



JESSICA GABRIELA PIMENTEL CONTINS

**DINÂMICA DA LIXIVIAÇÃO DE BORO POR DIFERENTES
FONTES APLICADAS EM SOLOS CONTRASTANTES**

**LAVRAS - MG
2021**

JESSICA GABRIELA PIMENTEL CONTINS

**DINÂMICA DA LIXIVIAÇÃO DE BORO POR DIFERENTES FONTES APLICADAS
EM SOLOS CONTRASTANTES**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Agronomia, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva
Orientador

MSc. Leonardo Fernandes Sarkis
Coorientador

**LAVRAS - MG
2021**

JESSICA GABRIELA PIMENTEL CONTINS

**DINÂMICA DA LIXIVIAÇÃO DE BORO POR DIFERENTES FONTES APLICADAS
EM SOLOS CONTRASTANTES
*DYNAMICS OF BORON LEACHING BY DIFFERENT SOURCES APPLIED IN
CONTRASTING SOILS***

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Agronomia, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 12 de novembro de 2021

MSc. Leonardo Fernandes Sarkis	UFLA
Dr. André Baldansi Andrade	UFLA
MSc. Ana Paula Pereira Nunes	UFLA
MSc. Adrienne Braga da Fonseca	UFLA

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva
Orientador

**LAVRAS - MG
2021**

A Deus que me fortaleceu, a minha família que sempre acreditou em mim, a UFLA pela oportunidade, aos professores e alunos da pós graduação que foram a base de todo meu aprendizado, e aos amigos que fizeram a trajetória ser mais leve.
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois se não fosse a bondade Dele eu sei que não estaria vivendo este momento. Sou grata por todas as oportunidades que Ele tem me permitido ter na vida, por todo cuidado, amor e por cuidar de mim em todos os momentos.

Aos meus pais Gisely Pimentel Contins e Gaspar Contins por acreditarem em mim e apoiarem todos os meus sonhos. A minha avó Delma Pimentel Ricardo que sempre me incentivou a estudar e buscar ser uma pessoa melhor.

Agradeço aos meus irmãos (Joyce, Leandro, Jefferson, Wanderson, Washington e Karine), ao meu noivo (Luiz Felipe), meus sogros (Margareth e Sidney), pela paciência e por terem me ajudado a perseverar, pois não foram anos fáceis.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelas inúmeras oportunidades que tive, não apenas de cursar um renomado curso de Agronomia, mas também por todo suporte da assistência estudantil (moradia, alimentação, bolsas) ao longo desses anos.

Ao Departamento de Agricultura por oferecer um curso tão robusto e por apoiar tantas iniciativas de palestras e cursos que me fizeram ampliar mais meus conhecimentos.

Agradeço ao Departamento Ciência do Solo pelos anos de iniciação científica, foi um divisor de águas na minha vida profissional ter aprendido tanto nesse departamento com os professores e colegas da pós-graduação.

Agradeço imensamente ao meu orientador Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva, ao meu coorientador MSc. Leonardo Fernandes Sarkis e aos companheiros de trabalho do Laboratório de Corretivos e Fertilizantes pela oportunidade, por me apoiarem durante a Iniciação Científica e acreditarem neste trabalho. Obrigada por este período de experiências, aprendi muito com vocês.

Agradeço ao professor Dr. Alfredo Scheid Lopes (*in memoriam*) por cada livro, cada incentivo, cada abraço fraterno, cada conselho pessoal e profissional. Foi uma honra ter no senhor um grande amigo e mentor.

Agradeço também ao Núcleo de Estudos em Ciência do Solo e a Terra Júnior Consultoria Agropecuária por todo conhecimento compartilhado e oportunidades.

As amigas de apartamento (Barbara, Isa, Poly, Karen, Débora e Larissa) que conviveram comigo todos os dias e que nunca me deixaram desistir.

A todos que me ajudaram a crescer e contribuíram para que esse momento acontecesse.

MUITO OBRIGADA!

*“O que torna um sonho irrealizável não é o
sonho em si, mas sim, a inércia de quem
sonha. Não sejam inertes!”
Alfredo Scheid Lopes*

RESUMO

A lixiviação de boro (B) é um dos principais desafios para o suprimento deste nutriente na agricultura. O objetivo deste trabalho foi analisar a dinâmica da lixiviação de B e a eficiência de aproveitamento deste nutriente pela soja, a partir da aplicação de diferentes fontes de fertilizantes em solos com texturas e teores de matéria orgânica (MOS) contrastantes. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC) com quatro repetições. As unidades experimentais consistiram em colunas de PVC preenchidas com solo e cultivadas com soja. Foram adotados quatro tipos de solos (argiloso + alto MOS, argiloso + baixo MOS, arenoso + alto MOS e arenoso + baixo MOS) e cinco tratamentos, sendo uma testemunha e quatro fontes de B: Procote, Ulexita, Bor Solo, Ácido bórico. A dose utilizada foi de 6 kg ha⁻¹ de B (0,02 g de B por coluna), sendo aplicada na superfície do solo. Foram realizadas simulações de chuva e a solução lixiviada foi coletada por recipientes instalados na base das colunas. O volume do lixiviado foi aferido e, posteriormente, as concentrações de B desta solução foram determinadas por ICP. Os índices de eficiência agrônômica (IEA) e a recuperação do boro aplicado (RBA) foram calculados a partir dos acúmulos de B pela soja e lixiviação acumulada, respectivamente, descontando-se as testemunhas. Os solos arenosos apresentaram as maiores lixiviações acumuladas ao longo do tempo. Apenas o solo argiloso com alto teor de MOS não teve maiores IEA e RBA em relação a testemunha.

Palavras-chave: ácido bórico; tecnologias para fertilizantes; eficiência de uso de B

ABSTRACT

Boron (B) leaching is one of the main challenges for the supply of this nutrient in agriculture. The objective of this work was to analyze the dynamics of B leaching and the efficiency of utilization of this nutrient by soybean, from the application of different sources of fertilizers in soils with contrasting textures and organic matter (MOS) contents. The experimental design used was completely randomized (DIC) with four replications. The experimental units consisted of PVC columns filled with soil and cultivated with soybeans. Four types of soils (clay + high MOS, clay + low MOS, sandy + high MOS and sandy + low MOS) and five treatments were adopted, with a control and four sources of B: Procote, Ulexite, Bor Solo, Boric acid. The dose used was 6 kg ha⁻¹ of B (0.02 g of B per column), being applied on the soil surface. Rain simulations were carried out and the leached solution was collected in containers installed at the base of the columns. The leachate volume was measured and, subsequently, the B concentrations of this solution were determined by ICP. The agronomic efficiency indices (IEA) and the applied boron recovery (RBA) were calculated from the accumulations of B by soybean and accumulated leaching, respectively, discounting the controls. Sandy soils had the highest accumulated leaching over time. Only the clayey soil with high MOS content did not have higher IEA and RBA in relation to the control.

