



REVISÃO E ATUALIZAÇÃO DO PLANO DIRETOR DO MUNICÍPIO DE BONITO – MS



RELATÓRIO TÉCNICO 09 EXEMPLOS DOS IMPACTOS DA EXPLORAÇÃO DE SOLOS CÁRSTICOS

CAPA

A composição visual da capa tem início na base, onde está localizado o logotipo do Plano Diretor de Bonito (MS). Essa faixa inferior apresenta uma coloração terrosa, inspirada na calcita, remetendo ao solo cárstico característico da região. A superfície é marcada por fissuras que simbolizam os rios subterrâneos que percorrem o subsolo de Bonito (MS), elementos essenciais de sua paisagem natural. Essas fissuras se estendem até a parte central da capa, agora sobre um fundo verde, evocando a vegetação e os espaços naturais do município. É nesse espaço central que se posiciona o título do documento, sobreposto a uma representação da malha hidrográfica de Bonito (MS), ilustrando de forma contínua a relação entre solo, água e território. Logo acima, uma faixa apresenta grafismos inspirados nas três principais etnias originárias da região — Kadiwéu, Kinikinau e Terena —, em reconhecimento aos primeiros habitantes e à diversidade cultural do município.

A fotografia ilustra um típico solo cárstico, destacando a interação complexa entre os processos de intemperismo químico e a dissolução das rochas carbonáticas. Observa-se uma mistura heterogênea, composta por fragmentos de diversas dimensões e formas angulosas, organizados em camadas irregulares, cujas tonalidades variam do vermelho ao amarelo, resultado da presença de óxidos de ferro e do avanço do intemperismo. Essas propriedades surgem da dissolução desigual de minerais (principalmente o carbonato de cálcio) por águas ligeiramente ácidas, o que gera cavidades, fissuras e áreas de fragilidade estrutural no subsolo. Com o passar do tempo, os materiais mais solúveis são eliminados, permanecendo apenas os minerais mais duráveis, como o quartzo, junto a solos residuais argilosos, conhecidos como terra *rossa*. Esse tipo de formação é frequentemente encontrado em áreas com relevo cárstico, onde a dinâmica das águas subterrâneas tem um papel crucial na modelagem da paisagem e na formação dos perfis de solo.

Autoria do texto e imagem: Jonas Godinho e Julio César de Araújo; Danilo Crelier



APRESENTAÇÃO

O relatório fornece uma visão abrangente dos fenômenos cársticos no Brasil e ao redor do Mundo, particularmente a ocorrência de subsidências e colapsos (dolinas) em terrenos calcários, e os impactos socioambientais associados. Diversos artigos e relatórios técnicos discutem o carste, suas características geomorfológicas e hidrológicas, e as consequências do uso e ocupação do solo nesses ambientes sensíveis, como poluição de aquíferos e riscos de inundações. Os exemplos aqui citados buscam estabelecer paralelos com município de Bonito, no Mato Grosso do Sul, cuja paisagem é marcada por formações cársticas, cavernas, dolinas e rios de águas cristalinas. A região destaca-se pela interação entre o turismo ecológico e a necessidade de manejo sustentável do território, evidenciando a importância da preservação dos sistemas cársticos frente às dinâmicas antrópicas. Assim, a revisão do PLANO DIRETOR deve ser atenciosa com essa particularidade do solo e seus impactos no município.



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO



Instituto Virtual Internacional
de Mudanças Globais
COPPE / UFRJ



Avenida Pedro Calmon s/n - Bloco P, P/4
Cidade Universitária, Ilha do Fundão
Rio de Janeiro – RJ | CEP: 21941-596
contato@ivig.coppe.ufrj.br
<https://ivig.coppe.ufrj.br/>

RESPONSÁVEIS PELO CONVÊNIO

Concedente Jaime Elias Verruk, Secretário de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação de Mato Grosso do Sul (SEMADESC)

Convenente Roberto De Andrade Medronho, Reitor da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Interveniente Alberto Felix Antônio da Nobrega, Fundação Universitária José Bonifácio (FUJB)

Fiscal do Convênio Hemilly Thalia Ferreira da Silva (SEMADESC)
Concedente

Fiscal do Convênio Neilton Fidelis da Silva (UFRJ)
Convenente

Fiscal do Convênio Júlio Martins (FUJB)
Interveniente



COORDENAÇÃO GERAL

SEMADESC - Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação de Mato Grosso do Sul

Jaime Elias Verruck Secretário de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação de Mato Grosso do Sul

Artur Henrique Leite Falcette Secretário Executivo de Meio Ambiente e de Secretário Adjunto de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação

Ana Cristina Trevelin Superintendente de Gestão de Ativos Ambientais

PREFEITURA MUNICIPAL DE BONITO (MS)

Josmail Rodrigues Prefeito

Juliane Ferreira Salvadori Vice-Prefeita/ Secretaria de Turismo e Desenvolvimento Econômico

IVIG / UFRJ - Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais da Universidade Federal do Rio de Janeiro

Marcos Aurélio V. Freitas, D Sc Coordenador IVIG, Geógrafo

Mário Moraes, D Sc Coordenador Executivo, Biólogo Marinho

Fábio Bitencourt, D Sc Coordenador da Revisão do Plano Diretor, Arquiteto e Urbanista

Natália B. Carvalho, D Sc Coordenação dos Estudos da Água, Bióloga

EQUIPE TÉCNICA

IVIG / UFRJ

Marlise de Aguiar, D Sc Arquiteto e Urbanista

Isabel Muzi, M Sc Arquiteto e Urbanista

Celso Hugo Girafa Arquiteto e Urbanista

Jonas Godinho, M Sc Arquiteto e Urbanista

Julio César de Araújo Arquiteto e Urbanista

Danilo Lobato Crelier Arquiteto e Urbanista

Jorge H. A. Prodanoff, D Sc Engenheiro Civil de Obras Hidráulicas

Adriana Cavalcanti, M Sc Oceanógrafa

PREFEITURA MUNICIPAL DE BONITO (MS)

Thyago Sabino Secretário Municipal de Meio Ambiente

Helia Mara Sanches Cardoso Assistente Administrativo e Chefe de Divisão de Arborização Urbana da Secretaria Municipal de Meio Ambiente

Aline Barbosa Giurizzatto Chefe de Saneamento da Secretaria Municipal de Meio Ambiente

Valdenir Roberto de Souza Diretor de Departamento de Gestão e Conservação Ambiental

Lucas Kazu Yanai Chefe da Divisão de Educação Ambiental

Osmar Jacques Teixeira Diretor de Departamento de Cadastro e Tributação

Elias de Oliveira Francisco Diretor de Turismo

Cristalvo Freitas Campos Diretor do Departamento de Trânsito e Mobilidade

NÚCLEO GESTOR

Presidente Jaime Elias Verruk

Vice-presidente Juliane Ferreira Salvadori

Coordenador Thyago Sabino

COLABORADORES

IVIG / UFRJ

Sylvia Meimaridou Rola, D Sc Coordenadora do Laboratório de Arquitetura e Cidades - LabArc IVIG, Arquiteta e Urbanista

Luiz Henrique Alves da Silva, M Sc Geógrafo

Cláudia da Cruz Lima Gonçalves Assistente Administrativo

Rosana Silva de Brito Pereira Assistente Administrativo

José Luiz Moreira Cardoso Suporte Operacional

Roberto dos Santos Cordeiro Assistente Técnico

Luiz Filipe Viana da Silva Gerente de Redes

PREFEITURA MUNICIPAL DE BONITO (MS)

Osmar Prado Pias Procurador Jurídico do Município

Jary Souza Neto Filho Secretário de Governo

Ana Carolina Colla Secretaria de Saúde

Leila Rodrigues Secretaria de Assistência Social

Eliana Maria Rafael Fregatto Secretaria Municipal de Educação e Cultura

Madson Rodrigues Cunha Secretário Municipal de Obras

Edilberto Cruz Gonçalves Secretário de Administração e Finanças

Lelo Marchi Diretor de Departamento de Cultura

José Sanches Cavalheiro (Zezão) Diretor do Departamento Municipal de Urbanismo, Habitação e Regularização Fundiária

COLABORADORES

ESTADO DO MATO GROSSO DO SUL

Paulo Sergio Gimenes Gestor de Desenvolvimento, Câmara Técnica de Conservação de Solo e Água, da Secretaria Executiva de Desenvolvimento Sustentável da SEMADESC

Versões

REVISÃO	DATA	OBSERVAÇÃO
R00	31/10/2025	Emissão Inicial

Sumário

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. Objetivo	10
1.2. Metodologia	10
2. CASOS NO BRASIL.....	12
2.1. Maceió, Alagoas.....	14
2.2. Teresina, Piauí.....	19
2.3. Lapão, Bahia.....	23
2.4. Irecê, Bahia.....	25
2.5. Cajamar, São Paulo	27
2.6. Mairinque, São Paulo.....	29
2.7. Vale do Ribeira, São Paulo	30
2.8. Sete Lagoas, Minas Gerais.....	32
2.9. Vazante, Minas Gerais	33
2.10. São Thomé das Letras, Minas Gerais	35
2.11. Jaíba, Minas Gerais.....	36
2.12. Belo Horizonte, Minas Gerais	38
2.13. Confins, Minas Gerais	40
2.14. Colombo, Paraná.....	41
2.15. Almirante Tamandaré, Paraná.....	43
2.16. Bocaiúva do Sul, Paraná	45

3. CASOS INTERNACIONAIS.....	46
3.1. Províncias na China	48
3.2. Ripon, Reino Unido	51
3.3. Norwich, Reino Unido	52
3.4. Riemst, Bélgica	53
3.5. Tournaisis, Bélgica.....	54
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
5. REFERÊNCIAS.....	56
Referências Bibliográficas	56
Páginas Eletrônicas Institucionais	59

1. Introdução

O **Relatório técnico 09 - Exemplos dos Impactos da Exploração de Solos Cársticos** tem como objetivo apresentar uma análise dos impactos ambientais, urbanos e sociais provocados pela exploração inadequada de solos cársticos, com destaque para regiões brasileiras e casos internacionais. A escolha do tema se justifica pela relevância geológica e ambiental do carste no Município de Bonito (MS), cuja paisagem subterrânea e hidrogeologia característica exigem cuidado especial na ocupação do solo e nas atividades extrativistas.

Solos cársticos são formados pela dissolução de rochas solúveis, como calcário, dolomita e gesso, e estão associados a feições geológicas como dolinas, cavernas e rios subterrâneos. Essa morfologia torna o terreno altamente vulnerável a subsidências, desabamentos e contaminação dos recursos hídricos. A atuação humana intensiva, especialmente através da mineração, remoção de vegetação, perfuração de poços e urbanização desordenada, tem agravado a instabilidade desses sistemas, colocando em risco populações inteiras, infraestrutura urbana e ecossistemas subterrâneos (FORD,WILLIAMS,2007,GOLDSCHIEDER ET AL., 2020).

Embora o termo "solos cársticos" seja amplamente utilizado na literatura técnica brasileira, é importante esclarecer que o fenômeno cárstico ocorre primariamente nas rochas solúveis subjacentes, e não propriamente no solo superficial. A literatura geocientífica internacional classifica os terrenos cársticos em três tipos principais, de acordo com a natureza das rochas formadoras: (1) carste carbonático, desenvolvido em calcário, dolomita e mármore; (2) carste evaporítico, formado em gesso, anidrita, halita (sal-gema) e outros evaporitos; e (3) carste silicático, que ocorre em rochas como quartzitos e arenitos (Chen et al., 2017; Veress, 2022; Martini, 2004).

O carste carbonático é o tipo mais comum e amplamente estudado, caracterizando a maioria das regiões cársticas do Brasil, incluindo Bonito (MS). O carste evaporítico, embora menos frequente, é particularmente relevante devido à alta solubilidade das rochas evaporíticas. Segundo Johnson (1997), os evaporitos são as rochas mais solúveis entre as rochas comuns, dissolvendo-se facilmente para formar cavernas,

dolinas e rios subterrâneos. O carste silicático, por sua vez, representa um tipo menos comum, mas cientificamente reconhecido, onde processos de dissolução química atuam sobre rochas silicáticas em condições específicas (Wray, 1997; Martini, 2004).

A diversidade de tipos cársticos é relevante para o presente estudo, uma vez que os casos apresentados abrangem diferentes contextos geológicos. Maceió (AL), por exemplo, representa um caso de carste evaporítico em sal-gema, enquanto a maioria dos demais municípios citados caracteriza-se por carste carbonático. Essa variedade demonstra que os riscos associados à exploração mineral e à urbanização não se limitam a áreas de calcário, mas estendem-se a todos os tipos de terrenos com rochas solúveis.

A distribuição global dos terrenos cársticos é ampla e diversificada, abrangendo todos os continentes habitados. As áreas cársticas ocupam aproximadamente 17,5% da superfície terrestre livre de gelo, concentrando-se em regiões tropicais e temperadas, onde as condições climáticas favorecem os processos de dissolução química (Goldscheider et al., 2020; Chen et al., 2017).

Quadro 1 - Distribuição percentual dos tipos de terrenos cársticos no mundo

Tipo de rocha	Percentual da superfície terrestre livre de gelo	Classificação
Rochas carbonáticas (calcário e dolomita)	15,2%	Carste carbonático
Rochas evaporíticas (gesso, anidrita, halita)	1,8%	Carste evaporítico
Rochas silicáticas (quartzito e arenito puro)	0,5%	Carste silicático
Outras rochas (siliciclásticas, ígneas e metamórficas não cársticas)	82,5%	Não cársticas

Fonte: Adaptado de Goldscheider et al.. (2007), Chen et al.. (2017) e MARTINI (2004).

No Brasil, as principais áreas cársticas concentram-se nas regiões Sudeste (Minas Gerais e São Paulo), Centro-Oeste (Mato Grosso do Sul, Goiás), Nordeste (Bahia, Piauí) e Sul (Paraná), correspondendo principalmente a formações carbonáticas do Proterozóico e Paleozóico. A região da Serra da Bodoquena, onde se localiza Bonito (MS), representa uma das mais importantes províncias cársticas do país, caracterizada por extensas formações de calcário e dolomita com desenvolvimento expressivo de cavernas, dolinas e rios subterrâneos.

A partir do levantamento de casos emblemáticos no Brasil, como os desastres geotécnicos em Maceió (AL), Cajamar (SP), Vazante (MG), entre outros, bem como de experiências internacionais como as ocorridas na China, Itália, Bélgica e Reino Unido, pretende-se destacar os principais mecanismos de instabilidade do terreno cárstico e suas consequências diretas e indiretas.

Este relatório foi elaborado pela equipe técnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), por meio do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais (IVIG), em parceria com a Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação (SEMADESC), com suporte administrativo da Fundação Universitária José Bonifácio (FUJB) e com apoio da Prefeitura Municipal de Bonito (MS). O projeto é viabilizado pelo Convênio nº 1729/2024 e tem como base o trabalho do Grupo de Trabalho (GT) instituído pelo Decreto Estadual nº 16.336/2023. A equipe é composta por profissionais da UFRJ, gestores públicos municipais e representantes da SEMADESC.

O município de Bonito (MS) é amplamente reconhecido por sua biodiversidade, geologia cárstica singular e importância ambiental estratégica na região Centro-Oeste do Brasil.

Por este motivo, a elaboração de um novo Plano Diretor requer um olhar técnico e participativo que considere a delicada relação entre o ser humano, o desenvolvimento urbano e a conservação ambiental, alinhando-se às diretrizes do Estatuto da Cidade (Lei Federal nº 10.257/2001) e aos compromissos da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente o ODS 11 — Cidades e Comunidades Sustentáveis (Brasil, 2022).

O processo segue as orientações metodológicas do Guia para Elaboração e Revisão de Planos Diretores (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2022, p. X), que estabelece as bases para uma política urbana democrática, inclusiva e sustentável, com destaque para a realização de audiências públicas como instrumentos fundamentais de escuta qualificada e gestão compartilhada das decisões urbanas (Brasil, 2007).

