



## Lixiviação e Disponibilidade de Boro em Função de Fontes e Características de Solos<sup>(1)</sup>.

Cleide Aparecida de Abreu<sup>(2)</sup>; Camila Prado Cenciani de Souza<sup>(3)</sup>; Cristiano Alberto de Andrade<sup>(4)</sup>; Ricardo Rossi<sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Trabalho executado com recursos da Mineração Morro Azul. <sup>(2)</sup> Pesquisadora do Instituto Agronômico de Campinas; Campinas, SP; [cleide@iac.sp.gov.br](mailto:cleide@iac.sp.gov.br); <sup>(3)</sup> Doutoranda do Instituto Agronômico de Campinas; Campinas, SP; [ccencian@yahoo.com.br](mailto:ccencian@yahoo.com.br); <sup>(4)</sup> Pesquisador da EMBRAPA Meio Ambiente; Jaguariúna, SP; [cristiano.andrade@embrapa.br](mailto:cristiano.andrade@embrapa.br). Gerente Agrônomo da Mineração Morro Azul Ltda; [ricardo.rossi@forzafert.com.br](mailto:ricardo.rossi@forzafert.com.br).

**RESUMO:** A lixiviação de B no solo em função da aplicação de fontes solúveis em água é uma preocupação relevante enquanto que a disponibilidade desse elemento no solo a partir da aplicação de fontes pouco solúveis é uma dúvida. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o potencial de lixiviação e a disponibilidade de B no Neossolo Quartzarênico Órtico Típico (NQOT, textura arenosa), no Gleissolo Melânico Distrófico Típico (GMDT, textura argilosa) e no Latossolo Vermelho Eutroférico Típico (LVET, textura muito argilosa) em função da aplicação das fontes ulexita, ácido bórico e da hidroboraçita fundida com rocha fosfática (termofosfato, produto comercial Optein). O experimento foi montado em colunas cilíndricas de PVC (5 cm de diâmetro e 19,5 cm de altura) onde foi adicionado 317 cm<sup>3</sup> de solo e no topo da coluna misturou 20 cm<sup>3</sup> de solo com a fonte de B na dose de 4 mg dm<sup>-3</sup> de B. A coluna foi saturada e realizada 10 lixiviações com CaCl<sub>2</sub> 0,005 mol L<sup>-1</sup>. Na solução lixiviada foi determinada a concentração de B e no solo o teor de B disponível (extrator água quente). Em todos os solos a hidroboraçita em termofosfato apresentou a menor quantidade de B lixiviado enquanto o ácido bórico, a maior. A disponibilidade de B residual no solo foi maior na hidroboraçita em termofosfato. Em função disso, os autores concluem que a hidroboraçita em termofosfato apresenta potencial de uso como fonte de B sujeita a menores perdas por lixiviação e cuja disponibilidade residual no solo se mostrou elevada.

**Termos de indexação:** hidroboraçita, ulexita, ácido bórico.

### INTRODUÇÃO

A disponibilidade de boro (B) é relacionada principalmente com o compartimento orgânico edáfico e não raramente solos agrícolas exibem concentrações desse micronutriente consideradas insatisfatórias. Em levantamento realizado por Abreu et al. (2005), de 13.416 amostras de solos provenientes de 21 estados brasileiros, 40% apresentaram baixos teores de B disponível (<0,2 mg dm<sup>-3</sup>). No solo, o B é encontrado nos minerais silicatados, adsorvido em argilominerais e na

materia orgânica (MO) e nos hidróxidos de alumínio e ferro (Dechen & Nachtigall, 2007). O B disponível encontra-se nas camadas superficiais dos solos bem drenados e a MOS constitui importante fonte desse elemento para as plantas (Vanderlei et al., 1988). À valores de pH entre 8 e 9 há precipitação de B (Dechen & Nachtigall, 2007).

A textura do solo também exerce influencia na disponibilidade de B, sendo esperada menor disponibilidade de B com o aumento do teor de argila, função da adsorção na superfície de óxidos de Fe e hidróxidos de Fe e Al (Dechen & Nachtigall, 2007). Em solos arenosos pode haver lixiviação excessiva do nutriente em função de altas precipitações.

As principais fontes de B aplicadas no solo são colemanita, ulexita e ácido bórico. A colemanita e a ulexita são fontes pouco solúveis em água, enquanto, o ácido bórico é totalmente solúvel, o que pode representar risco de perda de B no perfil do solo em solos de textura arenosa e sob condições de elevada precipitação. Por outro lado, há dúvidas se fontes menos solúveis devem ter compensação na dose para ofertar a mesma disponibilidade de B proporcionada por uma fonte solúvel.

