

ANÁLISE DO POTENCIAL AGRONÔMICO E ECOTOXICOLÓGICO DO USO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS E DE ROCHAS ARTIFICIAIS EM DIFERENTES PERÍODOS DE INCUBAÇÃO

ANALYSIS OF THE AGRONOMIC AND ECOTOXICOLOGICAL POTENTIAL OF USING ORNAMENTAL STONE AND ARTIFICIAL STONE WASTE OVER DIFFERENT INCUBATION PERIODS

Rafaella Valdo Nunes

Aluna de Graduação em Engenharia de Minas, 3º período, Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES
Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: agosto de 2025 a julho de 2026
rafaellavaldo6@gmail.com

Guilherme de Resende Camara

Orientador, Engenheiro Agrônomo, D.Sc.
gcamara@cetem.gov.br

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

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

RESUMO

A utilização agrícola de resíduos de rochas ornamentais representa uma alternativa promissora para a valorização de coprodutos minerais. Entretanto, ainda são escassos os estudos sobre o potencial agronômico de resíduos de rochas artificiais contendo matrizes poliméricas. Este trabalho objetivou avaliar a influência de diferentes períodos de incubação sobre o potencial agronômico de resíduos de rochas ornamentais naturais e artificiais, utilizando a emergência, o Índice de Velocidade de Emergência (IVE) e o desenvolvimento inicial de plântulas de milho (*Zea mays* L.) como indicadores biológicos. Os resultados demonstraram que o período de incubação influenciou a emergência das plântulas, com desempenho mais consistente dos resíduos minerais naturais de granito e quartzito. Em contrapartida, alguns tratamentos contendo resinas apresentaram reduções na emergência, sem alterar o IVE e a altura das plântulas. Esses resultados evidenciam o potencial agronômico dos resíduos minerais naturais e fornecem subsídios para futuras pesquisas sobre resíduos de rochas artificiais contendo matrizes poliméricas.

Palavras-chave: Agrominerais, economia circular, emergência de plântulas, resíduos minerais.

ABSTRACT

The agricultural use of ornamental stone waste represents a promising alternative for the valorization of mineral byproducts. However, studies on the agronomic potential of artificial stone waste with polymer matrices remain scarce. This study aimed to evaluate the influence of different incubation periods on the agronomic potential of natural and artificial ornamental stone waste, using emergence, the Emergence Rate Index (ERI), and the initial development of corn (*Zea mays* L.) seedlings as biological indicators. The results demonstrated that the incubation period influenced seedling emergence, with more consistent performance observed in natural mineral residues of granite and quartzite. In contrast, some treatments containing resins showed reduced emergence, without altering the ERI or seedling height. These results highlight the agronomic potential of natural mineral waste and provide a basis for future research on artificial rock waste containing polymer matrices.

Keywords: Agrominerals, circular economy, seedling emergence, mineral waste.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de rochas ornamentais constitui um importante segmento da mineração brasileira, destacando-se pela expressiva geração de emprego e renda. O Estado do Espírito Santo mantém posição de liderança nacional no setor, concentrando a maior parcela das exportações brasileiras de rochas ornamentais, o que reforça sua relevância econômica e tecnológica para o país. Entretanto, a extração e o beneficiamento dessas rochas resultam na geração de grandes volumes de resíduos, cuja destinação ainda representa um desafio ambiental e produtivo (Abirochas, 2026).

Nesse contexto, o aproveitamento agrícola desses resíduos surge como uma alternativa sustentável, capaz de promover sua valorização e contribuir para a economia circular por meio do fornecimento de minerais ao solo (Marinato; Camara, 2023). Embora o potencial agrônomo de resíduos de rochas ornamentais naturais seja amplamente investigado, ainda são escassos os estudos envolvendo resíduos provenientes de rochas artificiais contendo diferentes matrizes poliméricas, especialmente quanto aos seus efeitos sobre o estabelecimento inicial das plantas.