Este relatório integra a Etapa 2 – Leituras, reforçando o compromisso com a transparência, a publicidade e a gestão democrática da cidade, princípios que norteiam todo o processo de revisão e atualização do Plano Diretor.

1.1. Objetivo

Este relatório técnico tem como objetivo identificar e documentar casos emblemáticos de impactos resultantes da exploração de solos cársticos no Brasil e no exterior, apresentando uma análise dos efeitos ambientais, urbanos e sociais decorrentes do uso inadequado desses terrenos. A finalidade é subsidiar o planejamento territorial do Município de Bonito (MS), fornecendo referências para a prevenção e mitigação de riscos associados a esse tipo de formação geológica.

1.2. Metodologia

A metodologia está fundamentada na revisão bibliográfica e análise documental, estruturada nas seguintes etapas:

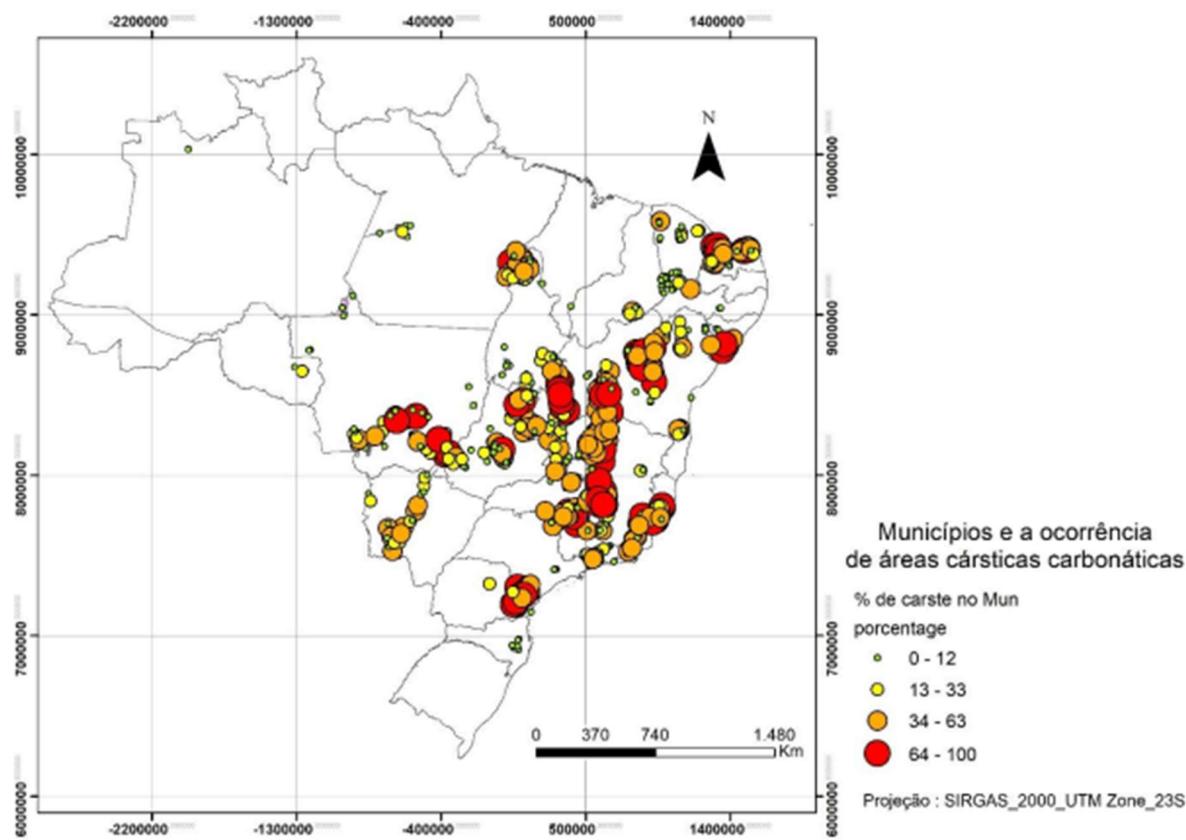
- **Revisão da literatura científica e técnica:** levantamento de artigos científicos, relatórios técnicos, reportagens, documentos governamentais e estudos de caso sobre fenômenos cársticos, com ênfase em impactos da exploração mineral e urbanização em terrenos de rochas solúveis;
- **Seleção de casos representativos:** identificação de casos emblemáticos no Brasil e internacionais que ilustram diferentes tipos de impactos e contextos geológicos;
- **Análise comparativa:** sistematização dos mecanismos de instabilidade, tipos de impactos socioambientais e medidas de mitigação adotadas nos casos estudados, estabelecendo paralelos com as características geológicas e ambientais do Município de Bonito;
- **Síntese e contextualização:** integração dos dados levantados com as especificidades do carste de Bonito (MS), visando fornecer orientações técnicas aplicáveis ao planejamento territorial municipal.

A análise abrangeu diferentes tipos de carste (carbonático, evaporítico e silicálico), permitindo uma compreensão ampla dos riscos associados à exploração de rochas solúveis e suas implicações para a gestão territorial sustentável.

2. Casos no Brasil

O Brasil possui extensas áreas de terrenos cársticos distribuídas por diferentes regiões do país, (Figura 1) abrangendo desde formações carbonáticas clássicas até depósitos evaporíticos. A exploração mineral, a urbanização acelerada e a ocupação inadequada do solo em áreas de fragilidade geológica geraram impactos significativos em diversos municípios brasileiros, resultando em subsidências, colapsos de terreno, deslocamentos populacionais e comprometimento de recursos hídricos.

Figura 1 — Porcentagem do território municipal com ocorrência de rochas cársticas carbonáticas.



Fonte: Lopes (2023).

São descritos a seguir dezesseis casos representativos de municípios brasileiros que enfrentaram ou enfrentam problemas relacionados à exploração e ocupação de terrenos cársticos. Os exemplos abrangem diferentes contextos geológicos e tipos de carste: Maceió (AL) ilustra os impactos da exploração de sal-gema (carste evaporítico); municípios como Cajamar (SP), Sete Lagoas (MG), Vazante (MG) e outros da região da Serra da Bodoquena demonstram os riscos associados ao carste

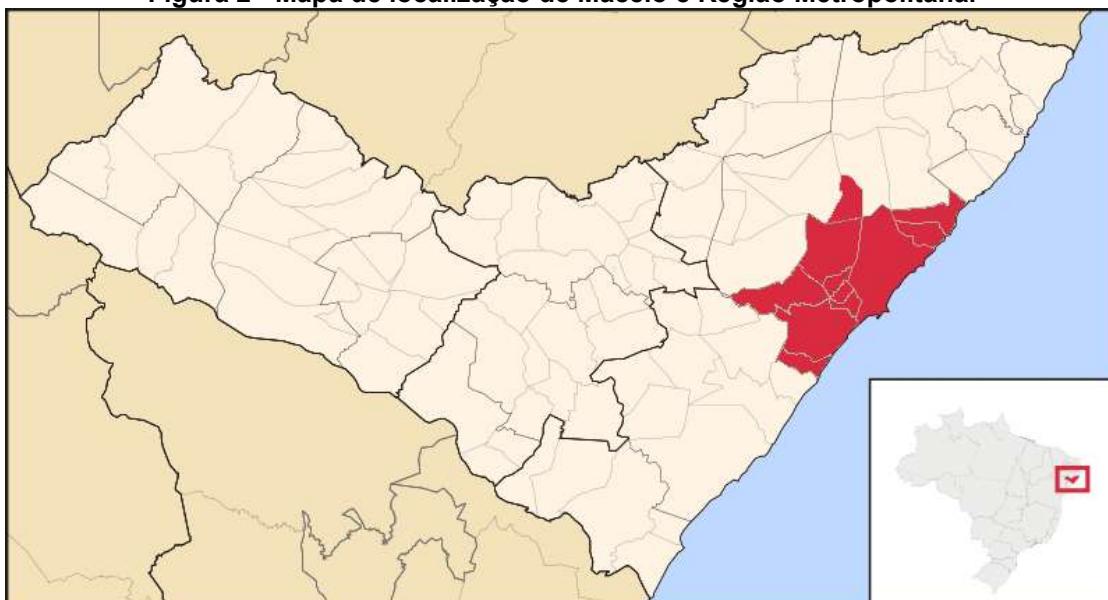
carbonático em calcário e dolomita; enquanto São Thomé das Letras (MG) representa um caso de carste silicático em quartzito (Sallun Filho; Karmann, 2007).

A diversidade desses casos permite compreender os múltiplos mecanismos de instabilidade geotécnica e suas consequências socioambientais, fornecendo subsídios para o planejamento territorial de Bonito (MS), município que compartilha características geológicas semelhantes com várias dessas localidades.

2.1. Maceió, Alagoas

O caso de Maceió é um dos exemplos mais notórios no Brasil de impactos severos decorrentes da exploração de sal-gema. A mineração, realizada pela Braskem desde os anos 1970, envolve a extração de sal-gema de rochas a mais de mil metros de profundidade, através da injeção de água para formar salmoura e posterior retirada da solução, segundo apontado por Seixas (2023) na BBC News Brasil. Embora o sal-gema seja um minério valioso para a indústria química (produção de cloro, soda cáustica, PVC, entre outros), a forma como a exploração foi conduzida gerou instabilidade no solo conforme matéria de Casemiro para a página eletrônica do G1 (20 ago. 2025).

Figura 2 - Mapa de localização de Maceió e Região Metropolitana.



Fonte: WIKICOMMONS (2009).

Cinco bairros da cidade de Maceió foram citados na BBC News Brasil: Pinheiro, Mutange, Bebedouro, Bom Parto e Farol. Segundo a matéria estes locais foram severamente afetados por afundamentos do solo, com risco iminente de colapso de minas subterrâneas. Órgãos de fiscalização já alertavam sobre esses riscos há pelo menos uma década. (Figura 3).

Figura 3 – Bairros Evacuados de Bebedouro, Bom Parto, Farol, Mutange e Pinheiro.



Fonte: Defesa Civil de Maceió

B B C

Fonte: Defesa Civil de Maceió apud. Seixas (2023).

Desabamentos e Rachaduras: O surgimento de rachaduras em imóveis e a formação de crateras no solo foram observados desde 2018, culminando em tremores de terra e danos irreversíveis a propriedades (Figura 4).

Figura 4 – Rachaduras em imóveis após tremores de terra em Maceió



Fonte: Moriyama (2024).

Mais de 14 mil imóveis foram evacuados, afetando cerca de 60 mil pessoas, que tiveram que abandonar suas casas e bairros, transformando-os em bairros fantasmas (Figura 5).

Figura 5 - Rua deserta em Bebedouro, um dos bairros de Maceió que se tornaram 'fantasmas' após a evacuação.



Fonte: França (2021).

Há ainda a preocupação de que um colapso maior possa levar à salinização da Lagoa Mundaú Figura 6, afetando drasticamente a fauna e flora locais.

Figura 6 - Vista aérea de uma das áreas afetadas pela subsidência em Maceió, mostrando a extensão do problema e Lagoa Mundaú

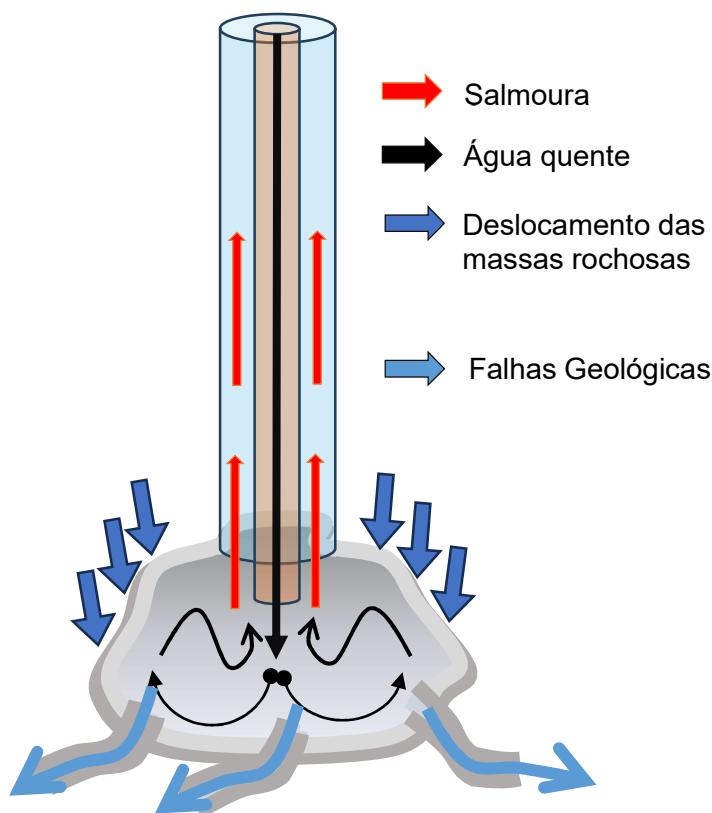


Fonte: Batista (2024).

O problema em Maceió, Alagoas, é um exemplo contundente de como a exploração mineral inadequada pode desencadear uma crise socioambiental de grandes

proporções. A extração de sal-gema, um minério essencial para a indústria química, foi realizada por décadas na capital alagoana. No entanto, a metodologia empregada, que envolvia a criação de grandes cavidades subterrâneas e a injeção de água quente para dissolver o sal, comprometeu a estabilidade geológica da região conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema adaptado da Dissolução do Sal Gema.



Fonte: Schmidt (2024).

Desde 2018, os moradores de bairros como Pinheiro, Mutange e Bebedouro começaram a sentir os efeitos dessa instabilidade, com o surgimento de rachaduras em suas casas e tremores de terra. A situação se agravou progressivamente, levando à evacuação de dezenas de milhares de pessoas e à desocupação de vastas áreas urbanas. A subsidênciia do solo atingiu níveis críticos, com afundamentos que chegaram a metros de profundidade em algumas áreas conforme pela BBC News Brasil (Seixas, 2023).

O Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) confirmou em 2019 que a mineração de sal-gema era a causa direta da instabilidade do solo. A Braskem, empresa responsável pela extração, interrompeu suas operações em 2019 e iniciou

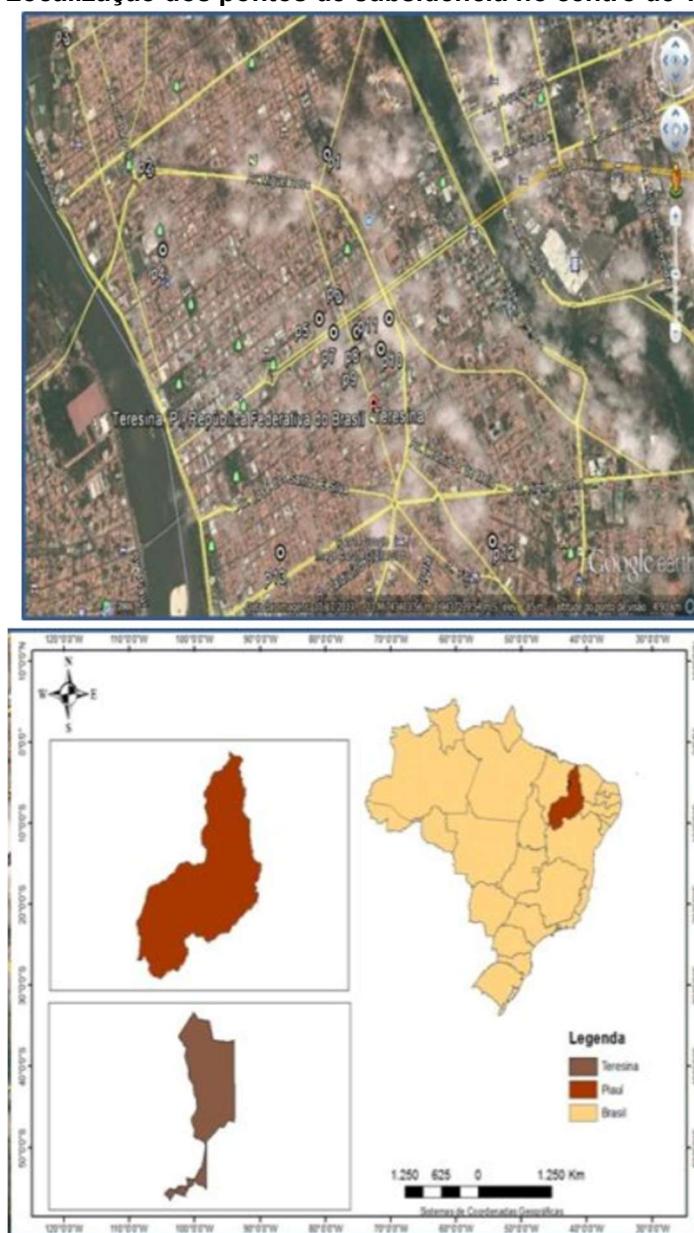
um plano de fechamento e estabilização das minas. Contudo, os impactos já eram irreversíveis para muitos, e a possibilidade de um colapso maior, com a salinização da Lagoa Mundaú, ainda é uma preocupação latente, afirma notícia, BBC News Brasil (Seixas, 2023).