Em função dos poucos resultados obtidos no Brasil sobre este assunto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar o potencial de lixiviação e a disponibilidade de B em três tipos de solo e a partir de duas fontes convencionais do nutriente (ulexita e ácido bórico) e uma fonte alternativa, a hidroboraçita fundida com rocha fosfática (termofosfato - produto comercial Optein).

### MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em laboratório no Instituto Agronômico em Campinas/SP. Os solos avaliados (0-20 cm) foram o Neossolo Quartzarênico Órtico Típico (NQOT) de textura arenosa, o Gleissolo Melânico Distrófico Típico (GMDT) de textura argilosa e o Latossolo Vermelho Eutroférico Típico (LVET) de textura muito argilosa, sendo que esses solos apresentaram teores de B em mg dm<sup>-3</sup> de 0,1; 0,2 e 0,3 e de MO em g dm<sup>-3</sup> de 13, 73 e 41, respectivamente, usando o extrator água quente para B (Abreu et al. 1994) e extração com ácido



sulfúrico e dicromato de potássio (método colorimétrico) para MO (Raij et al., 2001).

Para os solos NQOT e GMDT foi necessária aplicação de mistura 3:1 de carbonato de Ca e carbonato de Mg para correção da acidez, resultando na elevação do pH em  $\text{CaCl}_2$  a 5,7 no NQOT e de 4,6 no GMDT. O LVET não recebeu calagem pois o seu pH original foi de 5,0.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 3 solos x 3 fontes de B, além de tratamento adicional sem adição de B (controle). O experimento foi montado com três repetições, num total de 36 unidades experimentais. As fontes de B consistiram em hidroboracita em termofosfato (produto comercial Optein), ulexita e ácido bórico.

A dose de B avaliada foi de  $4 \text{ mg dm}^{-3}$  de B. Os fertilizantes apresentaram teores de B extraídos em HCl (Brasil, 2015) de 0,6% e 10% para as fontes hidroboracita em termofosfato e ulexita. O ácido bórico apresentou 18% de B solúvel em água (Brasil, 2015). Além de B, a hidroboracita em termofosfato continha  $\text{P}_2\text{O}_5$ , Fe, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn e Ni cujos teores (em % massa/massa) extraídos em HCl (Brasil, 2015) foram respectivamente iguais em % de 17,5; 6,2; 19,2; 7,8; 0,5; 0,02; 0,17 e 0,05.

A disponibilidade do B e o potencial de perda por lixiviação a partir das fontes foi avaliada por meio de experimentação em colunas de PVC de formato cilíndrico (5 cm de diâmetro e 19,5 cm de altura). Em sua base colocou-se uma tela fina de plástico, manta bidim e sob esses materiais uma camada de 1 cm de sílica ( $20 \text{ cm}^3$ ) para facilitar a drenagem dos lixiviados. Sobre a camada de sílica acondicionou-se uma coluna de 16,5 cm de solo e sobre essa em um anel de 1 cm de altura misturou-se  $20 \text{ cm}^3$  de solo com o fertilizante. No centro do topo da coluna foi colocado um pedaço circular de manta bidim de 2,0 cm de diâmetro para evitar que a percolação dos lixiviados ocorresse nas paredes da coluna. Cada coluna recebeu  $317 \text{ cm}^3$  de solo. A base da coluna de PVC foi fechada com tampa adaptada que continha abertura onde foi conectada mangueira plástica flexível para coleta dos lixiviados.

Cada coluna foi inicialmente saturada por gotejamento com solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,005 \text{ mol L}^{-1}$ . Em seguida foram realizadas 10 lixiviações por gotejamento com a mesma solução de  $\text{CaCl}_2$  utilizada para saturação, mantendo-se o intervalo de 1 hora entre elas. O volume de solução lixiviada foi aproximadamente 150 mL por evento de lixiviação e por coluna. Depois de finalizadas as lixiviações, as colunas foram desmontadas e a terra foi seca em temperatura ambiente (TFSA), passada em peneira de 2 mm e amostrada para análise de B disponível, extraído em água quente (Abreu et al., 1994). O teor de B, tanto nos lixiviados como no solo, foi

determinado utilizando ICP-OES. Considerando o volume lixiviado em cada coluna e a concentração de B nos lixiviados ( $\text{mg L}^{-1}$ ) foi calculada a quantidade de B lixiviada ( $\text{mg coluna}^{-1}$ ).

