

CIRCULAR TÉCNICA

56

Planaltina, DF  
Dezembro/2023

# Orientações para avaliação da periculosidade ambiental de remineralizadores de solos sobre organismos terrestres e aquáticos

Eduardo Cyrino Oliveira Filho  
Cintia Carla Niva  
Eder de Souza Martins

OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

6 ÁGUA POTÁVEL E SANEAMENTO



OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

15 VIDA TERRESTRE



# Orientações para avaliação da periculosidade ambiental de remineralizadores de solos sobre organismos terrestres e aquáticos<sup>1</sup>

## Remineralizadores de solos

Os agrominerais silicáticos são constituídos por materiais inorgânicos derivados de rochas silicáticas com potencial para intemperização na escala de tempo agrônômica, apresentando teores consideráveis de K, Ca, Mg, Si e outros nutrientes. Suas propriedades, após processos de beneficiamento mineral, os habilitam para uso no manejo da fertilidade do solo. Os agrominerais silicáticos, após transformações de cominuição que constituem processos de diminuição de tamanho de partículas, são considerados remineralizadores de solos (REM), desde que cumpram os critérios definidos pela Instrução Normativa nº 5/2016 do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) (Brasil, 2016), que regulamentou a Lei nº 12.890 (Brasil, 2013).

Os REM melhoram a qualidade do solo e fornecem nutrientes para a microbiota e para as plantas cultivadas (Ribeiro et al., 2020; Sousa et al., 2021; Swoboda et al., 2022). Cinco tipos de rochas têm a possibilidade de se transformar em REM: magnesianas (ex.: dunito, piroxenito, serpentinito); cálcicas (ex.: calcissilicáticas, anortositos); cálcio-magnesianas (ex.: basaltos, diabásios, gabros, anfíbolitos); potássicas (ex.: rochas alcalinas, rochas ricas em biotita); e cálcio-magnésio-potássicas (ex.: kama fugitos, olivina melilitito), sendo de abrangência nacional (Martins et al., 2023b). Os REM são comercializados em países de clima temperado em nichos de mercado, sendo utilizados na produção orgânica e agricultura regenerativa (Brasil, 2021). Por ou-

---

<sup>1</sup> Eduardo Cyrino Oliveira Filho, biólogo, doutor em Saúde Pública na Área de Toxicologia e Saúde, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. Cintia Carla Niva, bióloga, doutora em Molecular Science, pesquisadora da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF. Eder de Souza Martins, geógrafo, doutor em Geologia, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

tro lado, o consumo de REM alcançou mais de 7 milhões de toneladas entre 2019 e 2022 no Brasil, sendo mais diversificado e aplicado com o objetivo de diminuir os custos de fertilização do solo em sistemas de produção intensiva (Martins et al., 2023a).

Uma atenção especial deve ser dada à potencial presença de contaminantes nos produtos utilizados, particularmente aos metais pesados tóxicos.

Além disso, dependendo da rocha de origem e quantidade, o REM pode alterar o pH do solo e a quantidade de sais, bem como a textura do solo (Swoboda et al., 2022). Essas condições podem interferir na qualidade do habitat da diversidade animal que vive no solo, como minhocas e inúmeros invertebrados importantes para a ciclagem de nutrientes.

A Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016, do Ministério da Agricultura e Pecuária (Brasil, 2016), estabelece regras para o registro de remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, incluindo teores mínimos para nutrientes e máximos para alguns metais considerados tóxicos, como arsênio, cádmio, mercúrio e chumbo.

As análises descritas nesta Instrução Normativa não levam em consideração a toxicidade dos elementos presentes nesses insumos aos seres vivos presentes nos diferentes ambientes.

Os elementos potencialmente tóxicos (EPT) podem ser definidos como aqueles que apresentam limites máximos de biodisponibilidade no ambiente, a partir dos quais impactam negativamente o desenvolvimento da biota. Os EPT podem ser, do ponto de vista geoquímico, um elemento maior, como é o caso do alumínio, ocorrendo em porcentagem na crosta terrestre, ou um elemento traço, em  $\text{mg kg}^{-1}$  ou  $\mu\text{g kg}^{-1}$ , como metais e metaloides, como cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), mercúrio (Hg) e arsênio (As), entre outros (Pourret; Hursthouse, 2019).

A utilização de ensaios utilizando organismos oferece informações importantes sobre o perigo de uso dos remineralizadores. Prezando pela sustentabilidade agrícola, o uso de remineralizadores deve ser seguro ao meio ambiente, especialmente se o seu uso não causar efeitos deletérios sobre organismos não alvo.

## Elementos potencialmente tóxicos

Existem diferentes fontes de elementos potencialmente perigosos (EPT) no ambiente (Tang, 2021), tanto de origem natural quanto antrópica. Entre as fontes naturais, destacam-se todas as rochas, que são materiais de origem de solos (Bradl, 2005). As fontes antrópicas são geradas por atividades humanas, como a produção industrial e as atividades de mineração e urbanas (Rahman; Singh, 2019).