Este desastre em Maceió serve como um alerta global sobre a necessidade de rigorosos estudos de impacto ambiental e de práticas de mineração responsáveis, especialmente em áreas com características geológicas sensíveis como o carste. A tragédia ressalta a importância de uma fiscalização eficaz e de um planejamento urbano que integre a geologia do local para prevenir catástrofes semelhantes no futuro.

2.2. Teresina, Piauí

Teresina, a capital do Piauí, é uma das poucas capitais brasileiras que não se localiza no litoral e apresenta características geológicas que a tornam suscetível a fenômenos de subsidência (Figura 8). A cidade está situada sobre formações que incluem calcários e margas da Formação Pedra de Fogo, rochas que são passíveis de dissolução e podem condicionar processos de colapso e subsidência do solo (Lopes; Silva, Silva, 2014).

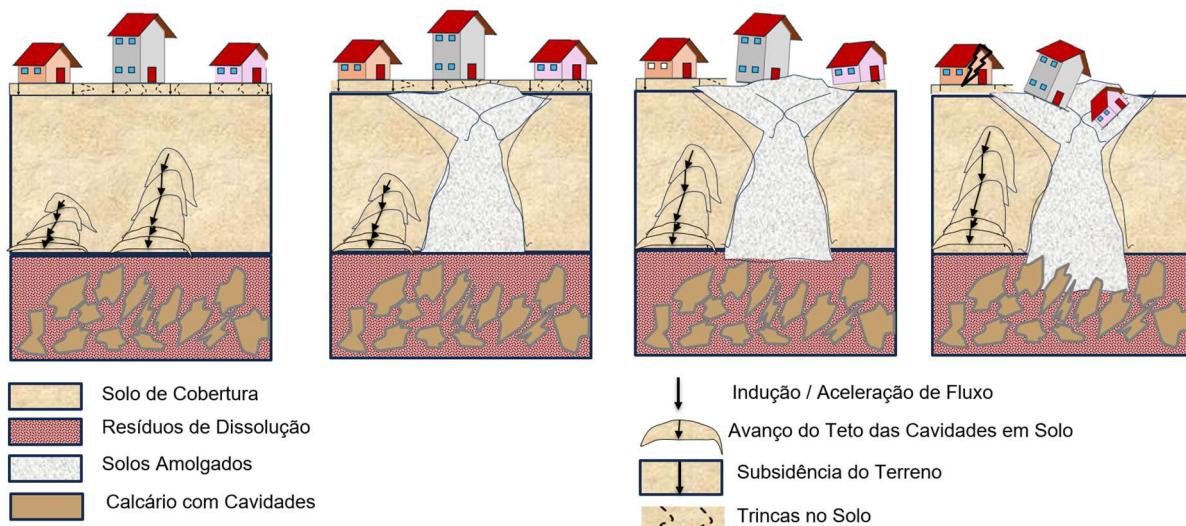
Figura 8 - Localização dos pontos de subsidência no centro de Teresina-PI.



Fonte: Lopes; Silva, Silva (2014)

Estudos e mapeamentos têm sido realizados para identificar as áreas de subsidência em Teresina, especialmente em regiões urbanas onde a acelerada verticalização e a construção de edifícios podem agravar a instabilidade do terreno (Goes, 2019), conforme Figura 9.

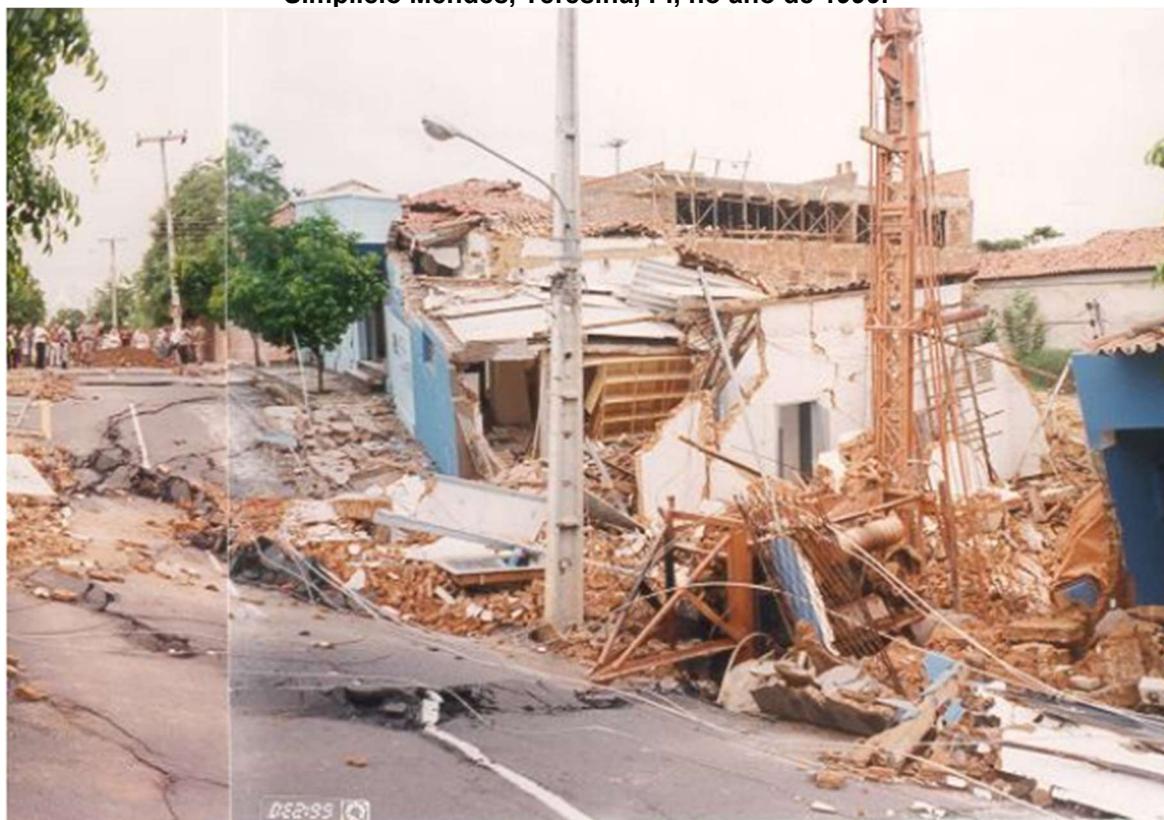
Figura 9 - Risco de Subsidência e Colapso do Solo em áreas urbanas.



Fonte: Adaptado de Goes (2019).

Embora a mineração de grande porte não seja o principal fator de impacto como em Maceió, a extração de materiais para a construção civil, como areia e seixos, em áreas urbanas e periurbanas, tem provocado impactos ambientais negativos e conflitos socioambientais (Lago, 2008). Como pode ser observado na Figura 10.

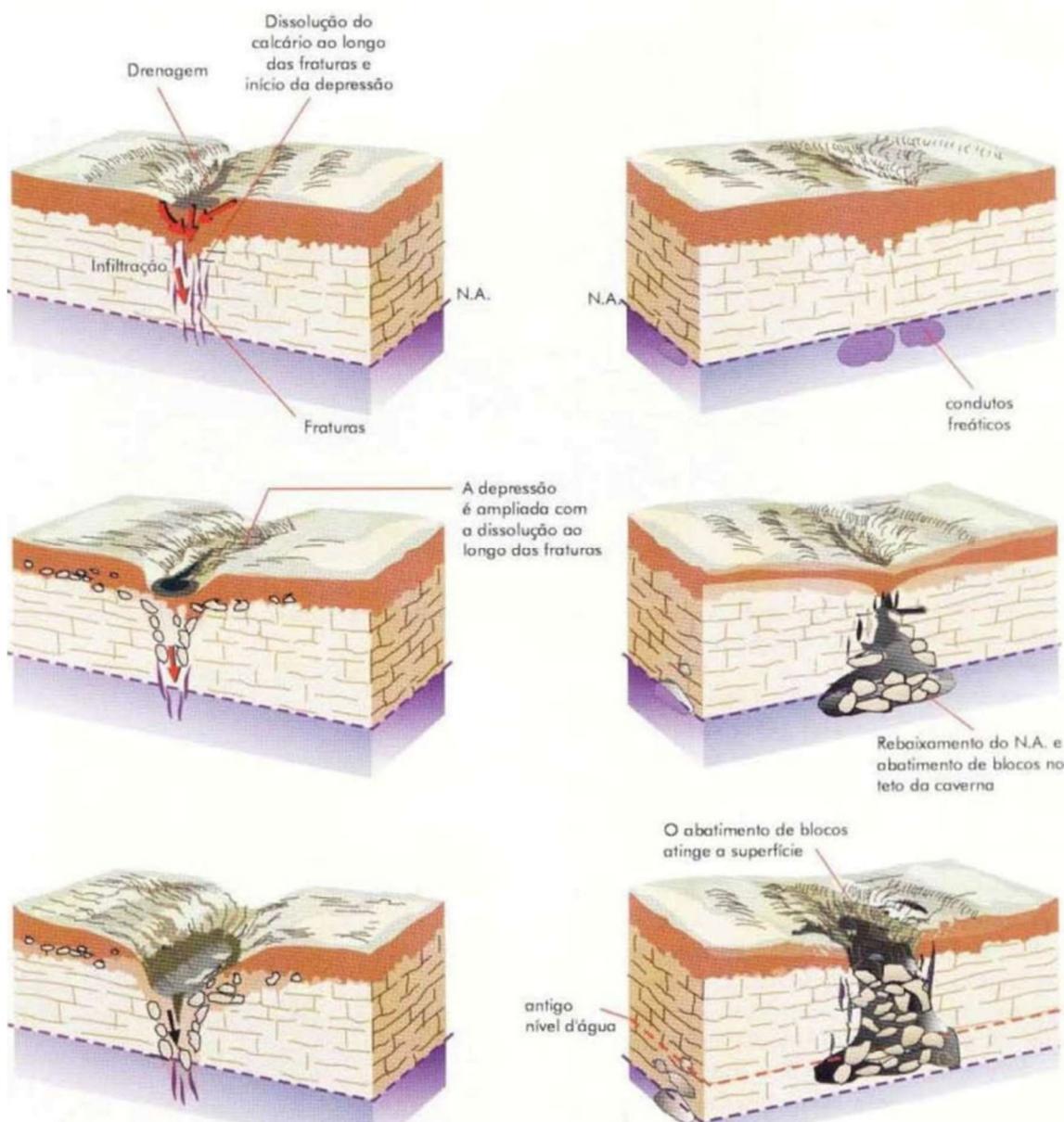
Figura 10 - Foto evidencia o colapso do terreno causado pela perfuração percussiva na rua Simplicio Mendes, Teresina, PI, no ano de 1999.



Fonte: Lago (2008).

O caso de Teresina destaca que mesmo em contextos em que a mineração não é a atividade econômica dominante, a interação entre a geologia cárstica e as intervenções humanas no solo pode gerar riscos significativos. A gestão do uso e ocupação do solo, aliada a estudos geológicos e geotécnicos, é fundamental para mitigar os impactos e garantir a segurança da população em áreas com essas características (Souza, 2018).

Figura 11 - Subsidências e colapso de solo.



Fonte: Souza (2018).

2.3. Lapão, Bahia

Lapão, no estado da Bahia, é um município que também já vivenciou eventos de instabilidade do solo em áreas cársticas. Em outubro de 2008, a cidade foi afetada por um evento geológico que causou rachaduras nas ruas, danos a residências e fissuras no solo com até 20 cm de largura e 15 cm de afundamento. Como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Rachadura na rua em Lapão

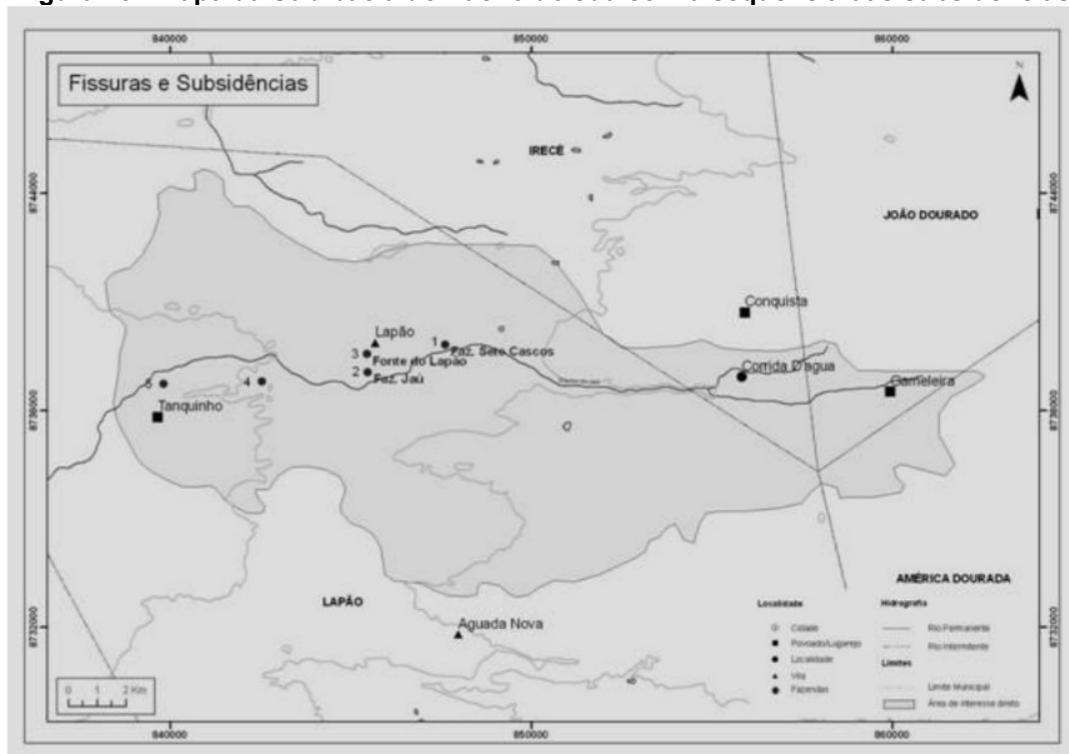


Fonte: Gomes (2010).

Um fenômeno geológico que provocou enormes fendas nas ruas de Lapão (município localizado a 478 km de Salvador) em 2008 e que se repetiu no ano passado foi objeto de discussões durante uma audiência pública realizada pelo Ministério Público estadual ontem, dia 25, na Câmara Municipal de Vereadores. Embora a pesquisa não tenha detalhado a relação direta com a mineração de grande escala, a ocorrência de fissuras e subsidências em uma área cárstica ressalta a vulnerabilidade do local a intervenções que alterem o equilíbrio geológico e hidrológico.

