INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE CORTE DE ROCHAS ORNAMENTAIS NA TOXICIDADE DOS RESÍDUOS GERADOS

Jéssica Dutra Ferreira, Ingrid Lins Noé, Karoline Campi, Mirna Aparecida Neves, Cristiane dos Santos Vergilio

Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, SN, Guararema - 29500-000, Alegre-ES, Brasil, jessicadutra017@gmail.com, ingridlnoe@gmail.com, karolinecampi@gmail.com, mirna.neves@ufes.br, cristiane.vergilio@ufes.br

Resumo
A indústria de rochas ornamentais gera grandes volumes de resíduos durante o beneficiamento, cuja composição pode variar conforme o processo de corte empregado. Este estudo avaliou a influência dos cortes em tear convencional e multifios na toxicidade dos resíduos, utilizando ensaios ecotoxicológicos com diferentes organismos-teste. A caracterização química evidenciou maior concentração de Fe_2O_3 nos resíduos do corte convencional, enquanto Ca e Mg predominaram nos extratos de ambos os processos. *D. similis* apresentou toxicidade aguda apenas para o resíduo do tear convencional, enquanto *C. dubia* apresentou efeitos crônicos (redução da prole) após a exposição aos dois tipos de resíduos, sendo mais pronunciado no tear convencional. Ensaios com a microalga *R. subcapitata* também demonstraram toxicidade crônica (inibição do crescimento) em ambos os resíduos. Os resultados demonstram que o processo de corte pode influenciar nas características químicas e no potencial tóxico dos resíduos e reforçam a importância da utilização de diferentes organismos-teste para uma avaliação mais abrangente dos riscos ambientais associados a esses materiais.
Palavras-chave: Tear convencional. Tear multifios. Mármore. Granito.

Área do Conhecimento: Ciências biológicas - Biologia geral.

Introdução

A indústria de rochas ornamentais apresenta crescimento expressivo no cenário internacional e o Brasil ocupa posição de destaque, estando entre os maiores exportadores mundiais (Abirochas, 2021). Apesar da importância econômica do setor, a atividade contribui para o aumento da geração de resíduos sólidos finos. O beneficiamento envolve, principalmente, as etapas de serragem e polimento e estima-se que cerca de 30% do volume dos blocos beneficiados seja convertido em resíduos, sendo um grande problema ambiental para o setor (Braga *et al*., 2010; Moreira *et al*, 2024).

O corte dos blocos rochosos constitui uma das principais fontes de resíduos e pode ser realizado por diferentes tecnologias, destacando-se os teares multilâminas (convencional) e multifios (fios diamantados). Na serragem convencional são utilizadas lâminas metálicas e insumos como água, granalha de aço e cal para promover o resfriamento e auxiliar no corte, podendo contribuir para a incorporação de partículas metálicas e outros componentes ao resíduo gerado. Já o corte multifios utiliza fios diamantados, que tem como insumo, predominantemente, água, possibilitando a serragem dos blocos com menor utilização de insumos e gerando resíduos com características distintas (Chiodi Filho, 2023; Freitas *et al*., 2022; Neves *et al*., 2025; Santos; Destefani; Holanda, 2013).

Essas diferenças nos sistemas de corte podem influenciar a composição e as características dos resíduos e, consequentemente, seu potencial de interação com os compartimentos ambientais. Embora a caracterização físico-química seja importante para identificar os constituintes presentes, ela não permite, isoladamente, determinar os efeitos desses materiais sobre os organismos vivos. Nesse contexto, os ensaios ecotoxicológicos constituem uma ferramenta complementar para avaliar os efeitos biológicos associados aos resíduos, permitindo identificar os efeitos da exposição sobre organismos representativos de diferentes níveis tróficos e fornecendo informações importantes para a avaliação dos riscos ambientais relacionados à disposição desses materiais (Van Der Oost; Beyer; Vermeulen, 2003). Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a influência dos processos de corte em tear convencional e multifios na toxicidade de resíduos de rochas ornamentais, utilizando indicadores aquáticos de diferentes níveis tróficos.

