

BIOINDICADORES APLICADOS A DIFERENTES REMINERALIZADORES DO SOLO

BIOINDICATORS APPLIED TO DIFFERENT SOIL REMINERALIZERS

Mayara Machado Melila Marinato

Aluna de Graduação em Engenharia de Minas, 9º período, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES

Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: setembro de 2024 a agosto de 2025
mayaramachado958@gmail.com

Guilherme de Resende Camara

Orientador, Engenheiro Agrônomo, D.Sc.
g.camara@cetem.gov.br

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Coorientador, Geólogo, D.Sc.
leolysil@cetem.gov.br

RESUMO

O setor de rochas ornamentais é responsável pela geração de grandes volumes de resíduos, e o uso do pó de rocha como remineralizador de solos surge como uma alternativa ambientalmente sustentável. Este estudo teve como objetivo avaliar, de forma preventiva, os possíveis efeitos adversos da aplicação de remineralizadores, frequentemente utilizados em altas dosagens, sobre o ecossistema edáfico, utilizando a minhoca *Eisenia andrei* como bioindicador. Foram realizados testes laboratoriais de fuga e de mortalidade, seguindo normas técnicas nacionais e internacionais. Os resultados indicaram a distribuição homogênea dos organismos, sem preferência significativa pelo solo controle e a ausência de mortalidade. Todos os critérios de validação dos testes foram atendidos, sugerindo que o material avaliado não apresenta toxicidade aguda. A análise dos dados respalda seu potencial uso agrícola, embora sejam recomendados estudos adicionais e eventuais ajustes nos protocolos para garantir a ausência de efeitos crônicos. Este trabalho visa complementar os protocolos agronômicos previstos na Instrução Normativa nº 5/2016, do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), contribuindo para a aplicação segura e sustentável desses insumos em solos agrícolas.

Palavras-chave: Ecotoxicidade, *Eisenia andrei*, pó de rocha, agrominerais, economia circular.

ABSTRACT

The ornamental stone sector generates large volumes of waste, and the use of rock dust as a soil remineralizer has emerged as an environmentally sustainable alternative. This study aimed to preventively assess the possible adverse effects of the application of remineralizers, often used in high dosages, on the edaphic ecosystem, using the earthworm *Eisenia andrei* as a bioindicator. Laboratory escape and lethality tests were carried out according to national and international technical standards. The results indicated no mortality and homogeneous distribution of the organisms, with no significant preference for the control soil. All the validation criteria for the tests were met, suggesting that the material evaluated does not present acute toxicity. The analysis of the data supports its potential agricultural use, although further studies and possible adjustments to the protocols are recommended to guarantee the absence of chronic effects. This work aims to complement the agronomic protocols provided for in Normative Instruction No. 5/2016 of the Ministry of Agriculture and Livestock (Mapa), contributing to the safe and sustainable application of these inputs in agricultural soils.

Keywords: Ecotoxicity, *Eisenia andrei*, rock dust, agrominerals, circular economy.

1. INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de rochas ornamentais possui grande relevância econômica, com o Estado do Espírito Santo desempenhando um papel de liderança. No ano de 2023, as exportações capixabas corresponderam a expressivos 82,2% do total nacional, conforme dados da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2024). Apesar dessa proeminência produtiva, o setor enfrenta o desafio da geração de uma vasta quantidade de resíduos (estéreis e rejeitos). A inviabilidade de aproveitamento da rocha, seja por falta de competência do maciço, por baixa tecnologia de extração e aproveitamento ou por não conformidade com as exigências estéticas do mercado, resulta em uma produção de estéreis na lavra que oscila entre 40% e 60% (ANDRADE, 2021).

Essa volumosa quantidade de material descartado impulsionou a busca por soluções que reduzam o impacto ambiental e fortaleçam a economia circular. Dentre as iniciativas, destaca-se a valorização do pó de rocha como remineralizadores de solos, visando contribuir para a esta problemática social e ambiental (MARINATO; CAMARA, 2023). Contudo, faz-se necessário um exame ambiental mais aprofundado sobre os efeitos adversos do uso desses resíduos como remineralizadores de solos.

Para tal, a aplicação de testes de ecotoxicidade utilizando bioindicadores é de suma importância. As minhocas são reconhecidas como eficazes bioindicadores ambientais, dada sua sensibilidade a modificações no ambiente, incluindo variações na fertilidade do solo e a presença de contaminantes em seu habitat (BROWN & DOMÍNGUEZ, 2010). Considerando a vasta geração de resíduos pela indústria de rochas ornamentais e o uso do pó de rocha como remineralizador de solos, é essencial investigar sua ecotoxicidade e validar a segurança e a sustentabilidade desse material, fornecendo base científica para práticas ambientais responsáveis.

