

CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



## AVALIAÇÃO DE RISCO ECOLÓGICO DE METAIS TÓXICOS EM CASCALHOS PROVENIENTES DA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.9.26.V-005>

Luiza Loss \*, Matheus Cavali, Simone Kubeneck, Armando Borges de Castilhos Junior, Sebastião Roberto Soares

\* Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); luiza.loss@posgrad.ufsc.br

### RESUMO

Os cascalhos são resíduos sólidos gerados durante a perfuração de poços de petróleo e gás, cuja composição química pode incluir metais tóxicos com elevado potencial de contaminação ambiental. Entre os mais preocupantes estão o arsênio, o cádmio, o chumbo e o mercúrio, reconhecidos pela alta toxicidade, persistência e bioacumulação nos ecossistemas. Este estudo teve como objetivo avaliar o risco ecológico associado à presença desses metais em cascalhos de perfuração provenientes de diferentes regiões produtoras de petróleo e gás, por meio da aplicação de índices como o fator de contaminação, o fator de risco ecológico potencial individual e o índice de risco ecológico potencial. Os dados de concentração dos metais foram obtidos da literatura científica, abrangendo amostras de campos *onshore* da Tailândia, campos de gás de xisto na China, exploração de petróleo e gás no Chipre, campo *onshore* na Polônia e cascalhos de poço *onshore* em Alagoas, Brasil. Como referência, adotaram-se os valores de referência de qualidade para solos estabelecidos pela CETESB. Os resultados indicaram que o mercúrio foi o metal de maior risco ecológico potencial na maioria das amostras. A amostra brasileira destacou-se pelo elevado teor de arsênio. As amostras do Chipre e da Polônia também foram classificadas com risco muito alto, enquanto uma parte das amostras da China apresentaram risco alto e outra parte risco ecológico baixo. Os resultados reforçam a necessidade de avaliações regionalizadas e de maior sistematização no reporte de concentrações de metais tóxicos em cascalhos de perfuração, especialmente no contexto brasileiro.

**PALAVRAS-CHAVE:** Avaliação de risco, gerenciamento de resíduos, resíduos industriais, petróleo, cascalho de perfuração.

### ABSTRACT

Drill cuttings are solid waste generated during oil and gas well drilling, whose chemical composition may include toxic metals with high environmental contamination potential. Among the most concerning are arsenic, cadmium, lead, and mercury, recognized for their high toxicity, persistence, and bioaccumulation in ecosystems. This study aimed to assess the ecological risk associated with the presence of these metals in drill cuttings from different oil and gas producing regions, through the application of indices such as the contamination factor, the individual potential ecological risk factor, and the potential ecological risk index. Metal concentration data were obtained from the scientific literature, covering samples from onshore fields in Thailand, shale gas fields in China, oil and gas exploration in Cyprus, an onshore field in Poland, and onshore drill cuttings in Alagoas, Brazil. The soil quality reference values established by CETESB were adopted as background reference. Results indicated that mercury presented the highest potential ecological risk in most samples. The Brazilian sample stood out due to its elevated arsenic content. Samples from Cyprus and Poland were also classified as very high risk, while some samples from China presented high risk and others low ecological risk. The findings reinforce the need for regionalized risk assessments and greater systematization in reporting toxic metal concentrations in drill cuttings, especially in the Brazilian context.

**KEY WORDS:** Risk assessment, waste management, industrial waste, petroleum, drill cuttings.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



## INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás é responsável pela geração de grandes volumes de resíduos sólidos ao longo das operações de perfuração de poços. Entre esses resíduos, destacam-se os cascalhos de perfuração, fragmentos de rocha provenientes da formação geológica atravessada pela broca, que emergem à superfície carreados pelo fluido de perfuração em circulação (PEREIRA et al., 2022). A composição química dos cascalhos de perfuração é altamente variável e resulta da interação de dois fatores principais: a origem geológica da rocha perfurada e o tipo de fluido de perfuração utilizado (LOSS et al., 2026). Muitos metais são constituintes naturais das rochas e suas concentrações variam conforme a litologia e a profundidade do poço. Quanto ao fluido de perfuração, aditivos químicos introduzidos para controlar propriedades como densidade e viscosidade podem ser fontes adicionais de contaminação. A barita ( $\text{BaSO}_4$ ), amplamente utilizada como adensante, pode estar associada à presença de metais como chumbo, zinco, níquel e cromo nos cascalhos (DE AZEVEDO et al., 2025).

