

A mineração em Rochas Carbonáticas na Região Metropolitana de Curitiba- PR: Desafios para a Preservação do Patrimônio Cárstico e Espeleológico

Mining in Carbonate Rocks in the Metropolitan Region of Curitiba, PR: Challenges for the Preservation of Karst and Speleological Heritage

Edenilson Roberto do Nascimento^{*}, Gisele Cristina Sessegolo^{**}, Elias Fernando Berra^{***}, Claudinei Taborda da Silveira^{****}, Tony Vinícius Moreira Sampaio^{*****}

^{*} Departamento de Geografia, UFPR, deni_ern@ufpr.br

^{**} GEEP-AÇUNGUI/Ecosistema Consultoria Ambiental, gisele.sessegolo@ecosistema.bio.br

^{***} Departamento de Geografia, UFPR, eliasberra@ufpr.br

^{****} Departamento de Geografia, UFPR, claudineits@ufpr.br

^{*****} Departamento de Geografia, UFPR, tonsysampaio@ufpr.br

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v59i0.93178>

Resumo

As rochas carbonáticas são os litotipos com maior volume de exploração e rentabilidade financeira na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), representando a mais importante fonte mineral para a indústria cimentícia, agregados para a construção civil, correção do solo, insumos para a indústria de transformação, além de abrigar o Aquífero Karst da RMC. Porém, a atividade minerária, realizada a céu aberto com o desmonte dos maciços rochosos com o uso de explosivos, impacta diretamente a paisagem cárstica e o patrimônio cárstico regional, notadamente as dezenas de cavernas ocorrentes na região. Assim, considerando a natureza irreversível dos impactos ambientais resultantes da mineração e a ausência de um monitoramento contínuo dessas áreas, utilizou-se dados de sensoriamento remoto, dados minerários oficiais e registros de danos ambientais para identificar o crescimento da mineração de rochas carbonáticas e os impactos sobre o patrimônio espeleológico regional. Os dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), os registros históricos do Grupo de Estudos Espeleológicos do Paraná (GEEP-Açungui) e, principalmente, o mapeamento das mudanças de uso da terra a partir da análise de imagens das séries Landsat 5, 7 e 8, foram os dados e informações considerados na análise. O aumento da área com uso e cobertura da terra classificada como “mineração” entre 1980 e 2022, o incremento anual na arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) e a presença de dezenas de cavernas em áreas com processos minerários ativos permitiram identificar que a mineração em rochas carbonáticas constitui o maior desafio à preservação dos sistemas cársticos da RMC.

Palavras-Chave:

Cavernas, Exploração Mineral, Sensoriamento Remoto, Google Earth Engine.

Abstract

Carbonate rocks are the lithotypes with the highest volume of exploitation and financial profitability in the Metropolitan Region of Curitiba (RMC), representing the most important mineral source for the cement industry, aggregates in construction, soil acidity correction, as well as housing the Karst Aquifer of the RMC, ornamental rock mines, and providing inputs for the manufacturing industry. However, mining activity, carried out in open-pit operations through the dismantling of rock masses usually using explosives, directly impacts the karst landscape and regional speleological heritage, especially the dozens of caves occurring in the region. Therefore, considering the irreversible nature of the environmental impacts resulting from mining and the lack of continuous monitoring of mined areas, remote sensing data, official mining data, and records of environmental damage were used to identify the growth of carbonate rock mining and its impacts on regional karst and speleological heritage. Specifically, the following data were used: records from the National Mining Agency (ANM), historical records from the Paraná Speleological Studies Group (GEEP-Açungui), and primarily, 1980-2022 land use and land cover change dataset derived from Landsat 5, 7, and 8 series of images. The increase in the land use classified as "mining" between 1980 and 2022, the annual increase in revenue from the Financial Compensation for Mineral Exploration, and the presence of dozens of caves in areas with active mining processes allowed for identifying that the growth of mining activity in carbonate rocks constitutes the greatest challenge to preserving the karst systems of the RMC.

Keywords:

Caves, Mineral Exploitation, Remote Sensing, Google Earth Engine.

I. INTRODUÇÃO

A exploração mineral na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), em especial de rochas carbonáticas, é a atividade mineral de maior importância econômica no estado do Paraná. Dados da Agência Nacional de Mineração demonstram que, entre os anos de 2002 e 2022, um total de 27,5% da arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) no Estado derivou da exploração de rochas carbonáticas, cujo percentual de compensação devido é de 2%, sendo que 58,4% deste montante resultaram da mineração de rochas carbonáticas nos municípios abrangidos no presente trabalho (ANM, 2023). Guimarães (2005) destaca que, no início do século, 50% da produção mineral paranaense era representada pela exploração de "calcário". Já, segundo o Plano Diretor da Mineração da RMC (MINEROPAR, 2004), 59.7% da arrecadação da CFEM no ano de 2001 resultava da exploração das substâncias minerais: "calcário calcítico, dolomítico e mármore" e cerca 31% dos 1489 processos minerários e 30% das áreas de mineração ativas na região vinculavam-se diretamente à exploração de litotipos carbonáticos.

Os dados da Agência Nacional de Mineração (ANM) registravam a existência de 726 processos minerários ativos cadastrados na área de estudo em 2022 (Figura 1), acessíveis no Sistema de Informação Geográfica da Mineração (SIGMINE). Dos 697 processos minerários que declaram a substância de interesse, 480 fazem referência às substâncias sólidas e água mineral explotadas em áreas com ocorrência de rochas carbonáticas. Cerca de 65,5% dos 195,6 mil hectares da área estudada estão, atualmente, em alguma fase de pesquisa ou exploração de substâncias sólidas ou de recursos hídricos, sendo 74.500 hectares em áreas de ocorrência de rochas carbonáticas mapeadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (BESSER, 2021).

