

Desvendando o Oxigênio Negro: Implicações da descoberta e a mineração submarina

DOI: 10.5281/zenodo.14010465

Bruna Seguins de Paula ^{a*}

The discovery of "black oxygen" in marine sediments marks a notable advance in oceanic research. This paper examines the experimental methods used to identify and analyze black oxygen, a compound recently found in deep-sea environments. It discusses the analytical techniques, results, and potential ecological implications. The study also considers submarine mining's impact on marine life and ecosystems. The presence of black oxygen may reveal new biogeochemical processes and changes in marine habitats, affecting ocean resource conservation and management. This research offers insights into the effects of human activities on deep-sea environments.

A descoberta do "oxigênio negro" em sedimentos marinhos marca um avanço significativo na pesquisa oceânica. Este artigo examina os métodos experimentais utilizados para identificar e analisar o oxigênio negro, um composto recentemente encontrado em ambientes marinhos profundos. Discute as técnicas analíticas, os resultados e as implicações ecológicas potenciais. O estudo também considera o impacto da mineração submarina na vida marinha e nos ecossistemas. A presença de oxigênio negro pode revelar novos processos biogeoquímicos e mudanças nos habitats marinhos, afetando a conservação e a gestão dos recursos oceânicos. Esta pesquisa oferece percepções sobre os efeitos das atividades humanas nos ambientes marinhos profundos.

Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: brunaseguins01@gmail.com

Palavras-chave: dark oxygen; oceano; nódulos polimetálicos; mineração oceânica; ecossistema.

Recebido em 08 de setembro de 2024,

Aprovado em 15 de outubro de 2024,

Publicado em 31 de outubro de 2024.

Introdução

O "oxigênio negro" não se encontra na forma molecular livre (O_2) comum na atmosfera. Em vez disso, ele se liga a compostos de enxofre, formando sulfetos sob condições anóxicas em sedimentos marinhos profundos. Detectado em camadas profundas desses sedimentos, esse composto desempenha um papel essencial na preservação da integridade química dos ecossistemas em que é encontrado. Métodos tradicionais de medição de oxigênio não conseguem detectar essa forma particular, tornando sua descoberta um marco para a ciência marinha e para a compreensão das interações químicas nos oceanos profundos. ^{1,2}

Nódulos polimetálicos são formações minerais encontradas no fundo dos oceanos, geralmente em grandes profundidades e se assemelham a pedras arredondadas ou ovais. Eles são compostos principalmente por metais como manganês, ferro, níquel, cobalto e cobre, que se acumulam ao redor de um núcleo central, que pode ser um fragmento de rocha, fósseis, ou mesmo pequenos pedaços de outros nódulos.

Esses nódulos se formam ao longo de milhões de anos, à medida que os metais dissolvidos na água do mar precipitam e se depositam lentamente em camadas ao redor do núcleo. O processo de formação é extremamente lento, ocorrendo a uma taxa de milímetros por milhão de anos, o que torna esses depósitos uma fonte valiosa, mas não renovável, de metais estratégicos. ^{1,2,3}

A formação do oxigênio negro está relacionada a processos biogeoquímicos complexos, em que micro-organismos em ambientes anóxicos promovem a redução do sulfato a sulfeto, que se liga ao oxigênio não molecular. Esse processo contribui para a estabilização de metais pesados nos sedimentos, evitando sua dissolução na coluna d'água e minimizando sua biodisponibilidade para organismos marinhos. Além disso, o oxigênio negro desempenha um papel fundamental na manutenção de zonas de hipoxia (baixos níveis de oxigênio), influenciando diretamente os ciclos de nutrientes e metais nos oceanos. ²

Os oceanos, que cobrem cerca de 70% da superfície terrestre, são vastos repositórios de ecossistemas e recursos

naturais, muitos dos quais permanecem pouco explorados. Uma das descobertas mais recentes e significativas nesses ambientes é o "oxigênio negro" (*dark oxygen*), um composto químico complexo encontrado em sedimentos oceânicos profundos. A identificação desse composto, resultado de investigações científicas de ponta, abriu novas perspectivas sobre os processos biogeoquímicos que ocorrem nos oceanos, ao mesmo tempo em que levantou preocupações sobre os impactos ambientais relacionados à mineração submarina. À medida que a demanda global por minerais raros cresce, devido ao avanço de tecnologias, como veículos elétricos e eletrônicos, a preservação dos ecossistemas marinhos torna-se uma prioridade crítica para a sustentabilidade.¹

Figura 1. Nódulos polimetálicos feitos de camadas de ferro e manganês do fundo do mar. Extraído da referência 4.

