

**FACULDADE DOCTUM
ISABELA DAMASCENO DE OLIVEIRA
ISABELA OLIVEIRA CAMPOS**

SUBSIDÊNCIA DO SOLO DEVIDO À EXPLOTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Juiz de Fora
2019

**ISABELA DAMASCENO DE OLIVEIRA
ISABELA OLIVEIRA CAMPOS**

SUBSIDÊNCIA DO SOLO DEVIDO À EXPLOTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Monografia de Conclusão de Curso, apresentada ao curso de Engenharia Civil, Faculdade Doctum de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof^a. Mestre Ana Cristina Junqueira Ribeiro.

Juiz de Fora
2019

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca Faculdade Doctum/JF

Oliveira, Isabela Damasceno de.
Subsidência do solo devido à exploração de água
subterrânea / Isabela Damasceno de Oliveira, Isabela Oliveira
Campos - 2019.
61f.

Monografia (Curso de Engenharia Civil) –
Faculdade Doctum Juiz de Fora.

1. Subsidência do solo. 2. Risco. 2. Monitoramento
I. Título. II Faculdade Doctum Juiz de Fora

TERMO DE APROVAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: Subsistência do solo
devido à exploração de água subterrânea

elaborado pelo(s) aluno(s) Isabela Damasceno de Oliveira
Isabela Oliveira Campos

foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de
Engenharia Civil
como requisito parcial da obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Juiz de Fora, 08 de julho de 2019.

[Assinatura]
Prof. Orientador Uma Cristina Furquim Ribeiro

[Assinatura]
Prof (a). Lucio Feltal Notta Junior

[Assinatura]
Prof (a). Benrique Guilherme D. Lacerias

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus, por nos conceder sabedoria e inteligência para que chegássemos até aqui, e por estar presente em todos os momentos de nossas vidas, iluminando-nos, protegendo-nos e abençoando-nos.

Aos nossos pais, por todo incentivo e apoio e por vivenciarem esta jornada conosco, com muito carinho e dedicação. Sem eles, nada disso seria possível. À minha irmã, pela alegria compartilhada. Aos nossos namorados, pelo carinho e amor nesse momento tão importante de nossas vidas.

Aos amigos de vida, por toda torcida, carinho e por compreenderem muitas de nossas ausências. Aos amigos da faculdade, agradecemos pela companhia diária e por compartilharem conosco o aprendizado adquirido nesta formação.

À nossa querida professora e orientadora, Eng^a e Mestre Ana Cristina Junqueira Ribeiro, agradecemos por toda paciência, dedicação e auxílio para elaboração deste trabalho. Agradecemos também à Eng^a e Mestre Cristiane Arantes Ferreira, pela orientação espontânea, dedicada e atenciosa.

RESUMO

OLIVEIRA, ISABELA DAMASCENO; CAMPOS, ISABELA OLIVEIRA. **Subsidência do solo devido à exploração de água subterrânea.** (60f.). Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Faculdade Doctum, Juiz de Fora, 2019.

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos da subsidência do solo devido à exploração de águas subterrâneas. A partir do levantamento dos registros de casos de subsidência ocorridos no Brasil e no mundo e da susceptibilidade de ocorrência em outros locais com características similares, verificou-se a necessidade da produção deste trabalho. Para tanto, elencaram-se os fatores que propiciam a ocorrência desse fenômeno e o levantamento de áreas de risco de subsidência por exploração de água subterrânea. A metodologia, uma pesquisa exploratória com caráter qualitativo, a partir de revisão bibliográfica, foi escolhida a fim de proporcionar informações factuais facilitando o entendimento do trabalho proposto. Com este estudo, espera-se contribuir para a divulgação do fenômeno e para o aprimoramento de novos estudos sobre monitoramento e mitigação de causas de ocorrência, minimizando os danos e reduzindo os colapsos estruturais causados pela subsidência do solo em áreas com captação de águas subterrâneas.

Palavras-chave: Subsidência do solo. Exploração de água subterrânea. Risco. Monitoramento.

ABSTRACT

This work presents a literature review on soil subsidence mechanisms due to the exploitation of groundwater. From the survey of the records of cases of subsidence occurring in Brazil and in the world and the susceptibility of occurrence in other places with similar characteristics, it was verified the necessity of the production of this work. In order to do so, it was listed the factors that allow the occurrence of this phenomenon and the survey of areas of subsidence risk due to the exploitation of underground water. The research methodology, based on a bibliographic review, was chosen in order to provide factual information facilitating the understanding of the proposed work. With this study, it is hoped to contribute to the dissemination of the phenomenon and the improvement of new studies on the monitoring and mitigation of causes of occurrence, minimizing damages and reducing the structural collapses caused by soil subsidence in areas with groundwater abstraction.

KEYWORDS: Subsidence of soil. Exploitation of groundwater. Risk. monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Classificação da subsidência de acordo com a origem.....	15
Figura 02 – Importância da informação sobre a subsidência do solo.....	19
Figura 03 – Representação esquemática da distribuição da água no solo e subsolo	22
Figura 04 – Ciclo hidrológico	23
Figura 05 – Tipos de aquíferos de acordo com a porosidade	25
Figura 06 – Tipos de aquíferos quanto à pressão.....	26
Figura 07 – Mapa das divisões hidrográficas do Brasil	28
Figura 08 – Poços cacimbas temporários	33
Figura 09 – Poços tubulares do tipo jorrante, em Cristino Castro - Piauí.....	34
Figura 10 – Poço artesiano	35
Figura 11 – Aquífero sedimentar não confinado.....	37
Figura 12 – Aquífero sedimentar confinado.....	38
Figura 13 – Esquema de um aquífero cárstico.....	39
Figura 14 – Colapso em aquífero cárstico.....	40
Figura 15 – Registro da subsidência em Cajamar, 1986.....	43
Figura 16 – Registro da subsidência ocorrida em Sete Lagoas, 1988	44
Figura 17 – Municípios com ocorrência de subsidência	46
Figura 18 – Entrada de dados para busca de poços cadastrados	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Diferença entre subsidência, colapso e recalque	15
Quadro 02 – Regiões hidrográficas e os principais aquíferos	29
Quadro 03 – Informações sobre os fatores contribuintes para a ocorrência de subsidência	41
Quadro 04 – Exemplos de outros casos de subsidência ocorridos no Brasil	45
Quadro 05 – Características dos municípios brasileiros quanto aos possíveis fatores de subsidência	53
Quadro 06 – Verificação da ocorrência de subsidência nos municípios em estudo..	55

LISTA DE GRÁFICOS E TABELAS

Tabela 01- Valores aproximados de subsidências registradas no mundo	17
Gráfico 01- Volume total de água doce no mundo.....	21
Tabela 02- Quantidade de poços cadastrados separados pelos estados do Brasil	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral.....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. METODOLOGIA.....	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4.1 Subsidência do solo.....	14
4.1.1 Casos históricos	16
4.2 Mecanismos de subsidência	18
4.3 Subsidência devido à exploração de água subterrânea	21
4.3.1 Águas subterrâneas	21
4.3.2 Aquíferos.....	23
4.3.3 Águas subterrâneas no Brasil.....	27
4.3.4 Meios de extração de águas subterrâneas	30
4.3.5 Tipos de subsidência.....	35
4.3.5.1 Subsidência em aquíferos sedimentares	36
4.3.5.2 Subsidência em aquíferos cársticos	39
4.3.6 Fatores que contribuem para a ocorrência de subsidência.....	41
4.4 Casos no Brasil	42
5 ANÁLISES	45
5.1 Caracterização das regiões em estudo	46
5.2 Monitoramento de áreas de risco	51
5.3 Compilação de dados dos municípios em estudo	53
6 RESULTADOS	54

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno de subsidência do solo é caracterizado pelo processo de rebaixamento da superfície decorrente de alterações na zona subterrânea. Os mecanismos de ocorrência estão relacionados com mudanças no meio físico causadas por agentes naturais e ou pelas intervenções desordenadas pelo homem (MARETTI, 2008).

A exploração¹ de recursos subterrâneos como petróleo, gás e água é relacionada como causadora dos diversos registros de ocorrências da subsidência. Entretanto, devido à essencialidade da água para a existência humana e à necessidade de se utilizar esse recurso natural para o desenvolvimento econômico, social e ambiental, este trabalho abordará a subsidência do solo decorrente da exploração de água subterrânea. A captação dos aquíferos, através de poços, ocorre a partir das pressões geradas pelas perfurações no solo, fazendo com haja a elevação da água subterrânea até a superfície do poço. Os espaços vazios oriundos do rebaixamento do nível da água ocasionam a subsidência (CABRAL, SANTOS E PONTES FILHO, 2006).

O uso de água subterrânea tem se intensificado por diversas regiões brasileiras, por ser considerada como forma alternativa de abastecimento em locais onde o fornecimento de água potável é inexistente ou ineficaz. Embora o Brasil seja considerado um dos países mais ricos de água doce do mundo, ainda existem cidades brasileiras que não possuem fornecimento regular de abastecimento de água ou acesso à água de qualidade. Apesar de possuir grandes bacias hidrográficas, grande parte destas se encontra afastada dos grandes centros consumidores. Esse fato, associado à busca incessante pela água em quantidade e com qualidade, tem tendenciado para a exploração de águas subterrâneas (ANA, 2018).

Os casos de subsidência registrados em diversos países do mundo foram ocasionados principalmente pela exploração dos recursos hídricos subterrâneos em aquíferos com formações cársticas e sedimentares, como, por exemplo, o que ocorreu na Califórnia, México, China. No Brasil, alguns dos casos ocorreram em Minas Gerais, São Paulo e Paraná (MARETTI, 2008).

¹ Exploração – não possui definição em dicionário, mas é de uso corrente na área da hidrologia para apontar aspectos negativos da exploração de águas subterrâneas e não está relacionado com a quantidade elevada do recurso extraído.

Frente ao cenário de acontecimentos de subsidência do solo no Brasil e no mundo, faz-se necessária a abordagem de temas relacionados ao fenômeno e aos impactos geológicos e estruturais que este pode causar em estruturas e edificações.

Considerando que o uso alternativo de água subterrânea impactará no aumento considerável da perfuração de poços em diversas regiões brasileiras, é de suma importância a elaboração de estudos e pesquisas voltados para os mecanismos, mapeamento e monitoramento de áreas susceptíveis à ocorrência da subsidência.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é descrever os mecanismos da subsidência do solo devido à exploração de águas subterrâneas.

2.2 Objetivos específicos

- Expor um levantamento bibliográfico de casos em que ocorreram subsidência no mundo e no Brasil;
- Correlacionar às características de ocorrência de subsidência;
- Apresentar um levantamento de áreas de risco de subsidência por exploração de água subterrânea.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho utilizou, como metodologia, uma pesquisa exploratória com caráter qualitativo, a partir de uma revisão bibliográfica, a fim de proporcionar mais informações, investigando-se o fenômeno de subsidência do solo devido à exploração de águas subterrâneas.

A revisão bibliográfica foi realizada através de consultas às bases de dados e sistemas agregadores de materiais acadêmicos e científicos. Para tal, foram utilizados os seguintes descritores: subsidência do solo, exploração de águas subterrâneas, poço artesianos. As referências selecionadas foram encontradas seguindo a filtragem de pesquisas por palavras chaves, títulos, autores, resumo.

Através da revisão bibliográfica, foi realizada, também, a busca por registros de casos nos quais ocorreu a subsidência do solo causada por exploração de águas subterrâneas no Brasil e no mundo. A partir dos dados obtidos na pesquisa, foi confeccionado um mapa do Brasil com o auxílio do *software* de sistemas de informações geográficas ArcGIS, constando as cidades com casos registrados. Foi elaborado um quadro correlacionando os possíveis fatores, como os aspectos geológicos, hidrogeológicos e uso e ocupação do solo, que podem potencializar a ocorrência de subsidência.

Os resultados obtidos na revisão bibliográfica serão discutidos na seção de análises, constando, ao final do trabalho, as conclusões com indicações para pesquisas futuras.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão abordados temas relacionados com o conceito e o mecanismo da subsidência do solo, águas subterrâneas e os sistemas aquíferos, casos históricos no mundo e no Brasil da ocorrência do fenômeno de subsidência, proporcionando clareza e entendimento para posterior processo de análise.

4.1 Subsidência do solo

Conforme Santos (2005), as intervenções humanas, utilizadas de forma demasiada e indiscriminada dos recursos naturais como gás, petróleo e água, são consideradas as causas mais comuns de ocorrências de subsidência. O fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno, devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, é caracterizado como subsidência, ou seja, é a redução do nível do terreno devido à remoção de suporte subterrâneo. Esse fenômeno pode ocorrer em diferentes proporções, com várias dimensões, envolvendo pequenas áreas a extensões de quilômetros.

Mingorance (2000) destaca que a ocorrência da subsidência de determinadas áreas está associada a diversos fatores, como a magnitude do rebaixamento do nível d'água, as condições geológicas favoráveis à sua ocorrência e o período de tempo variado.

É importante salientar que existe uma distinção entre subsidência do solo, colapso do solo e recalque do solo (LUNA, 2017; ARAÚJO, 2006), conforme mostrado no quadro 01 a seguir.