2. OBJETIVO

Com este trabalho objetivou-se avaliar preventivamente os efeitos adversos da aplicação de remineralizadores de solo, comumente aplicados em altas dosagens, sobre o ecossistema edáfico. Essa análise visa complementar os protocolos agronômicos previstos na Instrução Normativa nº 5/2016 do Ministério da Agricultura e Pecuária - Mapa (BRASIL, 2016), trazendo importantes premissas quanto a garantia sustentável de aplicação desses insumos nos solos agrícolas.

3. METODOLOGIA

3.1. Resíduo-Teste (Remineralizador)

Análises laboratoriais do resíduo-teste (remineralizador) consistiram na caracterização química e mineralógica das amostras (análise petrográfica; homogeneização; peneiramento; quarteamento; ajuste e classificação granulométrica; determinação da composição química por Fluorescência de Raios X – FRX; determinação da composição mineralógica por Difração de Raios X – DRX; quantificação do teor de dióxido de silício (SiO_2 – sílica livre) das amostras pelo método de Rietveld, teste de solubilização para análise de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) e determinação do potencial hidrogeniônico (pH).

3.2. Organismo-Teste

O organismo utilizado como bioindicador nos ensaios ecotoxicológicos foi a minhoca *Eisenia andrei*, espécie reconhecida internacionalmente por sua sensibilidade a contaminantes no solo e amplamente utilizada em testes de toxicidade. Inicialmente, uma população de organismos foi cedida pela Universidade Federal do Espírito Santo – UFES e multiplicadas no Laboratório Multiusuário de Solos do Centro de Tecnologia Mineral – LABSOL/CETEM, originando a matriz de obtenção dos organismos. Em laboratório, os organismos são mantidos em condições

controladas de temperatura (20 ± 2 °C), umidade (60–80%) e fotoperíodo (12 h luz/12 h escuro), em substrato composto por solo artificial padrão (70% areia, 20% caulim e 10% turfa) previamente umedecido com água destilada.

3.3. Aclimatação dos Organismos-Teste

Antes do início dos ensaios ecotoxicológicos, os exemplares de *Eisenia andrei* foram submetidos a um período de aclimatação em laboratório, por 48 horas. Durante as primeiras 24 horas, os organismos coletados da matriz foram mantidos em recipientes plásticos contendo solo natural (solo controle utilizado nos testes subsequentes), umedecido com água destilada até 60% da capacidade de retenção de água. As condições ambientais foram controladas, com temperatura de 20 ± 2 °C e ausência de luz. Após, os organismos foram previamente separados e acondicionados em placas de Petri contendo papel absorvente umedecido, por 24 horas, nas mesmas condições de temperatura e luminosidade anteriormente descritos, para expurgo intestinal.

3.4. Teste de Fuga (Bioensaios de Fuga)

O teste de fuga (*avoidance test* – ISO) foi conduzido de acordo com os procedimentos descritos nas normativas NBR/ISO 17512-1 (ABNT, 2011), com o objetivo de detectar respostas comportamentais rápidas dos organismos frente à exposição aos resíduos em solo.

O ensaio foi realizado em recipientes plásticos (recipientes-teste), contendo duas seções de mesma área, separadas por uma divisória plástica: uma contendo solo controle (não contaminado) e a outra contendo solo tratado (contaminado) com o resíduo (remineralizador), sem incubação prévia, o qual denominaremos de ‘Grupo A’. O ensaio foi executado com 5 réplicas. Foram utilizadas 10 minhocas adultas, com clitelo visível, por réplica. Após a disposição dos solos nos recipientes-teste, em mesmo volume entre as seções, a divisória é retirada e as minhocas são depositadas na linha de separação entre as duas seções. Os recipientes foram mantidos em condições controladas de temperatura (20 ± 2 °C), umidade (60–80%) e fotoperíodo (ausência de luz) por 48 horas, após as quais foi avaliada a distribuição dos organismos entre as seções.

Para a validação do teste de fuga é necessário o atendimento a duas condicionantes: (i) homogeneidade da distribuição dos organismos e; (ii) ausência de mortalidade. Para isso, cinco réplicas adicionais contendo apenas o solo natural puro (solo controle, não contaminado) em ambas as seções dos recipientes-teste foram adicionadas ao teste (*dual control test* – Grupo B). Ao final das 48 horas, o teste será considerado válido quando a homogeneidade da distribuição dos organismos estiver entre 40 e 60% entre seções e mortalidade ou ausência de minhocas por réplica menor ou igual a 10%.

