

MAPEAMENTO E ANÁLISE DAS SUBSIDÊNCIAS NO BRASIL

MAPPING AND ANALYSIS OF SUBSIDENCE IN BRAZIL

MAPEAMIENTO Y ANÁLISIS DE LAS SUBSIDENCIAS EN BRASIL

// RESUMO

AUTOR

Thyago Anthony Soares Lima 

Silvio Jorge Coelho Simões 

FILIAÇÃO INSTITUCIONAL
UNIVERSIDADE ESTADUAL
PAULISTA (UNESP)

E-MAIL

thyagoanthonysoares@yahoo.com.br

silvio.simoese@unesp.br

DATA DE SUBMISSÃO: 14/10/24

DATA DE APROVAÇÃO: 16/01/25

DOI: 10.12957/GEOUERJ.2025.87736



E-ISSN 1981-9021

ESTE É UM ARTIGO DE ACESSO ABERTO
DISTRIBUÍDO SOB OS TERMOS DA LICENÇA
CREATIVECOMMONS BY-NC-SA 4.0, QUE
PERMITE USO, DISTRIBUIÇÃO E REPRODUÇÃO
PARA FINS NÃO COMERCIAIS, COM A CITAÇÃO
DOS AUTORES E DA FONTE ORIGINAL E SOB
A MESMA LICENÇA.

Este estudo apresenta uma revisão de 75 eventos de subsidência registrados bibliograficamente no Brasil, destacando sua importância como um risco geológico de alcance global e suas significativas implicações ambientais. A maior concentração de ocorrências encontra-se na região Sudeste (36%), seguida pelo Nordeste (30%), Sul (21%) e Centro-Oeste (12%), enquanto a região Norte registra apenas um caso isolado. As planícies costeiras e fluviais concentram 35% dos eventos, enquanto áreas com presença de minerais cársticos representam 40%, e se impondo como subsidência natural mais comum no país com 37% dos casos totais, evidenciando elevada suscetibilidade dessas áreas ao colapso. Aproximadamente 52% das subsidências são atribuídas a atividades humanas, sendo a mineração responsável por 24% dos casos e a extração de água subterrânea por 18%. Adicionalmente, foi identificada uma carência de monitoramento adequado nessas áreas, com o emprego limitado de tecnologias avançadas, como sensoriamento remoto, GPS e modelagem geológica. Os resultados reforçam a urgência de aprimorar estratégias de monitoramento e implementar medidas eficazes de mitigação, oferecendo uma base técnica robusta para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão de riscos e à prevenção de futuros episódios de subsidência no Brasil.

Palavras-chave: Subsidência; Risco geológico; Minerais Cársticos; Impactos da mineração; Exploração de Água Subterrânea.

// ABSTRACT

This study presents a review of 75 subsidence events documented in Brazil, highlighting their significance as a global geological hazard and their substantial environmental implications. The highest concentration of occurrences is in the Southeast region (36%), followed by the Northeast (30%), South (21%), and Central-West (12%), while the North region reports only one isolated case. Coastal and fluvial plains account for 35% of the events, whereas areas with karstic minerals represent 40%, emerging as the most common type of natural subsidence in the country, with 37% of all cases, underscoring the high susceptibility of these areas to collapse. Approximately 52% of subsidence events are attributed to human activities, with mining responsible for 24% and groundwater extraction for 18%. Additionally, a lack of adequate monitoring in these areas was identified, with limited use of advanced technologies such as remote sensing, GPS, and geological modeling. The findings underscore the urgency of improving monitoring strategies and implementing effective mitigation measures, providing a robust technical foundation for public policy formulation aimed at risk management and preventing future subsidence episodes in Brazil.

Keywords: Subsidence; Geological Risk; Karst Minerals; Mining Impacts; Groundwater Extraction

// RESUMEN

Este estudio presenta una revisión de 75 eventos de subsidencia documentados en Brasil, destacando su importancia como un riesgo geológico de alcance global y sus significativas implicaciones ambientales. La mayor concentración de ocurrencias se encuentra en la región Sudeste (36%), seguida por el Nordeste (30%), el Sur (21%) y el Centro-Oeste (12%), mientras que la región Norte registra solo un caso aislado. Las llanuras costeras y fluviales concentran el 35% de los eventos, mientras que las áreas con minerales kársticos representan el 40%, consolidándose como el tipo de subsidencia natural más común en el país, con el 37% de los casos totales, evidenciando una elevada susceptibilidad de estas áreas al colapso. Aproximadamente el 52% de las subsidencias se atribuyen a actividades humanas, siendo la minería responsable del 24% de los casos y la extracción de agua subterránea del 18%. Además, se identificó una carencia de monitoreo adecuado en estas áreas, con un uso limitado de tecnologías avanzadas como el teledetección, GPS y modelado geológico. Los resultados refuerzan la urgencia de mejorar las estrategias de monitoreo e implementar medidas efectivas de mitigación, ofreciendo una base técnica sólida para la formulación de políticas públicas orientadas a la gestión de riesgos y a la prevención de futuros episodios de subsidencia en Brasil.

Palabra Clave: Subsidencia; Riesgo geológico; Minerales Kársticos; Impactos de la minería; Explotación de Agua Subterránea.

INTRODUÇÃO

A subsidência do solo é o afundamento gradual ou abrupto da superfície terrestre devido à extração de água, petróleo, gás natural ou minerais, aumentando a tensão subterrânea e rebaixando a superfície (Jackson et al., 1997; Galloway & Burbey, 2011). Pode ser causada por atividades humanas, como exploração de recursos e urbanização, ou processos naturais, como terremotos e formação de sumidouros (Schmidt et al., 2015). Seus impactos incluem danos estruturais, inundações e perdas econômicas, especialmente em áreas densamente povoadas (Huang et al., 2012; Bendarzsevszkij et al., 2021).

A subsidência pode afetar 1,6 bilhão de pessoas até 2040, com 635 milhões em risco elevado de inundações e mais de US\$ 8 trilhões do PIB global expostos a danos (Herrera-García et al., 2021). Países como Índia, China, Egito, México, EUA e Holanda são os mais impactados, especialmente devido à extração de água subterrânea e minerais em megacidades como Cidade do México, Jacarta e Bangkok (Schmidt et al., 2015; Motagh et al., 2008; Liu et al., 2017). A relação entre extração de água, extração mineral com subsidência é documentada desde a década de 1940 (Terzaghi, 1943) e foi reconhecida como prioridade pela UNESCO em 1965 (UNESCO & IASH, 1970).

A subsidência no Brasil é um problema crescente que afeta áreas urbanas e rurais, reduzindo a capacidade de armazenamento de água, aumentando o risco de inundações e deteriorando infraestruturas. Esse fenômeno compromete a segurança hídrica e a qualidade de vida, pois a menor infiltração no solo eleva o escoamento superficial e o risco de inundações durante chuvas intensas. Além disso, fissuras e deslizamentos ameaçam edificações, estradas e sistemas de transporte. Na zona rural, a exploração intensiva de recursos hídricos agrava a degradação do solo, prejudicando a infraestrutura e dificultando o desenvolvimento sustentável e o acesso a serviços básicos como água potável e saneamento.

A subsidência do solo no Brasil é um fenômeno significativo, porém subestimado no debate público e político. Apesar de existir ampla produção científica, técnica e jornalística sobre o tema, ainda há lacunas em estudos integrados que abordem suas implicações geológicas e ambientais em diferentes escalas. Colapsos, danos à infraestrutura, alagamentos e rompimentos de tubulações frequentemente não são diretamente associados à subsidência, dificultando respostas efetivas. Este trabalho busca caracterizar geológica e ambientalmente a subsidência, mapear casos registrados e contribuir para estratégias mitigatórias mais eficazes.

MATERIAIS E MÉTODOS

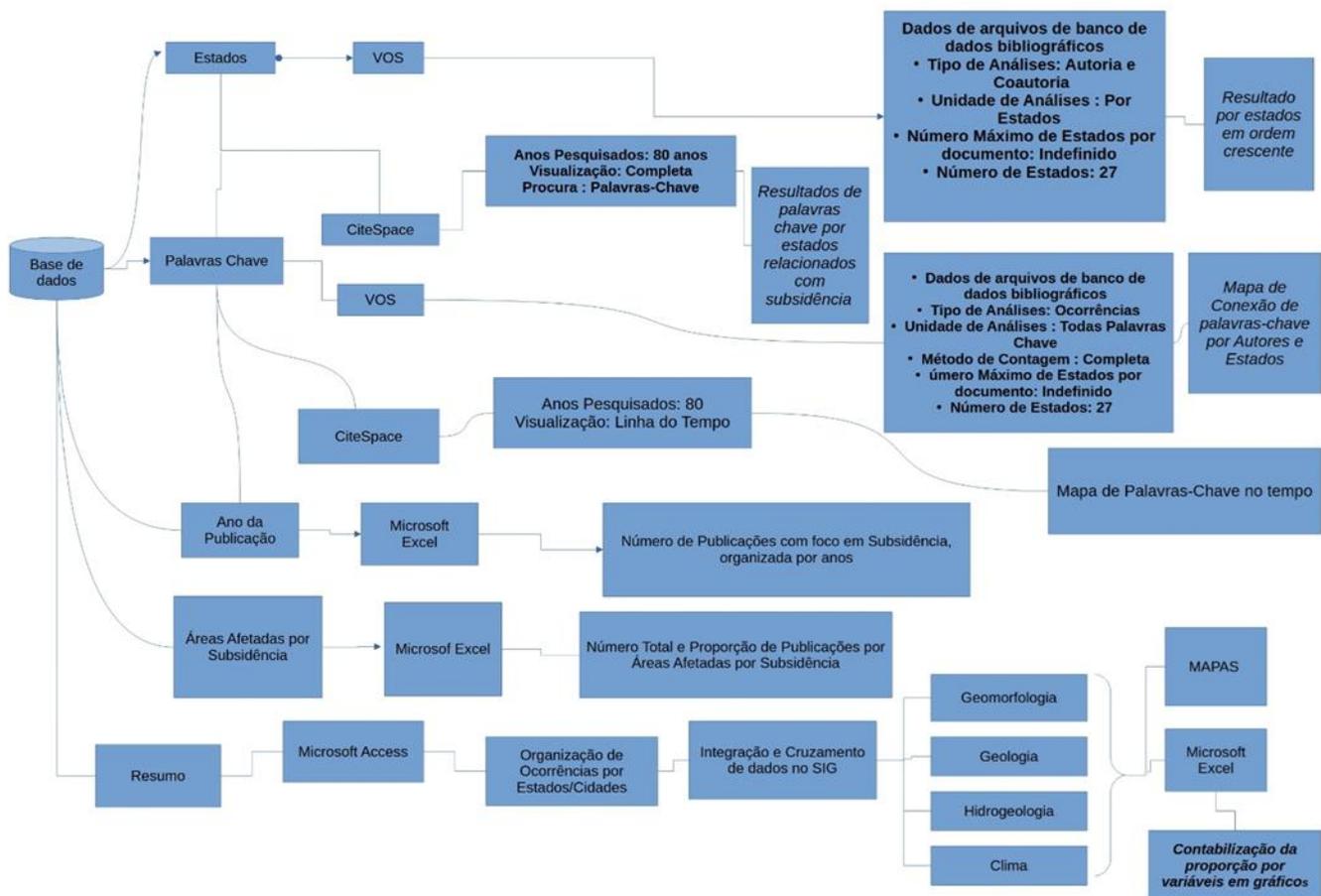
Este estudo sobre subsidência do solo no Brasil adotou uma abordagem qualitativa exploratória por meio de uma revisão sistemática da literatura. Utilizou-se o método integrativo com filtros processados por operadores booleanos, selecionando os estudos mais relevantes. Usando os descritores “*Subsidência do Solo*”, “*Colapso do Solo*”, “*Subsidência Cárstica*”,

“Adensamento de Solos”, “Exploração de Água Subterrânea” e “Mineração”, permitindo identificar tendências, lacunas e conexões entre pesquisas e pesquisadores.

Foram utilizadas as bases de dados Scopus, Web of Science e Google Scholar, além de fontes científicas e jornalísticas, por reunirem extensos bancos de periódicos revisados por pares com alto impacto. A bibliometria foi aplicada para quantificar publicações, analisando produtividade ao longo do tempo, principais autores, instituições, países, subáreas de pesquisa, formas de publicação e conteúdo de maior repercussão.