Metodologia

A coleta dos resíduos foi realizada em diferentes empresas do setor de rochas ornamentais situadas no sul do Espírito Santo, seguindo os procedimentos estabelecidos pela normativa ABNT NBR 10007:2004 (ABNT, 2004a). Foram coletadas amostras em teares de corte convencional (CONV) e teares de multifios (MULT).

Os extratos de solubilização foram preparados conforme a ABNT NBR 10006 (ABNT, 2004b), na proporção de 1:4, utilizando água destilada (para análises geoquímicas), meio LC Oligo (para ensaios com *R. subcapitata*) ou meio MS (para ensaios com *D. similis* e *C. dubia*). As amostras foram submetidas à agitação em baixa velocidade por 5 minutos, seguida de repouso por 7 dias. Após esse período, uma alíquota do sobrenadante foi utilizada, sem filtração, nos ensaios biológicos e uma segunda alíquota foi filtrada em membrana de 0,45 µm, conforme especificado na norma ABNT NBR 10006 (ABNT, 2004b), para análises geoquímicas.

A composição química total foi determinada por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX). As amostras brutas foram secas a 42 °C, homogeneizadas e fundidas com tetraborato de lítio e carbonato de lítio, na proporção de 9 g e 1,5 g, respectivamente, para cada 1 g de amostra, a aproximadamente 1300 °C durante 17 minutos. Os resultados foram expressos em porcentagem em massa dos seguintes óxidos: dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3:), óxido de ferro(III) (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), óxido de sódio (Na_2O), óxido de potássio (K_2O), dióxido de titânio (TiO_2), óxido de manganês (II) (MnO), trióxido de enxofre (SO_3); pentóxido de fósforo (P_2O_5), óxido de estrôncio (SrO); dióxido de zircônio (ZrO_2), óxido de bário (BaO), óxido de zinco (ZnO). A perda ao fogo (PF) foi determinada pela perda de massa após calcinação a 1100 °C.

As amostras filtradas foram submetidas à digestão ácida com ácido nítrico (HNO_3) a 65% e, posteriormente, analisadas por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) para determinação dos elementos-traço A Alumínio (Al); Bário (Ba); Cádmio (Cd); Cálcio (Ca); Cobalto (Co); Cobre (Cu); Cromo (Cr); Chumbo (Pb); Ferro (Fe); Magnésio (Mg); Manganês (Mn); Níquel (Ni); Titânio (Ti); Zinco (Zn). As concentrações determinadas foram expressas em mg/L e valores abaixo do limite de detecção do método analítico foram registrados como AD.

O ensaio de toxicidade aguda com *Daphnia similis* foi realizado conforme a ABNT NBR 12713 (ABNT, 2016), com quatro réplicas de cinco neonatos de 6 a 24 h de idade, totalizando 20 organismos. Os organismos foram expostos a 10 mL do extrato solubilizado por 48 h, em condições estáticas, a 20 ± 2 °C, no escuro e sem alimentação. O controle foi mantido em meio MS e, ao final da exposição, foi avaliada a imobilidade dos organismos. O ensaio foi considerado válido quando a imobilidade no controle não excedeu 10%.

O ensaio de toxicidade crônica com *Ceriodaphnia dubia* foi realizado conforme a ABNT NBR 13373 (ABNT, 2017), utilizando 10 réplicas com um neonato de até 24 h de idade cada. Os organismos foram expostos a 15 mL do extrato solubilizado por 7 dias, a 20 ± 2 °C, com renovação das soluções a cada 2 dias e alimentação diária. O controle foi mantido em meio MS. Ao final do período de exposição, foi determinado o número de neonatos produzidos. O ensaio foi considerado válido quando a letalidade no controle não excedeu 20% e a produção média de organismos jovens foi igual ou superior a 15.