Quadro 01 – Diferença entre subsidência, colapso e recalque

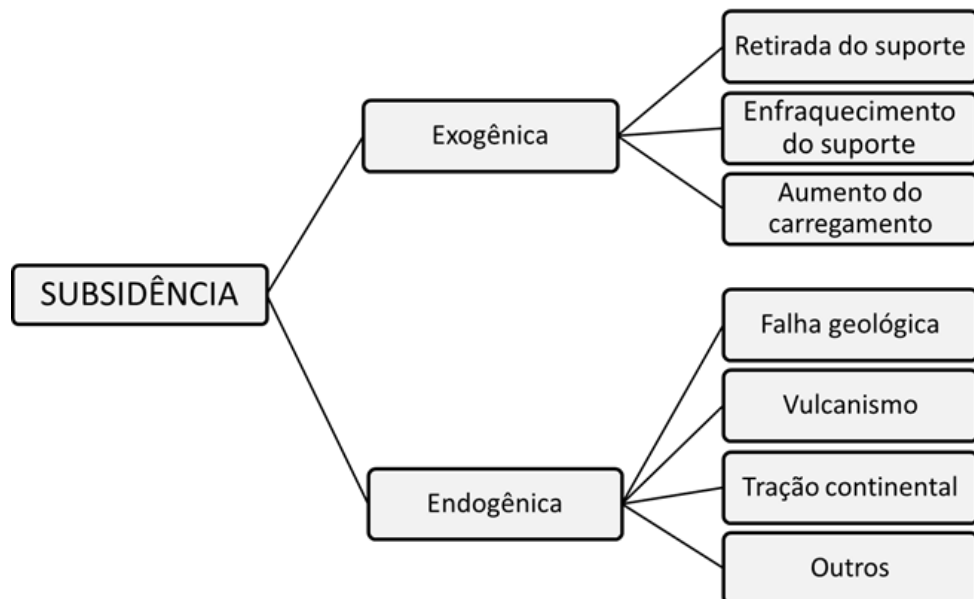
SUBSIDÊNCIA DO SOLO	COLAPSO DO SOLO	RECALQUE DO SOLO
É o rebaixamento da superfície devido à remoção do suporte. Em alguns casos são movimentos lentos, onde há adensamento do solo. Em áreas cársticas, ocorre pela dissolução subterrânea.	São movimentos bruscos, de forma aguda, que podem ocorrer mesmo sem sinais prévios denunciadores, que ocasionam desabamentos e afundamentos de terrenos de alto risco.	É definido pelo movimento vertical descendente de um elemento estrutural ou do solo. Pode ser definido como recalque total, quando ocorre em toda a fundação, ou recalque diferencial, quando ocorre em apenas um trecho.

Fonte: Adaptado de Luna (2017).

Assim, o fenômeno de subsidência pode causar o colapso do solo, como normalmente ocorre em regiões cársticas, podendo levar à ocorrência de recalque, tanto no solo quando em edificações e pavimentações.

De acordo com sua origem, a subsidência pode ser classificada como exogênica ou endogênica, conforme identificado na figura 01 (PROKOPOVICH, 1978).

Figura 01 - Classificação da subsidência de acordo com a origem



Fonte: Adaptado de Santos (2005).

A subsidência exogênica é o processo que se origina próximo à superfície da Terra e ocorre geralmente influenciada pelo homem. Já a endogênica é o processo que se origina no interior da crosta terrestre, sendo ocasionada por causas internas, da própria natureza (PROKOPOVICH, 1978).

4.1.1 Casos históricos

Existem registros na literatura que relatam o acontecimento do fenômeno de subsidência em diversos países do mundo, como pode ser observado nos exemplos a seguir relatados por autores diversos.

Cabral, Santos e Pontes Filho (2006) destacam que, em meados de 1910, foi registrada uma das primeiras ocorrências de subsidência na região do campo petrolífero *Goose Creek*, no Texas. A exploração demasiada de petróleo acarretou em um deslocamento de centímetros, evidente no terreno.

De acordo com o estudo apresentado por Davis e Masten (2016), o afundamento do Vale San Joaquim também representa um caso de subsidência. Situado no estado norte-americano da Califórnia, o Vale é conhecido pelas produções agrícolas nas zonas rurais. Entre 1920 e 1970, houve um intenso bombeamento para fins de irrigação, ocasionando uma subsidência no local de, aproximadamente, 9 metros. No final de 1970, com a construção de aqueduto na região, houve a substituição das águas subterrâneas como fonte de irrigação, ocasionando uma redução da taxa de subsidência. Estudos mostraram que, por três décadas seguidas, essa taxa manteve-se em declive. Entretanto, os problemas de secas na região e os casos de subsidência já ocorridos predispõem à região uma susceptibilidade de novas ocorrências do fenômeno.

Dentre os casos registrados na literatura consultada, Cabral, Santos e Pontes Filho (2006) destacam também que, ao longo de quatro décadas, o fenômeno de subsidência aumentou rapidamente próximo ao rio Choshui, em Taiwan. Após monitoramento da região, foram verificadas que as camadas de areia sofreram uma maior deformação, apresentando um comportamento mecânico elastoplástico e uma deformação volumétrica irreversível.

Outro caso de subsidência bastante conhecido ocorre no México. De acordo com a apresentação de Luna (2017), o aquífero do Vale de Toluca e a Cidade do México passaram por problemas de subsidência e rebaixamento do nível d'água da

ordem de, aproximadamente, 15 metros ao longo de 100 anos, decorrentes da exploração demasiada de água subterrânea para fins de abastecimento e irrigação. Maretti (2008) salienta a afirmação dos estudiosos mexicanos que só é possível controlar a subsidência, sendo impossível a estagnação do fenômeno, visto que o fornecimento de água na cidade é feito por captação de águas subterrâneas.

A tabela 01 apresenta outras localidades do mundo que tiveram registros de casos de subsidência, confirmando que esse fenômeno, apesar de não ser muito divulgado, é comum.

Tabela 01- Valores aproximados de subsidências registradas no mundo

LOCALIDADE	ORDEM DE SUBSIDÊNCIA (m)	TEMPO (anos)
Vale Las Vegas, Nevada	2,00	57
Hanói, Vietnam	0,30	6
Suzhou, China	1,00	14
Bologna, Itália	0,77	9
Wairakei, Nova Zelândia	14,00	45

Fonte: Elaborada pelas autoras (2019).

Observam-se, por meio das descrições desses casos, os longos períodos de ocorrência e as consequências, quando não são tomadas medidas mitigadoras em tempo hábil (SANTOS, 2008).

No Brasil, a despeito do amplo uso dos recursos subterrâneos, existem poucos registros de subsidência devido à extração de petróleo. Porém, em algumas regiões brasileiras, a situação de exploração de águas subterrâneas já resultou em rebaixamentos do nível piezométrico, tendo, como consequência, a ocorrência de subsidência. Oliveira (2010) destaca que os principais casos registrados no Brasil foram causados principalmente pela superexploração de aquíferos subterrâneos existentes nas regiões de São Paulo, Minas Gerais e Paraná. A descrição dos casos ocorridos no Brasil será explicitada de forma mais detalhada no decorrer deste trabalho.

4.2 Mecanismos de Subsidiência

De acordo com Cabral, Santos e Pontes Filho (2006), a subsidiência também pode ser classificada em função dos mecanismos causadores:

- devido à hidrocompactação;
- devido à dissolução de rochas e sais;
- devido à extração de petróleo ou gás;
- devido à atividade mineradora;
- devido à extração de água subterrânea;

Mingnorange (2000) sintetiza as principais características de ocorrências para cada grupo de mecanismo destacado acima.

- Subsidiência devido à hidrocompactação: ocorre uma rápida saturação em depósitos finos não saturados e mal compactados. Com adição de água, as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas pelo peso próprio, perdendo seu potencial de suporte.

- Subsidiência devido à dissolução de rochas e sais: através do fenômeno de carstificação, ocorre a dissolução de rochas calcárias e evaporitos pelas águas subterrâneas e superficiais, que resulta no processo de formação de cavernas subterrâneas.

- Subsidiência devido à extração de petróleo: a extração de fluido do solo ocasiona a redução da pressão dos poros da rocha subjacente ocasionando uma compactação.

- Subsidiência devido à atividade mineradora: durante o processo de exploração mineral, ocorre o processo de rebaixamento da superfície devido a escavações subsuperficiais, de forma contínua ou descontínua. Por ser resultante da remoção do suporte subterrâneo em grandes proporções, o rebaixamento do solo é proporcional à altura da área de extração.

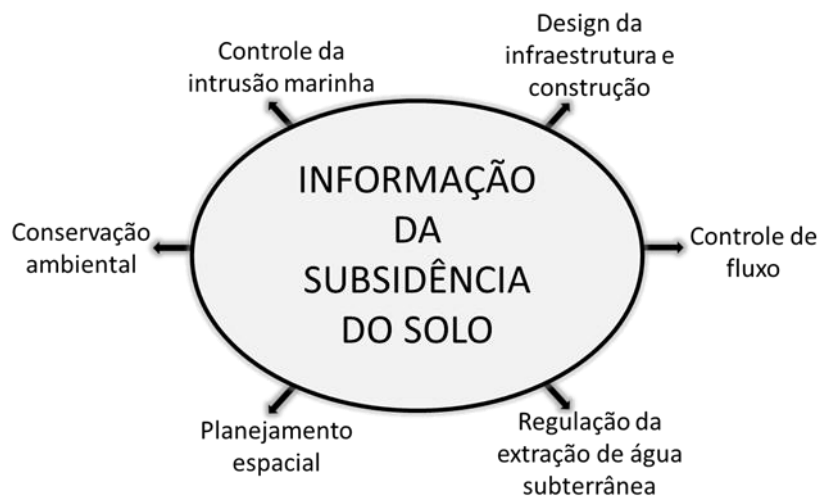
- Subsidiência devido à extração de água subterrânea: de forma similar à extração de petróleo, a subsidiência é resultante do rebaixamento do nível da água, produzindo uma diminuição da pressão nos poros que ajudam a suportar as camadas subjacentes de solo.

Como o presente trabalho concentra-se na subsidiência do solo devido à exploração de água subterrânea, abordaremos detalhadamente, no próximo item, somente esse mecanismo causador.

Cabral, Santos e Pontes Filho (2006) descreveram a ocorrência do fenômeno de subsidência do solo devido à exploração de água subterrânea do ponto de vista da distribuição de pressões e do o Princípio das Tensões Efetivas - PTE proposto por Terzaghi no ano de 1925. De acordo com Santos (2005), o PTE constitui o elo entre a exploração de água subterrânea e o fenômeno de subsidência, considerando que, dentro do aquífero, a pressão é neutra, ou seja, a pressão no poro preenchido com água equivale à carga hidráulica. Assim, quando a água é explorada do aquífero, a carga piezométrica e a pressão neutra diminuem, e a tensão efetiva no aquífero aumenta, uma vez que a pressão total permanece constante.

Portanto, é importante conhecer sobre a subsidência, havendo um controle geodésico a fim de reconhecer os motivos de sua ocorrência, portar uma avaliação de riscos e aplicar medidas para mitigar e prevenir o fenômeno (CABRAL, SANTOS e PONTES FILHO, 2006). A figura 02 mostra a importância e as informações a respeito da subsidência.

Figura 02 - Importância da informação sobre a subsidência do solo



Fonte: Adaptado de Cabral, Santos e Pontes Filho (2006).

Conforme Luna (2017), é importante entender o controle da intrusão marinha, o *design* da infraestrutura e construção, o controle de fluxo, a regulação da extração de água subterrânea, o planejamento espacial e a conservação ambiental, para, assim, minimizar e prevenir a ocorrência de subsidência.

Ainda de acordo com a mesma autora, o controle de intrusão marinha, no caso de aquíferos costeiros, deve ser bem analisado, pois a ocorrência do fenômeno

de subsidência pode propiciar o avanço da água do mar nos aquíferos, causando sua degradação por conta da água salgada, podendo haver inundações sobre as áreas urbanas.

O planejamento espacial e a conservação ambiental andam juntos. Sem o planejamento espacial, ocorrem impermeabilizações excessivas nas zonas de infiltração da água, devido à intensa urbanização, que acaba contribuindo para modificações das relações das águas, proporcionando uma menor recarga. Já a conservação ambiental deve ser sempre levada em consideração, pois uma ocupação inadequada em áreas em que o solo é vulnerável, ou seja, não tem capacidade de degradar as substâncias tóxicas, causa a poluição do solo, contaminando as águas subterrâneas. Então, é importante ter um planejamento espacial da área, de acordo com o que o solo local permitir, levando sempre em consideração a conservação ambiental (LUNA, 2017).

A regulação da extração de água subterrânea e o controle de fluxo devem estar sempre ligados. Isso porque, havendo uma regulação, um controle e uma fiscalização da extração da água e dos poços perfurados, não acarretará no fluxo do aquífero, pois será retirada apenas a quantidade que o aquífero suporta e consegue repor, sem levá-lo à subsidência e ao esgotamento.

Dessa forma, o *design* da infraestrutura e da construção deve levar em consideração os poços já perfurados e os que futuramente serão. Eles devem ser bem localizados, construídos de maneira correta, com medidores de vazão, extraíndo a quantidade adequada de água que o aquífero em que se localiza suportar (LUNA, 2017).

Assim, Luna (2017) descreve a importância de saber as informações corretas da localidade dos poços e do sistema aquífero, empreendendo algumas ações em prática, para minimizar e prevenir a ocorrência do fenômeno.

