

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**BALANÇO DE POTÁSSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA
INFLUENCIADO PELA TEXTURA E ADUBAÇÃO POTÁSSICA EM
SOLOS TROPICAIS**

FÁBIO STEINER

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do Título de Doutor
em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU – SP

Junho – 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**BALANÇO DE POTÁSSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA
INFLUENCIADO PELA TEXTURA E ADUBAÇÃO POTÁSSICA EM
SOLOS TROPICAIS**

FÁBIO STEINER
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU – SP

Junho – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO
DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA
- LAGEADO- BOTUCATU (SP)

s822b Steiner, Fábio, 1980-
Balanço de potássio no sistema solo-planta influenciado
pela textura e adubação potássica em solos tropicais /
Fábio Steiner. - Botucatu : [s.n.], 2014
xi, 79 f. : ils., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Fa-
culdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2014
Orientador: Ciro Antonio Rosolem
Inclui bibliografia

1. Semeadura. 2. Potássio na agricultura. 3. Fertili-
dade do solo. 4. Adubação. I. Rosolem, Ciro Antonio. II.
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
(Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas de
Botucatu. III. Título.

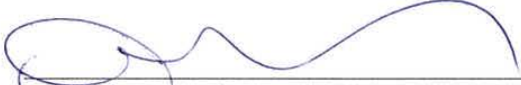
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "BALANÇO DE POTÁSSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA INFLUENCIADO
PELA TEXTURA E ADUBAÇÃO POTÁSSICA EM SOLOS TROPICAIS "


ALUNO: FÁBIO STEINER

ORIENTADOR: PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM

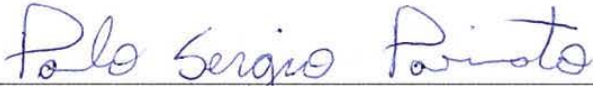
Aprovado pela Comissão Examinadora




PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM




PROF. DR. ALBERTO CARLOS DE CAMPOS BERNARDI



PROF. DR. PAULO SÉRGIO PAVINATO



PROF. DR. JOSE SALVADOR SIMONETTI POLONI



PROF. DR. JULIANO CARLOS CALONEGO

Data da Realização: 02 de junho de 2.014.

*Deus não escolhe os capacitados,
“Ele” capacita os escolhidos.*

Anônimo

*“Aquilo que escuto, eu esqueço
Aquilo que vejo, eu lembro
Aquilo que faço, eu aprendo”.*

Confúcio

*“Aquilo que pensamos saber,
com frequência nos impede de aprender”.*

Claude Bernard.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Fábio Steiner, filho de Ivo Steiner e Maria Aparecida Batista da Silva, nasceu na cidade de Marechal Cândido Rondon, Estado do Paraná, no dia 09 de agosto de 1980.

Diplomou-se em Agronomia pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Marechal Cândido Rondon, em Dezembro de 2007.

Em março de 2008, iniciou o curso de Mestrado em Agronomia área de concentração Produção Vegetal, na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Marechal Cândido Rondon, obtendo o título de Mestre em Agronomia em Fevereiro de 2010.

Em março de 2010, iniciou o curso de Doutorado em Agronomia área de concentração Agricultura, no Departamento de Produção Vegetal e Melhoramento, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Botucatu, obtendo o título de Doutor em Agronomia em Junho de 2014.

Ofereço a minha mãe Maria Aparecida Batista da Silva, pela educação e por tudo que fez e continua fazendo por mim.

Dedico à minha esposa Joice Vieira da Silva pela convivência agradável, generosidade e companheirismo nos momentos de dificuldade.

Oferecimento especial aos meus filhos João Victor, Arthur e Murilo, pelo amor e estímulo para superação de todas as dificuldades encontradas.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela preciosidade da vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da Bolsa de Doutorado e pelo suporte financeiro.

Ao Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem pela orientação, ensinamentos, confiança, clareza nos momentos de confusão e, sobretudo, pelo exemplo de dedicação ao ensino superior e a pesquisa. Meu eterno agradecimento. Muito Obrigado.

Aos Profs. Dr. Rogério Peres Soratto e Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol, pelos ensinamentos, exemplo de pesquisadores e pela capacidade administrativa junto à chefia do Departamento de Produção Vegetal – Agricultura da FCA, cujo apoio e compreensão foram fundamentais para a conclusão do curso de doutorado.

A todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Agricultura da FCA, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos amigos e colegas do curso de Pós-Graduação: Laércio Pivetta, Tiago Zoz, Laérte Pivetta, Gustavo Castoldi, Samuel Luiz Fioreze entre outros, agradeço muito pelo auxílio na semeadura, coleta de solos, e colheita dos experimentos de campo.

Aos colegas de Pós-Graduação em Agricultura Genivaldo David de Souza Schlick, Adalton Mazetti Fernandes, Émerson Borghi, Maurício Mancuso, Jaime Ferrari Neto, Cláudio Hideo M. da Costa, Fábio Rafael Echer, Gustavo Spadotti Amaral Castro, Rodrigo Arroyo Garcia, Júlio C. Bogiani, Samuel M. Zoca, Moniki Campos Janegitz, pelo convívio, amizade e aprendizado compartilhado durante estes quatro anos de muito estudo e trabalho.

Aos funcionários de campo do Departamento de Produção Vegetal – Agricultura, pela amizade e auxílio na condução dos experimentos.

Aos funcionários do Departamento de Produção Vegetal – Agricultura, em especial ao Dorival Pires de Arruda, Vera Lucia Rossi Cereda, Amanda Bedette e Rubens de Souza.

Aos funcionários da biblioteca ‘Paulo de Carvalho Mattos’ e da seção de Pós-Graduação.

A todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE APÊNDICES	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XII
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO LITERATURA	7
4.1 POTÁSSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA	7
4.2 BALANÇO DO POTÁSSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA	12
4.3 RESPOSTAS DAS CULTURAS À ADUBAÇÃO POTÁSSICA	15
4.4 MANEJO DA ADUBAÇÃO POTÁSSICA	16
5 MATERIAL E MÉTODOS	18
5.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	18
5.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	23
5.3 CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS E MANEJO DAS CULTURAS	23
5.4 DIAGNOSE FOLIAR, PRODUTIVIDADE E EXPORTAÇÃO DE POTÁSSIO PELAS CULTURAS	24
5.5 COLETA, PREPARO E ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO	25
5.6 BALANÇO DE POTÁSSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA	27
5.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	27
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6.1 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DAS CULTURAS	29
6.2 EXTRAÇÃO E EXPORTAÇÃO DE POTÁSSIO PELAS CULTURAS	34
6.3 POTÁSSIO NO SOLO	40
6.4 BALANÇO DE POTÁSSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA	57
7 CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
APÊNDICES	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades químicas e físicas dos solos antes da instalação dos experimentos (Agosto/2000).....	22
Tabela 2. Produtividade de grãos de soja, milho e crambe em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa	30
Tabela 3. Teor de K nas folhas de soja, milho e crambe em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa	35
Tabela 4. Teor de K nos grãos de soja, milho e crambe em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa	36
Tabela 5. Quantidade de K exportada com a colheita dos grãos de soja, milho e crambe em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa	38
Tabela 6. Variação (ΔK_{Solo}) entre a quantidade inicial (Agosto de 2000) e final (Maio de 2012) de K trocável no perfil do solo, em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa	46
Tabela 7. Variação ($\Delta K_{\text{Não-trocável}}$) entre a quantidade inicial (Agosto de 2000) e final (Maio de 2012) de K não-trocável no perfil do solo, em função da adubação potássica em solo de textura média e argilosa.....	52
Tabela 8. Valores de entrada (adubação) e saída (exportação) de K no sistema de produção, balanço de K na lavoura (adubação – exportação), alteração da disponibilidade de K trocável do solo (ΔK_{Solo}) na camada de 0–1,0 m de profundidade durante o experimento (2000–2012) e balanço de K no sistema solo-planta em solo tropical de textura média e argilosa	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática da dinâmica do potássio no sistema solo-planta.....	8
Figura 2. Precipitação pluvial e temperatura média mensal dos triênios 2000/2002 (A) e 2003/2005 (B) na Fazenda Experimental Lageado (FCA-UNESP), em Botucatu-SP.....	19
Figura 3. Precipitação pluvial e temperatura média mensal durante os períodos de 2006/2008 (A) e 2009/2012 (B) na Fazenda Experimental Lageado (FCA-UNESP), em Botucatu-SP.....	20
Figura 4. Balanço hídrico médio mensal durante o período de realização dos experimentos (2000–2012) na Fazenda Experimental Lageado (FCA-UNESP), em Botucatu-SP.....	21
Figura 5. Rendimento relativo de grãos de soja, milho e crambe em função da adubação potássica em solo tropical de textura média (A) e argilosa (B).....	31
figura 6. Produção acumulada de grãos de soja, milho e crambe durante os 12 anos de experimento com adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa.....	34
Figura 7. Quantidade total de K exportado com a colheita de grãos de soja, milho e crambe durante os 12 anos de experimento com adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa.....	39
Figura 8. Teor de K trocável no perfil do solo no início e após 12 anos de experimento com a aplicação anual de 0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 kg ha ⁻¹ de K ₂ O em solo tropical de textura média (A) e textura argilosa (B).....	41
Figura 9. Variação (ΔK_{Solo}) total entre a quantidade inicial (agosto de 2000) e final (maio de 2012) de K trocável na camada 0–1,0 m de profundidade em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa.....	49
Figura 10. Teor de K não-trocável no perfil do solo no início e após 12 anos de experimento com a aplicação anual de 0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 kg ha ⁻¹ de K ₂ O em solo tropical de textura média (A) e argilosa (B).....	51
Figura 11. Variação ($\Delta K_{Não-trocável}$) total entre a quantidade inicial (agosto de 2000) e final (maio de 2012) de K não-trocável na camada 0–1,0 m de profundidade em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa.....	55

LISTA DE APÊNDICES

- Apêndice 1.** Resultados da análise química do solo de textura média nas camadas de 0–0,05; 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m no 2º ano de experimento (Setembro de 2001) no tratamento sem adição de fertilizante potássico 75
- Apêndice 2.** Resultados da análise química do solo (0–0,20 m) das duas áreas experimentais no 4º ano de experimento (Maio de 2004) com diferentes históricos de fertilização potássica..... 75
- Apêndice 3.** Resultados da análise química do solo (0–0,20 m) das duas áreas experimentais no 7º ano de experimento (Maio de 2007) com diferentes históricos de fertilização potássica..... 75
- Apêndice 4.** Resultados da análise química do solo (0–0,20 m) das duas áreas experimentais no 10º ano de experimento (Maio de 2010) com diferentes históricos de fertilização potássica..... 76
- Apêndice 5.** Potássio acumulado na palhada de soja na colheita e liberação ocorrida nos intervalos avaliados, no ano agrícola de 2011/12, com a aplicação de $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O em solo tropical de textura média e argilosa..... 76
- Apêndice 6.** Resultados das propriedades químicas e físicas do perfil dos solos após 12 anos de experimento (Maio/2012) com adubação potássica 77
- Apêndice 7.** Parâmetros de ajuste da equação da relação quantidade/intensidade, quociente de atividade de equilíbrio (QAKe), potássio em equilíbrio (Ke) e poder tampão de potássio (PTK) dos solos das duas áreas de experimento 78
- Apêndice 8.** Produção de matéria seca das culturas de aveia-preta e milho, no ano agrícola de 2011, em função do efeito residual da aplicação de doses de K na cultura de verão (soja) em solo tropical de textura média e argilosa..... 78
- Apêndice 9.** Sintomas típicos de deficiência de potássio em folhas de soja cultivado em um Latossolo Vermelho de textura média após 12 anos sem a adição de fertilizante potássico. 79

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

α e β	coeficientes da equação linear
θ_{cc}	umidade na capacidade de campo
Σ	somatório
'	minuto
%	por cento
*	significativo a 5 %
**	significativo a 1 %
<	menor que
>	maior que
°	grau
°C	grau Celsius/centígrado
Δ	diferença
ΔK	adsorção ou dessorção de potássio
aCa	atividade de cálcio
aK	atividade de potássio
aMg	atividade de magnésio
Al/Al ³⁺	alumínio/ion alumínio
Ca/Ca ²⁺	cálcio/ion cálcio
CaCl ₂	cloreto de cálcio
CaCO ₃	carbonato de cálcio
CaO	óxido de cálcio
Ci	concentração molar do íon
Cl ⁻	cloreto
cm ³	centímetro cúbico
CTC	capacidade de troca de cátions
Da	densidade aparente
dm ³	decímetro cúbico
DMS	diferença mínima significativa
Dp	densidade de partículas
Ds	densidade do solo
EAA	espectrofotometria de absorção atômica
f	coeficiente de atividade
Fe	ferro
g	grama (0,001 kg)
H + Al	acidez potencial do solo
h	hora
H ⁺	íon hidrogênio
ha	hectare (10 000 m ²)
HCO ₃ ⁻	ácido carbônico
HNO ₃	ácido nítrico
HClO ₄	ácido perclórico

I	força iônica
I-E	ilita-vermiculita
K/K ⁺	potássio/íon potássio
K ₂ O	óxido de potássio
KCl	cloreto de potássio
Ke	potássio em equilíbrio
Kf	concentração de potássio após equilíbrio
kg	quilograma (unidade)
Ki	concentração de potássio inicial
Knt	potássio não-trocável
L	equação linear
Mg/Mg ²⁺	magnésio/íon magnésio
MgO	óxido de magnésio
min	minuto
mL	mililitro
mm	milímetro
mmol	milimol
mmol _c	milimol carga
MO	matéria orgânica
NO ₂ ⁻	nitrito
NO ₃ ⁻	nitrato
ns	não significativa
OAc ⁻	ácidos orgânicos
OH ⁻	hidroxila
<i>p</i>	probabilidade
P	fósforo
pH	potencial hidrogeniônico
PRNT	poder relativo de neutralização total
PTK	poder tampão de potássio
Q	equação quadrática
QAK	quociente de atividade de potássio
QAKe	quociente de atividade de equilíbrio
R ²	coeficiente de determinação
RR	rendimento relativo
S	latitude sul
SO ₄ ²⁻	sulfato
SSD	sistema de semeadura direta
TFSA	terra fina seca ao ar
V	saturação por bases do solo
v:v	relação volume:volume
W	longitude oeste
Z	valência do íon

