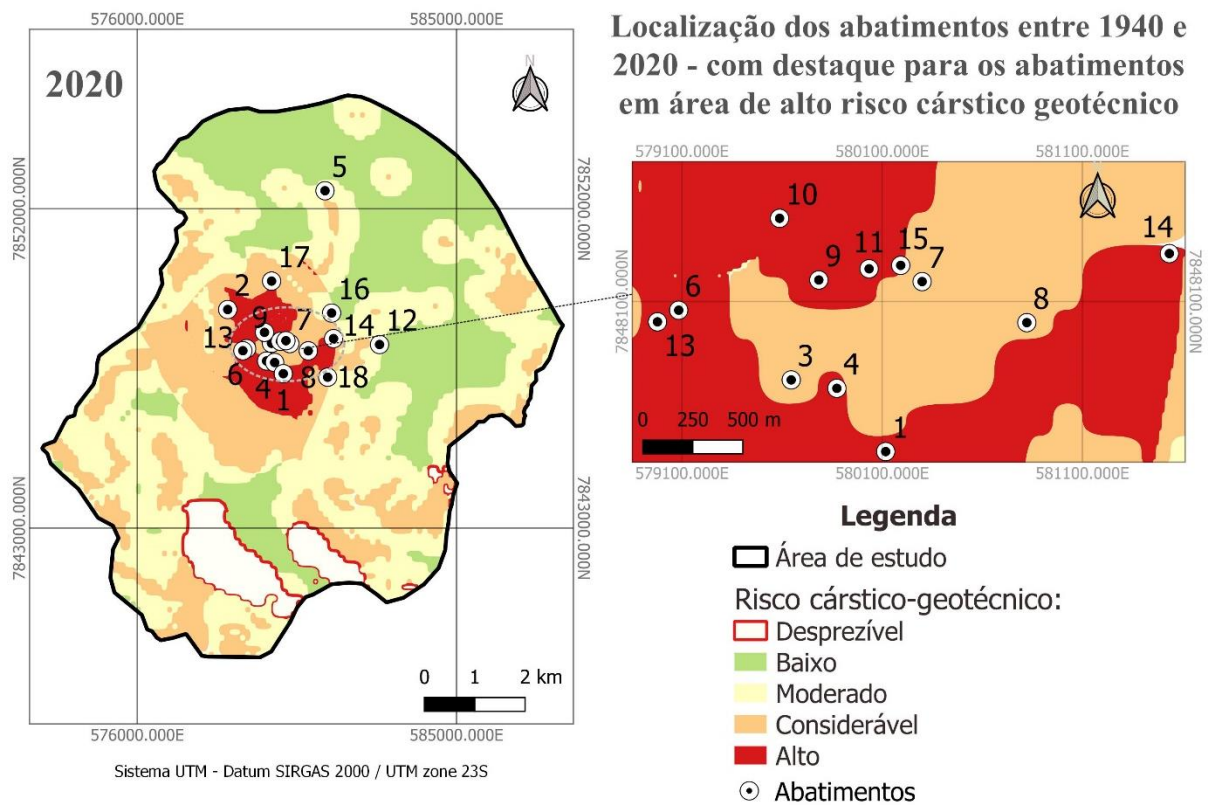


Figura 22 – Localização dos abatimentos entre 1940 e 2020, com destaque para localização de abatimentos na zona de alto risco. Fonte: a autora, 2023.

5.4. Evolução da mancha urbana

Com o desenvolvimento dos mapas de evolução da mancha urbana ao longo dos anos, foi possível realizar a comparação com as áreas de suscetibilidade cárstico geotécnica geradas nesse estudo (Figura 23). É possível observar que em 1940 existia uma área urbanizada de aproximadamente 7,01 km², correspondente à 4,81% da área modelada nesse estudo. Em 1960, essa área apresentou crescimento e já chegava a 20,49 km² (14,04%), enquanto em 1980 a mancha urbana era de 37,03 km² (25,37%). Em 2000, a área urbanizada caracterizava cerca de 49,64 km² (34,02%) e no tempo mais recente analisado, sendo o ano de 2020, tem-se uma mancha urbana de 67,17 km² que condiz com 46,02% da área de estudo. Portanto, pode-se afirmar que no decorrer de 80 anos, de 1940 a 2020, houve um crescimento na área urbanizada de cerca de 857%. Esses resultados podem ser observados na Tabela 8.

