

DINÂMICA DA DISPONIBILIDADE DE BORO PROVENIENTE DE RESÍDUO DE ROCHA ORNAMENTAL COMO FONTE ALTERNATIVA NA AGRICULTURA

DYNAMICS OF BORON AVAILABILITY FROM ORNAMENTAL STONE WASTE AS AN ALTERNATIVE BORON SOURCE FOR AGRICULTURE

Gabriel Souza Campos

Aluno de Graduação em Agronomia 6º período, UFES
Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: agosto de 2025 a julho de 2026
gabriel.s.campos@edu.ufes

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

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

Guilherme de Resende Camara

Coorientador, Agrônomo, D.Sc.
gcamara@cetem.gov.br

RESUMO

A geração de resíduos da extração de pegmatito e a elevada dependência brasileira da importação de fertilizantes minerais reforçam a necessidade de alternativas sustentáveis para o fornecimento de nutrientes à agricultura. Nesse contexto, objetivou-se avaliar a disponibilidade de boro proveniente de um resíduo da extração de pegmatito por meio de ensaio de incubação em Areia Normal Brasileira (ANB) e solo argiloso durante 150 dias. O experimento foi conduzido em delineamento fatorial $2 \times 3 \times 6$, utilizando três doses do material (0, 20 e 40 t ha⁻¹), seis épocas de avaliação e quatro repetições. A caracterização química por ICP-OES revelou teor de 34.664 mg kg⁻¹ de boro (3,5%). A aplicação do material promoveu incremento imediato nos teores de boro disponível em ambos os substratos, sendo os maiores valores observados na maior dose aplicada. Entretanto, a dinâmica da disponibilidade de boro não evidenciou aumento progressivo dos teores ao longo do período de incubação, indicando ausência de liberação gradual nas condições avaliadas. Conclui-se que o resíduo da extração de pegmatito apresenta potencial como fonte alternativa de boro, disponibilizando uma fração inicial do micronutriente, porém sem incremento contínuo da sua disponibilidade ao longo do tempo.

Palavras-chave: Agrominerais; economia circular; fertilidade do solo; micronutrientes.

ABSTRACT

The waste generated by pegmatite mining and Brazil's strong dependence on imported mineral fertilizers highlight the need for sustainable alternative nutrient sources for agriculture. In this context, this study evaluated boron availability from pegmatite mining waste through an incubation experiment conducted in Brazilian Standard Sand (BSS) and clay soil over 150 days. The experiment followed a $2 \times 3 \times 6$ factorial design, comprising three application rates (0, 20, and 40 t ha⁻¹), six evaluation periods, and four replicates. Chemical characterization by ICP-OES revealed a boron content of 34,664 mg kg⁻¹ (3.5%). The application of the material resulted in an immediate increase in available boron in both substrates, with the highest values observed at the highest application rate. However, boron availability did not increase progressively throughout the incubation period, indicating no evidence of gradual boron release under the evaluated conditions. The results indicate that pegmatite mining waste has potential as an alternative boron source, providing an initial readily available boron fraction but without a continuous increase in boron availability over time.

Keywords: Agrominerals; circular economy; soil fertility; micronutrients.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se entre os maiores produtores de rochas ornamentais do mundo, atividade de expressiva importância econômica, mas que gera elevados volumes de resíduos durante o beneficiamento das rochas (Abirochas, 2026), evidenciando a necessidade de alternativas para seu aproveitamento. Paralelamente, o agronegócio brasileiro permanece fortemente dependente da importação de fertilizantes minerais, condição que eleva os custos de produção e aumenta a vulnerabilidade do setor às oscilações do mercado internacional (Globalferti, 2021).

Nesse contexto, o aproveitamento de subprodutos da indústria de rochas ornamentais como fontes alternativas de nutrientes representa uma estratégia alinhada aos princípios da Economia Circular, agregando valor aos resíduos minerais e reduzindo a dependência de insumos externos (Camara et al., 2021). Entretanto, a baixa solubilidade dos minerais presentes nessas rochas limita a disponibilidade dos nutrientes às plantas e, conseqüentemente, sua eficiência agrônômica. Entre esses nutrientes, destaca-se o boro, micronutriente essencial ao crescimento e ao desenvolvimento vegetal e frequentemente deficiente nos solos brasileiros (Faquin, 2005).