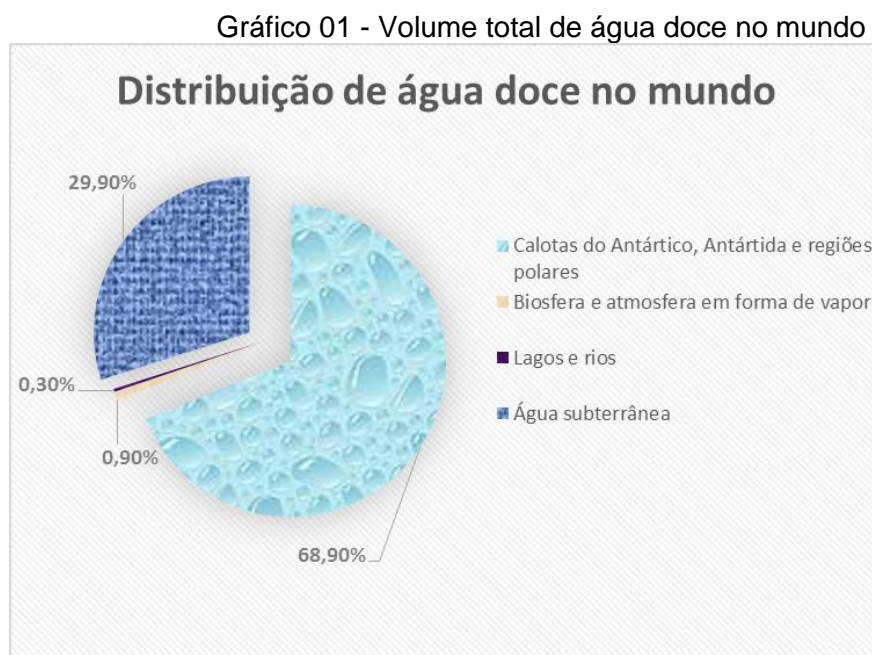
4.3 Subsidiência devido à exploração de água subterrânea

A superexploração dos recursos subterrâneos tem sido uma das causas de ocorrência de subsidiência, resultando danos relevantes em edificações, solo e até mesmo a exaustão dos mananciais.

Considerando a crescente demanda pela utilização de águas subterrâneas para fins de abastecimento de diversas regiões do Brasil e a possível intensificação das ocorrências de subsidiência decorrente desse mecanismo, é necessária a compreensão dos elementos envolvidos no desenvolvimento do fenômeno, bem como a disponibilidade hídrica, a formação geológica dos mananciais e os métodos de extração desse recurso subterrâneo.

4.3.1. Águas subterrâneas

O volume de água no Planeta Terra ocupa, aproximadamente, 70% da superfície, visto ser um dos recursos naturais mais abundantes disponíveis no planeta (FAVRETTO, 2016). De acordo com Tomaz (2011), como 97,5% da água disponível é salgada, somente 2,5% representa a água doce, que é a disponibilizada para o consumo humano, o que evidencia sua maior importância. Essa parcela de água doce encontra-se dividida conforme o gráfico 01.



Fonte: Adaptado de Tomaz (2011).

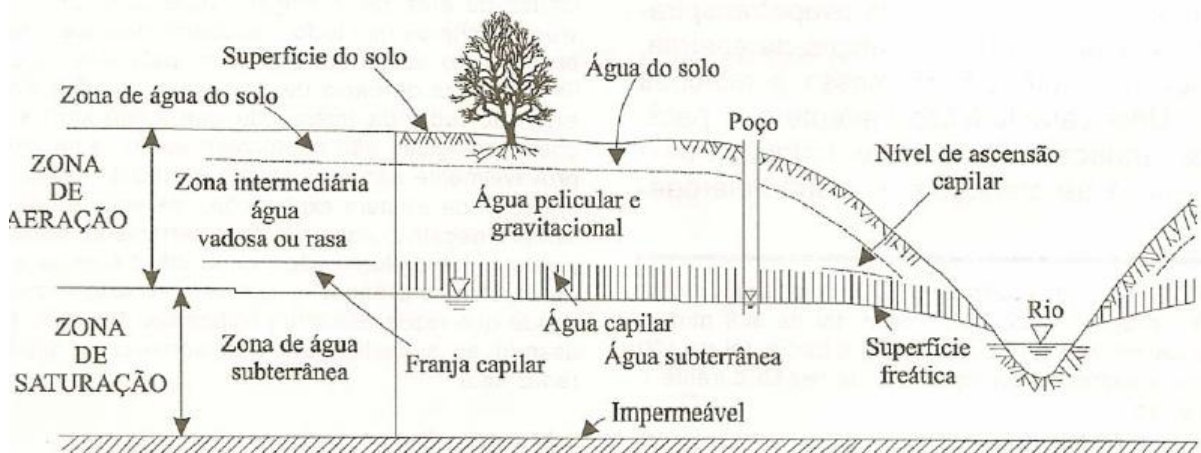
Ao observar o gráfico, Camponogara (2006) analisa que a parcela de água doce encontra-se dividida em: 68,9% estão sob forma sólida, 0,3% localizam-se em lagos e rios, 0,9% localizam-se em outros reservatórios e 29,9% são águas subterrâneas. É por esse motivo que a água subterrânea apresenta grande importância no abastecimento da população mundial.

A água subterrânea é toda a água que ocorre abaixo da superfície da terra, preenchendo as fraturas ou fissuras das rochas compactas ou os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares. Sendo submetida à força de gravidade e à força de adesão, desempenha um papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos (BORGHETTI; BORGHETTI. ROSA FILHO, 2004).

Conforme Todd (1959), águas subterrâneas são geralmente compreendidas como a água que ocupa todos os vazios de um estrato geológico. Para Guerra & Guerra (1997), água subterrânea é aquela que se infiltra nos solos e nas rochas, caminhando até o nível hidrostático.

Durante a infiltração da água no solo e no subsolo, encontramos uma distribuição do solo, que é dividido basicamente em duas zonas horizontais: zona não saturada e zona saturada (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000), conforme ilustrado na figura 03.

Figura 03 - Representação esquemática da distribuição da água no solo e subsolo



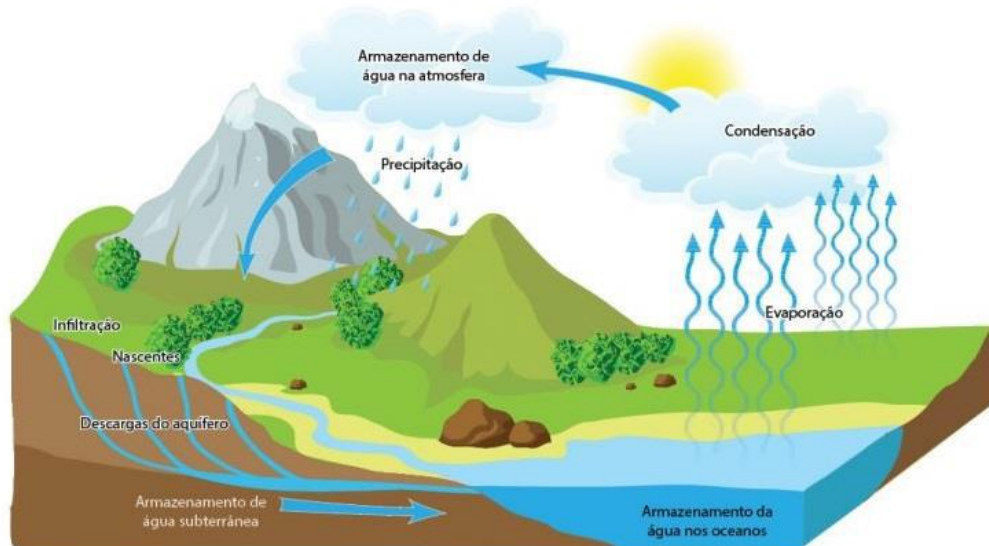
Fonte: Feitosa e Manoel Filho (2000).

A figura 03 é uma ilustração que representa a distribuição da água nas zonas de aeração e saturação. A zona não saturada, ou zona de aeração, situa-se entre o lençol freático e a superfície do terreno. Uma parcela da água sob a ação da força

de adesão ou de capilaridade fica retida nela, preenchendo os poros juntamente com os gases (principalmente ar e vapor d'água). A outra zona, a saturada, que se situa abaixo do lençol freático, é atingida pela água sob ação da gravidade, contendo todos os vazios existentes preenchidos por água (LUNA, 2017; MARETTI, 2008).

De acordo com Campos (2017), ao receber as precipitações, a superfície terrestre absorve essas águas através da infiltração do solo, da percolação e do escoamento superficial, contribuindo para a reposição hídrica. Essa movimentação recebe o nome de ciclo hidrológico, conforme ilustrado na figura 04.

Figura 04 - Ciclo hidrológico



Fonte: Revista Ecológico.

Para se condicionarem os estoques de água subterrâneas em volumes consideráveis para sua exploração, há a necessidade da reposição da água que é extraída, ou seja, o recarregamento dos aquíferos subterrâneos pela água das precipitações, que se integra no ciclo hidrológico (CAMPONOGARA, 2006).

4.3.2. Aquíferos

Aquífero é uma formação geológica do subsolo, que armazena água, e permite, em condições normais, sua movimentação em seu interior (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000). Rebouças *et al.* (2002) enfatizam que os aquíferos são reservatórios naturais de água subterrânea. Um aquífero pode ter extensão de poucos a milhares de quilômetros quadrados, ou pode, também, apresentar

espessuras de poucos a centenas de metros. Outro conceito refere-se a aquífero como sendo o material geológico capaz de servir de depositório e de transmissor da água ali armazenada (BORGHETTI; BORGHETTI. ROSA FILHO, 2004).

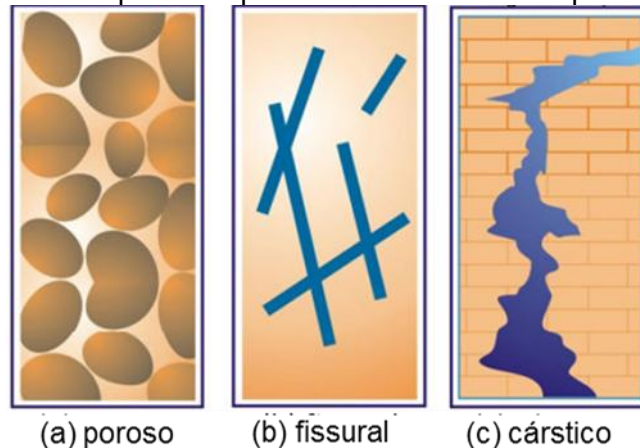
Segundo Feitosa; Manoel Filho (2000), em um sistema geológico, a natureza e a distribuição dos aquíferos são controladas pela litologia, estratigrafia e estrutura das formações geológicas. Ainda afirmam que o conhecimento da geologia de uma região, isto é, da sua litoestratigrafia e estrutura, é o ponto de partida para a compreensão da distribuição espacial dos aquíferos.

A litologia, ou seja, a sua constituição geológica, combina características como porosidade e permeabilidade. Trata da composição mineral, do grau de compactação dos sedimentos ou rochas e da distribuição de tamanho dos grãos constituintes do arcabouço geológico (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000). De acordo com Santos (2005), essa litologia é decorrente da sua origem geológica, que pode ser eólica, fluvial, glacial e aluvial (rochas sedimentares), metamórfica (rochas calcáreas) e vulcânica (rochas fraturadas).

A estratigrafia descreve as relações geométricas e cronológicas entre os vários elementos constituintes do sistema geológico, como camadas e formações de origem sedimentar. Já a estrutura diz respeito às características geométricas produzidas no sistema geológico por deformação após deposição ou cristalização, como é o caso das fissuras, juntas, falhas, fraturas e dobras (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2000).

Os aquíferos podem ser classificados de acordo com sua porosidade, isto é, a quantidade de poros ou vazios existentes numa superfície do corpo rochoso, sendo contínuos, de porosidade primária, como é o caso das rochas sedimentares (figura 06a); descontínuos, de porosidade secundária, rochas ígneas e metamórficas (figura 06b) e rochas calcáreas (figura 06c). A porosidade primária corresponde à porosidade devido aos vazios originais da rocha. A porosidade secundária é resultante das fissuras e cavidades de dissolução que se desenvolvem após a formação da rocha (SANTOS, 2005). A figura 05 ilustra os tipos de aquífero quanto à sua capacidade de transmissão de água de acordo com sua porosidade.

Figura 05 - Tipos de aquíferos de acordo com a porosidade



(a) poroso (b) fissural (c) cárstico
 Fonte: Borghetti; Borghetti. Rosa Filho (2004).

O aquífero poroso, também chamado de sedimentar ou granular, é formado por rochas sedimentares consolidadas ou inconsolidadas, solos arenosos e aluviões, onde a circulação da água acontece através dos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada. Devido ao grande volume de água que armazenam e por ocorrerem em grandes áreas, tornam-se os mais importantes aquíferos (LUNA, 2017).

O aquífero fissural ou fraturado, ainda segundo Luna (2017), é formado por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, duras e maciças, fazendo-se a circulação da água nas fraturas, fendas e falhas, abertas devido ao movimento tectônico. A capacidade dessas rochas de acumular água depende da quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação, permitindo a infiltração e o fluxo da água. Para haver um poço produtivo num aquífero com essa formação, depende da interceptação de fraturas capazes de conduzir a água. Na maioria das vezes, esse tipo fornece poucos metros cúbicos de água por hora.

O aquífero cárstico é formado por rochas calcáreas ou carbonáticas. A dissolução do carbonato pela água gera discontinuidades nas rochas que permitem a circulação da água. Essas discontinuidades podem gerar aberturas de grandes dimensões, criando verdadeiros rios subterrâneos. São aquíferos heterogêneos, descontínuos, com águas duras, com fluxo em canais (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004).

Assim, para uma litologia ser aquífera, ela deve ter seus poros saturados de água e permitir que a água armazenada tenha fácil circulação (REBOUÇAS *et al.*, 2002).