1 RESUMO

Estudos que contemplem o balanço de potássio (K) no sistema solo-planta são importantes para avaliar se as quantidades de fertilizantes aplicadas anualmente estão sendo aproveitadas para manter e/ou, melhorar a fertilidade do solo, ou estão intensificando as perdas de K por lixiviação. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da adubação potássica no balanço de K no sistema solo-planta em dois solos tropicais de texturas distintas. Os experimentos foram conduzidos na Fazenda Experimental Lageado, em Botucatu, SP, de 2000 a 2012, em um Latossolo Vermelho de textura média (210 g kg⁻¹ de argila) e em outro Latossolo Vermelho de textura argilosa (680 g kg⁻¹ de argila). Os tratamentos foram constituídos por sete doses de K aplicadas anualmente (0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O). O balanço de K no sistema solo-planta foi estimado, após o décimo segundo ano de experimento, considerando a quantidade do nutriente adicionada na adubação, a quantidade de K exportada da lavoura através dos grãos colhidos, e a alteração na disponibilidade de K trocável no perfil do solo, até 1,0 m de profundidade. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0–0,10; 0,10–0,20; 0,20–0,40; 0,40–0,60; 0,60–0,80 e 0,80–1,0 m de profundidade no 12º ano de condução do experimento. O teor inicial de 1,30 e 0,75 mmol_c dm⁻³ de K trocável na camada de 0–0,20 m de profundidade nos solos de textura média e argilosa, respectivamente, foi suficiente para atingir produtividade de grãos de soja superior a 90 % do rendimento máximo nos três e quatro primeiros anos de cultivo, respectivamente, não havendo necessidade de adubar com K, devido à contribuição do K não-trocável. A resposta da cultura à adubação potássica aumentou à medida que os cultivos se sucederam, e esse aumento correspondeu à diminuição das reservas disponíveis do nutriente no solo. A aplicação anual de 80 e 40 kg ha⁻¹ de K₂O foi suficiente para atender à demanda

das culturas e manter constante o teor de K trocável no solo de textura média e argilosa, respectivamente. O aumento da dose de fertilizante potássico intensificou as perdas de K por lixiviação para as camadas abaixo de 1,0 m de profundidade no solo de textura média, as quais variaram de 4 a 78 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K com a aplicação de 30 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O, representando de 16 a 52 % do K adicionado ao solo, respectivamente. Portanto, devido o elevado potencial de lixiviação de K em solos tropicais de textura média, o parcelamento da adubação potássica pode constituir excelente estratégia de manejo para minimizar perdas de K por lixiviação. A aplicação anual de até 180 kg ha⁻¹ de K₂O no solo de textura argilosa não proporcionou lixiviação de K para as camadas inferiores a 1,0 m de profundidade, indicando que as perdas do nutriente em solos com alta capacidade de troca de cátions podem ser inexpressivas em sistemas de rotação com o cultivo de, apenas, uma cultura comercial. A partir da dose de 105 e 90 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O para os solos de textura média e argilosa, respectivamente, houve incremento da reserva de K não-trocável no perfil do solo, considerando-se a camada até 1,0 m de profundidade. Não houve incremento de K não-trocável abaixo de 0,40 m de profundidade em solo argiloso, e no solo de textura média o incremento abaixo de 0,40 m de profundidade ocorre somente a partir de 150 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O.

Palavras chave: Ciclagem de nutrientes; K não-trocável; K trocável; Dinâmica do K no solo; Semeadura direta.

POTASSIUM BUDGET IN THE SOIL-PLANT SYSTEM AS AFFECTED BY SOIL TEXTURE AND POTASSIC FERTILIZATION IN TROPICAL SOILS. Botucatu, 2014. 79p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Author: FÁBIO STEINER

Adviser: CIRO ANTONIO ROSOLEM

2 SUMMARY

Studies that include potassium budget (K) in the soil-plant system are important to assess whether the amounts of fertilizer applied annually are being harnessed to maintain and or improve soil fertility, or are intensifying K losses by leaching. The objective of this study was to evaluate the effect of potassium fertilization on the K budget in soil-plant system in two tropical soils with different textures. The experiments were carried out at the Experimental Farm Lageado in Botucatu, SP, 2000-2012, on a medium texture Oxisol (210 g kg⁻¹ clay) and other clay Oxisol (680 g kg⁻¹ clay). Treatments consisted of seven levels of K applied annually (0, 30, 60, 90, 120, 150 and 180 kg ha⁻¹ yr⁻¹ K₂O). Soil samples were collected at depths of 0–0.10; 0.10–0.20; 0.20–0.40; 0.40–0.60; 0.60–0.80 and 0.80–1.00 m in the twelfth year of the experiment. Potassium budget in the soil-plant system was calculated based on (i) amount of nutrient inputs (fertilizer) and outputs (harvested grains) from the soil during the experiment, and on (ii) changes in soil K availability up to a depth of 1.0 m. The initial content of 1.30 and 0.75 mmol dm⁻³ of exchangeable K in the soil medium and clay texture was enough to achieve higher productivity soybeans at 90% of maximum yield in the first three to four years of cultivation, respectively, no need to fertilize with K because the contribution of non-exchangeable K. The crop response to potassium fertilization increased, as the succeeding crops, and this increase corresponded to a decrease in soil nutrient reserves available. The annual application of 80 and 40 kg ha⁻¹ K₂O was sufficient to meet crop demand and maintain a constant level of exchangeable K in the soil of clayey and silty , respectively texture. Increasing the dose of potassium fertilizer intensified K losses by leaching the soil of medium texture, which ranged 4-78 kg ha⁻¹ yr⁻¹ K with application of 30

and $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$, representing 16-52 % of K added to the soil, respectively. Therefore, due to the high leaching potential of soil K that the parcelling of application can provide excellent management strategy to minimize losses of K through leaching. The annual application of $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ in the clayey soil provided no leaching of K to below 1.0 m depth layers, indicating that the loss of nutrients in soils with high cation exchange capacity can be negligible in rotation with the cultivation of only one commercial culture systems. The annual application of up to 105 and $90 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ resulted in the availability of non-exchangeable K to reset the quantities exported and nutrient losses by leaching, respectively, in the clay and medium texture soil.

Keywords: Nutrient cycling; Non-exchangeable K; Exchangeable K; K dynamic; No-till.

3 INTRODUÇÃO

O potássio (K) é o segundo nutriente mais extraído e exportado pela maioria das plantas cultivadas, sendo imprescindível para o desenvolvimento, a produtividade e a qualidade dos grãos produzidos. A elevada exigência de K pela maioria das culturas contrasta com os teores, em geral, insuficientes que ocorrem nos solos brasileiros, o que tem levado a grande aumento do consumo de fertilizantes potássicos acompanhando o crescimento da produção agrícola brasileira nos últimos anos.

O K do solo é constituído pelo K da solução, K trocável, K não-trocável e o K estrutural, e o suprimento de K para as plantas advém da solução e dos sítios de troca dos coloides do solo, que estão em equilíbrio com o K não-trocável e com o K estrutural dos minerais (SPARKS; HUANG, 1985). O K da solução do solo pode ser absorvido pelas plantas, adsorvido às cargas negativas do solo, fixado em formas não-trocáveis ou lixiviado para as camadas mais profundas do solo, fora do alcance das raízes. O destino do K na solução do solo depende de acesso das raízes, da demanda das plantas, das exportações através de colheita e das propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo (SIMONSSON et al., 2007; ROSOLEM et al., 2012). Dessa maneira, o cultivo de plantas capazes de explorar camadas profundas do solo e a aplicação de fertilizante potássico na época mais apropriada e de maior exigência do nutriente pelas plantas são de extrema importância para a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola, por reduzir as perdas de K no sistema solo-planta e aumentar a eficiência de utilização desse nutriente.

Os cálculos de fluxos e de balanço de nutrientes vêm sendo cada vez mais utilizados para avaliar os efeitos, a longo prazo, do manejo da adubação e de rotações de culturas nos sistemas de produção. De acordo com Hanáčková et al. (2008), o saldo do

balanço de nutrientes no sistema solo-planta tem sido considerado um importante indicador da sustentabilidade do uso agrícola do solo ao longo do tempo. A diferença entre a quantidade do nutriente exportada com a colheita e a aplicada na adubação indica o grau de aumento ou de redução das reservas do nutriente no solo. Quando a saída de um nutriente é maior que a entrada na lavoura, a condição é de insustentabilidade (OENEMA et al., 2003). Portanto, é importante para o manejo adequado da adubação potássica estimar o saldo do balanço desse nutriente no sistema solo-planta. A aplicação insuficiente de adubo pode levar a balanços negativos, resultando na diminuição da fertilidade do solo, o que afeta a produtividade e a rentabilidade do sistema, além de levar ao esgotamento das reservas do solo (ROSOLEM et al., 1993; SINGH, et al., 2002; ÖBORN et al., 2005). Por outro lado, a aplicação excessiva de adubo leva a balanços excessivamente positivos, e resulta em baixa eficiência de uso e baixo desempenho econômico (BALIGAR et al., 2001), além de intensificar as perdas por lixiviação (ROSOLEM et al., 2006a; 2010), mesmo em solos com média e alta capacidade de troca catiônica (ERNANI et al., 2007b; WERLE et al., 2008). Diversos estudos indicam haver um balanço negativo de K no sistema solo-planta (BHATTACHARYYA et al., 2006; ANDRIST-RANGEL et al., 2007; SIMONSSON et al., 2007; HANÁČKOVÁ et al., 2008; FERREIRA et al., 2011; STEINER et al., 2012; ROSOLEM; CALONEGO, 2013), representando uma ameaça para a sustentabilidade do sistema de produção, devido ao esgotamento das reservas deste nutriente do solo.

Experimentos de longa duração, que contemplem o balanço e a dinâmica do K no perfil do solo, são importantes para avaliar se as quantidades de fertilizantes aplicadas anualmente estão sendo aproveitadas para a manutenção e/ou, melhoria da fertilidade do solo e se têm influência na produtividade agrícola. Por isso, estudos que visam reduzir as perdas e aumentar a eficiência de uso de K nas lavouras são primordiais. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da adubação potássica na dinâmica e no balanço de K no sistema solo-planta em dois solos tropicais de texturas distintas.

4 REVISÃO LITERATURA

4.1 Potássio no Sistema Solo-Planta

O potássio (K) é um dos nutrientes mais abundantes nos solos, podendo atingir concentrações de 300 a 30.000 mg kg⁻¹ (SPARKS, 2000), as quais são pouco menores nas regiões tropicais (900 a 19.000 mg kg⁻¹) (FASSBENDER, 1984). No entanto, a maior parte do K do solo (98 %) encontra-se na estrutura dos minerais primários e secundários (K estrutural), e só uma pequena fração encontra-se em formas mais prontamente disponíveis às plantas, seja ligado às cargas elétricas negativas (K trocável), seja na solução do solo (K solução) (SPARKS, 2000).

As plantas absorvem o K da solução do solo, cuja concentração é mantida pelo K adsorvido nos sítios de troca da fase sólida, denominado de K trocável. Uma vez esgotada a forma trocável e a concentração na solução atingir valores baixos, é forçada a liberação do K retido com maior energia, ou o contido nas entrecamadas e nas estruturas dos argilominerais primários e secundários (K não-trocável) (SPARKS, 2000; CURI et al., 2005). Todos os solos, em maior ou menor grau, apresentam K em formas não-trocáveis, ou não acessadas por extratores convencionalmente utilizados para avaliar a disponibilidade de K no solo, que podem migrar para a solução do solo e contribuir para a nutrição das plantas em curto e médio prazo (ROSOLEM; NAKAGAWA, 1985; ROSOLEM et al., 1993; CALONEGO et al., 2005; KAMINSKI et al., 2007; SIMONSSON et al., 2007; GARCIA et al., 2008; ROSOLEM et al., 2012).

A maneira com que o K se liga aos componentes sólidos do solo, assim como a energia dessas ligações, dá origem às várias formas de K no solo. Cada uma

dessas formas mantém um equilíbrio específico com a solução do solo, razão pela qual afetam a disponibilidade de K às plantas com diferentes magnitudes (ERNANI et al., 2007a). Dessa maneira, as formas de K do solo podem ser classificadas de acordo com a dificuldade com que as plantas têm em acessá-las, como o K prontamente disponível (K da solução + K trocável), K moderadamente disponível (na forma não-trocável) e o K lentamente disponível (representado pelo K estrutural) (Figura 1). Portanto, umas são disponíveis em curto prazo ou durante o período de cultivo e outras não.

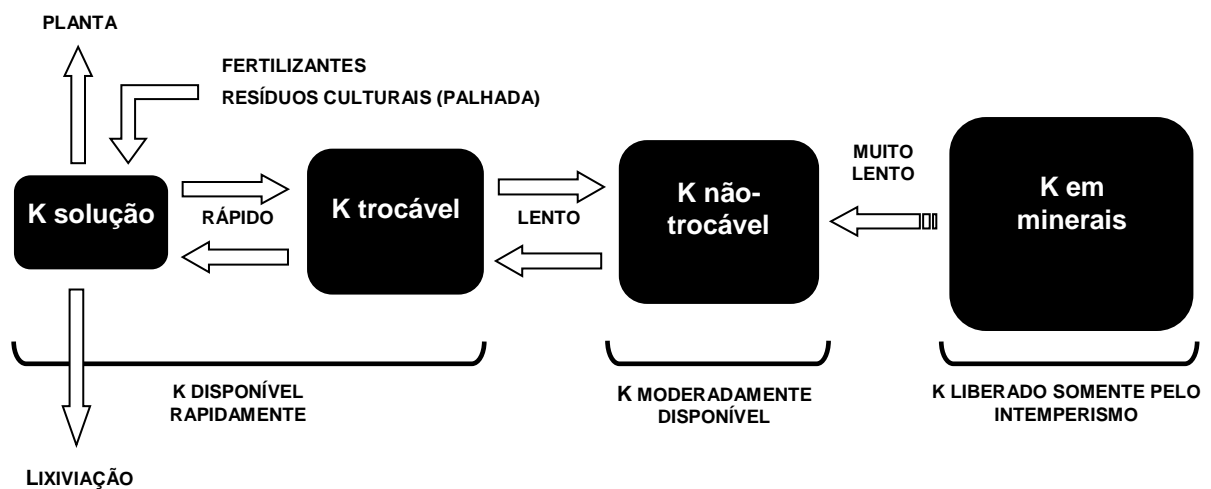


Figura 1. Representação esquemática da dinâmica do potássio no sistema solo-planta.

Fonte: adaptada de Mielniczuk (2005).