A seleção das referências seguiu critérios rigorosos para garantir qualidade e abrangência. Os dados foram extraídos de diversas plataformas e processados com esquemas conceituais definidos, utilizando softwares específicos, conforme mostrado no fluxograma metodológico (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma



Fontes: Autores (2024)

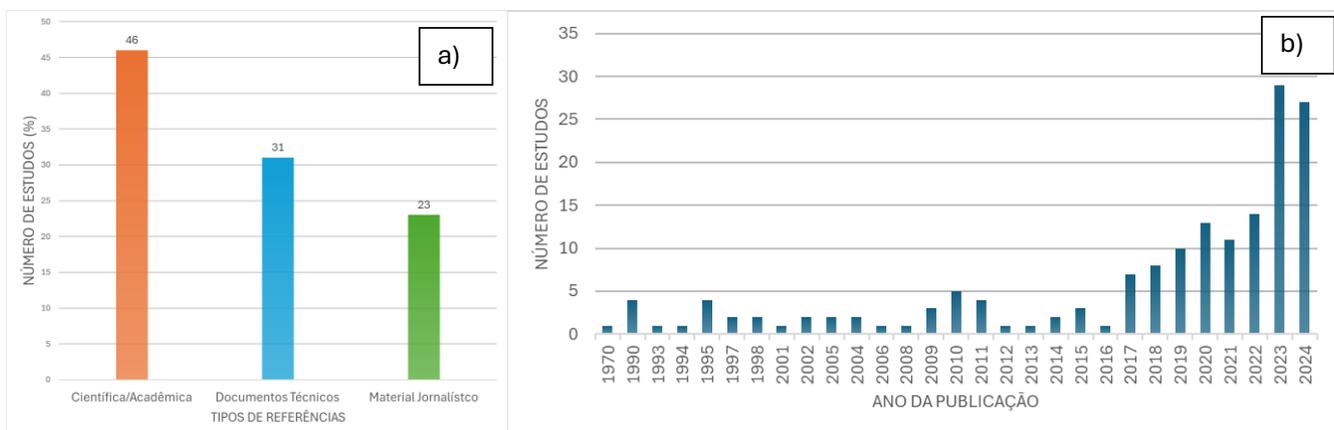
As informações foram carregadas no Microsoft Access, incluindo resumos de artigos, e consultas personalizadas extraíram dados sobre áreas temáticas relevantes. O Microsoft Excel foi utilizado para analisar o crescimento dos estudos ao longo dos anos, visualizando a evolução das publicações e temas abordados.

Análises bibliométricas avançadas foram realizadas com softwares especializados. O VOSviewer (versão 1.6.17) foi usado para examinar a colaboração entre países e a coocorrência de palavras-chave, enquanto o CiteSpace (versão 6.2.R2) integrou dados para gerar gráficos sobre o desenvolvimento temporal das palavras-chave e suas relações com os estados brasileiros.

O VOSviewer foi essencial na criação de redes de conectividade, permitindo a análise de citações, coautoria e frequência de citações, além de avaliar o desempenho de autores, publicações e palavras-chave ao longo do tempo. Usando a Análise de Redes Sociais (SNA), o software gera mapas bidimensionais, onde distâncias menores indicam relações mais fortes e áreas de maior densidade, representadas por "ilhas de calor", indicam maior relevância. Essas ferramentas ajudaram a identificar padrões emergentes e lacunas no conhecimento sobre subsidência no Brasil, oferecendo informações para aprofundar as discussões.

A análise utilizou dados obtidos por critérios rigorosos, garantindo a coerência e representatividade dos resultados. Foram coletados 166 documentos sobre subsidência e colapso no Brasil, incluindo 76 artigos científicos, 50 documentos técnicos e 40 matérias jornalísticas (Figura 2-a). O estudo abrangeu os últimos 54 anos (1970-2024), com um crescimento significativo a partir de 2017 (Fig. 2-b). Casos de subsidência foram analisados com Sistemas de Informação Geográfica (SIG), criando mapas nacionais que correlacionam eventos com fatores físicos e ambientais.

Figura 2. a) Tipos de publicações analisadas b) N° de estudos de casos por anos



Fontes: Autores (2024)

A análise dos casos de subsidência e sua correlação com variáveis físico-ambientais foi estruturada em etapas importantes. Primeiramente, foi construída uma base de dados espacial com fatores relevantes para entender o fenômeno. Em seguida, realizou-se uma avaliação espacial da subsidência, considerando a relação entre os casos observados e os fatores correlacionados. A abordagem parte da premissa de que as variáveis estão associadas a eventos reais de subsidência, e não apenas a riscos potenciais.

Estudos anteriores identificaram fatores essenciais que influenciam a subsidência do solo (Ghouschi et al 2024, Chai et al 2024). Nesta análise, foram incluídos dados fundamentais,

como geologia, hidrogeologia, geomorfologia e características climáticas (Tabela 1). Esses fatores foram organizados em um banco de dados espacial vetorial, indispensável para garantir a precisão das análises. A distribuição espacial e a frequência das pesquisas mostram uma concentração geográfica e um aumento nas publicações. Essa abordagem multidimensional fornece uma base sólida para futuras investigações sobre subsidência no Brasil, com detalhes adicionais disponíveis na Tabela 1.

Tabela 1. Dados Vetoriais e Rasters

Classe	Fonte	Escala	Resolução	Ano
Geologia	CPRM	1:1.000.000	-	2003
Hidrogeologia	CPRM	1:2.500.000	-	2007
Geomorfologia	IBGE	1:250.000	-	2006
Precipitação Média	Worldclim	-	1km x 1km	1970-2020
Temperatura Média	Worldclim	-	1km x 1km	1970-2020
Elevação	SRTM	1:250.000	30mx30m	2018
Clima	Alves et. al 2013	1:250.000	30mx30m	2018/2016

Fontes: Autores (2024)

No ambiente de SIG, a precisão dos dados espaciais é essencial. Para garantir confiabilidade, foram utilizados mapas autorizados por agências governamentais brasileiras, apesar das diferentes escalas. Os locais de subsidência e o banco de dados espacial foram cruzados para gerar uma análise mais precisa. Os fatores calculados foram mapeados em uma grade de 1 m x 1 m no formato GRID. A escolha do tamanho da célula na conversão de vetor para raster é fundamental, pois células grandes podem omitir detalhes, e pequenas aumentam o tamanho dos arquivos e o tempo de processamento. O tamanho ideal da célula foi definido com base na escala dos dados de entrada, sendo inferior a 100 m para escalas de 1:250.000 e 1:50.000, e inferior a 400 m e 1000 m para escalas de 1:1.000.000 e 1:2.500.000, respectivamente (Carranza, 2009; Hengl, 2006; Lee et al., 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

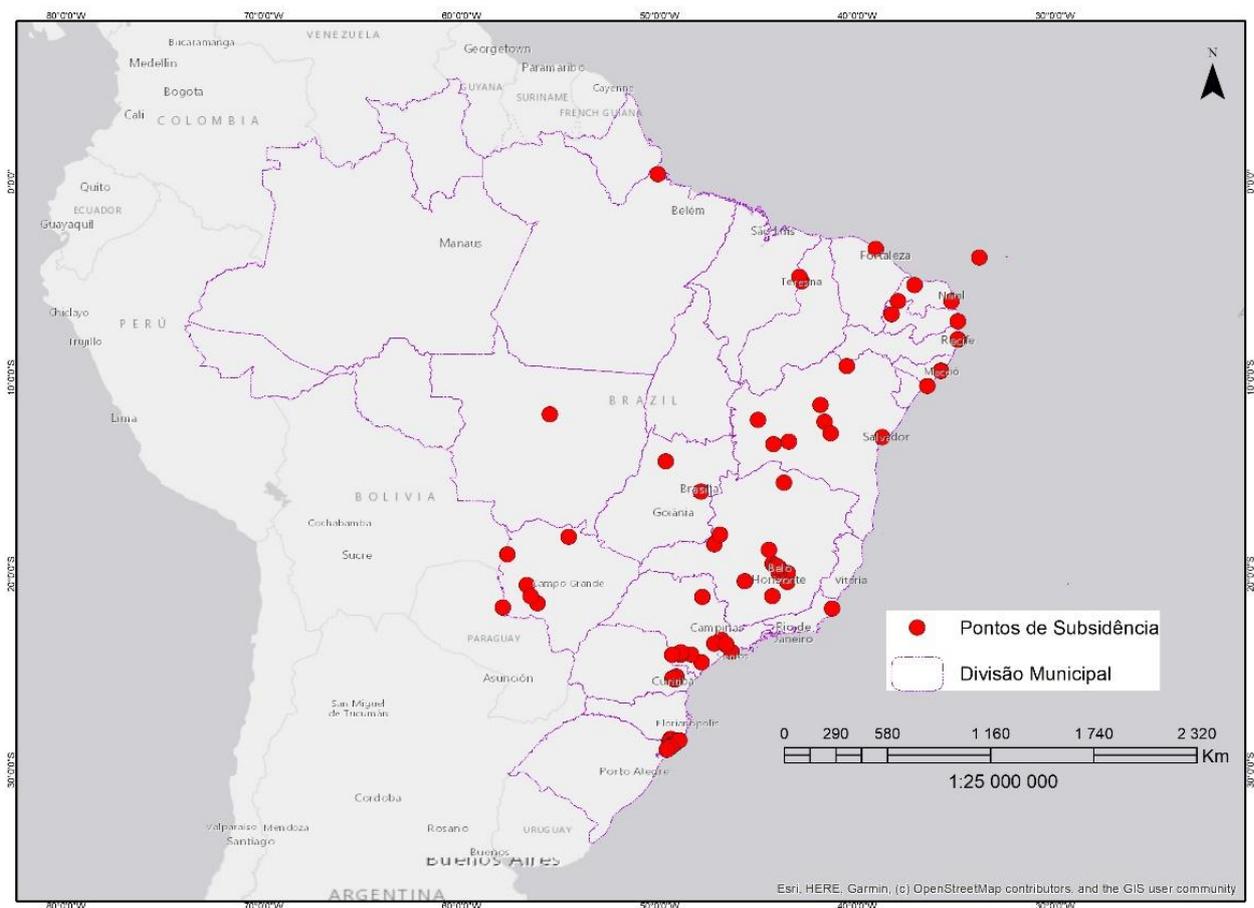
A subsidência no Brasil

Neste estudo, foram identificados 75 pontos de subsidência, determinados com base na metodologia descrita, utilizando documentos primários e excluindo duplicações. A análise concentrou-se na localização dos casos, na relevância das informações e nas fontes que esclarecessem as causas, consequências e características geomorfológicas, geológicas e hidrogeológicas das áreas afetadas.

A maioria dos casos de subsidência no Brasil está nas regiões Sudeste (36%) e Nordeste (30%), seguidas pelo Sul (21%) e Centro-Oeste (12%), com apenas um caso na região Norte. Essa distribuição reflete fatores como densidade urbana, atividades econômicas e características

geológicas e hidrogeológicas. A concentração de casos nos estados do Sudeste, Nordeste e Sul sugere uma correlação com o desenvolvimento econômico e a falta de monitoramento adequado. Regiões como o Centro-Oeste e Norte, com áreas sedimentares e grandes bacias hidrográficas, também apresentam condições vulneráveis à subsidência, sendo o risco potencialmente ampliado por atividades humanas, como desmatamento e exploração de recursos podem aumentar os riscos futuros nas regiões. (Figura 3).