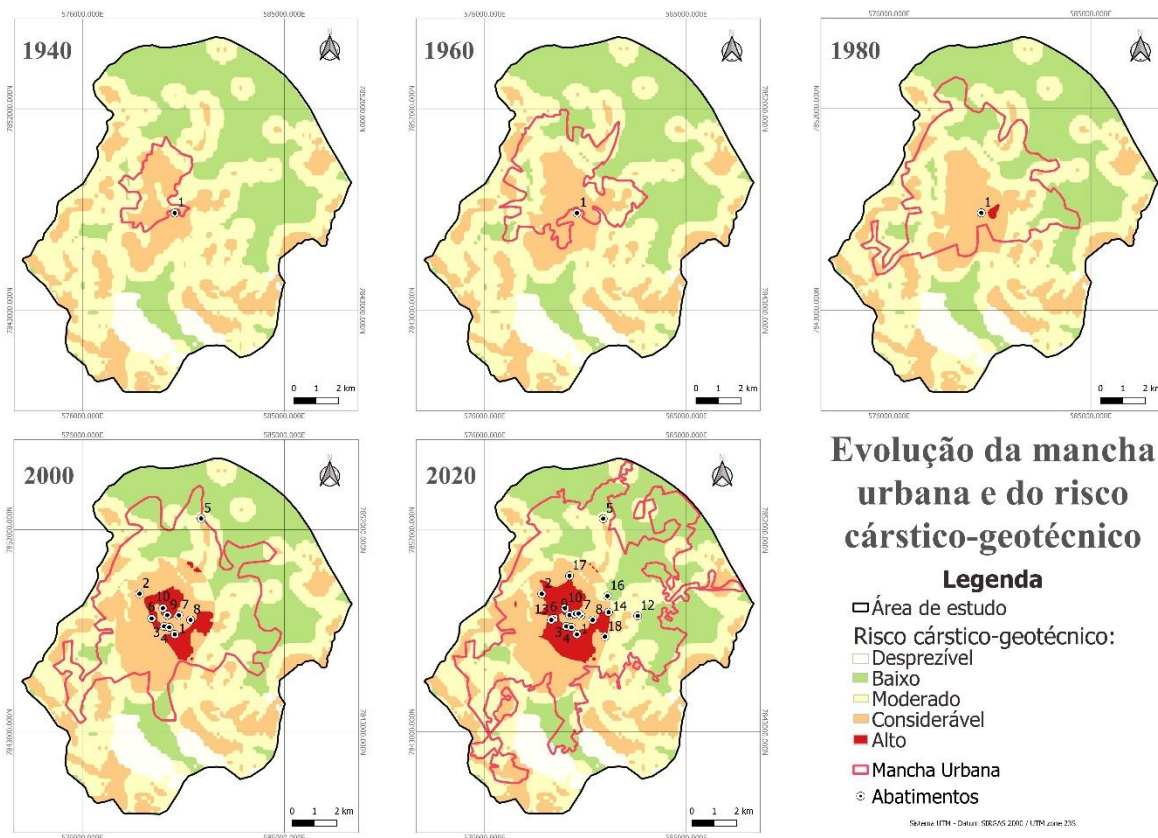


Figura 23 – Evolução da mancha urbana entre 1940 e 2020 e comparação com suscetibilidade cárstico-geotécnica.

Fonte: a autora, 2023.

Tabela 8 – Representação da evolução da mancha urbana e porcentagens da área de estudo.

Ano	Área da mancha urbana (km ²)	Porcentagem da área de estudo (%)
1940	7,01	4,81
1960	20,49	14,04
1980	37,03	25,37
2000	49,64	34,02
2020	67,17	46,02

Fonte: a autora, 2023.

De acordo com a Figura 23, é possível observar que em 1940 a mancha urbana abrange apenas três categorias de risco cárstico geotécnico, sendo o baixo risco presente em aproximadamente 2,03% da mancha urbana, enquanto 35,07% da área urbanizada é composta pelo risco moderado, já a maior parcela da mancha urbana dessa década é caracterizada pelo risco considerável sendo presente em 62,89% da região. Em 1960, ainda se tem a abrangência de três diferentes categorias de risco, 9,79% da mancha urbana era composta pelo risco cárstico geotécnico baixo, enquanto cerca de 48,55% da área era caracterizada pelo risco moderado, por fim 41,65% da área urbanizada indicava risco considerável.

O aparecimento do alto risco cárstico geotécnico se dá em 1980, sendo esse risco característico de 0,55% da mancha urbana deste ano. O baixo risco era indicado em cerca de 20,19% da área urbanizada, enquanto 45,17% apresentava risco moderado e 34,08% indicava risco cárstico considerável. Em 2000, tem-se o aumento da área atrelada ao alto risco cárstico geotécnico, passando a caracterizar cerca de 7,61% da mancha urbana. O baixo risco era apresentado em 22,28% da área urbanizada, enquanto 36,44% era caracterizado pelo risco moderado e 33,62% da mancha era composta pelo risco considerável. Na última década analisada tem-se que 9,03% da mancha urbana apresentava alto risco cárstico geotécnico. Enquanto 0,17% da área apresentava risco desprezível, 27,77% da mancha urbana era composta pelo risco baixo, 34,81% da área era caracterizada pelo risco moderado e 28,17% indicava considerável risco cárstico geotécnico. Essa evolução é demonstrada na Tabela 9.

Tabela 9 – Representação da evolução da suscetibilidade cárstico geotécnica na mancha urbana e porcentagens.

Risco cárstico geotécnico	Área				
	1940	1960	1980	2000	2020
Desprezível	-	-	-	-	0,12 km ² (0,17%)
Baixo	0,14 km ² (2,03%)	2,01 km ² (9,80%)	7,48 km ² (20,65%)	11,06 km ² (22,28%)	18,66 km ² (27,77%)
Moderado	2,46 km ² (35,08%)	9,95 km ² (48,55%)	16,73 km ² (45,17%)	18,09 km ² (36,44%)	23,38 km ² (34,81%)
Considerável	4,41 km ² (62,89%)	8,53 km ² (41,65%)	12,62 km ² (34,08%)	16,70 km ² (33,63%)	18,93 km ² (28,18%)
Alto	-	-	0,21 km ² (0,55%)	3,78 km ² (7,60%)	6,07 km ² (9,03%)

Fonte: a autora, 2023.