Os dados foram submetidos à análise de variância considerando-se o delineamento inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 3 x 3 (solos x fontes), com parcelas subdivididas (número de lixiviações). Posteriormente os resultados foram comparados por meio de Tukey 5% para os fatores qualitativos solos e fontes e utilizada análise de regressão para o fator quantitativo número de lixiviações. Os modelos de regressão testados foram linear e de cinética química de primeira ordem, sendo este último mostrado em seguida:

$$y = B_{ac} * (1 - e^{-kL}) \text{ em que,}$$

$B_{ac}$  = B acumulado lixiviado;

k = constante de velocidade da lixiviação;

L = número de lixiviações.

Os resultados dos controles (somente solo no interior das colunas) foram utilizados para isolar as quantidades de B lixiviadas a partir das fontes.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

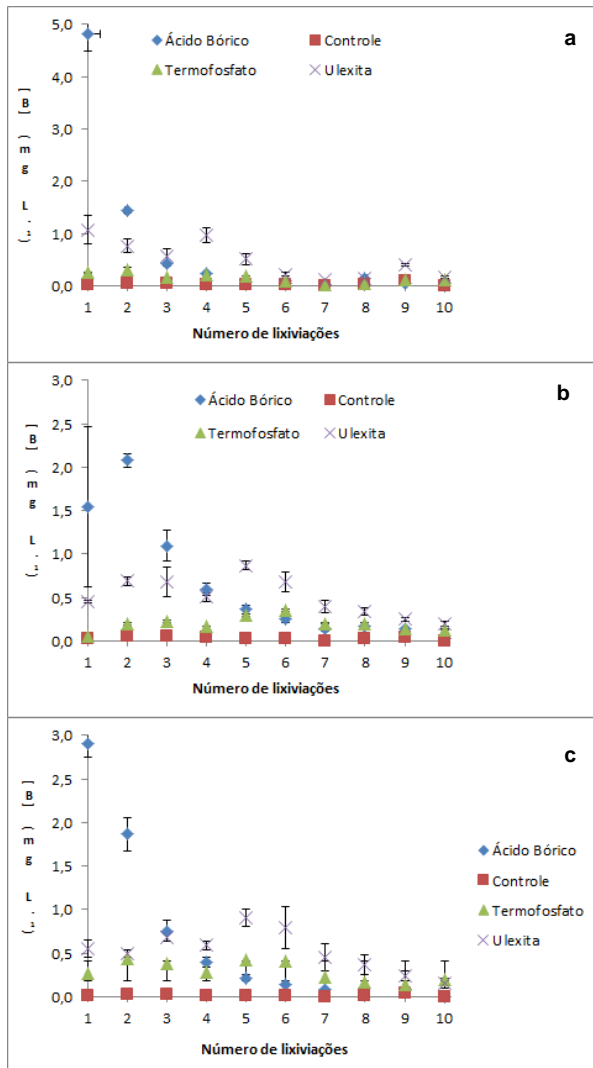
A concentração de B nas três primeiras lixiviações independentemente do tipo de solo foi maior no ácido bórico que liberou prontamente o B em comparação às demais fontes (Figura 1). A ulexita, seguida da hidroboracita em termofosfato apresentou liberação menor e gradual de B nos solos avaliados (Figura 1). Esse comportamento é associado às diferenças de solubilidade entre as fontes, em que o ácido bórico é muito solúvel e as demais fontes de menor solubilidade. O tratamento controle apresentou a menor concentração de B nos lixiviados (Figura 1).

O total de B lixiviado do fertilizante foi superior no ácido bórico, seguido da ulexita e por último da hidroboracita em termofosfato (Tabela 1).

Houve efeito de solo para o B lixiviado acumulado considerando a mesma fonte (Tabela 1). O ácido bórico nas cinco primeiras lixiviações apresentou a maior quantidade de B lixiviada no NQOT, seguido do GMDT e do LVET (Tabela 1). A partir da 6ª até a 10ª lixiviação, para o ácido bórico, não foram detectadas diferenças no B lixiviado acumulado entre o GMDT e o LVET (Tabela 1). A ulexita apresentou a maior quantidade de B acumulado lixiviado no NQOT, seguido do GMDT que não diferiu do LVET até a 5ª lixiviação (com exceção da 3ª lixiviação) (Tabela 1). A partir da 7ª lixiviação o B acumulado nas colunas tratadas com ulexita passa a ser maior no GMDT seguido do LVET (Tabela 1). A hidroboracita em termofosfato apresentou a maior quantidade de B acumulado no GMDT na quase totalidade das lixiviações, em