Figura 1. Distribuição espacial dos casos de subsidência no Brasil



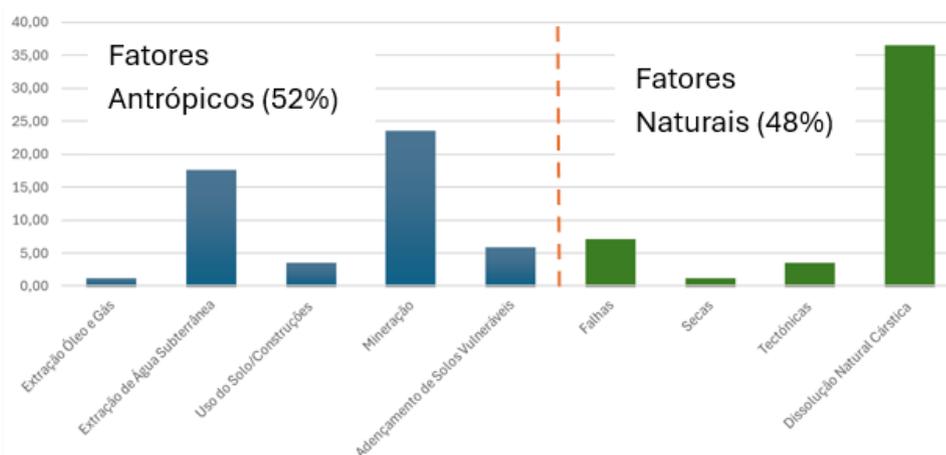
Fontes: Autores (2024)

O Sudeste e o Nordeste, com maior urbanização e intensa exploração de recursos hídricos e minerais, concentram os casos de subsidência devido à mineração e extração de água subterrânea, afetando a estabilidade geológica. Essas regiões, com bacias sedimentares e terrenos cársticos, são propensas a adensamento, dissolução e colapso. No Sul, embora a urbanização seja moderada, a exploração agrícola e industrial, junto a formações sedimentares e cársticas, especialmente em Santa Catarina e Paraná, favorecem a subsidência, agravada pela mineração de carvão. O Centro-Oeste, com geologia cárstica, tem alto potencial para subsidência, mas carece de estudos. No Norte, apesar das áreas sedimentares, os poucos casos podem ser atribuídos à baixa densidade populacional, exploração limitada de recursos e falta de monitoramento.

Fatores deflagradores e de influência

A subsidência é causada por dois grupos principais de fatores: antrópicos e naturais. Fatores antrópicos incluem a extração de fluidos subterrâneos (água, petróleo, gás), mudanças no uso do solo, sobrecarga de edificações, construção de instalações subterrâneas e mineração (Calderhead et al., 2011; Abidin et al., 2013; Ma et al., 2018). Já os fatores naturais envolvem falhas geológicas, movimentos tectônicos, compactação de sedimentos, elevação do nível do mar, oxidação e drenagem de solos orgânicos, e erosão cárstica (Bagheri et al., 2021; Modoni et al., 2013; Hwang et al., 2016).

Figura 4. Causas das Subsidências no Brasil



Fontes: Autores (2024)

Os dados indicam que 48% dos casos de subsidência no Brasil são causados por fatores naturais e 52% por atividades humanas. A dissolução de rochas cársticas e carbonatadas é responsável por 37% dos casos, destacando a vulnerabilidade dessas áreas ao colapso (Chaussard et al., 2014). Outros casos naturais estão associados a falhas geológicas (7%), ações tectônicas (3%) e secas (1%). Entre os fatores antrópicos, a mineração é a principal causa, responsável por 24% dos casos, como em Maceió (AL) e Criciúma (SC). A extração de água subterrânea contribui com 18%, especialmente em áreas agrícolas e urbanas (Li et al., 2017; Modoni et al., 2013). Mudanças no uso do solo, adensamento de solos vulneráveis colapsivos e a extração de petróleo e gás somam 10%.

Caracterização dos casos de subsidências catalogados no país

O estudo das subsidências no Brasil destaca a interação complexa entre fatores geológicos, hidrológicos e antrópicos, sublinhando a importância de uma abordagem integrada para sua prevenção e mitigação.

Na Bacia de Campos, RJ, Silva (2015) analisou a subsidência tectônica em poços da Agência Nacional de Petróleo (ANP), identificando variações de 4,0 a 8,0 km ao longo do Lineamento Alegre, uma estrutura de 200 km que vai do Campo de Marlim ao Campo de Jubarte. Em outubro

de 1986, Cajamar (SP) registrou um caso emblemático de subsidência, com uma cavidade de 13 metros de profundidade e 32 metros de diâmetro, que destruiu 480 residências e desabrigou 2.400 pessoas. O evento, atribuído à carstificação, exploração de águas subterrâneas e estiagem prolongada, ocorreu em uma área com calcários instáveis (Bottura e Albuquerque Filho, 1990).

Em 2007, uma subsidência na Marginal Pinheiros, em São Paulo, resultou em uma cratera de 80 metros de diâmetro durante obras do metrô, causada por erro humano, que levou à morte de sete pessoas e realocação de 73 famílias (IPT, 2008; Maffei et al., 2008; G1, 2022). Outras ocorrências incluem subsidência no Butantã, sem causas precisas identificadas (Maretti, 2008), e no Parque Anhanguera, em 1989, com danos de até 4 cm de recalque, associada a um poço de água subterrânea (Menegasse et al., 1994).

Santos (SP) enfrenta subsidência devido a argilas moles, causando inclinação de edifícios, devido ao recalque diferencial em solos compressíveis e heterogêneos. Esse processo é uma forma de subsidência estrutural, afetando a estabilidade das fundações superficiais inadequadas para o tipo de solo (Hachich, 1997; CPRM, 2018). Em Mairinque (SP), rachaduras e afundamentos foram registrados em 1981, causados por rochas carbonáticas e erosão cárstica (CPRM, 2019). No Vale do Ribeira (SP), subsidência ocorre em áreas desabitadas, com destaque para Ribeirão Grande, relacionada à mineração. Em Nova Campina (SP), subsidência e alagamentos são controlados por bombeamento (Sallum Filho, 2009).

Em março de 1988, Sete Lagoas (MG) enfrentou um evento de subsidência em uma área cárstica, com uma depressão circular que começou com 3 metros de diâmetro e 2 de profundidade, expandindo para 22 metros. O colapso, atribuído ao desmoronamento de uma caverna natural, foi intensificado pela estiagem e o rebaixamento do lençol freático (Silva, 1988). Um estudo de Galvão, Halihan e Hirata (2015) mapeou áreas de risco, mostrando que grande parte da área urbana está sobre terrenos cársticos, aumentando o risco de colapsos devido ao consumo excessivo de água subterrânea.

Em Ouro Preto (MG), colapsos de minas são registrados desde o século XVIII, como o da Mina do Chico Rei em 1725, que causou cerca de 50 mortes (Castro, 2010). Em 2022, um buraco de 14 metros levou à evacuação de famílias, e em 2023, um colapso revelou uma mina antiga em uma residência (Itatiaia, 2022a). A UFOP e a Defesa Civil do Município já mapearam mais de 170 minas na cidade (Itatiaia, 2022b). Em Coromandel (MG), uma cratera de 30 metros, típica de terrenos cársticos, foi identificada, sem vínculo com atividades humanas (Moura, 2017; CPRM, 2018).

Em Vazante (MG), problemas com dolinamentos foram registrados desde 2005, com eventos recorrentes (CPRM, 2018). Cidades como Vespaziano, Confins e Jibai, também em Minas Gerais, apresentaram dolinamentos cársticos semelhantes (Santos, 2022). Em Curvelo (MG), um evento de carstificação em 2019 causou deformações na superfície, resultando na remoção e realocação da população local (Toledo, 2021).

Em Pains (MG), Timo et al. (2009) mapearam diversas formas cársticas, como dolinas simétricas e assimétricas, uvalas, cânions e cavernas. Em Belo Horizonte e Barão de Cocais, problemas de subsidência estão relacionados à extração de minério de ferro (Antunes e Silva, 2023). Em São João Del Rei (MG), em 1993, afundamentos de aproximadamente 3 cm afetaram residências, sendo atribuídos à exploração excessiva de água subterrânea (Maciel Junior, 2001).

Em Santa Catarina, a mineração de carvão causa subsidência em municípios como Lauro Müller e Criciúma, afetando as bacias dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga (Baccin, 2011). A urbanização precária agrava o problema, sobrecarregando antigas minas (Ruiz et al., 2014). Além disso, a produtividade agrícola nas áreas rurais é reduzida (Almeida, 1999), e surgências e colapsos em minas alagadas são observados na sub-bacia do rio Sangão (Nascimento et al., 2002).

No Paraná, a exploração de água subterrânea em sistemas cársticos tem causado subsidências em Almirante Tamandaré e Colombo, com danos a residências, como rachaduras e depressões (Hindi et al., 2002; Vilarim et al., 2020). Em 1992, afundamentos devido à exploração excessiva de um aquífero cárstico em Almirante Tamandaré resultaram em indenizações de U\$180.000,00 pela SANEPAR (Nadal et al., 1995). Em 2007, uma cratera de 50x40 metros se formou, possivelmente por extração de água (Sallum Filho, 2009), e problemas como trincas e recalques afetaram instituições de ensino (Tribuna, 2013).

Um relatório de 2020 do CENACID/UFPR aponta subsidência e colapsos na região de "Águas Fervidas", afetando a agricultura devido à exploração do aquífero pela SANEPAR, resultando em fissuras e dolinas (CENACID, 2020). Em Bocaiúva do Sul, uma cratera de 5 metros de diâmetro se formou em um aquífero cárstico, causando danos menores a residências (Sallum Filho, 2009; CENACID, 2007).

Em Campos Verdes, Goiás, Nascimento (2009) destacou impactos da mineração de esmeraldas, incluindo subsidência e danos estruturais. Em Corumbá, MS, a mineração de manganês causa subsidência (Antunes e Silva, 2023). Dolinas, cavidades e fraturas cársticas foram identificadas por Sallum Filho (2009) e Guirra e Paranhos Filho (2024) em cidades como Jardim, Bodoquena, Bonito, Porto Murtinho e Pedro Gomes, MS. Em Sinop, MT, Campos et al. (2020) diagnosticaram solos colapsíveis que geravam problemas estruturais. Em Brasília, DF, a construção do metrô (iniciada em 1994) atrasou devido a solos colapsíveis, causando trincas e rachaduras, principalmente na Asa Norte (Reis, 2020). Braga 1993, através de um estudo sobre a espessura elástica efetiva no Cone do Amazonas, conseguiu ter a estimativa tectônica de uma subsidência presente na região, de aproximadamente 1km.

No Nordeste, a subsidência tem se intensificado, especialmente em áreas litorâneas e nas margens de rios. Em Teresina, PI, dois eventos de afundamento ocorreram em 1999 e 2008, ambos na região central, causando danos significativos (Lago et al., 2019). A geologia local, com calcário e sílex suscetíveis à dissolução, favorece esses eventos, agravados por infiltração de água e urbanização em áreas cársticas (Lopes et al., 2014).

João Pessoa, PB, enfrenta subsidência, especialmente no bairro Cruz das Armas, devido à infiltração de água em falhas no calcário da Formação Gramame, que causa o rebaixamento da Formação Barreiras e a formação de depressões. A exploração de água subterrânea agrava o problema (Furrier e Vital, 2011; Sousa e Soares, 2015). Em Souza, PB, a irrigação agrícola associada à exploração de água subterrânea e à seca extrema resultou em subsidência lenta no núcleo habitacional II, além do fim da atividade agrícola, causando uma catástrofe ambiental e econômica (Sousa, 2017).

No Rio Grande do Norte, diversos tipos de subsidência foram registrados. Em Martins, foram identificadas depressões em depósitos superficiais associadas a dolinas de subsidência (Moura, 2017). Coelho (2019) observou subsidência cratônica na Bacia do Paranaíba, e Menezes (2019) relatou fraturas e halos de subsidência em torno de dolinas cársticas no semiárido, especialmente na Bacia do Potiguar. Em Nísia Flores, a extração de água subterrânea de um aquífero semiconfinado causou subsidência lenta (Pereira et al., 2004). No Atol das Rocas, Gracia (2021) confirmou a ocorrência de subsidência, típica de ambientes naturais dessa região.

Em Recife, PE, a superexploração de águas subterrâneas e a baixa recarga dos aquíferos têm causado subsidência, especialmente no bairro de Boa Viagem. Santos (2005) destacou o rebaixamento do lençol freático, agravado por camadas de areia e argila. No Bairro do Pina, Luna et al. (2017) registraram um rebaixamento piezométrico de até 100 metros e uma taxa de subsidência de 0,68 mm/ano, totalizando 38,6 mm em 57 anos, com projeções de 10 mm até 2030. Souza et al. (2024) identificaram subsidência associada ao peso das construções sobre solos vulneráveis como silte e argila. As taxas de deslocamento variam, com até -20 mm/ano no Norte, -15 mm/ano no centro e -25 mm/ano no sul, além de movimentos horizontais de até -7 mm/ano em direção ao oeste.