Em certas regiões, ocorrem concentrações naturalmente elevadas de metais nas rochas e nos solos derivados (Galuszka et al., 2014). As atividades de mineração e uma série de processos industriais envolvendo metais são algumas das principais fontes pontuais pelas quais esses elementos podem ser liberados no ambiente (Bjerregaard et al., 2022).

Os minerais formadores de rochas na crosta terrestre são principalmente compostos por aluminossilicatos e carbonatos com diversas proporções de bases, além de minerais acessórios na forma de óxidos (Bradl, 2005). O alumínio torna-se biodisponível apenas em condições ácidas (Rabel et al., 2018) e depende da coordenação do alumínio nos minerais constituintes do solo (Kewei et al., 2023). Por outro lado, os minerais formadores de rochas podem ser fontes de EPT e apresentar algum perigo ambiental, dependendo das doses aplicadas aos solos no processo de remineralização (Dupla et al., 2023). Na Tabela 1, são apresentados os principais EPT contidos nos minerais formadores de rocha.

Vários estudos apresentam os teores de elementos-traço nos agrominerais, incluindo (Marchi et al., 2020; Martinazzo et al., 2020; Oliveira-Filho et al., 2022; Dupla et al., 2023). Embora alguns elementos-traço, como Cu, Zn ou Ni, sejam importantes como nutrientes para diversas espécies vivas, eles podem tornar-se tóxicos e apresentar perigo tanto para o ambiente quanto para a saúde da população humana, a partir de certas quantidades (Dupla et al., 2023).

Esse é o principal motivo para se conhecer a composição química dos produtos utilizados, bem como os possíveis efeitos adversos que podem causar, tanto às espécies do solo quanto da água, visando avaliar seus potenciais impactos.

**Tabela 1.** Principais elementos potencialmente tóxicos nos minerais formadores de rochas e sua taxa de solubilidade relativa ao feldspato potássico\*.

Mineral	Elemento potencialmente tóxico <sup>(1)</sup>	Solubilidade relativa ao feldspato potássico <sup>(2)</sup>
Anortita	Sr, Cu, Ga, Mn	$4.10^6$
Piroxênio	Ni, Co, Mn, Se, Li, V, Zn, Pb, Cu, Ga	$5.10^3$
Olivina	Ni, Co, Mn, Li, Zn, Cu, Mo	$2.10^3$
Anfibolio	Ni, Co, Mn, Se, Li, V, Zn, Cu, Ga	$1.10^3$
Flogopita	Rb, Ba, Ni, Co, Mn, Se, Li, V, Zn, Cu, Ga	$6.10^0$
Apatita	Terras Raras, Pb, Sr	$3.10^0$
Andesina	Sr, Cu, Ga, Mn	$2.10^0$
Biotita	Rb, Ba, Ni, Co, Mn, Se, Li, V, Zn, Cu, Ga	$2.10^0$
Oligoclásio	Cu, Ga	$1.10^0$
Ortoclásio	Rb, Ga, Sr, Cu	$1.10^0$
Albita	Cu, Ga	$8.10^{-1}$
Granada	Mn, Cr, Ga	$5.10^{-1}$
Muscovita	F, Rb, Ba, Sr, Cu, Ga, V	$2.10^{-2}$
Titanita	Terras Raras, V, Sn	$8.10^{-3}$
Ilmenita	Co, Cu, Cr, V	$8.10^{-3}$
Magnetita	Zn, Co, Ni, Cr, V	$8.10^{-3}$
Turmalina	Li, F, Ga	$8.10^{-3}$
Zirconita	Hf, U	$8.10^{-3}$
Quartzo	-	$5.10^{-3}$

<sup>(1)</sup> Bradl (2005).

<sup>(2)</sup> Martins; Martins et al. (2023b).

\* O feldspato potássico é o mineral mais presente nas rochas da crosta terrestre e é uma referência de solubilidade. Sua solubilidade relativa tem o valor de 1.

## Ecotoxicologia

De acordo com Kendall et al. (1996), a ecotoxicologia é a ciência responsável pelo estudo do destino e dos efeitos de substâncias químicas sobre os componentes de um ecossistema, baseada no emprego de métodos de laboratório e de campo.

Essa área detém grande importância no conhecimento da periculosidade de elementos químicos presentes ou lançados no ambiente, visto que avalia os efeitos desses elementos ou materiais sobre os organismos presentes no solo e na água.

A avaliação desses efeitos prevê o contato dos elementos potencialmente perigosos com os organismos vivos e determina os possíveis danos que podem ser causados às espécies testadas.

Todavia, após qualquer agente químico, inclusive os presentes nos remineralizadores, ser lançado no meio ambiente, uma série de fatores químicos, como solubilidade em água, meia-vida ou capacidade de adsorção às partículas do solo, e fatores do próprio ambiente, como temperatura, fotoperíodo e degradação microbiana, podem influenciar o contato do agente químico com os organismos vivos, afetando assim a disponibilidade para causar possíveis efeitos tóxicos (Luoma, 1983). Esse fenômeno de interação química e transformação é chamado de biodisponibilidade e pode variar em função de aspectos tanto ambientais quanto dos próprios agentes químicos envolvidos, como descrito nos exemplos acima.