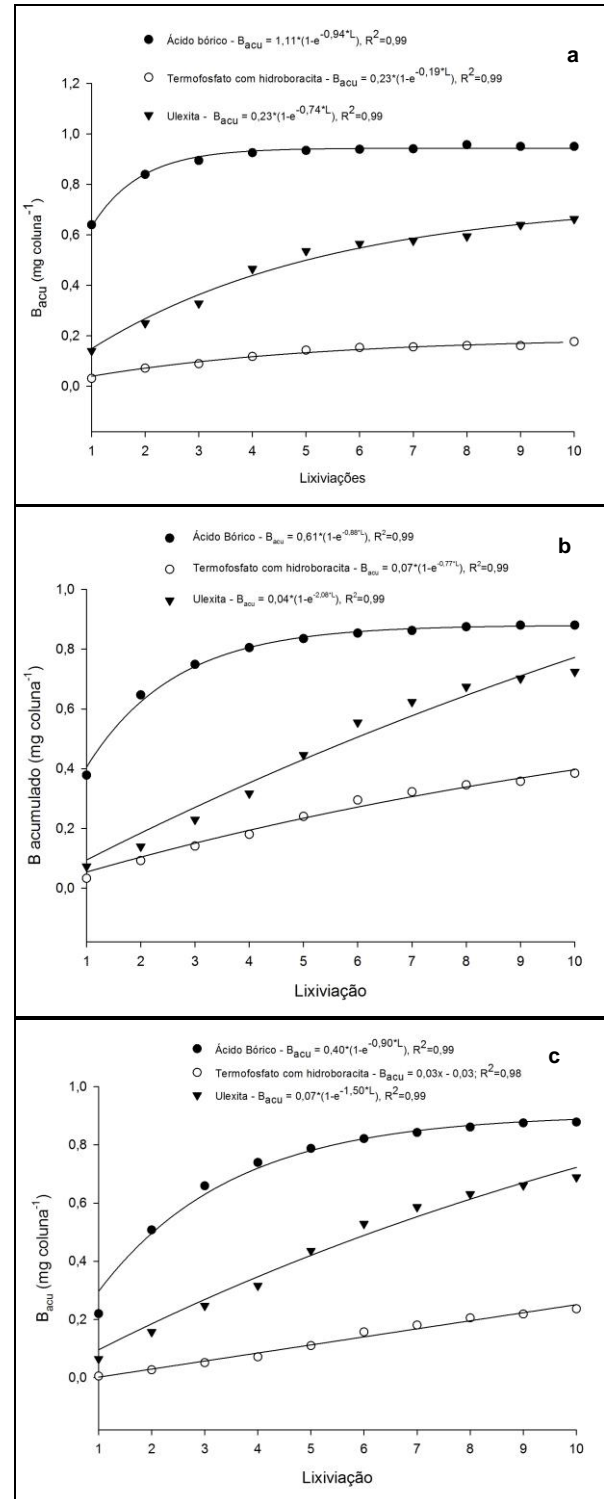
comparação com os demais solos (Tabela 1). Entre a quinta e a sétima lixiviações não houve diferença para o B acumulado a partir da fonte hidroboracita em termofosfato nos solos LVET e no NQOT, e nas ultimas lixiviações ocorreu o efeito contrário (Tabela 1).

em termofosfato esses valores são de 0,9 e 3,6 lixiviações, respectivamente.



**Figura 1** - Concentração de boro nos lixiviados coletados do NQOT (a), do LVET (b) e do GMDT (c).

Os modelos de cinética química de primeira ordem evidenciaram que o B potencialmente máximo lixiviado ( $B_{acu}$ ) e a constante de velocidade da lixiviação ( $k$ ) no NQOT foi maior no solo tratado com ácido bórico (Figura 2a). Os valores de  $B_{acu}$  no NQOT nas colunas onde foi aplicado ulexita e hidroboracita em termofosfato foram muito semelhantes, no entanto o valor de  $K$  foi maior na ulexita (Figura 2a). Esse fato também é evidenciado com os valores de  $\frac{1}{2}$  vida ( $\ln 2/k$ ) no NQOT em que para o ácido bórico em 0,7 lixiviação é lavado 50% do  $B_{acu}$ , enquanto nas fontes ulexita e hidroboracita



**Figura 2** – Boro acumulado nos lixiviados no NQOT (a), no LVET (b) e no GMDT (c) em função das fontes aplicadas.

No LVET e no GMDT o ácido bórico apresentou comportamento semelhante (Figuras 2b e 2c). A ulexita embora tenha apresentado os maiores valores de K no LVET e no GMDT, apresentou baixo  $B_{acu}$  em ambos os solos. A hidroboracita em termofosfato apresentou lixiviação de B que se adequou ao modelo linear no LVET.