Em 1982, em Petrolina, solos colapsíveis, com alto índice de vazios e baixa umidade, sofreram deformações bruscas devido a alterações na umidade, causando danos significativos às fundações de um conjunto habitacional e comprometendo as estruturas (Gomes da Silva e Xavier, 2021).

Em 2008, em Lapão, BA, um evento de subsidência causou rachaduras nas ruas e danos a residências, com afundamento de 15 cm e fissuras de até 20 cm, associado à estrutura cárstica da Fonte do Lapão (CPRM, 2018; Maia et al., 2010). O fenômeno se espalhou da Fazenda Sete Cascas à área urbana em 20 dias. Em 2009, novas subsidências foram registradas em Tanquinho, a 6 km de Lapão, em uma região com rochas carbonáticas suscetíveis à dissolução, agravadas por esgotos e águas residuais (Maia et al., 2010). Em Iraquara, na Chapada Diamantina, Salles e Galvão (2021) mapearam riscos de subsidência em terrenos cársticos, destacando maior suscetibilidade em áreas com afloramentos de rochas carbonáticas.

Em Andaraí, com características cársticas, foram registrados surgimentos de dolinas e abatimentos devido à atividade mineradora de diamantes (De Oliveira Santos et al., 2010). Em Santa Maria da Vitória, BA, Zonta et al. (2018) observaram problemas semelhantes, de origem natural, nas proximidades da Rodovia Federal BR-135, em região com geologia similar. Em Barreiras, BA, Pereira et al. (2017) associaram os afundamentos do tipo piping à concentração de água subsuperficial, relacionados a um sistema cárstico profundo nas rochas carbonáticas sob arenitos. Em 1990, Mendonça analisou os colapsos de solo no projeto de irrigação Formoso A, em Bom Jesus da Lapa.

Em 2018, na vila de Vera Cruz, Ilha de Itaparica, uma cratera de 46 metros de profundidade surgiu devido à extração de salmoura por uma multinacional, expandindo para 110 metros em dois anos (TVBAHIA, 2018). A área é monitorada com tecnologias avançadas, incluindo Radar de Abertura Sintética (SAR). No Ceará, na Sub-Bacia Mundaú, ocorre subsidência tectônica (Souza, 2022). Em Piaçabuçu, AL, Tanajura et al. (2022) avaliaram a subsidência da planície

deltaica do Rio São Francisco, identificando uma subsidência natural média de aproximadamente 4 metros.

Maceió um caso ressonante e emblemático

Maceió (AL) enfrenta uma das maiores subsidências urbanas do mundo, agravada por um sismo de 2,4 ML em março de 2018, no bairro do Pinheiro, associado ao colapso de uma mina de sal subterrânea. O evento resultou na evacuação de 6.356 edificações e no deslocamento de 25.000 moradores (Vassileva et al., 2021). Atualmente, a subsidência se estende para os bairros Mutange, Bom Parto, Bebedouro e Farol, afetando cerca de 55 mil pessoas e 14 mil residências em uma área superior a 3 km², com prejuízos de R\$ 11,5 bilhões (Fontes, 2024). O bairro Mutange foi totalmente evacuado, e Pinheiro e Bom Parto tornaram-se parcialmente desocupados" (Hartwig et al., 2023)

A subsidência em Maceió, segundo a CPRM (2020), é causada pela mineração de salgema, em que a dissolução de evaporitos cria cavidades instáveis que colapsam com o tempo (Vassileva et al., 2021). A extração é realizada por injeção de água em poços subterrâneos, dissolvendo o sal e deixando vazios subsuperficiais. Desde 1970, 35 poços foram instalados ao longo do rio Mundaú e na zona urbana, impactando os bairros de Mutange, Bebedouro e Pinheiro (UOL, 2023).

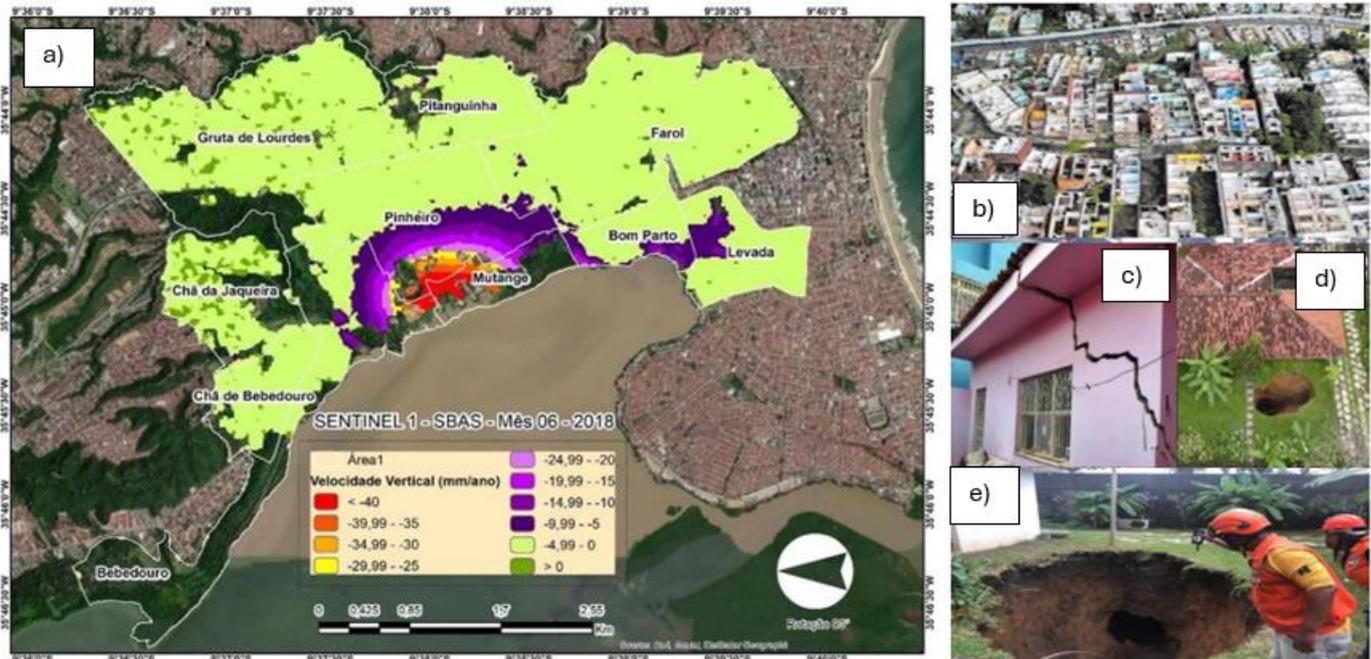
Em 1990, o Geógrafo Ivan Fernandes Lima já apontava essa região como subsidente em seu livro Maceió Cidade Restinga, usando dados da Petrobras. Ele identificou áreas próximas à Laguna Mundaú, cortadas pela Refração Sísmica 112 (R-112), que abrangia Mutange e Satuba, com sinais de subsidência. Lima verificou sua hipótese com dados do Poço TM-1-AL, da Petrobras, que apresentava compactações e testemunhos de organismos fluviais e estuarinos. Embora ele atribuisse a subsidência a causas naturais, isso indica que a área já sofria com o fenômeno na década de 1990.

Entre 2018 e 2019, a CPRM investigou a subsidência, instalando estações sísmicas que registraram atividade a menos de 1 km de profundidade, sob a Lagoa Mundaú e o bairro Pinheiro. Levantamentos gravimétricos indicaram anomalias negativas nas áreas de extração de sal, e a investigação audio-magnetotelúrica (AMT), revelou baixa condutividade a 900 metros, correspondendo à camada de extração. Medições de sonar confirmaram a migração das cavidades de sal, com colapsos totais e parciais (CPRM, 2019), destacando a complexidade do fenômeno e a urgência de ações preventivas.

O processamento de dados SAR do Sentinel-1, referentes a 2018, complementa as análises da CPRM (2019), Vassileva et al. (2021) e Euillades et al. (2020), revelando subsidências de até 40 cm próximas à Laguna Mundaú. Observações geológicas identificaram descontinuidades rasas associadas à infiltração de águas superficiais, que aumentam a instabilidade geológica e causam danos às habitações (Figura 5). A metodologia SBAS (Small Baseline Subset), proposta por Berardino et al. (2002), foi utilizada para processar as imagens SAR. Essa abordagem melhora a qualidade das medições e permite o monitoramento contínuo

de processos geológicos dinâmicos, como a subsidência, corrigindo artefatos e aprimorando a análise em áreas com grandes deformações.

Figura 5. a) InSar -SBAS- Deslocamento Vertical Ano 2018, b) Casas evacuadas e abandonadas c) Recalque Diferencial d) Sumidouro e) Colapso



Fonte: a) Autores; b) Süddeutsche Zeitung Nr.232/2022 c) CPRM 2019 d) TNH1 2022 e) TNH1 2022

Mantovani et al. (2024) identificaram variações significativas na subsidência em Maceió, com acumulados de até 3,83 metros nas áreas mais afetadas. Em Bebedouro, o fenômeno atingiu 0,33 metros em 41,85 hectares, e no Farol, 59,49 hectares. Áreas urbanas densamente povoadas apresentam maior suscetibilidade, ampliando danos estruturais e vulnerabilidade a inundações. A predominância da subsidência em terrenos planos sugere que sua uniformidade facilita deformações mais amplas, influenciadas por fatores geológicos, composição do solo e atividades humanas, exigindo investigações mais detalhadas (Mantovani et al., 2024).

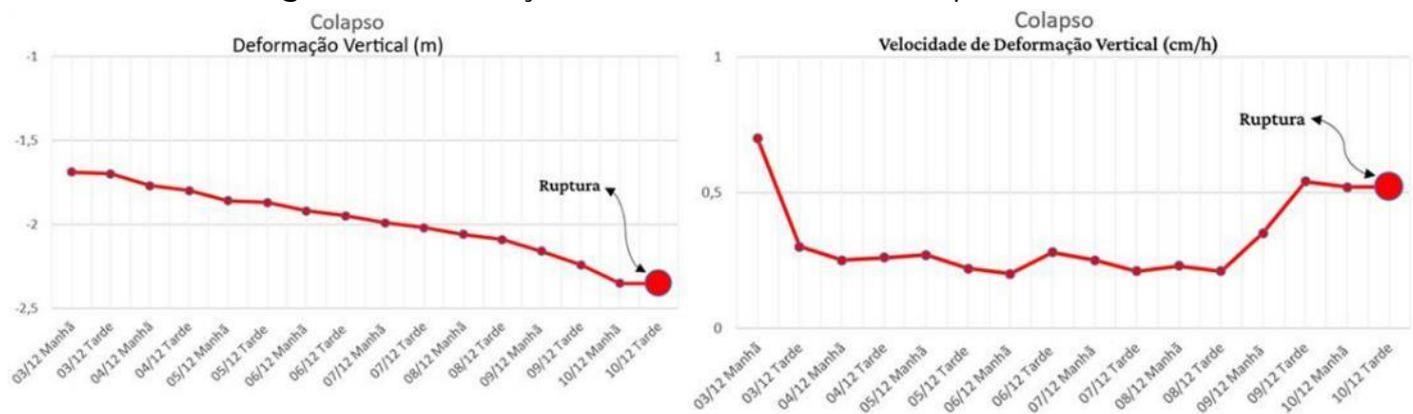
A área de subsidência em Maceió é atravessada por falhas geológicas inativas, como o sistema de falhas Mutange, que se estende NNW-SSE pela costa da Laguna Mundaú, interceptando poços de mineração de sal a cerca de 400 metros de profundidade. Essas falhas aumentam a vulnerabilidade da região, facilitando o fluxo de água subterrânea, dissolvendo o sal e criando vazios. A CPRM (2019) identificou falhas e colapsos em poços de sal, sugerindo que a subsidência está relacionada ao deslocamento dessas estruturas, possivelmente desencadeado pela exploração de sal e alterações no campo de tensão local (Goes et al., 2019; Hartwig et al., 2023).