6. Discussão

6.1. Risco geológico

No âmbito do risco geológico, percebeu-se a ligação direta desse risco com o tipo de rocha presente em cada localidade da área de estudo. Observa-se que a maior porcentagem da região modelada (66,62%) é caracterizada pelo risco 3, sendo esta área identificada pela presença de calcários cobertos por rochas competentes. Além disso, constatou-se que a concentração das zonas de alto risco geológico e risco considerável se dá principalmente na região central da área de estudo. Baseando-se nisso, tem-se que essa região central é a mais propícia ao acontecimento da carstificação, dado que os sedimentos que estão diretamente sobrepostos aos calcários facilitam a infiltração e acidificação das águas meteóricas através do ácido húmico adquirido durante sua percolação (Galvão *et al.*, 2015; MAGNABOSCO, 2020). Esse processo resulta na formação de condutos espessos e cavernas na região (MAGNABOSCO, 2020).

A categoria de risco geológico 1 está diretamente associada as localidades onde se tem a presença da Formação Serra de Santa Helena. Essa formação pode ser considerada hidrogeologicamente como um aquitardo (ASSUNÇÃO, 2019; SCHUCH, 2022), tendo característica semipermeável e não permitindo a efetiva infiltração das águas acidificadas como no caso anterior, e assim, pode ser considerada uma região de baixo risco geológico. As áreas consideradas com risco 0 (zero) são características do afloramento do embasamento, sendo que não acontecem carstificação nessas rochas, não influenciando no risco cárstico geotécnico final.

6.2. Risco hidrogeológico

Se tratando da hidrogeologia, percebeu-se pelos mapas potenciométricos que ao longo dos anos o fluxo subterrâneo está sofrendo desvios para onde tem-se maior concentração de poços. Pode-se visualizar que no decorrer dos 80 anos analisados, houve um rebaixamento de cerca de 40 metros no nível de água subterrânea nesta região, proveniente da sobreposição de vários cones de rebaixamento, estando este fato diretamente atrelado ao aumento do bombeamento das águas subterrâneas, principalmente para abastecimento. Consequentemente, a zona de captura vai se tornando cada vez maior e mais influente na região, aumentando o risco hidrogeológico, o que leva ao aumento direto do risco cárstico geotécnico final, dado que o risco geológico não se altera de maneira considerável na escala de tempo analisada pelo estudo.

Os mapas da evolução do risco hidrogeológico indicam que para a categoria de baixo risco (1) existe uma redução de área no decorrer de todos os anos analisados. Porém, essa redução não

está associada com o desaparecimento do risco e sim com a evolução do mesmo para uma categoria mais alta (moderado, considerável e alto) ao longo do período estudado. Para o risco denominado moderado, tem-se o aumento da região associada a ele desde seu aparecimento, em 1960, até 2000. Nos últimos 20 anos da análise ocorre a diminuição dessa área de risco moderado devido ao fato de que, em 2020, acontece o primeiro aparecimento de uma zona de alto risco hidrogeológico, o que reforça a premissa de que o risco moderado não desaparece/diminui realmente, apenas eleva seu patamar para outra categoria de maior valor.

A primeira aparição de uma área com risco considerável se dá em 1980 e a partir daí apresenta crescimento em todos os anos analisados. Como já dito, somente em 2020 há a indicação de uma região com alto risco hidrogeológico, o que está diretamente ligado ao rebaixamento do nível de águas subterrâneas na região e ao aumento da exploração na cidade ao longo do tempo, gerando a sobreposição e acentuação dos cones de rebaixamento. Segundo Schuch (2022), na última década a exploração anual de $7,39 \times 10^7$ m³ excedeu a recarga máxima do aquífero ($7,24 \times 10^7$ m³/ano).

6.3. Suscetibilidade cárstico geotécnica e evolução da mancha urbana

O risco final da análise feita foi denominado suscetibilidade cárstico geotécnica e, com isso pode-se observar que o primeiro aparecimento de alto risco se deu em 1980, mesmo ano em que ocorre o aparecimento do risco hidrogeológico considerável, localizado aproximadamente na mesma área. Isso corrobora a afirmação da alta influência do risco hidrogeológico sobre o risco cárstico geotécnico, dado que o risco geológico é praticamente imutável nesse espaço de tempo. Também pode-se perceber que o abatimento de grande dimensão de 1988, do qual tem-se as características exatas, como diâmetro e raio de influência, aconteceu após o aparecimento do alto risco cárstico geotécnico na região de estudo. A variação dessas áreas de risco por categoria é apresentada de forma gráfica na Figura 24.