Todavia, das mais de 200 cavidades presentes na RMC (CANIE, 2022), pelo menos 94 ocorrem na área estudada, todas hospedadas em rochas carbonáticas pertencentes a diferentes formações geológicas do Grupo Açungui – Neoproterozoico (FIORI e GASPAR, 1993). Embora a região apresente uma vocação mineral que atende uma considerável parcela das demandas econômicas e sociais do Paraná, a atividade é apontada historicamente como a principal responsável por vários impactos ambientais e a supressão parcial e, em alguns casos, total do patrimônio espeleológico, biológico e paleontológico associados às cavidades cársticas da RMC.

O registro de impactos ambientais é um fato observado e parcialmente documentado pelo Grupo de Estudos Espeleológicos do Paraná (GEEP-AÇUNGUI, 1992; 1995; 1997) e pesquisadores associados desde a década de 1980 (SESSEGOLO et al. 1993; 2001a; LINO e ALIEVI, 1980). Ainda mais evidentes do que os impactos sobre as cavidades cársticas, o avanço da mineração, conforme identificou Pinto (2011) ao estudar o município de Rio Branco do Sul, produz modificações geomorfológicas nas áreas de ocorrência de rochas carbonáticas.

Sessegolo et al. (2001b) destacaram como principais conflitos ambientais no carste: poluição hídrica, desmatamento, uso público inadequado, turismo em massa, exploração mineral, obras de interesse civil, expansão urbana, entre outros. Além disso, citam a conversão das cavernas em templos religiosos, depósitos de lixo e esgoto, reservatórios de água. Agravando essa situação, descrevem a existência de moradias em áreas de risco, uso de terrenos de alta declividade e frentes de lavras abandonadas.

Segundo Guimarães (2005), o desenvolvimento da atividade mineral na RMC se consolidou nos anos 1960, sem o planejamento ambiental adequado e sem uma “consciência coletiva” dos produtores. Rebelo et al. (2003), ao analisar a exploração mineral do “setor de calcário na RMC” apontou que a carência de conhecimento científico, a ocupação de áreas tradicionalmente destinadas à mineração, a falta de emprego de métodos tecnológicos e as exigências impostas pela adaptação às novas exigências ambientais no início dos anos 2000, desafiavam a sustentabilidade do setor mineral da região. Nesse contexto, Nascimento (2012), baseado nas características do relevo regional, sugeriu diferentes tipos de exploração (mineração, exploração de água,

turismo) nos sistemas cársticos na região limítrofe das bacias hidrográficas dos rios Iguaçu e Ribeira, indicando critérios exploratórios baseados nos níveis de exposição dos sistemas cársticos condicionados pelo relevo.

É importante destacar que os instrumentos legais de preservação, que passaram a considerar as cavernas como bens da União são recentes no Brasil. A Portaria nº 887/1990, o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico criado 2004 e o Decreto Federal nº 6.640 de 2008 e suas alterações, entraram em vigor somente cinquenta anos após os primeiros registros oficiais de requerimentos de exploração mineral na área estudada. Dentre outros importantes marcos na preservação do patrimônio espeleológico brasileiro, duas medidas de preservação se destacam nas últimas décadas: I) a área de proteção mínima de 250 metros no entorno das cavidades; II) a classificação das cavidades naturais subterrâneas de acordo com seu grau de relevância (máximo, alto, médio ou baixo), em função de seus atributos ecológicos, biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, cênicos, histórico-culturais e socioeconômicos.

A disponibilidade de dados de sensoriamento remoto orbital, embora bastante recente quando comparadas com as atividades minerárias desenvolvidas por décadas ou até mesmo séculos antes do advento do sensoriamento remoto, possui a vantagem de fornecer dados que independem das limitações impostas pela dependência de esforços governamentais, pela parcialidade de informações de atividades minerais regulamentadas ou pela sonegação de informações.

Os sistemas sensores com séries temporais de décadas e acesso gratuito, a exemplo da série Landsat, permitem a mensuração do avanço da mineração e as mudanças de uso e cobertura da terra por meio de diferentes métodos de mapeamento temático. Diniz (2014) com o uso de imagens TM/Landsat 5 identificou um crescimento de 285% da área minerada no Quadrilátero Ferrífero – MG, entre os anos de 1985 e 2011. Latifovic et al. (2005), ao relacionar o decréscimo da área vegetada e a atividade minerária, identificou um aumento de aproximadamente 90% da área minerada na região central do Canadá entre 1992 e 1991, também com a análise de imagens da série Landsat.

Embora entenda-se que a mineração não seja a única atividade conflitante com a preservação do patrimônio espeleológico e a perda de biodiversidade regional, o presente trabalho tem como objetivo realizar a análise da expansão da atividade minerária na região norte de Curitiba, entre a década de 1980 até o ano de 2022. Para mensurar o aumento da mineração na área de estudo foram analisadas, com o uso da plataforma Google Earth Engine (GEE) imagens dos sensores Landsat 5 ETM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI, entre os anos de 1984 e 2022, os dados oficiais da ANM entre 2002 e 2022, e os dados de processos minerários estão disponíveis no SIGMINE desde a década de 1930.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a identificação dos registros históricos oficiais e das diferentes fases dos processos minerários junto à ANM, foram utilizados os dados geoespaciais de requerimentos minerários disponibilizados no SIGMINE referentes ao ano de 2021; Esses dados, os quais foram filtrados espacialmente para separar processos minerários: (a) de toda a área de estudo; (b) das áreas de ocorrência de litotipos carbonáticos (BESSER, 2021), e (c) para as áreas de ocorrência das 94 cavidades naturais subterrâneas registradas no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE, 2022) na área de estudo (Figura 1).