Keywords: boric acid; technologies for fertilizers; efficiency of use of B

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do experimento.	6
Figura 2 - Colunas de lixiviação.	6
Figura 3 - Furos para semeadura da soja.	8
Figura 4 - Semeadura da soja.	8
Figura 5 - Soja após germinação, antes do desbaste.	9
Figura 6 - Soja após o desbaste.	9
Figura 7 - Amostras secando em estufa.....	10
Figura 8 - Amostras após secagem.	10
Figura 9 - Pesagem das amostras.	10
Figura 10 - Comparativo entre solos com tratamento de Bor Solo. Da esquerda para a direita: argiloso com baixa MOS, argiloso com alta MOS, arenoso com baixa MOS, e arenoso com alta MOS.	15
Figura 11 - Comparativo entre solos com tratamento de Procote. Da esquerda para a direita: argiloso com baixa MOS, argiloso com alta MOS, arenoso com baixa MOS, e arenoso com alta MOS.....	15
Figura 12 - Comparativo entre solos com tratamento de Ácido Bórico. Da esquerda para a direita: argiloso com baixa MOS, argiloso com alta MOS, arenoso com baixa MOS, e arenoso com alta MOS.	16
Figura 13 - Comparativo entre solos com tratamento de Ulexita. Da esquerda para a direita: argiloso com baixa MOS, argiloso com alta MOS, arenoso com baixa MOS, e arenoso com alta MOS.....	16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado das análises físicas e químicas dos solos utilizados no experimento.....	7
---	---

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Boro lixiviado para cada tipo de solo em função das diferentes fontes de adubação boratada utilizada.	12
Gráfico 2 - Lixiviação acumulada de boro por diferentes fontes em função da textura e nível de MOS.	13
Gráfico 3 - Massa seca da soja para cada tipo de solo em função das diferentes fontes de adubação boratada.	14
Gráfico 4 - Acúmulo de boro na parte aérea da soja para cada tipo de solo em função das diferentes fontes de adubação boratada utilizada.	17
Gráfico 5 - Índice de eficiência agronômica (IEA) das fontes de boro em todos os solos.	18
Gráfico 6 - Recuperação do boro aplicado (RBA) pelas fontes em todos os solos.	19

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Índice de Eficiência Agronômica.....	11
Equação 2 - Recuperação do B Aplicado.....	11

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	2
2.1	Soja	2
2.2	Boro	3
3	MATERIAL E MÉTODOS	5
3.1	Estrutura do experimento.....	5
3.2	Condução do experimento	8
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
5	CONCLUSÃO	20
	REFERÊNCIAS	21

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a dinâmica da lixiviação do boro (B) é importante para o entendimento do comportamento deste nutriente no perfil do solo (COMMUNAR & KEREN, 2007) e a definição de estratégias de adubação para suprimento das demandas nutricionais da soja. Segundo TAVANTI et al., (2021) o micronutriente B possui grande importância na fisiologia dos vegetais pois participa da construção das paredes celulares, divisão celular, estrutura e funcionamento da membrana celular, respiração, metabolismo de RNA, metabolismo de ascorbato, ácido indol-acético, metabolismo de nitrogênio, metabolismo de carboidratos e no processo de fotossíntese.

Na realização da adubação boratada, a fim de suprir as demandas da cultura, quando se utiliza baixas concentrações de micronutrientes, eles podem melhorar os sistemas de defesa da planta para lidar com estresses abióticos. Contudo, a aplicação em concentrações elevadas pode levar à toxicidade das plantas, afetando processos como crescimento, divisão celular, fotossíntese, conteúdo de clorofila nas folhas e o metabolismo bioquímico, podendo levar a morte (REID, 2013).

A depender da fonte de fertilizante utilizada para suprimento da demanda de B pelas plantas, uma fração prontamente solúvel pode ser lixiviada no perfil do solo (SILVA et al., 1995), sendo esta movimentação variável em função da textura do solo, teor de matéria orgânica (MOS), pH, volume e intensidade de chuvas (PATIL et al., 1997).

A lixiviação de B em solos tropicais é um fenômeno de suma importância, pois embora este nutriente também ocorra na forma de íon borato ($H_4BO_4^-$) na solução do solo, é predominante no solo a forma indissociada neutra de ácido bórico ($H_3BO_3^0$), podendo ser lixiviado mais facilmente a depender dos diversos fatores supracitados (SÁ & ERNANI, 2016).

Estudos mostram que os solos de textura arenosa e pobres em MOS apresentam baixa disponibilidade de B devido a sua baixa capacidade de retenção do nutriente (SILVA ET AL., 1995), e, de acordo com CHAUDARY & SHUKLA (2004), os solos de texturas mais argilosas tendem a reter o B adicionado por períodos mais longos, o que também ocorre em solos com mais carbono orgânico, pois possuem maior capacidade de troca de cátions e substâncias quelantes.

Com isso, o objetivo deste trabalho foi analisar a dinâmica da lixiviação de B por diferentes fontes e seu aproveitamento pela cultura da soja em solos com texturas e teores de MOS contrastantes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Soja

A soja *Glycine max* (L.) Merrill é uma cultura com centro de origem no nordeste da China, conhecida a 3.000 a.C. É uma importante leguminosa da família Fabaceae, empregada na alimentação humana e animal. O Brasil é o maior produtor e exportador de soja do mundo e nos últimos anos esta cultura tem ocupado a maior área cultivada e liderado a expansão da fronteira agrícola. O país responde hoje por 50% do comércio mundial de soja. Segundo o 1º levantamento da safra 2021/2022 estima-se que o Brasil terá uma área plantada de 39.92 mil ha com produtividade de 3.5kg ha⁻¹, uma produção estimada de 140.7 mil t do grão. A produção deverá apresentar incremento de 2,5% em relação à safra que se encerrou (CONAB, 2021).

A cultura se adaptou bem nos hemisférios norte e sul, e nas mais variadas características edafoclimáticas (JULIATTI et al., 2004). O potencial produtivo da soja pode sofrer diversas interferências, como pela disponibilidade hídrica, fertilidade do solo, época de semeadura, cultivar utilizada, população de plantas e ataque de pragas e doenças (CASA & REIS, 2004).

A ocorrência de problemas com fertilidade do solo ocorre principalmente devido à grande demanda nutricional das cultivares atuais (FAGERIA et al., 2002). Para que se mantenha a produtividade da cultura elevada é importante que ocorra um bom desenvolvimento vegetal, o que só é possível se houver água no solo e adequada nutrição para as plantas (TAIZ et al, 2004). Com a melhoria das cultivares ao longo dos anos a deficiência de nutrientes se agrava pelo fato delas serem mais exigentes em fertilidade do solo. Além disso, diversos estudos tem constatado o aumento da produtividade das lavouras após adubação, principalmente quando utilizadas fontes com micronutrientes (FAGERIA et al., 2002).

2.2 Boro

Dentre os micronutrientes, a deficiência de B é a mais frequente no Brasil (PRADO et al., 2006). ABREU et al. (2005) realizou o levantamento de 13.416 amostras de solos provenientes de 21 estados brasileiros e observou que 40% apresentaram baixos teores de B disponível ($<0,2 \text{ mg dm}^{-3}$). Nos solos da região do cerrado a principal fonte do B é a MOS, e como é pouco presente nesses solos, existe uma maior probabilidade de ocorrer deficiência de B em cultivos nessas áreas, caso não se faça adubação (BUZETTI et al., 1990a,b). Além disso, como na região do cerrado ocorre baixa disponibilidade hídrica, pH baixo e altos teores de ferro e alumínio, há uma maior predisposição à deficiência de B (MAGALHÃES et al., 1978). A deficiência de B pode causar diversas respostas nas plantas, incluindo a inibição do crescimento do sistema radicular, a ausência ou anormalidade na diferenciação vascular, principalmente em relação ao floema, e necrose do ápice radicular (GUPTA, 1993; MARSCHNER, 1995).