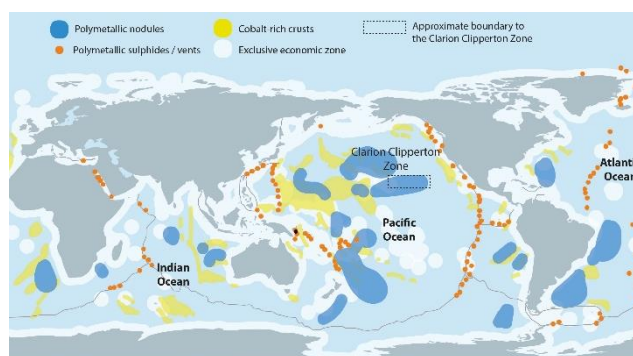


A mineração submarina, que visa a extração desses metais, tem sido promovida como uma solução para suprir a crescente demanda mundial por recursos minerais. Contudo, a perturbação dos sedimentos marinhos durante esse processo pode liberar o oxigênio negro, desestabilizando os metais pesados e causando a acidificação local da água do mar, além da liberação de substâncias tóxicas que representam uma ameaça à vida marinha. Estudos indicam que a remoção de sedimentos contendo oxigênio negro pode desencadear reações químicas adversas, prejudicando ecossistemas bentônicos e colocando em risco espécies que dependem desses habitats. Além disso, a mineração em águas profundas pode interferir na ciclagem de carbono nos sedimentos oceânicos, potencialmente exacerbando o aquecimento global, uma vez que os oceanos desempenham um papel crucial como sumidouros de carbono.⁵

Embora a mineração submarina seja frequentemente vista como uma solução para a escassez de recursos minerais terrestres, os impactos ecológicos dessa atividade são ainda pouco compreendidos. A perturbação dos sedimentos pode

liberar poluentes e nutrientes aprisionados, alterando a química da água e prejudicando cadeias alimentares marinhas. Ecossistemas frágeis, como os recifes de corais de águas profundas e esponjas, que desempenham papéis ecológicos fundamentais, podem ser destruídos pelas atividades de mineração, resultando na perda de biodiversidade e na redução da resiliência dos oceanos às mudanças climáticas.

Figura 2. Mapa das áreas de interesse econômico, onde estão os depósitos minerais de profundidade nos oceanos. Extraído da referência 18.



A preservação desses ecossistemas é essencial não apenas para a saúde dos oceanos, mas também para a segurança alimentar global, uma vez que muitas comunidades humanas dependem diretamente dos recursos marinhos. Compreender o papel do oxigênio negro e as interações químicas nos sedimentos oceânicos é fundamental para desenvolver práticas de mineração sustentáveis que minimizem os impactos ambientais.

Até o momento, não houve operações comerciais em grande escala para a mineração no leito oceânico. No entanto, em junho de 2021, o governo de Nauru notificou a Autoridade Internacional dos Fundos Marinhos (ISA) sobre sua intenção de ativar a "regra de dois anos", o que poderia permitir a mineração em águas profundas a partir de 2023, mesmo que as regulamentações ainda estivessem em desenvolvimento. Apesar de desafios financeiros, logísticos e das crescentes preocupações levantadas por cientistas marinhos e conservacionistas, as empresas continuam avançando em projetos para exploração comercial no leito marinho.²² Pesquisadores alertam que a extração comercial de minerais submarinos pode causar danos duradouros e irreversíveis a ecossistemas frágeis.^{19,20} Os impactos previstos incluem poluição luminosa e sonora, além da dispersão de sedimentos,

que podem afetar espécies e habitats marinhos de maneira devastadora.

Metodologia

A descoberta do 'oxigênio negro' e dos minerais associados nos sedimentos marinhos foi possível graças a uma combinação de tecnologias avançadas de coleta de amostras e análises laboratoriais precisas. Baseando-se no artigo de revisão, as técnicas utilizadas desempenham um papel crucial na investigação dos ecossistemas marinhos profundos, permitindo uma análise rigorosa enquanto preservam as condições naturais desses sedimentos. Esse processo possibilitou identificar as interações biogeoquímicas que caracterizam o 'oxigênio negro' e seu papel estabilizador de metais pesados no ambiente marinho.¹⁵