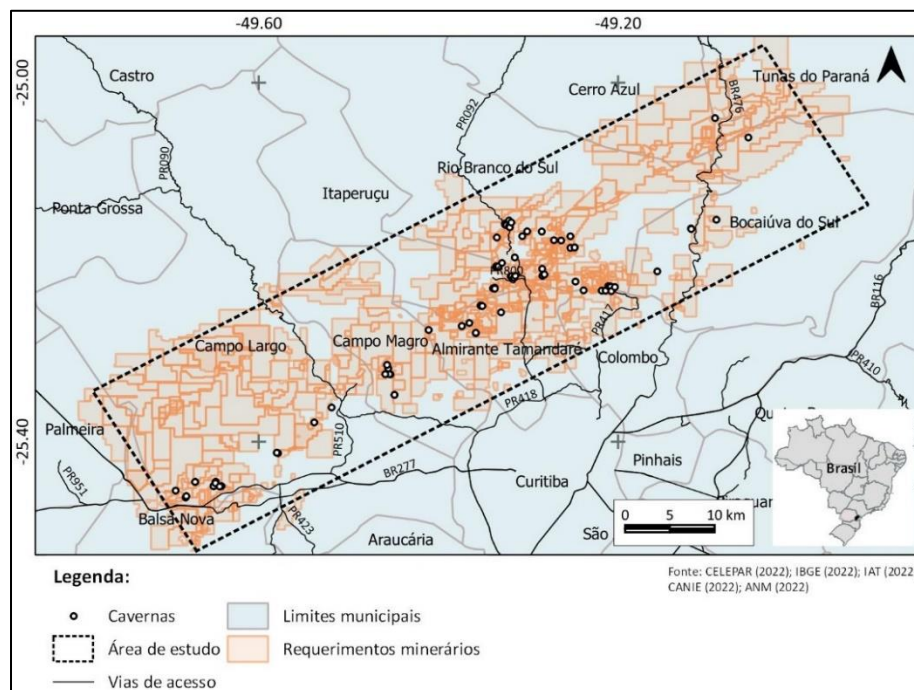


Figura 1: Localização e acessos da área de estudo e distribuição dos requerimentos minerários parcial ou totalmente contidos na área estudada.

Os dados referentes à arrecadação da CFEM, disponíveis entre os anos de 2002 e 2022, foram filtrados para as seguintes substâncias: calcário, calcita, dolomito e mármore e água mineral. Tais dados foram consultados no Painel do Anuário Mineral Brasileiro Interativo (2023) da ANM e serviram de parâmetro de mensuração do crescimento da atividade minerária nos 11 municípios abrangidos pela área de estudo até o ano de 2022.

O mapeamento das mudanças no uso e cobertura da terra foram realizadas na plataforma Google Earth Engine (GEE), por meio de desenvolvimento de scripts na linguagem de programação JavaScript, o qual pode ser acessado em <<https://code.earthengine.google.com/ddf61d8c0b812b2e7b711213f833b9c2>>. As imagens analisadas, pertencentes à série histórica do programa Landsat, foram classificadas de modo a diferenciar as respostas espectrais dos seguintes alvos de interesse: 1) “áreas de mineração” (atividade minerária em rochas

carbonáticas); 2) “corpos d’água” (rios e lagos e represas); 3) “vegetação” (ocorrência de cobertura vegetal) e 4) “áreas urbanizadas” (aglomerados urbanos ou industriais), demais classes, a exemplo da classe “solo exposto” foram desconsideradas. As imagens dos satélites LandSat 5, 7 e 8 foram filtradas por: a) período de interesse, conforme Tabela 1; b) cobertura de nuvens menor ou igual a 5%; c) qualidade do pixel da coleção de imagens (pixel com valor máximo para a banda espectral, de forma a gerar uma composição temporal dos melhores pixels em cada período considerado, muito embora tal prática possa privilegiar imagens com respostas espectrais influenciadas por variações sazonais). Aqui, o termo década não se refere a um período de 10 anos, mas ao período escolhido para representar a referida década. Devido a frequente cobertura de nuvens na área, a composição temporal teve que utilizar de 2 a 3 anos de imagens para compor uma imagem livre de nuvens dentro da área de estudo.

A classificação foi realizada com o algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest (RF), utilizando as bandas espectrais apresentadas no Tabela 1 como parâmetros de entrada para treinar o classificador. O RF é um algoritmo de aprendizado de máquina que consiste em aprender várias árvores de decisão fracas para gerar uma árvore de decisão mais forte, a qual é utilizada para realizar regressão ou classificação (BREIMAN, 2001). Definiram-se as classes: 1) “áreas de mineração” (mineração em rochas carbonáticas); 2) “corpos d’água”; 3) “vegetação” e, 4) “áreas urbanizadas”.

No processo de validação, a fim de quantificar as incertezas da classificação, calculou-se a matriz de confusão/erro a qual fornece medidas de exatidão global e acurácia de usuário e de produtor, as informações sobre a quantidade de amostras coletadas estão disponíveis em <<https://code.earthengine.google.com/ddf61d8c0b812b2e7b711213f833b9c2>>.

Tabela 1. Síntese das imagens analisadas no Google Earth Engine e acurácia global por período.

Década de interesse	Período de aquisição das imagens analisadas	Sensor Landsat utilizado	Bandas analisadas	Acurácia global
1980	01/01/1987 - 31/01/1989	5/TM	4,3,2	96%
1990	01/01/1997 - 30/12/1999	7 ETM+	4,3,2	95%
2000	01/01/2005 - 31/12/2008	7 ETM+	4,3,2	74%
2010	01/01/2016 - 31/12/2018	OLI-TIRS	5,4,3	98%
Início 2020	01/01/2020 - 31/12/2022	OLI-TIRS	5,4,3	97%

Fonte: Elaborado pelos autores

A análise espacial, a confecção dos layouts das figuras e a espacialização dos dados obtidos na ANM, CPRM, ITCG, bem como os dados obtidos nas análises realizadas no GEE, foram realizadas com a utilização do software QGIS 3.16.10-Hannover (QGIS, 2023).

Os impactos ambientais identificados nas últimas décadas, mais precisamente a partir da segunda metade da década de 1980, se basearam na existência prévia de cadastro de cavidades, em especial nas memórias e documentos do GEEP-Açungui, principal fonte de registros e de ocorrência e impactos ambientais no patrimônio espeleológico da RMC. Porém, deve-se considerar que as diversas mudanças de gestão do grupo e conversão de dados espaciais, resultaram em imprecisões de difícil mensuração na localização das cavernas que podem, eventualmente, interferir nas análises espaciais.