A busca por fontes alternativas de nutrientes para o sistema solo-planta tem adquirido importância estratégica para a agricultura brasileira, sobretudo após as limitações no fornecimento internacional de fertilizantes observadas durante os conflitos entre Rússia e a Ucrânia, que evidenciaram a vulnerabilidade da dependência nacional de insumos importados. Nesse cenário, a avaliação de materiais minerais ricos em boro provenientes de subprodutos da cadeia de rochas ornamentais pode contribuir para o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis, conciliando o aproveitamento de resíduos minerais com a diversificação das fontes de nutrientes para a agricultura.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a disponibilidade de boro proveniente de um pegmatito, por meio de ensaio de incubação em Areia Normal Brasileira (ANB) nº 50 (ABNT NBR 7214:2015) e em solo argiloso, durante 150 dias, visando compreender a dinâmica temporal do boro disponível e o potencial desse material como fonte alternativa desse micronutriente para a agricultura.

3. METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em delineamento fatorial $2 \times 3 \times 6$, constituído por dois substratos (S1: Areia Normal Brasileira nº 50 – ANB e S2: solo argiloso), três doses de pegmatito (D0: 0,00 t ha⁻¹; D1: 20,00 t ha⁻¹; D2: 40,00 t ha⁻¹) e seis épocas de avaliação (EA0, EA30, EA60, EA90, EA120 e EA150), correspondentes a 0, 30, 60, 90, 120 e 150 dias de incubação, respectivamente. O pegmatito foi previamente cominuído conforme a Instrução Normativa MAPA nº 05/2016, sendo utilizado material com 100% das partículas passantes em peneira ABNT nº 50 (< 0,30 mm). As doses foram definidas de forma a ampliar a sensibilidade do ensaio para a avaliação da disponibilidade de boro proveniente do pegmatito durante o período de incubação.

Foram utilizadas quatro repetições, totalizando 36 combinações fatoriais e 144 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída por 300 g de substrato previamente seco ao ar, peneirado, homogeneizado ao respectivo tratamento e acondicionado em recipientes plásticos transparentes. O solo argiloso foi previamente caracterizado quanto aos seus atributos físicos e químicos, enquanto a Areia Normal Brasileira foi utilizada conforme especificação da ABNT NBR 7214.

As unidades experimentais permaneceram incubadas em casa de vegetação, sob incidência indireta de luz solar. Durante todo o período experimental, a umidade dos substratos foi mantida em aproximadamente 60% da capacidade de campo, enquanto a temperatura, a umidade relativa do ar e a luminosidade ambiente foram monitoradas continuamente por meio de *datalogger*, com registros realizados a cada 10 minutos. Em todos os recipientes foi mantida uma pequena abertura nas tampas para permitir a troca gasosa com o ambiente.

A cada 30 dias (épocas de avaliação), foram realizadas as análises da disponibilidade de boro no substrato. 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 Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise química do pegmatito por ICP-OES evidenciou teor de 34.664 mg kg⁻¹ de boro (3,5%), confirmando que o material constitui uma fonte expressiva desse micronutriente. Contudo, a presença de elevados teores totais não implica, necessariamente, elevada disponibilidade às plantas, uma vez que essa depende da mineralogia da fonte e dos processos físico-químicos que controlam a liberação e a permanência do elemento na solução do solo. Nesse contexto, a dinâmica da disponibilidade de boro foi avaliada por meio do ensaio de incubação.

As doses de pegmatito influenciaram significativamente ($p < 0,01$) os teores de boro disponível em ambos os substratos avaliados (Tabela 1). Em todas as épocas de avaliação, a aplicação do pegmatito promoveu incremento nos teores de B em relação à testemunha (D0), sendo os maiores valores observados na maior dose aplicada (D2), seguida por D1. Esses resultados demonstram que o pegmatito apresenta boro potencialmente disponível ao sistema, evidenciando seu potencial como fonte alternativa desse micronutriente.

Tabela 1: Disponibilidade de boro em Areia Normal Brasileira (ANB) e solo argiloso submetidos à aplicação de diferentes doses de pegmatito durante 150 dias de incubação.

DOSE	Época de Avaliação (dias)											
	EA0		EA30		EA60		EA90		EA120		EA150	
D0	0,0100	cA	0,0500	cA	0,0325	cA	0,0925	cA	0,0950	cA	0,000	cA
D1	0,6025	bA	0,3425	bB	0,3700	bB	0,6525	bA	0,4125	bB	0,2600	bB
D2	1,0450	aA	0,7700	aB	0,8275	aB	0,9525	aA	0,7000	aB	0,6450	aB
F	45.3989**											
CV%	23.62											

DOSE	Época de Avaliação (dias)											
	EA0		EA30		EA60		EA90		EA120		EA150	
D0	0,2400	cA	0,3400	cA	0,2525	cA	0,2475	cA	0,3475	bA	0,1700	cA
D1	0,6400	bA	0,5575	bA	0,5400	bA	0,5350	bA	0,5250	bA	0,4300	bA
D2	1,3750	aA	0,8575	aB	0,8575	aB	0,9050	aB	0,8950	aB	0,6725	aC
F	25.5240**											
CV%	21.49											

Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Foi aplicado o Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$).