## **Relação entre biodisponibilidade e bioacumulação**

A bioacumulação é um parâmetro crucial na avaliação ecotoxicológica e na análise de risco ecológico, utilizado para determinar a quantidade de um agente químico armazenada em uma espécie viva (Connell, 1997). No entanto, esse fenômeno é uma decorrência da biodisponibilidade, a qual depende do comportamento de degradação ou da força de ligação do agente químico estudado com o mineral de origem. Os contaminantes dissolvidos ou adsorvidos estarão mais disponíveis para a biota aquática do que contaminantes com ligações estruturalmente complexas com minerais, os quais podem vir a tornar-se biodisponíveis após a ingestão (Calmano et al., 1993). Essa premissa, de liberação após a ingestão, também é confirmada por alguns autores que observaram que a biodisponibilidade pode ser influenciada pela habilidade do organismo em metabolizar os contaminantes após a ingestão (Luoma, 1983; Schlekot et al., 2000).

Ainda assim, outros autores consideram que as bases científicas para definir a biodisponibilidade de um elemento, visando a avaliação de riscos ecológicos ou humanos, são insuficientes (Peijnenburg; Jager, 2003; Harmsen, 2007). O efeito danoso de um metal depende, basicamente, da quantidade acumulada e de suas formas químicas no solo. Ou seja, vários fatores podem interferir na biodisponibilidade, e isso também deve ser avaliado.

## Modelos biológicos para ensaios terrestres

Segundo Decaëns et al. (2006), considerava-se que o solo abrigaria  $\frac{1}{4}$  da biodiversidade do planeta. No entanto, estudos mais recentes indicam que a biodiversidade do solo pode alcançar 59% do total (Anthony et al., 2023), reforçando o conceito de que o solo é vivo e sua saúde depende dos organismos que nele vivem. São milhões de microrganismos (bactérias e fungos) em apenas uma colher de solo e dezenas de milhares de espécies de animais invertebrados, em grande parte, invisíveis a olho nu, que compõem as comunidades que vivem no solo. Alguns poucos organismos são eventualmente considerados pragas, mas a esmagadora maioria é benéfica devido a funções que contribuem para a manutenção da qualidade do solo, tanto como habitat quanto para a fertilidade na agricultura.

Algumas espécies de minhocas, microminhocas, colêmbolos, ácaros e outros invertebrados do solo, e também microrganismos, são utilizados para avaliar a toxicidade de uma substância no solo. Os invertebrados do solo também podem acumular metais pesados em seus corpos e sofrer danos, mas também podem repassar os metais acumulados para animais que os predarem. Protocolos e guias com a descrição de métodos padronizados de ensaios ecotoxicológicos com organismos do solo são disponibilizados por instituições como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), United States Environmental Protection Agency (USEPA) e Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) (Tabela 2), entre outras. Tais ensaios geralmente avaliam efeitos de sobrevivência, reprodução, comportamento, crescimento, bioacumulação, etc. Apesar de esses ensaios serem realizados em laboratório, avaliações em campo e semicampo (parcialmente em campo) também podem ser realizadas com algumas espécies ou com comunidades de organismos (Niva; Brown, 2019).

Embora não haja ainda a previsão de ensaios dessa natureza para o registro de remineralizadores, no caso de agrotóxicos, por exemplo, a avaliação dos efeitos sobre organismos do solo é exigida para a determinação do grau de periculosidade ambiental que consta no rótulo dos produtos comercializados, conforme a Lei Federal nº 7.802, de 11 de julho de 1989 (Brasil, 1989).

**Tabela 2.** Principais protocolos e guidelines para ensaios ecotoxicológicos com organismos terrestres disponíveis por agências nacionais e internacionais\*.

ABNT <sup>(1)</sup>	USEPA <sup>(2)</sup>	OECD <sup>(3)</sup>
Ecotoxicologia terrestre – toxicidade aguda – método de ensaio com minhocas (Lumbricidae)	Seedling Emergence and Seedling Growth	Collembolan Reproduction Test in Soil
Qualidade do solo – inibição da reprodução de Collembola ( <i>Folsomia cándida</i> ) por poluentes do solo	Early Seedling Growth Toxicity Test	Predatory mite ( <i>Hypoaspis</i> ( <i>Geolaelaps</i> ) <i>aculeifer</i> ) reproduction test in soil
Qualidade do solo – determinação dos efeitos de poluentes na flora terrestre Parte 2: efeitos do solo contaminado na emergência e no crescimento inicial de vegetais superiores	Earthworm Subchronic Toxicity Test	Earthworm Reproduction Test ( <i>Eisenia fetida</i> / <i>Eisenia andrei</i> )
Qualidade do solo – efeitos de poluentes em Enchytraeidae ( <i>Enchytraeus</i> sp.) – determinação de efeitos sobre reprodução e sobrevivência	Soil Microbial Community Toxicity Test	Enchytraeid Reproduction Test
–	–	Bioaccumulation in Terrestrial Oligochaetes

<sup>(1)</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas.