2. OBJETIVOS

Avaliar a influência de diferentes períodos de incubação sobre o potencial agrônomo de resíduos de rochas ornamentais naturais, de rochas artificiais produzidas com resina epóxi e com resina poliuretana vegetal à base de mamona, utilizando a germinação, o vigor e o desenvolvimento inicial de plântulas de milho (*Zea mays* L.) como indicadores biológicos.

3. METODOLOGIA

3.1. Obtenção, Preparo e Caracterização Química e Mineralógica das Amostras

Os resíduos de granito e quartzito foram obtidos durante o beneficiamento de rochas extraídas nos municípios de Barra de São Francisco (ES) e Uruoca (CE), respectivamente. O beneficiamento foi realizado em uma empresa localizada em Cachoeiro de Itapemirim (ES), sendo posteriormente encaminhados no formato de casqueiros ao Centro de Tecnologia Mineral – Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM/NRES), onde foram preparados para as análises laboratoriais. As amostras foram submetidas aos processos de homogeneização, britagem, peneiramento, quarteamento e ajuste granulométrico. Posteriormente, realizou-se a caracterização petrográfica, química e mineralógica por meio de análise petrográfica, fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX).

3.2. Produção das Rochas Artificiais (aglomeradas)

As rochas artificiais foram produzidas no Laboratório Multiusuário de Materiais (LABMAT) do Centro de Tecnologia Mineral – Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM/NRES), utilizando resíduos dos litotipos granito e quartzito como agregados minerais. Como matrizes poliméricas, empregaram-se uma resina epóxi bicomponente e uma resina poliuretana vegetal bicomponente à base de óleo de mamona.

Seguindo a metodologia descrita por Gadioli et al. (2021; 2023) e Castilho et al. (2024), foram produzidos quatro compósitos de rochas artificiais: (i) resíduo de granito e resina epóxi; (ii) resíduo de quartzito e resina epóxi; (iii) resíduo de granito e resina poliuretana vegetal; e (iv) resíduo de quartzito e resina poliuretana vegetal. Adicionalmente, foram produzidos dois compósitos utilizando Areia Normal Brasileira (ANB) nº 50 (ABNT NBR 7214:2015) como agregado mineral e as mesmas matrizes poliméricas empregadas na fabricação das rochas artificiais, originando os materiais: (i) ANB e resina epóxi; e (ii) ANB e resina poliuretana vegetal à base de óleo de mamona. Esses compósitos foram produzidos e destinados à avaliação isolada da influência das matrizes poliméricas sobre o desenvolvimento inicial das plântulas.

Todas as amostras produzidas foram fragmentadas e cominuídas até alcançarem a granulometria Filler (100% passante em malha de 0,3 mm (ABNT 50), conforme previsto na IN MAPA 05/2016 (Brasil, 2016), originando os materiais particulados utilizados como tratamentos na etapa de incubação.

3.3. Incubação dos Resíduos ao Substrato

Cada material particulado proveniente dos compósitos anteriormente produzidos foi individualmente homogeneizado ao substrato de plantio (ANB - Areia Normal Brasileira nº 50) em superdosagem correspondente a 40 t ha⁻¹, permanecendo incubado em recipiente plástico transparente por 30, 60 ou 90 dias, sem a presença de plantas, em casa de vegetação. Durante esse período, a umidade foi mantida em aproximadamente 80% da capacidade de campo, enquanto a temperatura, a umidade e a luminosidade ambiente foram acompanhadas ao longo de todo o período experimental por meio de *datalogger*, com registros realizados a cada 10 minutos. Em todos os recipientes foi mantida uma pequena abertura nas tampas plásticas para a troca de gases com o meio.

3.4. Avaliação da Emergência e do Desenvolvimento Inicial das Plântulas

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação do CETEM/NRES. A execução do estudo proposto foi feita individualmente por período de incubação dos resíduos ao substrato (30, 60 e 90 dias), e correspondeu a nove tratamentos e três repetições, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Descrição dos tratamentos.