O caso de Lapão demonstra a importância do monitoramento contínuo e da compreensão das dinâmicas geológicas em áreas cársticas, mesmo na ausência de grandes projetos de mineração, para prevenir e mitigar os impactos sobre a infraestrutura e a população (Figura 13 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 13 - Mapa da Sub-bacia do riacho do Juá com a sequência das subsidências

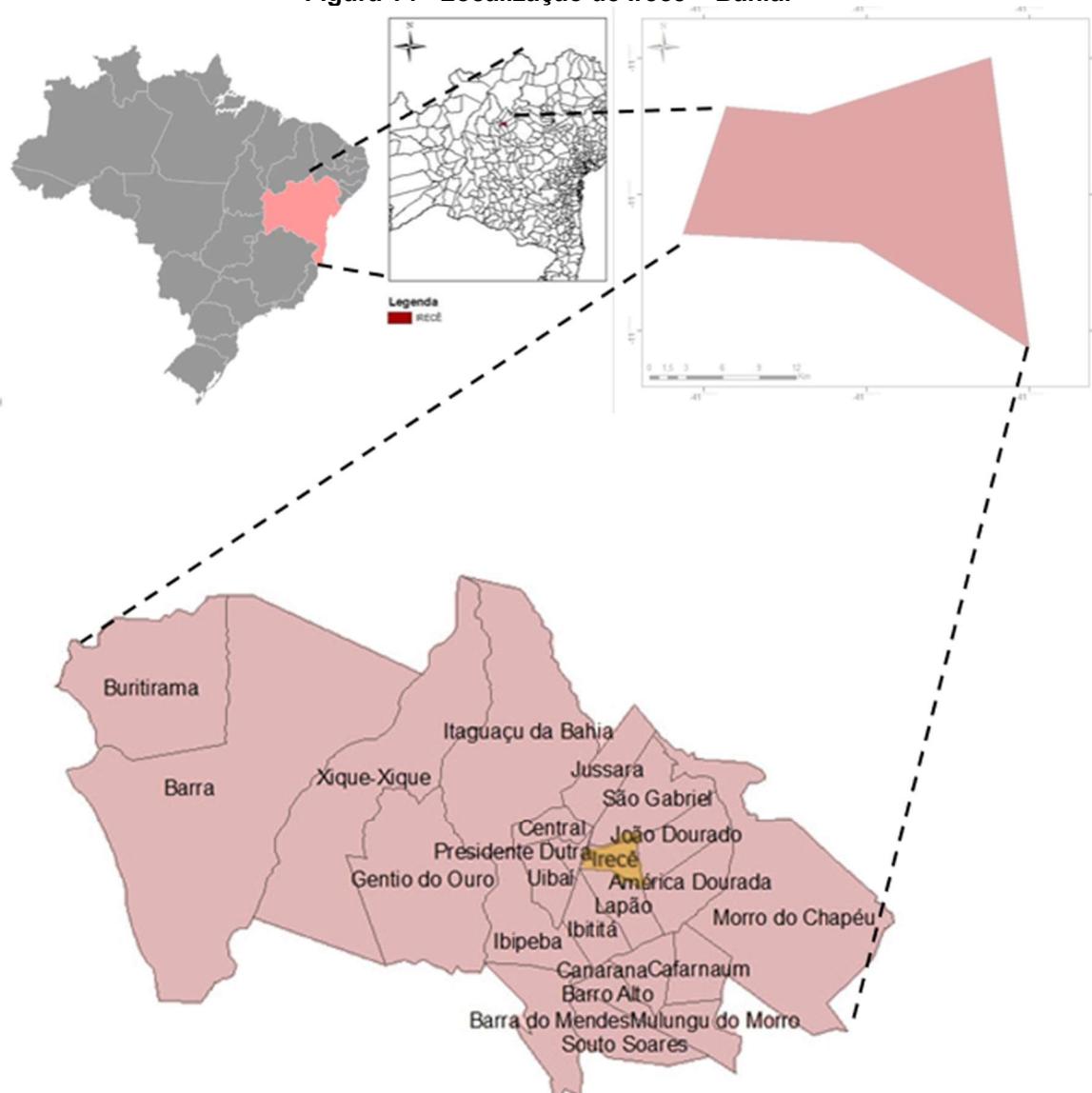


Fonte: Gomes (2010).

2.4. Irecê, Bahia

Irecê, localizada na Bahia, está inserida em uma região com rica presença de aquíferos cársticos, que são importantes fontes de água subterrânea. Conforme (Figura 14) No entanto, essa característica geológica também a torna suscetível a problemas de instabilidade do solo e contaminação da água, especialmente em decorrência de atividades humanas (Gomes, 2007).

Figura 14 - Localização de Irecê – Bahia.



Fonte: Adaptado de Medeiros et al.. (2018) e Ministério Público do Estado da Bahia (2025).)

A microrregião de Irecê já registrou eventos de subsidência localizada, com afundamentos de até 15 cm em áreas rurais, o que demonstra a vulnerabilidade do terreno cárstico. Além disso, a exploração de fosfato e a extração de água por

mineradoras na região têm levantado preocupações. Há relatos de extração irregular de água que pode estar contribuindo para o esvaziamento de poços artesianos, afetando o abastecimento local (Gomes, 2007). A mineração, mesmo que traga desenvolvimento econômico, pode gerar impactos ambientais e sociais como a contaminação da água e do solo usados pela comunidade.

Visto isso, o contexto geológico de Irecê, marcado pela presença de aquíferos cársticos essenciais, impõe a necessidade imperativa de um manejo sustentável dos recursos hídricos e minerais. Tal abordagem é fundamental para mitigar a degradação ambiental e assegurar a segurança hídrica e geológica da população.

Considerando as evidências de contaminação em zonas rurais que dependem de poços para abastecimento, a avaliação de risco de contaminação do aquífero cárstico torna-se uma etapa crucial para a gestão integrada dos recursos hídricos na região.

Portanto, segundo (Gonçalves, 2004) a implementação de um plano de ação robusto que é indispensável para diagnosticar a vulnerabilidade do sistema e orientar medidas preventivas e corretivas eficazes. Este plano deve contemplar, prioritariamente, a identificação e o mapeamento das populações usuárias de água de poços, bem como a realização de uma campanha de amostragem abrangente, com a análise de todos os parâmetros de qualidade relevantes para ambientes cársticos.

2.5. Cajamar, São Paulo

Em agosto de 1986, no município de Cajamar (SP), registrou-se um dos mais expressivos acidentes de colapso de solo em terreno cárstico urbano no Brasil — conhecido como o ‘buraco de Cajamar’. O evento evidenciou a fragilidade de terrenos calcários sob uso urbano intensivo, sendo acelerado pela extração de água subterrânea e outras intervenções humanas em ambiente cárstico (Oliveira, 2010).

Nos terrenos de rochas carbonáticas como o que ocorre em Cajamar, SP, os afundamentos ocorrem de duas formas principais: colapsos de solo (movimentos bruscos) e subsidências (afundamentos mais lentos). Esses fenômenos podem surgir de maneira natural, devido aos processos de dissolução da rocha (carstificação), ou serem acelerados ou deflagrados por atividades humanas, especialmente o uso inadequado do solo. Tais ações, particularmente aquelas que modificam a dinâmica e a circulação das águas subterrâneas (como o bombeamento excessivo), aumentam significativamente o risco desses afundamentos. (Oliveira, 2010).

A exploração de calcário, fundamental para a produção de cimento e outros materiais de construção, tem sido uma atividade econômica relevante nas áreas cársticas. No entanto, quando conduzida sem o devido planejamento, pode causar severa degradação ambiental e impactos indesejáveis, como a poluição visual, sonora e atmosférica. Além disso, a remoção de grandes volumes de material do subsolo e as alterações no fluxo das águas subterrâneas provocadas pela mineração tendem a desestabilizar as estruturas cársticas, elevando o risco de colapsos e subsidências do terreno. Esse cenário torna-se ainda mais crítico à medida que antigas áreas de mineração, mesmo desativadas, são alcançadas pela expansão urbana, ampliando os riscos e os problemas para a população (Oliveira, 2010).

O acidente de 1986 em Cajamar serviu como um marco para a compreensão dos riscos associados à mineração em áreas cársticas no Brasil. Ele destacou a necessidade de estudos geológicos e geotécnicos aprofundados antes da concessão de licenças para atividades extrativas, bem como a implementação de medidas de monitoramento contínuo para prevenir novos desastres (Figura 15).

Figura 15 - Colapso de solo em Cajamar, São Paulo, em 1986.

Fonte: Prefeitura de Cajamar (2019).

A experiência de Cajamar reforça a importância de uma gestão ambiental rigorosa e de um planejamento territorial que considere as características geológicas específicas de cada região para evitar a repetição de tragédias semelhantes. Isto é frequentemente, regiões com características topográficas favoráveis, como as planícies cársticas (poljés), acabam se tornando atrativas para a ocupação urbana descontrolada, caracterizada por grandes e pesadas construções e tráfego intenso de veículos, que oculta a complexidade do ambiente cárstico e suas cavidades, cavernas e outras estruturas subterrâneas, bem como áreas de extrema fragilidade. Conforme (Oliveira, 2010) menciona em sua seção de urbanização.

2.6. Mairinque, São Paulo

Mairinque, no estado de São Paulo, é outra localidade brasileira que já registrou problemas relacionados à subsidência do solo em áreas cársticas. (SALLUN FILHO, 2009). Em 1981, a cidade foi palco de ocorrências onde diversas edificações apresentaram trincas e afundamentos de piso, um indicativo da instabilidade geológica local. Conforme apresentado na Tabela 1

Tabela 1 Casos de Subsidências Catalogados no Brasil

Sudeste	São Paulo – SP	Cajamar	Formação Estrada dos Romeiros	Metassedimentos-Metavulcânicas	Explotação de Água Subterrânea
		São Paulo (2 pts)	Formação Resende	Bacias Sedimentares	1. Retirada do Suporte Base 2. Exploração de Água Subterrânea
		Santos	Depósitos litorâneos indiferenciados	Metassedimentos-Metavulcânicas	Peso Construtivo
		Mairinque	Grupo Serra do Itaberaba	Metassedimentos-Metavulcânicas	Dissolução de Rochas
		Vale do Ribeira	Formação Pariquera-Açu	Formações Cenozoicas	Dissolução de Rochas
		Ribeirão Grande	Litofacies Água Clara, carbonática	Metassedimentos-Metavulcânicas	Mineração de Calcário e Argila
		Ribeirão Preto	Grupo Serra Geral	Vulcânicas	Explotação de Água Subterrânea
		Nova Campina	Formação Furnas	Bacias Sedimentares	Dissolução de Rochas
		Itapeva	Grupo Itararé	Bacias Sedimentares	Dissolução de Rochas
		Itararé	Grupo Itararé	Bacias Sedimentares	Dissolução de Rochas

Fonte: Lima (2024).

A presença de terrenos cársticos em Mairinque a torna suscetível a esses fenômenos, que podem ser agravados por atividades humanas. Embora a pesquisa inicial não tenha detalhado a relação direta com a mineração em Mairinque, a inclusão da cidade em estudos sobre subsidência em áreas cársticas no Brasil, ao lado de Cajamar e Sete Lagoas, reforça a necessidade de compreender os fatores que condicionam esses processos.

Esses processos podem ser retardados ou acelerados pela ação humana, sobretudo quando há incentivo à ocupação descontrolada de áreas cársticas — sistemas de elevada vulnerabilidade ambiental que, por suas características naturais, atraem uma variedade de usos intensivos, como: ocupação urbana, mineração de rochas calcárias, extração de água subterrânea, agricultura de alta intensidade e exploração turística (patrimônio espeleológico). Parafraseando Lima e Simões (2024), é fundamental investir em estudos que investiguem as origens e os efeitos desses fenômenos, empregando tecnologias de ponta, como sensores e satélites, para

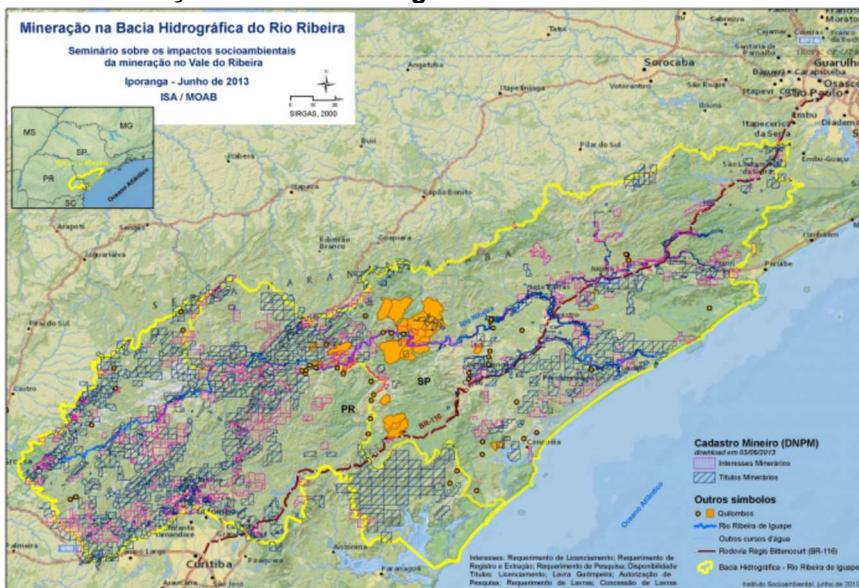
monitorar e simular os processos de subsidência. Essas informações são essenciais para a formulação de estratégias de prevenção e mitigação que envolvam a regulamentação da extração de água subterrânea, a adoção de práticas sustentáveis na agricultura e na mineração, além da implementação de políticas públicas voltadas à proteção ambiental e à segurança da população. Assim, a subsidência deve ser abordada como uma prioridade para o progresso sustentável brasileiro.

2.7. Vale do Ribeira, São Paulo

O Vale do Ribeira, localizado no sul do estado de São Paulo e leste do Paraná, é uma das regiões cársticas mais importantes do Brasil, com uma rica diversidade de feições cársticas, incluindo cavernas e dolinas. Essa característica geológica, aliada à presença de atividades de mineração, tem gerado diversos impactos socioambientais na região.

O Vale do Ribeira é suscetível a processos de afundamento cárstico, especialmente em municípios como Barra do Turvo e Apiaí. A mineração subterrânea e a extração de recursos podem induzir ou acelerar a subsidência e o colapso do solo, como já mencionado anteriormente em outro caso (Cabral Junior, 2020).

Figura 16 - Mineração na Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira no Vale do Ribeira



Fonte: Cabral Júnior (2020).

A mineração na região tem sido associada à contaminação do solo e de lençóis freáticos por metais pesados, devido à disposição inadequada de pilhas de rejeito. As águas das chuvas lixiviam esses materiais, carregando-os para os cursos d'água e afetando a qualidade da água e a saúde das comunidades locais.

Debates na região têm destacado os impactos da exploração mineral sobre as comunidades, incluindo o Quilombo Porto Velho (em Itáoca/Iporanga) que sofre pressão devido à exploração de calcário e ouro, com o Ministério Pùblico Federal (MPF) pedindo a suspensão de atividades e a análise de danos, incluindo a contaminação do solo e lençóis freáticos em territórios quilombolas (Instituto Socioambiental, 2013).

O Vale do Ribeira é um exemplo complexo de como a interação entre a geologia cárstica e a mineração pode gerar sérios problemas ambientais e sociais. A luta pela sustentabilidade na região envolve a proteção de seus ecossistemas cársticos e a garantia dos direitos das comunidades afetadas pela atividade minerária.

2.8. Sete Lagoas, Minas Gerais

Sete Lagoas, Minas Gerais, apresentou acidentes ambientais em suas áreas cársticas, dentre eles em 1988, o afundamento de cerca de 20 metros de diâmetro e 5 de profundidade tragou parte da arquibancada do Estádio Municipal demonstrando a recorrência de problemas em regiões com essa formação geológica (Sallun FILHO, 2009).