Para a delimitação das zonas de amortecimento das áreas de mineração sobre as cavidades constantes no CANIE (2022), utilizou-se a distância de 250 m (duzentos e cinquenta metros), conforme a Resolução CONAMA nº 347, de 10 de setembro de 2004, que define a área de influência e, portanto, da manutenção da biodiversidade e da estabilidade do patrimônio espeleológico nacional.

III. RESULTADO E DISCUSSÃO

Nas classificações do uso e cobertura da terra, realizadas no GEE, entre a década de 1980 até 2022, é possível identificar um crescimento de 363% na área classificada como “áreas de mineração” (Figuras 2 e 3). Os dados da década de 1980 permitiram classificar 641 ha como “área de mineração”, com incremento de 11% na década de 1990, chegando a 709 ha; na década de 2000 o crescimento em relação à década anterior foi de 68%, chegando em 1196 ha, na década de 2010 houve um crescimento menos expressivo, de apenas 10%, chegando a 1326 ha e, por último, nos anos 2010 até 2022, verificou-se um expressivo aumento de 75% em relação à década anterior, alcançando 2330 ha (Figura 2). Vale ressaltar que o crescimento identificado entre 1980 e 2022, baseado em imagens da série Landsat, não mensura o volume explotado em lavras por bancadas, representando somente a expansão da área minerada. A figura 4 apresenta as áreas de mineração na década de 1980 e as áreas de mineração verificadas na década de 2020.

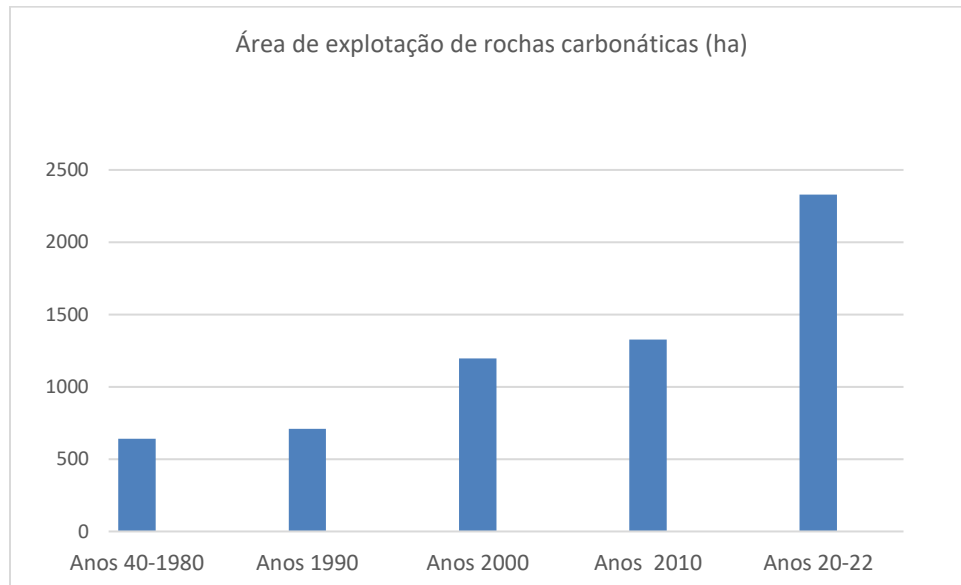
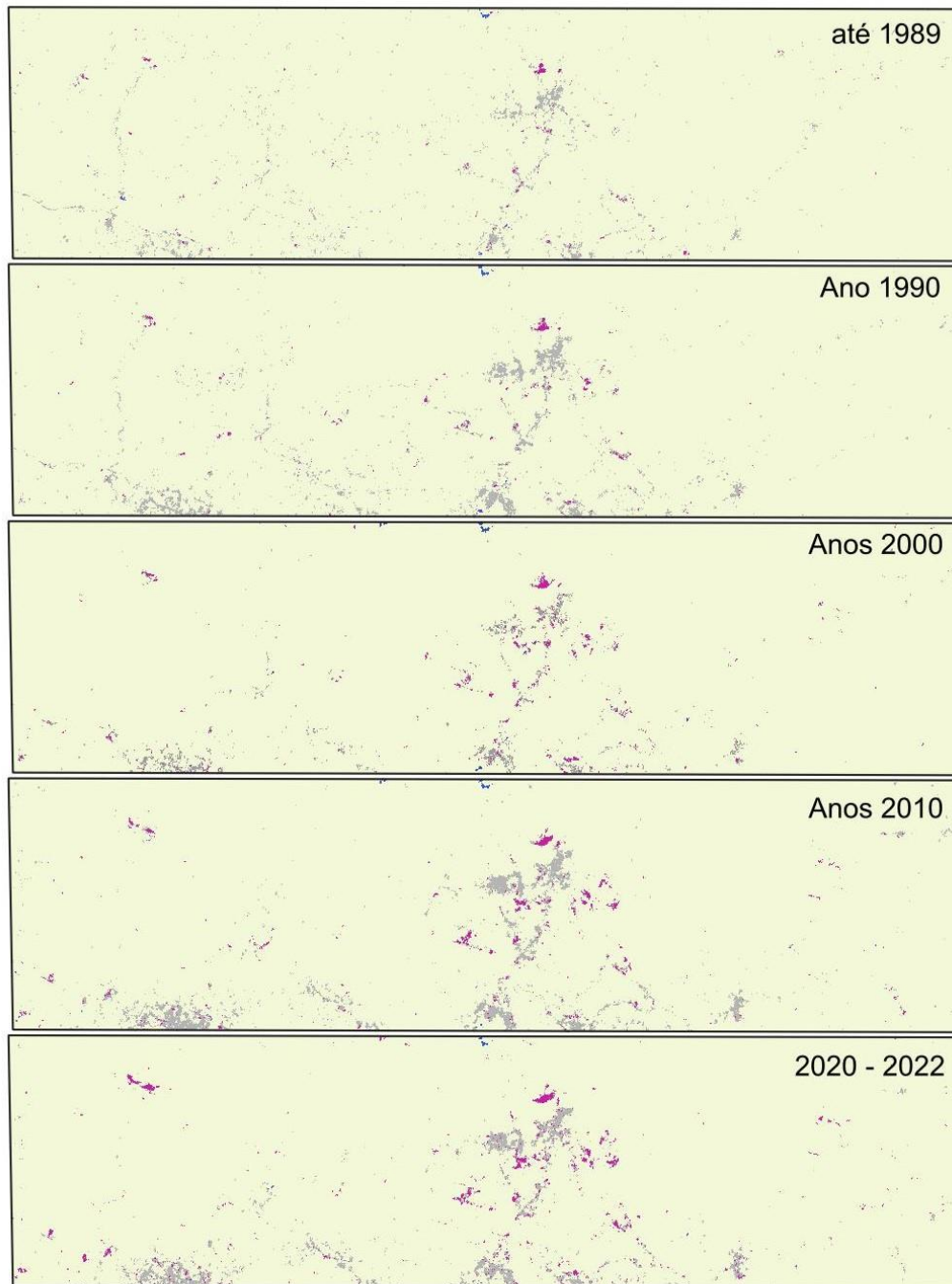