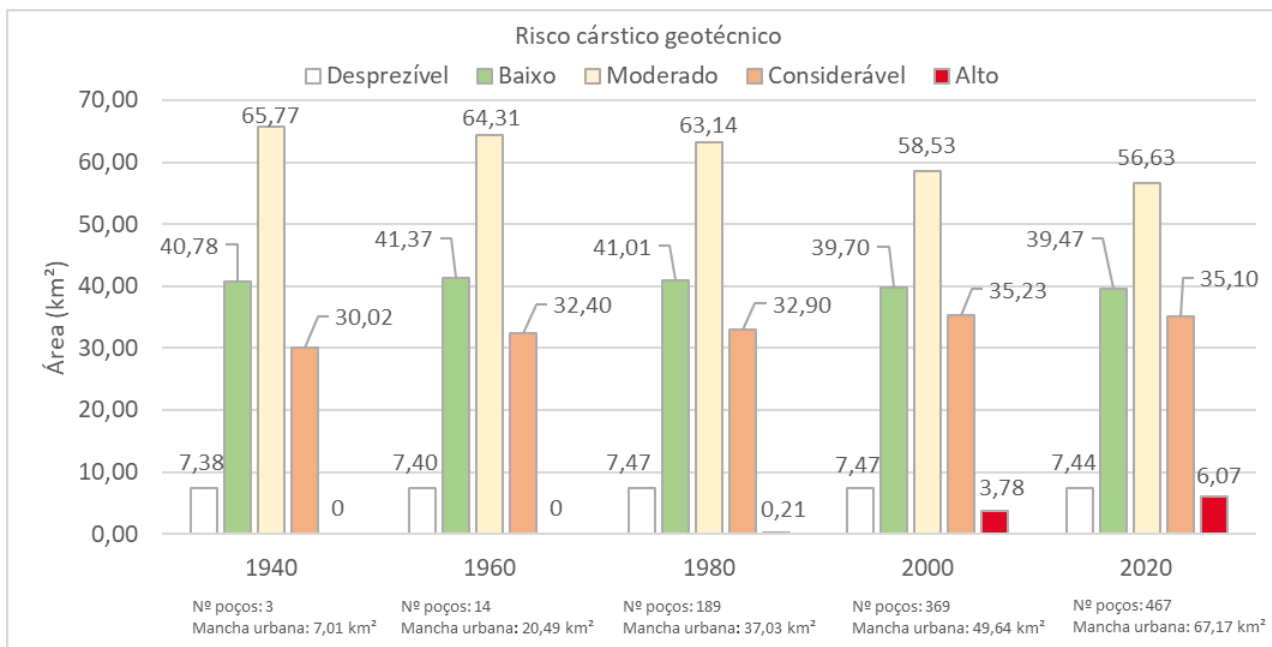


Figura 24 – Variação das áreas das categorias de suscetibilidade cárstico geotécnica ao longo do tempo.
Fonte: a autora, 2023.

O ano de 1980 também pode ser considerado um marco na evolução de números de poços tubulares na cidade de Sete Lagoas. Como já demonstrado na Tabela 1, de acordo com Schuch (2022), entre 1940 e 1980, houve um crescimento de aproximadamente 6200%, indo de 3 para 189 poços tubulares. Continuando nesse raciocínio, de 1980 a 2020 passa-se de 189 para 369 poços, o que condiz com um aumento percentual de cerca de 95,24% nesse período. Esses dados confirmam que após 1980 houve um grande aumento no volume de água explorada, e consequentemente um rebaixamento do nível de água subterrânea na região. Fatos que influenciam diretamente no aumento do risco hidrogeológico local e concomitantemente na elevação da suscetibilidade cárstico geotécnica da área.

Em relação ao planejamento urbano, tem-se que desde o aparecimento da zona de alto risco cárstico geotécnico, em 1980, essa área está integralmente dentro da mancha urbana ao longo dos anos analisados. Além disso, os pontos onde ocorreram os abatimentos passam a estar integralmente dentro das manchas urbanas a partir de 1980. Já para as décadas de 1940 e 1960 a localização do abatimento está fora do limite urbano apenas cerca de 137 metros de distância. Outro ponto observável é que em 2020 ocorre o primeiro aparecimento de risco desprezível na mancha urbana, porém isso não quer dizer que o risco cárstico geotécnico está diminuindo e sim que a mancha urbana está cada vez mais se expandindo para áreas onde se tem o afloramento do embasamento.

Essas constatações indicam que as cargas geradas pelas edificações decorrentes da urbanização podem influenciar na ocorrência dos abatimentos na área urbana de Sete Lagoas, principalmente nas localidades onde se tem-se a concentração dos poços de bombeamento, a sobreposição dos cones de rebaixamento e concomitantemente os menores níveis de água subterrânea que aumentam os vazios no subsolo. O que demonstra o descaso com relação à importância de estudos hidrogeológicos para orientar o planejamento urbano local.

7. Conclusão

Com a elaboração desse estudo pode-se concluir que a suscetibilidade cárstica geotécnica está evoluindo no decorrer do tempo, sendo a área associada ao alto risco cada vez maior na região de estudo. Pode-se perceber também a influência direta da exploração de água subterrânea sem gerenciamento adequado na evolução desse risco, sendo esse bombeamento caracterizado pelo aumento exacerbado de número de poços e pela concentração dos mesmos na área urbana, o que gera a sobreposição dos cones de rebaixamento. O risco hidrogeológico é o fator mais influente no risco cárstico geotécnico quando comparado ao risco geológico, sendo que o risco ligado à hidrogeologia se altera mais no período analisado.

Estando ciente das áreas consideradas de alto risco cárstico geotécnico na região analisada, pode-se tomar providências acerca da ocupação e planejamento urbano local, indicando áreas mais ideais para à expansão urbana no futuro, bem como readequar as explorações dentro das áreas de alto risco, além de fiscalizar a região em busca da diminuição da exploração clandestina de água subterrânea. Outra opção seria a realocação de poços ativos, para que não haja sobreposição dos cones de rebaixamento. Além de incentivar medidas de intervenção para a elevação do nível de água subterrânea, como o uso de estruturas facilitadoras de infiltração ou pontos de recarga artificial por injeção. Por fim, esse estudo pode servir como direcionamento e base para outros trabalhos futuros em Sete Lagoas, bem como auxiliar na elaboração de uma carta de aptidão à urbanização, onde se indica áreas mais estáveis para a ocupação urbana, considerando também outros fatores ambientais e humanos.