Entre os contaminantes de maior preocupação nos cascalhos de perfuração estão os metais tóxicos arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg), amplamente reportados na literatura científica e reconhecidos por sua alta toxicidade, persistência ambiental e capacidade de bioacumulação ao longo da cadeia trófica (CHEN et al., 2023). Em organismos aquáticos, os efeitos tóxicos desses metais são bem documentados: o Hg é neurotóxico, o Pb é danoso ao sistema imunológico e reprodutivo, o As induz estresse oxidativo e o Cd atua como desregulador endócrino (KOVACIK; HELCZMAN, 2025).

Apesar da relevância ambiental do tema, ainda são apresentadas lacunas importantes na literatura sobre os cascalhos de perfuração. A maioria dos estudos disponíveis concentra-se em regiões como Ásia e Europa, sendo escassos os trabalhos que reportam sistematicamente as concentrações dos quatro metais (As, Cd, Pb e Hg) em uma mesma amostra, de forma a permitir a aplicação integral de metodologias de avaliação de risco ecológico. No contexto brasileiro, essa lacuna é ainda mais evidente, comprometendo a construção de um panorama nacional de risco.

Nesse contexto, a avaliação de risco ecológico surge como uma ferramenta para subsidiar a gestão ambiental dos cascalhos de perfuração, permitindo, além dos valores de concentrações de metais, fornecer base para a definição de estratégias de tratamento, destinação e, inclusive, de regulamentação. A metodologia proposta por Hakanson (1980) é amplamente utilizada na literatura mundial por integrar concentrações dos metais, valores de referência e fatores de toxicidade de cada elemento, possibilitando análises comparativas entre diferentes regiões e rochas. Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar o risco ecológico associado à presença de As, Cd, Pb e Hg em cascalhos de perfuração provenientes de diferentes regiões produtoras de petróleo e gás, contribuindo para o conhecimento sobre o resíduo e para o desenvolvimento de práticas de gestão no setor petrolífero.

## OBJETIVOS

Avaliar os riscos ecológicos associados à presença dos metais tóxicos As, Cd, Pb e Hg em cascalhos de perfuração provenientes de diferentes regiões, por meio da aplicação dos índices estabelecidos na literatura mundial (fator de contaminação, fator de risco ecológico potencial individual e índice de risco ecológico potencial).

## METODOLOGIA

A identificação dos riscos ecológicos foi determinada em relação à composição dos cascalhos em função da presença e concentração de metais nesses resíduos. Para mensurar os referidos riscos, foram realizadas buscas nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* utilizando os termos *drill cuttings*, *drilling waste*, *oil well waste*, *crude oil*, *petroleum*, *heavy metals*, *risk assessment* e *characterization*, a fim de localizar artigos científicos que reportaram concentrações de metais presentes nos cascalhos de perfuração.

O risco ecológico referente às concentrações de metais presentes nos cascalhos foi determinado conforme a metodologia proposta por Hakanson (1980), por meio do cálculo sequencial de três índices: o fator de contaminação (CF), o fator de risco ecológico potencial individual (Er) e o índice de risco ecológico potencial (RI).

O CF é calculado pela razão entre a concentração do metal na amostra e o valor de referência, conforme a equação 1:

$$CF = C_{\text{amostra}} / C_{\text{referência}} \quad \text{equação (1)}$$



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



Onde  $CF < 1$  indica ausência de contaminação;  $1 \leq CF < 3$  indica contaminação moderada;  $3 \leq CF < 6$  indica contaminação significativa; e  $CF \geq 6$  indica contaminação muito alta.

O valor de referência corresponde à concentração natural do metal na crosta terrestre ou no solo local. Na ausência de valores de referência específicos para cascalhos de perfuração no Brasil, adotaram-se os valores de referência de qualidade (VRQ) para solos estabelecidos pela CETESB (2014), que representam as concentrações de substâncias químicas que caracterizam a qualidade natural dos solos.

O Er é determinado pela multiplicação do fator de resposta tóxica do metal (Tr) pelo CF, conforme a equação 2:

$$Er = Tr \times CF \quad \text{equação (2)}$$

Os fatores de resposta tóxica foram adotados como valores fixos ( $Hg = 40$ ,  $Cd = 30$ ,  $As = 10$  e  $Pb = 5$ ), correspondentes ao valor de referência BPI = 5,0 para sistemas aquáticos moderadamente eutróficos, conforme amplamente adotado na literatura científica. Os resultados do Er são interpretados de acordo com os seguintes intervalos:  $Er < 40$  indica risco baixo;  $40 \leq Er < 80$  indica risco moderado;  $80 \leq Er < 160$  indica risco considerável;  $160 \leq Er < 320$  indica risco alto; e  $Er \geq 320$  indica risco muito alto.