A movimentação das falhas geológicas, reativadas por alterações no campo de tensões locais devido à subsidência, pode impactar além das áreas diretamente afetadas. Como zonas de fraqueza estrutural, as falhas podem transmitir deformações para regiões adjacentes, redistribuindo tensões no subsolo. Isso pode resultar em deformações no terreno, rachaduras em edificações e maior vulnerabilidade à subsidência em áreas próximas. A magnitude desses

efeitos depende do comprimento e da conectividade das falhas, bem como das propriedades geológicas locais.

Em novembro de 2023, a Mina de número 18, localizada entre o bairro do Mutange e a laguna Mundaú, apresentou sinais de instabilidade, incluindo afundamentos e tremores intensos, indicando que a cavidade estava se elevando. Em dezembro, segundo boletins oficiais diários da Defesa Civil Municipal repassados aos jornais, a deformação vertical atingiu 1,6 metros, e, em 10 de dezembro, pouco antes do colapso parcial, o afundamento foi de 2,35 metros. Nos momentos finais antes da ruptura, a mina afundou 12,5 cm em 24 horas, com a taxa de subsidência diminuindo de 0,54 cm/h para 0,52 cm/h (Figura 6). O colapso gerou uma cratera de aproximadamente 100 metros de diâmetro, com profundidade entre 3 e 11 metros (G1, 2023).

Figura 6. Deformação e Velocidade Vertical Colapso Mina 18



Fontes: Autores (2024)

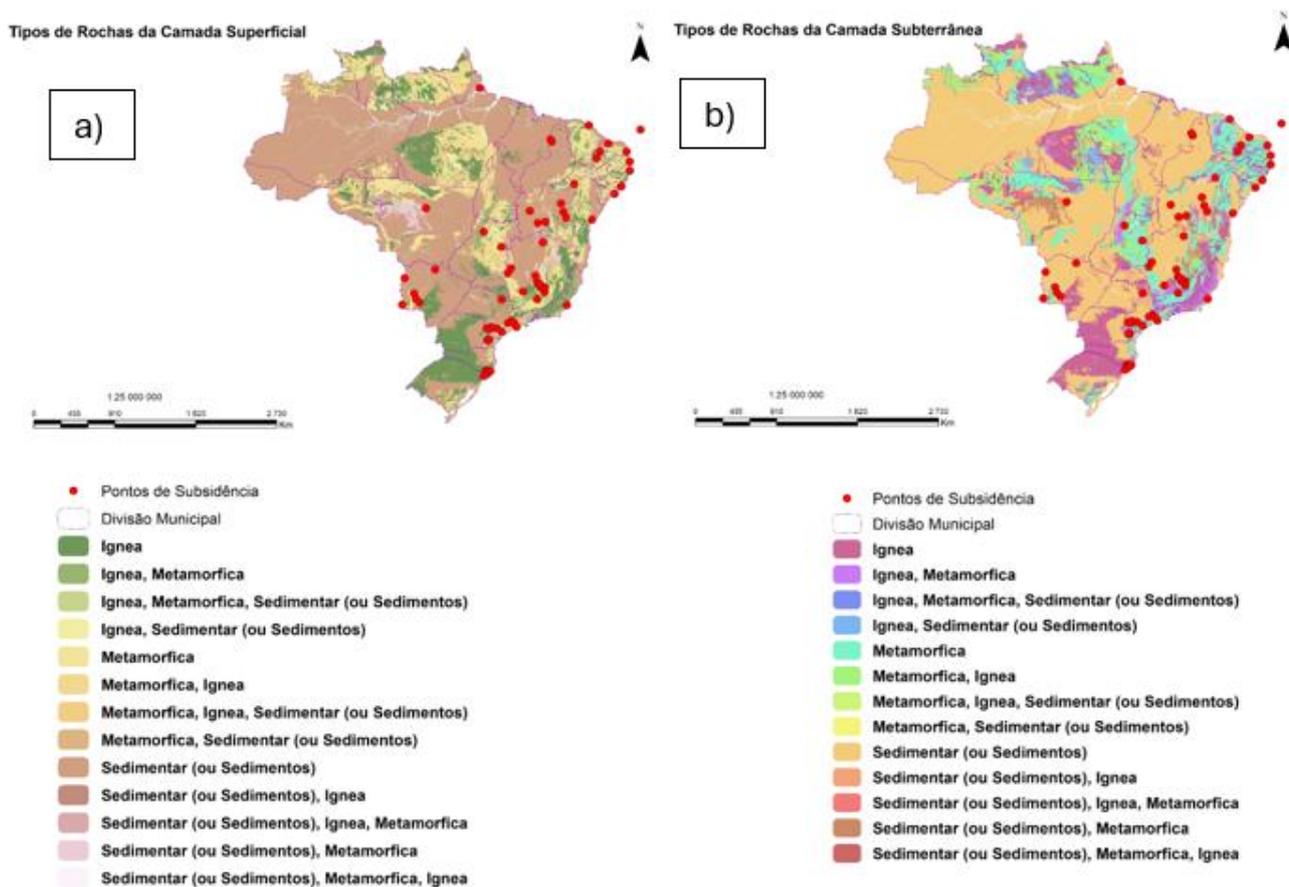
Outra área de subsidência na cidade, situada no Bairro da Levada, foi registrada pela CPRM (2019) e estudada por Vassileva et al. (2021) e Euillades et al. (2020). Diferente das áreas de subsidência nos bairros Pinheiro, Bebedouro, Mutange e Farol, a Levada e Bom Parto apresentam afundamentos médios de 1 a 4 cm/ano, associados a áreas de manguezais aterrados, indicando uma origem distinta da subsidência observada no Pinheiro (CPRM, 2019).

No entanto, há divergências nos estudos sobre a subsidência em Bom Parto e Levada. Euillades et al. (2020) observam uma deformação acumulada de 10 cm entre 2016 e 2020, sugerindo uma origem distinta da subsidência do Pinheiro, enquanto Vassileva et al. (2021) apontam que a subsidência nessas regiões iniciou em 2007, com uma taxa de 4 cm/ano, diminuindo para 1 cm/ano em 2020, e sugerem uma conexão com a subsidência do Pinheiro, com padrão de deslocamento NNW-SSE, possivelmente relacionada a falhas reativadas. O relatório da CPRM (2019), baseado em dados SAR, não indicou variação significativa no afundamento em Bom Parto e Levada, e classificou ambas as áreas como subsidência por argilas moles e não por extração de halita, mas as atualizações do Mapa de Ações Prioritárias da Defesa Civil Municipal (2020 e 2023) incluíram Bom Parto como afetado pela mineração de salgema, conectando a subsidência dos bairros Pinheiro, Farol, Mutange e Bebedouro, reforçando a hipótese de Vassileva et al. (2021) de uma única área de subsidência.

Características geológicas

As rochas superficiais mais frequentemente afetadas são predominantemente sedimentares (~64%), seguidas por rochas metamórficas (~15%) e ígneas (~8%). Formações mistas sedimentares/metamórficas representam ~7%, enquanto as mistas metamórficas/sedimentares correspondem a ~6%. Nas rochas subterrâneas, o padrão é semelhante, com predominância das sedimentares (~67%), seguidas pelas metamórficas (~15%) e ígneas (~10%). Formações mistas metamórficas/sedimentares e combinações entre metamórficas, sedimentares e ígneas compõem ambos ~4% (Figura 7).

Figura 7. a) Tipos de Rochas das Camadas Superficiais Afetadas b) Tipos de Rochas das Camadas Subterrâneas Afetadas



Fontes: Autores (2024)

A descrição reflete um panorama geológico coerente, com as rochas sedimentares, devido à sua porosidade e predominância em bacias sedimentares, sendo mais suscetíveis à subsidência, tanto na superfície quanto no subsolo. A menor incidência de rochas ígneas e mistas pode ser atribuída à sua maior resistência à compactação e erosão. Os dados litológicos indicam a presença de 80 minerais nas rochas afetadas por subsidência, com predominância de minerais

sedimentares como areia, argila, arenito e calcário, uma tendência também observada na litologia subterrânea, onde os litotipos sedimentares são os mais impactados.

As áreas com predominância de rochas cársticas ou carbonatadas, ou mesmo com presença minoritária desses minerais, são altamente suscetíveis à subsidência devido à fragilidade e solubilidade dessas rochas. O calcário, uma rocha cárstica, é particularmente vulnerável por sua capacidade de se dissolver facilmente em água, formando cavernas e cavidades que podem causar o colapso do solo. Isso explica o fato de 40% dos casos de subsidência no Brasil ocorrerem em áreas com essas características litológicas.

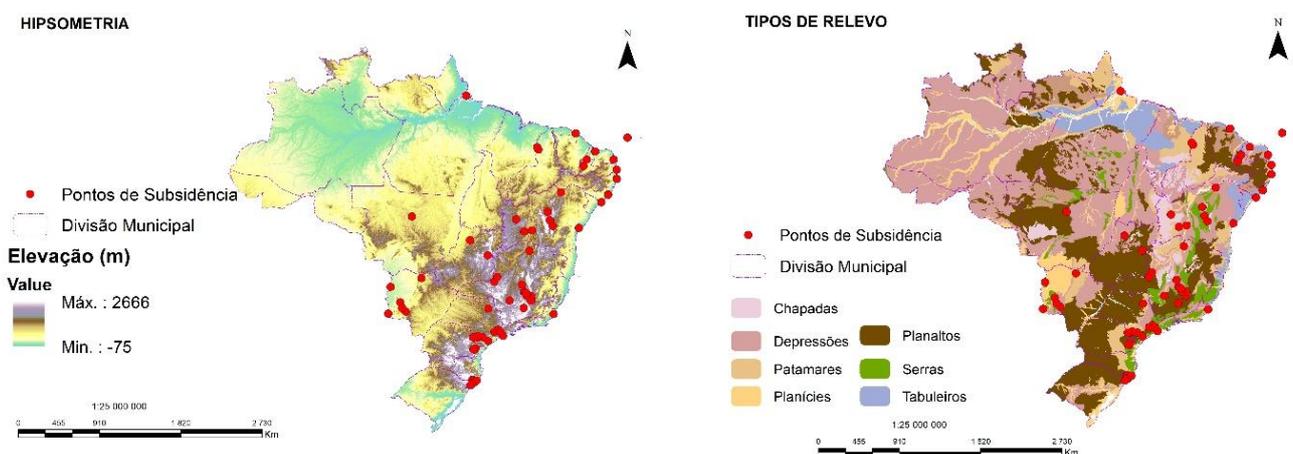
A combinação de alta solubilidade e fragilidade das rochas cársticas e carbonatadas torna essas regiões especialmente suscetíveis a subsidência, agravada pela extração de recursos e alterações nas condições hidrológicas. Assim, a presença de minerais sedimentares e a fragilidade dessas rochas são fatores-chave para a alta incidência de subsidência nessas áreas, refletindo a complexidade dos processos e a importância das características litológicas na determinação da vulnerabilidade.

Características geomorfológicas

As áreas mais afetadas por subsidência estão localizadas em planícies costeiras, fluviais e regiões deltaicas, predominantemente em áreas de baixa e média altitude, como o litoral sudeste e nordeste, historicamente urbanizadas e sujeitas à extração de recursos e expansão urbana (Figura 8).

Cerca de 35% dos casos ocorrem em elevações entre 0 e 50 metros, principalmente em planícies, enquanto áreas entre 50 e 400 metros representam 23%, e regiões acima de 400 metros, como tabuleiros e planaltos, correspondem a 42%. Os resultados corroboram com Mantovani et al. (2024), que destaca a predominância de subsidência em áreas planas, devido à presença de sedimentos aluviais suscetíveis à compactação. A drenagem ineficiente e a extração de recursos também aumentam a vulnerabilidade dessas áreas.