<sup>(2)</sup> United States Environmental Protection Agency.

<sup>(3)</sup> Organisation for Economic Cooperation and Development.

\*Todos esses protocolos estão disponíveis nas páginas das respectivas instituições. Cabe ressaltar que as Normas da ABNT têm custo para aquisição. Os protocolos da USEPA e da OCDE estão disponíveis para leitura e impressão.

## Modelos biológicos para ensaios aquáticos

A maioria dos poluentes lançados no solo, na água ou no ar tem os recursos hídricos como seus receptores finais. Por esse motivo, mesmo antes de surgir o termo ecotoxicologia, já existia a Toxicologia Aquática. Vários são os ensaios disponíveis para avaliação da ecotoxicidade de substâncias químicas sobre organismos aquáticos. No entanto, no caso específico de metais, bem como de outros poluentes persistentes, também são importantes os estudos de bioacumulação.

Algas, crustáceos, moluscos e peixes são os grupos mais estudados na ecotoxicologia aquática, buscando-se conhecimento sobre os efeitos nocivos

das inúmeras substâncias químicas e misturas lançadas no ambiente, tanto na pesquisa acadêmica quanto na área de regulação de produtos. Várias espécies são consideradas modelo para avaliações dessa natureza, como a microalga verde *Raphidoceles subcaptata*, os microcrustáceos do gênero *Daphnia* sp., ou entre os peixes, a espécie *Danio rerio*, popularmente conhecida como paulistinha ou peixe-zebra.

Protocolos e guias para ensaios ecotoxicológicos estão disponibilizados por diversas instituições nacionais ou internacionais, como ABNT, USEPA e OCDE (Tabela 3).

**Tabela 3.** Principais protocolos e guidelines para ensaios ecotoxicológicos com organismos aquáticos disponíveis por agências nacionais e internacionais\*.

ABNT <sup>(1)</sup>	USEPA <sup>(2)</sup>	OECD <sup>(3)</sup>
Método de ensaio com algas	Algal Toxicity	Freshwater Alga and Cyanobacteria, Growth Inhibition Test
Método de ensaio com <i>Ceriodaphnia</i> spp (Crustacea, Cladocera)	Daphnid Chronic Toxicity Test	<i>Daphnia</i> sp. Acute Immobilisation Test
Método de ensaio com <i>Daphnia</i> spp. (Crustacea, Cladocera)	Freshwater and Saltwater Fish Acute Toxicity Test	Fish, Acute Toxicity Test
Toxicidade aguda – método de ensaio com peixes (Cyprinidae)	Fish Early Life Stage Toxicity Test	Fish, Early-life Stage Toxicity Test
Toxicidade crônica de curta duração – método de ensaio com peixes	Fish Bioconcentration Factor (BCF)	Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test

<sup>(1)</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas.

<sup>(2)</sup> United States Environmental Protection Agency

<sup>(3)</sup> Organisation for Economic Cooperation and Development.

\*Todos esses protocolos estão disponíveis nas páginas das respectivas instituições. Cabe ressaltar que as Normas da ABNT têm custo para aquisição. Os protocolos da USEPA e da OCDE estão disponíveis para leitura e impressão.

Para escolher os ensaios a serem utilizados no estudo, é preciso conhecer as propriedades do material, como solubilidade, potencial precipitação sobre o sedimento, meia vida e adsorção em superfícies, pois cada característica pode demandar um ou mais grupos específicos. Os organismos aquáticos podem ser planctônicos (de coluna d'água), bentônicos (de fundo) ou nec-tônicos (que nadam), e o conhecimento dessa informação é crucial para a escolha das espécies a serem testadas.

Segundo Oliveira-Filho et al. (2013), para uma avaliação mais precisa, recomenda-se a realização de ensaios com no mínimo três organismos pertencentes a diferentes níveis tróficos da cadeia alimentar aquática. Esse critério dará mais precisão e segurança quanto à periculosidade aquática do material a ser testado.

Cabe ressaltar que, pela Lei Federal nº 11.794/2008 (Lei Arouca) (Brasil, 2008), estudos envolvendo peixes (animais vertebrados) devem passar por avaliação de uma Comissão de Ética de Uso Animal da Instituição antes de serem iniciados.

## Estudos de caso

Para exemplificar os métodos e os sistemas de avaliação apresentados no texto, este documento apresenta a seguir dois estudos já publicados que avaliaram os efeitos de remineralizadores sobre organismos do solo e da água.

### Organismos terrestres

As minhocas e microminhocas são animais de corpo mole que ingerem solo, matéria orgânica e microrganismos, constroem galerias ajudando a movimentar solo e matéria orgânica, aeram o solo e favorecem a infiltração de água e decomposição da matéria orgânica. Além disso, a presença das minhocas é frequentemente associada a solos férteis. Muitos microartrópodes, como os colêmbolos (pulgas de jardim), são detritívoros e, portanto, ajudam na ciclagem de nutrientes (Brown et al., 2015). Os microrganismos têm grande importância na decomposição e, em ação conjunta com a fauna, transformam a matéria orgânica no solo e disponibilizam nutrientes para as plantas.