O RI é obtido pelo somatório dos fatores de risco ecológico individuais de todos os metais avaliados, conforme a equação 3:

$$RI = \sum Er \quad \text{equação (3)}$$

Os resultados do RI são interpretados conforme os seguintes intervalos:  $RI < 150$  indica risco ecológico baixo;  $150 \leq RI < 300$  indica risco moderado;  $300 \leq RI < 600$  indica risco considerável; e  $RI \geq 600$  indica risco muito alto.

Ao final, os resultados foram compilados em gráficos para permitir a visualização comparativa da avaliação de risco ecológico dos cascalhos provenientes das diferentes regiões produtoras de petróleo e gás analisadas. Os gráficos foram gerados no *Visual Studio Code*, por meio de códigos desenvolvidos em linguagem *Python*, com o auxílio das bibliotecas *pandas* e *matplotlib*.

## RESULTADOS

A avaliação de risco ecológico foi realizada com base em dados de concentração de As, Cd, Pb e Hg obtidos de dez amostras de cascalhos de perfuração provenientes de diferentes regiões. As amostras incluem cascalhos de campos de petróleo *onshore* da Tailândia (POYAI et al., 2020), campos de gás de xisto da China (HUANG et al., 2022; WANG et al., 2022; WANG; XIONG, 2021; XIONG et al., 2022), exploração de petróleo e gás no Chipre (KAZAMIAS; ZORPAS, 2021) e campos *onshore* na Polônia (MIKOS-SZYMAŃSKA et al., 2018) e no Brasil (FREITAS, 2013).

Em relação ao CF, o Hg destacou-se como o metal de maior preocupação na maioria das amostras. O As apresentou contaminação moderada na maioria das amostras. O Pb apresentou predominantemente ausência de contaminação ou contaminação moderada. O Cd apresentou ausência de contaminação ou contaminação moderada em todas as amostras, conforme Figura 1.

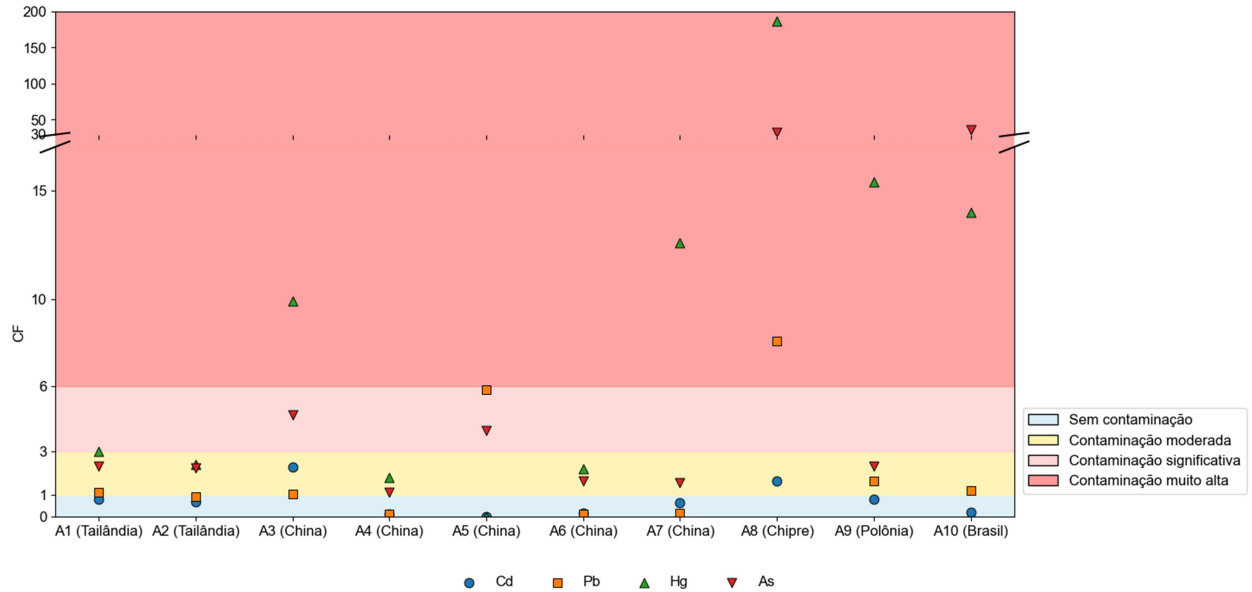
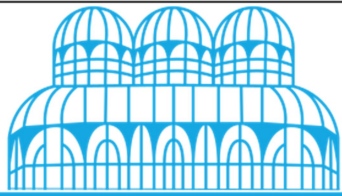


Figura 1: CF dos metais analisados nas diferentes amostras de cascalhos. Fonte: Autora do trabalho.