REFERÊNCIAS

- ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. **Águas Subterrâneas**. São Paulo, s.d. Disponível em: <https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/#ind2>.
- AGÊNCIA PEIXE VIVO. GESTÃO DE AQUÍFEROS. MÓDULO HIDROGEOLOGIA. Curso de Capacitação de Agentes Gestores de Recursos Hídricos. 2012.
- ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de. O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.
- ALMEIDA, Gustavo Henrique Tonelli Dutra de; MASINI, Letícia Santos; MALTA, Luiz Ricardo Santos. Hidrologia e drenagem. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. 200 p.
- ALMEIDA, Leonardo. Hidrogeologia - Conceitos Básicos. Coordenação de Águas Subterrâneas SIP/ANA. Brasília: 2016.
- ALVES, Michele Aparecida Gomes. Controles hidrogeológicos cársticos e efeitos antrópicos na Lagoa Grande, Sete Lagoas (MG). Ouro Preto, 2020.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. DIREITO DE ÁGUAS À LUZ DA GOVERNANÇA. Ministério do Desenvolvimento Regional. Curso de Direito das Águas à Luz da Governança. Brasília - DF: 2019. Disponível em: https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/1052/3/UNIDADE%2003_ANA.pdf.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Governança das águas subterrâneas: desafios e caminhos. Pilar Carolina Villar; Ricardo Hirata; José Luiz Albuquerque; Ana Maciel de Carvalho. – Brasília: ANA, 2022. 202 p.: il.
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Hidrogeologia Conceitos Básicos. Coordenação de Águas Subterrâneas SIP/ANA. Brasília: 2016.
- ANDRADE, Dalton. Lagoa do Matadouro. 2010. Disponível em: <https://www.daltonandrade.com/lagoa-do-matadouro/>. Acesso em: 19 de outubro de 2022.
- ASSUNÇÃO, Pedro Henrique da Silva. Análise da zona de recarga e sua interação com o aquífero cárstico na lagoa do Matadouro, zona urbana de Sete Lagoas: uma abordagem científica e ambiental. 2019.
- AVELLAR, Gisela de; CASTRO, José Flávio Moraes; HADAD, Renato Moreira. ANÁLISE GEOECOSSISTÊMICA DA BACIA DO RIBEIRÃO SÃO JOÃO COM USO DE GIS. **CLIMEP-Climatologia e Estudos da Paisagem**, v. 3, n. 1, 2008.
- AZEVEDO, Guiomar G. **A Região de Sete Lagoas**. Tese de concurso à livre docência da cadeira de Geografia do Brasil da Faculdade de Filosofia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, UFMG, 1963.
- BARROS, Leonardo. PODE HAVER UM NOVO ACIDENTE EM SETE LAGOAS - O PERIGO É NÃO FAZER NADA HOJE. 2009. Disponível em: <http://www.leonardobarros.com/2009/06/o-perigo-e-nao-fazer-nada-hoje.html>. Acesso em: 20 de outubro de 2022.
- BATISTA, Jonathan Carvalhaes. Superexploração de águas subterrâneas, o caso de Recife. 2015. Tese de Doutorado. São Paulo, 2015.
- BEYNEN P. E. 2011. Karst Management. Springer, Tampa, Flórida, 502p.

- BOLDRIN, Mirtes Tatiane Neisse; CUTRIM, Alterêdo Oliveira. Aspectos da gestão de águas subterrâneas urbanas, 2011.
- BORGHETTI, Jose Roberto; BORGHETTI, Nadia Rita; ROSA FILHO, Ernani Francisco da. **A integração das águas: revelando o verdadeiro aquífero Guarani**. 2011.
- BORN, Cristiano R.; BARBOSA, Nazaré A.; STEIN, Ronei T.; GOYA, Samara C.; NASCIMENTO, Danielle S.; SODER, Maurem N. F. Hidrogeologia. Porto Alegre : SAGAH, 2021.
- BOTELHO, Lúcio Antônio Leite Alvarenga. Gestão dos Recursos Hídricos em Sete Lagoas/MG: uma abordagem a partir da evolução espaço-temporal da demanda e da captação de água. Departamento de Geografia - UFMG. Belo Horizonte: 2008.
- BRASIL. Lei nº 9433 (1997). Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 15 fev. 2023.
- BRASIL. Tribunal de Contas da União. Referencial básico de gestão de riscos / Tribunal de Contas da União. – Brasília: TCU, Secretaria Geral de Controle Externo (Segecex), 2018. 154 p.: il.
- CABRAL, Jaime Joaquim da Silva Pereira; SANTOS, Sylvana Melo dos; PONTES FILHO, Ivaldo Dário da Silva. Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n. 3, p. 147-157, 2006.
- CABRAL, Jayme Álvaro de Lima. Zoneamento geotécnico e aptidão dos terrenos: município de Sete Lagoas. Belo Horizonte: CPRM, 1994.
- CAPUCCI, Egmont; MARTINS, Aderson Marques; MANSUR, Kátia Leite; MONSORES, André Luiz Mussel. POÇOS TUBULARES E OUTRAS CAPTAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Alemanha: 2001.
- CARNEIRO, Fernando Alves. Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil. 2013. Tese de Doutorado.
- CASTRO, Antônio Luiz Coimbra de. Manual de Planejamento em Defesa Civil-Volume I. Brasília. 1999.
- CBH RIO DAS VELHAS - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Dependente do Rio das Velhas e de poços profundos, Sete Lagoas investe em reservatório de 10 milhões de litros para evitar seca. Assessoria de Comunicação CBH Rio das Velhas: 2020.
- CHAVES, Rafael Macedo. Mapeamento da Vegetação e Uso do Solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jequitibá. Monografia (Especialização) – Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Cartografia. Belo Horizonte – 2005. 38 pg.
- CLEARY, Robert W. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Tampa: 1989.
- CONICELLI, Bruno Pirilo. Gestão das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (SP). São Paulo: Tese (Doutorado)-Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, 2014.
- COSTA, Carlos Nunes da. DISCIPLINA DE FUNDAMENTOS DE GEOTECNIA. CAPÍTULO 5 – A ÁGUA NOS MACIÇOS. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. 2007.

- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Curso Básico de Percepção e Mapeamento do Risco Geológico. COLAPSO E SUBSIDÊNCIA. Espírito Santo: 2018.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Conceitos Fundamentais de Risco e de Áreas de Risco. Defesa Civil. Belo Horizonte: 2017.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Zoneamento geotécnico e aptidão dos terrenos: município de Sete Lagoas. Belo Horizonte: CPRM, 1994.
- CRUZ, Jocy; PILÓ, Luís. Espeleologia e Licenciamento Ambiental. **ICMBio, Brasília, Brazil**, 2019.
- CUSTODIO, Emilio. Aquifer overexploitation: what does it mean?. Hydrogeology journal, v. 10, n. 2, p. 254-277, 2002.
- DARDENNE, Marcel Auguste. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congresso Brasileiro de Geologia. 1978. p. 597-610.
- DEFESA CIVIL. Conceitos Fundamentais de Risco e de Áreas de Risco. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2017.
- DEFESA CIVIL. Gestão de Risco de Desastres. Santa Catarina: 2022.
- DEFESA CIVIL. Gestão de Risco: o que é. Santa Catarina: 2022.
- DONATO, Laryssa de Almeida. Planejamento urbano e o direito ao acesso à água. **Revista do CNMP**, n. 7, p. 186-210, 2018.
- ESCOLERO, o.A., MARIN, L.E., STEINICH, B. PACHECO, A.J., CABRERA, S.A., ALCOCER, J. 2002. Development of a protection strategy of karst limestone aquifers: the Merida Yucatan, Mexico case study. Water Resources Management, Netherland, 16: 351-367.
- ESTELLER, M.V., DIAZ-Delgado, C. 2002. Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico. Environmental Management. 29(2): 266-278.
- FAPEU - Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária. RESILIÊNCIA E RISCO DE DESASTRES: UM GUIA PARA ATUAÇÃO MUNICIPAL. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. Florianópolis: FAPEU, 2020.
- FEITOSA, Fernando Carneiro; FILHO, João Manoel; FEITOSA, Edilton Carneiro; DEMETRIO, José Geilson. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Ministério de Minas e Energia, CPRM, 2008.
- FERREIRA, Cristiano Fernandes. Fragilidades e impactos ambientais no carste e nas cavernas. In: CRUZ, Jocy Brandão; PILÓ, Luís. **Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: 2019. p. 7-56.
- FERREIRA, Débora; ALBINO, Lisangela; FREITAS, Mário Jorge Cardoso Coelho. Mapeamento participativo para a gestão de risco de desastres: região dos Baús, Ilhota-SC. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, p. 713-730, 2017.
- FERREIRA, Fernanda Costa. Modelagem da capacidade de suporte da área central de Sete Lagoas, MG: subsídios para gestão urbana. Belo Horizonte: 2019.
- FITTS, Charles Richard. **Águas Subterrâneas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier. Grupo GEN, 2014. E-book. ISBN 9788595154421.
- FORD, D.C; WILLIAMS, P.W. 2007. Karst geomorphology and hydrology, 2nd ed. Wiley, Chichester, NY, 562p.

- FREEZE, Allan R.; CHERRY, John A. Água subterrânea. São Paulo: Everton de Oliveira, 2017.
- FURTADO, Janaina Rocha. **Gestão de riscos de desastres**. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis: CEPED UFSC, 2012.
- GALVÃO, Paulo Henrique Ferreira. Hydrogeological Conceptual Model of Sete Lagoas (MG) and Associated Implications of Urban Development in Karst Region. University of São Paulo Institute of Geosciences. São Paulo: 2015.
- GALVÃO, Paulo Henrique Ferreira. Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- GALVÃO, Paulo Henrique; HIRATA, Ricardo Aoki; SILVA, Arnaldo Cordeiro; OSORIO, Daniela Barbati; BARBOZA, Gilcélia Cristina; L'ABBATE, Maria Fátima de Melo. Caracterização hidrogeológica e avaliação preliminar do atual sistema de gestão dos aquíferos cársticos, no município de Sete Lagoas (MG). ABAS, São Paulo: 2012.
- GALVÃO, Paulo; HALIHAN, Todd, HIRATA, Ricardo. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology Journal*, v. 23, n. 7, p. 1499–1513, 2015.
- GIAMPÁ, Carlos Eduardo Quaglia; GONÇALES, Valter Galdino. Águas subterrâneas e poços tubulares profundos. 2. ed. rev. e atualizada. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- GIRÃO, Ítalo Renan Ferreira; RABELO, Davi Rodrigues; ZANELLA, Maria Elisa. Análise teórica dos conceitos: riscos socioambientais, vulnerabilidade e suscetibilidade. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 4, p. 71-83, 2018.
- GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. Taylor & Francis. International Contributions to Hydrogeology, 264p.
- GOMES, Rafael Magnabosco de Almeida; GALVÃO, Paulo; MACIEL, Ana; SILVA, Aline da. COMPORTAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA E POTENCIALIDADE HÍDRICA EM AQUÍFERO CÁRSTICO A PARTIR DE ANÁLISE ESTRUTURAL E PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS–SETE LAGOAS (MG). *Águas Subterrâneas*, 2018.
- GROTZINGER, J.; JORDAN, T. Para entender a terra. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- GUTIÉRREZ, F.; PARISE, M.; WAELE, J. De; JOURDE, H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, v. 138, p. 61-88, 2014.
- HAGER, Francis Priscilla Vargas; SILVA, José de Ribamar da Costa; ALMEIDA, Wesley Machado de; OLIVEIRA, Wilton de Arruda. A problemática da gestão das águas subterrâneas no Brasil. *Águas Subterrâneas*, 2002.
- HARDT, Rubens. Sistema cárstico e impactos antrópicos: considerações sobre o manejo. **Simpósio de Pós-Graduação em Geografia do Estado de São Paulo SIMPGEO-SP**, p. 1295-1309, 2008.
- HIRATA, Ricardo; SUHOGUSOFF, Alexandra Vieira; MARCELLINI, Silvana Susko; VILLAR, Pilar Carolina; MARCELLINI, Laura. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento Estudo de Águas Subterrâneas. Instituto Trata Brasil, 2019.
- HIRATA, Ricardo; SUHOGUSOFF, Alexandra; MARCELLINI, Silvana Susko; VILLAR, Pilar Carolina; MARCELLINI, Laura. As águas subterrâneas e sua importância ambiental e