Figura 8. a) Subsidências por Elevação b) Subsidências por Relevo



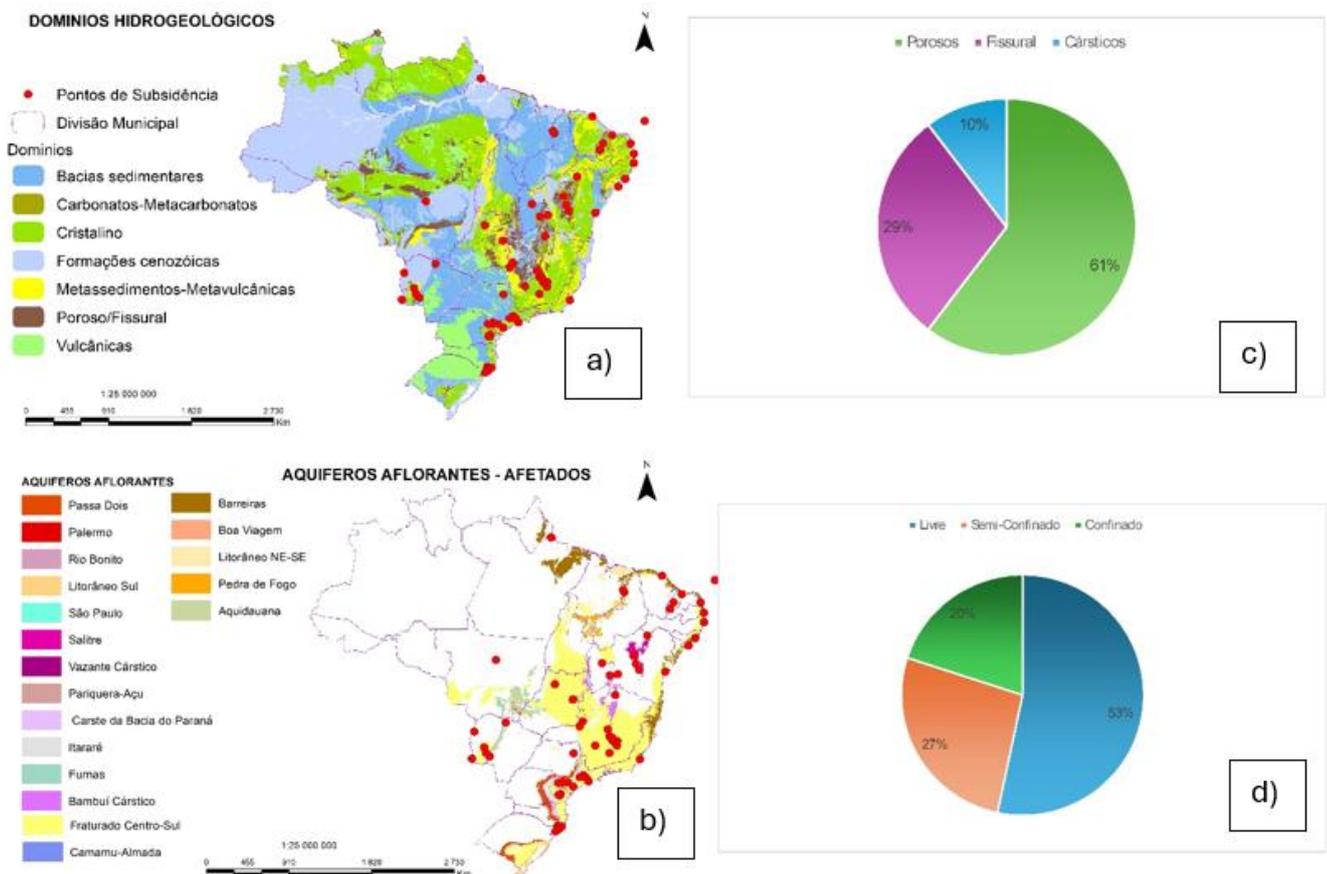
Fontes: Autores (2024)

Características hidrogeológicas

Os domínios hidrogeológicos mais afetados pela subsidência no Brasil são as Bacias Sedimentares (25%), devido à natureza das rochas sedimentares; as Formações Cenozoicas (23%), vulneráveis por camadas menos consolidadas; as Formações Carbonáticas/Metacarbonáticas (20%), suscetíveis à dissolução de calcário; e os Metassedimentos-Metavulcânicas (16%), que, apesar de antigas, ainda sofrem subsidência, especialmente com extração mineral. O Domínio Cristalino, mais resistente, representa 12%, e as Formações Vulcânicas, menos impactadas, 4%. (Figura 9).

A análise dos aquíferos aflorantes afetados pela subsidência, considerando o tipo de confinamento (livre, confinado ou semiconfinado) e a formação geológica (poroso, fissural ou cárstico), revela padrões importantes sobre os aquíferos mais vulneráveis a esse fenômeno no Brasil (Figura 9c e 9d).

Figura 9. a) Subsidências por Domínios Hidrogeológicos b) Subsidências por Aquíferos Aflorantes Afetados; c) Classificação dos aquíferos afetados quanto a formação geológica (%); d) Classificação dos aquíferos afetados quanto à pressão hidrostática (%).



Fontes: Autores (2024)

A maioria dos casos de subsidência no Brasil ocorre em aquíferos aflorantes porosos (61%), devido à estrutura permeável e à perda de pressão causada pelo esgotamento de água subterrânea, frequentemente agravada por atividades como mineração. Aquíferos fissurais representam 29% dos casos, onde a subsidência é associada ao colapso de fraturas e deslocamento das camadas rochosas, influenciados por variações na pressão da água e ações antrópicas. Já os aquíferos cársticos, responsáveis por 10% dos casos, sofrem subsidência pela dissolução de rochas solúveis, como calcário, formando cavidades que podem colapsar abruptamente, causando impactos significativos.

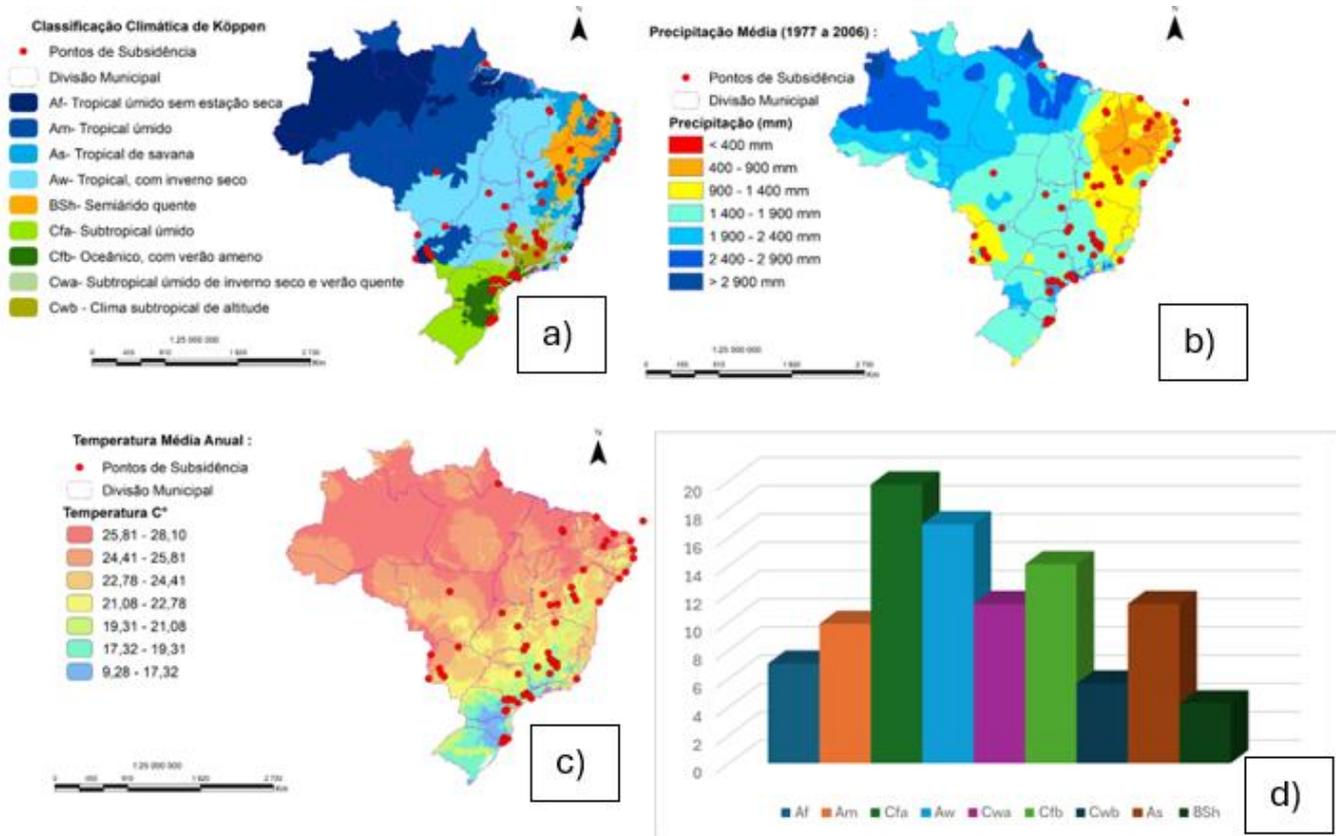
Mais da metade dos casos de subsidência no Brasil ocorrem em aquíferos aflorantes livres (53%), onde a água está em contato direto com a superfície, tornando-os mais suscetíveis a variações no nível do lençol freático. A subsidência nesses aquíferos está frequentemente ligada ao esgotamento de água subterrânea, mineração e perda de suporte do solo devido à diminuição da pressão hidráulica. Aquíferos semi-confinados representam 27% dos casos, sendo parcialmente protegidos por camadas não totalmente impermeáveis. Neles, a subsidência ocorre devido a variações na pressão da água e interação com aquíferos adjacentes, agravada pela exploração excessiva e mineração. Já os aquíferos confinados, que representam 20% dos casos, estão totalmente isolados por camadas impermeáveis acima e abaixo. Embora menos comuns, a subsidência nesses aquíferos pode ocorrer por compressão das rochas e extração intensiva de água e minérios.

Fatores climáticos

Fatores climáticos, como precipitação e temperatura, desempenham um papel significativo na deflagração ou potencialização de processos de subsidência. Em regiões com chuvas intensas, o aumento da saturação do solo pode acelerar a compactação dos sedimentos e gerar desestabilização, especialmente em solos menos consolidados ou com presença de materiais dissolúveis, como carbonatos. Por outro lado, temperaturas elevadas podem intensificar a evaporação, diminuindo o nível freático e causando o colapso de estruturas subterrâneas.

Ao cruzar os pontos de subsidências, com a classificação climática de Köppen, revisada por Kottek et al. (2006), na Figura 10, destaca-se que áreas subtropicais úmidas (Cfa, ~20%) concentram a maior parte dos eventos de subsidência. Nessas regiões, a combinação de precipitação significativa com altas temperaturas sazonais podem levar ao aumento da pressão sobre aquíferos e solos frágeis.

Figura 10. a) Localização das Subsidiências em Relação a Classificação Climática de Köppen b) Localização das Subsidiências em Relação à Precipitação Média Anual C) Localização das Subsidiências em Relação à Temperaturas Médias Anuais D) Percentagem de casos de Subsidiências em relação ao tipo de clima.



Fontes: Autores (2024)

As áreas de clima tropical com inverno seco (Aw, ~17%), oceânico com verões amenos (Cfb, ~14%) e tropical com estação seca no verão (As, ~11%), bem como as subtropicais com inverno seco (Cwa, ~11%), também apresentam grande suscetibilidade, já que as variações hídricas e térmicas afetam diretamente a estabilidade do solo. Nas regiões tropicais úmidas (Am, ~10%) e tropicais de altitude (Cwb, ~6%), a oscilação entre estações úmidas e secas, aliada às variações sazonais de temperatura, contribui para a intensificação dos processos de subsidência. Já nas áreas tropicais sem estação seca (Af, ~7%), a saturação constante do solo pode reduzir sua coesão estrutural, favorecendo o afundamento gradual.

Por fim, as regiões semiáridas (Bsh, ~4%) apresentam menor incidência de subsidência. A pouca cobertura vegetal e as condições de evaporação exacerbada favorecem a subsidência ao expor o solo a processos erosivos e reduzir o suporte hídrico no subsolo. As variações climáticas nessas regiões contribuem diretamente para a desestabilização das camadas sedimentares, amplificando o risco de subsidência em áreas geologicamente vulneráveis.