Conforme Feitosa; Manoel Filho (2000), os aquíferos podem ser caracterizados quanto à pressão das águas nas suas superfícies limítrofes, como:

- Aquífero não confinado: é também conhecido como livre, freático ou não artesiano. É constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão e limitado na base por uma camada impermeável, conforme mostrado na figura 07. A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. Os aquíferos livres têm a chamada recarga direta, devido à água precipitada atingir diretamente o reservatório livre. Assim, o seu nível de água varia segundo a quantidade de chuva.
- Aquífero confinado: também conhecido como aquífero artesiano. É constituído por uma formação geológica permeável, confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis, conforme indicado na figura 06. A pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água ascenda no poço para além da zona aquífera, ocorrendo o fenômeno artesianismo. O seu reabastecimento ou recarga, por meio das precipitações, dá-se preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície.

Figura 06 - Tipos de aquíferos quanto à pressão



Fonte: Borghetti; Borghetti Rosa Filho (2004).

De acordo com Santos (2005), pode-se ainda definir um terceiro tipo de aquífero, chamado aquífero semiconfinado. Nesse tipo de aquífero, encontra-se uma limitação na base, no topo, ou em ambos, por camadas cuja permeabilidade é bem menor do que a do próprio aquífero. O nível d'água nesse aquífero está, ainda assim, submetido à pressão maior que a atmosférica.

Independentemente do tipo de aquífero, a superexploração da água subterrânea pode desencadear um processo de subsidência. A exploração desses reservatórios subterrâneos deve estar vinculada à compatibilização com as leis naturais que governam a sua ocorrência e reposição e com a proteção das áreas de recarga (SANTOS, 2005).

4.3.3 Águas subterrâneas no Brasil

De acordo com a Agência Nacional das Águas – ANA, o Brasil possui uma riqueza de água doce distribuída em aquíferos com dimensões ainda não conhecidas, mas já existem projetos desenvolvidos para conhecer e estudar o volume de água subterrânea disponível e sua contribuição no território brasileiro.

A partir do relatório emitido pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH (2017), entende-se que o fluxo de águas superficiais e subterrâneas nas bacias hidrográficas acontece de forma semelhante ao ciclo hidrológico, sendo a maior parte das águas absorvidas na superfície terrestre oriunda de águas pluviais.

Segundo dados disponibilizados pela Agência, em 2017, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH instituiu, por meio da Resolução nº32 de 2003, a Divisão Hidrográfica Nacional, definindo doze regiões hidrográficas brasileiras (figura 07) a fim de facilitar o entendimento das águas subterrâneas e a disposição dos aquíferos.

Figura 07 – Mapa das divisões hidrográficas do Brasil



Fonte: Adaptado de ANA (2016).

Observa-se, no mapa ilustrado na figura 07, que as regiões foram divididas, levando em consideração as características semelhantes entre elas. O quadro 02 apresenta um breve detalhamento dessas regiões, de acordo com as informações

relevantes quanto à abrangência no território brasileiro, à disponibilidade desses recursos hídricos e aos principais aquíferos.

Quadro 02 – Regiões hidrográficas e os principais aquíferos

continua

REGIÃO HIDROGRÁFICA	ESTADOS	ÁREA (km ²)	PRINCIPAIS AQUÍFEROS
Amazônica	Acre, Amazonas, Rondônia, Roraima, Amapá, Pará e Mato Grosso	3.800.000	Alter do Chão, Barreiras, Içá, Solimões, Boa Vista – Areias Brancas, Parecis e Fraturado Norte
Tocantins – Araguaia	Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão, Mato Grosso e Distrito Federal	967.059	Furnas, Alter do Chão, Barreiras, Bambuí Cárstico, Itapecuru, Aquidauana, Ponta Grossa, Urucuaia – Areado e Fraturado Norte
Atlântico NE Ocidental	Maranhão e Pará	254.100	Barreiras, Corda e Itapecuru
Parnaíba	Ceará, Piauí e Maranhão	344.112	Cabeças, Poti-Piauí, Serra Grande e Fraturado Semiárido
Atlântico NE Oriental	Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas	287.348	Barreiras, Jandaíra, Açú, Serra Grande, Médio da Bacia do Araripe, Litorâneo Nordeste- Sudeste e Fraturado Semiárido
São Francisco	Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e Distrito Federal	640.000	Bambuí Cárstico, Marizal, Salitre, Superior da Bacia do Araripe, Urucuaia-Areado, Fraturado Centro-Sul e Fraturado Semiárido
Atlântico Leste	Bahia, Minas Gerais, Sergipe e Espírito Santo	374.677	Barreiras, Litorâneo Nordeste-Sudeste, Marizal, Salitre, São Sebastião e Fraturado Semiárido.
Uruguai	Rio Grande do Sul e Santa Catarina	174.612	Guarani e Serra Geral

Paraná	São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Goiás, Santa Catarina e Distrito Federal	879.860	Bauru-Caiuá, Guarani, Itararé, São Paulo e Serra Geral
Paraguai	Mato Grosso e Mato Grosso do Sul	1.100.000	Aquidauana, Furnas, Guarani, Pantanal, Parecis, Ponta Grossa e Serra Geral
Atlântico Sudeste	Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná	229.972	Barreiras, Furnas, Carste da Bacia do Paraná e Fraturado Centro-Sul
Atlântico Sul	São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul	185.856	Guarani, Litorâneo Sul, Rio Bonito e Serra Geral

Fonte: Adaptado de ANA (2014).

De acordo com o levantamento realizado pela ANA (2014), os aquíferos do território brasileiro são distribuídos e classificados em sistemas poroso, cárstico e fraturado. O sistema poroso, que ocupa mais de 42% da totalidade do território, é formado principalmente pelos aquíferos Alter do Chão, Bauru-Caiuá, Guarani e Içá. O sistema cárstico foi dividido em 26 aquíferos, sendo os principais: Bambuí Cárstico, Carste da Bacia do Paraná. Já o sistema fraturado abrange predominantemente os aquíferos Serra Geral e Fraturado Semiárido.

4.3.4 Meios de extração de águas subterrâneas

Mesmo perante a situação favorável do Brasil em relação à disponibilidade de água doce, o país enfrenta problemas relacionados ao abastecimento de água, o que se agrava diante do uso desordenado de ocupação do solo, dispondo de recursos hídricos superficiais cada vez mais escassos e contaminados. Com isso, as extrações das águas subterrâneas estão sendo usadas de forma significativa para atendimento das necessidades das populações (GIRALD, 2013).

O maior volume de água subterrânea extraída é destinado ao abastecimento público, mas também é utilizado para fins industriais e agrícolas. Diversas cidades do país dependem, integral ou parcialmente, da água subterrânea para abastecimento, como, por exemplo, Ribeirão Preto (SP), Recife (PE).

Tabela 02 – Quantidade de poços cadastrados separados pelos estados do Brasil

UF	QUANTIDADE	UF	QUANTIDADE	UF	QUANTIDADE
AC	883	MA	12.170	RJ	1.193
AL	2.865	MG	20.633	RN	11.715
AM	9.286	MS	2.087	RO	2.873
AP	105	MT	3.747	RR	1.868
BA	25.585	PA	9.251	RS	19.034
CE	23.833	PB	19.363	SC	7.893
DF	282	PE	30.981	SE	5.550
ES	1.009	PI	29.987	SP	32.816
GO	5.695	PR	28.578	TO	1.199

Fonte: Siagas (2019).

A tabela 02 apresenta a quantidade de poços cadastrados na base de dados atualizada do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS, totalizando 310481 poços. A quantidade de poços perfurados cadastrados fornece informações sobre a exploração dos mananciais subterrâneos, porém, segundo o Ministério do Meio Ambiente – MMA, essa quantia corresponde a, aproximadamente, 20% do número de poços clandestinos.

De acordo com a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS (2019), a construção de poços para captação de água subterrânea deve seguir restritamente os procedimentos descritos nas normas NBR 12.212/1992 e NBR 12.244/1992. Para a execução da perfuração e do uso do poço, é necessária a solicitação de uma outorga aos órgãos gestores dos recursos hídricos.

Segundo Diniz (2010), a escolha sobre qual método de extração de água deve ser aplicado depende da capacidade da formação do aquífero e da profundidade do nível estático da água.

Registros datados de aproximadamente 2000 aC relatam o aproveitamento da água subterrânea através da escavação do solo até uma profundidade abaixo do nível freático construindo os chamados poços (VASCONCELOS, 2014; DINIZ, 2010).

A palavra “poço”, de acordo com sua utilização, pode estar associada a duas finalidades básicas. Um pesquisador o considera como uma “janela” de acesso

direto ao aquífero, sendo a fonte de muitas informações, já, para a população em geral, significa uma fonte de abastecimento hídrico (VASCONCELOS, 2014).

Todd (1959) apresenta a definição de poços de água como sendo "um furo ou cava, geralmente vertical, escavado no terreno para trazer água subterrânea até a superfície". Considerando a forma de construção dos poços, eles podem ser classificados como sendo "poços rasos" e "poços perfurados". Um poço raso pode ser escavado, perfurado, cravado ou lavado. Já os poços profundos são os que se caracterizam por serem perfurados por métodos de percussão rotativos hidráulicos ou rotativos reversos.

Cedestrom (1964) e Costa (1986) salientam que poços escavados são chamados de cacimba ou cacimbão e são feitos com ferramentas manuais. Também informam que esses tipos podem ser revestidos com tijolo ou pedra, possuindo diâmetro variável desde 1 até 5m, sendo encontrados também alguns com 10m. Costa (1986) alega que os poços amazonas denotam um tipo "sofisticado" de cacimba, construído com um pré-filtro que atua como filtro, sendo o fundo tamponado ou utilizado também como filtro, possuindo diâmetros superiores a 5 m.

As cacimbas são diferenciadas dos cacimbões pela falta de revestimento em sua parede. As cacimbas são consideradas como poços escavados, sem revestimento, sendo bastante comuns em leitos de rios ou nas margens de reservatórios de águas superficiais. As características das dimensões dessas unidades de captação são variadas, tanto em diâmetro como em profundidade. Existe um tipo particular de cacimba, encontrado nas margens dos reservatórios superficiais (açudes) e em leitos de rios ou riachos secos, são as "cacimbas temporárias", possuindo profundidades muito rasas (VASCONCELOS, 2014), conforme ilustrado na figura 08.

Figura 08 – Poços cacimbas temporários



Fonte: Vasconcelos (2014).

Na figura 08 encontramos dois exemplos de cacimbas temporários: A) localizado no leito de uma drenagem seca (Lagoa do Barro - Piauí); B) localizado ao lado de um reservatório de superfície (Coreaú - Ceará). Já os cacimbões são todos os poços que possuem diâmetro superior a meio metro e inferior a cinco metros e que possuam um revestimento lateral. Em algumas situações, esses poços são fechados com tampas, sendo comum, em alguns cacimbões, a redução do diâmetro de acordo com a profundidade (VASCONCELOS, 2014).

Segundo Diniz (2010), poços escavados manualmente, em geral, podem ser construídos com mão de obra local, pouco qualificada. Já a perfuração de poços tubulares frequentemente requer equipamentos mais sofisticados e considerável experiência.

Um poço tubular tem sua estrutura revestida por tubos, podendo ser de diversos materiais, como aço, ferro, ou policloreto de vinila (PVC). Presta-se a captações de aquíferos rasos e pouco produtores, e, também, aqueles de grande profundidade e diâmetro, produtores de expressivas vazões, atendendo, assim, às mais diversas situações. Quando são construídos corretamente, têm uma vida útil longa, prestando-se ao abastecimento por várias dezenas de anos, como é o caso do Poço tubular “Pitombas”, no município de Governador Rosado, Rio Grande do Norte, perfurado em 1937 e até hoje produtor de água. (DINIZ, 2010).

As formas verticais para captação de água subterrânea por meio de poços tubulares, em muitos casos, são as mais eficientes. Esses poços são conhecidos

popularmente como "poços artesianos" ou "poços profundos" (VASCONCELOS, 2014).

Poço artesiano é um poço perfurado por furadeiras gigantes, usando uma broca. Possui diâmetro pequeno e grande profundidade. O fenômeno de "artesianismo" trata da elevação do nível de água no poço. O sistema ocorre através de perfuração no solo atingindo o aquífero confinado, gerando pressões, o que faz com que ocorra a elevação da água subterrânea até a superfície do terreno, sendo este classificado como poço jorrante, como exemplificado na figura 09 (TODD, 1959; HIRATA, 2002).

Figura 09 – Poços tubulares do tipo jorrante, em Cristino Castro - Piauí



Fonte: Vasconcelos (2014).

Quando a água não atingir a superfície, será classificado como não jorrante ou semiartesiano, pois a pressão não foi suficiente e necessita de uma bomba para trazê-la à superfície (TODD, 1959; HIRATA, 2002). A figura 10, a seguir, apresenta as características de um poço artesiano.

Figura 10 – Poço artesiano



Fonte: Revista Super Interessante, p.36, São Paulo, set. 2002.

A figura 10 mostra um esquema do solo perfurado de um poço artesiano, que possui uma válvula que controla a vazão da água; uma bomba para puxar a água para superfície quando a pressão não for suficiente; um tubo liso que é o meio de condução da água para a superfície; filtros para filtrar algumas impurezas menores e permitir a entrada de uma pequena quantidade de água.; cascalho que é usado como pré-filtro e retém as impurezas maiores e, no final, aquífero onde se localiza a zona subterrânea preenchida por água (HIRATA, 2002).