Tratamento	Descrição	Nº Rep
T1	Areia Normal Brasileira (ANB) nº 50 (ABNT NBR 7214:2015).	3
T2	Resíduo de rocha artificial produzida com ANB e resina epóxi.	3
T3	Resíduo de rocha artificial produzida com ANB e resina vegetal.	3
T4	Resíduo de granito.	3
T5	Resíduo de quartzito.	3
T6	Resíduo de rocha artificial produzida com granito e resina epóxi.	3
T7	Resíduo de rocha artificial produzida com quartzito e resina epóxi.	3
T8	Resíduo de rocha artificial produzida com granito e resina vegetal.	3
T9	Resíduo de rocha artificial produzida com quartzito e resina vegetal.	3

Ao término de cada período de incubação, foram semeadas dez sementes de milho (*Zea mays* L.) híbrido transgênico SHS Super RR, adquiridas comercialmente, em cada unidade experimental. Após a semeadura, os recipientes permaneceram em casa de vegetação, sendo mantidas as mesmas condições de irrigação e umidade adotadas durante a etapa de incubação, assim como para o monitoramento da temperatura, umidade e luminosidade do ambiente.

Cada unidade experimental foi constituída por recipientes plásticos contendo 700 g de Areia Normal Brasileira nº 50 homogeneizada aos respectivos resíduos, conforme descrição dos tratamentos.

As contagens de emergência das plântulas foram realizadas diariamente entre o quarto e o sétimo dia após a semeadura. Com base nessas avaliações, determinaram-se a porcentagem de emergência e o Índice de Velocidade de Emergência (IVE), conforme Maguire (1962). Ao sétimo dia após a semeadura, as plântulas foram classificadas em normais e anormais, de acordo com os critérios estabelecidos no Capítulo 4 das Regras para Análise de Sementes (RAS, 2025). O desenvolvimento inicial foi avaliado por meio da mensuração da altura da parte aérea, utilizando régua graduada, com os resultados expressos em centímetros.

As análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2025), por meio de análise de variância (ANOVA), sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em virtude da limitação de espaço desta versão do manuscrito e considerando o foco na avaliação agrônoma dos materiais, os resultados apresentados concentram-se nas variáveis relacionadas ao estabelecimento inicial das plântulas, objetivo central desta pesquisa.

O estabelecimento inicial das plântulas foi caracterizado pela porcentagem de emergência aos sete dias após a semeadura, pelo Índice de Velocidade de Emergência (IVE), pela curva de emergência acumulada e pela altura da parte aérea, permitindo avaliar, de forma integrada, a capacidade, a velocidade e a dinâmica da emergência, bem como o crescimento inicial das plântulas sob os diferentes tratamentos e períodos de incubação.

A emergência das plântulas foi influenciada pelo período de incubação dos materiais, com respostas distintas entre os tratamentos. Aos 30 DAI, os maiores percentuais de emergência foram observados nos tratamentos T2, T3, T4, T5 e T7, enquanto aos 60 dias após a incubação (DAI) houve redução significativa em T2, T7 e T8. Aos 90 DAI, apenas o tratamento T3 manteve desempenho inferior aos demais, indicando que os efeitos dos materiais sobre o estabelecimento inicial das plântulas variaram em função do tempo de incubação.

O Índice de Velocidade de Emergência (IVE) foi calculado de acordo com a metodologia proposta por Maguire (1962), utilizando-se as contagens diárias de plântulas emergidas entre o quarto e o sétimo dia após a semeadura. Após análise, não foram observadas diferenças significativas no IVE entre os tratamentos em nenhum dos períodos de incubação avaliados ($p > 0,05$), indicando que a velocidade de emergência das plântulas foi semelhante durante os sete dias após a semeadura.