DISCUSSÃO

Categorização dos riscos de subsidência do solo

Os riscos associados à subsidência do solo no Brasil podem ser categorizados com base em sua origem (natural ou antrópica), intensidade (gradual ou abrupta) e localização geográfica (urbana, rural ou industrial). A predominância das causas antrópicas, com destaque para a mineração (24%), reflete uma característica peculiar do Brasil, contrastando com o padrão global, onde a extração de água subterrânea é o principal agente de subsidência. Essa discrepância pode ser explicada pela alta concentração de atividades minerárias em áreas densamente povoadas e com infraestrutura urbana próxima, como os casos emblemáticos de Maceió (AL) e Ouro Preto (MG).

As regiões Sudeste e Nordeste apresentam risco elevado devido à combinação de fatores geológicos (terrenos cársticos e sedimentares), hidrológicos (aquíferos porosos e fissurais) e climáticos (variações de precipitação e temperatura). Já no Sul, os riscos estão frequentemente associados à exploração de carvão, enquanto no Centro-Oeste e Norte, os dados são escassos, dificultando uma avaliação precisa dos níveis de risco. Além disso, a falta de uma padronização nacional para classificação e monitoramento de riscos de subsidência cria desafios adicionais para a gestão eficaz desse fenômeno, o que dificulta a sua categorização.

Mitigação dos impactos da subsidência da terra

A mitigação dos impactos da subsidência no Brasil exige uma abordagem integrada, que combine tecnologias de monitoramento avançadas, políticas públicas eficazes e ações preventivas específicas para cada região afetada. Ferramentas como InSAR e SIG têm se mostrado eficazes no monitoramento contínuo, possibilitando análises preditivas e a identificação precoce de áreas de risco. No entanto, sua aplicação ainda é limitada devido à falta de investimentos adequados e capacitação técnica em escala nacional. A implementação de metodologias integradas e a utilização de tecnologias avançadas, são fundamentais para aprimorar a análise do fenômeno e permitir uma resposta mais ágil e precisa às áreas vulneráveis.

De acordo com os dados levantados neste artigo, as políticas públicas voltadas para mitigação devem priorizar a regulamentação rigorosa da exploração mineral e hídrica, com fiscalização constante e penalidades claras para atividades irregulares. A existência de planos de usos sustentáveis dos recursos hídricos, especialmente em áreas com aquíferos vulneráveis, a incorporação de diretrizes de risco de subsidência no planejamento urbano das cidades, evitando construções em áreas suscetíveis sem estudos geotécnicos adequados. Uma educação ambiental e capacitação técnica especializada no tema para gestores públicos e comunidades locais, visando aumentar a conscientização sobre os riscos da subsidência e promover práticas preventivas.

Além disso, é essencial estabelecer redes colaborativas entre instituições acadêmicas, órgãos governamentais e setor privado, garantindo a troca de informações e o desenvolvimento de estratégias conjuntas de mitigação. Portanto, a mitigação eficaz dos impactos da subsidência depende não apenas de avanços tecnológicos, mas também de um compromisso institucional robusto, com ações coordenadas e investimentos contínuos que garantam a segurança estrutural, ambiental e socioeconômica das áreas afetadas.

CONCLUSÃO

A análise dos fenômenos de subsidência no Brasil, baseada na integração de dados geológicos, hidrogeológicos, climáticos e antrópicos, revelou padrões claros de distribuição espacial e relações causais distintas entre os fatores envolvidos. No entanto, algumas limitações foram identificadas durante o tratamento dos dados. Em primeiro lugar, a heterogeneidade das fontes disponíveis, que incluem artigos científicos, relatórios técnicos e informações jornalísticas, pode ter influenciado a precisão de alguns resultados. Além disso, a cobertura desigual dos dados entre as regiões brasileiras, com escassez de informações sistematizadas para o Norte e Centro-Oeste, representa um desafio para uma análise verdadeiramente abrangente, uma vez que lacunas significativas de dados, sugerem a necessidade de ampliar os estudos, análises, coleta de dados e monitoramento sistemático e contínuo, especialmente em áreas menos estudadas.

Dentro desse contexto, este estudo analisou os fenômenos de subsidência no Brasil, caracterizando suas causas, distribuição espacial e implicações ambientais. Foi evidenciado que a mineração se destaca como o principal agente desencadeador de subsidência no país, diferindo do padrão global, onde a extração de água subterrânea predomina, provavelmente isso estaria interligado ao grande histórico de extração intensiva próxima a áreas urbanas e ao uso de técnicas que geram instabilidades geológicas, agravado por fiscalização deficiente e monitoramento inadequado.

Geologicamente, ficou demonstrado que rochas sedimentares e aquíferos porosos possuem maior suscetibilidade ao fenômeno, enquanto fatores climáticos, como variações na precipitação e na temperatura, potencializam os riscos associados, além disso as planícies costeiras, fluviais e regiões de baixa altitude, onde solos menos consolidados e que naturalmente favorecem a deformação e o processos de colapso, especialmente quando combinados com atividades antrópicas intensivas e variações climáticas, são as mais suscetíveis e afetadas.

Em síntese, o estudo oferece uma visão integrada dos processos de subsidência no Brasil, fornecendo evidências científicas que podem orientar políticas públicas e estratégias de mitigação específicas. A continuidade de pesquisas regionais, aliada ao fortalecimento do monitoramento e à adoção de tecnologias de precisão, seria fundamental para reduzir os impactos desse fenômeno e promover a segurança das áreas afetadas.

REFERÊNCIAS

- ABIDIN, H. Z. et al. On causes and impacts of land subsidence in Bandung Basin, Indonesia. *Environmental earth sciences*, v. 68, p. 1545-1553, 2013.
- ALMEIDA, I. T. A poluição atmosférica por material particulado na mineração a céu aberto. 1999. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- ANTUNES, V. N. B.; SILVA, M. S. Danos ambientais e subsidência de mineração: lições extraídas de uma revisão sistemática da literatura. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia*, n. 64, 2024.
- BACCIN, F.K. As atividades de produção de carvão e suas subsequências ambientais com relação aos eventuais processos de subsidência. 2011, 63f. Trabalho de Conclusão de Curso – Auditoria e Perícia Ambiental – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2011.
- BENDARZSEVSZKIJ, Anton et al. World economic forum 2017. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, v. 4, n. 2, 2021.
- BERNARDINO, P., G. FORNARO, R. LANARI, and E. SANSOSTI. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40: 2375–2383, 2002.
- BOTTURA, J.A., ALBUQUERQUE FILHO, J.L. Condicionantes hidrogeológicos no processo de subsidência em Cajamar, SP. In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 1990. Anais. Porto Alegre, RS, 1990
- BRAGA, L. F.S. Resposta flexural da litosfera e subsidência regional na área do Cone do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 7, n. 1-4, p. 157-172, 1993.
- CALDERHEAD, A. I. et al. Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources*, v. 34, n. 1, p. 83-97, 2011.
- CAMPOS, P. C. de O.; BRUNELLI, G. D. P.; MARQUES, M. E. S. Análise de Fundações em Solos Colapsíveis: Estudo de Caso no Município de Sinop–MT. 2020. Anais de XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas, SP. 2020.
- CARRANZA, E.J. M. Objective selection of suitable unit cell size in data-driven modeling of mineral prospectivity. *Computers & Geosciences*, v. 35, n. 10, p. 2032-2046, 2009.
- CASTRO, Tereza Cristina Lopes. *As Minas de Ouro do Brasil: Dois Séculos de História e Arte*. Rio de Janeiro: Editora Capivara, 2010, 440p.
- CENACID (2007) Centro de Apoio Científico em Desastre. Relatório de trabalho do grupo de monitoramento geodésico – 03-09-07, Bocaiuva do Sul, 2007.

CENACID (2020) Centro de Apoio Científico em Desastre. Avaliação de áreas visitadas com subsidências e colapsos em região de processos cársticos e exploração de aquíferos no município de Colombo – Paraná. Relatório 01, 14p., 2020.

CPRM (2018) Serviço Geológico do Brasil. Curso Básico de Percepção e Mapeamento do Risco Geológico, 67p.

CPRM (2019) Serviço Geológico do Brasil. Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): volume I e Volume II

CHAI, L. et al. Risk assessment of land subsidence based on GIS in the Yongqiao area, Suzhou City, China. Scientific Reports, v. 14, n. 1, p. 11377, 2024.

COELHO, D. L. de O. Sismologia de fonte passiva na bacia do Parnaíba: implicações para a subsidência cratônica. 2019. 154f. Tese de Doutorado em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade do Rio Grande do Norte, RN, 2019.

DE OLIVEIRA SANTOS, L. T. S. et al. Conseqüências da atividade garimpeira de diamante na Bacia do rio Coisa Boa, Vila de Igatu-Andaraí-BA. Revista de biologia e ciências da terra, v. 10, n. 2, p. 1-11, 2010.

EUILLADES, P.A.; et al . Subsidence In Maceio, Brazil, Characterized By Dinsar And Inverse Modeling. In IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS 2020), 22–26 March 2020, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-3/W2-2020, 2020, 2020, Santiago, Chile, 2020.

FONTES, S. Conta da Braskem com afundamento do Solo em Maceió, já chega à 1,55 Bilhões. Valor Econômico, 2024. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2024/03/19/conta-da-braskem-com-afundamento-do-solo-em-maceio-ja-chega-a-r-155-bilhoes.ghtml>. Acesso em: 25 de junho de 2024.

FURRIER, M., VITAL, S. R.O. A Formação de Dolinas em Áreas Urbanas: o Caso do Bairro de Cruz das Armas em João Pessoa-PB, Revista Brasileira de Geografia Física 01 (2011) 161-173, 2011

GARCIA, K. B. L. Morfologia e sedimentação da Plataforma do Atol das Rocas. 2021. 53f. Dissertação de Mestrado em Geodinâmica e Geofísica. Centro de Ciências Exatas e Naturais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 2021.

G1. Em 2007, desabamento em obra do metrô abriu cratera de 80 metros e matou 7 pessoas na Marginal Pinheiros, G1, 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2022/02/01/em-2007-desabamento-em-obra-do-metro-abriu-cratera-de-80-metros-e-matou-7-pessoas-na-marginal-pinheiros.ghtml>. Acesso em: 12 agosto de 2023.

G1. GRÁFICO mostra evolução da velocidade do afundamento e da profundidade do solo em Maceió até o rompimento sob lagoa. G1, 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2023/12/11/infografico-veja-evolucao-da-velocidade-do-afundamento-e-da-profundidade-do-solo-em-maceio-ate-o-rompimento-sob-lagoa.ghtml>. Acesso em: 12 de dezembro de 2023.