O B é um micronutriente muito importante no desenvolvimento das culturas agrícolas, pois está relacionado a diversos processos fisiológicos dentro das plantas, como a síntese de parede celular, integridade da membrana plasmática, divisão celular, germinação do pólen, florescimento, frutificação, transporte de açúcares, lignificação, metabolismo de carboidratos, metabolismo de RNA, respiração, metabolismo de AIA, metabolismo fenólico e metabolismo de ascorbato (CAKMAK & ROMHELD, 1998; FAGERIA et al., 2002). SHELP (1993) observou que devido a contribuição do B na fisiologia dos processos metabólicos, a adubação boratada tem tido efeitos positivos no crescimento de raízes.

O B é absorvido pelas raízes das plantas quando está na solução do solo e a sua disponibilidade depende de diversos fatores como pelo pH do solo, teor de MOS, capacidade de troca de cátions (CTC), conteúdo de argila, textura e atividade biológica (FAGERIA et al., 2002). O pH e a textura são os fatores que mais influenciam a adsorção e a lixiviação. O B é adsorvido até o pH 9 e a partir deste valor sua adsorção é diminuída devido ao ácido bórico ser muito fraco ($pK=9,23$). Entretanto, quanto menor a concentração de B no solo, menor será o efeito do pH na adsorção do micronutriente (SALTALI et al., 2005) (GOLDBERG et al., 2005). De acordo com DECHEN & NACHTIGALL (2007), em valores de pH entre 8 e 9 inicia a precipitação do B. CRUZ et al., (1987) afirma que no Brasil, pH de 4,2 a 5,6, em Latossolo Vermelho de textura média, aumentaram significativamente a quantidade de B adsorvido, provavelmente devido ao teor de cargas negativas contidas na fração argila desses solos e ao

pH estar na faixa de adsorção. A correção do pH do solo em torno de 5,5 a 6 auxilia no aumento da adsorção do B utilizado na adubação. Conhecer a capacidade do solo em adsorver B é importante para a correção de deficiências do nutriente e para evitar problemas com toxicidade (COMMUNAR & KEREN, 2007).

Para explicar a adsorção de B no solo, de acordo com HATCHER et al. (1967) alguns mecanismos foram propostos: adsorção de íon borato, adsorção de ácido bórico, formação de complexos orgânicos, precipitação de boratos insolúveis com alumina e sílica, e entrada do B nas grades cristalinas dos minerais de argila. Segundo AZEVEDO et al., (2001), a quantidade de B que um solo pode adsorver depende da composição mineralógica do solo, do pH, da MOS e da concentração da solução em equilíbrio. O B é encontrado no solo nos minerais silicatados, adsorvido em argilominerais, na MOS e nos hidróxidos de alumínio e ferro (DECHEN & NACHTIGALL, 2007). Os solos do Brasil possuem caulinita em abundância e esta possui como componente o hidróxido de alumínio, que possui alta afinidade com B (HATCHER et al., 1967; SIMS & BINGHAM, 1968a). O B que está adsorvido no solo e não se encontra em solução, pode ser desorvido com o tempo e lixiviar (SILVA et al., 1995) (COMMUNAR & KEREN, 2006, 2007).

A deficiência de B pode ser resultado de lixiviação excessiva, particularmente em solos arenosos ou de excesso de calagem (SIMS & BINGHAM, 1968b). Entender o processo de lixiviação do B também é um importante componente da dinâmica do elemento no perfil do solo (COMMUNAR & KEREN, 2007). A textura do solo e a quantidade de água que percorre por sua estrutura influencia diretamente na quantidade de B que será removido do solo (PATIL et al., 1997). Também exerce influência na disponibilidade de B, sendo esperada menor disponibilidade do micronutriente com o aumento do teor de argila, em função da adsorção na superfície de óxidos de Fe e hidróxidos de Fe e Al.

Os fertilizantes boratados em sua maioria são bastante solúveis e por isso apresentam grande mobilidade no perfil do solo, aumentando a taxa de lixiviação de acordo com a textura do solo em questão. Com isso, a taxa de lixiviação do nutriente no perfil do solo varia, principalmente no solo arenoso. Dessa forma, optar por adubos de solubilidade mais lenta torna o nutriente menos susceptível a lixiviação (MORTVEDT, 1994). Em solos pobres de MOS e textura arenosa ocorre baixa disponibilidade de B, o que se agrava ainda mais em áreas com altas precipitações porque devido à natureza física do solo arenoso ser de maior porosidade e possuir menos cargas negativas, a água percola com mais facilidade carregando os nutrientes pelo perfil, levando à lixiviação desses nutrientes (SILVA et al., 1995; COMMUNAR &

KEREN, 2006; DECHEN & NACHTIGALL, 2007). De acordo com CHAUDARY & SHUKLA (2004), para os solos de textura mais argilosa, o B tende a ficar retido nas cargas das partículas de argila por um tempo mais longo, o que também ocorre em solos com mais carbono orgânico e maior capacidade de troca catiônica.

As fontes de B mais utilizadas na adubação das plantas são colemanita, ulexita e ácido bórico (ABREU et. al., 2015). O ácido bórico é uma fonte totalmente solúvel. A colemanita e a ulexita são pouco solúveis em água o que representa uma menor possibilidade de perda por lixiviação, pois o nutriente é liberado de forma mais lenta para o solo, principalmente em casos de solo de textura arenosa e em locais com altas precipitações. Contudo, ainda não há estudos suficientes para definir se é preciso realizar uma compensação na dosagem para oferecer para a planta a mesma disponibilidade de B que uma fonte solúvel oferece. O ácido bórico (H_3BO_3) possui um teor de B na faixa de 17 a 18% e devido a ser encontrado na forma de cristais de ácido bórico possui alta solubilidade em água e pouca reatividade com o solo, sendo uma fonte de B extremamente susceptível a lixiviação no perfil do solo (BYERS et al., 2001).

Assim busca-se compreender melhor a dinâmica da lixiviação do B por diferentes fontes em diferentes tipos de solo, a fim de encontrar resultados que colaborem nas tomadas de decisões quanto a fertilização, aumente a eficiência da adubação, minimize os custos de produção e facilite o manejo de lavouras.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Estrutura do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo - DCS, localizado na Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras-MG. As unidades experimentais consistiram em colunas de PVC cilíndrico preenchidas com solo, nos quais foram cultivadas plantas de soja. As colunas de lixiviação foram construídas a partir do empilhamento de seis anéis de PVC com 10 cm de altura e 200 mm de diâmetro, totalizando colunas de 60 cm de altura, a fim de simular um perfil de solo até 60 cm de profundidade. A base das colunas de lixiviação foi perfurada para a instalação de uma mangueira de polietileno para coleta da solução lixiviada do perfil de solo. Os orifícios das mangueiras foram recobertos com tela de

proteção para evitar a translocação de partículas de solo. Assim, a solução lixiviada foi coletada em garrafas PET com capacidade de 2 L, e uma alíquota de aproximadamente 10 ml foi retirada para análise química de B pelo método ICP-OES.

Figura 1 - Estrutura do experimento.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 2 - Colunas de lixiviação.



Fonte: Do autor (2021)

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC) com quatro repetições. Foram estudados quatro tipos de solos (Tabela 1) e cinco tratamentos, sendo uma testemunha e quatro fontes de adubação boratada: Procote (7,1% B), Ulexita (6% B), Bor Solo (10% B), Ácido bórico (17% B). A dose utilizada foi de 6 Kg ha⁻¹ de B (0,02 g de B por coluna) para adubação e simulação da lixiviação de B no perfil de solo.

Tabela 1 – Resultado das análises físicas e químicas dos solos utilizados no experimento.