socioeconômica para o Brasil. ABAS - Associação Brasileira de águas subterrâneas. São Paulo: Universidade de São Paulo/Instituto de Geociências, 2019.

HIRATA, Ricardo; ZOPY, José Luiz Gomes; OLIVEIRA, Fernando Roberto de. **Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial**. Águas do Brasil: análises estratégicas. Tradução. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sete Lagoas**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/sete-lagoas.html>.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão de Águas. **Outorga**. 2021. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/outorga>.

INSTITUTO TRATA BRASIL. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. Estudo de Águas Subterrâneas. 2019.

KARMANN, Ivo. CICLO DA ÁGUA – Água subterrânea e sua ação geológica. 2000.

LANDAU, Elena Charlotte; OLIVEIRA, Renata Poliana Cordeiro; SANTOS, Marcos Aurélio dos; GUIMARÃES, Daniel Pereira. Expansão urbana da cidade de Sete Lagoas/MG entre 1949 e 2010. In: Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011. São José dos Campos: INPE, 2011.

LEÃO, Marcia Silva. Diagnóstico climático e estudo das variações termo-higrométricas do município de Sete Lagoas-MG. Belo Horizonte: 2008.

LINS, Eduardo Antonio Maia; SILVA, Andréa Karla Araújo; BARROS, Andréa Cristina Baltar; MOTA, Adriane Mendes Vieira. Impactos ambientais causados por perfurações de poços clandestinos—estudo de caso. In: **XI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Vitória/ES, 2020.

LLAMAS, M.R. Sustainable groundwater use and overexploitation. IN Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), UNESCO, Eolss Publishers, Paris, France, 2011.

MACHADO, Lilian Aline; CARMO, Ana Maria Raposo do; JARDIM, Carlos Henrique. Tendências e variações na temperatura e precipitação em Montes Claros e Sete Lagoas—MG. REVISTA GEONORTE, v. 3, n. 9, p. 613–625-613–625, 2012.

MAGNABOSCO, Rafael Almeida Gomes. 2020. Modelo Hidrogeológico Conceitual e Análise da Favorabilidade Hidrogeológica do Aquífero Cárstico na Região Urbana de Sete Lagoas - MG. Programa de pós-graduação em evolução crustal e recursos naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

MENDES, Ana Paula. OUTORGA COMO SISTEMA DE GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO SUL DE MINAS GERAIS: estudo de caso bacia do Rio Verde. 2015.

MIGUEZ, Marcelo Gomes; GREGÓRIO, Leandro Torres Di; VERÓL, Aline Pires. Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos. 1. ed. - Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MOLINA, J. L., GARCÍA ARÓSTEGUI, J. L., BENAVENTE, J., VARELA, C., DE LA HERA, A., & LÓPEZ GETA, J. A. (2009). Aquifers Overexploitation in SE Spain: A Proposal for the Integrated Analysis of Water Management. *Water Resources Management*, 23(13), 2737–2760. doi:10.1007/s11269-009-9406-5.

NOGUEIRA, Marly. A Autonomia de uma cidade média Sete Lagoas (MG). Geografia, 1999.

OLIVEIRA JÚNIOR, Genildo da Silva. Avaliação da água subterrânea a partir dos poços perfurados no bairro da prata em Campina Grande-PB: mapeamento, qualidade e vazão disponível. 2018.

OLIVEIRA, Débora Vasconcelos; BACELLAR, Luis de Almeida Prado; ARANHA, Paulo Roberto Antunes. Caracterização de Suscetibilidade ao Colapso por Análise Estrutural e Geofísica em Área Cárstica no Município de Sete Lagoas-MG. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 2, p. 76-86. Rio de Janeiro: 2020.

OLIVEIRA, Luís Marcelo. Acidentes Geológicos Urbanos. MINEROPAR - Serviço Geológico do Paraná. Curitiba, 2010 (1ª Edição), 78 p.

PEREIRA, Simone Imaculada. MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA NUMÉRICA APLICADA À AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE USO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO CONTEXTO DO AQUIFERO CÁRSTICO DA REGIÃO URBANA DE SETE LAGOAS (MG). Ouro Preto, 2022.

PESSOA, Paulo Fernando Pereira. Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas-MG: Potencialidade e Riscos. São Paulo, 1996.

PMSL - PREFEITURA MUNICIPAL DE SETE LAGOAS. 2017. LEI COMPLEMENTAR DE PARCELAMENTO DO SOLO. Carta de zoneamento. Escala: 1/45000.

PMSL - PREFEITURA MUNICIPAL DE SETE LAGOAS. História do município de Sete Lagoas. 2017. Disponível em: <https://www.setelagoas.mg.gov.br/detalhe-da-materia/info/historia/6527>. Acesso em: 12 de outubro de 2022.