Segundo Mielniczuk (2005), sob o ponto de vista de nutrição da planta, o equilíbrio mais importante é entre o K trocável e o K na solução, cujo somatório para fins práticos é considerado como K disponível às plantas. A capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos, que varia em função do teor de matéria orgânica, do tipo e quantidade de argila e do pH do solo, é o principal componente do solo que determina a relação entre o K trocável e o K da solução, e para uma mesma quantidade de K total do solo, haverá menos K na solução em solos com maior CTC, o que refletirá em menores perdas por lixiviação, menor retirada desnecessária de K pelas plantas e maior capacidade de armazenamento de K no solo.

Em solos tropicais, a disponibilidade e a capacidade de suprimento de K dependem da presença de minerais primários e secundários, da aplicação de fertilizantes e da CTC e da ciclagem do nutriente pelas plantas. Em outras palavras, a disponibilidade depende das formas de K e da quantidade armazenada em cada uma dessas formas (ROSOLEM et al., 1988), aspectos que contribuem para a dinâmica do K no perfil do solo.

De acordo com Havlin e Westfall (1985), o K trocável tem sido considerado um bom índice, em solos tropicais, para prever a capacidade de suprimento de K às plantas. Entretanto, essa forma de K do solo, responsável pela disponibilidade imediata às plantas, não é capaz de manter a produtividade das culturas a médio ou longo prazo.

Nachtigall e Vahl (1991) estudando a dinâmica de liberação de K em diferentes solos, observaram que o K trocável tende a diminuir assintoticamente até níveis mínimos, que variam com o tipo de solo, a partir do qual a forma não-trocável passa a controlar a disponibilidade de K dos solos. No entanto, Mielniczuk e Selbach (1978) destacaram que o esgotamento do K nos solos pode ocorrer tanto nas formas trocáveis como nas formas não-trocáveis, mesmo quando há adições periódicas de adubos potássicos.

Em experimento conduzido durante 11 anos (1991–2002) em um Argissolo Vermelho, com 110 g kg^{-1} de argila, do Rio Grande do Sul, Bortoluzzi et al. (2005) verificaram que os teores de K trocável, nas parcelas sem adubação potássica, mantiveram-se constantes, indicando que o solo alcançou um equilíbrio entre as formas de K trocável e não-trocável com um mínimo de K^+ (em torno de 30 mg kg^{-1}) no solo. A manutenção desta situação por longos períodos pode diminuir os teores de K não-trocável e comprometer a reposição deste à solução do solo e o estabelecimento de plantas cultivadas.

Ernani et al. (2002) observaram em sete anos de experimento, que o teor de K trocável do solo diminuiu de 140 mg kg^{-1} no primeiro ano para 40 mg kg^{-1} no quinto ano e que, após isso, os teores permaneceram constantes. Os autores atribuíram esses resultados ao efeito tamponante de formas não-trocáveis de K do solo, as quais liberaram K e com isso o teor do nutriente do solo permaneceu inalterado a partir do quinto ano de avaliação. Kaminski et al. (2007) também constataram que os teores de K trocável diminuíram, aproximadamente, 50 % após o primeiro cultivo. Os autores atribuíram tal fato a elevada extração de K pela aveia. Nos demais cultivos, o teor de K trocável permaneceu constante.

Rosolem et al. (2012) estudando um Latossolo Vermelho com 210 g kg^{-1} de argila de Botucatu (SP), verificaram que a extração do K pelas plantas de braquiária (*Brachiaria ruziziensis*, syn. *Urochloa ruziziensis*), em cinco cortes sucessivos, superou o teor de K trocável, demonstrando a importância da forma não-trocável como fonte de K para as plantas. Steiner et al. (2014), avaliando o suprimento de K de doze solos do Estado do Paraná sob sucessão de seis cultivos, constataram que a contribuição do K não-trocável variou de 44 a 73 % do K extraído pelas plantas.

Para Rosolem et al. (1988), a liberação das formas de K não-trocável para a cultura da soja num Latossolo ocorreu somente quando os teores trocáveis foram inferiores a 60 mg kg^{-1} . Essas formas seriam, inclusive, responsáveis pela manutenção das quantidades extraídas pelo extrator Mehlich-1 ou acetato de amônio $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ à pH 7,0, mesmo quando há aportes desse nutriente via adubação. Em outro estudo, Rosolem et al. (1993) constataram que a disponibilização do K não-trocável em cinco solos tropicais, independentemente do tipo de solo, manteve equilibrados os níveis de K trocável do solo durante o desenvolvimento das plantas. Estes autores ainda verificaram que a fração de K não-trocável foi a principal fonte de K para a soja.

Bortoluzzi et al. (2005) observaram, em experimento de longa duração (1991–2002) em solo com minerais micáceos de textura arenosa, que mesmo quando os teores disponíveis de K encontravam-se na classe de disponibilidade média a baixa, eles pouco se alteraram durante os períodos de cultivo, sendo que após dez anos a resposta à adubação potássica foi apenas para a adição do nutriente e não para doses. Estes autores, no entanto, verificaram as formas de K não-trocável variaram, aumentando nas doses mais altas e diminuindo nas doses mais baixas ou onde não houve adição. Indicando que estas formas participam da dinâmica de disponibilidade de K no solo. Por isso, ainda há necessidade de se estudar alternativas na estimativa desta disponibilidade, diagnosticando o seu potencial para períodos mais longos.

A avaliação da contribuição do K trocável e K não-trocável no suprimento do nutriente às culturas passa por estudos de acompanhamento do esgotamento das formas ocorrentes no solo e das compensações entre elas durante os cultivos, com a concomitante avaliação periódica por procedimento de fracionamento, onde se empregam extratores com capacidade crescente de dessorção. Assim, seria possível verificar se formas quantificadas pelos extratores são as mesmas disponíveis às plantas, ou permitiria escolher métodos para avaliar a disponibilidade de curto prazo, mas também escolher extratores que informassem sobre o potencial de disponibilidade de médio e longo prazo, para melhor planejar e indicar as doses na adubação potássica para culturas anuais de importante repercussão econômica.

Os métodos utilizados para avaliar a disponibilidade de K no solo podem ser constituídos de soluções ácidas diluídas, ou superfícies de troca catiônica como as resinas, que extraem as formas retidas com menor energia, as quais compreendem aquelas normalmente extraídas pelas plantas nas quantidades necessárias para o seu crescimento.

No estado de São Paulo, o K trocável determinado pelo método da resina, é o índice utilizado para diagnosticar a disponibilidade do K do solo para às plantas (RAIJ et al., 2001). Com base nos teores extraídos pelo método são feitas as recomendações de adubação, independentemente da classe do solo e da sua composição mineralógica (RAIJ et al., 1997). Apesar de Raij et al. (1997) admitirem que o K não-trocável do solo e o K dos resíduos vegetais podem contribuir consideravelmente para a nutrição das plantas cultivadas, no Manual de Recomendação de Adubação para o Estado de São Paulo (Boletim Técnico 100) as doses de fertilizante potássico para às culturas é fundamentada, principalmente, nos teores de K trocável da camada superficial (0,0–0,20 m) do solo.

Raij (1991) argumenta que na maioria dos trabalhos experimentais consideram-se apenas os teores de K trocável e de K não-trocável do solo da camada superficial (0–0,20 m). Em muitos casos subestima-se o potencial de K do solo, pois, a tendência é que nas camadas mais profundas as fontes de K menos disponíveis sejam mais abundantes em decorrência do menor estágio de intemperismo. No trabalho de Raij e Quaggio (1984), constatou-se que os teores de K não-trocável do horizonte B de alguns solos foram maiores do que os da camada superficial. Segundo Elkhatib e Rern (1988), para subsidiar discussões a respeito das recomendações de adubação potássica para as culturas, é importante definir a taxa de disponibilização do K não-trocável do solo. A avaliação das reservas de K não-trocável merece estudos mais aprofundados para o entendimento de sua dinâmica no solo.

Rosolem (1997) argumenta que o manejo adequado da adubação potássica, no que diz respeito às quantidades de fertilizante a serem ministradas, pode reduzir perdas, o que é importante do ponto de vista econômico e ambiental, porém, se a aplicação de K for subestimada, pode haver esgotamento das reservas de K do solo. Em estudo conduzido durante três anos em um Latossolo Vermelho com 120 g kg⁻¹ de argila em São Manoel (SP), Rosolem e Nakagawa (2001) reportaram aumento na lixiviação de K no perfil quando foram aplicadas doses acima de 80 kg ha⁻¹ de K₂O por ano, independentemente do modo de aplicação do fertilizante.

As perdas de K por lixiviação são muito dependentes da concentração de K na solução do solo e do excesso de água para o seu deslocamento para camadas mais profundas no perfil (MIELNICZUK, 2005; ROSOLEM et al., 2006a; 2010). Embora em manejos conservacionistas normalmente observa-se maior infiltração de água, o K na solução é menor em decorrência da maior CTC, por causa de recuperação da matéria orgânica e da presença contínua de plantas comerciais ou de cobertura (MIELNICZUK, 2005).

Uma das condições indispensáveis à lixiviação de cátions no solo é a presença de ânions solúveis, tais como Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , OAc^- e HCO_3^- (ROSOLEM et al., 2006a). Mesmo os cátions monovalentes, Na^+ e K^+ , são lixiviados principalmente na companhia de ânions solúveis. A energia de retenção de cátions trocáveis, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , nos colóides do solo segue a série liotrópica, em que o primeiro e principal fator é a energia de atração da carga, e o segundo o tamanho dos íons hidratados (RAIJ, 1991). Deste modo, em solos bem drenados, as quantidades de K lixiviadas são relativamente maiores do que as dos cátions bivalentes, ou seja, em solos minerais ácidos, a lixiviação de cátions segue a ordem: $\text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$ (RAIJ, 1991).

A retenção de cátions nas camadas superficiais do solo ocorre apenas quando as cargas negativas dos ácidos húmicos e das argilas estão livres, o que, em muitas situações, não ocorre. Isto explica a facilidade com que o K na forma de fertilizante KCl, quando aplicado no solo, é rapidamente lixiviado pela água de chuva (ROSOLEM et al., 2006b). Para minimizar essas perdas, tem sido sugerido a alteração da química da solução do solo, com vistas em favorecer a maior mobilidade dos cátions divalentes, situação possível com a manutenção da palhada na superfície em sistemas conservacionistas, como a semeadura direta, e em culturas perenes (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; ROSOLEM et al., 2006b).

Ziglio et al. (1999) verificaram que, em sistemas com palha de aveia e mucuna em superfície, ocorreu lixiviação preferencial dos cátions divalentes, ao contrário do que normalmente se observa em cultivo convencional, sem palha na superfície. De acordo com Rosolem et al. (2004), tal fato ocorre porque os ligantes orgânicos têm ligação mais estável quanto maior a valência do íon. Em outro estudo, Rosolem et al. (2006b) verificaram que os ácidos orgânicos liberados da palhada de milho presente na superfície do solo funcionaram como ligantes, proporcionando maior retenção do K na camada superficial do solo, minimizando sua lixiviação. Portanto, tanto o parcelamento da adubação potássica como o cultivo de plantas de cobertura no sistema de semeadura direta podem constituir estratégias para minimizar perdas de K por lixiviação, sem comprometer a produtividade das culturas no sistema de rotação.

4.2 Balanço do Potássio no Sistema Solo-Planta

A elevada extração e exportação de K pela maioria das culturas, associada ao alto potencial de perdas por lixiviação, faz com que o manejo da adubação

potássica seja de grande importância em solos tropicais, uma vez que as reservas de K nesses solos, de modo geral, não são suficientes para suprir as quantidades extraídas pelas plantas ao longo dos anos.

A dose de fertilizante potássico adequada para cada cultura pode ser estimada pela quantidade exportada na colheita, assim como pela lixiviação para as camadas mais profundas do solo, fora do alcance das raízes, e pela quantidade de K liberada das reservas minerais do solo. Portanto, dependerá da cultura, da CTC do solo e de sua força de adsorção de K e mineralogia, que influenciam na lixiviação.

Resultados obtidos por Blake et al. (1999), em estudo realizado em três experimentos de longa duração por 30 anos (1965-1996) em Rothamsted (Reino Unido), Bad Lauchstaedt (Alemanha) e Skierniewice (Polónia), indicam que menos de 62 % de todo o K adicionado foi computado no perfil do solo até a profundidade de 0,80 m e/ou extraído pelas plantas, indicando haver elevada perda por lixiviação. Em um Nitossolo com 600 g kg⁻¹ de argila de Botucatu (SP), Rosolem e Calonego (2013) verificaram, após três anos de experimento, que as rotações de culturas envolvendo soja, triticales (*X Triticosecale*), girassol (*Helianthus annuus*), milheto (*Pennisetum glaucum*), sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor*), crotalária (*Crotalaria juncea*) e pousio não foram eficientes em prevenir as perdas de nutrientes do solo. Estes autores observaram perdas de K no sistema solo-planta na ordem de 33–95 kg ha⁻¹, com a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de K₂O. Em outro estudo conduzido durante dois anos em um Latossolo Vermelho com 420 g kg⁻¹ de argila de Botucatu (SP), Calonego e Rosolem (2013) verificaram que as perdas de K variaram de 120–160 kg ha⁻¹ durante a safra de verão com milho e de 115–150 kg ha⁻¹ durante o cultivo da soja.

Pesquisas realizadas em muitos países indicam haver balanço negativo de K no sistema solo-planta. Dobermann et al. (1996) em 11 experimentos com fertilização potássica a longo prazo, em cinco países asiáticos, demonstraram que na maioria dos locais o balanço de K foi negativo, com uma remoção líquida média de 34 a 63 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K. Os autores ainda verificaram que houve esgotamento das reservas de K do solo em muitos dos locais estudados. De modo similar, Bhattacharyya et al. (2006) verificaram que a exportação de K pelas culturas durante 30 anos foi maior que a quantidade de K total aplicado, apresentando saldo negativo no balanço de K no solo. Os autores, ainda, concluíram que se a adubação potássica não for revista a longo prazo, as doses atualmente recomendadas podem ameaçar a sustentabilidade do sistema de cultivo de trigo-soja.

Singh et al. (2002) em estudo conduzido durante oito anos em um Latossolo Vermelho na Índia, verificaram que a atual recomendação de 40 kg ha⁻¹ de K₂O no

cultivo de arroz e de trigo no regime irrigado, representa uma ameaça para a sustentabilidade do sistema, devido ao esgotamento das reservas de K do solo.