Embora diferenças significativas tenham sido observadas na porcentagem final de emergência entre alguns tratamentos e períodos de incubação, tais variações não foram acompanhadas por alterações no Índice de Velocidade de Emergência (IVE), que permaneceu estatisticamente semelhante entre os tratamentos ($p > 0,05$). Esse resultado sugere que os materiais influenciaram predominantemente o estabelecimento final das plântulas, sem modificar a dinâmica da emergência ao longo do período avaliado, aspecto que pode ser melhor visualizado por meio da curva de emergência acumulada (Figura 1).

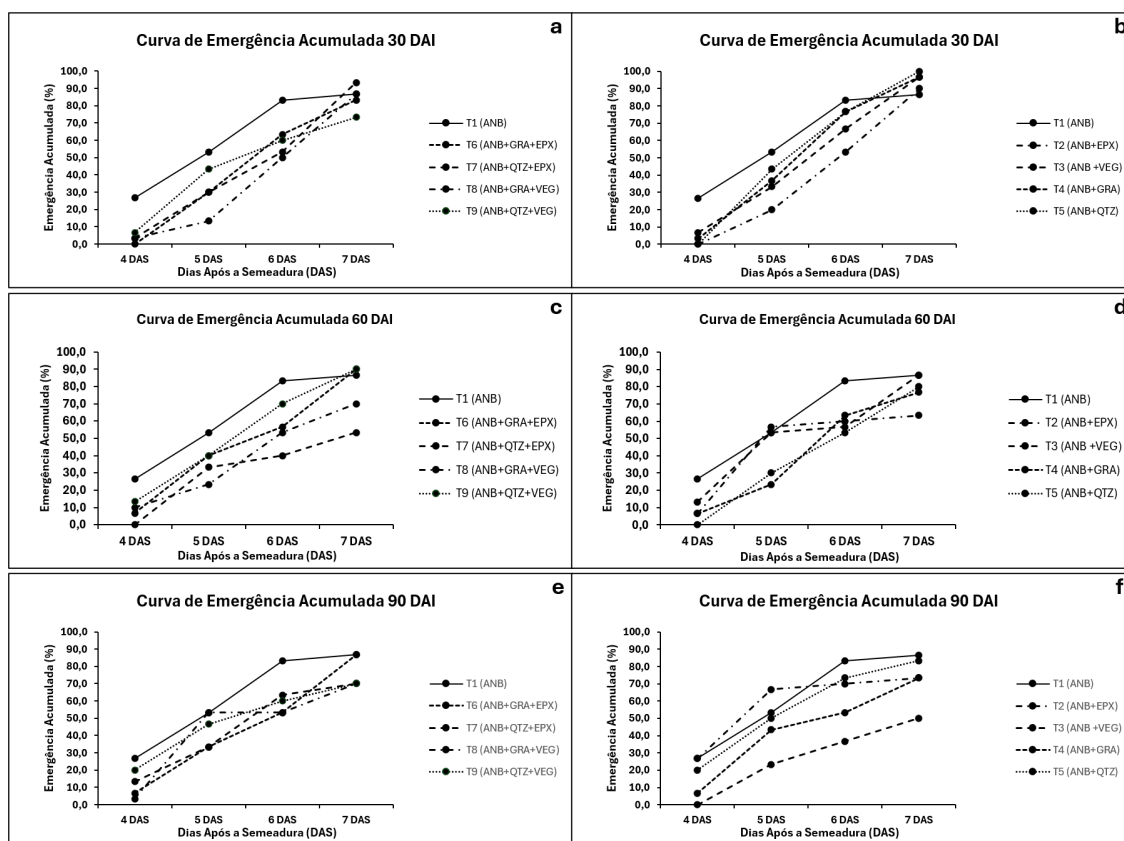


Figura 1. Dinâmica da emergência acumulada de plântulas de milho ao longo de sete dias após a semeadura, sob diferentes tratamentos e períodos de incubação dos materiais. Os painéis (a) e (b) representam os tratamentos incubados por 30 dias; (c) e (d), por 60 dias; e (e) e (f), por 90 dias. Os tratamentos foram divididos em dois grupos por período de incubação para melhorar a visualização das curvas. Quanto maior o IVE, mais rapidamente ocorreu a emergência das plântulas.