PMSL - PREFEITURA MUNICIPAL DE SETE LAGOAS. Reservatório de 10 milhões de litros construído por Prefeitura e SAAE está em plena operação. Prefeitura Municipal de Sete Lagoas: 2022.

RECKZIEGEL, Bernadete Weber; ROBAINA, Luis Eduardo de Souza. Riscos geológico-geomorfológicos: revisão conceitual. *Ciência e Natura*, v. 27, n. 2, p. 65-84, 2005.

RODRÍGUEZ-ESTRELLA, T.R. 2012. The problems of overexploitation of aquifers in semi-arid áreas: the Murcia Region and the Segura Basin (South-east Spain) case. *Hydrology and Earth System Science Discussions*. 9: 5729-5756.

RUPPENTHAL, Janis Elisa. Gerenciamento de Riscos. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria; Rede e-Tec Brasil, 2013. 120 p.

SAAE - Serviço Autônomo de Águas e Esgoto. Estudos Hidrogeológicos no município de Sete Lagoas - MG. Volume 1/6 – Relatório Técnico. Sete Lagoas: SAAE, 2013.

SAAE - Serviço Autônomo de Águas e Esgoto. SAAE Sete Lagoas. 2019. Disponível em: <http://www.saaesetelagoas.com.br/>.

SANSONE, Eduardo César. POROSIDADE DAS ROCHAS. 2014.

SCHUCH, Camila Santos. Influências urbana, industrial e climática na superexploração do aquífero cárstico no município de Sete Lagoas (MG). Ouro Preto, 2022.

SERAPHIM, Ana Paula Albuquerque Campos Costalonga. Relações entre as áreas de recarga dos aquíferos e áreas destinadas a urbanização: estudo dos padrões de ocupação do solo da unidade hidrográfica do Paranoá-DF. 2018.

SETE LAGOAS (2017) – Lei Complementar nº 209/ 2017 – Dispõe sobre a Lei de Uso e Ocupação do Solo no município de Sete Lagoas. Prefeitura Municipal de Sete Lagoas, dezembro de 2017.

SETTI, Arnaldo Augusto; LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck; CHAVES, Adriana Goretti de Miranda; PEREIRA, Isabella de Castro. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. **Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica**, v. 328, 2001.

SILVA, Adelbani Braz da. Abatimento de solo na cidade de Sete Lagoas, Minas Gerais. *Águas Subterrâneas*, v. 12, n. 1, 1988.

STEVANOVIĆ, Zoran. Global distribution and use of water from karst aquifers. Geological Society, London, Special Publications, 466(1), 217–236. 2018. doi:10.1144/sp466.17.

TEIXEIRA W., TOLEDO M.C.M.de, FAIRCHILD T.R., TAIOLI F. 2003. Decifrando a Terra 2ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 557p.

TOMINAGA, Lídia Keiko; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosângela. Desastres naturais - Conhecer para prevenir. São Paulo: Ed. Instituto Geológico, 2009.

TRAVASSOS, Luiz Eduardo Panisset. **Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gestão integrada das águas urbanas. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 5, n. 2, p. 71-81, 2008.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; CABRAL, Jaime Joaquim da Silva Pereira. **Qualidade da Água Subterrânea**. Prospecção Tecnológica de Recursos Hídricos. CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos: 2003. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/a2b_doc_final_agua_subterr_1184.pdf/49642517-e831-4ef7-bccd-5c6d3834a3a0?version=1.0.

TULLER, M. P, RIBEIRO, J. H., DANDERFER, A. 1992. Mapeamento Geológico da área do Projeto VIDA, CPRM, Belo Horizonte. Relatório interno.

TULLER, Manoel Pedro; RIBEIRO, José Heleno; SIGNORELLI, Nicola; FÉBOLI, Wilson Luis; PINHO, Júlio Murilo Martino. Projeto Sete Lagoas-Abaeté, Estado de Minas Gerais (CPRM) Orgs. **Belo Horizonte: CPRM-BH**, v. 6, 2010.

VALADÃO, Roberto Célio; SILVEIRA, José Sílvia. 'Água mole em pedra dura tanto bate até que fura': as migrações da água sob nossos pés. **Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, v. 25, n. 1 e 2, p. 16-39, 2018.

VENI, George; DUCHENE, Harvey; CRAWFORD, Nicholas C.; GROVES, Christopher G.; HUPPERT, George N.; KASTNING, Ernst H.; OLSON, Rick; WHEELER, Betty J. Living with karst: a fragile foundation. Environmental Awareness Series, n. 4. American Geosciences Institute, 2001. 64p.

VILARIM, Maiana Borba; PRADO, Pedro Augusto Alves; MENDONÇA, André Rego Barros Furtado; CABRAL, Jaime Joaquim da Silva Pereira; SANTOS, Sylvana Melo. IX-020–CASOS DE SUBSIDÊNCIA DEVIDO À EXPLOTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA. ABES - XIX SILUBESA. 2020.

WHITE, W. B.; CULVER, D. C.; PIPAN, Tanja. Cave, definition of. In: CULVER, D.C., WHITE, W.B. (Ed.). Encyclopedia of Caves. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. p. 103-107

WILLIAMS, P. Dolines. In: GUNN, J. (Ed.). Encyclopedia of Caves and karst science. London: Fitzroy Deaborn, 2004. p. 304-310.

ZUQUETTE, Lázaro Valentim. **Importância do Mapeamento Geotécnico no Uso e Ocupação do Meio-Físico: Fundamentos e Guia para Elaboração**. Volume I. São Carlos, 1993.