Em Sete Lagoas, a mineração de calcário para a produção de cimento é uma atividade econômica de longa data. A remoção de rochas e a alteração do regime hídrico subterrâneo podem levar à desestabilização das cavidades cársticas, resultando em afundamentos. Além disso, a urbanização crescente sobre essas áreas sensíveis aumenta a vulnerabilidade da população e da infraestrutura a esses fenômenos. A cidade tem buscado soluções para mitigar esses riscos, incluindo o monitoramento geológico e a implementação de planos de manejo para as áreas cársticas. Recentemente a prefeitura de Sete Lagoas iniciou o processo licitatório para contratar estudos sobre o fenômeno da cratera (Oliveira, 2024).

Figura 17 - Buraco no bairro Santa Luzia, em Sete Lagoas, Minas Gerais, evidenciando a subsidênci a do solo.



Fonte: Oliveira (2024).

2.9. Vazante, Minas Gerais

Vazante, localizada no noroeste de Minas Gerais,(Figura 18) é um município cuja economia está fortemente ligada à mineração de zinco. A região é caracterizada por uma geologia cárstica avançada, com a presença de metadolomitos do Grupo Vazante, que são suscetíveis à carstificação. Essa característica geológica, combinada com a intensa atividade de mineração subterrânea, tem gerado diversos problemas geotécnicos e hidrogeológicos na área. (Bittencourt; Reis Neto, 2012).

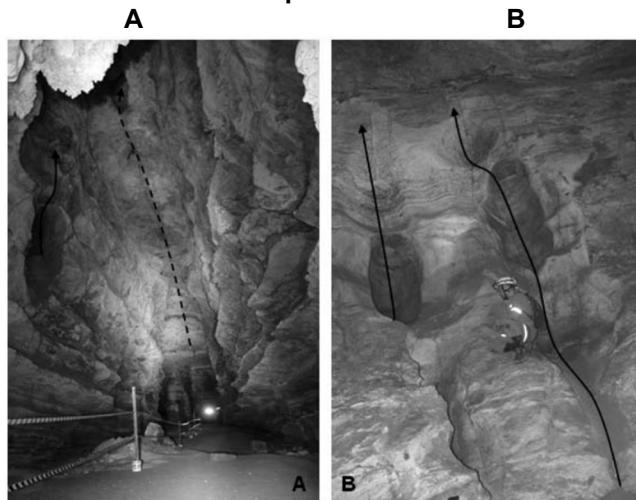
Figura 18 - Localização de Vazante - Minas Gerais



Fonte: Bittencourt , Reis Neto (2012).

A Mina de Vazante, uma das unidades operacionais da Votorantim Metais Zinco S/A, empresa do grupo Votorantim é a mais importante mina de zinco do país durante a década de 60. (Bittencourt; Reis Neto, 2012). Vale ressaltar que as feições exocársticas mais comuns são as dolinas, sumidouros e nascentes cársticas (Figura 19).

Figura 19 - Feições morfológicas de dissolução por fluxo ascendente descritas na Gruta Lapa Nova.



A: Canal de teto (seta tracejada) e canal subindo pela parede (seta cheia).

B: Canais subindo pelas paredes da caverna (setas cheias).

Bittencourt (2012).

A exploração do aquífero cárstico de Vazante, sem o devido conhecimento de sua dinâmica, pode levar a impactos negativos na disponibilidade e qualidade da água subterrânea, conforme registrado por

Figura 20 – A esquerda, fotografia da dolina na Avenida Geraldo Campos, bairro Vazante Sul, Vazante (MG), (2019) e a direita fotografia da dolina na rua Gerônimo Honofre, bairro Vazante Sul, Vazante (MG), (2013)



Fonte: Santos (2020).

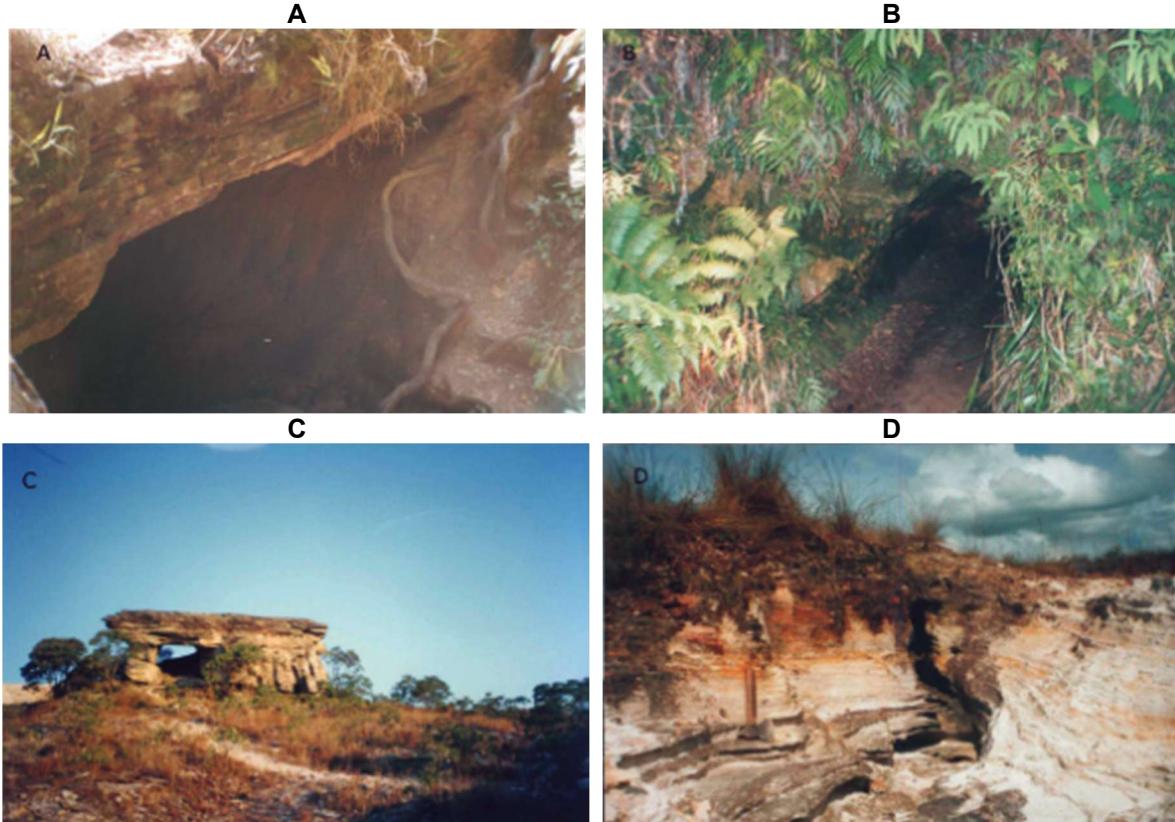
A exploração do aquífero cárstico de Vazante, sem o devido conhecimento de sua dinâmica, pode levar a impactos negativos na disponibilidade e qualidade da água subterrânea.

O caso de Vazante ilustra os desafios complexos de conciliar a exploração de recursos minerais com a proteção ambiental e a saúde pública em áreas cársticas. A contaminação e a instabilidade do solo são preocupações sérias que exigem monitoramento contínuo e a implementação de práticas de mineração mais sustentáveis.

2.10. São Thomé das Letras, Minas Gerais

A mineração na região levou à degradação de cavernas em quartzito, um exemplo de como a extração de materiais pode comprometer formações geológicas únicas e ecossistemas subterrâneos (Neto, 2012).

Figura 21 - Exemplos de morfologias e processos cársticos em São Thomé das Letras:



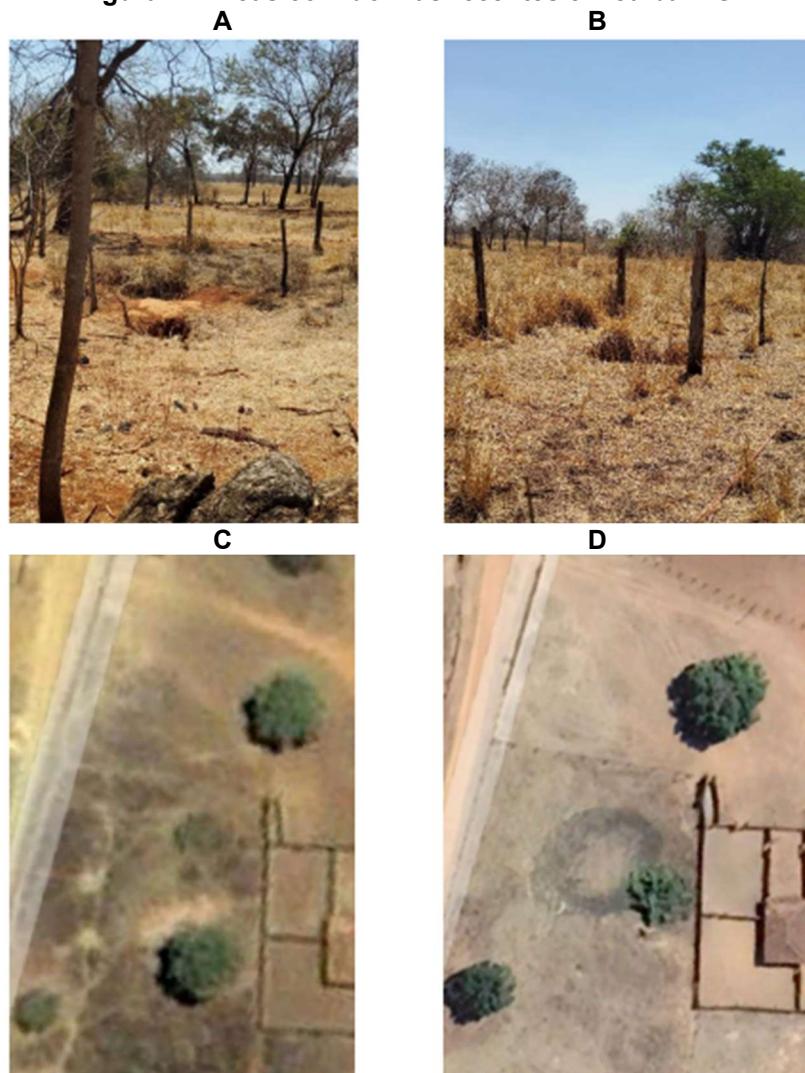
- A) Dolina de abatimento marcando a entrada superior da Gruta do Carimbado;
- B) Parte final da cavidade da Gruta do Sobradinho, com fluxo hídrico permanente;
- C) “Pedra da taça” – conduto formado por dissolução isolado entre as lavras abertas;
- D) Processo de dissolução no quartzito formando pequenas depressões a partir de planos de fraqueza.

Fonte: Neto (2012).

2.11. Jaíba, Minas Gerais

Jaíba, localizada no norte de Minas Gerais, é uma região que apresenta características cársticas significativas, com a presença de rochas carbonáticas suscetíveis à dissolução. Essa geologia a torna propensa a fenômenos como a formação de dolinas e subsidência do solo. Estudos indicam que a área tem registrado dolinas recentes (Figura 22) e que esses processos podem ser acelerados por fatores como o bombeamento excessivo de água em poços tubulares.

Figura 22-Áreas com dolinas recentes em Jaíba-MG.



- (A) Dolina de colapso cercada em área de rocha;
- (B) Dolina de colapso cercada por fazendeiro;
- (C) Imagem de agosto de 2003 em Jaíba –MG (coordenada 640600.41m E/ 829901.24 m S);
- (D) Imagem de maio de 2021 em Jaíba –MG (coordenada 640600.41m E/ 829901.24 m S)

Fonte: Lopes (2023).

Embora a região seja mais conhecida pelo Projeto Jaíba, um grande projeto de irrigação, e pelos problemas associados à gestão hídrica e à infraestrutura dos canais, a presença de um sistema cárstico ativo é um fator importante a ser considerado. A interação entre a exploração de recursos hídricos e a geologia cárstica pode levar a instabilidades no terreno, afetando tanto as áreas agrícolas quanto as urbanas. (Lopes, 2023)

O caso de Jaíba ressalta a complexidade dos impactos em áreas cársticas, onde múltiplos fatores, incluindo o uso da água e as características geológicas, podem contribuir para a subsidência do solo (Rodrigues, 2021). A necessidade de um manejo integrado dos recursos hídricos e do solo é crucial para garantir a sustentabilidade e a segurança na região (Figura 23)

Figura 23 - Manejo integrado dos Recursos Hídricos em Jaíba.

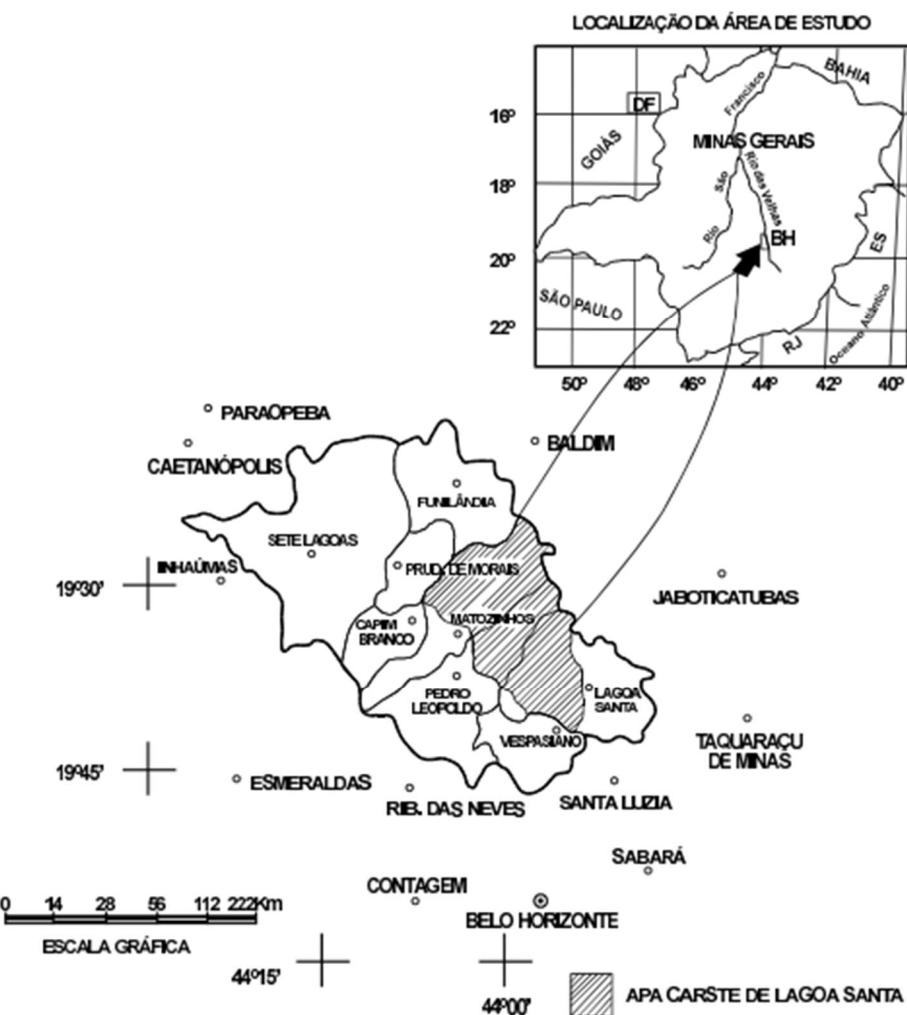


Fonte: Rodrigues (2021).

2.12. Belo Horizonte, Minas Gerais

A região metropolitana de Belo Horizonte, incluindo Vespasiano, está inserida em um contexto geológico com a presença de formações cársticas. Tem o objetivo de promover o equilíbrio entre a salvaguarda do sistema cárstico e o vetor de controle em relação aos grandes vetores metropolitanos de Vespasiano, Pedro Leopoldo, Matozinhos e Lagoa Santa, reduzindo os efeitos dessa expansão nas áreas mais vulneráveis da APA (Cabral et al., 1998). Essa característica confere à área uma sensibilidade a processos de subsidência e colapso do solo, especialmente em locais onde há interação com atividades humanas.