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$).

^{ns} não significativo ($p \geq 0,05$).

Entretanto, a dinâmica da disponibilidade de boro observada durante os 150 dias de incubação não evidenciou comportamento compatível com uma fonte de liberação gradual. Tanto na Areia Normal Brasileira quanto no solo argiloso, os maiores teores de B disponível foram registrados na instalação do experimento (EA0), especialmente na dose D2, seguidos por oscilações e, de maneira geral, tendência de redução ao longo do período de incubação (Figura 1). Apesar das variações observadas entre as épocas de avaliação, não ocorreu incremento progressivo da disponibilidade de B, indicando que o pegmatito não promoveu aumento contínuo da fração disponível do micronutriente nas condições avaliadas.

É importante destacar que este estudo avaliou a fração operacionalmente disponível de boro, determinada pelo método de análise de solo, e não o teor total do elemento presente no sistema. Assim, a redução dos teores de B disponível ao longo da incubação não deve ser interpretada como perda do nutriente, uma vez que o experimento foi conduzido em sistema fechado, sem possibilidade de lixiviação. Os resultados sugerem, portanto, que ocorreu redistribuição do boro entre diferentes compartimentos do sistema, reduzindo a fração prontamente disponível sem, necessariamente, alterar seu conteúdo total.

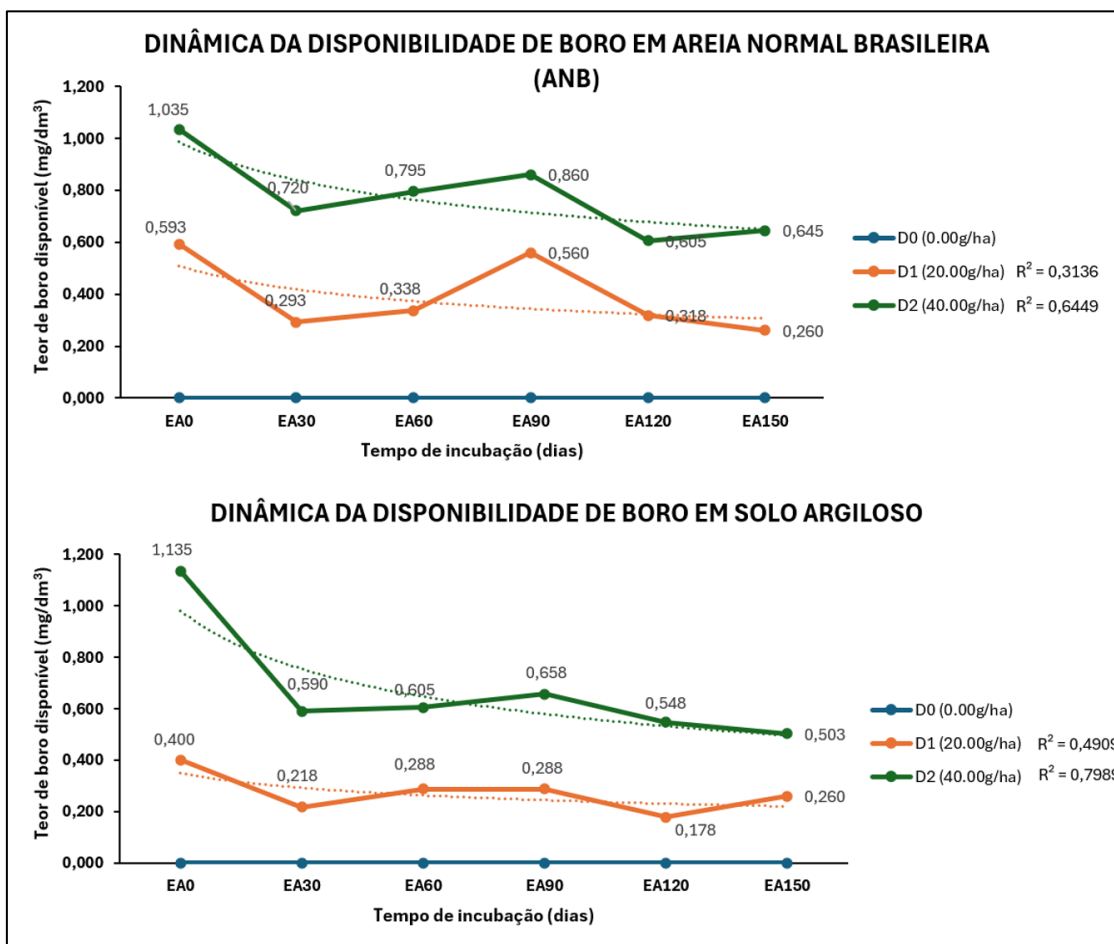


Figura 1: Dinâmica da disponibilidade de boro em Areia Normal Brasileira (ANB) e solo argiloso após a aplicação de diferentes doses de pegmatito durante 150 dias de incubação.

Esse comportamento pode ser explicado pela natureza mineralógica do pegmatito. O boro encontra-se predominantemente associado a minerais borossilicáticos, nos quais está incorporado à estrutura cristalina e depende do intemperismo para sua liberação. Dessa forma, após a disponibilização da fração mais lábil do material, o sistema tende a estabelecer um novo equilíbrio entre as fases sólida e líquida, reduzindo a concentração de boro prontamente extraível. Além da limitada dissolução do mineral, processos como adsorção específica às superfícies minerais, difusão para sítios menos acessíveis e envelhecimento químico provavelmente contribuíram para a redução da disponibilidade do elemento ao longo do tempo.

As oscilações observadas durante a incubação também podem estar relacionadas às alterações do pH dos substratos decorrentes da aplicação do pegmatito. A disponibilidade de boro é fortemente influenciada pelo potencial hidrogeniônico do meio, uma vez que modificações no pH alteram os processos de adsorção e dessorção do elemento nas superfícies minerais. Assim, variações no pH ao longo da incubação podem ter modificado temporariamente o equilíbrio entre o boro presente na solução e aquele retido na fase sólida, contribuindo para as flutuações observadas nos teores determinados analiticamente.