Figura 2: Crescimento da área de mineração de carbonatos na série temporal estudada. No eixo “x” é apresentado o intervalo temporal considerado e no eixo “y” a área em hectares.

Nos estudos efetuados pelo GEEP-Açungui, em 1995 verificou-se que das 76 cavernas cadastradas na RMC, 39 encontravam-se suprimidas, 15 parcialmente destruídas, 18 ameaçadas, 3 com uso inadequado e apenas 1 conservada. Essa análise indicava que aproximadamente 50% das cavernas cadastradas haviam sido suprimidas.



Legenda:

- | | |
|--------------------------------|---------------|
| Limite da área de estudo | Área urbana |
| Classes de uso da terra | Vegetação |
| Área de mineração | Corpos d'água |

0 5 10 km



Figura 3: Cobertura do uso da terra para a série temporal analisada, conforme gerada no Google Earth Engine. Informações complementares no Tabela 1.

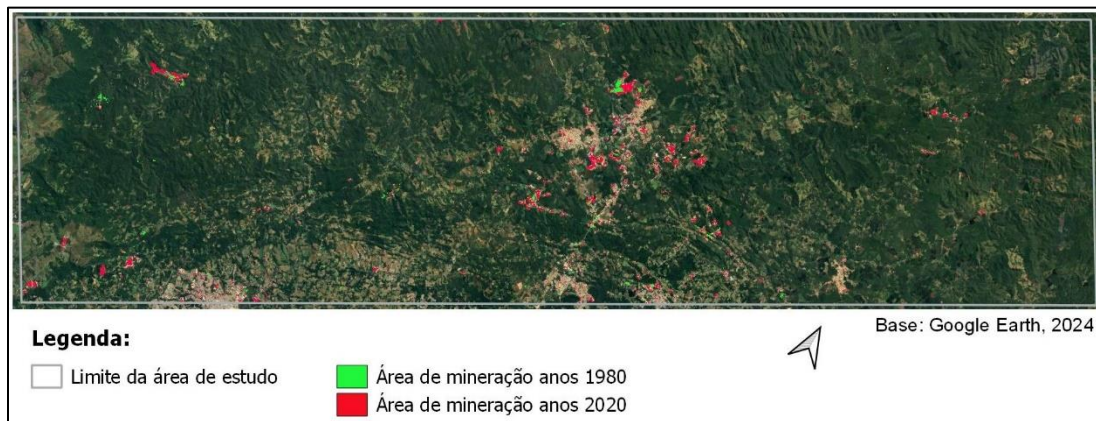


Figura 4: Comparação da área com cobertura do uso da terra classificada como “mineração” nas décadas de 1980 e 2020.

Guimarães (2005), ao descrever o cenário da exploração mineral na Formação Capiru, principal faixa de ocorrência de rochas carbonáticas da área de estudo, no início dos anos 2000, identificou que havia 198 áreas de mineração mapeáveis, sendo que 107 estavam ativas, 43 estavam desativadas e 24 em situação de abandono, dados que corroboram a desaceleração no crescimento verificada na década de 2010 (Figura 2).

Em relação ao avanço da mineração sobre a área de ocorrência de cavernas, verifica-se, no presente trabalho, quando se compara as áreas de mineração identificadas no GEE com o cadastro de cavidades do CANIE 2022, que na década de 1980 haviam 31 cavidades com distância menor que 250 m de uma ou mais áreas de mineração ativas; na década de 1990 havia 37; na década de 2000 havia 38; na década de 2010 havia 32; e entre 2020 e 2022 foram identificadas 33 cavidades que distavam menos de 250 m de uma ou mais áreas de mineração em atividade. Na década de 2010, verifica-se a diminuição da quantidade de cavernas com distância de até 250 m de atividades minerárias.

A Figura 5 apresenta as áreas de amortecimento nas décadas de 1980, 1990 e 2000 da região de ocorrência de quatro cavernas no município de Rio Branco do Sul-PR. Nota-se que nas duas primeiras décadas a Gruta do Bento e as Grutas Rio Branco I e II estavam a menos de 250 m de um alvo com resposta espectral de mina ativa, fato não verificado na década de 2000, quando a desativação da mina permitiu o crescimento da vegetação e mudança da resposta espectral da área de mineração. A adequação às leis ambientais e/ou a viabilidade econômica possivelmente motivou a diminuição do número de cavernas com atividade mineral em suas áreas de influência.