Em solos brasileiros, estudos realizados por Rosolem et al. (1984) em um Latossolo Vermelho arenoso, demonstraram acentuado decréscimo nos teores de K trocável do solo, no transcorrer de cultivos sucessivos de soja. Os autores afirmaram ser necessária a utilização de, no mínimo, 80 kg ha⁻¹ de K₂O por ano, para manter estável o teor de K trocável no solo. De modo similar, Borkert et al. (1997a,b) constataram que houve diminuição nos teores de K trocável, em diferentes tipos de solo do Paraná, no transcorrer de dez anos de cultivo de soja, e constataram que são necessárias adubações potássicas para evitar o esgotamento das reservas de K do solo, recomendando-se de 80 a 150 kg ha⁻¹ de K₂O aplicados anualmente, dependendo do tipo de solo. Em outro experimento, Scherer (1998b) demonstrou que a aplicação anual de 60 kg ha⁻¹ de K₂O na cultura da soja, nos solos do Oeste Catarinense, foi suficiente para atender à demanda da cultura e manter o teor de K trocável no solo próximo do nível crítico (em torno de 60 mg dm⁻³ ou 1,5 mmol_c dm⁻³). No entanto, deve-se ressaltar que a maior parte das pesquisas de fertilidade do solo no Brasil foram desenvolvida com preparo convencional do solo (aração e gradagem), sendo necessário rever muitos conceitos em virtude da rápida evolução dos manejos conservacionistas, com ênfase para o sistema de semeadura direta.

No Estado de São Paulo, a adubação potássica é baseada unicamente na manutenção de um nível crítico de K no solo, onde o rendimento relativo das culturas seja próximo a 90 % do máximo (RAIJ et al., 1997). Nessas condições, é possível que a preservação do K não-trocável seja comprometida, provocando algumas consequências como alterações nos minerais potássicos existentes no solo (PERNES-DEBUYSER et al., 2003; BORTOLUZZI et al., 2005; SIMONSSON et al., 2009). Por outro lado, o uso de altas doses de adubo potássico com o objetivo de aumentar a reserva do K no solo, independentemente da forma com que possa acumular, não se justifica plenamente, pois também há esgotamento dessas formas pela absorção de luxo pelas plantas (GOMMERS et al., 2005), bem como eleva as perdas por lixiviação (ROSOLEM et al., 2006a; WERLE et al., 2008).

4.3 Respostas das Culturas à Adubação Potássica

O incremento na produtividade agrícola, decorrente da adição de fertilizantes potássicos ao solo, varia principalmente com a quantidade de K disponível no solo, com as espécies vegetais, com o teor de água e com o nível geral da fertilidade do solo.

Nos solos tropicais com predomínio de minerais de argila do tipo 1:1, pequena parte do K aplicado vai para a solução do solo e o restante migra para o complexo de troca. Em solos onde existe um teor considerável de minerais do tipo 2:1, concomitante a valores elevados de pH, pode haver fixação de K nas entrecamadas desses minerais, no entanto, esse fenômeno é pouco expressivo nos solos brasileiros (ERNANI et al., 2007a). A dinâmica do K adicionado pelos fertilizantes nos solos brasileiros é, portanto, relativamente simples. A única perda de K a partir do solo acontece por lixiviação.

Em geral, as culturas respondem significativamente à adubação potássica quando os teores de K no solo são inferiores a $2,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (MEURER; INDA JÚNIOR, 2004). Rheinheimer et al. (2001) em levantamento realizado no Estado do Rio Grande do Sul, verificaram que aproximadamente 73 % das amostras apresentaram teores de K no solo superiores a $2,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Em pesquisas realizadas em diferentes regiões do Brasil verificou-se baixas respostas das culturas à adição de fertilizantes potássicos (BORKERT et al., 1993; BRUNETTO et al., 2005), mesmo em solos com teor de K trocável considerado médio ou baixo. Isso tem sido atribuído à contribuição de formas de K não-trocáveis (ROSOLEM et al., 1993; SIMONSSON et al., 2007; GARCIA et al., 2008; ROSOLEM et al., 2012). Segundo Gommers et al. (2005), quando os mecanismos que controlam a absorção de K são eficientes, especialmente em baixas concentrações na solução do solo, tem-se como resultado um forte gradiente químico em direção à rizosfera, criando um ambiente favorável à liberação do K de formas não-trocáveis. Por isso, o suprimento é tamponado pelas formas de K trocáveis, adsorvidas com baixa energia de ligação nos sítios de troca, e pelas formas de K não-trocáveis, adsorvidas com alta energia de ligação nos sítios de troca, contidas nas entrecamadas dos minerais de argila ou em minerais primários. Portanto, é importante compreender a dinâmica da disponibilidade de K para poder planejar programas de adubação.

Kaminski et al. (2007) verificaram que o acúmulo de K na parte aérea das plantas, nos cinco cultivos estudados, aumentou de forma linear com a aplicação das doses de K. Isso ocorre porque as plantas, em geral, possuem mais de um mecanismo de absorção de K, inclusive para teores mais altos no solo. Por isso, elas absorvem quantidades

acima da sua necessidade metabólica, que é acumulada em organelas da célula vegetal, caracterizando o consumo de luxo, como relatado por Marschner (1995) e Gommers et al. (2005). Como consequência dessa maior extração pelas plantas também têm-se observado maiores reduções de K no solo (SILVA et al., 1995).

4.4 Manejo da Adubação Potássica

Na definição da melhor estratégia para o manejo da adubação potássica, os seguintes pontos devem ser observados: (i) movimentação do K nos diferentes tipos de solos e potencial de lixiviação – definir modo e época de aplicação; (ii) absorção e acúmulo de K nas diferentes fases de desenvolvimento das culturas – definir em que época aplicar; (iii) efeito salino dos fertilizantes potássicos, principalmente, quando a fonte é o KCl – definir método e época de aplicação em função da dose (COELHO, 2005). Assim, a adubação potássica pode variar em relação à dose a ser aplicada, ao tipo de fertilizante, à época e modo de aplicação dos fertilizantes.

A época de aplicação dos fertilizantes potássicos depende do teor de K trocável, da CTC do solo, da espécie vegetal e da quantidade a ser aplicada. Para culturas anuais, normalmente todo o K necessário para o crescimento e desenvolvimento das plantas tem sido adicionado por ocasião da semeadura, juntamente com os demais nutrientes. Em algumas situações, no entanto, a adubação potássica deve ser parcelada em duas vezes, e isso ocorre em solos arenosos, de baixa CTC, ou quando a dose a ser aplicada na semeadura é muito alta, independentemente da CTC (COELHO, 2005). Solos com baixa CTC têm baixa capacidade de adsorver K. Sendo assim, recomenda-se aplicar parte do K na semeadura e o restante em cobertura para reduzir as perdas por lixiviação.

Foloni e Rosolem (2008), avaliando o manejo da adubação potássica em um solo de textura média de Botucatu (SP), verificaram que a antecipação da adubação potássica, com doses de 60 a 90 kg ha⁻¹ de K₂O na semeadura do milho cultivado na primavera, não comprometeu o acúmulo de K na parte aérea das plantas de soja cultivada em rotação, no sistema de semeadura direta.

Os fertilizantes potássicos podem ser adicionados ao solo em linha ou a lanço. Como o K tem boa mobilidade no solo e se liga aos compostos sólidos, o método de adição dos fertilizantes potássicos (a lanço, incorporado ou localizado) normalmente não interfere na absorção do nutriente pelas plantas (MIELNICZUK, 2005). No entanto, há

evidências que a adubação potássica à lanço pode ser beneficiada pela melhor exploração dos sítios na CTC no solo. De acordo com Altmann (2012), a aplicação de K à lanço é imprescindível em solos arenosos, pois, a concentração do adubo na linha favorece a lixiviação do nutriente. Nas condições de solos arenosos, com CTC abaixo de $60 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, deve-se aplicar o K preferencialmente aos 20 a 30 dias após a cultura instalada. Por sua vez, em solos argilosos, com CTC acima de $60 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, a adubação potássica pode ser realizada aos 15 dias antes da semeadura. Outro fator a ser considerado é a salinização provocada pelo adubo concentrado nas linhas de semeadura, principalmente em doses elevadas.

Foloni e Rosolem (2008) obtiveram as máximas produtividades de soja com doses de 85 a 90 kg ha^{-1} de K_2O aplicadas na sucessão milheto–soja no sistema de semeadura direta. Esses autores, ainda, ressaltaram que tal adubação pode ser totalmente antecipada na semeadura da gramínea de cobertura, sem comprometimento de rendimento da lavoura comercial.

5 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi composto por dois experimentos de longa duração (2000-2012) com diferentes históricos de adubação potássica no sistema de semeadura direta. As análises laboratoriais dos experimentos foram realizadas no Laboratório de Relação Solo-Planta do Departamento de Produção Vegetal e Melhoramento da Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA.

5.1 Localização e Caracterização da Área Experimental

Os experimentos foram conduzidos na Fazenda Experimental Lageado, Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, em Botucatu – SP (22°51' S, 48°26' W e altitude média de 780 m). O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cfa, com chuvas no verão e seca no inverno, com precipitação média anual de 1.430 mm e temperatura média anual de 21,0 °C (CUNHA; MARTINS, 2009).

Os dados climáticos mensais durante o período de condução dos experimentos (2000 a 2012), para as condições climáticas da Fazenda Experimental Lageado (FCA/UNESP) são mostrados nas Figuras 2 e 3. Na Figura 4 são mostrados os dados do balanço hídrico médio mensal do período de 2000 a 2012, calculado segundo metodologia de Thornthwaite e Mather (1955).

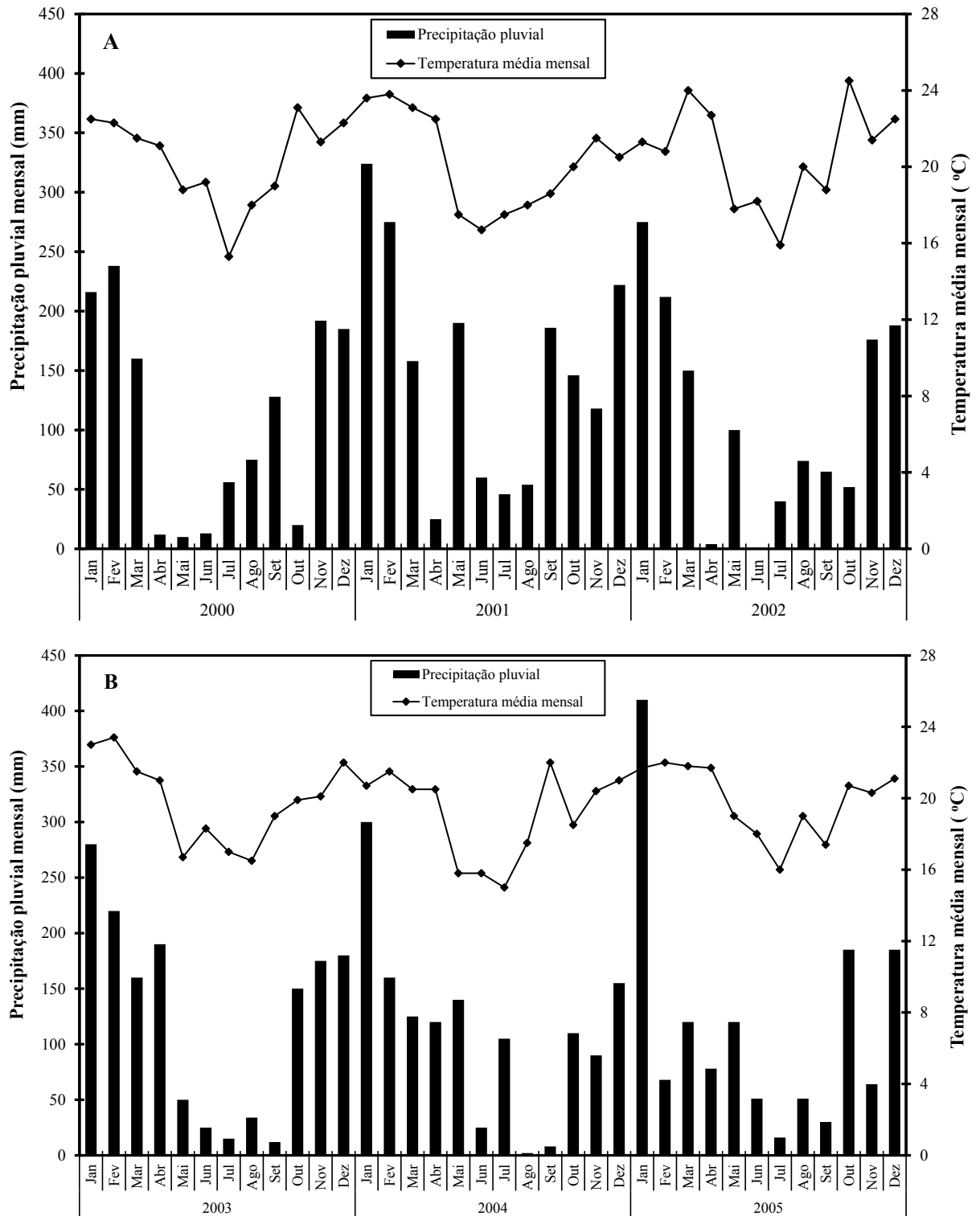


Figura 2. Precipitação pluvial e temperatura média mensal dos triênios 2000/2002 (A) e 2003/2005 (B) na Fazenda Experimental Lageado (FCA-UNESP), em Botucatu-SP.