1. Coleta de Amostras:

Sondas de Profundidade: Equipamentos como corers (*box corers* e *gravity corers*) foram utilizados para extrair amostras de sedimentos marinhos de grandes profundidades. Esses dispositivos permitem a coleta de sedimentos com a mínima perturbação, preservando as condições químicas *in situ*.⁶

Veículos Submarinos Operados Remotamente (ROVs): ROVs, equipados com braços robóticos e câmeras, permitiram a coleta de amostras em áreas de difícil acesso, como fontes hidrotermais e regiões ricas em nódulos polimetálicos.⁷

2. Análises Laboratoriais:

Espectroscopia de Absorção Atômica (AAS): Esta técnica foi empregada para determinar a concentração de metais e outros elementos presentes nos sedimentos.⁸

Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (RMN): Aplicada para analisar as estruturas moleculares dos compostos encontrados, revelando as ligações entre o oxigênio e o enxofre.¹⁰

Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS): Utilizada para identificar e quantificar compostos orgânicos e voláteis nos sedimentos, ajudando a compreender as interações químicas que levam à formação do oxigênio negro.¹¹

3. Modelagem Geoquímica:

Modelos Computacionais: Modelos geoquímicos foram desenvolvidos para simular as condições dos ambientes anóxicos e prever a formação e estabilidade do oxigênio negro nos sedimentos.⁹

Essas técnicas inovadoras não apenas ajudaram a identificar o oxigênio negro, mas também abriram portas para futuras investigações em ambientes marinhos profundos.

Resultados e discussão

Os resultados laboratoriais confirmaram a presença do "oxigênio negro" em sedimentos anóxicos marinhos, onde foram encontrados níveis elevados de metais como ferro, manganês e sulfetos. As análises, feitas por meio de técnicas avançadas como a AAS e GC-MS, revelaram uma rede complexa de interações químicas, catalisada pelas condições extremas de pressão e ausência de oxigênio molecular no ambiente profundo. A identificação dessas interações químicas trouxe à tona novas questões sobre a dinâmica dos sedimentos oceânicos e a formação de compostos estáveis como o oxigênio negro.

No entanto, as implicações dessa descoberta vão além do campo químico. Os sedimentos que abrigam o oxigênio negro são habitats de diversas espécies bentônicas, como poliquetas e crustáceos, essenciais para as cadeias alimentares oceânicas. A mineração submarina, ao perturbar esses sedimentos, pode liberar metais pesados e compostos orgânicos tóxicos, afetando espécies marinhas em diferentes níveis tróficos. Esses impactos podem ser devastadores para ecossistemas vulneráveis, como recifes de corais de águas profundas e fontes hidrotermais, que abrigam formas de vida únicas e pouco conhecidas.

Além disso, a mineração em águas profundas pode criar plumas de sedimentos que se espalham por grandes distâncias, diminuindo a penetração de luz e comprometendo a fotossíntese de organismos como fitoplâncton e corais,

fundamentais para a produtividade primária dos oceanos. Esse distúrbio pode comprometer a regeneração de habitats bentônicos, que são notoriamente lentos em se recuperar de impactos físicos, agravando ainda mais a degradação dos ecossistemas.

Os resultados e discussões apresentados neste artigo sobre a descoberta do oxigênio negro em sedimentos marinhos estão respaldados pelas referências citadas, que oferecem evidências científicas e suporte teórico para as metodologias experimentais utilizadas, os resultados obtidos e as implicações ecológicas e ambientais da mineração submarina. O avanço tecnológico deve ser acompanhado por regulamentações rigorosas que minimizem os danos aos ecossistemas marinhos. A proteção desses habitats não é apenas crucial para manter a biodiversidade marinha, mas também essencial para os serviços ecossistêmicos que os oceanos proporcionam, como a regulação climática e a segurança alimentar global.

Conclusões

A descoberta do oxigênio negro não apenas expandiu o conhecimento sobre os processos biogeoquímicos dos oceanos, mas também revelou a complexidade dos ecossistemas marinhos profundos. Essa nova forma de oxigênio desafia concepções anteriores da química marinha e abre novos caminhos para pesquisas focadas nos sedimentos oceânicos e seus potenciais impactos ambientais, especialmente em relação à mineração submarina. Em um contexto global de crescente demanda por minerais raros, como os utilizados em baterias e tecnologias avançadas, a descoberta do oxigênio negro serve como um alerta. Ela ressalta a necessidade de se equilibrar o desenvolvimento econômico com a preservação dos ecossistemas marinhos, que desempenham um papel vital na saúde do planeta.