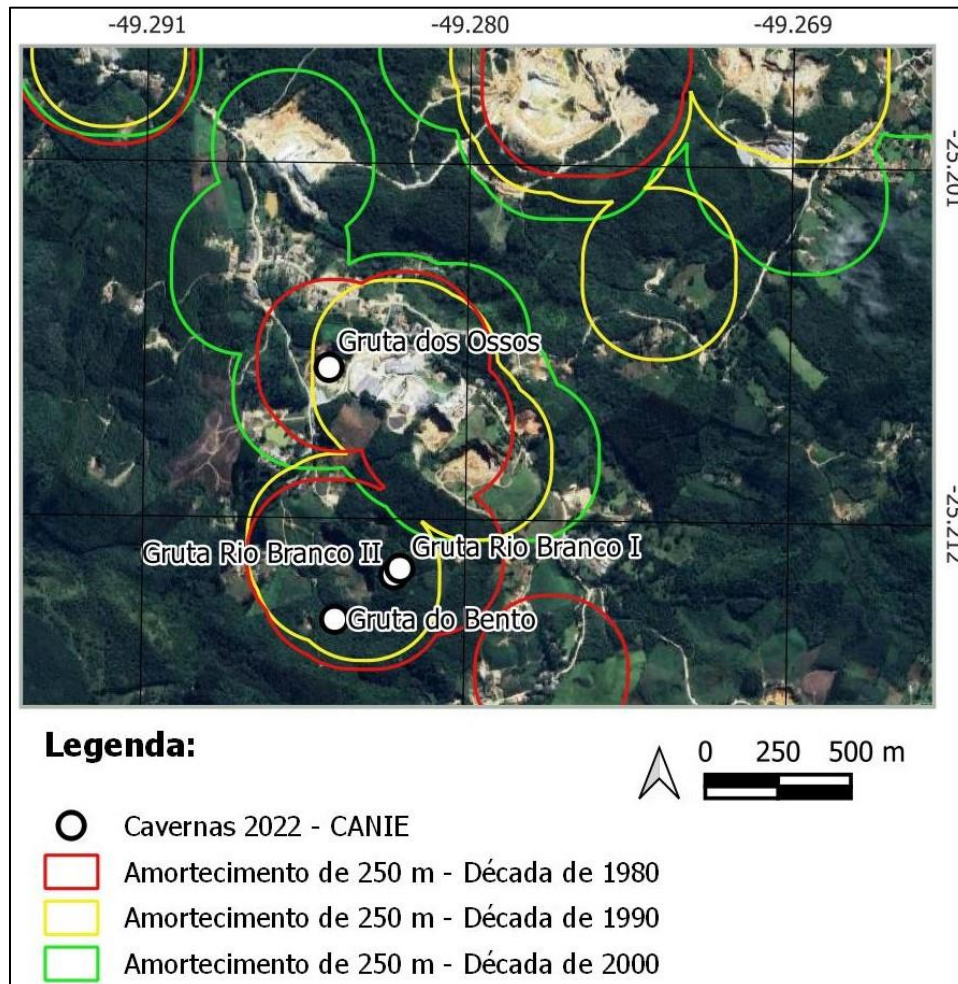


Figura 5: observar que a mina próxima às grutas Rio Branco I e II e Gruta do Bento possuem vegetação, denotando a desativação da exploração no local.

Das 93 cavidades cársticas presentes na área de estudo, 85 estão em áreas com requerimentos ativos na ANM (CANIE, 2022; ANM, 2023). Existem, atualmente, 22 processos minerários com presença de cavernas, sendo 21 em fase de concessão de lavra e uma em fase de requerimento de lavra (ANM, 2023), ou seja, a grande maioria das cavernas está em áreas com exploração mineral ou apta à mesma.

A evolução da arrecadação da CFEM nos últimos vinte anos, oriunda da exploração das substâncias sólidas “calcário”, “dolomito” e “mármore”, nos municípios parcialmente abrangidos pela área estudada, pode ser observada na Figura 6. A tendência de crescimento nos valores recolhidos da CFEM, que totalizou mais de R\$ 61,3 milhões no período considerado, denota a necessidade crescente de bens minerais nos últimos anos e o conseqüente aumento da exploração mineral na região. A existência, no ano de 2003, de 475 processos minerários em toda a RMC com “Substância Principal” declarada como “Calcário calcítico, dolomítico, mármore” (MINEROPAR, 2004) quando comparada com os 480 processos minerários presentes somente na área de estudo

(SIGMINE, 2021), que abrange parte de 11 dos 29 municípios da RMC, expressa o crescimento da atividade minerária nas últimas duas décadas.

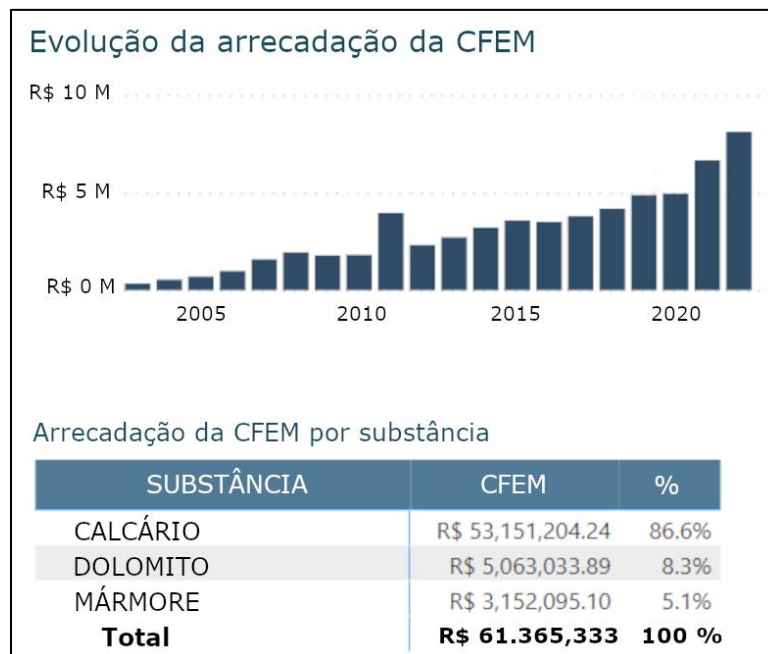


Figura 6: Evolução da CFEM entre 2000 e 2022 para as substâncias sólidas “calcário”, “dolomito” e “mármore” (ANM, 2023).