Figura 24 - Localização da APA Carte de Lagoa Santa



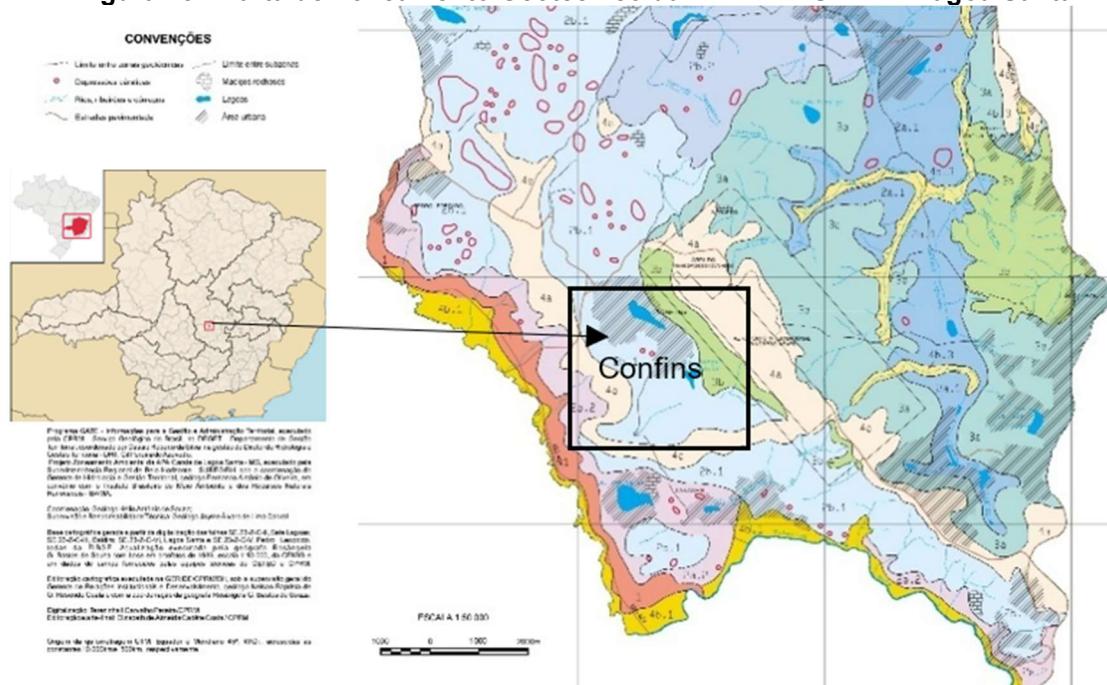
Fonte: Cabral et al. (1998).

Embora a pesquisa não tenha identificado casos específicos de subsidência em Vespasiano diretamente ligados à exploração inadequada de solos cársticos em grande escala, a proximidade com áreas de mineração e a presença de formações cársticas na região metropolitana de Belo Horizonte indicam um potencial de risco. Que pode ser mitigado pela al função ambiental desta zona é propiciar o equilíbrio entre o sistema cárstico e o vetor de expansão norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte, garantindo as interfaces entre estes dois processos distintos: o processo de metropolização, representado pelo complexo aeroportuário, e o processo de desenvolvimento do território da APA, com suas características sócio-ambientais específicas. Portanto, a função dessa zona é estabelecer o bloqueio aos grandes vetores metropolitanos de Vespasiano/Lagoa Santa e Pedro Leopoldo/Sete Lagoas, em direção à APA, visando disciplinar sua expansão sobre áreas de maior fragilidade (Cabral et al., 1998).

2.13. Confins, Minas Gerais

Confins, no estado de Minas Gerais, está situada em uma região de notável importância geológica, a Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa. Essa área é caracterizada por um sistema cárstico complexo, tornando o município e seus arredores suscetíveis a fenômenos de subsidência do solo.

Figura 25 - Carta de Zoneamento Geotécnico da APA CARSTE DE Lagoa Santa - MG



Fonte: Adaptado de IBAMA /CPRM (2001).

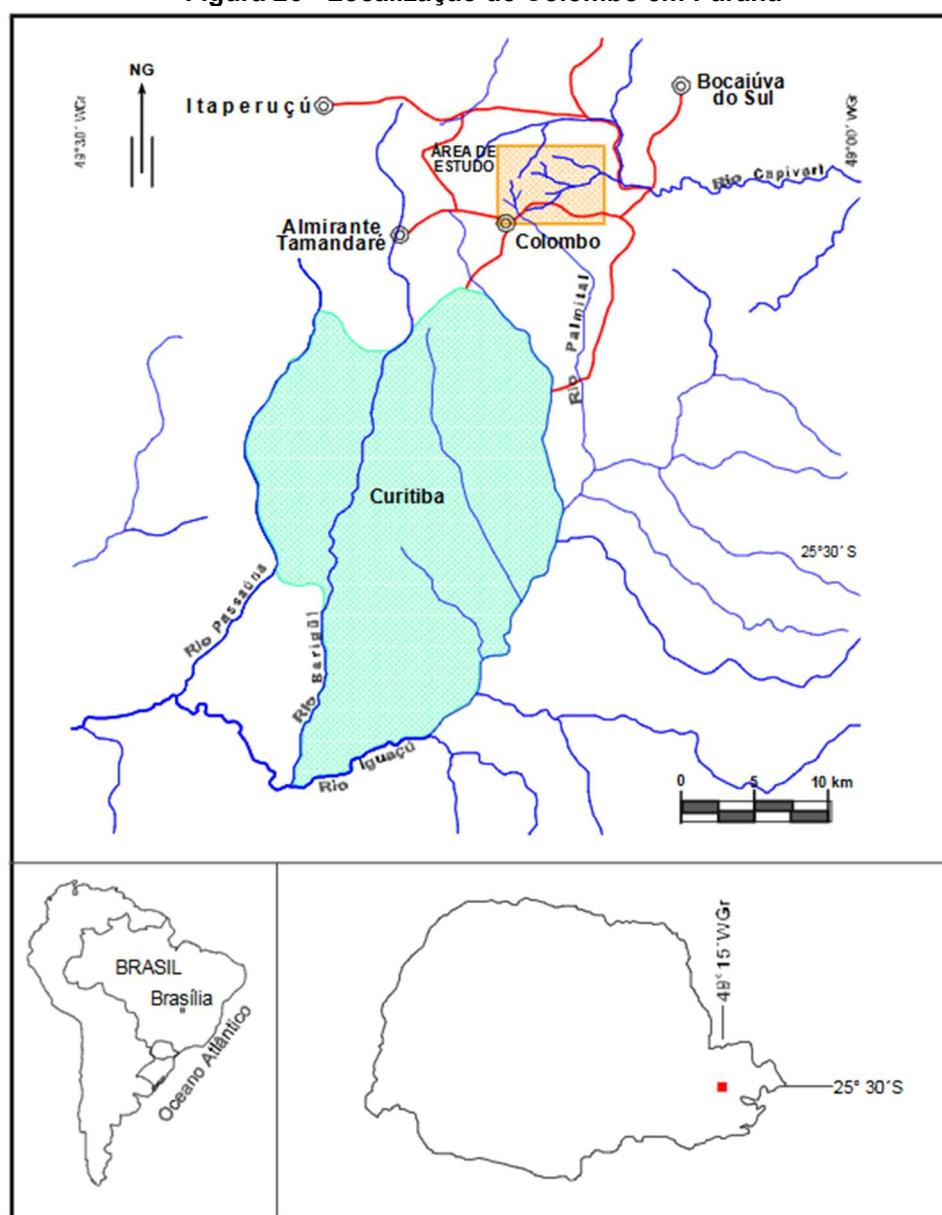
Estudos e planos diretores da região indicam que a quase totalidade de Confins possui risco de subsidência cárstica, com exceção de algumas áreas específicas (CABRAL et al., 1998). A expansão urbana e industrial na Região Metropolitana de Belo Horizonte, onde confins está inserida, tem ampliado os impactos ambientais sobre os sistemas cársticos e hídricos. A exploração de recursos, embora não detalhada como mineração de grande porte nos resultados da pesquisa para Confins especificamente, pode agravar a fragilidade do solo cárstico.

Os problemas relacionados à subsidência em áreas cársticas podem levar a danos à infraestrutura e alterações no armazenamento de aquíferos. A gestão territorial em Confins, portanto, deve considerar a vulnerabilidade geológica para mitigar riscos e garantir um desenvolvimento sustentável. A preservação das lagoas e do patrimônio natural da cidade é um desafio constante diante da pressão urbana e de possíveis atividades que afetem o subsolo.

2.14. Colombo, Paraná

Colombo, município localizado na Região Metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná, é outra área com significativa presença de formações cársticas. A exploração do aquífero cárstico local tem gerado impactos ambientais importantes, principalmente relacionados ao secamento de fontes e drenagens, além de casos de subsidência e colapsos de terreno. (Hindi et al., 2011)

Figura 26 - Localização de Colombo em Paraná



Fonte: HINDI et al. (2011).

Entre os anos de 1995 e 1998, foram registrados vários casos de subsidência e colapsos de terreno nas bacias dos rios Tumiri e Fervida, em Colombo, que causaram avarias em infraestruturas. Esses eventos são resultado da interação entre a geologia cárstica e a exploração de águas subterrâneas sem o conhecimento adequado das características do aquífero. (Hindi et al., 2011)

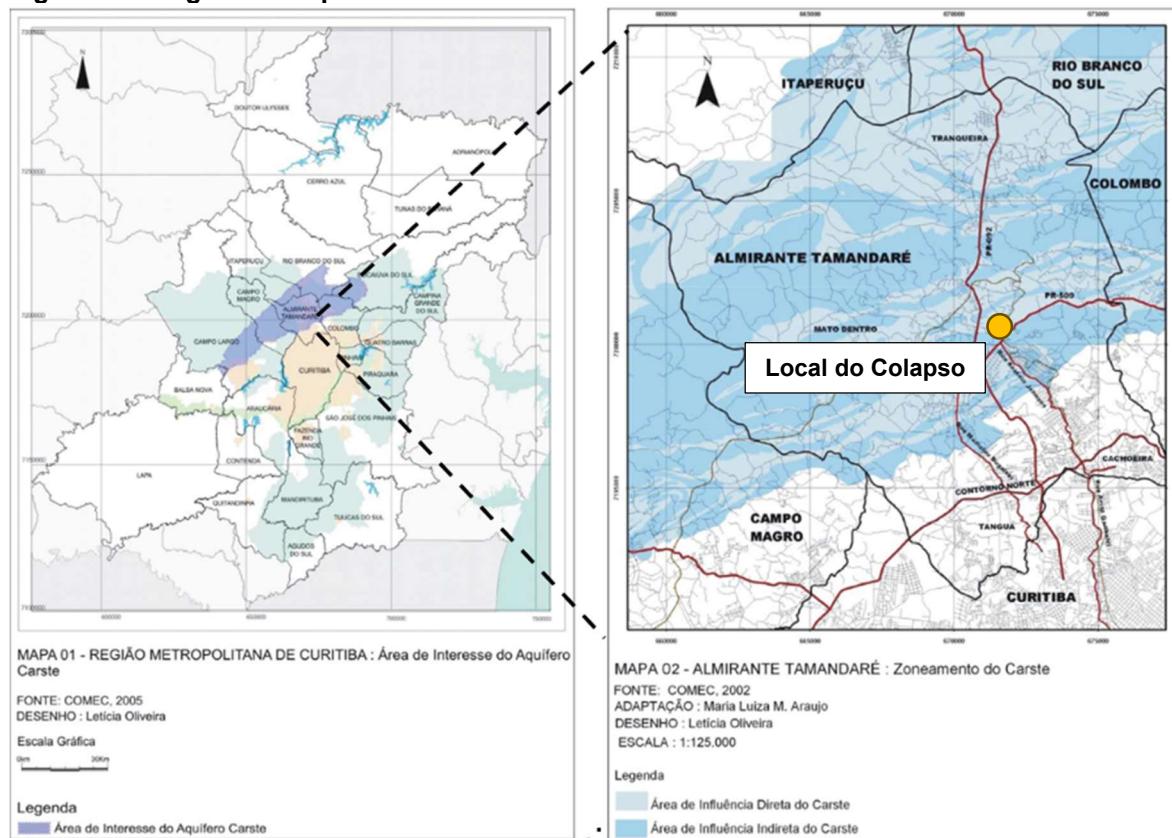
A mineração, especialmente a céu aberto, também ocorre no município, ao lado de áreas habitadas, o que pode agravar os problemas de instabilidade do solo e contaminação.

O caso de Colombo destaca a complexidade da gestão de recursos hídricos em áreas cársticas e a necessidade de um planejamento cuidadoso para a exploração sustentável do aquífero. A combinação de solos ambientalmente frágeis com o manejo intensivo pode levar a fortes impactos, exigindo a implementação de medidas preventivas e de monitoramento para proteger o meio ambiente e a população.

2.15. Almirante Tamandaré, Paraná

Almirante Tamandaré (PR) situa-se sobre unidades carbonáticas e apresenta cavidades e sumidouros associados ao carste, cuja exposição à mineração e à expansão urbana tem provocado acidentes geotécnicos e preocupações com a qualidade hídrica (Araújo, 2006). A interação entre uso antrópico e fragilidade geológica do carste requer Planejamento integrado e práticas sustentáveis para reduzir riscos socioambientais (Vestena et al., 2019). Na Região Metropolitana de Curitiba, o município de Colombo tem registros documentados de subsidência, secamento de nascentes e danos à infraestrutura atribuídos à exploração dos aquíferos cársticos, provocando também fortes pressões sociais e medidas de contenção (Hindi et al., 2002; Andrade et al., 2015). Colombo, Paraná: Sofreram impactos ambientais significativos devido à exploração de seus aquíferos cársticos, ressaltando a questão da contaminação da água e a sobrecarga dos recursos hídricos subterrâneos.

Figura 27 - Região Metropolitana de Curitiba e Almirante Tamandaré - Zoneamento do Carste



Fonte: Adaptado de Araújo (2006).

Figura 28 - Colapso Natural em Área Cárstica.

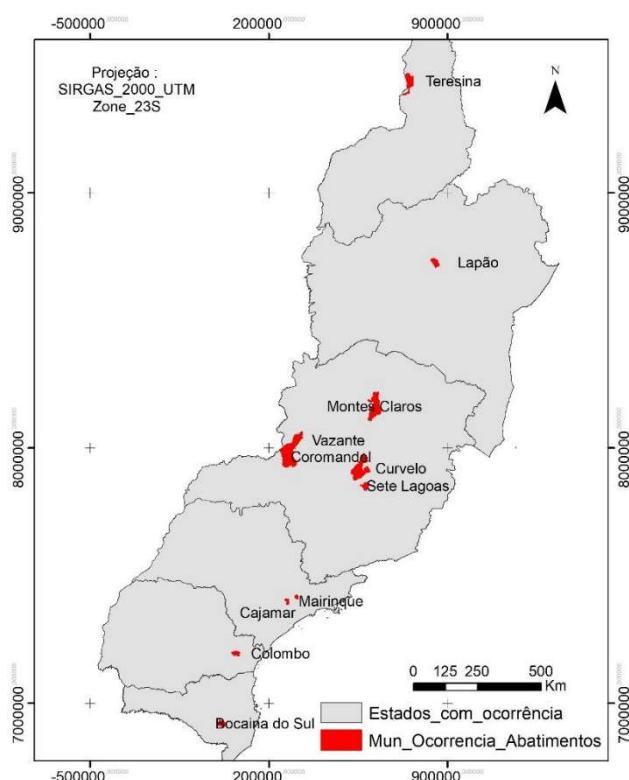


Fonte: Adaptado de Araújo (2006).

2.16. Bocaiúva do Sul, Paraná

Bocaiúva do Sul, no Paraná, é outra cidade brasileira que se insere em uma região de geologia cárstica, especificamente na área de abrangência do Aquífero Karst (Figura 29). Essa característica geológica, embora importante para o abastecimento de água subterrânea, também a torna vulnerável a fenômenos de instabilidade do solo, especialmente quando há exploração inadequada dos recursos hídricos ou outras intervenções no subsolo. (SALLUN FILHO, 2009).