Embora o solo argiloso apresente maior capacidade de retenção de boro em razão de sua maior superfície específica e da presença de óxidos de ferro e alumínio, o comportamento temporal foi semelhante ao observado na Areia Normal Brasileira. Em ambos os substratos, verificou-se incremento inicial da disponibilidade de B após a aplicação do pegmatito, seguido por estabilização ou redução dos teores durante o período experimental. Esses resultados sugerem que, nas condições avaliadas, a mineralogia da fonte exerceu maior influência sobre a disponibilidade do boro do que as diferenças texturais entre os substratos.

De forma geral, os resultados evidenciam que o pegmatito apresenta capacidade de disponibilizar boro imediatamente após sua aplicação, porém não evidenciam aumento progressivo da disponibilidade desse micronutriente durante os 150 dias de incubação. Esse comportamento indica que a fração inicialmente disponível representa apenas uma parcela do boro presente no material, permanecendo a maior parte do elemento retida na estrutura mineral e, conseqüentemente, indisponível em curto prazo.

5. CONCLUSÃO

O pegmatito apresentou capacidade de disponibilizar boro imediatamente após sua aplicação, evidenciando seu potencial como fonte alternativa desse micronutriente. No entanto, a dinâmica da disponibilidade de boro durante os 150 dias de incubação não evidenciou aumento progressivo dos teores disponíveis, indicando ausência de liberação gradual nas condições avaliadas. Esses resultados demonstram que o material apresenta uma fração de boro prontamente disponível, enquanto a maior parte do elemento permanece retida na estrutura mineral ou em formas menos disponíveis ao longo do período de incubação.

6. AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica; ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), em especial, à equipe do Laboratório Multiusuário de Solos (LABSOL), pelo suporte técnico; aos pesquisadores Leonardo Silveira e Guilherme Camara, pela orientação 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.

CAMARA, G. R.; FAITANIN, B. X.; SILVEIRA, L. L. L.; CHIODI FILHO, C.; SANTOS, E. S. Utilização de rochas ornamentais ricas em minerais potássicos como fonte alternativa de insumo agrícola via rochagem – Parte I. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021.

FAQUIN, V. Nutrição mineral de plantas. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005.

GLOBALFERT. Outlook GlobalFert 2021: 2º reporte anual do mercado de fertilizantes – 2021. Brasília: GlobalFert, 2021.

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