Quanto ao Er, o Hg foi o metal que apresentou os maiores valores em praticamente todas as amostras. O As também mostrou valores equivalentes ao risco muito alto. Os demais metais, Cd e Pb, apresentaram Er predominantemente classificados como risco baixo a moderado em todas as amostras, conforme Figura 2.

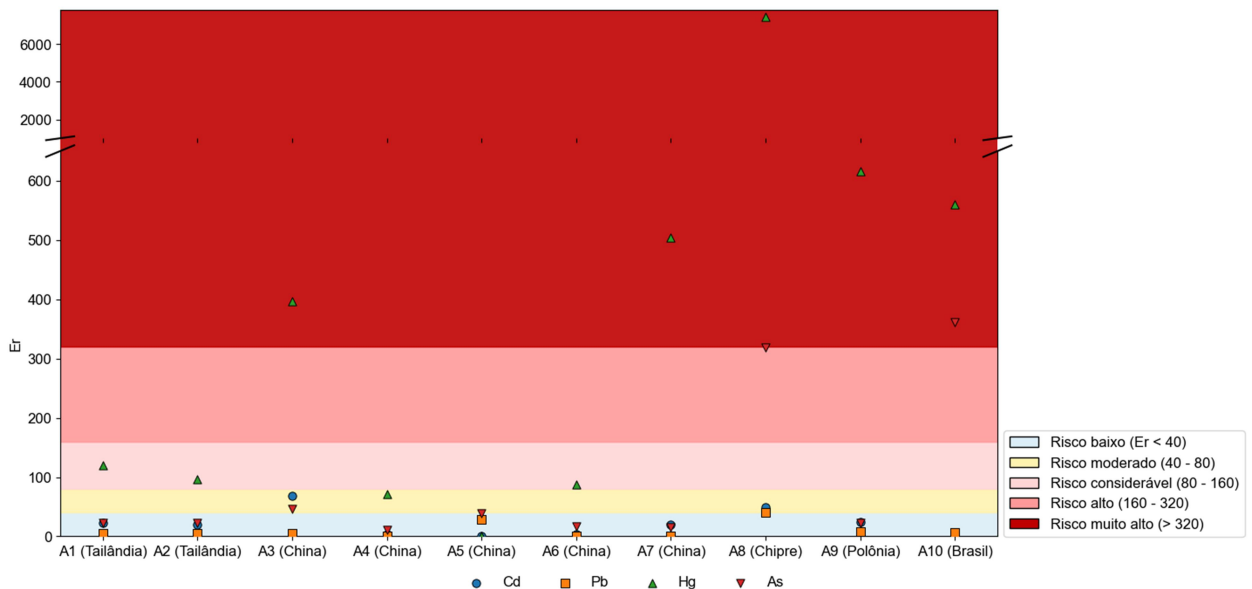
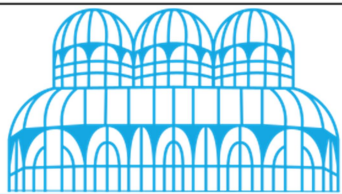


Figura 2: Er dos metais analisados nas diferentes amostras de cascalhos. Fonte: Autora do trabalho.

Em relação ao RI, a amostra do Chipre registrou o maior valor de toda a série, classificado como risco muito alto, evidenciando um nível de contaminação excepcionalmente elevado em relação às demais regiões. Os resultados demonstram que o Hg é o principal metal responsável pelo risco ecológico elevado nos cascalhos avaliados em praticamente todas as regiões analisadas, sendo determinante para a classificação final do RI (Figura 3).