4.3.5 Tipos de subsidência

A subsidência associada à extração de águas subterrâneas pode ocorrer em sistemas de aquíferos sedimentares e cársticos, que serão descritos a seguir. Segundo Cabral, Santos e Pontes Filho (2006), é resultante do bombeamento do fluido que reduz a pressão dos poros que ajuda a suportar as camadas subjacentes do solo, como consequência do rebaixamento do nível da água.

4.3.5.1 Subsidiência em aquíferos sedimentares

A ocorrência de subsidiência em aquíferos sedimentares, também chamados de aquíferos porosos, geralmente afeta grandes áreas e compreende a forma mais extensa e custosa de subsidiência, em nível mundial. O mecanismo de subsidiência que ocorre em aquíferos sedimentares devido à exploração dos recursos hídricos subterrâneos é de fácil compreensão, quando se considera que, em um cubo de solo, em que atua constantemente uma carga geostática, vale o Princípio das Tensões Efetivas - PTE proposto por Terzaghi:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} p$$

onde:

σ'_{ij} é uma componente do tensor de tensões efetivas;

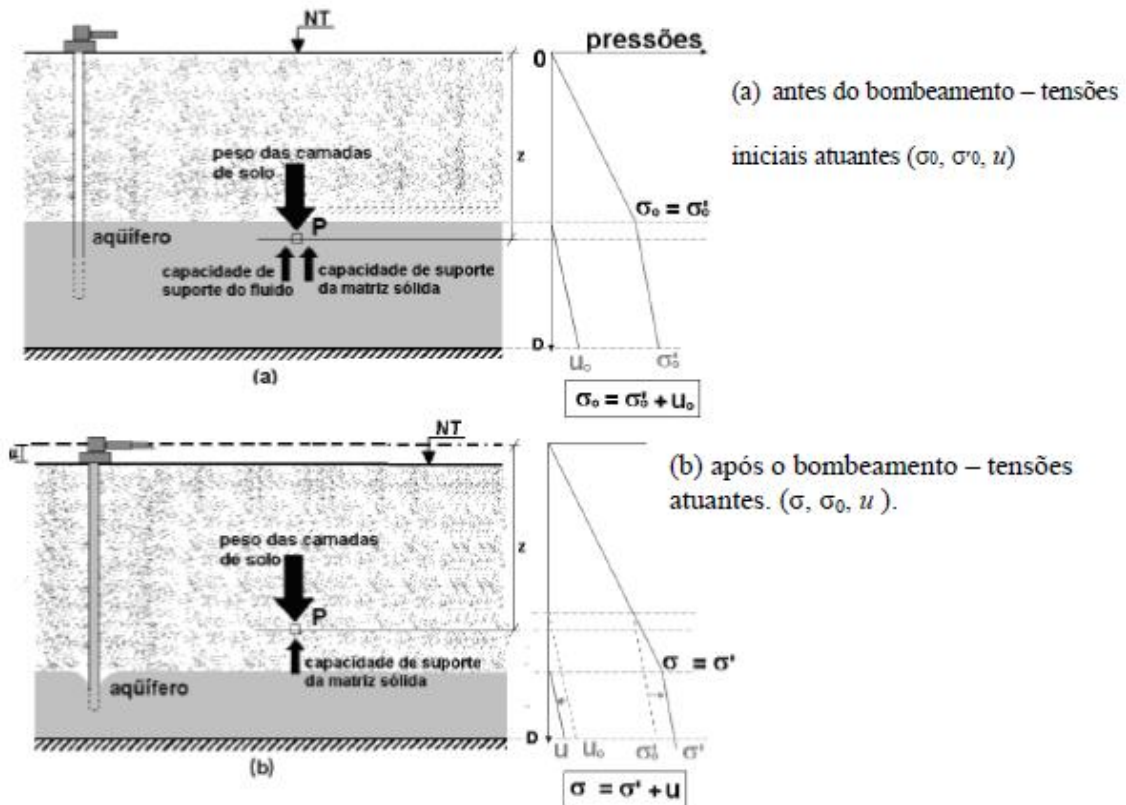
σ_{ij} é uma componente do tensor de tensões totais;

δ_{ij} é a função Delta de Kronecker; e

p é a pressão no poro com fluido.

De acordo com Santos (2005), o PTE constitui o elo entre a exploração de água subterrânea e o fenômeno de subsidiência. Dentro do aquífero, a pressão neutra u , ou seja, a pressão no poro preenchido com água equivale à carga hidráulica. Quando a água é explotada do aquífero, a carga piezométrica e a pressão neutra diminuem e a tensão efetiva no aquífero aumenta, uma vez que a pressão total permanece constante. Isso é esquematizado na figura 11.

Figura 11 – Aquífero sedimentar não confinado



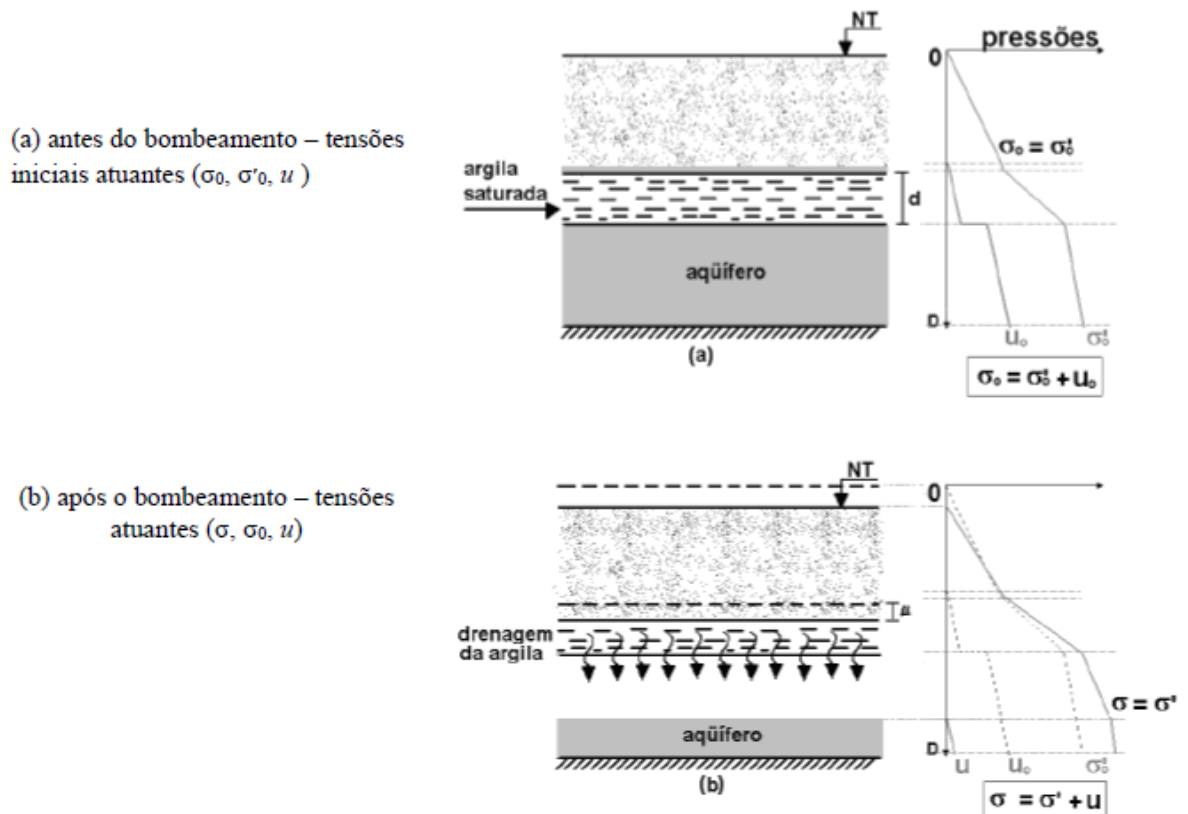
Fonte: Santos (2005).

No determinado ponto P dentro do aquífero, localizado na figura 11(a), antes do bombeamento, o solo está sujeito às tensões iniciais (σ_0, σ'_0, u), tal que o peso das camadas de solo é suportado pela matriz sólida e pelo fluido simultaneamente. Com a contínua retirada dos recursos hídricos subterrâneos e o rebaixamento do nível da água, verifica-se que, no mesmo ponto P, figura 11(b), a carga geostática passa a ser suportada apenas pela matriz sólida. Esse aumento na tensão efetiva resulta na compressão do solo e consequente subsidência (SANTOS, 2005). De acordo com Scott (1979), considerando que a contração volumétrica de materiais granulares é quase irrecuperável, a superfície de subsidência que ocorre como resultado da redução na pressão do fluido em uma camada subjacente pode raramente ser revertida.

Esse fenômeno pode acontecer tanto em aquíferos não confinados quanto em aquíferos confinados. Para essa segunda situação, a figura 12 apresenta um esquema da ocorrência do fenômeno. Ao rebaixar o nível do aquífero inferior, a camada de argila drena a água e ocorre um recalque que acarreta um rebaixamento do nível do terreno (NT) (CABRAL, SANTOS e PONTES FILHO, 2006).

Os solos de granulação fina registram “na memória” as máximas tensões experimentadas por sua estrutura, que são comumente conhecidas como tensão de pré-consolidação. A tensão de pré-consolidação, σ'_p , constitui o fator condicionante do comportamento da estrutura sólida do solo, nesse tipo de material, em resposta às solicitações de carga. Quando a tensão efetiva reduz e a pressão neutra aumenta, o solo expande elasticamente. Por outro lado, quando a tensão efetiva aumenta e a pressão neutra diminui, duas situações podem ser esperadas: a tensão efetiva é inferior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um deslocamento vertical recuperável ou elástico, ou, ao contrário, a tensão efetiva é superior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um significativo rearranjo que resulta num deslocamento vertical irrecuperável ou inelástico (SANTOS, 2005).

Figura 12 – Aquífero sedimentar confinado



Fonte: Santos (2005).

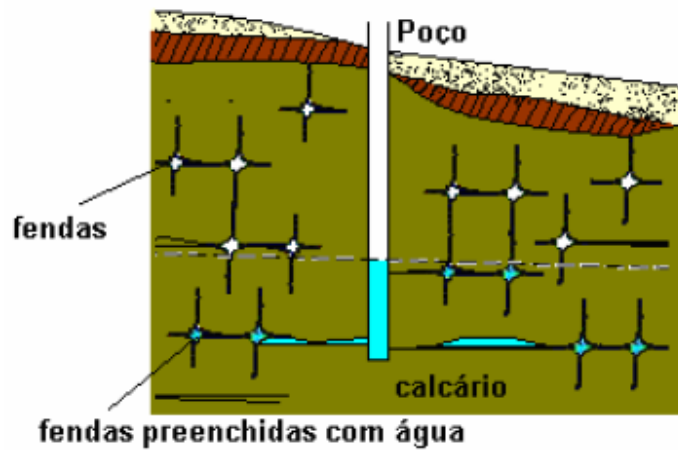
Esse aumento na tensão efetiva resulta na compressão do solo e consequente subsidência. De acordo com Scott (1979), considerando que a contração volumétrica de materiais granulares é quase irrecuperável, a superfície de

subsidiência que ocorre como resultado da redução na pressão do fluido em uma camada subjacente pode raramente ser revertida.

4.3.5.2 Subsidiência em aquíferos cársticos

A água presente num aquífero do tipo cárstico é encontrada preenchendo as fraturas e as fendas abertas por dissolução dos calcários, a carstificação, como mostrado na figura 13 (CABRAL, SANTOS e PONTES FILHO, 2006).

Figura 13 – Esquema de um aquífero cárstico



Fonte: Santos (2005).

De acordo com a definição apresentada anteriormente, pode-se concluir que o fenômeno se origina na presença da água percolante dentro do aquífero. Entretanto, a água da chuva, em combinação com o gás carbônico da atmosfera, constitui um meio ácido que tem a propriedade de dissolver, entre outras, as rochas compostas de carbonatos (SANTOS, 2005).

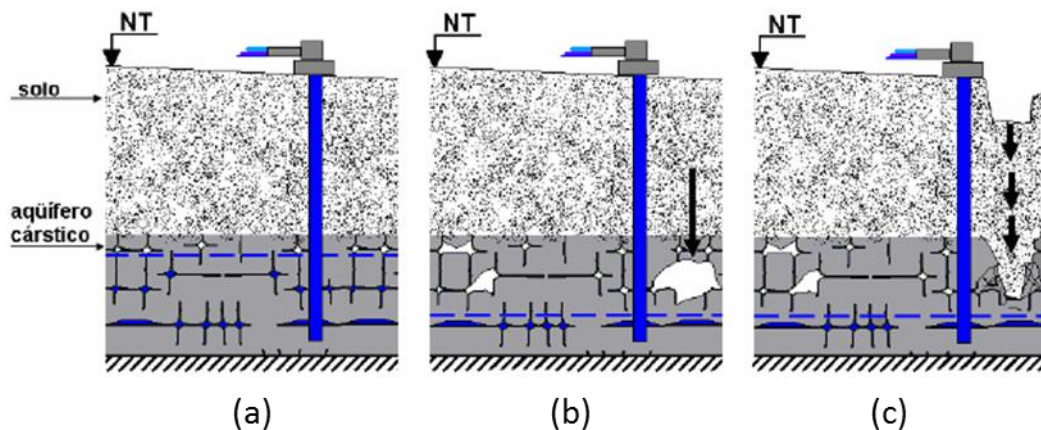
Segundo Cabral, Santos e Pontes Filho (2006), a carstificação é um fenômeno natural e frequente em regiões de ocorrência de geologia cárstica. Com relação às condições de armazenamento e fluxo d'água de um aquífero cárstico, esse fator é decorrente da dissolução da massa carbonática ao longo dos seus planos de fraturamento. Por esse motivo, ao contrário dos demais aquíferos, apresenta variação no volume de armazenamento, ao longo do tempo, à medida que ocorre desgaste da massa carbonática pelos processos de dissolução.