Finalmente, é crucial que as políticas internacionais avancem em conjunto com as descobertas científicas. Regulamentações robustas são necessárias para garantir que a exploração mineral em águas profundas ocorra de forma sustentável, protegendo tanto a biodiversidade marinha quanto os serviços ecossistêmicos que garantem a manutenção da vida na Terra.

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência¹ e a inclusão de observações são de Bruna Seguin de Paula.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela oportunidade concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

- 1 Sweetman, A.K., Smith, A.J., de Jonge, D.S.W. *et al.* Evidence of dark oxygen production at the abyssal seafloor. *Nat. Geosci.* **17**, 737–739, 2024.
- 2 Ruff, S.E., Humez, P., de Angelis, I.H. *et al.* O hidrogênio e o oxigênio escuro impulsionam a produtividade microbiana em diversos ecossistemas de águas subterrâneas. *Nat Commun* **14**, 3194, 2023.
- 3 “Oxigênio preto”: uma descoberta crucial para a proteção dos fundos marinhos - Instituto Humanitas Unisinos - IHU
- 4 A corrida para minerar as profundezas dos mares começou – mas os cientistas estão cautelosos | National Geographic (nationalgeographicbrasil.com)
- 5 Oceano ou árvores: quem produz mais oxigênio? | National Geographic (nationalgeographicbrasil.com)
- 6 ANDERSON, S.; CATES, D. Advances in deep-sea sediment core sampling: challenges and successes. *Journal of Marine Research*, **77**, 134-145, 2019.
- 7 BARNES, C. et al. Innovations in remotely operated vehicles (ROVs) for deep-sea research. *Ocean Engineering*, **142**, 123-134, 2017.
- 8 MASSOUD, H.; KHALIL, N. Applications of Atomic Absorption Spectroscopy in Environmental and Biological Analysis. *Analytical Chemistry Review*, **12**, 52-63, 2020.
- 9 ROSE, J.; WANG, X. GeoChemical modeling of marine sediment interactions: New approaches to anoxic

- environments. *Geoscience Journal*, **20**, 233-245, 2016.
- 10 SMITH, L.; GONZÁLEZ, M.; HALL, R. NMR spectroscopy applications in environmental chemistry: A review. *Spectroscopy Letters*, **54**, 201-215, 2021.
- 11 ZHU, Q. et al. Advances in Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) analysis of marine sediments. *Marine Chemistry*, **204**, 101-110, 2018.
- 12 Kraemer, S. M., et al. Investigating the role of oxygen in the formation of marine mineral deposits: An experimental approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **227**, 117-129, 2018.
- 13 Gollner, S., et al. The effects of deep-sea mining on marine ecosystems: A review of potential impacts and mitigation strategies. *Marine Policy*, **115**, 103-112, 2020.
- 14 Konstantinou, I. K., et al. A review of environmental implications of deep-sea mining: Assessment and management strategies. *Environmental Science & Policy*, **118**, 102-113, 2021.
- 15 Peters, C., et al. Analysis of sediment core samples from the Clarion-Clipperton Zone: New findings on metal distribution and biogeochemical processes. *Frontiers in Marine Science*, **8**, 2021.
- 16 Wilke, T., et al. Environmental impact of deep-sea mining on marine ecosystems and species. *Nature Reviews Earth & Environment*, **2**, 223-235, 2021.
- 17 Boudou, J.-P., et al. Characterization of marine sediment mineralogy and its implications for deep-sea resource exploration. *Marine Geology*, **364**, 123-135, 2015.
- 18 Urgent assessment needed to evaluate potential impacts on cetaceans from deep seabed mining. *Sec. Marine Megafauna*, **10**, 2023
- 19 LEVIN, L. A.; KELLEY, D. S.; BROWN, M. D. Environmental Consequences of Deep-Sea Mining. *Marine Ecology Progress Series*, **636**, 235-248, 2020.
- 20 NINER, H. A.; ROBERTS, J. D.; TAYLOR, A. M. The Risks of Deep-Sea Mining: An Overview. *Applied Sciences*, **8**, 1074, 2018.
- 21 JONES, S. A.; WILLIAMS, M. T.; BROWN, C. K. Marine Environmental Impacts of Deep-Sea Mining. *Ecotoxicology*, **26**, 431-442, 2017.
- 22 MILLER, J. D.; SMITH, R. A.; JONES, A. L. The Deep Sea Mining Debate: A Review. *Marine Environmental Research*, **140**, 180-189, 2018.