As curvas de emergência acumulada evidenciaram o comportamento temporal das plântulas sob os diferentes tratamentos e períodos de incubação, permitindo visualizar a evolução do estabelecimento inicial ao longo dos sete dias após a semeadura. Embora tenham sido observadas diferenças entre os tratamentos quanto ao percentual final de emergência, as curvas indicam que o processo ocorreu de forma semelhante ao longo do período avaliado, corroborando os resultados do Índice de Velocidade de Emergência (IVE), que não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos. Dessa forma, os materiais avaliados exerceram maior influência sobre o percentual de plântulas estabelecidas ao final da avaliação do que sobre a dinâmica temporal da emergência.

Em contraste com a porcentagem de emergência, a altura média das plântulas não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos em nenhum dos períodos de incubação avaliados ($p > 0,05$). Esse resultado indica que, embora alguns materiais tenham influenciado o estabelecimento inicial das plântulas, o crescimento da parte aérea das plântulas emergidas ocorreu de forma semelhante entre os tratamentos durante os sete dias de avaliação.

5. CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que o potencial agrônomo dos materiais avaliados foi influenciado pelo período de incubação, refletindo-se principalmente na porcentagem final de emergência das plântulas de milho. De modo geral, os resíduos minerais naturais de granito e quartzo apresentaram comportamento mais consistente ao longo dos diferentes períodos de incubação, enquanto alguns tratamentos contendo resinas epóxi e poliuretana vegetal apresentaram

reduções na emergência em períodos específicos. Em contrapartida, o Índice de Velocidade de Emergência (IVE) e a altura das plântulas não diferiram entre os tratamentos, indicando que, nas condições experimentais adotadas, os materiais influenciaram predominantemente a capacidade de estabelecimento das plântulas, sem comprometer a velocidade de emergência nem o desenvolvimento inicial das plântulas estabelecidas. Dessa forma, os resultados reforçam o potencial de aproveitamento agronômico dos resíduos minerais naturais e fornecem subsídios inéditos para a avaliação do comportamento agronômico de resíduos de rochas artificiais contendo matrizes poliméricas, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de valorização desses materiais e indicando a necessidade de investigações complementares sobre a influência das resinas em seu desempenho agronômico.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica; aos pesquisadores do Laboratório de Materiais do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/LABMAT), Lahís Menon e Bruno Mardegan, pelo apoio técnico; aos demais membros da equipe do Laboratório de Solos do CETEM (LABSOL), pela colaboração durante a execução do trabalho; e ao orientador, Guilherme Camara, pela orientação e acompanhamento da pesquisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais: Informe 06/2026. Brasília: Abirochas, 2026.

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.

CASTILHO, E. D. F.; Gadioli, M. C. B.; de Aguiar, M. C.; Agrizzi, C. P.; Vieira, C. M. F.; de Azevedo, A. R. G. Comparative analysis of the technological properties of natural and agglomerated stones in epoxy matrix. *Journal of Materials Research and Technology - JMR&T*, v. 31, p. 3149-3159, 2024.

GADIOLI, M. C. B.; Aguiar, M. C.; Giori, A. J. N.; Pazeto, A. A.; Fernandes, M. C. S. Rochas aglomeradas: uma alternativa tecnológica e ambiental para a utilização dos resíduos de rochas ornamentais. 1. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2021. v. 1. 44 p.

GADIOLI, M. C.; Agrizzi, C. P.; de Aguiar, M. C.; Lima, R. M.; Pedruzzi, A. D.; Ribeiro, C. E. Evaluation of the contents of ornamentals stones wastes and vegetable polyurethane resin in the production of engineered stones. *Journal of Building Engineering*, v. 78, p. 107594, 2023.

MARINATO, M.; Camara, G. R. 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.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.