O processo de subsidiência em aquíferos cársticos é discutido amplamente por pesquisadores de todo o mundo. Lamont-Black *et al.* (2002) realizaram um

estudo sobre os problemas de subsidência potencialmente atribuídos à carstificação do calcário e apresentaram um esquema para o modelo conceitual dos mecanismos de subsidência. De acordo com Lamont-Black *et al.* (2002), a dissolução do calcário acontece quando estão presentes simultaneamente os seguintes componentes: calcário, não saturação de água, energia para movimentação da água através do sistema, abastecimento de água. Assim, os frequentes colapsos das superfícies em ambientes cársticos constituem sérios problemas ambientais tanto em áreas rurais como em áreas urbanas.

Conforme Santos (2005), do ponto de vista do processo físico, a subsidência de um aquífero cárstico acontece, normalmente, após um rebaixamento excessivo do nível d'água que resulta num agravamento das condições naturais e aumento na dissolução da rocha, queda da pressão da água subterrânea e consequente aceleração do carreamento de grãos do solo. Essa sequência de acontecimentos pode resultar, em alguns casos, no desabamento do teto das cavidades seguido do rebaixamento do solo da superfície, conforme mostrado na figura 14.

Figura 14 – Colapso em aquífero cárstico



Fonte: Santos (2005).

Na figura 14(a) tem-se o início do bombeamento. Em seguida, após um tempo de exploração, na figura 14(b), ocorre o rebaixamento excessivo do nível d'água, que provoca o carregamento do material carstificado e o surgimento de novas cavidades. Já na figura 14(c), houve um desmoronamento das paredes e do teto da cavidade e da camada de solo sobrejacente.

Essas cavidades podem ter tamanhos variados, o que torna a “dimensão” do possível rebaixamento de difícil previsão, podendo resultar em desmoronamentos de

camadas sobrejacentes e surgimento de cavidades superficiais de alguns metros de profundidade e de algumas dezenas de metros de diâmetro (SANTOS, 2005).

4.3.6 Fatores que contribuem para a ocorrência de subsidência

De acordo com Santos (2005), as áreas susceptíveis de ocorrência de subsidência são identificadas a partir de algumas características relacionadas com os aspectos geológicos, hidrogeológicos e o uso e ocupação do solo, que podem desencadear o processo de subsidência.

Quadro 03 – Informações sobre os fatores contribuintes para ocorrência de subsidência

FATORES CONTRIBUINTES		
GEOLÓGICOS	HIDROGEOLÓGICOS	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO
. Obtenção de dados e informações necessárias acerca da existência de carste coberto e materiais argilosos em uma região.	. Realização de estudos relacionados com os dados hidrológicos.	. Obtenção de dados de densidade demográfica e realização de estudos sobre áreas de ocupação.
. Identificação de alguns aspectos relacionados com a natureza do carste, localização espacial dos materiais, possíveis alterações topográficas e movimentação dos solos presentes na área da região de estudo.	. Associação de informações quanto as características pluviométricas locais, interferindo na recarga do aquífero e a intensidade de bombeamento de água através da quantidade de poços.	. Ocupação desordenada devido ao aumento da demanda populacional, geralmente, despreza as características geológicas e hidrogeológicas do ambiente, ocupando áreas indevidas.
. Análise de áreas propícias a ocorrência de subsidência do solo.	. Identificação de áreas de risco, com possibilidades de rebaixamento brusco do nível da água subterrânea.	. O aumento da carga de edificações em zonas frágeis interligado com a exploração de águas subterrâneas, potencializam o risco de subsidência.

Fonte: Adaptado de Santos (2005).

O quadro 03 descreve a importância da realização dos estudos sobre a geologia, a hidrogeologia e o uso e a ocupação do solo de áreas de interesse, pois tais estudos possibilitam a obtenção de resultados que, não analisados e mitigados corretamente, potencializam o risco de ocorrência de subsidência.

4.4 Casos no Brasil

Segundo Cabral, Santos e Pontes Filho (2006), a subsidência pode ocorrer tanto em aquíferos cársticos quanto em aquíferos porosos, também chamados de sedimentares.

O município de Cajamar, em São Paulo, enfrentou uma crise hídrica em meados de 1986, ocasionando um aumento desordenado da exploração de águas subterrâneas através de poços profundos, a fim de atender às necessidades por parte da companhia de abastecimento público e grandes indústrias regionais. De acordo com Maretti (2008), a captação de águas subterrâneas no aquífero cártico, nessa região, foi responsável pela ocorrência de uma catástrofe, em grande proporção. Formou-se uma cratera com, aproximadamente, 13 metros de profundidade e 31 metros de diâmetro, atingindo diversas casas, com desabamento, trincas e recalques. A figura 15, obtida pelo Diário de Cajamar (2018), revela a cratera formada no local. A Redação do Diário descreve que a cidade ficou conhecida como a “cidade do buraco”. Após a reconstrução do local, foi edificada uma praça.

Figura 15 – Registro da subsidência em Cajamar, 1986



Fonte: Diário de Cajamar (2018).

De acordo com os estudos realizados por Botelho (2008), a cidade de Sete Lagoas, em Minas Gerais, também vivenciou uma insuficiência de recursos hídricos, provocada pelo processo de expansão urbana. Para atender às necessidades da cidade, em 1940, iniciou-se a exploração das camadas subterrâneas, visto que o município assenta-se sobre um aquífero carbonatado com calcários e dolomitos. Ao longo de mais de 60 anos, a atividade de exploração de águas subterrâneas intensificou, aumentando significativamente a quantidade de poços. O autor afirma que a exploração inadequada no aquífero cártico ocasionou sérios problemas entre os anos de 1940 e 2000, como subsidências e rachaduras no solo (figura 16), com registros de rebaixamento com aproximadamente 30 metros de profundidade.

Figura 16– Registro da subsidência ocorrida em Sete Lagoas, 1988



Fonte: A.B.Silva (1995).

De acordo com o estudo apresentado por Hindi *et al.* (2002), a exploração dos recursos subterrâneos na região do aquífero cárstico situado no município de Colombo, em Curitiba, vem sendo utilizada como fonte do abastecimento público da região. A exploração, através de 11 poços situados nas bacias dos rios Fervida e Tumiri, produziu, em alguns pontos, subsidências e colapsos de terreno que causaram graves avarias em várias residências, depressões e rachaduras nas vias que cortam essa região e o secamento ou diminuição de vazão de fontes naturais e de rios. O autor ainda descreve outra ocorrência também no Paraná, no município de Bocaiuva do Sul, uma cratera de 5 metros de diâmetro e 5 metros de profundidade.

A análise feita por Luna (2017) destaca que, em ambos os casos descritos acima, as áreas são geologicamente caracterizadas por aquíferos cársticos. O quadro 04 apresenta outros exemplos de casos de subsidência ocorridos em regiões brasileiras.

Quadro 04 - Exemplos de outros casos de subsidência ocorridos no Brasil

LOCALIDADE	ANO DE OCORRÊNCIA	CONSEQUÊNCIAS
Lapão, Bahia	2008	Aparecimento de rachaduras em ruas e edificações. Subsidência do terreno em 15cm e fissuras no solo com 20cm de largura.
Almirante Tamandaré, Paraná	1992 2007	Vários pequenos afundamentos de terreno, trincas de edificações, inclinações de edificações, descolamento entre alvenaria e peças estruturais. Apresenta forma elipsoidal, com dimensões atingindo 50 metros de comprimento, 40 metros de largura e cerca de 30 metros de profundidade
Teresina, Piauí	1999	Grande afundamento com comprometimento total de várias edificações.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2019).

Ressalta-se, ainda, que já aconteceram, por todo o país, outros eventos similares de afundamentos em terrenos cársticos e sedimentares, mas, por não terem causado danos maiores e perceptíveis, não obtiveram repercussão e a devida análise e registros técnicos por parte de especialistas (LUNA, 2017).

5 ANÁLISES

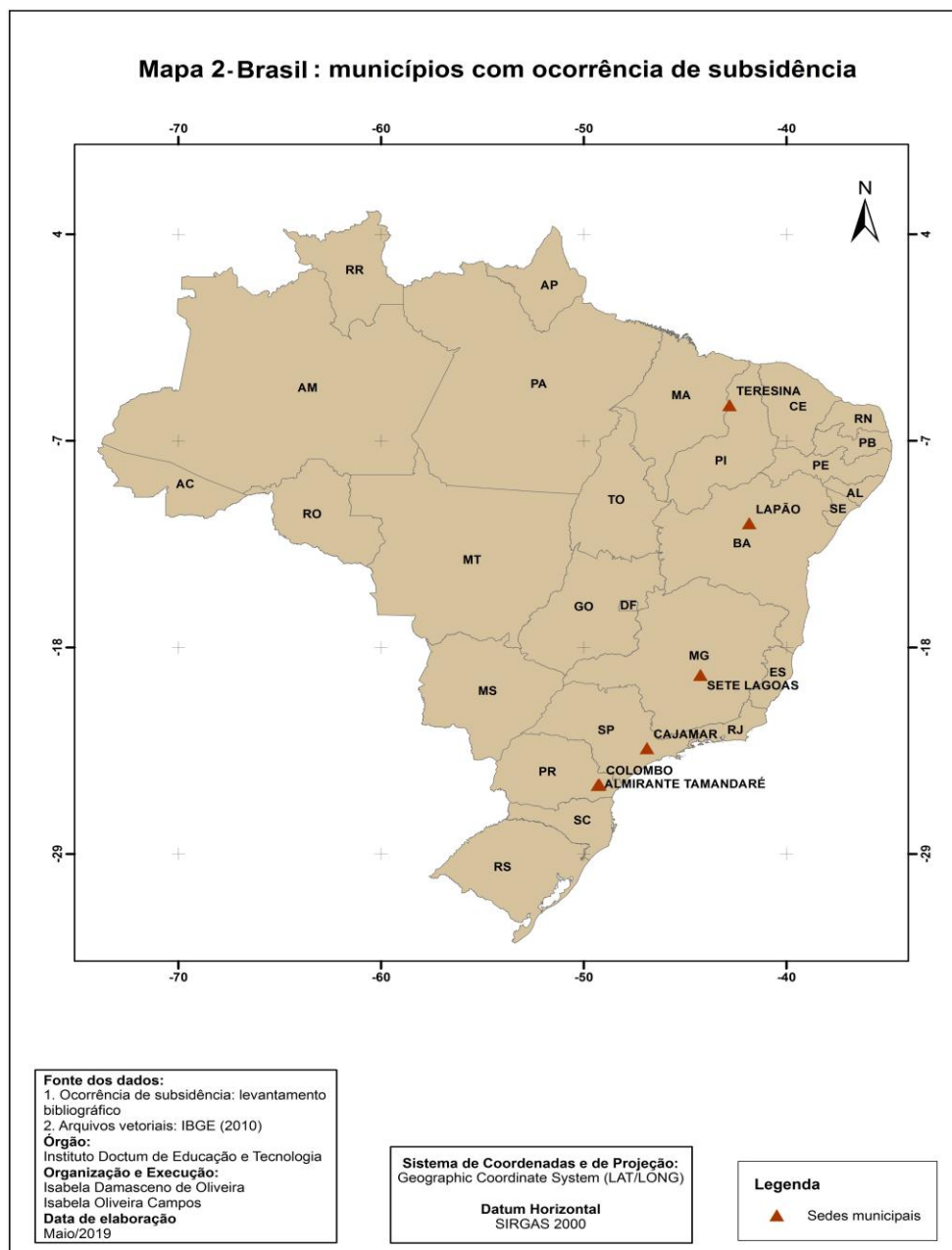
Neste capítulo apresentam-se as análises dos fatores que contribuem para a ocorrência de subsidência correlacionados com os registros de casos ocorridos no Brasil que foram expostos na revisão bibliográfica deste trabalho.

Baseando-se na distribuição dos aquíferos brasileiros e suas respectivas classificações geológicas e hidrogeológicas, foram identificadas áreas de risco de subsidência por exploração de água subterrânea, que apresentam características similares das regiões de ocorrência.

5.1 Caracterização das regiões em estudo

Os dados apresentados a seguir descrevem as características geológicas, hidrogeológicas e informações sobre o uso e ocupação do solo indicado pela densidade demográfica das regiões em estudo. Com o auxílio do *software* de sistemas de informações geográficas ArcGIS, elaborou-se um mapa (figura 17) localizando as cidades brasileiras com casos registrados e expostos anteriormente neste trabalho.

Figura 17 – Municípios com ocorrência de subsidência



Fonte: Elaborado pelas autoras (2019).

As informações locais relacionadas com extensão territorial, habitantes e densidade demográfica foram obtidas a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2019). A população é estimada pelo IBGE, pois o último censo demográfico ocorreu no ano de 2010.

Os índices pluviométricos e o comportamento da temperatura ao longo do ano das regiões foram obtidos através de pesquisas no site de meteorologia Climatempo (2019), ressaltando-se que as médias climatológicas são os valores calculados a partir de uma série de dados de 30 anos observados.

Foi contabilizada a quantidade de poços perfurados nas regiões em estudo, a partir de registros atualizados em 16 de abril de 2019, de poços cadastrados no site da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2019). As pesquisas foram realizadas por áreas (figura 18), considerando que essa área refere-se à região analisada.