Figura 29 - Mapa com a localização dos Estados e Municípios com registro de eventos de abatimento.



Fonte: Lopes (2023).

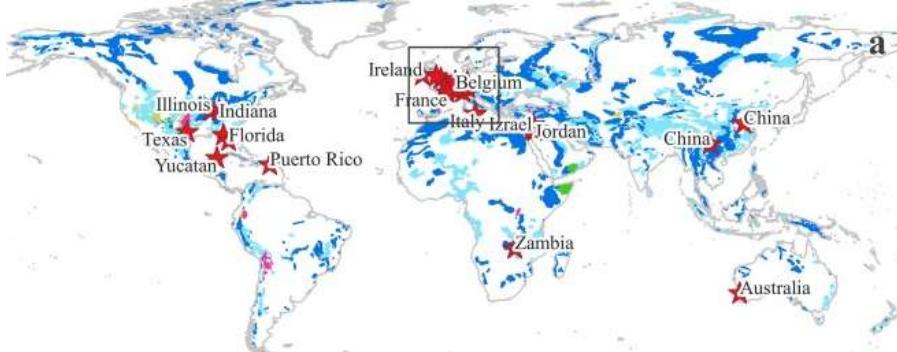
Em 2007, Bocaiúva do Sul registrou um colapso de solo que resultou em uma cratera de 5 metros de diâmetro e 5 metros de profundidade, um evento que evidencia a suscetibilidade da região a esses fenômenos (Lopes, 2023). A exploração de águas subterrâneas sem o devido conhecimento das características do aquífero cárstico pode levar a impactos negativos, como a subsidéncia do terreno. A cidade, assim como outras na região metropolitana de Curitiba, enfrenta o desafio de conciliar o desenvolvimento urbano e a exploração de recursos com a preservação de suas formações cársticas e a segurança da população. (Lima; Simões, 2024).

3. Casos Internacionais

Os fenômenos cársticos e seus impactos associados à exploração mineral e urbanização não são exclusividade do Brasil, sendo observados em diversos países ao redor do mundo. A experiência internacional oferece importantes lições sobre os riscos geotécnicos em terrenos cársticos e sobre as estratégias de gestão territorial adotadas em diferentes contextos geológicos e socioeconômicos.

Um impacto global significativo, frequentemente associado à mineração em áreas cársticas, é a contaminação da água subterrânea (Figura 30). A drenagem ácida proveniente de minas, especialmente de empreendimentos desativados, pode liberar metais pesados e outros contaminantes como ferro, manganês, zinco, arsênio, níquel e cádmio nos aquíferos. Devido à natureza dos sistemas cársticos, que apresentam alta permeabilidade e condutos interconectados, o fluxo subterrâneo é rápido e pouco filtrado. Essa característica torna os aquíferos extremamente vulneráveis à poluição e compromete uma das mais importantes fontes de água potável do planeta (Lukač Reberski et al. 2022).

Figura 30 - Mapa Mundial de solos Cársticos e suas particularidades:
Mapa (a): Distribuição global dos terrenos cársticos e locais de estudo (EOC sites).
Mapa (b): Ampliação da Europa, destacando países com ocorrência de formações cársticas.



Legenda:

-  Local de estudo do EOC (EOC sites)

Mapa Mundial de Terrenos Cársticos (World Karst Map)

- Rochas carbonáticas contínuas
 - Rochas evaporíticas contínuas
 - Rochas carbonáticas descontínuas
 - Rochas evaporíticas descontínuas
 - Rochas mistas (carbonáticas e evaporíticas)

Fonte: Adaptado de Lukač Reberski et al. (2022).

Foram identificados quatro casos internacionais representativos que ilustram diferentes tipos de carste e suas problemáticas específicas: (1) a China, com

extensas áreas de carste carbonático e rápida urbanização; (2) o Reino Unido, onde o carste evaporítico em gesso e halita tem causado subsidências em áreas urbanas consolidadas; (3) a região de Riemst na Belgica, com ocorrências de colapsos em carste evaporítico de gesso; e (4) a Bélgica, onde o carste carbonático apresenta desafios recorrentes para o planejamento urbano e a expansão de infraestrutura.

A análise comparativa desses casos internacionais com a realidade brasileira permite identificar padrões comuns de instabilidade geotécnica e orientar políticas públicas voltadas à prevenção e mitigação de riscos em Bonito (MS) e em outros municípios com características cársticas semelhantes.

Os impactos decorrentes da exploração inadequada de terrenos cársticos configuram um problema de escala global. Embora as manifestações variem conforme o tipo de rocha, o regime hidrológico e o uso do solo, os mecanismos e as consequências ambientais são, em essência, análogos.

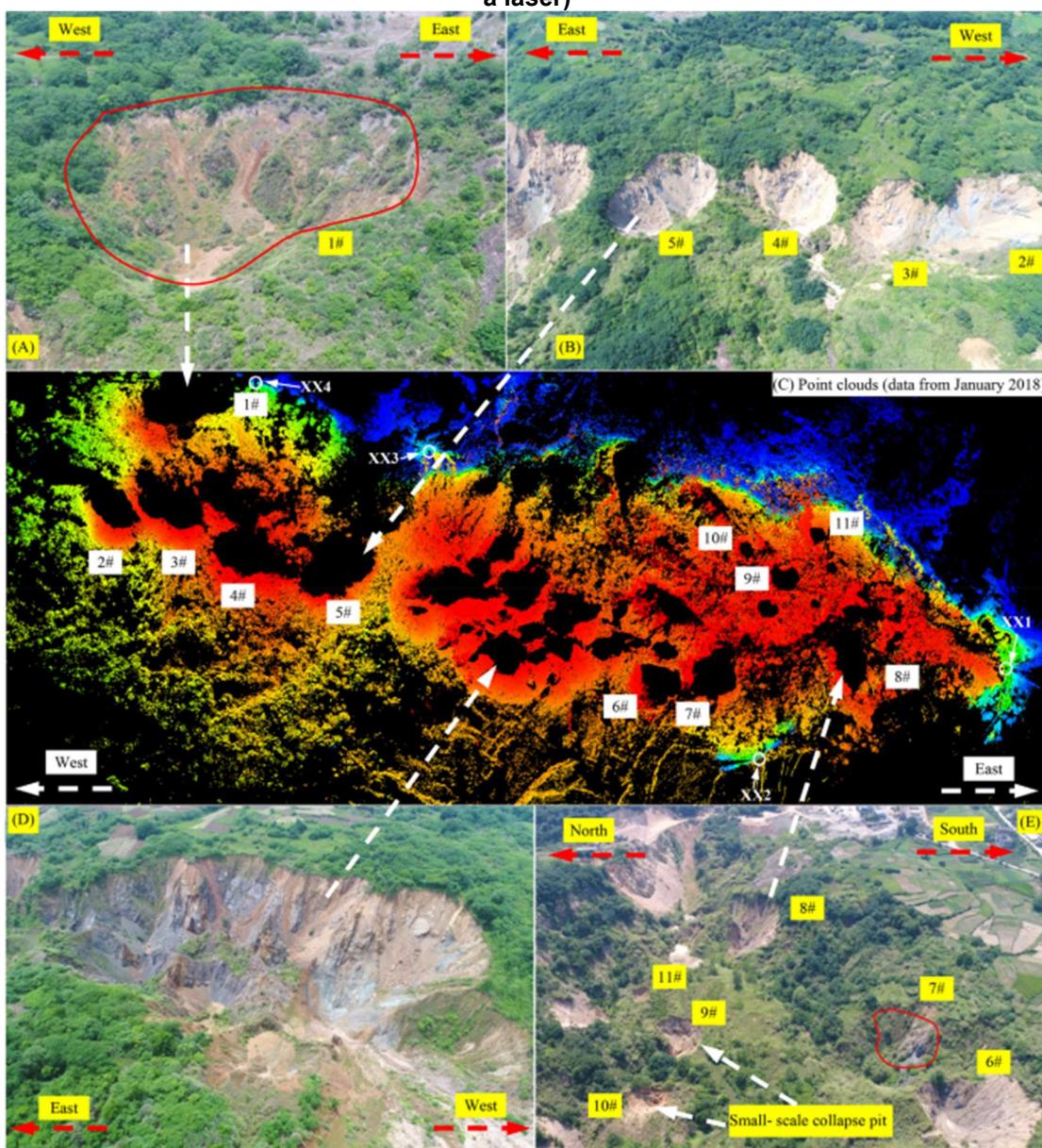
3.1. Províncias na China

A China possui uma das maiores e mais complexas áreas cársticas do mundo, cobrindo uma vasta extensão de seu território. Essa riqueza geológica, no entanto, vem acompanhada de desafios significativos, especialmente devido à intensa atividade de mineração. A exploração de carvão, minério de ferro e outros recursos minerais em regiões cársticas tem levado a problemas generalizados de subsidênci a do solo, segundo (IMWA, 1996).

O processo de subsidênci a em áreas cársticas mineradas na China é complexo e multifacetado. A remoção de grandes volumes de minério, o rebaixamento do lençol freático devido ao bombeamento de água nas minas e a alteração das tensões no maciço rochoso contribuem para a instabilidade do terreno. Isso resulta na formação de dolinas, afundamentos e colapsos que afetam infraestruturas, terras agrícolas e assentamentos humanos. Relatos indicam que mais de 797 regiões em 23 províncias chinesas foram impactadas por subsidênci a relacionada à mineração em áreas cársticas, demonstrando a escala do problema (IMWA, 1996).

O governo chinês tem investido em pesquisas e tecnologias para mitigar os impactos da mineração em áreas cársticas, incluindo o desenvolvimento de métodos de preenchimento de vazios subterrâneos e o monitoramento da estabilidade do solo. No entanto, a magnitude da atividade minerária e a complexidade geológica das regiões cársticas tornam o desafio considerável. O caso da China serve como um lembrete da necessidade de equilibrar o desenvolvimento econômico com a proteção ambiental e a segurança das comunidades em áreas geologicamente sensíveis.

Figura 31 - Uma visão geral da área de colapso da superfície do solo (os números brancos XX1, XX2, XX3 e XX4 mostrados em (C) identificam os pontos de monitoramento de varredura a laser)



Fonte: Xia et al.. (2019).

Figura 32 - Dolina em região de mineração na China, ilustrando os impactos da exploração

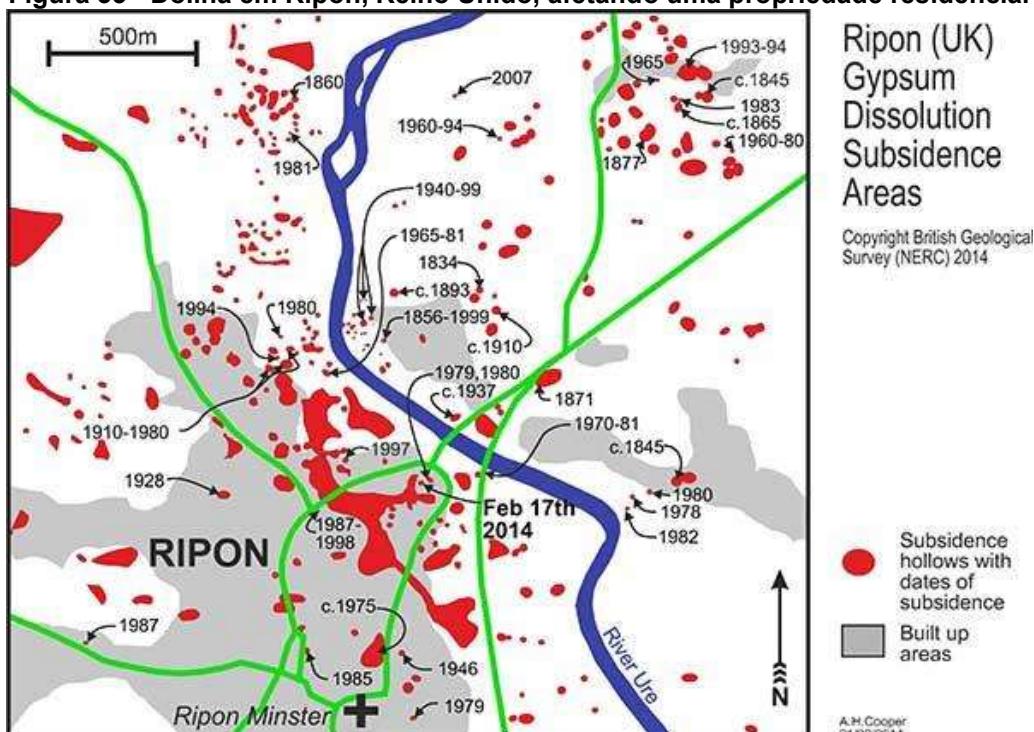


Fonte: Liu; Zhou (2013).

3.2. Ripon, Reino Unido

Ripon, uma cidade no Reino Unido, é notória pela sua suscetibilidade a dolinas (sinkholes), fenômenos geológicos que ocorrem naturalmente em áreas cársticas. A presença de gesso (gypsum) no subsolo, um mineral altamente solúvel, torna a região particularmente vulnerável à formação dessas cavidades. (British Geological Survey, 2025). Embora as dolinas possam surgir por processos naturais, a atividade humana, como a construção e o manejo inadequado da água, pode acelerar e agravar sua ocorrência, causando danos significativos a propriedades e infraestruturas.

Figura 33 - Dolina em Ripon, Reino Unido, afetando uma propriedade residencial



Fonte: British Geological Survey (2014).

3.3. Norwich, Reino Unido

A presença de antigas minas de giz (*chalk mines*) levou à formação de dolinas, onde a interceptação de vazios subterrâneos estáveis por essas minas desencadeou colapsos (BRITISH GEOLOGICAL SURVEY, 2025).

Norwich, também no Reino Unido, apresenta um histórico de dolinas relacionadas à sua herança de mineração. A cidade possui antigas minas de giz (*chalk mines*) que, ao longo do tempo, podem ter interceptado vazios subterrâneos estáveis. Quando esses vazios são perturbados, seja por vibrações, mudanças no nível da água subterrânea ou sobrecarga, podem ocorrer colapsos, resultando na formação de dolinas na superfície.

Figura 34 - Dolina em Norwich



Fonte: Karstphotos (2019).

Figura 35 - Um ônibus que caiu em uma dolina em Norwich, Reino Unido, ilustrando o impacto em infraestruturas.