Ensaio ecotoxicológico foram realizados conforme recomendações contidas em protocolos internacionais para verificar se os remineralizadores derivados de biotita xisto (do estado de Goiás) e fonolito (do estado de Minas Gerais) teriam algum efeito sobre a reprodução, comportamento e sobrevivência de alguns animais invertebrados representativos do solo. Os teores de metais pesados das rochas utilizadas estavam dentro do permitido por lei (Niva et al., 2021).

Minhocas, microminhocas e colêmbolos foram submetidos a misturas de diferentes proporções dos pós de rocha e solo. Efeitos negativos sobre a sobrevivência e reprodução de microminhocas foram observados apenas quando os animais foram submetidos ao pó de rocha puro ou em proporção acima de 10%, situações que equivaleriam a depósitos de rejeitos ou áreas muito próximas. O comportamento de fuga de colêmbolos também foi observado apenas a partir de 10% do pó de rocha misturado ao solo. As minhocas foram as mais sensíveis dos três organismos, apresentando comportamento de fuga já a partir de 1% dos pós de rocha, ou seja, fogem ou evitam solo com mais de 1% de pó de rocha. Infere-se que o uso de remineralizadores, neste caso, não é prejudicial à fauna do solo desde que mantido em proporções menores do que 1% (equivalente a aproximadamente 20 Mg ha<sup>-1</sup> de pó de rocha). Com a fuga ou evitamento de invertebrados do solo, poderia haver prejuízos à saúde do solo do local em questão devido à perda de serviços ecossistêmicos prestados por esses organismos (Niva et al., 2021).

## Organismos aquáticos

Visando avaliar a solubilidade em água e a toxicidade/acumulação dos metais presentes no pó da rocha biotita xisto, Oliveira-Filho et al. (2022) realizaram experimentos com o peixe zebra *Danio rerio*. Os ensaios com *Danio rerio* foram aprovados pela Comissão de Uso Animal do Centro Universitário de Brasília (Processo 003/15) de 19 de março de 2015.

A rocha moída biotita xisto utilizada nesse estudo foi originária da cidade de Nova Era, Minas Gerais, proveniente do estéril de garimpo de esmeraldas (Martins et al., 2008). Na composição química desse material foi determinado 151 ppm para Zn, 142 ppm para Ba, 93,3 ppm para Ni, 53,9 ppm para Cu e 49,4 ppm para Co. Todavia, concentrações menores do que 20 ppm também foram registradas sendo: 15,9 ppm para Sr, 5,8 ppm para Mo, 10,3 ppm para Pb, e <0,1 ppm para Cd.

A potencial periculosidade do pó da biotita xisto para o ambiente aquático foi determinada a partir de ensaios para avaliar a solubilidade e a liberação de metais na água. Visando simular um processo de lixiviação, o material foi agitado em duas diferentes soluções, água ultrapura e cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>). Estes solventes têm diferentes propriedades químicas e são utilizados para modelar processos que ocorrem naturalmente no solo. A água ultrapura é um agente de solubilização que extrai os elementos solúveis em água, ou seja,

facilmente liberados no ambiente. A água ultrapura foi utilizada para simular a ação da água da chuva na biotita xisto. Já a solução de 10 mM  $\text{CaCl}_2$  foi utilizada para avaliar os teores trocáveis dos metais presentes na rocha, simulando a ação solvente presente na solução do solo. Em ambos os casos se utilizou as concentrações de 1 g de pó de biotita xisto para 10 mL de solução. De acordo com Houba et al. (2000), a solução de  $\text{CaCl}_2$  tem aproximadamente a mesma força iônica do que a média de soluções de solo naturais.

Na água ultrapura os elementos mais solúveis foram K ( $69,4 \text{ mg L}^{-1}$ ), Cr ( $0,88 \text{ mg L}^{-1}$ ), Mn ( $0,26 \text{ mg L}^{-1}$ ), e Sr ( $0,13 \text{ mg L}^{-1}$ ). Outros elementos como Co, Ni, Zn e Pb não foram solúveis, indicando que não são facilmente liberados no ambiente aquático.

Já com a solução de  $\text{CaCl}_2$  foram extraídos K ( $254 \text{ mg L}^{-1}$ ), Cr ( $1,09 \text{ mg L}^{-1}$ ), Mn ( $0,36 \text{ mg L}^{-1}$ ), Ni ( $0,35 \text{ mg L}^{-1}$ ), e Sr ( $2,18 \text{ mg L}^{-1}$ ), todos em quantidades visivelmente maiores do que com a água ultrapura. Isso se deve ao fato de que a solução salina extrai os elementos trocáveis e mobiliza os elementos fracamente adsorvidos, que são mais facilmente liberados da estrutura dos minerais componentes da rocha moída.