Figura 18 – Entrada de dados para busca de poços cadastrados

PESQUISA ÁREA

The interface is titled "PESQUISA ÁREA". It contains two main sections for data entry, one for point P1 and one for point P2. At the top, there are two radio buttons: "Coordenadas Geográficas" (which is selected) and "UTM". Below this, for each point, there is a "Hemisfério" dropdown menu currently set to "S". Underneath, there are input fields for "Latitude" and "Longitude", each with sub-fields for degrees (°), minutes ('), and seconds ("). A "Pesquisar" button is positioned at the bottom center of the form. The background shows a map with a compass rose in the bottom left corner.

Fonte: CPRM (2019).

Para concluir a busca por região, é necessária a entrada das coordenadas geográficas de dois pontos distantes. As coordenadas das diferentes regiões foram localizadas com o auxílio do *Google Earth*.

- Sete Lagoas – Minas Gerais

O município de Sete Lagoas está localizado na área central do Estado de Minas Gerais. A região possui uma extensão territorial de 536,64 km², uma população estimada de 237.286 pessoas e densidade demográfica de 398,32 hab/m². As coordenadas geográficas dos dois pontos necessários para a obtenção das quantidades de poços registrados foram: latitude 1 - 19° 21' 26" S; longitude 1 - 44° 20' 58" W; latitude 2 - 19° 33' 47" S; longitude 2 - 44° 06' 30" W.

Geologicamente, o município de Sete Lagoas é composto por rochas carbonáticas, com espessura de 600 a 800 metros. O aquífero cárstico dessa região, denominado aquífero Bambuí, constitui-se na única fonte de abastecimento de água para consumo correspondendo à faixa de rochas carbonáticas, por onde os fluxos e armazenamento de água dissolvem o material rochoso (BOTELHO, 2008).

O clima da região é caracterizado como tropical semiúmido, com um inverno seco e ameno e um verão quente e chuvoso. A temperatura média anual mínima é de 15°C e máxima de 28°C e apresenta precipitação média anual entre 1.200 a 1.300 mm. A distribuição das chuvas não é homogênea, havendo, às vezes, 4 a 5 meses de estiagem, nos meses de maio a setembro.

Por estarem inseridos em um ambiente cárstico, os estágios da evolução do relevo estão diretamente ligados à quantidade das chuvas. Em climas úmidos ou semiúmidos, como o de Sete Lagoas, a precipitação é o fator principal da formação do relevo, devido à dissolução das rochas, em superfície e sub superfície através da ação da água (BOTELHO, 2008).

Segundo o mesmo autor, embora o município esteja localizado nos domínios da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, em seu território, não há cursos de água com vazão elevada. A presença de rochas carbonáticas proporciona fluxos de água subterrâneos, através de cavernas e condutos. Com isso, o recurso de águas subterrâneas vem sendo explorado na região. Assim, constatou-se que há 260 poços cadastrados, sendo estes usados para abastecimento da população e irrigação.

- Colombo – Paraná

O município de Colombo situa-se na Região Metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná. A região possui uma extensão territorial de 197,79 km², uma população estimada de 240.840 pessoas e densidade demográfica de 1.076,72 hab/m². As coordenadas geográficas dos dois pontos necessários para a obtenção

das quantidades de poços registrados foram: latitude 1 - 25° 15' 18" S; longitude 1 - 49° 15' 59" W; latitude 2 - 25° 19' 16" S; longitude 2 - 49° 09' 57" W.

O sistema aquífero cárstico, situado em Colombo, também conhecido como "Aquífero Karst", é constituído pelas rochas metacarbonáticas. Na área das bacias, as rochas carbonáticas encontram-se cobertas por um manto de intemperismo de espessura variável. O fluxo subterrâneo é regido por fatores climáticos, ressaltando-se as zonas carstificadas onde os canais de dissolução e cavidades formam os dutos para a passagem e armazenamento da água (HINDI *et al.*, 2002).

Esse sistema aquífero vem sendo explotado em zonas urbana e rural do município através de poços situados nas bacias dos rios Fervida e Tumiri perfurados pela Companhia de Saneamento do Estado do Paraná - SANEPAR, para complementar o abastecimento público de cidade e para fins de utilização doméstica, totalizando 86 poços legalizados cadastrados na CPRM.

O clima da região é classificado como pluvial quente-temperado, sendo sempre úmido, com temperatura média anual de 17°C, com média máxima de 25°C e média mínima de 11°C. A precipitação média anual é de 1.500 a 1.550 mm, com chuvas concentradas nos meses de dezembro a fevereiro, sendo os meses mais seco junho a agosto.

- Lapão - Bahia

O município de Lapão localiza-se no estado da Bahia, na microrregião de Irecê, conhecida nacionalmente por suas potencialidades agrícolas. A região possui uma extensão territorial de 642,88 km², uma população estimada de 27.170 pessoas e densidade demográfica de 42,38 hab/km². As coordenadas geográficas dos dois pontos necessários para a obtenção das quantidades de poços registrados foram: latitude 1 - 11° 21' 17" S; longitude 1 - 41° 59' 29" W; latitude 2 - 11° 32' 21" S; longitude 2 - 41° 38' 50" W.

A região está inserida nas bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré, afluentes do rio São Francisco. Apresenta aquífero cárstico constituído predominantemente por rochas carbonáticas. A porção central do aquífero, na região de Irecê/Lapão, possui um domínio estrutural caracterizado pela presença de intensos cavalgamentos, com dobramentos e falhamentos (MAIA; DIAS NETO; GOMES, 2010). Esse sistema aquífero vem sendo explotado para fins de abastecimento local através de 366 poços cadastrados.

A precipitação média anual da região varia de 620 a 680 mm. Normalmente, nos meses de abril a outubro, quase não há chuva, formando, assim, um período de grande estiagem. Sua temperatura média anual máxima é de 29°C e mínima de 19°C.

- Cajamar – São Paulo

O município de Cajamar localiza-se na região metropolitana de São Paulo. A região possui uma extensão territorial de 131,39 km², uma população estimada de 75.638 pessoas e densidade demográfica de 488,18 hab/m². As coordenadas geográficas dos dois pontos necessários para a obtenção das quantidades de poços registrados foram: latitude 1 - 23° 19' 09" S; longitude 1 - 46° 57' 57" W; latitude 2 - 23° 24' 36" S; longitude 2 - 46° 48' 12" W.

Segundo Marreti (2008), o município pertence à Bacia do Alto Tietê, sendo abastecido totalmente pelas águas subterrâneas captadas em estruturas cársticas, constatando-se o cadastramento de 101 poços tubulares.

A zona afetada pela subsidência assenta-se sobre calcários muito pouco metamorfisados (metacalcarenitos, metadolomitos), capeados por espesso pacote de solo residual (BOTTURA; ALBUQUERQUE FILHO, 1990).

A precipitação média anual é de 1.500 a 1.600 mm, com períodos de chuvas maiores nos meses de setembro a março. A temperatura média anual máxima é de 24°C e mínima de 15°C.

- Almirante Tamandaré – Paraná

O município de Almirante Tamandaré localiza-se no estado do Paraná. A região possui uma extensão territorial de 194,74 km², uma população estimada de 117.168 pessoas e densidade demográfica de 529,95 hab/m². As coordenadas geográficas dos dois pontos necessários para a obtenção das quantidades de poços registrados foram: latitude 1 - 25° 18' 03" S; longitude 1 - 49° 23' 19" W; latitude 2 - 25° 20' 58" S; longitude 2 - 49° 15' 17" W.

A região de Almirante Tamandaré apresenta estrutura geomorfológica com afloramento de rochas carbonáticas e a presença de aquíferos cársticos, chamado de "Aquífero Karst". Nessa região, as rochas carbonáticas encontram-se cobertas por um manto de intemperismo com cerca de 20 m de espessura. Os solos têm textura argilosa e são bem desenvolvidos (BITTENCOURT *et al.*, 2002). O abastecimento de água do município vem sendo complementado através da escavação de poços tubulares poços, sendo que 52 poços foram cadastrados.

O município apresenta precipitação média anual de 1.500 a 1.570 mm, com distribuição homogênea das chuvas durante todo o ano, possuindo temperatura média anual máxima de 24°C e mínima de 14°C.

- Teresina – Piauí

Teresina é a capital e o município mais populoso do estado brasileiro do Piauí. A região possui uma extensão territorial de 1.391,046 km², uma população estimada de 861.442 pessoas e densidade demográfica de 584,94 hab/m². As coordenadas geográficas dos dois pontos necessários para a obtenção das quantidades de poços registrados foram: latitude 1 - 5° 01' 32" S; longitude 1 - 42° 55' 09" W; latitude 2 - 5° 10' 44" S; longitude 2 - 42° 41' 07" W.

A base geológica do estado do Piauí é formada, em cerca de 84% do território, pela Bacia do Parnaíba, englobando as Formações Piauí e, predominantemente, Pedra de Fogo. Na Formação Piauí, os calcários são dolomíticos, com espessura de 1,5 a 4,5 cm. A Formação Pedra de Fogo é caracterizada por uma considerável variedade de rochas (sílex, calcário, folhelhos, siltito). A intercalação dos calcários com outras rochas, típica da bacia sedimentar do Parnaíba, aumenta o poder de dissolução das águas sob as rochas (LOPES; SILVA A.C.; SILVA, J.C., 2014).

A exploração das águas subterrâneas ocorre de forma intensa e prolongada no aquífero cárstico da região, contendo 1.233 poços cadastrados na base de dados da CPRM.

A precipitação média anual da região é de 1.350 a 1.410 mm, com pouca a quase nenhuma chuva entre os meses de junho a outubro. O clima da região é tropical quente e úmido, possuindo temperatura média anual mínima de 22°C e máxima de 33°C.

5.2 Monitoramento de áreas de risco

O aumento da exploração das águas subterrâneas e o rebaixamento persistente do nível de água tem despertado atenção ao risco de ocorrência de subsidência. Dessa forma, o monitoramento dos aquíferos sujeitos à exploração através de poços é importante, pois fornece informações sobre taxa de bombeamento, níveis de recargas e características do solo, minimizando, assim, os impactos e a ocorrência desse fenômeno (BATISTA, 2015).

De acordo com Maretti (2008), a simulação da subsidência não é facilmente aplicada e deve ser realizada através de programas computacionais capazes de representar os aspectos sobre fluxo de água no aquífero e a compactação do solo. São alguns exemplos de monitoramento: GPS, simulações numéricas e programas computacionais.

Sendo assim, o processo de monitoramento pode ser utilizado como importante ferramenta de gestão dos recursos subterrâneos, para previsão de cenários futuros.

Os estudos realizados por Villar (2008) e Santos (2005) mostram que, respectivamente, as regiões de Ribeirão Preto- SP e Recife – PE são áreas com risco iminente do fenômeno de subsidência que estão sendo monitoradas há alguns anos, mas ainda não apresentaram registros efetivos de ocorrência. As duas regiões utilizam o processo de exploração de águas subterrâneas, para fins de abastecimento público e privado.

Os dados abaixo caracterizam os municípios de risco, seguindo a objetividade do conteúdo exposto no item 5.1.

- Ribeirão Preto – São Paulo

O município de Ribeirão Preto está situado na região nordeste do estado de São Paulo. Conforme os dados do IBGE (2019), a região possui uma extensão territorial de 650,92 km², uma população estimada de 694.534 pessoas e densidade demográfica de 928,92 hab/km². As coordenadas geográficas dos dois pontos necessários para a obtenção das quantidades de poços registrados foram: latitude 1 - 21° 07' 04" S; longitude 1 - 47° 55' 43" W; latitude 2 - 21° 15' 38" S; longitude 2 - 47° 41' 16" W.

É geologicamente formado pelo Aquífero Guarani localizado na Bacia Geológica Sedimentar do Paraná. Trata-se de um aquífero poroso formado principalmente de arenitos (VILLAR, 2008).

A precipitação média anual é de 1.420 a 1.500 mm e a temperatura média anual máxima é de 28°C e mínima de 18°C (CLIMATEMPO, 2019)

De acordo com o Departamento de Água e Esgotos de Ribeirão Preto – DAERP (2019), todo o abastecimento público do município é realizado através de poços tubulares profundos. Ao todo, são 514 poços cadastrados na base de dados da CPRM.

- Recife – Pernambuco

O município de Recife é a capital do estado de Pernambuco. Segundo os dados do IBGE (2019), a região possui uma extensão territorial de 218,84 km², uma população estimada de 1.637.834 pessoas e densidade demográfica de 7.039,64 hab/m². As coordenadas geográficas dos dois pontos necessários para a obtenção das quantidades de poços registrados foram: latitude 1 - 08° 02' 01" S; longitude 1 - 34° 56' 47" W; latitude 2 - 08° 05' 03" S; longitude 2 - 34° 52' 54" W.

A geologia da região é marcada pela bacia sedimentar costeira Pernambuco – Paraíba. É formada por uma sequência de rochas sedimentares, predominando os arenitos (MANOEL FILHO, 2004).

A precipitação média anual é de 2.380 a 2.450 mm, com pouca chuva nos meses de outubro, novembro e dezembro. Possui temperatura média anual mínima de 21°C e máxima de 29°C (CLIMA TEMPO, 2019)

De acordo com a ANA (2014), o sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana do Recife é bastante complexo. Em grande parte da região, complementa-se o abastecimento com a utilização de manancial subterrâneo e uma minoria capta exclusivamente em poços. Nos registros da CPRM foram localizados 1.768 poços cadastrados.