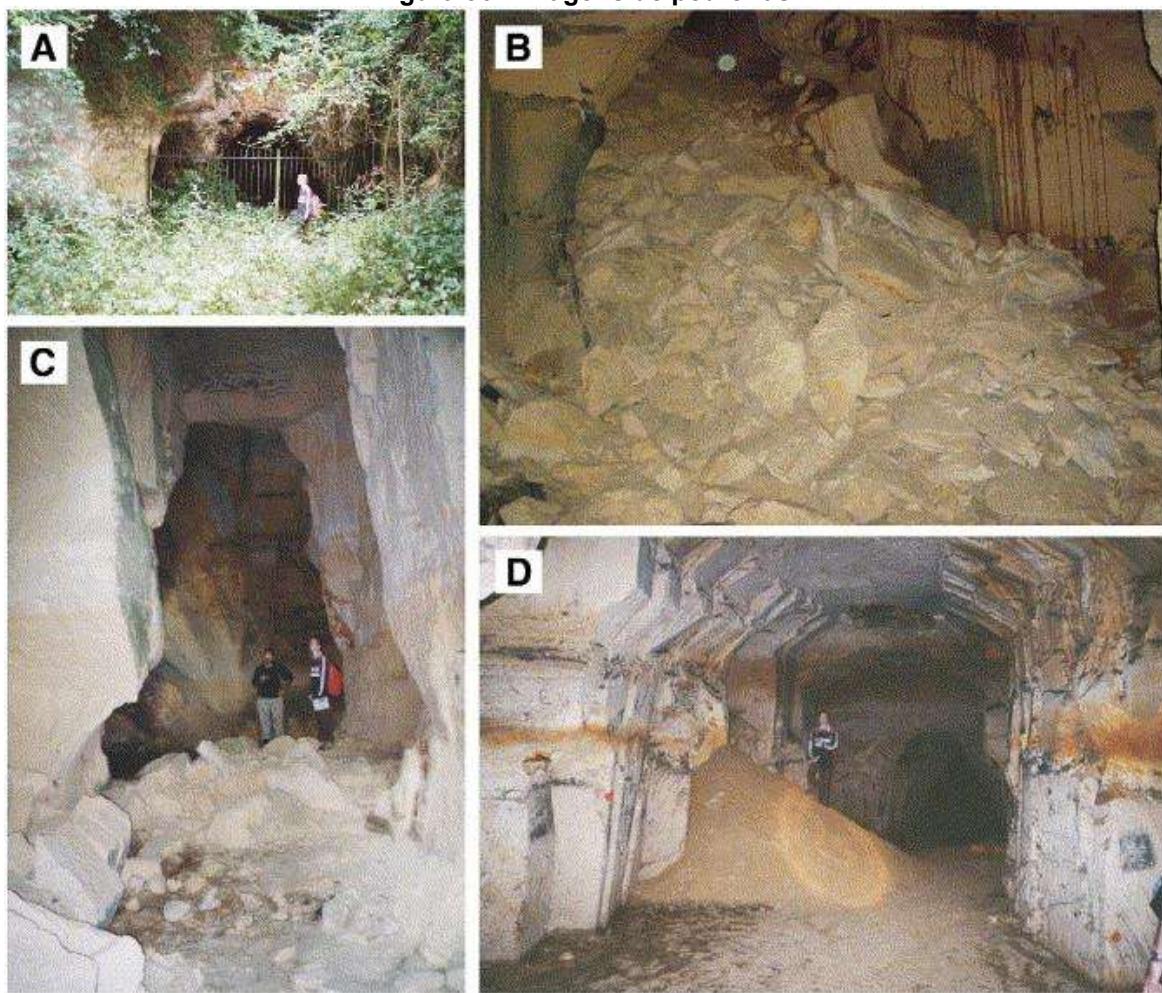


Fonte: BBC (1988)I

3.4. Riemst, Bélgica

A região de Riemst na Bélgica, é caracterizada pela presença de corpos de gesso, um mineral altamente solúvel que contribui para a formação de terrenos cársticos. A exploração de gesso através de grandes pedreiras a céu aberto e subterrâneas tem gerado preocupações significativas em relação à estabilidade do solo. As atividades de mineração podem induzir ou acelerar processos de subsidência, resultando em afundamentos e colapsos que afetam a infraestrutura e a segurança das comunidades locais. (Van Den Eeckhaut et al., 2007)

Figura 36 - Imagens de pedreiras.



- (A) Entrada de uma pedreira subterrânea de calcário no fundo de um vale (Heers, em 2004);
- (B) galeria bloqueada por sedimentos (brecha de fragmentos de calcário e areia ou silte sobrepostos) após o colapso parcial da pedreira de Roosburg em 1958 (Riemst, em 2005);
- (C) colapso parcial do telhado de uma pedreira (Heers, em 2004). Observe o roubo de um pilar à esquerda;
- (D) colapso do telhado próximo ao cruzamento de duas galerias (Riemst, em 2005).

Fonte: Van Den Eeckhaut et al.. (2007).

3.5. Tournaisis, Bélgica

Em Tournaisis, localizado no sul da Bélgica, as atividades de pedreira nesta área cárstica resultaram na abertura de cerca de trinta dolinas, um exemplo claro de como a remoção de material pode induzir colapsos em formações cársticas. (Langer, 2001)

A região de Tournaisis, no sul da Bélgica, é outro exemplo de área cárstica onde a atividade de pedreira tem causado impactos ambientais notáveis. A extração de materiais tem levado à formação de dolinas, com cerca de trinta dessas cavidades tendo se aberto na região. Esse fenômeno é resultado da remoção de suporte do subsolo e da alteração do fluxo de água, que podem desestabilizar as formações cársticas e induzir colapsos (Langer, 2001) conforme pode ser observado na (Figura 37).

Figura 37 -Dolina em Tournaisis, Bélgica, em área de pedreira, demonstrando o impacto da extração.



Fonte: Langer (2001).

4. Considerações Finais

A análise comparativa dos casos estudados evidencia que a exploração inadequada de terrenos cársticos configura um risco geotécnico significativo, capaz de provocar colapsos estruturais, subsidências, contaminação de aquíferos e deslocamentos populacionais. Os episódios registrados em Maceió, Cajamar, Colombo, Confins, entre outros, demonstram que, apesar das diferenças regionais, os padrões de instabilidade mantêm estreita relação com o uso intensivo do subsolo, a carência de estudos geológicos aprofundados e a fragilidade dos mecanismos de fiscalização e licenciamento.

Diante desse cenário, recomenda-se que a Atualização e Revisão do Plano Diretor de Bonito (MS) conte com as seguintes medidas:

- Mapeamento geotécnico detalhado das áreas com presença de carste;
- Criação de zonas de uso restrito e definição de zoneamento de risco;
- Diretrizes para monitoramento de subsidência e controle rigoroso da perfuração de poços;
- Avaliação de impacto ambiental obrigatória para qualquer empreendimento em solos cársticos;
- Políticas de educação ambiental e incentivo à participação comunitária na gestão do território.

A preservação dos sistemas cársticos é crucial não apenas para prevenir desastres, mas também para assegurar a segurança hídrica, a integridade dos ecossistemas subterrâneos e o direito à moradia segura. Este relatório busca contribuir com uma abordagem integrada e preventiva para a gestão de territórios geologicamente sensíveis, promovendo o equilíbrio entre desenvolvimento e conservação.

5. Referências

Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, Maria Luiza Malucelli. *A influência do aquífero carste em Almirante Tamandaré*. Geografar, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 20–37, jul./dez. 2006. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/geofar/article/view/6838>. Acesso em: 24 ago. 2025.
- ANDRADE, Regyane R. de et al.. *Os impactos ambientais decorrentes da exploração do aquífero karst na região de Colombo/PR*. Revista Multitemporal, 2015. Disponível em: <https://periodicos.unisantacruz.edu.br/index.php/revusc/article/view/41>. Acesso em: 24 set. 2025.
- BATISTA, Roberta. *Antes e depois: Maceió perde um bairro inteiro afetado pela mineração*. G1, 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/al/alagoas/arquivo/noticia/2024/11/15/antes-e-depois-maceio-perde-um-bairro-inteiro-afetado-pela-mineracao.ghtml>. Acesso em: 20 ago. 2025.
- BITTENCOURT, C.; REIS NETO, J. M. dos. *O sistema cárstico de Vazante – carste em profundidade em metadolomitos do Grupo Vazante – MG*. Revista Brasileira de Geociências, v. 42, n. 1, p. 1–10, mar. 2012. Disponível em: <https://pgeo.igc.usp.br/portal/index.php/rbg/o-sistema-carsitico-de-vazante-carste-em-profundidade-em-metadolomitos-do-grupo-vazante-mg/>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. Porto Alegre: Verbo Jurídico, 2004.
- BRASIL. *Estatuto da Cidade*. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm. Acesso em: 14 abr. 2024.
- BRASIL. Ministério das Cidades. *Guia para Elaboração do Plano Diretor Participativo: metodologia de participação*. Brasília: Ministério das Cidades, 2007.
- BRASIL, Ministério Do Desenvolvimento Regional. *Guia para elaboração e revisão de Planos Diretores*. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/desenvolvimento-urbano/guia-para-elaboracao-e-revisao-de-planos-diretores>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- BRASIL. *Plano Regional de Desenvolvimento do Centro-Oeste (PRDCO) 2020–2023*. Brasília: Governo Federal, 2019.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. *Understanding sinkholes and karst*. [S.I.], 2013. Disponível em: <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/earth-hazards/sinkholes/>. Acesso em: 24 ago. 2025.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. *Planning and development in Ripon*. [S.I.], 2013. Disponível em: <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/sinkholes-research/development-in-ripon/>. Acesso em: 24 out. 2025.

CABRAL, J. A. de L.; SOUSA, H. A.; CHAPADEIRO, E. *APA Carste de Lagoa Santa: Zoneamento ambiental*. CPRM; IBAMA, 1998. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/bitstream/doc/10191/1/Zoneamento%20Ambiental.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2025.

CABRAL JÚNIOR, Marsis. *Bases para a dinamização da cadeia produtiva mineral no Vale do Ribeira*. Apresentação no Fórum de Mineração no Vale do Ribeira, São Paulo: IPT, 2020. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2020/03/apres.-ipt_-marsis-cabral.pdf. Acesso em: 29 ago. 2025.

CASEMIRO, Poliana. *O que é o sal-gema, causa do afundamento em área de mina em Maceió, e para que é usado?* G1, 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/ciencia/noticia/2023/12/05/o-que-e-o-sal-gema-causa-do-afundamento-em-area-de-mina-em-maceio-e-para-que-e-usado-ele-e-igual-ao-sal-marinho.ghtml>. Acesso em: 20 ago. 2025.

CHEN, X. et al.. *Global karst water resources and their future trends*. Earth-Science Reviews, v. 166, p. 38–57, 2017. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.12.007.

FORD, Derek; WILLIAMS, Paul D. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 562 p. Disponível em: <https://sudartomas.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/11/karsthydrogeologyandgeomorphology1.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2025.

FRANÇA, Raíssa. *Bairros afundando transformam parte de Maceió em cidade fantasma e atraem curiosos*. BBC News Brasil, Maceió, 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-59179804>. Acesso em: 20 ago. 2025.

GOLDSCHEIDER, Nico et al.. *Global distribution of carbonate rocks and karst water resources*. Hydrogeology Journal, v. 28, p. 1661–1677, 2007. Acesso em: 25 ago. 2025.

GOMES, F. J. *Subsidência em terrenos cársticos na região de Lapão e Irecê (BA)*. Salvador: UFBA, 2010.

GONÇALVES, Mário Jorge de Souza. *Avaliação de risco de contaminação do aquífero fissural cárstico da região de Irecê (BA)*. 2004. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

HINDI, Eduardo Chemas et al.. *Características hidrogeológicas do aquífero cárstico em Colombo (PR) e impactos ambientais resultantes da sua exploração*. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: ABAS, 2002.

IMWA – International Mine Water Association. *Surface Subsidence in the Karst Mining Area in China*. 1996. Disponível em: http://www.imwa.de/bibliographie/13_2_021-025.pdf. Acesso em: 27 ago. 2025.

JOHNSON, K. S. *Evaporite karst in the United States*. Carbonates and Evaporites, v. 12, n. 1, p. 2–14, 1997.

LANGER, William H. *Potential Environmental Impacts of Quarrying Stone in Karst – A Literature Review*. U.S. Geological Survey, 2001. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0484/ofr-01-0484po.pdf>. Acesso em: 24 out. 2025.

LIU, Kun; ZHOU, Wenting. *Giant sinkholes plague Hubei mining region*. China Daily, 23 set. 2013. Disponível em: https://usa.chinadaily.com.cn/china/2013-09/23/content_16986875.htm. Acesso em: 24 ago. 2025.

LIMA, T. A. S.; SIMÕES, S. J. C. *Subsidência e colapso no Brasil: uma revisão abrangente*. In: ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES, 4., São José dos Campos, 2024. Anais... São José dos Campos: UNESP/CEMADEN, 2024.

LOPES, Natália Dias. *Comparação de dois modelos empíricos para a classificação do grau de suscetibilidade a abatimento em áreas cársticas carbonáticas na Bacia do Rio Vieira, município de Montes Claros – MG*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

LUKAČ REBERSKI, Jasmina et al.. *Emerging organic contaminants in karst groundwater: a global level assessment*. Journal of Hydrology, v. 604, 127242, jan. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169421012920>. Acesso em: 24 ago. 2025.

MARTINI, J. E. J. *Silicate karst in the Clarens Formation sandstone, South Africa*. In: GUNN, J. (Ed.). Encyclopedia of Caves and Karst Science. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 1410–1413.

MEDEIROS, Oliveira; COSTA, Taiara; TOLENTINO, Nogueira; SANTOS, Rosângela dos. *Balanço hídrico climatológico e curva ombrotérmica para o município de Irecê – Bahia*. In: III Congresso Internacional das Ciências Agrárias – COINTER-PDVAgro, 2018. Anais... 2018.

MORIYAMA, Victor. *Catástrofe em câmera lenta: um bairro ameaçado pelo desmoronamento das minas da Braskem em Maceió*. Revista Piauí, Ed. 208, 2024. Disponível em: <https://piaui.folha.uol.com.br/materia/um-bairro-ameacado-pelo-desmoronamento-das-minas-da-braskem-em-maceio/>. Acesso em: 20 ago. 2025.

NETO, R. M. *O fenômeno cárstico em São Thomé das Letras (MG) e a mineração: evolução e degradação de cavernas em quartzito.* Revista Brasileira de Geomorfologia, 2012. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/301>. Acesso em: 25 ago. 2025.

OLIVEIRA, Luís Marcelo de. *Acidentes geológicos urbanos.* Curitiba: MINEROPAR, 2010. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-04/acidentes_geologicos_urbanos_2010.pdf. Acesso em: 29 ago. 2025.

OLIVEIRA, V. *Estudos serão feitos na cratera do Santa Luzia em Sete Lagoas através de licitação.* Sete Lagoas.com.br, 4 abr. 2024. Disponível em: <https://setelagoas.com.br/noticias/cidades/95451-estudos-serao-feitos-na-cratera-do-santa-luzia-atraves-de-licitacao-prefeitura-convida-empresas-interessadas/>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SEIXAS, Josué. Mina em Maceió: entenda situação alarmante de região em risco de colapso. *BBC News Brasil*, [S. I.], 1 dez. 2023. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/articles/cyr22m7zxp8o>. Acesso em: 27 ago. 2025.

WRAY, R. A. L. *Quartzite karst in southeastern Australia: geomorphology, hydrology and speleogenesis.* Zeitschrift für Geomorphologie, v. 41, n. 1, p. 41–56, 1997.

VERESS, Márton. *A general description of karst types.* Encyclopedia, Basel, v. 2, n. 2, p. 1103–1118, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-8392/2/2/73>. Acesso em: 24 out. 2025.

VAN DEN EECKHAUT, M. et al.. *Sinkhole formation above underground limestone quarries: a case study in South Limburg (Belgium).* Geomorphology, Amsterdam, v. 91, n. 1/2, p. 19–37, nov. 2007.

Páginas Eletrônicas Institucionais

CÂMARA MUNICIPAL DE CAJAMAR.O buraco de Cajamar]. Cajamar, SP: [s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.cmdc.sp.gov.br/texto/14>. Acesso em: 24 set. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso: 05/02/2025.

NSTITUTO SOCIOAMBIENTAL (ISA). *Impactos socioambientais da mineração no Vale do Ribeira são debatidos em seminário.* 20 jun. 2013. Disponível em: <https://site-antigo.socioambiental.org/pt-br/noticias-socioambientais/impactos-socioambientais-da-mineracao-no-vale-do-ribeira-sao-debatidos-em-seminario>. Acesso em: 25 ago. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BONITO. Disponível em: <https://www.bonito.ms.gov.br/>. Acesso: 20/02/2025.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DA BAHIA. Centro de Apoio Operacional de Defesa do Meio Ambiente e Urbanismo – CISP Regional Irecê. Disponível em:
<https://cispregional.mpba.mp.br/cispsregionais/irece/> Acesso em: 24 out. 2025.

SEMADESC. Secretaria Estadual de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação de Mato Grosso do Sul. Disponível em: <https://www.semadesc.ms.gov.br/>. Acesso: 05/02/2025.

UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://ufrj.br/>. Acesso: 05/02/2025.

IVIG. Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais. Disponível em: <https://ivig.coppe.ufrj.br/>. Acesso: 05/02/2025.



REVISÃO E ATUALIZAÇÃO DO PLANO DIRETOR DO MUNICÍPIO DE BONITO – MS



BONITO – MATO GROSSO DO SUL – BRASIL
15 DE JUNHO DE 2025