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

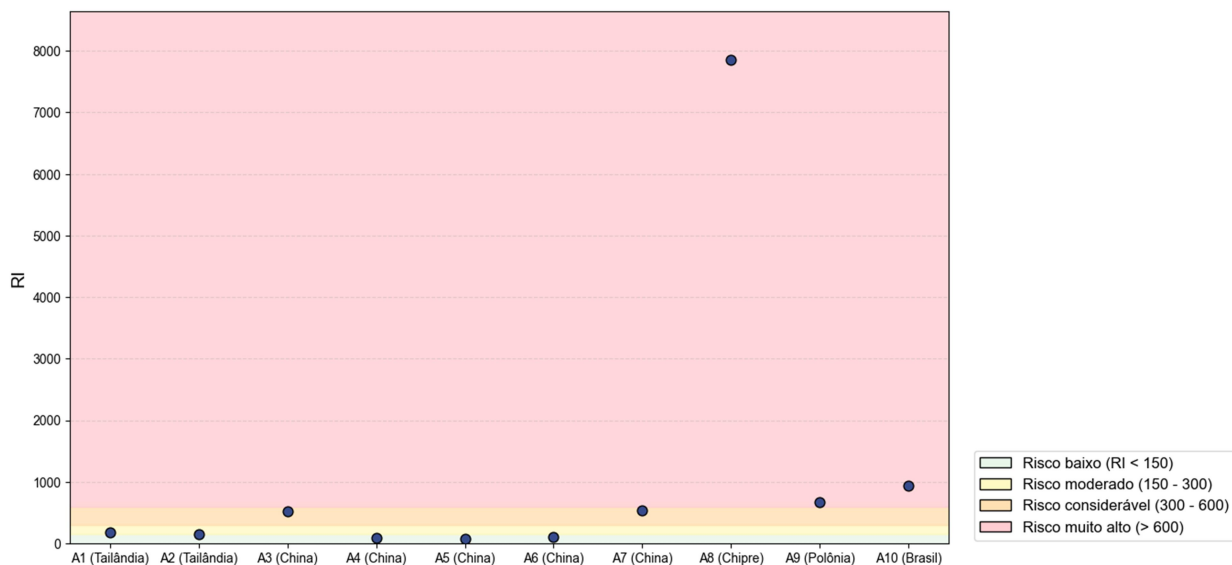


Figura 3: RI dos metais analisados nas diferentes amostras de cascalhos. Fonte: Autora do trabalho.

A análise comparativa entre as amostras permite identificar padrões importantes. As duas amostras da Tailândia ilustram bem a sensibilidade do índice RI à concentração de mercúrio: a amostra 1 foi classificada com risco moderado (RI = 172), impulsionada pelo Er considerável do Hg (Er = 120), com concentração de 0,15 mg/kg. A amostra 2, com concentração de Hg ligeiramente inferior (0,12 mg/kg), resultou em RI = 143, classificado como risco baixo. Essa diferença de apenas 0,03 mg/kg de Hg foi suficiente para alterar a classificação do risco ecológico, evidenciando a alta sensibilidade do índice a variações nas concentrações desse metal, o que se deve diretamente ao seu elevado fator de resposta tóxica (Tr = 40). Ressalta-se ainda que a amostra 1 apresentou concentrações superiores de Pb e As em relação à amostra 2, contribuindo adicionalmente para o RI mais elevado.

As cinco amostras provenientes de campos de gás de xisto da China (amostras 3 a 7) apresentaram variação expressiva nos resultados. As amostras com concentrações de Hg de 0,49 mg/kg e 0,63 mg/kg resultaram em RI de 517 e 539, respectivamente, classificadas como risco considerável. As demais três amostras chinesas apresentaram RI abaixo de 110, enquadrando-se na categoria de risco baixo. Essa variabilidade dentro de uma mesma região geográfica sugere heterogeneidade nas formações geológicas ou nas práticas de perfuração entre os diferentes campos estudados, reforçando a importância de avaliações amostrais representativas.

As amostras do Chipre (amostra 8), da Polônia (amostra 9) e do Brasil (amostra 10) foram as mais preocupantes, com RI superior a 600 nas três, classificadas como risco muito alto. A amostra do Chipre destacou-se pelos valores excepcionalmente elevados de Pb (137 mg/kg), Hg (9,3 mg/kg) e As (111,4 mg/kg). As amostras da Polônia (RI = 671) e do Brasil (RI = 933) apresentaram perfis de concentração relativamente semelhantes para Cd (0,4 e 0,1 mg/kg), Pb (28,1 e 20,2 mg/kg) e Hg (0,77 e 0,7 mg/kg). A principal distinção entre elas reside na concentração de As, que na amostra brasileira atingiu 126,7 mg/kg, valor consideravelmente superior ao observado na amostra polonesa (8,1 mg/kg), sendo o principal fator responsável pelo RI significativamente mais elevado do Brasil em relação à Polônia. Essa concentração elevada de arsênio na amostra brasileira é notável, porém a literatura de origem não apresenta discussão acerca das possíveis causas desse teor, o que pode estar relacionado à geologia local da formação perfurada ou a aditivos do fluido de perfuração utilizados. Essa lacuna reforça a necessidade de estudos mais detalhados sobre a composição dos cascalhos de perfuração no contexto brasileiro.