O teste de inibição do crescimento com *Raphidocelis subcapitata* foi realizado conforme a ABNT NBR 12648 (ABNT, 2018), com adaptação para tubos de ensaio. Foram utilizadas dez réplicas para o controle (meio LC Oligo) e para os extratos solubilizados, com concentração inicial de 1×10^4 células/mL. Os tubos foram mantidos sob agitação contínua e iluminação fluorescente branca, a 24 °C, durante 96 horas. Ao final, a densidade celular foi determinada por contagem em câmara de Neubauer, utilizando microscópio óptico com objetiva de 100×.

Inicialmente, os ensaios foram realizados com amostras individuais, preservando as características específicas de cada material. Posteriormente, os resultados foram agrupados para a análise comparativa entre os tratamentos. Os dados foram submetidos à Análise de Variância (One-Way ANOVA), seguida do teste de Tukey, considerando nível de significância de 5%. Os cálculos e gráficos foram realizados no software GraphPad Prism.

Resultados

A composição química predominante das amostras analisadas foi representada por dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (III) (Fe_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio

(MgO), óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O) (Tabela 1). Dentre eles, o Fe_2O_3 apresentou concentrações mais elevadas nos resíduos provenientes da serragem em tear convencional. Entre os elementos analisados nos extratos solubilizados, o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) apresentaram as maiores concentrações para os dois tipos de corte (Tabela 2).

Tabela 1 - Composição química total (%) de amostras de resíduos de corte de rochas ornamentais determinada por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX).

Corte	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	MnO	SO_3	P_2O_5	SrO	ZrO_2	BaO	ZnO	PF
CONV	50,2	11,29	23,63	4,75	1,41	2,79	3,44	1,06	0,22	0,16	0,33	0,04	0,03	0	0	0,54
MULT	59,3	13,5	9,85	4,96	3,04	2,85	3,29	1,53	0,13	0,22	0,69	0,07	0,16	0,07	0,01	0,3

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

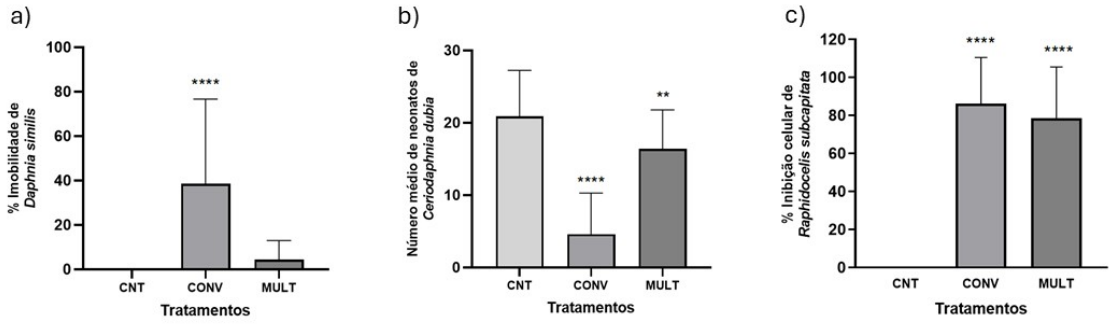
Tabela 2 - Concentração de elementos químicos (mg/L) nos extratos solubilizados das amostras de corte de rochas ornamentais determinado por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Corte	Al	Fe	Mn	Ba	Ca	Mg	Ti	Cr	Co	Cu	Cd	Ni	Zn	Pb
CONV	0,3	0,2	0,0	0,0	6,05	0,34	0,09	AD	AD	AD	AD	AD	AD	AD
MULT	0,4	0,1	0,0	0,0	13,63	6,56	0,01	AD	AD	AD	AD	AD	AD	AD

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Os ensaios ecotoxicológicos evidenciaram respostas distintas entre os bioindicadores aquáticos e os processos de corte avaliados (Figura 1). O ensaio de toxicidade aguda com *Daphnia similis* (Fig. 1a) indicou toxicidade apenas para os resíduos provenientes do corte convencional. Para *Ceriodaphnia dubia*, foram observados efeitos crônicos em ambos os tipos de resíduos, porém com maior intensidade no material proveniente do corte convencional (Fig. 1b). Já o ensaio de inibição do crescimento com *Raphidocelis subcapitata* evidenciou inibição significativa para os resíduos de ambos os processos de corte (Fig. 1c).