Para o teste de fuga, a significância dos resultados obtidos foi avaliada pelo Teste Exato de Fisher (CESAR et al., 2015). Por fim, é feito o cálculo do percentual de fuga para expressar a preferência dos organismos pelo solo controle, com base na equação $x = [(nc - nt) / N] \times 100$, onde: x é a fuga, expressa em porcentagem; nc é o número de minhocas encontradas no solo controle, por recipiente-teste ou somadas em todas as réplicas; nt é o número de minhocas encontradas no solo-teste, por recipiente-teste ou somadas em todas as réplicas; e N é o número total de minhocas introduzidas no ensaio.

3.5. Teste de Mortalidade (Letalidade / Bioensaio Agudo)

O teste de mortalidade foi conduzido seguindo as normativas OECD 207 (OECD, 1984), ISO 11268-1 (ISO, 2012), NBR 15537 (ABNT, 2014) e ASTM E1676 (ASTM, 1995), com duração de 14 dias.

Solo natural tratado com o resíduo, sem incubação prévia e em superdosagem única (40 toneladas por hectare) foi acondicionado em recipientes plásticos de 1 litro, em cinco réplicas, nas quais foram introduzidas 10 minhocas adultas por réplica. A umidade foi ajustada

para 60% da capacidade de retenção de água do solo. Durante o período do ensaio, os recipientes foram mantidos sob as mesmas condições de temperatura e fotoperíodo descritas anteriormente. Ao final dos 14 dias, foi verificada a mortalidade dos organismos, considerando como mortos aqueles que não respondessem ao estímulo tátil.

Para a validação do teste de mortalidade é necessário o atendimento a uma condicionante: mortalidade em solo natural (solo controle, sem contaminação) $\leq 10\%$. Para isso, cinco réplicas adicionais contendo apenas o solo natural foram adicionadas ao teste. Para a análise dos resultados, calcula-se a média e o desvio padrão do número de indivíduos no solo-teste. A significância das diferenças de mortalidade obtidas em cada tratamento e a amostra controle foram avaliadas com auxílio de ANOVA, seguida do teste de Dunnet.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resíduo-Teste (Remineralizador)

O resíduo-teste em estudo trata-se de um estéril proveniente da extração de rocha ornamental oriunda de uma lavra localizada no município de Venda Nova do Imigrante, Espírito Santo, cuja classificação petrográfica descreve como minerais predominantes o plagioclásio (30%) seguido de microclina (30%), quartzo (15%), biotita (13%), hornblenda (7%) e ortopiroxênio (5%), sendo, então, classificada como rocha silicática, de cor cinza esverdeado, estrutura maciça, textura levemente orientada e granulação grossa.

Para realização da Análise Granulométrica por Peneiramento foram utilizados 300,00g do material em estudo. Deste volume, 100% das partículas foram passantes nas peneiras ABNT 4, 7, 10, 20 e 50. Estes resultados nos permitem confirmar que o material está de acordo com a faixa granulometria denominada FILLER, prevista na IN 05/2016 (BRASIL, 2016).

A composição química obtida por FRX apresentou como principais elementos: SiO_2 (53,00%), Al_2O_3 (13,10%), CaO (8,24%), K_2O (7,60%), Fe_2O_3 (7,36%), MgO (4,78%), TiO_2 (1,66%), P_2O_5 (2,01%) e outros (2,27%). O resíduo-teste apresenta natureza alcalina, com potencial hidrogeniônico equivalente a 8,06. A composição química obtida através do teste de solubilização do apresentou como resultado os seguintes elementos: As ($< 1,00 \text{ mg/L}$), Hg ($< 0,01 \text{ mg/L}$), Pb (2,20 mg/L) e Cd ($< 0,003 \text{ mg/L}$).

4.2. Teste de Fuga (Bioensaios de Fuga)

O presente teste de fuga foi considerado válido frente as condicionantes descritas no tópico 3.4, visto ter apresentado, ao final das 48 horas, distribuição dos organismos de 54% e 46% entre seções (*dual control test* – Grupo B), o que caracteriza a homogeneidade da distribuição das minhocas no recipiente-teste, e mortalidade ou ausência de minhocas por réplica igual a 0%, fato que valida a objetividade do teste em detectar efeitos subletais.

A média final do percentual de fuga foi equivalente a -8,00% para o Grupo A (organismos dispostos em solo contaminado em uma das seções), indicando que não houve fuga significativa para o compartimento de solo controle (considera-se ausência de fuga para valores negativos). O desvio padrão foi de 70,1%, demonstrando alta variabilidade entre as replicatas. Para o Grupo B o cálculo do percentual de fuga do solo-teste foi de 8,00%, com desvio padrão de 46,0%, indicando uma leve preferência das minhocas por um dos lados, mesmo sendo compostos pelo mesmo tipo de solo.