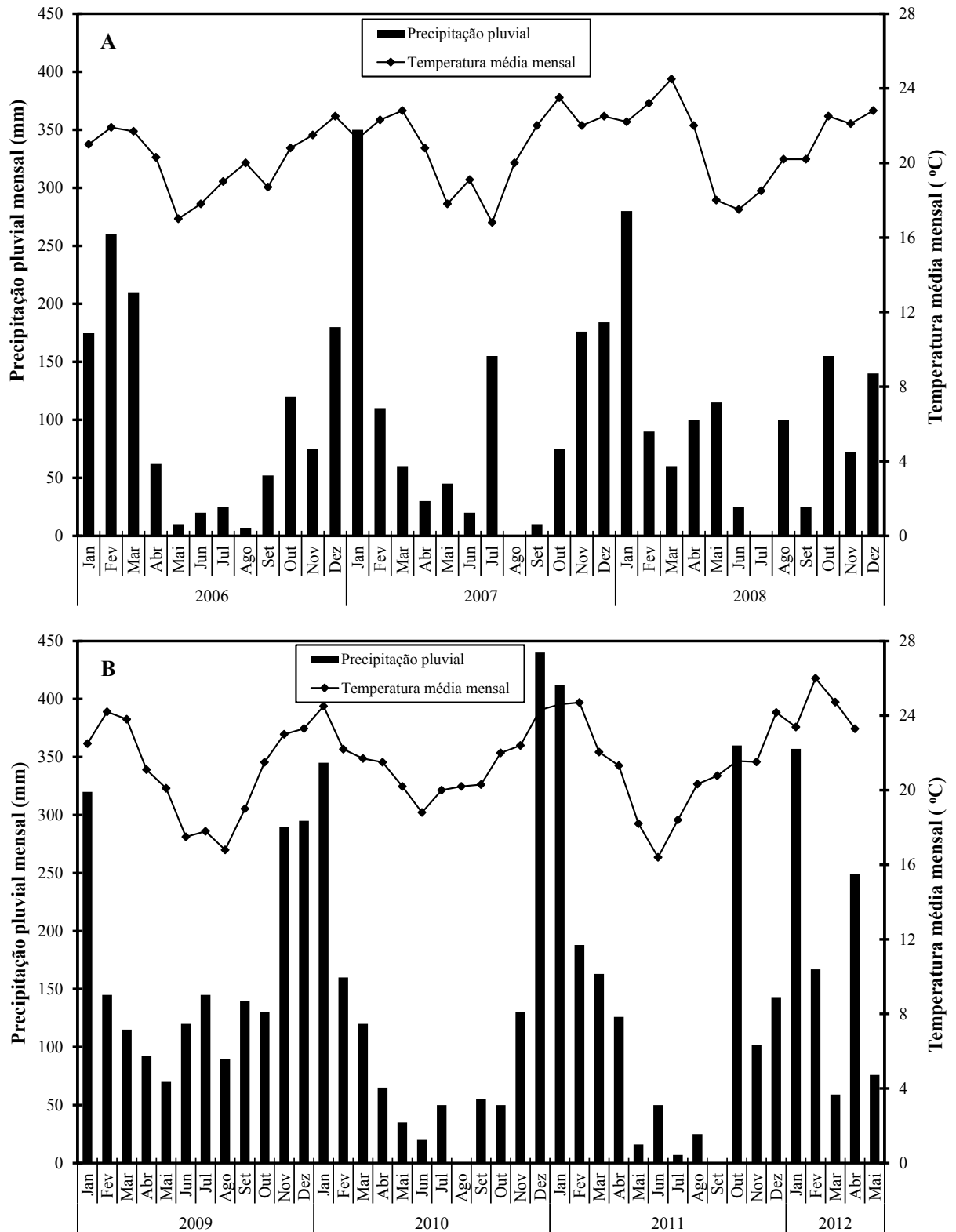


Figura 3. Precipitação pluvial e temperatura média mensal durante os períodos de 2006/2008 (A) e 2009/2012 (B) na Fazenda Experimental Lageado (FCA-UNESP), em Botucatu-SP.

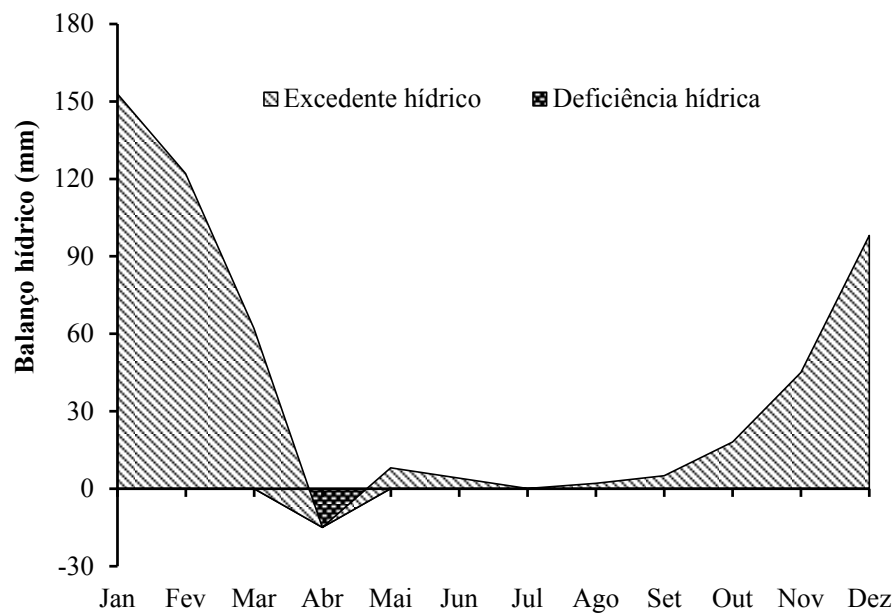


Figura 4. Balanço hídrico médio mensal durante o período de realização dos experimentos (2000–2012) na Fazenda Experimental Lageado (FCA-UNESP), em Botucatu-SP.

Os solos de ambas as áreas experimentais apresentam relevo suave ondulado, com boa drenagem e foram classificados como Latossolo Vermelho distroférico (EMBRAPA, 2006). Um possui textura média (210 g kg^{-1} de argila), e o outro textura argilosa (680 g kg^{-1} de argila). A distância entre as duas áreas experimentais é de aproximadamente 500 m, portanto, o regime hídrico durante a condução dos experimentos foi semelhante para os dois locais.

As áreas foram cultivadas com soja no verão e aveia-preta no inverno, em semeadura direta, por um ano agrícola (safra 99/00) antes da instalação dos experimentos. Em agosto de 2000, para caracterizar o perfil dos solos, foram coletadas 20 amostras de solo em cada uma das áreas experimentais, nas entrelinhas da cultura de inverno. Estas amostras foram coletadas aleatoriamente nas profundidades de 0–0,05, 0,05–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,40; 0,40–0,60; 0,60–0,80 e 0,80–1,00 m. Os resultados das análises químicas (RAIJ et al., 2001) e físicas (EMBRAPA, 1997) são mostrados na Tabela 1.

A fração argila isenta de óxidos de ferro livres do solo de textura média apresenta de 73 a 83 % de caulinita [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$] e 14 a 18 % de alofana, com teores menores que 3 % de gibbsita [$\text{Al}(\text{OH})_3$]. O solo argiloso apresenta de 60 a 79 % de caulinita e 13 a 20 % de gibbsita (CARVALHO et al., 1983).

Tabela 1. Propriedades químicas e físicas dos solos antes da instalação dos experimentos (Agosto/2000)

Propriedades químicas										
Camada	pH	MO	P _{resina}	H + Al	Ca	Mg	K	K _{nt} ⁽¹⁾	CTC	V
(m)		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmolc dm ⁻³ -----						%
Solo de textura média [†]										
0–0,05	5,2	21,0	18,4	27,3	21,0	13,0	2,68	1,50	64,0	57
0,05–0,10	5,2	18,1	16,2	28,2	17,0	11,0	0,65	1,00	56,9	50
0,10–0,20	4,6	18,9	5,3	34,1	8,0	5,8	0,55	0,72	48,5	30
0,20–0,40	4,0	18,2	2,9	44,8	5,0	2,6	0,71	0,38	53,1	16
0,40–0,60	3,8	15,3	1,9	66,0	3,0	1,2	0,32	0,54	70,5	6
0,60–1,00	3,8	14,3	1,7	67,4	2,0	0,6	0,23	0,50	70,2	4
Solo de textura argilosa ^{††}										
0–0,05	5,0	20,6	23,4	55,9	36,0	13,9	1,34	0,75	107,1	48
0,05–0,10	5,1	21,1	12,3	60,4	34,3	14,7	0,35	0,50	109,7	45
0,10–0,20	4,9	19,2	15,6	66,9	29,2	11,9	0,55	0,72	108,5	38
0,20–0,40	4,8	19,8	4,6	76,1	24,1	9,3	1,42	0,74	110,9	31
0,40–0,60	4,8	14,8	2,5	82,1	17,6	6,8	0,64	1,08	107,1	23
0,60–1,00	4,7	13,3	2,8	92,0	11,8	3,4	0,31	1,02	107,5	14
Propriedades físicas										
Camada	Granulometria			Classe textural	Densidade do solo					
	Argila	Silte	Areia							
(m)	----- g kg ⁻¹ -----				g cm ⁻³					
Solo de textura média [†]										
0–0,05	210	20	770	Média	1,39					
0,05–0,10	220	10	770	Média	1,49					
0,10–0,20	220	10	770	Média	1,45					
0,20–0,40	250	20	730	Média	1,52					
0,40–0,60	310	20	670	Média	n.d.					
0,60–1,00	300	20	680	Média	n.d.					
Solo de textura argilosa ^{††}										
0–0,05	580	180	240	Argilosa	1,22					
0,05–0,10	640	160	200	Muito Argilosa	1,22					
0,10–0,20	660	150	190	Muito Argilosa	1,22					
0,20–0,40	720	140	140	Muito Argilosa	1,25					
0,40–0,60	700	150	150	Muito Argilosa	1,30					
0,60–1,00	710	150	140	Muito Argilosa	n.d.					

[†] Dados obtidos em Foloni e Rosolem (2008). ^{††} Dados obtidos em Tozi, T. (dados não publicados). n.d.: não determinado. ⁽¹⁾ K não-trocável, obtido pela diferença entre o K extraído com HNO₃ 1,0 mol L⁻¹ fervente e o K trocável.

5.2 Delineamento Experimental e Tratamentos

O delineamento experimental adotado nos dois experimentos foi o de blocos ao acaso com sete tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por sete doses de K aplicadas anualmente (0, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O). Cada parcela experimental tinha 8,0 m de comprimento por 6,0 m de largura (48,0 m²).

5.3 Condução dos Experimentos e Manejo das Culturas

Em setembro de 2000 foram instalados os dois experimentos semeando-se a cultura do milheto. As culturas de verão foram: soja (*Glycine max* (L.), Merrill), nas safras 2000/01, 01/02, 02/03, 03/04, 04/05, 05/06, 06/07, 09/10, 10/11 e 11/12 e milho (*Zea mays* L.), nas safras de 2007/08; 08/09. No outono/inverno dos anos de 00, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 11 foi cultivada a aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb) e no outono/inverno de 2010 foi cultivado o crambe (*Crambe abyssinica* Hochst). No inverno de 08 e 09 os solos permaneceram em pousio. Na primavera de 00, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 09, 10 e 11 foi cultivado o milheto (*Pennisetum glaucum* L.) e na primavera de 07 e 08 o girassol (*Helianthus annuus* L.).

O milheto, a aveia-preta e o girassol foram cultivados de acordo com as recomendações técnicas de Salton e Kichel (1997), Derpsch e Calegari (1992) e Sfredo et al. (1984), respectivamente. A cultura do crambe foi cultivada de acordo com as recomendações de Pitol et al. (2010). A soja e o milho foram cultivados de acordo com as recomendações de Embrapa (2000) e Embrapa (1996), respectivamente.

Nos primeiros três anos dos experimentos (safras 00/01, 01/02 e 02/03), as doses de K aplicadas resultaram da combinação da adubação potássica em duas épocas: 0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de K₂O aplicados na semeadura do milheto cultivado na primavera, combinados com as doses de 0, 30, 60 e 90 kg ha⁻¹ de K₂O aplicadas na semeadura da cultura de verão (soja ou milho) cultivadas subsequentemente sobre a palhada do milheto (FOLONI; ROSOLEM, 2008). A partir do quarto ano (safra 03/04), as doses foram aplicadas em uma única vez na semeadura da cultura de verão. Em todos os anos, a adubação potássica foi realizada, manualmente, a lanço em área total, na forma de cloreto de potássio (KCl). A adubação fosfatada na cultura da soja foi realizada segundo a recomendação (RAIJ et al., 1997), mediante análise do solo. A aplicação de nitrogênio (N) e

fósforo (P) nas culturas do milho e crambe foi realizada segundo a recomendação (RAIJ et al., 1997; PITOL et al., 2010), mediante análise do solo. As culturas de cobertura (milheto e aveia-preta) não receberam aplicação de fertilizantes nitrogenados e fosfatados.

Em novembro de 2000, antes da semeadura da soja no solo de textura média, fez-se uma calagem superficial com 1,0 Mg ha⁻¹ de calcário (CaO = 39 %; MgO = 13 % e PRNT = 91 %). Em setembro de 2005, 0,9 e 3,0 Mg ha⁻¹ de calcário foram aplicados em superfície sem incorporação para elevar a saturação por bases do solo de textura média a 60 % e do solo argiloso a 70 %, respectivamente (RAIJ et al., 1997). Em setembro de 2010, fez-se novamente calagem superficial com 0,7 e 2,3 Mg ha⁻¹ de calcário (CaO = 25 %; MgO = 12 % e PRNT = 95 %) visando elevar a saturação por bases a 60 % no solo de textura média e a 70 % no solo argiloso.

5.4 Diagnose Foliar, Produtividade e Exportação de Potássio pelas Culturas

Entre 2000/01 e 2011/12, foram avaliados e analisados os dados de produção de grãos e teores de K nas folhas e nos grãos das culturas de verão (soja ou milho) e de outono/inverno (crambe).

No estágio de floração plena de cada cultura, correspondente a R2 (FEHR; CAVINESS, 1977), R1 (MAGALHÃES; DURÃES, 2006) e F (PITOL et al., 2010), para soja, milho e crambe, respectivamente, foram efetuadas amostragens do tecido foliar para avaliar os teores de K. Na cultura da soja, coletou-se o terceiro trifólio com pecíolo, a partir do ápice das plantas, num total de 30 trifólios por unidade experimental, conforme procedimentos descritos por Malavolta et al. (1997). Na cultura do milho, coletou-se o terço médio com nervura da folha oposta e abaixo da inserção da espiga (MALAVOLTA et al., 1997), num total de 15 folhas por unidade experimental. Na cultura do crambe, como não há recomendação de amostragem específica, coletou-se a terceira folha totalmente expandida a partir do ápice da haste principal, num total de 30 folhas por unidade experimental. As amostras de tecido foliar foram lavadas em água destilada, secas em estufa de circulação forçada de ar, a 65 °C, por 72 h e moídas em moinho tipo Wiley. Em seguida, o teor de K foi determinado, após a digestão úmida utilizando uma mistura de ácido nítrico (HNO₃) e ácido perclórico (HClO₄) na proporção 6:1 (v:v), por fotometria de chama (MALAVOLTA et al., 1997).