## CONCLUSÕES

A aplicação dos índices propostos por Hakanson (1980) aos cascalhos de perfuração de diferentes regiões permitiu identificar o Hg como o metal de maior risco ecológico potencial entre os quatro metais avaliados, sendo o principal fator determinante do RI em praticamente todas as amostras analisadas. As amostras do Chipre, da Polônia e do Brasil apresentaram risco muito alto, enquanto amostras de campos de gás de xisto na China apresentaram risco considerável.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



As amostras da Tailândia e das demais regiões chinesas apresentaram risco ecológico baixo a moderado, indicando variações significativas no perfil de contaminação entre as diferentes regiões analisadas.

Os resultados reforçam a necessidade de avaliações de risco ecológico regionalizadas como ferramenta de suporte à gestão adequada dos cascalhos de perfuração. Recomenda-se ampliar o banco de dados com amostras de regiões da América do Norte e Oriente Médio, bem como estudos futuros que reportem as concentrações de As, Cd, Hg e Pb, viabilizando análises comparativas globais e contribuindo para o desenvolvimento de regulamentações voltadas à mitigação dos impactos ambientais da exploração de petróleo e gás.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Chen, X.; et al. **Oil-based drilling cuttings pyrolysis residues at a typical shale gas drilling field in Chongqing: pollution characteristics and environmental risk assessment.** *Environmental Geochemistry and Health*, v. 45, n. 6, p. 2949–2962, 2023.
2. De Azevedo, P. C. C.; et al. **Chemical fractionation and risk assessment of metals in drill cuttings from onshore and offshore oil and gas wells.** *Marine Pollution Bulletin*, v. 213, p. 117635, 2025.
3. Freitas, F. C. **Caracterização química de cascalhos de perfuração de poços de petróleo e seus efeitos em plantas e nas bases trocáveis do solo.** 135 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) – Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.
4. Hakanson, L. **An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach.** *Water Research*, v. 14, n. 8, p. 975–1001, 1980.
5. Huang, Q.; et al. **Utilizing shale gas drilling cuttings as admixture in cement mortars: a case study in Fuling, Chongqing, China.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 16, p. 24362–24369, 2022.
6. Kazamias, G.; Zorpas, A. A. **Drill cuttings waste management from oil & gas exploitation industries through end-of-waste criteria in the framework of circular economy strategy.** *Journal of Cleaner Production*, v. 322, p. 129098, 2021.
7. Kovacik, A.; Helezman, M. **Effects of arsenic, cadmium, lead and mercury on the physiological state of freshwater fish family Cyprinidae: a systematic review.** *Environmental Pollutants and Bioavailability*, v. 37, n. 1, p. 2522277, 2025.
8. Loss, L.; et al. **Environmental aspects of drill cuttings from oil operations: characterization, risk assessment, valorization, and treatment innovations.** *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 23, n. 4, p. 307, 2026.
9. Mikos-Szymańska, M.; et al. **Characterization of drilling waste from shale gas exploration in Central and Eastern Poland.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, n. 36, p. 35990–36001, 2018.
10. Pereira, L. B.; et al. **Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review.** *Fuel*, v. 310, p. 122301, 2022.
11. Poyai, T.; et al. **Solvent-based washing as a treatment alternative for onshore petroleum drill cuttings in Thailand.** *Science of the Total Environment*, v. 718, p. 137384, 2020.
12. Wang, C. Q.; et al. **Pozzolanic activity and environmental risk assessment of water-based drilling cuttings of shale gas.** *Construction and Building Materials*, v. 348, p. 128657, 2022.
13. Wang, C. Q.; Xiong, D. M. **Leaching assessment of aerated concrete made of recycled shale gas drilling cuttings: particular pollutants, physical performance and environmental characterization.** *Journal of Cleaner Production*, v. 282, p. 125099, 2021.
14. Xiong, D. M.; et al. **Study on environment-friendly disposal and utilization of oil-based drilling cuttings solidified body of shale gas.** *Construction and Building Materials*, v. 327, p. 127043, 2022.