Nos ensaios com peixes, os organismos foram divididos em seis grupos expostos por 96 horas à uma concentração de 700 g de biotita xisto moído para 2,8 mil milímetros, de água mole sintética, conforme padrões da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). A razão estabelecida de 1:4 foi adaptada de metodologia de ensaios com sedimentos desenvolvida por Burton Junior (1991). Dois grupos foram avaliados após as 96 horas de exposição, outros dois avaliados após 15 dias em água limpa sem o pó de rocha e os últimos dois grupos foram avaliados após 30 dias em água limpa sem o pó de rocha.

Não houve mortalidade entre os peixes após as 96 horas de exposição. De acordo com a solubilidade dos elementos observada em água ultrapura, essa ausência de mortalidade pode ser confirmada por outros estudos. Simplício et al. (2017) mostraram baixa toxicidade de fertilizantes para o peixe Danio rerio (paulistinha), incluindo o K. Em outro estudo, Oliveira-Filho et al. (2013) evidenciaram uma toxicidade do cromo para peixes de água doce em valores 27 a 40 vezes maiores do que o quantitativo observado como solúvel da rocha em água ultrapura.

Sobre a acumulação de metais nos peixes, observou-se que os valores se elevaram durante as 96 horas de exposição ao pó da rocha, e se manteve acima dos patamares regulares, em comparação ao grupo controle (não ex-

posto), até 15 dias em água limpa. Todavia, após 30 dias em água limpa, foi possível observar que o teor de metais nos peixes voltou aos valores basais, sugerindo que os resíduos do pó foram eliminados nas fezes, e os metais não se acumularam em vísceras ou músculos dos peixes (Oliveira-Filho et al., 2022).

## Orientações e considerações finais

A proposta desse documento é fornecer subsídio e material necessário para o estudo e melhor esclarecimento sobre as interações ambientais dos remineralizadores. Os casos apresentados mostram dados de pesquisa capazes de orientar gestores, pesquisadores e técnicos ambientais interessados na obtenção desse conhecimento.

Os resultados observados nos casos aqui, mostram e reforçam a premissa que o risco zero não existe. Quaisquer compostos químicos utilizados ou lançados no ambiente por uma condição não natural devem passar por uma avaliação dos seus possíveis efeitos adversos. Desse modo, os estudos apresentados nesse documento evidenciam que a determinação da composição química e a investigação sobre potenciais efeitos ecotoxicológicos são passos de grande importância para essa avaliação, tal como realizada pelos órgãos reguladores de agrotóxicos.

A realização de ensaios com organismos terrestres e aquáticos são imprescindíveis para a avaliação do perigo desses compostos, e a complementação com uma avaliação do risco ecológico seria de grande importância. Manuais e publicações detalhando todos os procedimentos apresentados nos casos descritos estão disponíveis (conforme apresentados nas Tabelas 2 e 3) e podem auxiliar consideravelmente na condução das análises a serem realizadas.

Este trabalho contribui para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) números 6 e 15, em compromisso proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU), especificamente com relação à água potável e ao saneamento, bem como na proteção da vida terrestre e continental. Essas ações contam com o apoio da Embrapa para que sejam atingidas.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15088**: Ecotoxicologia aquática: toxicidade aguda: método de ensaio com peixes (Cyprinidae). 3.ed. Rio de Janeiro, 2016. 25p.
- ANTHONY, M. A.; BENDER, S. F.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. Enumerating soil biodiversity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 120, n. 33, 2023. DOI: 10.1073/pnas.2304663120.
- BJERREGAARD, P.; ANDERSEN, C. B. I.; ANDERSEN, O. Ecotoxicology of metals - sources, transport, and effects on the ecosystem. In: NORDBERG, G. F.; COSTA, M. H. **Handbook on the toxicology of metals**. 5. ed. New York: Academic, 2022. v. 1. p. 593-627. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823292-7.00016-4>.
- BRADL, H. B. Sources and origins of heavy metals. In: BRADL, H. B. **Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation**. Neubrück: Elsevier, 2005. v. 6, p. 1-27. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(05\)80020-1](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(05)80020-1).
- BRASIL. Casa Civil. **Lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008**. Estabelece procedimentos para uso científico de animais. Brasília: Presidência da República, 2008. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2008/lei/11794.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/lei/11794.htm). Acesso em: 19 dez. 2023.
- BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989**. Dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins, e dá outras providências. Brasília, 1989. Disponível em: [www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l7802.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7802.htm). Acesso em: 7 ago. 2023.
- BRASIL. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei Nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013**. Altera a Lei No 6.894 de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura. Brasília, 2013. Disponível em: <https://shre.ink/rAxK>. Acesso em: 19 dez. 2023.
- BRASIL, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016**. Estabelece regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Brasília, 2016. Disponível em: <https://shre.ink/rAxZ>. Acesso em: 19 dez. 2023.
- BRASIL, Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050**. Brasília: SAE, 2021. Disponível em: <https://shre.ink/rAxj>. Acesso em: 19 dez. 2023.
- BROWN, G. G.; NIVA, C. C.; ZAGATTO, M. R. G.; FERREIRA, S. de A.; NADOLNY, H. S.; CARDOSO, G. B. X.; SANTOS, A.; MARTINEZ, G. de A.; PASINI, A.; BARTZ, M. L. C.; SAUTTER, K. D.; THOMAZINI, M. J.; BARETTA, D.; SILVA, E. da; ANTONIOLLI, Z. I.; DECAËNS, T.; LAVELLE, P. M.; SOUSA, J. P.; CARVALHO, F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (Ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 121-154. Disponível em: <https://shre.ink/rAxt>. Acesso em: 19 dez. 2023.
- BURTON JR., G.A. Assessing the toxicity of freshwater sediments. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v.10, p.1585-1627, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5620101204>.