Na maturação das culturas, correspondente a R8 (FEHR; CAVINESS, 1977), R6 (MAGALHÃES; DURÃES, 2006) e M (PITOL et al., 2010), para soja, milho e crambe, respectivamente, efetuou-se a avaliação da produtividade de grãos. A produtividade de soja e crambe foram determinadas em uma área de 9,45 m² (1,35 × 7,0 m), a partir da colheita de três linhas de cultivo, com sete metros de comprimento cada, em local escolhido aleatoriamente, na parcela onde se procedeu a coleta de amostras foliares. A produtividade de milho foi determinada em uma área de 11,2 m² (1,60 × 7,0 m), a partir da colheita de duas linhas de cultivo, com sete metros comprimento cada, em local escolhido aleatoriamente, na parcela onde se procedeu a coleta de amostras foliares. Após a colheita, os grãos de soja, milho ou crambe foram pesados e tiveram os seus teores de água determinados e corrigidos para 13 %.

As exportações de K foram estimadas usando a produção de grãos e a concentração do nutriente nos grãos de soja, milho ou crambe, determinado como em Malavolta et al. (1997), de acordo com a Equação 1.

$$K_{\text{Exportado}} = (\text{Prod.} \times K_{\text{Grãos}}) / 1000 \quad [1]$$

onde $K_{\text{Exportado}}$ é a quantidade de K exportado através da colheita dos grãos de soja, milho e crambe (em kg ha⁻¹); Prod. é a produção de grãos (em kg ha⁻¹) de soja, milho ou crambe em cada tratamento; e, $K_{\text{Grãos}}$ é a concentração de K nos grãos (em g kg⁻¹) de soja, milho ou crambe em cada um dos tratamentos.

5.5 Coleta, Preparo e Análise Química do Solo

Durante o período de condução dos experimentos, em alguns anos, amostras de solos foram coletadas nas camadas de 0–0,20 m, a fim de acompanhar a disponibilidade de K trocável e a fertilidade geral dos solos. Os resultados destas análises são mostrados nos Apêndices 1 a 4.

Em maio de 2012, 40 dias após a colheita da soja na safra de verão de 2011/12, amostras de solos foram coletadas nas camadas de 0–0,05; 0,05–0,10; 0,10–0,20; 0,20–0,40; 0,40–0,60; 0,60–0,80 e 0,80–1,00 m de profundidade. Em um experimento prévio, verificou-se que um período de 40 dias foi suficiente para a liberação de mais de 98 % do K

contido nos resíduos culturais da soja (Apêndice 5). Portanto, neste estudo não foi avaliado o K contido nos resíduos culturais da soja por ser inexpressivo. As amostras de solos foram coletadas com trado tipo caneca em sete pontos por parcela, formando uma amostra composta representativa de cada tratamento. Essas amostras foram secas ao ar, passadas em peneira de 2,0 mm e submetidas à determinação dos teores de K trocável e K não-trocável. Essas amostras também foram submetidas as análises químicas de rotinas (RAIJ et al., 2001) e as análises físicas (EMBRAPA, 1997), e os resultados são mostrados no Apêndice 6.

O teor de K trocável no solo foi determinado pelo método da resina de troca iônica. Este método é utilizado pelos laboratórios de análises de rotina do Estado de São Paulo. O procedimento analítico está detalhado em Raij et al. (2001).

Para a determinação do teor de K não-trocável, utilizou-se o método proposto por Knudsen et al. (1982). Amostras de 2,5 g de TFSA de cada tratamento foram colocadas em erlenmeyer de 125 mL e acrescidas de 25 mL de HNO_3 1,0 mol L^{-1} . Os erlenmeyer parcialmente tampados com lâminas de alumínio foram distribuídos em placa aquecedora a 110 °C, permanecendo sob fervura por 10 min. Em seguida, o extrato foi filtrado em papel de filtragem lenta tipo Whatman nº 42 e o resíduo lavado com HNO_3 0,1 mol L^{-1} . Ao final, o volume foi aferido em balão volumétrico de 50 mL e acondicionado para a determinação dos teores de K em fotômetro de chama. O teor de K não-trocável foi obtido pela diferença entre K extraído com HNO_3 1,0 mol L^{-1} fervente e o K trocável extraído pelo método da resina.

As medidas da relação quantidade/intensidade (Q/I) foram determinadas conforme método descrito por Mielniczuk (1978), com modificações. Optou-se por utilizar, como solução de referência, CaCl_2 1,0 mmol L^{-1} . A partir das medidas quantidade e intensidade, por meio de equações ajustadas para cada solo, foi construída “a curva” que relaciona o ΔK (fator quantidade) em função do QAK (fator intensidade) e estimaram-se os valores do quociente de atividade de equilíbrio (QAKe), do potássio em equilíbrio na solução do solo (K_e) e poder tampão de potássio (PTK). O QAKe foi considerado o ponto onde o ΔK foi igual a zero, o K_e como sendo o intercepto da reta ao eixo ΔK , ou seja, quando $\text{QAK} = 0$, e o PTK, pela declividade da reta. Os resultados são mostrados no Apêndice 7.

5.6 Balanço de Potássio no Sistema Solo-Planta

A quantidade de K trocável no solo, em kg ha^{-1} , foram estimados considerando a concentração do nutriente, a densidade do solo e o volume de solo em cada uma das camadas amostradas. Considerando a quantidade de K trocável no solo no primeiro ano (Agosto de 2000) e após 12 anos de experimento (Maio de 2012), a Equação 2 foi utilizada para estimar a variação na disponibilidade de K trocável e K não-trocável em cada camada de solo (até 1,0 m).

$$\Delta K_{\text{Solo}} = K_{\text{Solo final}} - K_{\text{Solo inicial}} \quad [2]$$

onde ΔK_{Solo} é a variação no K trocável ou K não-trocável no perfil do solo até 1,0 m, durante a condução do experimento; $K_{\text{Solo final}}$ é a quantidade de K trocável em Maio do último ano de experimento; e, $K_{\text{Solo inicial}}$ é a quantidade de K trocável no perfil do solo em Agosto do primeiro ano.

O balanço de K no sistema solo-planta ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foi estimado, após o décimo segundo ano de condução do experimento, considerando a quantidade do nutriente adicionada na adubação ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), a quantidade de K exportada da lavoura através dos grãos colhidos ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e a alteração na quantidade de K trocável (ΔK_{Solo}) no perfil do solo até 1,0 m de profundidade ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), de acordo com a Equação 3:

$$\text{Balanço de K} = K_{\text{Adubação}} - K_{\text{Exportado}} - \Delta K_{\text{Solo}} \quad [3]$$

O saldo negativo para o balanço de K no sistema solo-planta foi interpretado como uma liberação líquida de K do solo proveniente de formas inicialmente não-trocáveis, enquanto que saldo positivo indica ter havido perdas de K por lixiviação para as camadas mais profundas do solo, respectivamente.

5.7 Análises Estatísticas

Os dados originais dos dois experimentos foram submetidos à análise de variância, aplicando-se o teste F a 5 %, e, quando os efeitos da adubação potássica foram significativos, utilizou-se análise de regressão e as equações significativas até 5 % de

probabilidade pelo teste F, com os maiores coeficientes de determinação (R^2) foram ajustadas. O estudo de regressão foi aplicado para as seguintes variáveis: teor de K nas folhas de soja, milho ou crambe; produtividade e acúmulo de K nos grãos de soja, milho ou crambe. Estas análises foram realizadas utilizando o software SigmaPlot 11.0 para Windows (Systat Software, Inc., San Jose, CA, EUA).

Os dados dos teores de K trocável e K não-trocável dos solos foram submetidos à análise de variância, aplicando-se o teste F e, quando significativas, para cada profundidade amostrada, as médias dos efeitos da adubação potássica foram comparadas pelo teste t a 5 % de probabilidade. Estas análises foram realizadas utilizando-se o software Sisvar versão 5.1 para Windows (Software de Análises Estatísticas, UFLA, Lavras, MG, BRA).

Para comparação dos efeitos da adubação potássica na disponibilidade e no balanço de K no sistema solo-planta, o critério estatístico empregado foi à comparação de médias, utilizando o intervalo de confiança da média 95 % ($p = 0,05$) (PAYTON et al., 2000). Nessa técnica, dois tratamentos são considerados significativamente diferentes quando não há sobreposição entre os limites superior e inferior.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Produtividade de Grãos das Culturas

O rendimento de grãos alcançados nas dez safras de soja, nas duas safras de milho e na safra de outono/inverno de crambe com a aplicação de doses de fertilizante potássico são mostrados na Tabela 2. A produtividade média de soja no solo de textura média, durante o período de experimento, variou de 1.526 a 3.820 kg ha⁻¹, com valor médio de 2.668 kg ha⁻¹. No solo de argiloso, a produtividade média variou de 2.544 a 4.420 kg ha⁻¹, com valor médio de 3.413 kg ha⁻¹. A produtividade média de milho (safras 2007/08 e 2008/09) variou de 5.236 a 7.602 kg ha⁻¹ nos solos de textura média e argilosa, respectivamente. A produtividade média de crambe foi de 542 e 1.003 kg ha⁻¹ no solo de textura média e argilosa, respectivamente. Estes resultados indicam que, em nenhum ano, houve limitação drástica da produtividade, causada por outros fatores, além da deficiência de K. Os curtos períodos de estiagem não chegaram a comprometer o rendimento de grãos das culturas.

Apesar da baixa disponibilidade inicial de K nos solos (teor médio na camada de 0–0,20 m de 1,30 mmol_c dm⁻³ no solo de textura média e 0,75 mmol_c dm⁻³ no solo argiloso; Tabela 1), a cultura da soja, sem a aplicação de K, atingiu produção de grãos superior a 90 % do rendimento máximo nos três primeiros anos no solo de textura média e nos quatro primeiros anos no solo argiloso (Tabela 2 e Figura 5). A baixa resposta das culturas à adubação potássica em diferentes regiões do Brasil já tinha sido obtida por outros autores. Dentre eles, destacam-se os trabalhos de Borkert et al. (1993), em solos do Paraná, e os de Scherer (1998a,b), em solos de Santa Catarina, ambos cultivados com soja, e o de Brunetto et al. (2005), com as culturas da soja, milho e sorgo no Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 2. Produtividade de grãos de soja, milho e crambe em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Soja (00/01)	Soja (01/02)	Soja (02/03)	Soja (03/04)	Soja (04/05)	Soja (05/06)	Soja (06/07)	Milho (07/08)	Milho (08/09)	Soja (09/10)	Crambe (10)	Soja (10/11)	Soja (11/12)	TOTAL
	kg ha ⁻¹													
	Solo de textura média													
0	3.370	2.874	3.753	2.553	1.582	1.438	1.050	2.532	2.359	784	186	362	361	23.204
30	3.477	3.010	3.722	3.322	2.455	2.341	1.811	4.986	5.022	1.958	454	1.426	1.098	35.082
60	3.694	3.062	4.037	3.837	2.621	2.463	1.849	5.784	5.757	2.868	640	1.893	1.544	40.050
90	3.704	3.155	3.886	3.967	2.950	2.867	2.353	6.224	5.951	3.105	626	2.306	1.974	43.068
120	3.525	3.123	3.796	4.072	2.466	2.878	2.209	6.341	6.209	3.125	634	2.288	1.963	42.630
150	3.500	2.867	3.748	3.744	2.463	2.611	2.103	5.843	5.554	3.046	625	2.222	1.870	40.196
180	3.287	2.856	3.796	4.090	2.428	2.565	2.232	6.037	5.798	3.015	628	2.090	1.872	40.694
Média	3.508	2.992	3.820	3.655	2.424	2.452	1.944	5.392	5.236	2.557	542	1.798	1.526	37.846
Regressão	Q**	Q**	ns	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
	Solo de textura argilosa													
0	4.116	3.537	4.070	3.159	2.541	2.456	1.921	6.340	6.532	2.257	355	1.915	1.456	40.655
30	4.465	3.690	4.097	3.180	2.976	3.128	2.706	7.347	7.224	2.987	685	2.819	2.337	47.641
60	4.558	3.802	4.218	3.522	3.194	3.439	3.042	7.865	7.408	3.768	987	3.287	2.819	51.909
90	4.544	3.639	4.353	3.357	3.327	3.468	2.975	8.094	7.818	3.956	1.158	3.755	2.706	53.150
120	4.514	3.505	4.304	3.424	3.286	3.461	3.009	7.877	7.369	4.165	1.236	3.882	2.894	52.926
150	4.246	3.664	4.134	3.344	3.052	3.318	2.970	7.972	7.664	3.824	1.305	3.930	2.810	52.233
180	4.496	3.734	4.087	3.482	3.081	3.301	2.883	7.721	7.391	3.951	1.297	3.819	2.784	52.027
Média	4.420	3.653	4.180	3.353	3.065	3.224	2.787	7.602	7.344	3.558	1.003	3.344	2.544	50.077
Regressão	Ns	Ns	ns	ns	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**

ns: não significativo. * e ** significativos a 5 e 1 %, respectivamente. L: regressão linear. Q: regressão quadrática.