Figura 1 – Porcentagem de imobilidade de *Daphnia simlis* (a), número médio de neonatos produzidos por *Ceriodaphnia dúbia* (b) e porcentagem de inibição celular de *Raphidocelis subcapitata* (c) após a exposição aos resíduos de corte de rochas ornamentais. As diferenças significativas entre os tratamentos foram determinadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ** $p < 0,01$; **** $p < 0,0001$.



Fonte: Os autores (2026).

Discussão

A composição química dos resíduos refletiu a natureza das rochas processadas e as características das etapas de beneficiamento. Os resíduos gerados na serragem em tear convencional apresentaram maior concentração de Fe_2O_3 (Tabela 1), característica que pode estar associada ao emprego de granalha de aço durante o corte (Moreira *et al*., 2024; Neves; Raymundo, 2022). Nos extratos solubilizados, Ca e Mg foram os elementos predominantes em ambos os tipos de corte (Tabela 2). Essa composição pode estar relacionada à mineralogia das rochas processadas, uma vez que rochas carbonáticas, como os mármores, são caracterizadas pela maior presença de Ca e Mg (Neves; Raymundo, 2022), o que pode contribuir para os valores elevados desses elementos observados nos extratos.

Os resultados dos ensaios ecotoxicológicos evidenciaram respostas distintas entre os organismos avaliados e os processos de corte, com maior toxicidade associada aos resíduos provenientes do tear convencional (Figura 1). No ensaio de toxicidade aguda com *Daphnia similis*, foi observada toxicidade apenas para os resíduos do corte convencional. Esse efeito pode estar relacionado ao enriquecimento dos resíduos com Fe e outros elementos biodisponíveis, decorrente do uso de granalha de aço nesse tipo de corte (Moreira *et al*., 2024; Neves; Raymundo, 2022). A liberação desses componentes no meio aquoso pode aumentar sua disponibilidade para os organismos, resultando em efeitos adversos como a imobilidade observada. Entretanto, essa associação deve ser interpretada com cautela, uma vez que a toxicidade pode resultar da ação conjunta de diferentes constituintes presentes nos resíduos e de suas interações no meio aquoso, e não necessariamente da ação isolada do Fe.

No ensaio de toxicidade crônica com *Ceriodaphnia dubia*, foram observados efeitos crônicos nos dois tipos de resíduos, porém mais evidente no corte convencional. A redução na reprodução evidencia a ocorrência de efeitos subletais associados à exposição prolongada aos resíduos e ocorrência de efeitos também no resíduo proveniente do corte multifios demonstra que a ausência de granalha de aço nesse processo não elimina o potencial ecotoxicológico do material, indicando que outros constituintes presentes nos resíduos podem contribuir para os efeitos observados. Alterações nos parâmetros reprodutivos podem ocorrer mesmo na ausência de mortalidade significativa, refletindo interferências fisiológicas decorrentes da exposição prolongada a contaminantes (Magalhães, 2014), além disso, parâmetros reprodutivos e o tempo necessário para a produção da prole inicial em cladóceros constituem indicadores sensíveis de estresse ambiental (Stewart *et al*., 1998). Assim, os resultados obtidos reforçam a importância da exposição crônica na identificação de alterações que podem não ser observadas em períodos mais curtos e da utilização de diferentes abordagens ecotoxicológicas na avaliação dos riscos associados aos resíduos de rochas ornamentais.