Em relação ao Teste Exato de Fisher aplicado ao Grupo A, não foi observado significância entre ao dados ($p = 0,245$, ou seja, $p > 0,05$), o que significa que não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula. Isso indica que não houve preferência significativa das minhocas pelo solo controle em detrimento do solo teste. Em outras palavras, os organismos se distribuíram aleatoriamente ou apresentaram uma preferência muito leve, estatisticamente equivalente a uma distribuição aleatória. Já para a análise do duplo-controle (Grupo B), cujo objetivo é verificar a homogeneidade da distribuição das minhocas entre dois compartimentos

com o mesmo solo, o p-valor bilateral foi de 0,841, também não significativo ($p > 0,05$). Isso confirma que a distribuição dos organismos foi homogênea, como esperado em um sistema equilibrado. Portanto, não houve influência de fatores externos no comportamento das minhocas, como iluminação desigual, gradientes de umidade ou temperatura, reforçando que o sistema de ensaio está adequadamente controlado.

4.3. Teste de Mortalidade (Letalidade / Bioensaio Agudo)

Não foi registrada mortalidade em nenhuma das repetições, tanto para o grupo exposto ao solo controle (Grupo B) quanto para o grupo exposto ao solo-teste (Grupo A). Todos os organismos permaneceram vivos ao final do período de 14 dias de exposição. Quando não há diferença estatística significativa na mortalidade entre o solo-teste e o solo controle (e, neste caso, não houve mortalidade em nenhum dos grupos), o resultado deve ser expresso como "não tóxico", indicando que sob as condições do ensaio propostas para a espécie *Eisenia andrei* neste experimento, o solo-teste (com a presença do remineralizador) não induziu efeitos letais agudos. A ausência de mortalidade sugere que a concentração ou a natureza dos potenciais contaminantes presentes no remineralizador testado não foram suficientes para causar a morte dos organismos-teste em um período de 14 dias, mesmo em superdosagem de aplicação.

5. CONCLUSÕES

Os ensaios realizados com *Eisenia andrei* indicaram que o resíduo-teste (remineralizador) avaliado não apresentou toxicidade aguda, conforme os testes de fuga e letalidade. Não houve mortalidade nem preferência significativa pelo solo controle, e todas as condicionantes de validação foram atendidas.

Dessa forma, os resultados validam a segurança ecotoxicológica preliminar do remineralizador analisado, garantindo sua sustentabilidade ambiental. Sugere-se, no entanto, a realização de estudos complementares para avaliar possíveis efeitos crônicos e impactos em outros organismos do solo, assim como a realização de incubações prévias do resíduo-teste ao solo, visto que remineralizadores de solos possuem liberação lenta de elementos.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, a Professora Zélia Gai, da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, e ao meu orientador, Guilherme Camara.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Balanço do Setor Brasileiro de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2023: Informe 01/2024. Brasília: Abirochas, 2024.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15537: ecotoxicologia terrestre: ecotoxicidade aguda: método de ensaio para minhocas. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 17512-1/2011: qualidade do solo: ensaio de fuga para avaliar a qualidade de solos e efeitos de substâncias químicas no comportamento: parte 1: ensaio com minhocas (*Eisenia fetida* e *Eisenia andrei*). Rio de Janeiro, 2011.

ANDRADE, M. Metodologia de Construção de Depósito de Estéril de Rocha Ornamental. 2021. 160 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Cachoeiro de Itapemirim. 2021.

ASTM. American Society for Testing and Materials. E1676-95: standard guide for conducting a laboratory soil toxicity test with lumbricid earthworm *Eisenia foetida*. West Conshohocken, 1995.

BRASIL. Instrução Normativa número 5, de 10 de março de 2016: estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Brasília: Governo Federal; 2016.

BROWN, G.; DOMÍNGUEZ, J. Uso das Minhocas como Bioindicadoras Ambientais: Princípios e Práticas. In: O 3º Encontro Latino-Americano de Ecologia e Taxonomia de Oligoquetas, 2010.

CESAR, R.G.; NATAL-DA-LUZ, T.; BIDONE, E.; CASTILHOS, Z.; POLIVANOV, H. & SOUSA, J.P. (2015). Disposal of dredged sediments in tropical soils: Ecotoxicological evaluation based on bioassays with springtails and enchytraeids. Environmental Science and Pollution Research International, 22, 2916-924.

ISO. International Organization for Standardization. ISO 11268-1: soil quality: effects of pollutants on earthworms (*Eisenia fetida*): part 1: determination of acute toxicity using soil substrate. Geneva, 2012.

MARINATO, M.; CAMARA, GR. Estéreis de Rochas Ornamentais como Potencial Remineralizador do Solo – Protocolo Agronômico II. XXXII Jornada de Iniciação Científica e VIII Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. Rio de Janeiro: Cetem, p.199-204, 2024.

OECD. Organization for Economic Co-Operation and Development. Earthworm acute toxicity test. Paris, 1984. 9 p. (OECD. Guideline for testing of chemicals, 207).