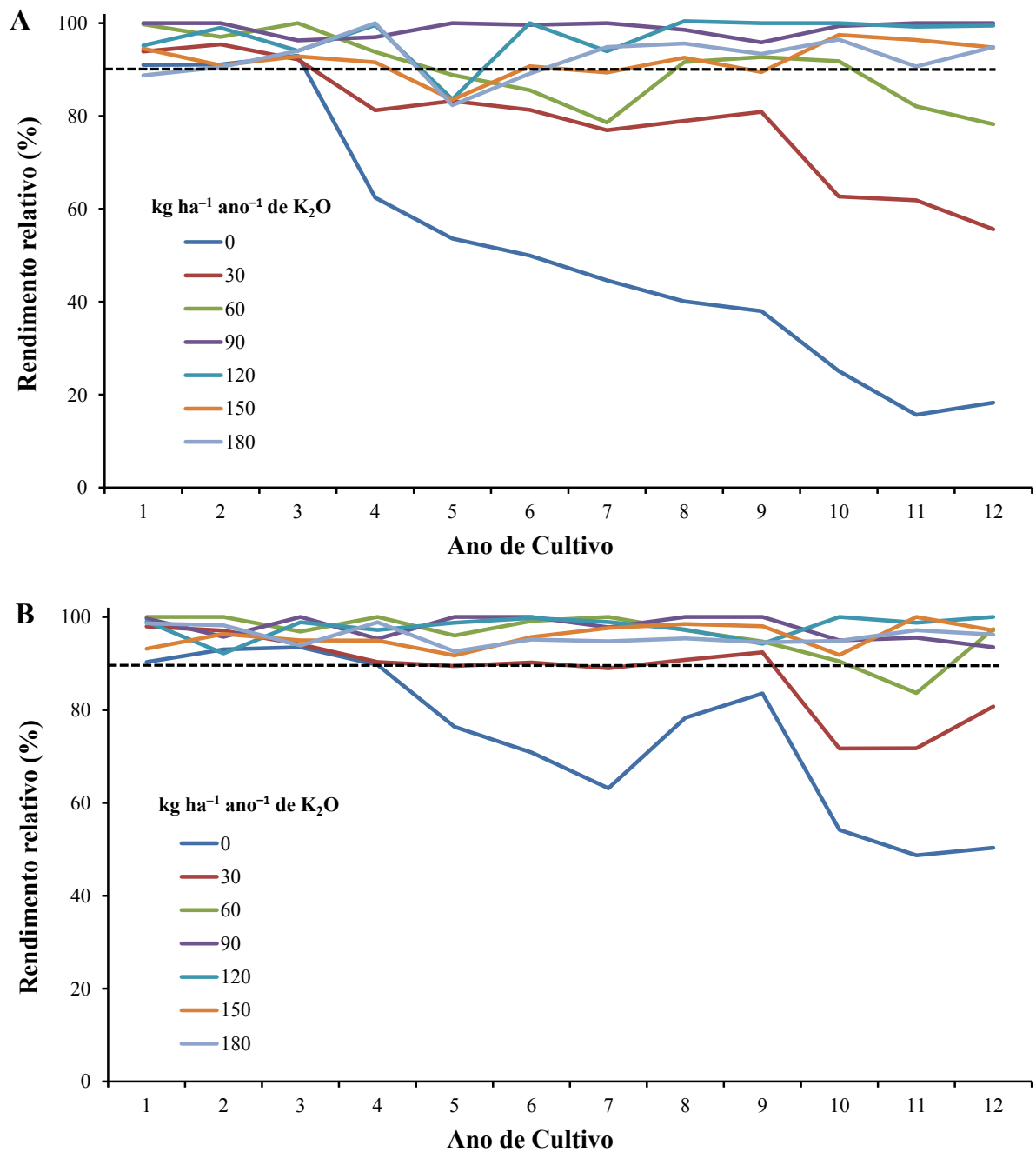


Figura 5. Rendimento relativo de grãos de soja, milho e crambe em função da adubação potássica em solo tropical de textura média (A) e argilosa (B). (----) representa o rendimento relativo de grãos de 90 %.

Esta baixa resposta das culturas comerciais à adubação potássica é atribuída à liberação de K não-trocável. Tal inferência justifica os resultados obtidos neste estudo em virtude da soja possuir elevada capacidade de utilizar as reservas de K não-trocável do solo (FERNANDES et al., 1993). Segundo Gommers et al. (2005), quando os mecanismos que controlam a absorção de K são eficientes, principalmente em baixas concentrações na

solução do solo, tem-se como resultado um forte gradiente químico em direção à rizosfera, criando um ambiente favorável à liberação do K de formas não-trocáveis.

A partir do quarto ano (safra 2003/04) no solo de textura média e do quinto ano (safra 2004/05) no solo argiloso, a produção de grãos de soja, sem a adição de K, foi reduzida (Tabela 2 e Figura 5), indicando que em solos com teor inicial de K trocável considerado baixo, a capacidade do solo em suprir a necessidade do nutriente varia de 3 a 4 anos agrícolas (safras). A menor produção de grãos, a partir do 3º e, ou 4º ano pode ser atribuída ao esgotamento das formas prontamente disponíveis de K do solo com o decorrer dos cultivos sucessivos. Tal inferência confirma os dados reportados por Havlin e Westfall (1985), os quais mencionaram que o K trocável tem sido considerado um bom índice, em solos tropicais, para prever a capacidade de suprimento de K dos solos com reserva disponível no curto prazo. No entanto, essa forma de K do solo, responsável pela disponibilidade imediata para as plantas, não é capaz de manter a produtividade das culturas a médio ou longo prazo, havendo rápida queda na produção logo após os primeiros cultivos.

Em experimento conduzido por 12 anos em um Latossolo Húmico de Campos Novos (SC), de textura muito argilosa, Scherer (1998b) constatou que teor inicial de $3,20 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K (Mehlich 1) no solo foi suficiente para atingir rendimentos máximos de soja nos quatro primeiros anos de cultivo, não havendo necessidade de adubar com K. No entanto, a partir do quinto cultivo houve drástica redução da produtividade da soja, de modo que produtividade de grãos no 11º cultivo representou apenas 20 % do rendimento máximo com fertilização.

No presente estudo a produtividade de grãos no último cultivo de soja (safra 2011/12) no solo de textura média, sem a adição de K, foi de apenas 361 kg ha^{-1} e, com a aplicação do nutriente a produtividade aumentou para 1.720 kg ha^{-1} (média das seis doses). No solo argiloso, a produtividade de grãos no último cultivo de soja (safra 2011/12), sem a adição de K, foi de 1.456 kg ha^{-1} e, com a aplicação do nutriente a produtividade média aumentou para 2.725 (Tabela 2). Em geral, os resultados obtidos neste estudo indicam que é possível obter altas produtividades de grãos com baixas doses de fertilizantes potássicos ($30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O), fato este decorrente da contribuição de formas não-trocáveis de K na nutrição das plantas. No entanto, a omissão da adubação potássica, por 12 anos consecutivos, proporcionou produtividade de grãos inferior a 29 e 54 % do rendimento máximo, nos últimos três anos agrícolas nos solos de textura média e argilosa, respectivamente (Figura 5).

A produção acumulada de grãos das culturas comerciais foi incrementada com a adição de fertilizante potássico (Tabela 2). Quando não houve adição de

K no solo, a produção acumulada de grãos foi de, apenas, 23.240 e de 40.655 kg ha⁻¹ para os solos de textura média e argilosa, respectivamente. Por outro lado, quando foi adicionado K, foi possível obter produção acumulada de 40.287 e 51.648 kg ha⁻¹ (média das seis doses) nos solos de textura média e argilosa, respectivamente. A adição de fertilizante potássico aumentou a produção de grãos das culturas em torno de 73 e 27 % para os solos de textura média e argilosa, respectivamente. Estes resultados indicam que os solos tropicais argilosos são menos dependentes de adubação potássica quando comparado aos solos de textura média. A maior capacidade de suprimento de K do solo argiloso reflete a maior disponibilidade de K mantida na solução do solo durante os anos de cultivos em decorrência do maior PTK desse solo (Apêndice 6). Solos com maior PTK possuem maior capacidade de reposição de K na solução, à medida que o K é retirado do solo (ERNANI et al., 2007a).

A produção máxima de grãos foi de 43,8 e 53,9 Mg ha⁻¹, obtido com a adição de 120 e 121 kg ha⁻¹ de K₂O, para os solos de textura média e argilosa, respectivamente (Figura 6). Em experimento de longa duração (1995–2002) conduzido em um Argissolo Vermelho com 110 g kg⁻¹ de argila de Santa Maria (RS), Brunetto et al. (2005), avaliando cinco doses de K aplicadas anualmente na semeadura da cultura de verão (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O), obtiveram rendimento máximo de 32,4 Mg ha⁻¹ com a aplicação de 128 kg ha⁻¹ de K₂O. Em geral, estudos com adubação potássica mostram que as curvas de resposta a K atingem rendimento máximo com a aplicação de 100 a 130 kg ha⁻¹ de K₂O, especialmente em solos de textura média a arenosa, com teores médios a baixos de K trocável. No entanto, deve-se ressaltar que a dose de máxima eficiência econômica normalmente não excede os 80 kg ha⁻¹ de K₂O, quando faz-se aplicação na forma de KCl. Neste estudo, a produtividade de grãos equivalente a 90 % do rendimento máximo foi obtida com a aplicação de 62 e 42 kg ha⁻¹ de K₂O, respectivamente, no solo de textura média e argilosa.

Independentemente da adição ou não de fertilizante potássico, a produção de grãos foi diferente entre os solos na maioria dos cultivos (Tabela 2 e Figura 6), demonstrando que os solos possuem capacidade de produção distinta. A menor produção de grãos obtida no solo de textura média deve-se ao menor PTK desse solo (Apêndice 7). Solos que apresentam menor PTK indicam que, quando o K é absorvido da solução do solo pelas raízes das plantas, a capacidade de repô-lo também é reduzida, de modo que, se nenhuma adubação for realizada ao longo dos cultivos sucessivos, haverá deficiência deste nutriente.

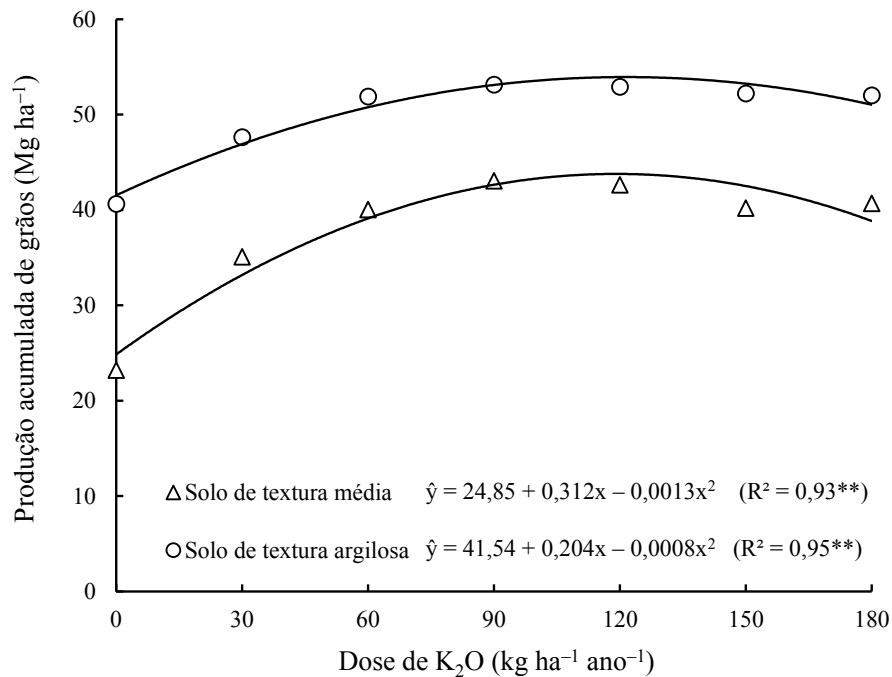


Figura 6. Produção acumulada de grãos de soja, milho e crambe durante os 12 anos de experimento com adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa. **: significativo a 5 % de probabilidade.

6.2 Extração e Exportação de Potássio pelas Culturas

Os teores de K nas folhas e nos grãos de soja, milho e crambe em função a aplicação anual de doses de fertilizante potássico são mostrados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. O decréscimo nos teores de K nas folhas de soja verificado no decorrer dos cultivos, no tratamento sem adição do nutriente, é devido à exaustão das formas prontamente disponíveis de K nos solos, como mencionado anteriormente. Sintomas de deficiências severas de K nas plantas de soja e crambe foram observados nos quatro últimos cultivos, no tratamento sem adição de K, quando os teores de K nas folhas foram inferiores a 10 g kg⁻¹ (Apêndice 9). Inicialmente os sintomas de deficiência de K se restringiram ao aparecimento de manchas cloróticas e necroses nas bordas das folhas mais velhas. Mas, com o decorrer do desenvolvimento a deficiência, a necrose, avançou para o centro dos folíolos e as áreas necrosadas ficaram quebradiças, deixando os folíolos com aspecto esfarrapado. A deficiência severa de K nas plantas resultou no abortamento de flores e grãos e retardamento das brotações laterais, levando a maturação desuniforme. Os grãos produzidos eram pequenos, enrugados e deformados. Scherer (1998a) e Borkert et al. (1993) constataram deficiências severas de K em soja, quando os teores estavam abaixo de 9 e 12 g kg⁻¹, respectivamente.

Tabela 3. Teor de K nas folhas de soja, milho e crambe em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Soja (00/01)	Soja (01/02)	Soja (02/03)	Soja (03/04)	Soja (04/05)	Soja (05/06)	Soja (06/07)	Milho (07/08)	Milho (08/09)	Soja (09/10)	Crambe (10)	Soja (10/11)	Soja (11/12)
	----- g kg ⁻¹ -----												
	Solo de textura média												
0	–	–	–	9,4	–	–	7,9	8,3	8,4	–	7,8	5,3	4,8
30	–	–	–	17,2	–	–	18,8	20,3	19,6	–	10,6	14,7	15,6
60	–	–	–	19,9	–	–	21,4	24,5	24,0	–	13,7	17,9	22,1
90	–	–	–	26,1	–	–	20,8	22,2	21,3	–	17,3	23,4	24,2
120	–	–	–	25,2	–	–	22,5	20,2	20,9	–	20,8	26,5	24,7
150	–	–	–	32,6	–	–	21,9	26,7	23,1	–	22,1	26,6	24,3
180	–	–	–	29,8	–	–	20,1	25,5	21,4	–	21,2	25,9	24,0
Regressão				Q**			Q**	Q**	Q**		Q**	Q**	Q**
	Solo de textura argilosa												
0	–	–	–	19,1	–	–	14,6	12,9	13,3	–	9,7	7,4	7,8
30	–	–	–	20,5	–	–	17,8	17,8	18,8	–	14,5	12,4	14,3
60	–	–	–	24,5	–	–	22,6	20,7	19,6	–	20,5	16,6	16,5
90	–	–	–	24,0	–	–	18,9	21,0	22,3	–	24,2	24,7	22,7
120	–	–	–	24,4	–	–	21,9	19,9	21,6	–	26,4	24,3	24,3
150	–	–	–	21,4	–	–	24,7	20,5	21,5	–	36,9	22,1	20,8
180	–	–	–	25,6	–	–	20,2	22,3	20,4	–	35,5	18,2	21,3
Regressão				L**			Q**	Q**	Q**		Q**	Q**	Q**

– não determinado. * e ** significativos a 5 e 1 %, respectivamente. L: regressão linear. Q: regressão quadrática.