O ensaio *com Raphidocelis subcapitata* apresentou uma resposta distinta, com inibição significativa do crescimento nos resíduos provenientes de ambos os processos de corte. A intensidade do efeito dificultou a diferenciação das respostas entre os tratamentos. Embora as microalgas sejam amplamente utilizadas na avaliação ecotoxicológica, sua resposta pode ser influenciada por diferentes características físicas e químicas da matriz, como pH, disponibilidade de nutrientes e presença de diferentes substâncias, que podem modificar tanto o crescimento quanto a sensibilidade aos contaminantes. Além disso, microalgas podem apresentar limitações na avaliação de matrizes complexas, nas quais diferentes constituintes podem atuar simultaneamente sobre os organismos (Diogo *et al*., 2023). Além disso, a elevada inibição pode estar relacionada não apenas à composição química dos resíduos, mas também à presença de partículas finas em suspensão no extrato, uma vez que as amostras não foram filtradas antes da exposição. Essas partículas podem reduzir a penetração da luz no meio e, consequentemente, interferir na atividade fotossintética e no crescimento das microalgas. Considerando que as partículas provenientes dos resíduos podem ser carreadas para corpos d'água pode ocorrer o aumento da turbidez e redução da disponibilidade de luz na coluna d'água, afetando potencialmente organismos fotossintetizantes (Liu *et al*., 2013; Venturoti *et al*., 2019). Dessa forma, no presente estudo, embora *R. subcapitata* tenha apresentado elevada sensibilidade aos resíduos, a intensidade da inibição observada em ambos os tratamentos dificultou a identificação de diferenças relacionadas ao processo de corte. Esse resultado reforça a importância da utilização de diferentes organismos-teste na avaliação ecotoxicológica, uma vez que respostas distintas podem fornecer informações complementares sobre os efeitos dos resíduos.

Em conjunto, os resultados demonstram diferenças entre os resíduos provenientes de diferentes tipos de corte tanto nas suas características químicas quanto nas suas respostas biológicas. De forma geral, os resíduos provenientes do corte convencional apresentaram maior toxicidade, entretanto, a ocorrência de efeitos biológicos também nos resíduos do corte multifios evidencia que a toxicidade não pode ser atribuída a um único constituinte. A integração dos dados de caracterização e dos ensaios ecotoxicológicos, portanto, permite uma avaliação mais abrangente do potencial de risco desses resíduos, demonstrando que sua composição química, o processo de beneficiamento e a resposta dos organismos devem ser considerados conjuntamente.

Conclusão

Os resultados demonstraram que o processo de corte influenciou as características químicas e o potencial ecotoxicológico dos resíduos de rochas ornamentais, com maior toxicidade, de modo geral, associada aos resíduos provenientes do corte convencional. Entretanto, a ocorrência de efeitos também nos resíduos multifios evidencia que a ausência de granalha de aço não elimina seu potencial tóxico.

Entre os organismos avaliados, *Daphnia similis* e *Ceriodaphnia dubia* apresentaram respostas capazes de evidenciar diferenças entre os processos de corte, enquanto *Raphidocelis subcapitata* apresentou elevada inibição do crescimento em ambos os resíduos, dificultando a diferenciação entre os tratamentos. Dessa forma, *R. subcapitata* apresentou menor capacidade de evidenciar diferenças relacionadas ao processo de corte nas condições avaliadas, reforçando a importância da utilização de diferentes organismos-teste e da integração entre a caracterização química e os ensaios ecotoxicológicos para uma avaliação mais abrangente do potencial de risco desses resíduos.