Local de coleta	Mata Nativa, UFLA	Zootecnia, UFLA	Carrancas, MG	Itutinga, MG
Textura	Argilosa	Argilosa	Arenosa	Arenosa
Teor de MOS.	Alto	Baixo	Alto	Baixo
Ca (cmolc dm ⁻³)	0,88	0,55	6,08	1,48
Mg (cmolc dm ⁻³)	0,71	0,10	1,92	0,60
Al (cmolc dm ⁻³)	0,00	0,01	0,17	0,09
H+Al (cmolc dm ⁻³)	4,20	1,82	2,22	1,27
T (cmolc dm ⁻³)	5,88	2,48	11,18	3,44
SB (cmolc dm ⁻³)	1,68	0,66	8,96	2,17
t (cmolc dm ⁻³)	1,68	0,67	9,13	2,26
P-rem (mg L ⁻¹)	7,00	3,55	44,36	44,74
P (mg dm ⁻³)	0,00	0,49	69,64	6,30
K (mg dm ⁻³)	33,27	5,75	376,12	34,57
Zn (mg dm ⁻³)	0,90	0,30	8,58	0,20
Fe (mg dm ⁻³)	37,00	27,53	264,47	11,60
V (%)	28,49	26,80	80,18	63,04
m (%)	0,00	1,49	1,86	3,98
Mat. Org. (dag Kg ⁻¹)	2,37	1,01	4,98	1,49
pH (H ₂ O)	5,50	4,80	6,20	6,40
Areia (%)	17,00	19,00	70,00	94,00
Silte (%)	16,00	17,00	15,00	2,00
Argila (%)	67,00	64,00	15,00	4,00
Mn (mg dm ⁻³)	25,00	5,40	52,09	3,30
Cu (mg dm ⁻³)	4,40	1,30	2,17	0,19
B (mg dm ⁻³)	0,05	0,01	0,07	0,07

Os tipos de solos utilizados, entre textura argilosa e arenosa de alta e baixa MOS foram escolhidos para avaliar a dinâmica de B em função destes atributos. Para o preenchimento das colunas de lixiviação com 0,02 m³, os solos foram destorroados, peneirados em peneira de 4mm e submetidos a calagem para elevação da saturação por bases para V%=70. Após, os solos receberam carga hidráulica, em que as colunas foram irrigadas uma vez por dia, saturando a coluna de água, até que se percebesse lixiviação na mangueira coletora e a estabilização da estrutura do solo, o que durou aproximadamente quatro dias.

3.2 Condução do experimento

Os solos foram preparados para o semeio da cultura da soja com adubação de base para normalizar os níveis de fertilidade com aplicação dos seguintes nutrientes, em mg dm⁻³: P (200), Ca (129), Mg (26), S (39), Zn (5), Mo (0,1), Cu (1,5) e Mn (3). Para a adubação foram utilizados reagentes p.a. Em seguida, foram semeadas seis sementes de soja cultivar 95R90IPRO da Pioneer Sementes em cada coluna de lixiviação, deixando-se apenas três plantas após desbaste realizado 10 dias após a emergência (DAE).

Figura 3 - Furos para semeadura da soja.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 4 - Semeadura da soja.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 5 - Soja após germinação, antes do desbaste.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 6 - Soja após o desbaste.



Fonte: Do autor (2021)

As plantas de soja foram utilizadas como indicador da disponibilidade de B no solo após simulação de lixiviação por chuvas. As plantas foram regadas diariamente de acordo com a sua demanda hídrica em cada tipo de solo. Durante o experimento foram realizadas quatro simulações de chuva, sendo a primeira e a quarta equivalentes a 95,49 mm cada uma, a segunda e a terceira equivalentes a uma chuva de 127,5 mm, cada. A primeira simulação de chuva foi feita no dia 04/11/2019, 25 DAE. O intervalo entre as precipitações ocorreu para simular a uma lavoura convencional com precipitação pluviométrica constante ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura e para evitar a rápida lixiviação da B em uma única chuva.

Os tratamentos foram aplicados de acordo com a recomendação do fabricante para cada fertilizante. O Bor Solo®, Ulexita e Ácido bórico foram aplicados diretamente sobre o solo. Já o Procote® foi misturado junto ao cloreto de potássio para aplicação conjunta sobre o solo e, por esse motivo, a adubação de potássio foi padronizada nesta mesma data para todos os tratamentos. Os tratamentos com adubação boratada foram aplicados no estágio V3 da cultura de soja, 18 DAE.

A coleta do líquido lixiviado ocorreu sempre um dia após a simulação das chuvas, para que houvesse tempo necessário de lixiviação da solução do solo excedente da capacidade de campo de cada tipo de solo. De cada garrafa coletora, os volumes lixiviados foram medidos e uma alíquota foi coletada para análise química dos teores de B. Os frascos com as alíquotas foram armazenados em geladeira até que as análises fossem realizadas.

As plantas foram colhidas 54 dias após a sementeira, colocadas para secagem em estufa a 65°C, submetidas a pesagem e moagem. Após, o material moído foi conduzido para análise para determinação do teor de B. O teor de B foi determinado utilizando ICP-OES. Considerando o volume lixiviado em cada coluna e a concentração de B nos lixiviados (mg L^{-1}) foi calculada a quantidade de B lixiviada (mg coluna^{-1}). A variável B na planta (acúmulo) foi calculada pelo produto entre massa seca da parte aérea e teor de B na parte aérea.

Figura 7 - Amostras secando em estufa.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 8 - Amostras após secagem.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 9 - Pesagem das amostras.



Fonte: Do autor (2021)

Foram calculados dois índices de eficiência: Índice de eficiência agronômica (IEA) e a recuperação do B aplicado (RBA). As equações dos índices estão representadas abaixo:

Equação 1 - Índice de Eficiência Agronômica.

$$IEA(\%) = \frac{[B \text{ acumulado na p. aérea no trat. adubado } (\frac{mg}{coluna}) - B \text{ acumulado na p.aérea na testem. } (\frac{mg}{coluna})]}{[B \text{ acumulado na p.aérea com ácido bórico } (\frac{mg}{coluna}) - B \text{ acumulado na p.aérea na testem. } (\frac{mg}{coluna})]} \times 100$$

Equação 2 - Recuperação do B Aplicado.

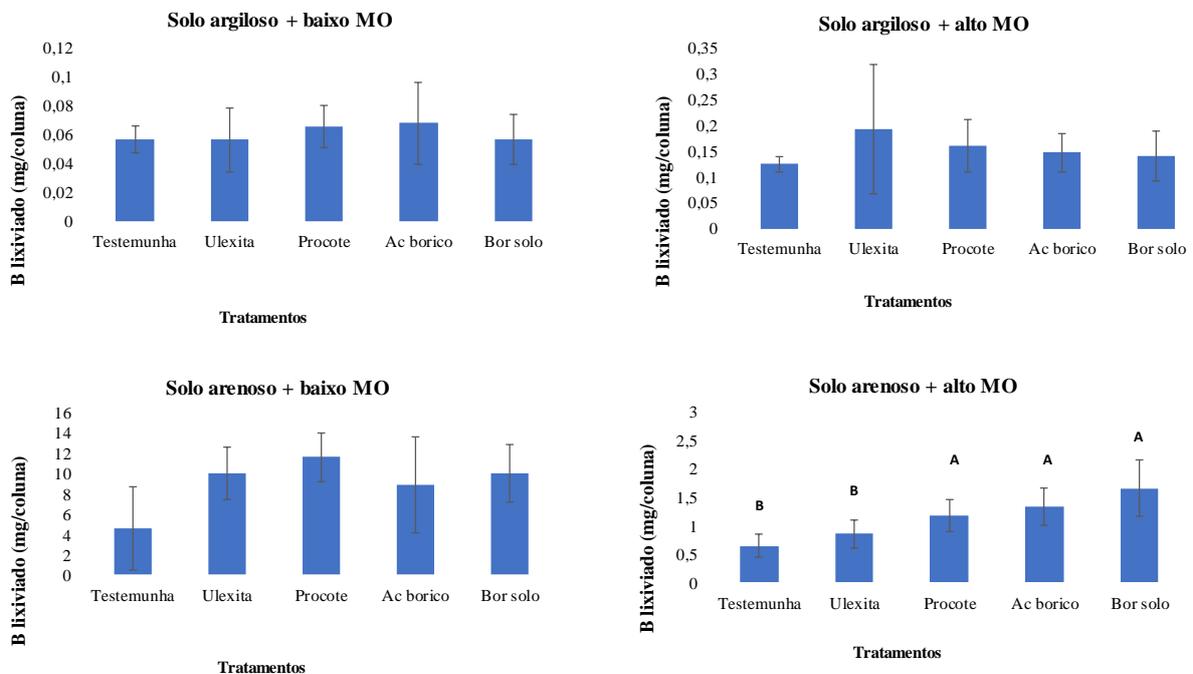
$$RBA(\%) = \frac{[B \text{ acumulado no tratamento adubado } (\frac{mg}{coluna}) - B \text{ acumulado na testemunha } (\frac{mg}{coluna})]}{[Dose \text{ de B } (\frac{mg}{coluna})]} \times 100$$