5.3 Compilação de dados dos municípios em estudo

A compilação dos dados referentes os tipos de aquíferos, população, extensão territorial, densidade demográfica, índice pluviométrico e a quantidade de poços foram relacionados no quadro 05, a fim de facilitar a análise das possíveis semelhanças entre eles.

Quadro 05 - Características dos municípios brasileiros quanto aos possíveis fatores de subsidência

continua

LOCALIDADE	AQUÍFERO	POPULAÇÃO (hab)	EXTENSÃO TERRITORIAL (km ²)	DENSIDADE DEMOGRÁFICA (hab/m ²)	ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO (mm)	QUANT. DE POÇOS
Sete Lagoas (MG)	Cárstico	237.286	536,64	398,32	1.200 a 1.300	260
Colombo (PR)	Cárstico	240.840	197,79	1.076,72	1.500 a 1.550	86
Lapão (BA)	Cárstico	27.170	642,88	42,38	620 a 680	366

Cajamar (SP)	Cárstico	75.638	131,39	488,18	1.500 a 1.600	101
Almirante Tamandaré (PR)	Cárstico	117.168	194,74	529,95	1.500 a 1.570	52
Teresina (PI)	Cárstico	861.442	1.391,046	584,94	1.350 a 1.410	1.233
Recife (PE)	Sedimentar	1.637.834	218,84	7.039,64	2.380 a 2.450	1.768
Ribeirão Preto (SP)	Sedimentar	694.534	650,92	928,92	1.420 a 1.500	514

Fonte: Elaborado pelas autoras (2019).

Com a compilação dos dados encontrados no quadro 05, é possível visualizar características em comum entre as localidades, principalmente em relação à formação geológica dos aquíferos e à densidade demográfica, conforme os resultados apresentados no item posterior.

6 RESULTADOS

As características analisadas das regiões relatadas acima reportam uma semelhança em aspectos cruciais, que são possíveis desencadeadores da ocorrência do fenômeno de subsidência do solo.

Na caracterização das regiões em estudo, foram consideradas informações referentes à densidade demográfica e à extensão territorial. Observa-se que regiões como Colombo (PR), Cajamar (SP) e Almirante Tamandaré (PR) possuem uma pequena área, em extensão territorial, porém, com grande densidade demográfica e possíveis áreas com ocupações irregulares, devido ao crescimento desordenado.

As densidades de poços em determinadas regiões são reflexo dos fatores demográficos e climáticos. Logo, áreas com grande número populacional tendem à necessidade de uma maior captação de água subterrâneas através de poços, para fins de abastecimento total ou parcial da população, como é o exemplo de Teresina (PI), Sete Lagoas (MG), Recife (PE) e Ribeirão Preto (SP). Contudo, existem casos de regiões com pequeno número populacional, mas que necessitam de grande quantidade de poços para abastecimento único ou complementar, pois apresentam baixas precipitações, como é o caso de Lapão (BA). Ressalta-se que a busca realizada na CPRM fornece somente a quantidade de poços cadastrados. Assim,

como não é possível contabilizar os poços irregulares, é provável que o número real de poços seja maior.

Observa-se, também, que, em relação aos aspectos geológicos, todos os municípios em que já ocorreu o fenômeno de subsidência localizam-se em sistemas de aquíferos cársticos, despertando atenção para outras localidades que ocupam sistemas semelhantes a esse.

O quadro 06 faz uma verificação entre as regiões de estudo com os tipos de aquíferos, a existência de registros de ocorrência de subsidência, o monitoramento da área e a exploração de água subterrânea.

Quadro 06 – Verificação da ocorrência de subsidência nos municípios em estudo

LOCALIDADE	AQUÍFERO		REGISTROS DE SUBSIDÊNCIA		ÁREA MONITORADA		EXPLOTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEAS	
	CÁRSTICO	SEDIMENTAR	SIM	NÃO	SIM	NÃO	SIM	NÃO
Sete Lagoas (MG)	X		X			X	X	
Colombo (PR)	X		X			X	X	
Lapão (BA)	X		X			X	X	
Cajamar (SP)	X		X			X	X	
Almirante Tamandaré (PR)	X		X			X	X	
Teresina (PI)	X		X			X	X	
Recife (PE)		X		X	X		X	
Ribeirão Preto (SP)		X		X	X		X	

Fonte: Elaborado pelas autoras (2019).

Sobre os resultados obtidos, destaca-se a semelhança entre as características geológicas dos locais em que ocorreram a subsidência do solo e as áreas de risco que estão em processo de monitoramento, registrando a presença de aquíferos cársticos e sedimentares, estando o fenômeno de subsidência relacionado à exploração de água subterrânea. Existem poucos estudos que registram a ocorrência de subsidência em bacias sedimentares, mesmo sendo susceptível em regiões de bombeamento demasiado de águas subterrâneas. Todavia, a partir das

análises realizadas neste trabalho, constata-se que a presença de monitoramento nos dois municípios expostos acima aponta indicativos de ocorrência da subsidência em aquíferos desse tipo.

Observou-se que, nos estudos de formação cársticas que apresentaram ocorrência de subsidência, não foram apresentados indícios de monitoramento, ao contrário dos trabalhos referentes às bacias sedimentares, em que há o monitoramento, mesmo ainda não tendo ocorrido o fenômeno de subsidência.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados apresentados, concluímos que o objetivo geral e os objetivos específicos foram atingidos.

A intensa exploração do recurso hídrico subterrâneo, a recarga precária dos aquíferos, as características geológicas e a crescente e densa ocupação são fatores que indicam a possibilidade de ocorrência do fenômeno de subsidência do solo.

Diante do problema exposto e do possível risco a que as populações dessas áreas fragilizadas estão expostas, propõe-se um levantamento de dados e estudos preventivos e meios para monitoramento, a fim de possibilitar um bombeamento sustentável de água subterrânea, controlando a intensidade de captação, monitorando o rebaixamento de nível de água e verificando a eficiência de recarga do aquífero. Além disso, há necessidade de estudos relacionados ao crescimento populacional e à ocupação desordenada em áreas de risco.

Com os estudos apresentados nesta pesquisa, espera-se contribuir para a divulgação e o aprimoramento de novos estudos sobre o tema. Acredita-se que o incentivo ao monitoramento e à mitigação das causas de ocorrência do fenômeno seja capaz de minimizar os danos, reduzindo as ocorrências de colapsos estruturais causados pela subsidência do solo em áreas com captação de águas subterrâneas.

Sendo assim, a sugestão para trabalhos futuros está relacionada com o aprimoramento de novas pesquisas sobre o monitoramento de áreas de risco, com desenvolvimento de métodos físicos e matemáticos, como ferramentas de simulação de futuras ocorrências do fenômeno de subsidência.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno / Agência Nacional de Águas. --Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/> Acesso em: 22 mar. 2019.

ARAÚJO, M. L. M. A influência do aquífero carste em Almirante Tamandaré. Disponível em: http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/PUBLICACOES/geografar_a_influencia_do_carste_em_at.pdf Acesso em: 23 fev. 2019

BITTENCOURT, A. V. L. *et al.* Aspectos da qualidade de águas do aquífero cárstico em Almirante Tamandaré - PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, Natal, RN **Anais...** Natal, RN: ABAS, 2002.

BORGHETTI, N. R. B; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani. A verdadeira integração dos países do Mercosul.** Curitiba: Editora dos autores 2004. 214p.

BOTELHO, L. A. L. **A Gestão dos Recursos Hídricos em Sete Lagoas/MG:** uma abordagem a partir da evolução espaço temporal da demanda e da captação de água. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

BOTTURA, J. A.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Condicionantes hidrológicos no processo de subsidência em Cajamar, SP. In: VI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Porto Alegre, RS., 1990.

CABRAL, J. J. da S. P.; SANTOS, S. M.; PONTES FILHO, I. D. S. Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 3, p. 147-157, 2006.

CAMPONOGARA, I. **Vulnerabilidade natural no sistema aquífero guarani e análise de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas em Quaraí, BR E Artigas, UY.** 2006. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria, RS, 2006.

CAMPOS, G. A. **Estudo da viabilidade econômica do aproveitamento da água pluvial em uma residência.** 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Faculdade Doctum de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

CEDERSTROM, D. J. **Água Subterrânea, uma Introdução.** Rio de Janeiro: Aliança para o progresso, 1964.

CLIMATEMPO. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/1307/colombo-pr> Acesso em: 16 abr. 2019

COSTA, W. D., 1986. O Aquífero Aluvial e sua Exploração Racional. *In*: IV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Brasília - ABAS/DNAEE/ DNPM.

DAVIS, M. L.; MASTEN, S. J. **Princípios de engenharia ambiental**. Porto Alegre: AMGH, 2016.

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTOS DE RIBEIRÃO PRETO – DAERP, 2019 Disponível em: <https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/daerp/i04deondevem.php>. Acesso em: 14 mai. 2019.

DINIZ, J. A. O. Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável no Nordeste brasileiro: alternativas de captações para o abastecimento integrado de pequenas comunidades. *In*: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 16., 2010, Natal, RN **Anais...** Natal, RN: ABAS, 2010.

FAVRETTO, C. R. **Captação da água da chuva para utilização na lavagem de veículos**: Estudo de caso para o município de Pelotas - RS. 2016. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas Centro de Engenharias, Pelotas, 2016. Cap. 2.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. Noções de hidroquímica. *In*: _____ (Coord.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID/UFPE, 2000. p. 81-108.

GALLOWAY, D. L.; BURBEY, T. J. Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. **Hydrogeology Journal**, v. 19, n. 8, p. 1459-1486, 2011.

GIRALDI, A. A água que ninguém vê. Unespciência. Disponível em: http://www.abas.org/arquivos/unespciencia_052013.pdf Acesso em: 24 mai. 2019.

GUERRA, A. T. & GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997.

HINDI, E. C. *et al.* Características hidrogeológicas do aquífero cárstico em Colombo (PR) e impactos ambientais resultantes da sua exploração. *In*: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 12., 2002, Natal, RN **Anais...** Natal, RN: ABAS, 2002.

HIRATA, R. O que é um poço artesiano. **Revista Super Interessante**, São Paulo, set. 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/colombo/panorama>. Acesso em: 16 abr. 2019

LAMONT-BLACK, J., YOUNGER, P.L., FORTH, R.A., COOPER, A.H., BONNIFACE, J.P. A decisionlogic framework for investigating subsidence problems potentially attributable to gypsum karstification. *In*> **Engineering Geology** n. 65, p.205-215, 2002.

LOPES, L. S. O.; SILVA, A. C.; SILVA, J. C. B. Riscos geológicos; eventos de subsidências no município de Teresina – PI. **Revista Geonorte**. Edição especial 4, v. 10, n. 6, p. 197-201, 2014.

LUNA, R. M. R. de. **Investigação da ocorrência de subsidência do solo em região de exploração de aquíferos na planície costeira da cidade do Recife em Pernambuco**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil.) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2017.

MAIA, P. H. P.; DIAS NETO, B.; CORREA-GOMES, L.C. Análise geológica e estrutural das fissuras e subsidências no carste de Lapão. **Cadernos de Geociências**, v. 7, n. 2, 2010. Disponível em: cadernosdegeociencias.igeo.ufba.br Acesso em: 23 fev. 2019

MANOEL FILHO, J. Exploração de água subterrânea em zona urbana: caso da grande recife – PE. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 13., 2004, Natal, RN **Anais...** Natal, RN: ABAS, 2004.

MARETTI, E. P. **Subsidência de solo deflagrada por intervenções antrópicas: Estudo de caso em área situada na porção nordeste da cidade universitária, Butantã, São Paulo - SP**. 2008. Dissertação (Mestre em Tecnologia Ambiental) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, São Paulo, 2008.

MINGORANCE, F. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS, Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000.

OLIVEIRA, L. M. de. **Acidentes Geológicos Urbanos**. Curitiba: MINEROPAR - Serviço Geológico do Paraná, 2010.

PROKOPOVICH, N.P. Genetic classification of land subsidence. In: Evaluation and Prediction of Subsidence. Engineering Foundation Conference in Pensacola Beach, Florida. Proc. Am. Soc Civil Engrs., New York, N.Y., p.389-399, 1978.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2. ed. São Paulo: Escrituras, 2002. 748 p.

SANTOS, A.R. **Terrenos Calcários: Áreas de risco geológico para a Engenharia e para o Meio Ambiente**, 2008.

SANTOS, S. M. dos. **Investigação metodológicas sobre o monitoramento da subsidência do solo devido à extração de água subterrânea**. 2005. 231 f. - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SCOTT, R.F. **Subsidence – A Review. Evaluation and Prediction of Subsidence**. New York: ASCE, p.1-25, 1979.

TERZAGHI, K.T. **Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage**. Deuticke, Wien, 399p, 1925.

TODD, D. K. **Hidrologia de águas subterrâneas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1959.

TOMAZ, P. Conceito de aproveitamento de água de chuva. *In*: TOMAZ, Plínio. **Aproveitamento de água de chuva em áreas urbanas para fins não potáveis**. [S. l.: s. n.], 2011. Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/livros-digitais/>. Acesso em: 11 abr. 2019.

TUCCI, C. E. M; HESPANHOL, I.; NETTO, O. de M. C. **Gestão da água no Brasil**. Brasília: UNESCO, 2001. 156p.

VASCONCELOS, M. B. Poços para captação de águas subterrâneas: Revisão de conceitos e proposta de nomenclatura. *In*: Congresso brasileiro de águas subterrâneas, 18., 2014, Natal, RN **Anais...** Natal, RN: ABAS, 2014.