- GALVÃO, P., HALIHAN, T., HIRATA, R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology journal*, v. 23, n. 7, p. 1499-1513, 2015.
- GALLOWAY, D. L.; BURBEY, T. J. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, v. 19, n. 8, p. 1459, 2011.
- GOES, H., FERNANDES DA SILVA, S., ANTONELLI, T., 2019. Estudos sobre a Instabilidade do Terreno nos Bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL). Volume II Geofísica - gravimetria. Brasília, 2019.
- GOMES DA SILVA, G. I. G.; XAVIER, J. M. COMPARATIVO DE TÉCNICAS PARA MELHORIA DE SOLOS COLAPSÍVEIS: Análise da Viabilidade de Aplicação no Solo de Ibimirim-PE. *Revista Multidisciplinar do Sertão*, v. 3, n. 3, p. 341-353, 2021.
- GHOUSHCHI, S. J.; VAHABZADEH, S.; PAMUCAR, D. Applying hesitant q-rung orthopair fuzzy sets to evaluate uncertainty in subsidence causes factors. *Heliyon*, v. 10, n. 8, 2024.
- GUIRRA, A. P. M.; PARANHOS FILHO, A. C. Cavernas do Mato Grosso do Sul: revisão, atributos condicionantes, análise preditiva e autocorrelação espacial. *Terr@ Plural*, v. 18, p. 1-31, 2024.
- HACHICH, W. (1997) O renivelamento dos edifícios de Santos. *Revista Técnica*. Editora Pini. São Paulo, v.28, 1997
- HARTWIG, M. E. et al. The significance of geological structures on the subsidence phenomenon at the Maceió salt dissolution field (Brazil). *Acta Geotechnica*, v. 18, n. 10, p. 5551-5573, 2023.
- HENGL, T. Finding the right pixel size. *Computers & geosciences*, v. 32, n. 9, p. 1283-1298, 2006.
- HERRERA-GARCÍA G et al. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*. 2021 Jan 1;371(6524):34-36.
- HINDI, E.C. et al. Características hidrogeológicas do aquífero cárstico em Colombo (PR) e impactos ambientais resultantes da sua exploração. VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 2002. Anais. Florianópolis, SC, 2002.
- HUANG, Bijuan; SHU, Longcang; YANG, Y. S. Groundwater overexploitation causing land subsidence: hazard risk assessment using field observation and spatial modelling. *Water resources management*, v. 26, p. 4225-4239, 2012.
- HWANG, C. et al. Time-varying land subsidence detected by radar altimetry: California, Taiwan and north China. *Scientific reports*, v. 6, n. 1, p. 28160, 2016.
- IPT- (2018) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas PINIweb: Relatório do IPT sobre acidente na Estação Pinheiros (1 - 7) Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=e9V6P2Qs0so&list=PLc_tQpFqoPRag6htx_RkdNUZgij-AJbs_> Acesso em 20 de dezembro de 2024.
- ITATIAIA. Buraco se abre e revela mina de ouro escondida debaixo de casa em Ouro Preto, Itatiaia, 2022 (a). Disponível em: <https://www.itatiaia.com.br/noticia/buraco-se-abre-e-revela-mina-escondida-debaixo-de-casa-em-ouro-preto>. Acesso em: 11 de março de 2023

- ITATIAIA. Professor descobre 170 minas de ouro 'escondidas' em Ouro Preto, Itatiaia, 2022 (b). Disponível em: <https://www.itatiaia.com.br/noticia/professor-descobre-170-minas-de-ouro-escondidas-em-ouro-preto>. Acesso em: 11 de março de 2023.
- JACKSON, Julia A. Subsidence. In: Glossary of geology. 4. ed. Alexandria, Virginia: American Geological Institute, 1997. p. 123-125.
- LAGO, A. L.; BORGES, W.R.; AMARAL E.S.; Mapeamento de áreas de subsidência com GPR em Teresina, PI; In 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, Anais, 19-22 August 2019.
- LEE, S.; CHOI, J.; WOO, I. The effect of spatial resolution on the accuracy of landslide susceptibility mapping: a case study in Boun, Korea. *Geosciences Journal*, v. 8, p. 51-60, 2004.
- LIMA, I.F.; Maceió, a cidade restinga: contribuição ao estudo geomorfológico do litoral alagoano, Ed. FAC-SÍMILE, EDUFAL, 1990, Original Universidade do Texas, 255pg.
- LIU, Yanjun; MA, Teng; DU, Yao. Compaction of muddy sediment and its significance to groundwater chemistry. *Procedia Earth and Planetary Science*, v. 17, p. 392-395, 2017.
- LOPES, L.S.O., et al. Riscos geológicos: eventos de subsidências no município de teresina-pi. *Revista Geonorte*, v. 5, n. 19, p. 197-201, 2014.
- LUNA, R.M.R., Garnés, S.J.A., Cabral, J.J.S.P., Santos S.M. (2017) Groundwater overexploitation and soil subsidence monitoring on Recife plain (Brazil). *Natural Hazards*, v. 86, n. 3, p. 1363-1376, 2017.
- MA, T. et al. Water-rock interactions and related eco-environmental effects in typical land subsidence zones of China. *Hydrogeology Journal*, v. 26, n. 5, 2018.
- MACIEL JÚNIOR, O. C. Estudo de movimentos de subsidência na região central de São João del Rei-MG. 2001. 86f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.
- MAIA, P.H.P. et al. Análise geológica e estrutural das fissuras e subsidências no carste de Lapão. *Revista Cadernos de Geociências*, v. 7, n. 2, p. 112-121, 2010.
- MAFFEI, C. E. M. et al. As causas do acidente da Estação Pinheiros da Linha 4 do Metrô de São Paulo. *Techne*, v. 16, n. 138, p. 62-71, 2008.
- MANTOVANI, J. R. et al. An assessment of ground subsidence from rock salt mining in Maceió (Northeast Brazil) from 2019 to 2023 using remotely sensed data. *Environmental Challenges*, v. 16, p. 100983, 2024.
- 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. 2008.60f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2008.

- MENEGASSE V., L. N., SABADIA, J.A. B. e DUARTE, U. Problemas geotécnicos associados a exploração de água subterrânea: um exemplo relevante no município de São Paulo. Águas subterrâneas: (São Paulo). São Paulo: Abas.1994
- MENEZES, D. F. Fraturas e halos de subsidência em torno de dolinas, Semiárido do Brasil. 2019. 69f. Dissertação de Mestrado em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 2019.
- MENDONÇA, M. B. Comportamento De Solos Colapsíveis Da Região De Bom Jesus Da Lapa – Bahia.1990. 281f. Tese de Doutorado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.
- MODONI, G. et al. Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. Engineering geology, v. 167, p. 59-71, 2013.
- MOTAGH, M. et al. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. Geophysical Research Letters, v. 35, n. 16, 2008.
- MOURA, M. Cratera de cerca de 30 metros se abre em fazenda em MG e é avaliada pela UFU, G1, 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/minas-gerais/triangulo-mineiro/noticia/cratera-de-cerca-de-30-metros-se-abre-em-fazenda-em-mg-e-e-avaliada-pela-ufu.ghtml>. Acesso em 10 de Junho de 2023.
- MOURA, P. E. F. Evolução Geomorfológica do relevo cárstico do município de Martins-Rio Grande do Norte. 2017.156f. Dissertação de Mestrado em Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará, CE, 2017.
- NADAL, C.A. et al. Monitoramento De Subsidência Do Terreno Devido A Exploração De Aquífero Carstico. Revista Águas Subterrâneas, Vol 0, Iss 0, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas-ABAS, 1995
- NASCIMENTO, F.M.F. et al. Impactos ambientais nos recursos hídricos da exploração de carvão em Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO, 1.; CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA, 2., Belo Horizonte, 2002. Resumo. Belo Horizonte, 2002.
- NASCIMENTO, I. B. Problemáticas socioambientais e implicações à saúde do trabalhador: o caso do garimpo de esmeraldas em Campos Verdes-GO. 2009.169 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Geografia, Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- PEREIRA, R.; JUNIOR, G. C. D. S.; JUNIOR, J.A. G. Funcionamento Hidrodinâmico do Aquífero Semiconfinado da Região do Bonfim-RN-Brasil: Uma Interação com o Aquífero Livre e a Lagoa do Bonfim. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 2004, V.9, N.2, 75-84.
- PEREIRA, D. A. et al. Dolinas em Arenitos do Grupo Urucuia na Formação Chapadão na Bacia Hidrográfica do Rio Grande em Barreiras–Bahia. Águas Subterrâneas, 2016.
- REIS, A. P. C. Simulação numérica tridimensional da escavação do trecho Asa Norte do metrô do DF com tuneladora tipo EPB. 2021. 124f. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2021.

- RUIZ, M. S. et al. Abordagens de conflitos socioambientais em casos de subsidência de minas de carvão no Brasil e EUA. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 17, n. 2, p.129-156, 2014.
- SALLES, L., GALVÃO, P. Nova Abordagem De Avaliação Da Suscetibilidade Ao Colapso E Subsidência De Áreas Cársticas: Estudo De Caso Do Município De Iraquara, Chapada Diamantina (Ba), Brasil. *Águas Subterrâneas*. In *Anais do VI Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo*, 2021.
- SALLUM FILHO, W.; Subsidência e Colapso em Terrenos Cársticos in *DESASTRES NATURAIS Conhecer para prevenir*, Lídia Keiko Tominaga, Jair Santoro, Rosangela do Amaral (orgs.) – São Paulo: Instituto Geológico, 2009. –196 p.: il.; color.; 24 cm
- 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.
- SANTOS, A. R.; *Meio Ambiente: Áreas De Risco Para A Engenharia Em Calcários Cársticos: Modelagem Geológica E Soluções Construtivas*. 2022. Disponível em: <https://agego.org.br/wp-content/uploads/2022/11/AREAS-DE-RISCO-PARA-A-ENGENHARIA-EM-CALCARIOS-CARSTICOS-MODELAGEM-GEOLOGICA-E-SOLUCOES-CONSTRUTIVAS.pdf>. Acesso em 15 de dezembro de 2024.
- SCHMIDT, C.W. et al. Delta subsidence: an imminent threat to coastal populations, *Environmental Health Perspectives*, 123(8), A204-A209, 2015.
- SILVA, V. L. *Análise da taxa de subsidência da Bacia de Campos nas proximidades do Lineamento Alegre*. 2015, 50f. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, 2015.
- SILVA, A.B. *Abatimento de solo na cidade de Sete Lagoas, Minas gerais*. *Águas Subterrâneas*, v. 12, n. 1, p. 57-66, 1988.
- SOUSA, N.R.P., SOARES, A.B. *Caracterização geotécnica da rocha calcária de João Pessoa/PB*. *Geotecnia*, v. 135, p. 129-157, 2015
- SOUSA, M. L. *As conseqüências da seca no Perímetro Irrigado de São Gonçalo-Sousa-PB*. 2017. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso de Geografia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2017.
- SOUZA, W.D.O. et al. Analysis of Urbanization-Induced Land Subsidence in the City of Recife (Brazil) Using Persistent Scatterer SAR Interferometry. *Remote Sens*. 2024, 16, 2592.
- SOUZA, I. C D. O. *O efeito da subsidência tectônica na evolução do depocentro e no desenvolvimento da Sub-Bacia Mundaú, margem equatorial brasileira*. 2022. 88f. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, SP, 2022.
- TANAJURA, E. L. X. et al. *Avaliação de Subsidência Planície Deltaica do Rio São Francisco a partir dos Vértices de Referência de Nível da Rede Altimétrica Brasileira*. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 45, p. 1-14, 2022.

- TERZAGHI, K. Theory of consolidation. Theoretical soil mechanics, Ed. John Wiley & Sons, London, 1943, 526p.
- TIMO, M. B. et al. Gruta Do Baú: Beleza E Diversidade De Espeleotemas Na Região De Corrêgo Fundo, Minas Gerais-Brasil. In: Anais do Congresso Brasileiro De Espeleologia. 2009. p. 251-257.
- TOLEDO, V. L. Geofísica aplicada a áreas suscetíveis à subsidência cárstica em Curvelo-MG. 2021. 97f. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, 2021.
- TRIBUNA, Colégio construído em área cavernosa está afundando. Tribuna, 2013. Disponível em: <https://www.tribunapr.com.br/noticias/parana/colegio-construido-em-area-cavernosa-esta-afundando/>. Acesso em: 25 fevereiro de 2023
- TVBAHIA, Cratera gigante misteriosa com quase 50 metros de profundidade surge perto de vila na BA e preocupa moradores: 'Medo'. G1, 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/ba/bahia/noticia/cratera-gigante-misteriosa-com-quase-50-metros-de-profundidade-surge-na-ba-e-preocupa-moradores-medo.ghtml>. Acesso em: 16 de março de 2023.
- UNESCO, IASH. Land Subsidence: Proceedings of the First International Symposium on Land Subsidence, Tokyo, 1969. Int. Ass. Sci. Hydro (IASH), 1970.
- UOL, Extração de sal-gema por 40 anos: o que são as minas da Braskem em Maceió? UOL, 2023. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2023/12/01/o-que-sao-as-minas-da-braskem.htm?cmpid=copiaecola>. Acesso em 5 de janeiro de 2024.
- VASSILEVA, M. et al.; A decade-long silent ground subsidence hazard culminating in a metropolitan disaster in Maceió, Brazil in Scientific Reports 11, 7704 Nature Research. 2021.
- VILARIM M.B. et al., Casos De Subsidência Devido à Exploração De Água Subterrânea, XIX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Recife, agosto de 2020. Anais do Simpósio XIX SILUBESA, da - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife, 2020.
- ZONTA, J. T.; DA LUZ, C. C.; SACHET, J. V. Mitigação Do Impacto Ambiental Em Áreas Cársticas: Estudo De Caso De Uma Dolina De Colapso Na Rodovia Federal Br-135/Ba.2018. Relatório Técnico do Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura, Universidade Federal do Paraná, PR, 2018.