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa de análise estatística SISVAR 5.3® (FERREIRA, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A quantidade de boro lixiviada (mg) foi influenciada significativamente ($p \leq 0,05$) pelos tratamentos com diferentes fontes de B apenas no solo arenoso com alto teor de MOS (Gráfico 1). Para esta variável, os solos argilosos apresentaram valores muito baixos de B lixiviado e o contrário foi observado nas colunas com solo arenoso de baixo teor de MOS., em que todos os tratamentos registraram lixiviação considerável de até 12 mg (60% do B aplicado), entretanto foram estatisticamente iguais. Já para o solo arenoso com alto teor de MOS, houve diferença estatística em que as fontes Procote®, ácido bórico e Bor Solo® apresentaram juntos os maiores valores de lixiviação provavelmente por apresentarem maiores teores de B solúvel prontamente disponível. Já a Ulexita apresentou menor lixiviação, similar ao controle, o que pode ser explicado por ser uma fonte de adubação com predominância de frações menos solúveis do nutriente, demandando mais tempo para que a lixiviação ocorra na mesma proporção que os demais fertilizantes.

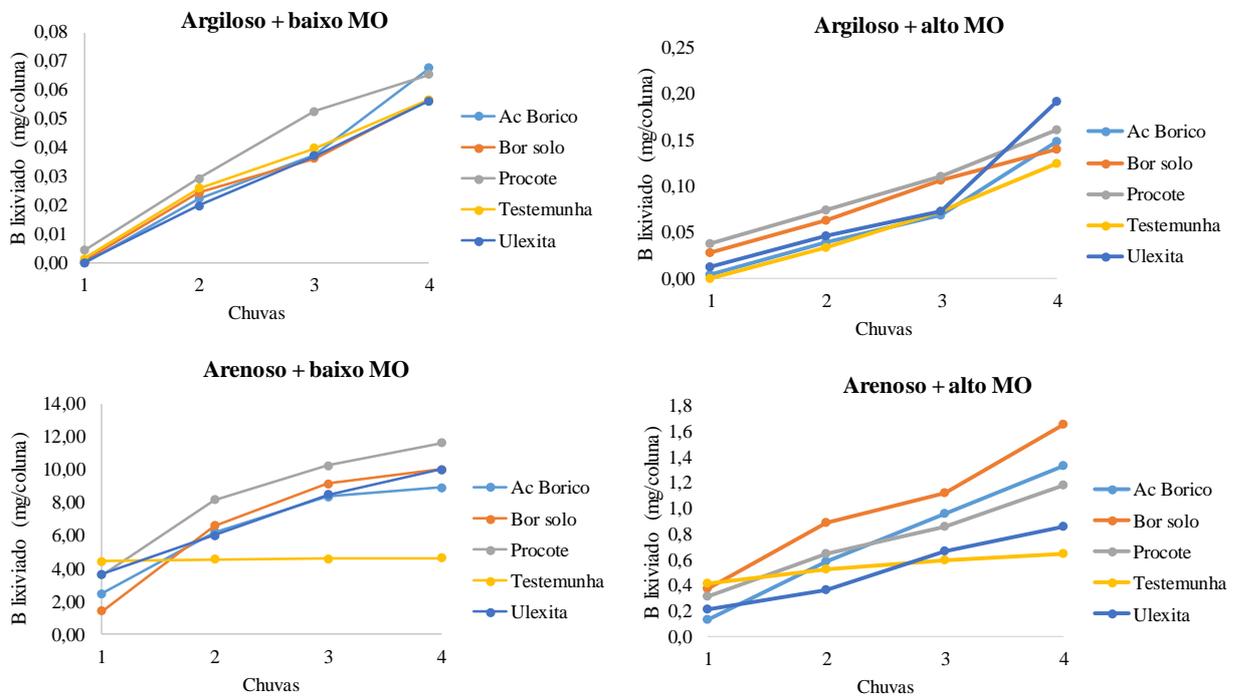
Gráfico 1 - Boro lixiviado para cada tipo de solo em função das diferentes fontes de adubação boratada utilizada.



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knot (5%).

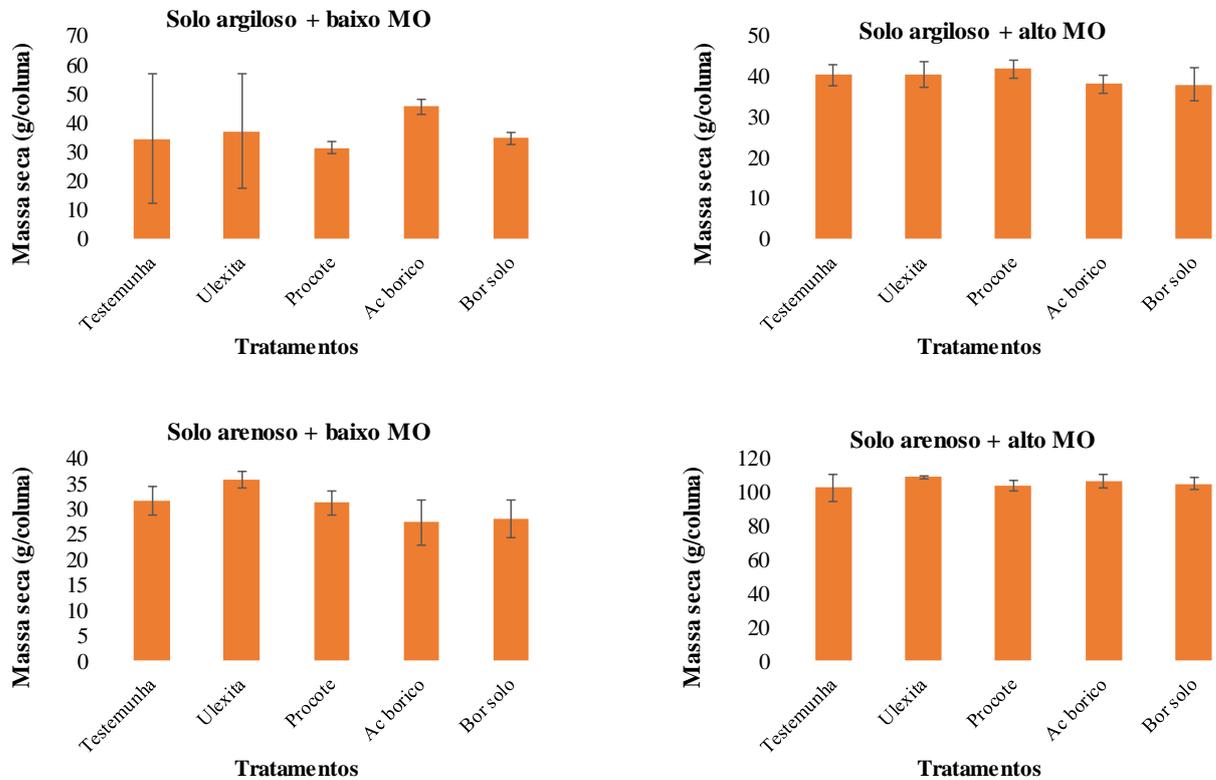
A lixiviação acumulada de boro ao longo do tempo apresentou-se diferente nos solos estudados (Gráfico 2). Entre os solos argilosos, tanto de baixa e alta MOS, houve variação mínima entre as fontes. Já nos solos arenosos, foi observado o aumento da lixiviação ao longo do tempo para todas as fontes de adubação, em especial no solo arenoso com baixo teor de MOS, em que os incrementos de boro na solução lixiviada foram mais acentuados. Assim, a presença de MOS teve grande influência nos solos de textura arenosa, diminuindo a lixiviação.