Como perspectiva para estudos futuros, destaca-se a necessidade de investigar a contribuição do material particulado para a elevada inibição observada em *R. subcapitata*, especialmente quanto à possível redução da disponibilidade de luz no meio. Também seria relevante aprofundar a relação entre a composição dos resíduos e os efeitos observados nos organismos-teste, considerando a possível contribuição conjunta de seus diferentes constituintes. Essas abordagens poderão contribuir para uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos na toxicidade dos resíduos e de seu potencial de risco ambiental.

Referências

ABIROCHAS – Associação Brasileira Da Indústria De Rochas Ornamentais. **Cenário Mundial**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/01/Cenario-Mundial-2021.pdf. Acesso em: 30 jun. 2026

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 12713: 2016. Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda - Método de ensaio com Daphnia spp (Crustacea, Cladocera). 27p. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 13373:2017. Ecotoxicologia aquática – Toxicidade crônica - Método de ensaio com Ceriodaphnia spp (Crustacea, Cladocera). 27p. Rio de Janeiro, 2017.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR 10004:2004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 10007:2004 - Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2004). NBR 10006:2004 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

BRAGA, Florindo dos Santos *et al.* Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, p. 237–244, 2010.

CHIODI FILHO, Cid. Mineração Brasileira deve Retomar Crescimento. **Brasil Mineral**, São Paulo, v. 426, p. 90–93, 2023.

DIOGO, B. S. *et al*. Are the ecotoxicological tools viable to evaluate the effectiveness of wastewater treatment plant effluents?. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 11, p. 11943-11962, 2023. DOI:10.1007/s13762-023-04791-2.

FREITAS, Lilian Gabriella Batista Gonçalves *et al.* Quality of soil under deposits of dimension stone processing wastes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 5, p. 883–891, 2022. DOI: 10.1590/S1413-415220210271.

LIU, Chunguang *et al.* Effects of suspended particles on the growth of two dominant phytoplankton species of Bohai Bay, China. **Marine pollution bulletin**, v. 74, n. 1, p. 220-224, 2013. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.06.054.

MAGALHÃES, Danielly de Paiva. **Avaliação química e ecotoxicológica para seleção de bioensaios aquáticos sensíveis a efluentes contendo metais**. 2014. 169 f. Tese (Doutorado em Química Ambiental) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: https://www.bdtd.uerj.br:8443/bitstream/1/15633/1/Danielly%20de%20Paiva%20Magalhaes.pdf Acesso em: 24 ago. 2026.

MOREIRA, Beatriz Carvalheira *et al.* Características físicas, químicas e eletrorresistividade em depósitos de resíduos finos do beneficiamento de rochas ornamentais. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 11, n. 27, p. 243–254, 2024. DOI: 10.21438/rbgas(2024)112716.

NEVES, Mirna Aparecida *et al.* Chemical and mineralogical composition of different particle size fractions of fines from dimension stone processing. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 11, n. 1, p. 560–572, 2025. DOI:10.21680/2447-3359.2025v11n1ID37711.

NEVES, Mirna Aparecida; RAYMUNDO, Valerio. Deposits of fine wastes from dimension stone processing and quality of the phreatic aquifer. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 257–267, 2022.

SANTOS, Max M. Aguiar; DESTEFANI, André Zoteli; HOLANDA, José Nilson França de. Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 18, n. 4, p. 1442–1450, 2013.

STEWART, Arthur J.; KONETSKY, Belinda K. Longevity and reproduction of Ceriodaphnia dubia in receiving waters. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 17, n. 6, p. 1165-1171, 1998. DOI: 10.1002/etc.5620170625.

VAN DER OOST, Ron; BEYER, Jonny; VERMEULEN, Nico P.E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 13, n. 2, p. 57-149, 2003. DOI: 10.1016/S1382-6689(02)00126-6.

VENTUROTI, Graciele Petarli *et al.* Geophagus brasiliensis (Teleostei: Cichlidae) as an indicator of toxicity of ornamental stone processing wastes. **Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology**, [*s. l.*], vol. 226, p. 108639, 2019. DOI: 10.1016/j.cbpc.2019.108639.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).