CALMANO, W.; HONG, J.; FORSTNER, U. Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential. **Water Science and Technology**, v. 28, p. 223-235, 1993. DOI: 10.2166/wst.1993.0622.

CONNELL, D. W. **Basic concepts of environmental chemistry**. Boca Raton: CRC Press, 1997.

DECAËNS, T.; JIMÉNEZ, J. J.; GIOIA, C.; MEASEY, G. J.; LAVELLE, P. The values of soil animals for conservation biology. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, p. S23-S38, 2006.

DUPLA, X.; MÖLLER, B.; BAVEYE, P. C.; GRAND, S. Potential accumulation of toxic trace elements in soils during enhanced rock weathering. **European Journal of Soil Science**, v. 74, n. 1, e13343, 2023. DOI: 10.1111/ejss.13343.

GALUSZKA, A.; MIGASZEWSKI, Z. M.; ZALASIEWICZ, J. Assessing the Anthropocene with geochemical methods. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 395, n. 1, p. 221-238, 2014. DOI: 10.1144/SP395.5.

HARMSSEN, J. Measuring bioavailability: from a scientific approach to standards methods. **Journal of Environmental Quality**, v. 36, p. 1420-1428, 2007. DOI: 10.2134/jeq2006.0492.

HOUBA, V. J. G.; TEMMINGHOFF, E. J. M.; GAIKHORST, G. A.; VAN VARK, W. Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 31, p. 1299-1396, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103620009370514>.

KENDALL, R. J.; BENS, C. M.; COBB III, G. P.; DICKERSON, R. L.; DIXON, K. R.; KLAINE, S. J.; LACHER, T. E.; LA POINT, T. W.; McMURRY, S. T.; NOBLET, R.; SMITH, E. E. Aquatic and terrestrial ecotoxicology. In: KLAASSEN, C. D.; AMDUR, M. O.; DOULL, J. (Ed.). **Casarett and doull's toxicology: the basic science of poisons**. New York: McGraw-Hill, 1996. p. 883-905.

KEWEI, L. I.; YANGXIAOXIAO, S. H. I.; NKOH, J. N.; JIANG, J.; RENKOU, X. U. Effect of coordination nature of aluminum on its activation from minerals and oxisols during their acidification. **Pedosphere**, 2023. DOI: 10.1016/j.pedsph.2023.07.003.

LUOMA, S. N. Bioavailability of trace metals to aquatic organisms - a review. **Science of the Total Environment**, v. 28, p. 1-22, 1983. DOI: 10.1016/S0048-9697(83)80004-7.

MARCHI, G.; GUELFILVA, D. R.; MALAQUIAS, J. C.; GUILHERME, L. R. G.; SPEHAR, C. R.; MARTINS, E. S. Solubility and availability of micronutrients extracted from silicate agrominerals. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, e00807, 2020. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.00807.

MARTINAZZO, R.; BERGMANN, M.; SILVEIRA, C. A. P.; BAMBERG, A. L.; TORRES, D. P.; SANDER, A. (Ed.). **Micronutrientes e metais pesados em agrominerais: caracterização de rochas do escudo sul-rio-grandense e da Bacia do Paraná**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2020. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 488). Disponível em: <https://shre.ink/rAx.f>. Acesso em: 19 dez. 2023.

MARTINS, E. de S.; OLIVEIRA, C.G. de; RESENDE, A.V. de; MATOS, M.S.F. de. Agrominerais: rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. In: LUZ, A.B. da; LINS, F.A.F. (Ed.). **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2008, p. 205- 221. Disponível em: <https://shre.ink/rAvQ>. Acesso em: 18 dez. 2023.

MARTINS, E. S.; THEODORO, S. H.; BERNARDEZ, F. F. G.; SIQUEIRA, A. P.; CURTIS, J. C. D.; LUCHESE, A. V. Produção brasileira de remineralizadores e fertilizantes naturais: 2019 a 2022. **Revista Novo Solo**, n. 3, p. 10-19, 2023a. Disponível em: <https://abrefen.org.br/download/2057/?tmstv=1687465582>.

MARTINS, E. de S.; MARTINS, E. S.; HARDOIM, P. R. Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos. **Informe Agropecuário da EPAMIG**, v. 44, n. 321, p. 26-39, 2023b.

NIVA, C. C.; BROWN, G. G. (Ed.). **Ecotoxicologia terrestre: métodos e aplicações dos ensaios com oligoquetas**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. Disponível em: <https://shre.ink/rAx2>. Acesso em: 19 dez. 2023.