Gráfico 2 - Lixiviação acumulada de boro por diferentes fontes em função da textura e nível de MOS.



Com relação a massa seca de parte aérea não houve diferença significativa entre os tratamentos, considerando que o solo arenoso com alto teor de MOS obteve resultados superiores no crescimento das plantas por ter fertilidade natural elevada, provavelmente devido ao alto teor de MOS. (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Massa seca da soja para cada tipo de solo em função das diferentes fontes de adubação boratada.



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knot (5%).

Nas figuras 10 (Bor solo), 11 (Procote), 12 (Ácido bórico), e 13 (Ulexita) pode-se observar, visualmente, que o solo arenoso com alto teor de MOS se destacou em todos os tratamentos em relação ao crescimento das plantas. As imagens mostram, respectivamente, da esquerda para a direita os solos: argiloso com baixa MOS, argiloso com alta MOS, arenoso com baixa MOS, e arenoso com alta MOS.

Figura 10 - Comparativo entre solos com tratamento de Bor Solo. Da esquerda para a direita: argiloso com baixa MOS, argiloso com alta MOS, arenoso com baixa MOS, e arenoso com alta MOS.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 11 - Comparativo entre solos com tratamento de Procote. Da esquerda para a direita: argiloso com baixa MOS, argiloso com alta MOS, arenoso com baixa MOS, e arenoso com alta MOS.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 12 - Comparativo entre solos com tratamento de Ácido Bórico. Da esquerda para a direita: argiloso com baixa MOS, argiloso com alta MOS, arenoso com baixa MOS, e arenoso com alta MOS.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 13 - Comparativo entre solos com tratamento de Ulexita. Da esquerda para a direita: argiloso com baixa MOS, argiloso com alta MOS, arenoso com baixa MOS, e arenoso com alta MOS.



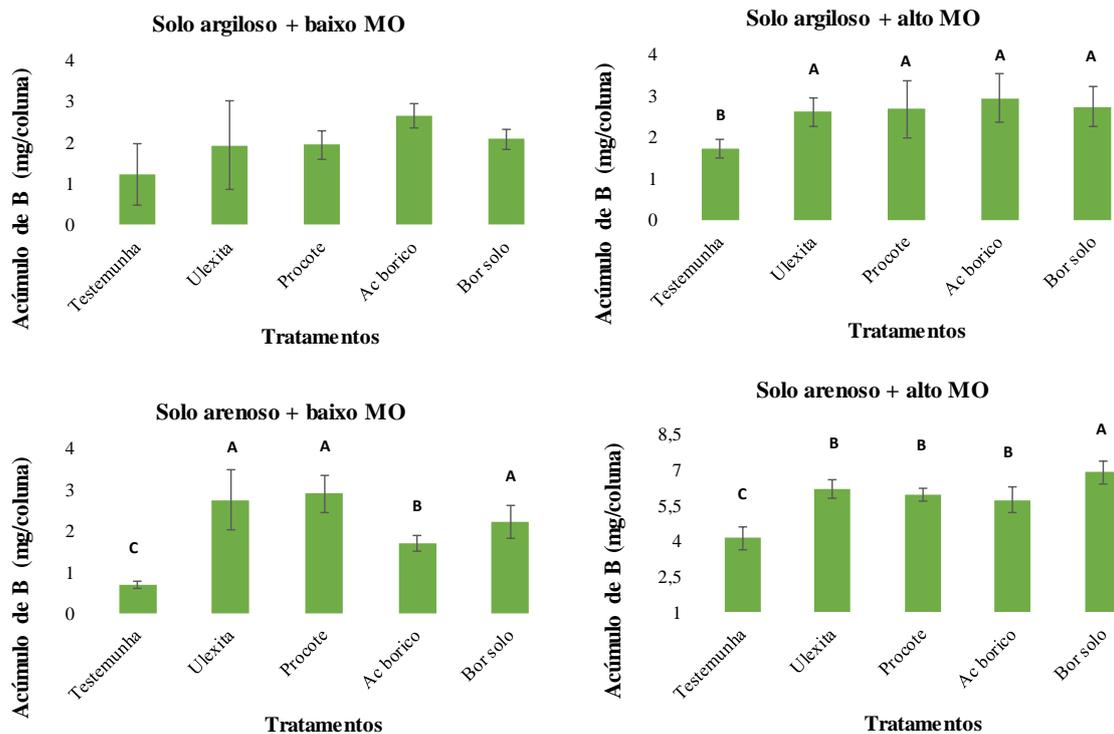
Fonte: Do autor (2021)

Em relação ao acúmulo de boro na parte aérea da soja, foi influenciado significativamente ($p \leq 0,05$) pelos tratamentos com diferentes fontes de boro em todos os solos, exceto no solo argiloso com baixo teor de MOS (Gráfico 4).

Para o solo argiloso com alto teor de MOS as fontes boratadas tiveram resultados semelhantes, com acúmulo em torno de 3 mg de B (15% do B aplicado) na parte aérea, sendo diferentes apenas da testemunha.

Para o solo arenoso com baixo teor de MOS, Ulexita, Procote e Bor Solo foram iguais estatisticamente, com resultados em torno de 3,5 mg de B (17,5% do B aplicado) na parte aérea, sendo seguidos por ácido bórico e pela testemunha com resultados inferiores. Já para o solo arenoso com alto teor de MOS., o tratamento com Bor Solo proporcionou maior acúmulo nas plantas, sendo seguido por Procote, Ácido bórico e Ulexita com resultados iguais estatisticamente. Ressalta-se que, todos os resultados de acúmulo de boro nas plantas em todos os tipos de solo são dependentes diretamente da quantidade de boro lixiviado e do teor de MOS, sendo este atributo um dos mais importantes para adsorção de boro no solo e disponibilização para as plantas quando necessário.