Quanto ao B disponível residual no solo (extrator água quente), os resultados revelaram que independentemente do tipo de solo a hidroboracita em termofosfato evidenciou os maiores teores de B disponível (Tabela 1), sendo que no GMDT o teor não diferiu do tratamento controle – o que pode ser atribuído ao B liberado da MOS em função do alto teor nessa nesse solo ( $73 \text{ g dm}^{-3}$ ) (Tabela 1). O tratamento controle apresentou o menor teor de B no NQOT e não diferiu estatisticamente da ulexita no LVET (Tabela 1).

**Tabela 1.** Boro lixiviado acumulado do fertilizante e teores disponíveis de B residuais no solo em função do tipo de solo, da fonte aplicada e do número de lixiviações.

B (mg B coluna <sup>-1</sup> ) do NQOT (textura arenosa)											
L/F	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	*B <sub>solo</sub>
Co	-----										0,10cC
Ule	0,14bA	0,25bA	0,33b	0,47bA	0,54bA	0,56bA	0,58bB	0,59bC	0,64bB	0,66b	1,00b
HT	0,03c	0,07cA	0,09cB	0,12cB	0,14cB	0,15cB	0,16cB	0,16cC	0,16cC	0,18c	1,73aA
AB	0,64aA	0,84aA	0,89aA	0,93aA	0,93aA	0,94aA	0,94aA	0,96aA	0,95aA	0,95a	1,04bA
B (mg B coluna <sup>-1</sup> ) do LVET (textura muito argilosa)											
Co	-----										0,70bB
Ule	0,06bB	0,16bB	0,25b	0,32bB	0,44bB	0,53bC	0,59bB	0,63bB	0,66bB	0,69b	0,79b
HT	0,01c	0,03cB	0,05cC	0,07cC	0,11cB	0,16cB	0,18cB	0,21cB	0,22cB	0,24c	1,74aA
AB	0,22aC	0,51aC	0,66aC	0,74aC	0,79aC	0,82aB	0,84aB	0,86aB	0,88aB	0,88a	0,69bB
B (mg B coluna <sup>-1</sup> ) do GMDT (textura argilosa)											
Co	-----										1,21aA
Ule	0,07bB	0,14bB	0,23b	0,32bB	0,45bB	0,55bA	0,62bA	0,67bA	0,70bA	0,72b	0,81b
HT	0,03c	0,09cA	0,14cA	0,18cA	0,24cA	0,29cA	0,32cA	0,35cA	0,36cA	0,38c	1,38aB
AB	0,38aB	0,65aB	0,75aB	0,81aB	0,84aB	0,85aB	0,86aB	0,87aB	0,88aB	0,88a	0,47cB

\*B<sub>solo</sub>: teor de B disponível residual no solo (extrator água quente) em mg dm<sup>-3</sup> após desmontagem das colunas. Ule: ulexita. HT: hidroboracita em termofosfato. AB: ácido bórico. Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey com 95% de probabilidade para o fator fonte de B e tipo de solo. A ausência de letras indica que não houve diferença estatística entre os parâmetros avaliados.

## CONCLUSÕES

A disponibilidade de boro no solo foi regulada pelo potencial de lixiviação desse nutriente a partir das fontes com diferentes solubilidades, em que o ácido bórico proporcionou as maiores perdas de B, enquanto a hidroboracita em termofosfato (produto comercial Optein) se mostrou menos solúvel; e, portanto, a hidroboracita em termofosfato apresenta potencial de uso como fonte de B sujeita a menores perdas por lixiviação e cuja disponibilidade residual no solo se mostrou elevada.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Mineração Morro Azul Ltda pelo suporte financeiro da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; RAIJ, B. van; BATAGLIA, O. C. Extraction of boron from soil by microwave heating for ICP-AES determination. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 25:3321-3333, 1994.
- ABREU, C. A.; RAIJ, B. van; ABREU, M. F.; GONZÁLEZ, A. P. Routine Soil Test to Monitor Heavy Metals and Boron. *Scientia Agricola*, 62:6:564-571, 2005.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 03, de 26 de Janeiro de 2015. Aprovar os métodos oficiais para realização de ensaios em amostras oriundas do controle oficial de fertilizantes e corretivos, constantes do Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos indexado ao International Standard Book Number (ISBN) sob o número 978-85-7991-081-4. *Diário Oficial da União* de 27/01/2015.
- DECHEN, A.R. & NACHTIGALL, G.R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.A.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. eds. *Fertilidade do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, UFV, 2007 p. 91-132.