NIVA, C. C.; SEGAT, J. C.; BARETTA, D.; BARETTA, C. R. D. M.; OLIVEIRA, M. I. L. de; FIALHO, A. R.; MARCHI, G.; MARTINS, E. de S. Ecotoxicological assessment of silicate rock fertilizers using soil invertebrates. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, e01454, 2021. Disponível em: <https://shre.ink/rAxH>. Acesso em: 19 dez. 2023.

OLIVEIRA-FILHO, E. C.; MUNIZ, D. H. F.; FREIRE, I. S.; AQUINO, F. G.; ANDRADE, L. R. M. Comparative susceptibility of freshwater fish species to metals from ultramafic soils. **Ecotoxicology and Environmental Contamination**, v. 8, p. 119-123, 2013. DOI: 10.5132/eec.2013.01.017.

OLIVEIRA-FILHO, E. C.; MUNIZ, D. H. F. M.; RESENDE, A. V.; MARTINS, E. S. Solubility, toxicity and accumulation of metals from biotite schist rock in *Danio rerio* fish. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, e01342, 2022. Disponível em: <https://shre.ink/rAt4>. Acesso em: 19 dez. 2023.

PEIJNENBURG, W. J. G. M.; JAGER, T. Monitoring approaches to assess bioaccessibility and bioavailability of metals: matrix issues. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 56, p. 63-77, 2003. DOI: 10.1016/S0147-6513(03)00051-4.

POURRET, O.; HURSTHOUSE, A. It's time to replace the term "heavy metals" with "potentially toxic elements" when reporting environmental research. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 22, 4446, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16224446>.

RABEL, D. O.; MOTTA, A. C. V.; BARBOSA, J. Z.; PRIOR, S. A. Depth distribution of exchangeable aluminum in acid soils: a study from subtropical Brazil. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 40, e39320, 2018. DOI: 10.4025/actasciagron.v40i1.39320.

RAHMAN, Z.; SINGH, V. P. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 7, 419, 2019. DOI: 10.1007/s10661-019-7528-7.

RIBEIRO, I. D. A.; VOLPIANO, C. G.; VARGAS, L. K.; GRANADA, C. E.; LISBOA, B. B.; PASSAGLIA, L. M. P. Use of mineral weathering bacteria to enhance nutrient availability in crops: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 590774, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.590774>.

SCHLEKAT, C. E.; DECHO, A. W.; CHANDLER, G. T. Bioavailability of particle associated silver, cadmium and zinc to the estuarine amphipod *Leptocheirus plumulosus* through dietary ingestion. **Limnology and Oceanography**, v. 45, p. 11-21, 2000. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.1.0011>.

SIMPLICIO, N. C. S.; MUNIZ, D. H. F.; ROCHA, F. R. M.; MARTINS, D. C.; DIAS, Z. M. B.; FARIA, B. P. C.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. Comparative analysis between ecotoxicity of nitrogen-, phosphorus-, and potassium-based fertilizers and their active ingredients. **Toxics**, v. 5, p. 2, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/toxics5010002>.

SOUSA, W. D. S.; CAMPOS, T. S.; SOUZA, A. G. V.; CINTRA, P. H. N.; FARIA, L. O.; SANTOS, T. E. B. Performance of lettuce submitted to the rock dust remineralizer and doses of efficient microorganisms. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 8, n. 2, e5526, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.32404/rean.v8i2.5526>. Acesso em: 19 dez. 2023.

SWOBODA, P.; DÖRING, T. F.; HAMER, M. Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: a review. **Science of the Total Environment**, v. 807, 150976, 2022.

TANG, M. Composition of the earth's crust. In: **ENCYCLOPEDIA of geology**. [S.l.]: Elsevier, 2021. p. 178-186. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00044-8>. Acesso em: 19 dez. 2023.

#### Embrapa Cerrados

BR 020 Km 18 Rod. Brasília/Fortaleza  
Caixa Postal 08223  
CEP 73310-970, Planaltina, DF  
Fone: (61) 3388-9898  
[www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)  
[www.embrapa.br/fale-conosco/sac](http://www.embrapa.br/fale-conosco/sac)

#### 1ª edição

Publicação digital (2023): PDF



MINISTÉRIO DA  
AGRICULTURA E  
PECUÁRIA



#### Comitê Local de Publicações

##### Presidente

*Lineu Neiva Rodrigues*

##### Secretário-executivo

*Gustavo José Braga*

##### Secretária

*Alessandra Silva Gelape Faleiro*

##### Membros

*Alessandra Silva Gelape Faleiro*

*Alexandre Specht*

*Edson Eyji Sano*

*Fábio Gelape Faleiro*

*Jussara Flores de Oliveira Arbues*

*Kleberson Worsley Souza*

*Ranyse Barbosa Quirino da Silva*

*Shirley da Luz Soares Araujo*

Supervisão editorial, revisão de texto e editoração eletrônica

*Jussara Flores de O. Arbues*

##### Normalização bibliográfica

*Rosamares Rocha Galvão (CRB-1/2122)*

##### Projeto gráfico da coleção

*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*