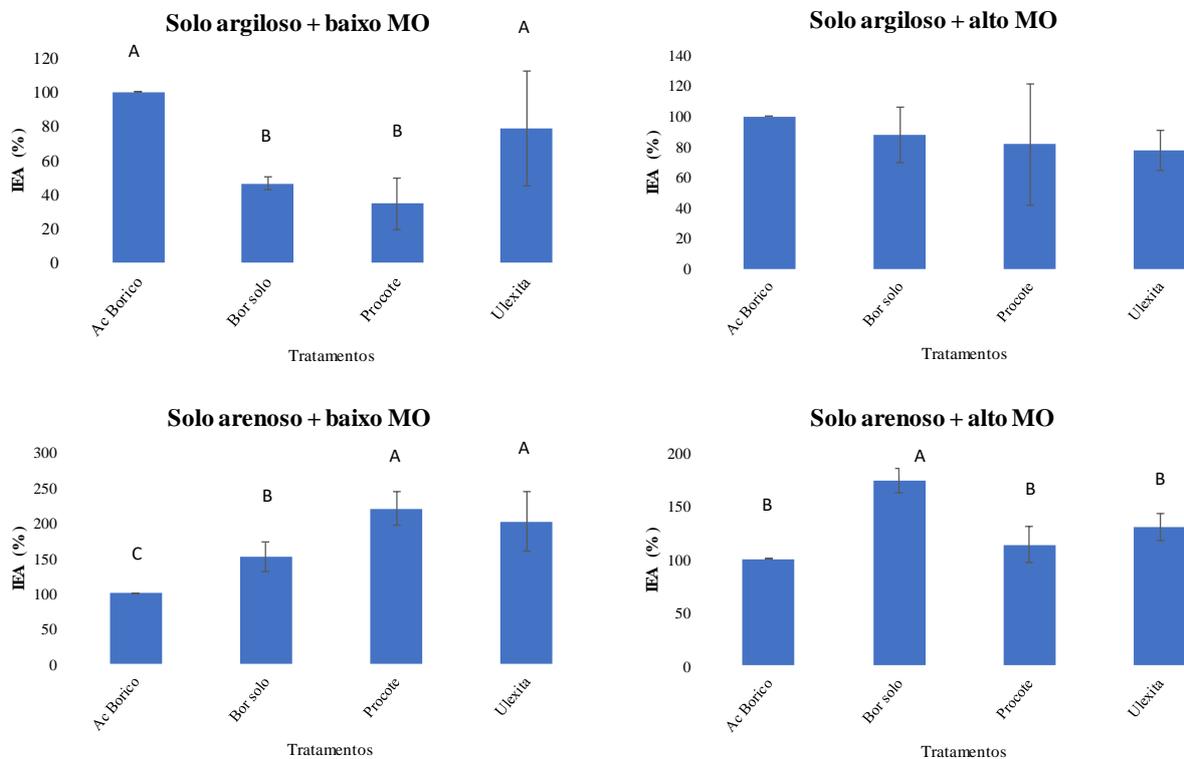
Gráfico 4 - Acúmulo de boro na parte aérea da soja para cada tipo de solo em função das diferentes fontes de adubação boratada utilizada.



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knot (5%).

O índice de eficiência agrônômica (IEA) foi influenciado significativamente ($p \leq 0,05$) pelas fontes de boro em todos os solos, exceto no solo argiloso com alto teor de MOS (Gráfico 5). Para o solo argiloso com baixo teor de MOS as fontes Ácido bórico e Ulexita foram superiores e estatisticamente iguais. No solo arenoso com baixo teor de MOS, as fontes Ulexita e Procote foram superiores estatisticamente, seguidas pelo Bor solo e pelo ácido bórico. Já no solo arenoso com alto teor de MOS, a fonte Bor solo foi superior às demais.

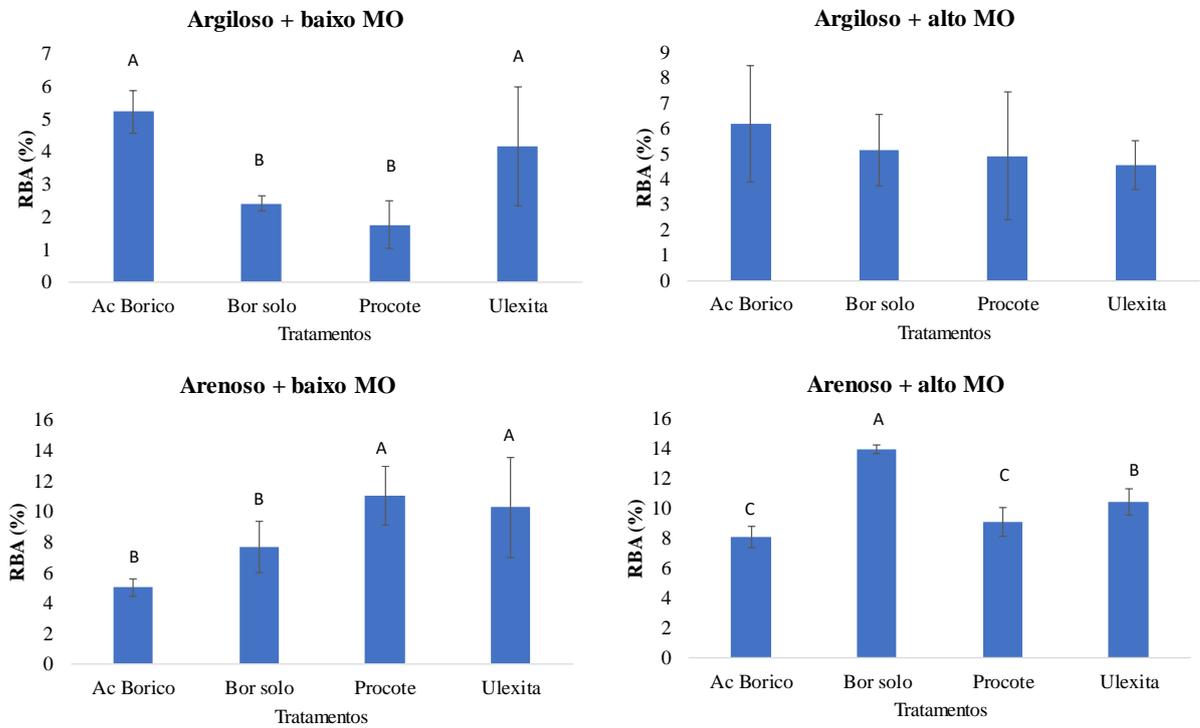
Gráfico 5 - Índice de eficiência agrônômica (IEA) das fontes de boro em todos os solos.



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knot (5%).

A recuperação do boro aplicado (RBA) foi influenciada significativamente ($p \leq 0,05$) pelas fontes de boro em todos os solos, exceto no solo argiloso com alto teor de MOS (Gráfico 6). No solo argiloso com baixo teor de MOS, as fontes Ulexita e ácido bórico foram estatisticamente superiores em relação às demais fontes. Já no solo arenoso com baixo teor de MOS, as fontes Ulexita e Procote tiveram uma recuperação maior do boro aplicado. No solo arenoso com alto teor de MOS a ordem de RBA foi Bor solo > Ulexita > Procote = ácido bórico.

Gráfico 6 - Recuperação do boro aplicado (RBA) pelas fontes em todos os solos.



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Scott-Knot (5%).

5 CONCLUSÃO

O acúmulo de boro na soja em todos os tipos de solo é dependente diretamente da quantidade de boro lixiviado e do teor de MOS.

Apenas o solo argiloso com alto teor de MOS não teve maiores índices de eficiência agronômica e recuperação do boro aplicado em relação ao controle.

Os solos argilosos apresentaram valores baixos de B lixiviado.

Os solos arenosos apresentaram as maiores variações de lixiviação acumulada de boro ao longo do tempo.

O solo arenoso de baixo teor de MOS teve as maiores lixiviações, até 12 mg (60% do B aplicado).