Para Sessegolo et al. (1996), considerando-se a potencialidade de cavernas não cadastradas e que não possuíam nenhum registro histórico, além da atividade mineral remontar desde o final do século XVIII, estimou-se que no mínimo 50% do patrimônio espeleológico da RMC havia sido destruído até 1995. Sessegolo et al. (2001b), assinalaram, ainda, que a expansão urbana da RMC ampliou os impactos ambientais na região e que tais impactos tendiam a se agravar devido a exploração do aquífero cárstico regional, atividade estratégica para a RMC.

É importante destacar que o mapeamento sistemático das cavidades cársticas da RMC teve início apenas na segunda metade da década de 1980, com o início das atividades do GEOP-Açungui, mais de cinquenta anos após o início da exploração mineral dos carbonatos da região, década coincidente com o início da aquisição de dados pelo satélite Landsat 5. Muito embora centenas de cavidades tenham sido mapeadas nos últimos anos, o cadastro atual de cavidades não contempla a totalidade de cavernas existentes na região e, certamente, uma expressiva parcela do patrimônio espeleológico regional possivelmente foi destruída antes de seu mapeamento. Não há nenhuma dúvida em se afirmar que existem muitas cavernas a serem descobertas e muitas descobertas a se fazer nas cavernas cadastradas.

Outro aspecto relevante que deve ser considerado para entender a relação entre o avanço da mineração e a presença de cavernas diz respeito ao fato de diversas cavidades terem sido descobertas posteriormente ao

início da atividade minerária e das restrições ambientais impostas a partir da Constituição de 1988. Assim, algumas incongruências entre a mineração e a preservação do patrimônio espeleológico, identificadas no presente estudo, eram desconhecidas durante parte do tempo da atividade de algumas mineradoras e, em alguns casos, as cavidades foram descobertas/expostas por conta do avanço das frentes de lavra.

Os moradores mais antigos da região estudada, segundo os registros históricos do GEEP-Açungui dos anos 1980 e 1990, relatam que o início das minerações de rochas carbonáticas entre o início do século XIX e grande parte do século XX utilizavam a entrada de cavernas como local inicial do avanço de frente de lavra. As características do relevo, da cobertura vegetal, os métodos rudimentares de mineração, a falta de consciência ambiental e a inexistência de normativas legais de preservação foram responsáveis pela supressão de diversas cavernas na RMC.

O processamento do material litológico, em especial para a fabricação da cal, cimento e agregados para a construção civil, representa uma etapa com potencial impacto ambiental, sendo o material particulado transportado pelo vento que, em alguns casos, cobre a vegetação e a infraestrutura nas áreas próximas às áreas de mineração e locais de beneficiamento. Além da poluição atmosférica a poluição hídrica e sonora é comum, variando em função do tipo de processamento posterior à extração mineral.

No caso específico do material particulado carregado pelo vento, há uma influência na resposta espectral dos alvos, que podem superdimensionar as áreas de mineração ativas na classificação do uso da terra. Todavia, o espalhamento da poluição pode servir de parâmetro para mensurar a expansão ou retração da atividade mineral ou, até mesmo, do cumprimento das normativas legais de mitigação da poluição atmosférica (Figura 7).



Figura 7: poluição resultante do processamento de rochas carbonáticas para a fabricação de cal cobrindo a vegetação e as infraestruturas adjacentes - Almirante Tamandaré-PR. Fonte: autores.

A indisponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens em determinados para todos os anos analisados, a dificuldade na separação de alvos com respostas espectrais semelhantes (solo exposto, urbanas e áreas próximas ao beneficiamento do material litológico), bem como a falta de registros históricos oficiais dos impactos ambientais sobre as cavidades da RMC, podem ser apontadas como os principais limitadores no presente estudo, todavia o uso dos dados da ANM, mesmo considerando possibilidade de sonegação fiscal da CFEM, e os relatos históricos do GEEP-Açungui permitiram fundamentar a pesquisa.

IV. CONCLUSÕES

A mineração de rochas carbonáticas na Região Metropolitana de Curitiba (RMC) apresentou um expressivo crescimento ao longo das últimas quatro décadas, observado tanto no aumento da área identificada como “áreas de mineração”, na classificação de uso e cobertura da terra realizada a partir de imagens no GEE, quanto na arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM). No entanto, o desenvolvimento econômico do setor minerário foi acompanhado de impactos ambientais significativos sobre o patrimônio espeleológico da RMC.

A análise dos dados de imagens orbitais revelou um crescimento de mais de 300% na área com resposta espectral de mineração de carbonatos entre 1980 e 2022, indicando uma expansão geográfica considerável da atividade. Paralelamente, os registros históricos do Grupo de Estudos Espeleológicos do Paraná (GEEP-AÇUNGUI) apontam para a supressão parcial ou total de cavernas desde meados dos anos 1980.

A dispersão atmosférica de material particulado proveniente do beneficiamento do material litológico, bem como a semelhança da resposta espectral de áreas com solos expostos de mostraram as principais limitantes ao uso de dados de sensoriamento remoto no presente estudo podendo, até mesmo, superdimensionar a área classificada como “áreas de mineração”. A utilização de dados da ANM, CANIE, GEEP-Açungui entre outros, foram fundamentais para identificar o crescimento da atividade minerária e os impactos sobre o carste regional.

Enfim, é essencial a ampliação do conhecimento e da melhoria da gestão ambiental por parte das diversas esferas do governo, especialmente estadual, que conduz os processos de licenciamento ambiental das atividades econômicas, para que o patrimônio espeleológico seja de fato estudado e cadastrado conforme as normativas técnicas e legais vigentes.

A proposição de medidas compensatórias devido a mineração em áreas cársticas devem ser revistas e ampliadas na RMC. A produção agrícola paranaense, por exemplo, que figura recorrentemente entre as maiores

do Brasil, está diretamente vinculada ao fornecimento de corretivo agrícola a partir de rochas carbonáticas presentes na área estudada, fato que deve motivar a proposição de medidas compensatórias específicas que promovam a preservação do patrimônio espeleológico.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela infraestrutura para o desenvolvimento do trabalho; Grupo de Estudos Espeleológicos do Paraná (GEEP-AÇUNGUI) pelo fornecimento de registros históricos; plataforma Google Earth Engine pelo fornecimento de imagens e condições de processamento.

V. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. Anuário Mineral Brasileiro. Ano base 2022. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizDA5NGMyYmYtOWQyMi00NzA1LWZhOTQtNmU5NjEyMTI3ZDMxliwidCI6ImEzMDgzZTlxLTc0OWItNDUzNC05YWZlLTU0Y2MzMTg4OTdiOCJ9&pageName=ReportSection7a43f884dc43352e5953>. Acesso em: 25 de janeiro de 2023. 2023.
- BESSER, M. L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A. L. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná. Escala 1:600.000. Curitiba: SGB-CPRM, 2021.
- BREIMAN, L. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>. 2001.
- CADASTRO NACIONAL DE INFORMAÇÕES ESPELEOLÓGICAS (CANIE). Instituto Chico Mendes de Biodiversidade (ICMBio). Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV). Base de dados Brasil. Brasília. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2022.
- DINIZ, J. M. F. S.; REIS, A. A.; ACERBI J. F. W.; GOMIDE, L. R. Detecção da Expansão da Área Minerada no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, no período de 1985 a 2011 através de técnicas de sensoriamento remoto. *Boletim de Ciências Geodésicas (Online)*, v. 20, p. 683-700, 2014.
- FIORI A. P. GASPAR L. A. Considerações sobre a estratigrafia do Grupo Açungui (Proterozóico Superior), Paraná, sul do Brasil. *Bol. IG-USP, Série Científica*, 24: 1-19, 1993.
- GEEP-AÇUNGUI. Diagnóstico da degradação ambiental de cavidades naturais subterrâneas no Estado do Paraná. Avaliação preliminar 1. Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba, 1992. (Relatório interno não publicado). 49 p.
- GEEP-AÇUNGUI. Diagnóstico da degradação ambiental de cavidades naturais subterrâneas da Região Metropolitana de Curitiba. Convênio FNMA/MMA 037/94. Curitiba, 1995. (Relatório interno não publicado).
- GEEP-AÇUNGUI. Diagnóstico da degradação ambiental de cavidades naturais subterrâneas na Região Metropolitana de Curitiba – Relatório técnico complementar, 1997. Convênio FNMA/MMA 055/97. Curitiba, 1995b. Relatório Interno [S.p.]
- GUIMARÃES, S. B. O. Calcário como minério na Formação Capiru do Grupo Açungui: estudo analítico para a

Região Metropolitana de Curitiba-PR. Orientador: José Manoel dos Reis Neto. 2005. Doutorado em Geologia Exploratória, Programa de Pós-Graduação em Geologia, UFPR, Curitiba-PR. p. 5–18. 2005.

LATIFOVICA, R.; FYTASB, K.; CHENC, J.; PARASZCZAKB, J. Assessing Land Cover Change Resulting from Large Surface Mining Development. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7, p. 29-48. 2005.

LINO, C. F.; ALLIEVI, J. *Cavernas Brasileiras*. São Paulo: Melhoramentos, 1995.

MINEROPAR. Plano Diretor de Mineração (PDM) para a Região Metropolitana de Curitiba (RMC). Base de DO Instituto Água e Terra. Curitiba. Disponível em: < <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Plano-Diretor-de-Mineracao-para-Regiao-Metropolitana-de-Curitiba-2004>>. Acesso em: 13 setembro de 2023. 2004.

NASCIMENTO, E. R.; REIS NETO, J. M.; REBELO, A. M. A.; SAMPAIO, T. V. M.; SILVEIRA, C. T. Parâmetros geomorfométricos do relevo no entendimento do nível de exposição dos sistemas cársticos na região limítrofe das bacias hidrográficas do Alto Iguaçu e do Alto Ribeira - Região norte de Curitiba - PR. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, p. 81-90, 2012.

PINTO, R. C.; PASSOS, E. Alterações geomorfológicas ocasionadas pela extração de calcário no município de Rio Branco do Sul - PR. *Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia*, v. 3, p. 3-20, 2011.

QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>. 2023.

REBELO, A.; GUIMARÃES, S. B.; REIS NETO, J. M. A Exploração Mineral e o Desenvolvimento Paranaense: o setor de calcário na Região Metropolitana de Curitiba. *Boletim Paranaense de Geociências*, Curitiba-PR, v. 1, n.53, p. 13-26, 2003.

SESSEGOLO, G. C.; ZAKRZEWSKI, D. P.; NAGAI, S.; SUZUKI, F. Y. Diagnóstico da degradação ambiental de cavidades naturais subterrâneas no Estado do Paraná. Região Metropolitana de Curitiba. Curitiba (Relatório interno, não publicado). 1993.

SESSEGOLO, G. C.; SILVA-DA-ROCHA, L. F.; ZAKRZEWSKI, D. P. Degradação Ambiental de Cavernas na Região Metropolitana de Curitiba - PR. In: SESSEGOLO, G. C.; SILVA-DA-ROCHA, L. F.; THEULEN, V. (Orgs.). *Cavernas do Paraná – Dez Anos de Espeleologia*. Curitiba: GEEP-Açungui. p. 5-8. 1996.

SESSEGOLO, G. C.; OLIVEIRA, K. L.; SILVA-DA-ROCHA, L. F.; Contexto Atual da Conservação de Cavernas no Estado do Paraná, Brasil. In: SILVA-DA-ROCHA, L. F.; OLIVEIRA, K. L.; SESSEGOLO, G. C. (Orgs.). *Conservando Cavernas – 15 Anos de Espeleologia*. Curitiba: GEEP-Açungui. p. 5-8. 2001a.

SESSEGOLO, G. C. e THEULEN, V. Alternativas para a proteção do patrimônio espeleológico brasileiro. In: SILVA-DA-ROCHA, L. F.; OLIVEIRA, L. K.; SESSEGOLO, G. C. *Conservando cavernas: 15 Anos de Espeleologia GEEP-Açungui*. Curitiba: GEEP-Açungui, 2001b.