A MOS é muito importante para diminuir a lixiviação, principalmente no solo arenoso.

Utilizar fontes de baixa solubilidade como a Ulexita em solos arenosos diminui as perdas por lixiviação.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. A. et al. **Routine Soil Test to Monitor Heavy Metals and Boron**. *Scientia Agricola*, 62:6:564-571, 2005.

ABREU, C.A. et al. **Lixiviação e Disponibilidade de Boro em Função de Fontes e Características de Solos**. *Revista do XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, Natal, 2015.

AZEVEDO, R.A.; FAQUIN, V.; FERNANDES, L.R. **Adsorção de boro em solos de várzea do Sul de Minas Gerais**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, p.957-964, 2001.

BUZETTI, S.; MURAOKA, T.; SÁ, M.E. **Doses de boro na soja, em diferentes condições de acidez do solo: I. Produção de matéria seca e de grão e nível crítico no solo**. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, Campinas, v.14, p57-161,1990a.

BUZETTI, S.; MURAOKA, T. ; SÁ, M.E. **Doses de boro na soja, em diferentes condições de acidez do solo: II. Níveis críticos nas plantas e nos grãos**. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, Campinas, v.14,p.163-166,1990b.

BYERS, D.E.; MIKKELSEN, R.L. & COX, F.R. **Greenhouse evaluation of four boron fertilizer material**. *J. Plant Nutr.*, 24:717-725, 2001.

CAKMAK, I. & RÖMHELD, V. **Boron deficiency-induced impairments of celular functions in plants**. In: DELL, B.; ROWN, P.H. & BELL, R.W., eds. *Boron in soil and plants: Review. Symposium*. Chiang Mai. *Plant Soil*, 193:71-83, 1998.

CASA, R.T.; REIS, E.M. **Doenças relacionadas à germinação, emergência e estabelecimento de plântulas de soja em semeadura direta**. In: REIS, E.M. *Doenças na cultura da soja*. Passo Fundo: Aldeia Norte Editora, 2004. 128p.

CHAUDHARY, D.R.; SHUKLA, L.M. **Boron adsorption and desorption in arid soils of India**. *Agrochimica*, v.48, p.141-152, 2004.

CONAB. **Levantamento de safra - Primeiro levantamento: Safra 2021/2022**. Brasília: CONAB, 2021. 60 p. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-gaos>>. Acesso em: 14 out. 2021.

COMMUNAR, G.; KEREN, R. **Rate-limited boron transport in soils: the effect of soil texture and solution pH**. *Soil Science Society of America Journal*, v.70, p.882-892, 2006.

COMMUNAR, G.; KEREN, R. **Effect of transient irrigation on boron transport in soils**. *Soil Science Society of America Journal*, v.71, p.306-313, 2007.

CRUZ, M.C.P.; NAKAMURA, A.M.; FERREIRA, M.E. **Adsorção de boro pelo solo: efeito da concentração e o pH**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.22, p.621-626, 1987.

DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R. **Elementos requeridos à nutrição de plantas**. In: NOVAIS, R.F.; et al. eds. *Fertilidade do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, UFV, 2007 p. 91-132.

FAGERIA, N. K. et al. **Micronutrients in crop production**. *Advances in Agronomy*, v. 77, p. 185-268, 2002.

GOLDBERG, S.; CORWIN, D.L.; AHOUSE, P.J.; SUAREZ, D.L. **Prediction of boron adsorption by field samples of diverse textures**. *Soil Science Society of America Journal*, v.69, p.1379-1388, 2005

GUPTA, U.C. **Boron and its role in crop production**. Boca Raton: CRC Press, 1993. 237p.
MAGALHÃES, J.R.; MONNERAT, P.H. **Aplicação foliar de boro na prevenção de deficiência e na composição mineral do tomateiro**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.13,p.81-89,1978.

GUPTA, U.C. **Deficiency, sufficiency, and toxicity levels of boron in crops.** In: GUPTA, U.C., ed. *Boron and its role in crop production.* Boca Raton, CRC Press, 1993. p.137-145.

JULIATTI, F.C.; POLIZEL, A.C.; JULIATTI, F.C. **Manejo integrado de doenças na cultura da soja.** 1ª. Ed. Uberlândia-MG. 2004. 327p.

HATCHER, J.T.; BOWER, C.A.; CLARCK, M. **Adsorption of boron by soils as influenced by hydroxy aluminum and surface area.** *Soil Science*, v.104, p.422-426, 1967.

MAGALHÃES, J.R.; MONNERAT, P.H. **Aplicação foliar de boro na prevenção de deficiência e na composição mineral do tomateiro.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.13,p.81-89,1978.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** 2nd ed. San Diego: Academic, 1995. 902p

MENGEL, K. & KIRBY, E.A. **Principles of plant nutrition.** Bern: International Potash Institute, 2001. 687p.

MORALES ABANTO, A.; MÜLLER, L.E. **Alteraciones producidas en el maracuja (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) por deficiencias de manganeso, hierro, boro, y zinc.** *Turrialba, Coronado*, v.27, p.163-168, 1977.

MORTVEDT, J.J. **Needs for controlled-availability micronutrient fertilizers.** *Fert. Res.*, 38:213-221,1994.

PATIL, S.G.; SETKAR, S.; HEBBARA, M. **Relationship between water table depth, soil boron and sunflower genotypic response on a saline soil.** In: DELL, B.; BROWN, P.H.; BELL, R.W. (Ed.). **Boron in soils and plants.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. p.261-264.

PRADO, R.M.; NATALE, W.; ROZANE, D.E. **Níveis críticos de boro no solo e na planta para cultivo de mudas de maracujazeiro-amarelo.** *Rev. Bras. Frutic.*, Jaboticabal - SP, v. 28,

n. 2, p. 305-309, Agosto 2006.

REID, R.J. **Boron Toxicity and Tolerance in Crop Plants**. Crop Improvement under Adverse Conditions. Springer, New York, p. 333–346. 2013.

SÁ, A. A.; ERNANI, P. R. **Boron leaching decreases withincreases on soil pH**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 40, 2016.

SALTALI, K.; BILGILI, A.V.; TARAKCIOGLU, C.; DURAK, A. **Boron adsorption in soils with different characteristics**. Asian Journal of Chemistry, v.17, p.2487-2494, 2005.

SHELP, B.J. **Physiology and biochemistry of boron in plant**. In: GUPTA, U.C., ed. Boron and its role in crop production. Boca Raton, CRC Press, 1993. p.53-85.

SILVA, N. M.; CARVALHO, L.H.; KONDO, J.I.; BATAGLIA, O.C.; ABREU, C.A. **Dez anos de sucessivas adubações com boro no algodoeiro**. Bragantia, v.54, p.177-185, 1995.

SIMS, J.R.; BINGHAM, F.T. **Retention of boron by layer silicates, sesquioxides and soil materials: II. Sesquioxides**. Soil Science Society of America Proceedings, v.32, p.364-369, 1968a.

SIMS, J.R.; BINGHAM, F.T. **Retention of boron by layer silicates, sesquioxides and soil materials: III. Iron and aluminum-coated layer silicates and soil materials**. Soil Science Society of America Proceedings, v.32, p.369-373, 1968b.

TAIZ, L. & ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre, Artmed. p.719. 2004.

TAVANTI, T.R.; MELO, A.A.R.; MOREIRA, L.D.K.; SANCHEZ, D.E.J.; SILVA, R.S.; SILVA, R.M.; REIS, A.R. **Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants**. Plant Physiology and Biochemistry. Elsevier. 160, p. 386–396. 2021.