Tabela 4. Teor de K nos grãos de soja, milho e crambe em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Soja (00/01)	Soja (01/02)	Soja (02/03)	Soja (03/04)	Soja (04/05)	Soja (05/06)	Soja (06/07)	Milho (07/08)	Milho (08/09)	Soja (09/10)	Crambe (10)	Soja (10/11)	Soja (11/12)
	----- kg Mg ⁻¹ -----												
	Solo de textura média												
0	11,5	10,2	12,2	14,8	14,3	11,8	12,6	5,04	4,93	14,1	8,1	12,6	13,9
30	15,6	12,1	14,2	14,9	15,9	14,6	14,5	5,15	4,98	15,6	8,3	13,7	14,5
60	15,1	11,5	15,1	18,6	18,8	15,0	15,8	5,83	6,20	17,1	8,8	15,9	16,3
90	14,8	13,9	16,6	19,0	17,9	14,7	16,8	5,36	7,02	18,4	9,7	17,4	17,2
120	16,0	12,6	16,4	20,5	16,9	15,8	16,4	6,08	6,83	17,5	9,8	15,9	17,0
150	13,2	13,1	15,3	19,6	17,8	16,2	15,8	5,94	6,55	17,2	10,1	15,5	17,4
180	12,7	12,6	14,6	18,6	16,4	15,8	14,9	5,93	6,21	17,5	10,5	16,7	16,3
Média	14,1	12,3	14,9	18,0	16,9	14,8	15,3	5,62	6,10	16,8	9,3	15,4	16,1
Regressão	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	Q*	ns	L*	Q*	Q*
	Solo de textura argilosa												
0	15,5	13,8	15,4	14,5	13,5	14,4	15,1	4,98	4,82	15,3	9,8	14,8	14,2
30	15,3	12,9	15,7	15,2	15,8	16,0	17,0	5,52	5,08	15,9	11,4	17,8	17,5
60	16,3	13,2	16,5	14,4	14,9	16,7	16,5	5,33	4,80	16,7	12,0	18,3	18,7
90	17,4	14,7	16,6	16,4	15,9	17,5	18,1	5,89	5,46	15,9	12,9	17,4	18,0
120	17,5	14,4	17,2	16,2	17,1	16,9	18,7	6,03	5,40	16,1	13,5	17,8	17,9
150	15,8	13,3	17,6	16,8	17,3	17,3	19,2	5,85	5,61	15,9	13,9	17,2	18,2
180	16,5	13,8	16,1	15,7	15,8	17,2	18,2	5,94	4,90	16,9	14,1	18,5	19,0
Média	16,3	13,7	16,4	15,6	15,8	16,6	17,5	5,65	5,15	16,1	12,5	17,5	17,9
Regressão	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	Ns	ns	ns	ns	L*	ns	ns

ns: não significativo. * e ** significativos a 5 e 1 %, respectivamente. L: regressão linear. Q: regressão quadrática.

Em geral, quando houve adição de K os teores de K nas folhas de soja, milho e crambe situam-se na faixa considerada adequada (Tabela 3). Scherer (1998a) definiu como nível de suficiência para a soja uma concentração de 17 g kg^{-1} de K nas folhas. Malavolta et al. (1997) estabeleceram como ideal para o ótimo desenvolvimento das plantas concentrações entre 17 e 25 g kg^{-1} de K nas folhas de soja e entre 17 e 35 g kg^{-1} nas folhas de milho. Para a cultura do crambe, a concentração de 26 g kg^{-1} de K nas folhas foi sugerida como nível de suficiência (ROSOLEM; STEINER, 2014).

O teor de K nos grãos de soja pouco se alterou com as doses de K, embora os menores teores tenham sido encontrados no tratamento sem adição de K (Tabela 4). O teor médio de K nos grãos de soja variou de $12,3$ a $18,0 \text{ g kg}^{-1}$ no solo de textura média e de $13,7$ a $17,9 \text{ g kg}^{-1}$ no solo argiloso. Estes dados indicam que para cada tonelada de grãos de soja produzida houve exportação média de $12,3$ a $18,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de K. Estimativas de exportação de K pela soja foram descritas por Borkert et al. (2005), que constataram que para cada tonelada de grãos produzidos são exigidos cerca de 30 kg de K (em torno de 36 kg de K_2O), sendo 60% deste K exportado com a colheita dos grãos (em torno de 18 kg de K).

O teor de K nos grãos de milho foi de $5,86$ e $5,40 \text{ g kg}^{-1}$ (médias das duas safras) no solo de textura média e argilosa, respectivamente (Tabela 4). Para cada tonelada de grãos de milho produzida houve exportação de 5 a 6 kg ha^{-1} de K. De acordo com Coelho (2005), é necessário que se utilize adubação potássica de cerca de 17 kg de K_2O (em torno de 14 kg de K) para produzir uma tonelada de grãos de milho. Em torno de 32% deste montante (cerca de $4,5 \text{ kg}$ de K) são exportados da área em razão da colheita dos grãos.

O teor de K nos grãos de crambe aumentou com o acréscimo das doses de fertilizante potássico nas duas classes de solo. Para cada tonelada de grãos de crambe produzida houve exportação média de $9,3$ e $12,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de K no solo de textura média e argilosa, respectivamente (Tabela 4). Esta quantidade de K exportada é semelhante à relatada para a cultura da canola (9 kg ha^{-1} de K por tonelada de grãos) (HALLIDAY et al., 1992).

A exportação de K pelas culturas durante os 12 anos de experimento variou em função da cultura e da adição de K (Tabela 5). A quantidade de K exportada pela soja no solo de textura média variou de $25,2$ (safra 2011/12) a $66,7 \text{ kg ha}^{-1}$ (safra 2003/04), com exportação média de $41,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de K. No solo argiloso, a quantidade de K exportada variou de $46,2$ (safra 2011/12) a $72,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (safra 2000/01), com exportação média de $55,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de K. A quantidade de K exportada pelo milho foi de $31,7$ e $40,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (médias das duas safras) no solo de textura média e argilosa, respectivamente. A exportação de K pelo crambe foi de $5,2$ e $13,0 \text{ kg ha}^{-1}$ no solo de textura média e argilosa, respectivamente.

Tabela 5. Quantidade de K exportada com a colheita dos grãos de soja, milho e crambe em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Soja (00/01)	Soja (01/02)	Soja (02/03)	Soja (03/04)	Soja (04/05)	Soja (05/06)	Soja (06/07)	Milho (07/08)	Milho (08/09)	Soja (09/10)	Crambe (10)	Soja (10/11)	Soja (11/12)	TOTAL
----- kg ha ⁻¹ -----														
Solo de textura média														
0	38,8	29,3	45,8	37,8	22,6	17,0	13,2	12,8	11,6	11,1	1,5	4,6	5,0	251
30	54,2	36,4	52,9	49,5	39,0	34,2	26,3	25,7	25,0	30,5	3,8	19,5	15,9	413
60	55,8	35,2	61,0	71,4	49,3	36,9	29,2	33,7	35,7	49,0	5,6	30,1	25,2	518
90	54,8	43,9	64,5	75,4	52,8	42,1	39,5	33,4	41,8	57,1	6,1	40,1	34,0	585
120	56,4	39,3	62,3	83,5	41,7	45,5	36,2	38,6	42,4	54,7	6,2	36,4	33,4	576
150	46,2	37,6	57,3	73,4	43,8	42,3	33,2	34,7	36,4	52,4	6,3	34,4	32,5	531
180	41,7	36,0	55,4	76,1	39,8	40,5	33,3	35,8	36,0	52,8	6,6	34,9	30,5	519
Média	49,7	36,8	57,0	66,7	41,3	36,9	30,1	30,7	32,7	43,9	5,2	28,6	25,2	485
Regressão	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
Solo de textura argilosa														
0	63,8	48,8	62,7	45,8	34,3	35,4	29,0	31,6	31,5	34,5	3,5	28,3	20,7	478
30	68,3	47,6	64,3	48,3	47,0	50,0	46,0	40,6	36,7	47,5	7,8	50,2	40,9	595
60	74,3	50,2	69,6	50,7	47,6	57,4	50,2	41,9	35,6	62,9	11,8	60,2	52,7	665
90	79,1	53,5	72,3	55,1	52,9	60,7	53,8	47,7	42,7	62,9	14,9	65,3	48,7	710
120	79,0	50,5	74,0	55,5	56,2	58,5	56,3	47,5	39,8	67,1	16,7	69,1	51,8	722
150	67,1	48,7	72,8	56,2	52,8	57,4	57,0	46,6	43,0	60,8	18,1	67,6	51,1	699
180	74,2	51,5	65,8	54,7	48,7	56,8	52,5	45,9	36,2	66,8	18,3	70,7	52,9	695
Média	72,3	50,1	68,8	52,3	48,5	53,7	49,3	43,1	37,9	57,5	13,0	59,3	46,2	651
Regressão	Q*	Ns	Ns	L*	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**	L**	Q**	Q**	Q**

ns: não significativo. * e ** significativos a 5 e 1 %, respectivamente. L: regressão linear. Q: regressão quadrática.

A quantidade de K exportada aumentou com as doses de fertilizante potássico na maioria das safras (Tabela 5), acompanhando o aumento na produtividade (Tabela 2). Quando não houve adição de K no solo, a exportação total de K nos 12 anos de experimento foi de, apenas, 251 kg ha⁻¹ no solo de textura média e de 470 kg ha⁻¹ no solo argiloso. Estas quantidades de K exportadas equivalem à exportação média anual de 21 e 40 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K, respectivamente, para o solo de textura média e argilosa. Quando foi adicionado K, a exportação total de K foi de 524 e 681 kg ha⁻¹ (média das seis doses) no solo de textura média e argilosa, respectivamente. Estes dados equivalem à exportação média anual de 44 e 57 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K. Em experimento conduzido por 16 anos (1991–2007) em um Argissolo Vermelho com 180 g kg⁻¹ de argila, Kaminski et al. (2010) também verificaram que a exportação de K pelas culturas de soja, trigo e mamona aumentou com as doses de K.

A exportação máxima de K, durante os 12 anos, foi de 594 e 727 kg ha⁻¹, obtido com a adição de 120 e 127 kg ha⁻¹ de K₂O, para os solos de textura média e argilosa, respectivamente (Figura 7). Estas quantidades de K exportadas equivalem à exportação média anual de 49,5 e 60,6 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K. Foloni e Rosolem (2008) constataram que as maiores exportações de K (56 kg ha⁻¹, média de duas safras) ocorreram quando foram aplicados 90 kg ha⁻¹ de K₂O na semeadura da soja.

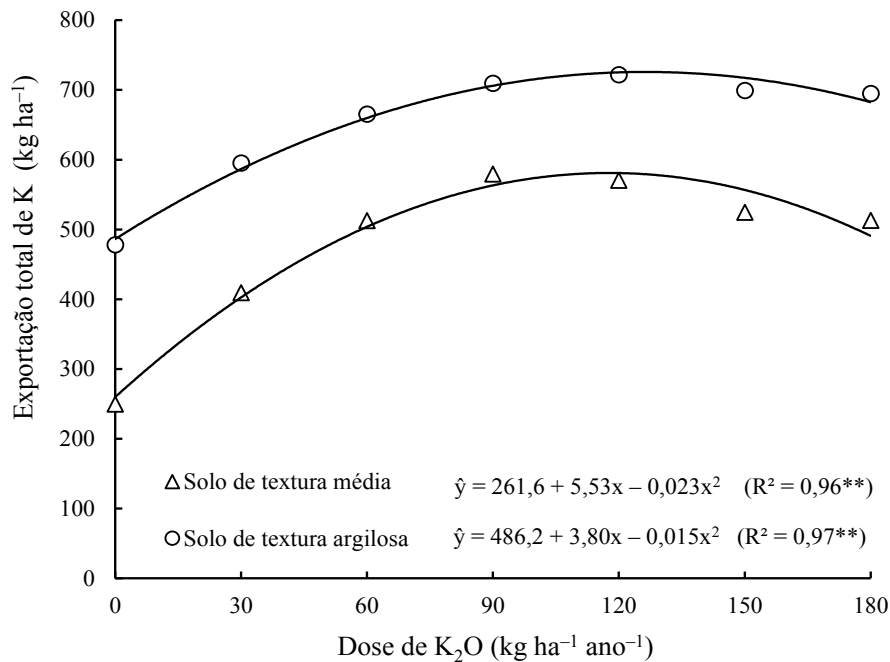


Figura 7. Quantidade total de K exportado com a colheita de grãos de soja, milho e crambe durante os 12 anos de experimento com adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa. **: significativo a 5 % de probabilidade.

6.3 Potássio no Solo

Os teores de K trocável no perfil dos solos em função a aplicação anual de doses de fertilizante potássico são mostrados na Figura 8. No tocante à distribuição dos teores de K no perfil do solo (0–1,0 m), verificaram-se menores teores do nutriente em profundidade, formando gradientes decrescentes de concentração de K a partir da superfície do solo (Figura 8). A formação de gradientes químicos em profundidade é uma característica comum em sistema de semeadura direta consolidado, como no presente estudo, que acontece paralelamente ao gradiente decrescente de matéria orgânica (Apêndice 6), como mencionado por Ferreira et al. (2009). A ausência de revolvimento do solo no sistema de semeadura direta, aliada a manutenção dos resíduos vegetais na superfície e a aplicação de fertilizantes, resulta em acúmulo de matéria orgânica e de nutrientes na camada superficial do solo. Incrementos no teor de matéria orgânica do solo resultam em aumento da capacidade dos solos em reter cátions, como o K^+ , que podem lixiviar (BAYER; MIELNICZUCK, 1997), porém, disponibilizando-os para absorção pelas plantas. A matéria orgânica é responsável por grande parte (até 80 %) da CTC dos solos tropicais (SILVA; MENDONÇA, 2007).

Garcia et al. (2008) também encontraram aumento dos níveis de K nas camadas superficiais do solo no sistema semeadura direta, e atribuíram esses resultados à capacidade das plantas de cobertura de reciclar o nutriente, extraíndo K não-trocável do solo e, em seguida, retornando o nutriente em formas disponíveis através da lavagem pela chuva. Além disso, Franchini et al. (1999) atribuíram o maior acúmulo de K na camada superficial do solo em semeadura direta, ao aporte de resíduos vegetais com alto teor de ânions orgânicos, com preferência para complexar cátions polivalentes, que são lixiviados para camadas mais profundas, em vez do K, conseqüentemente, aumentando a porcentagem de K na CTC do solo das camadas superficiais. Tal inferência foi comprovada nos estudos de Rosolem et al. (2006b), os quais verificaram que os ácidos orgânicos liberados da palhada de milho adicionada na superfície do solo funcionaram como ligantes, proporcionando maior retenção de K na camada superficial do solo, minimizando a lixiviação do nutriente na coluna de solo. Portanto, esse gradiente decrescente de concentração de K com o aumento da profundidade do solo, característico do sistema de semeadura direta, é resultante da aplicação superficial de fertilizantes, do mínimo revolvimento do solo e da manutenção da palhada na sua superfície.

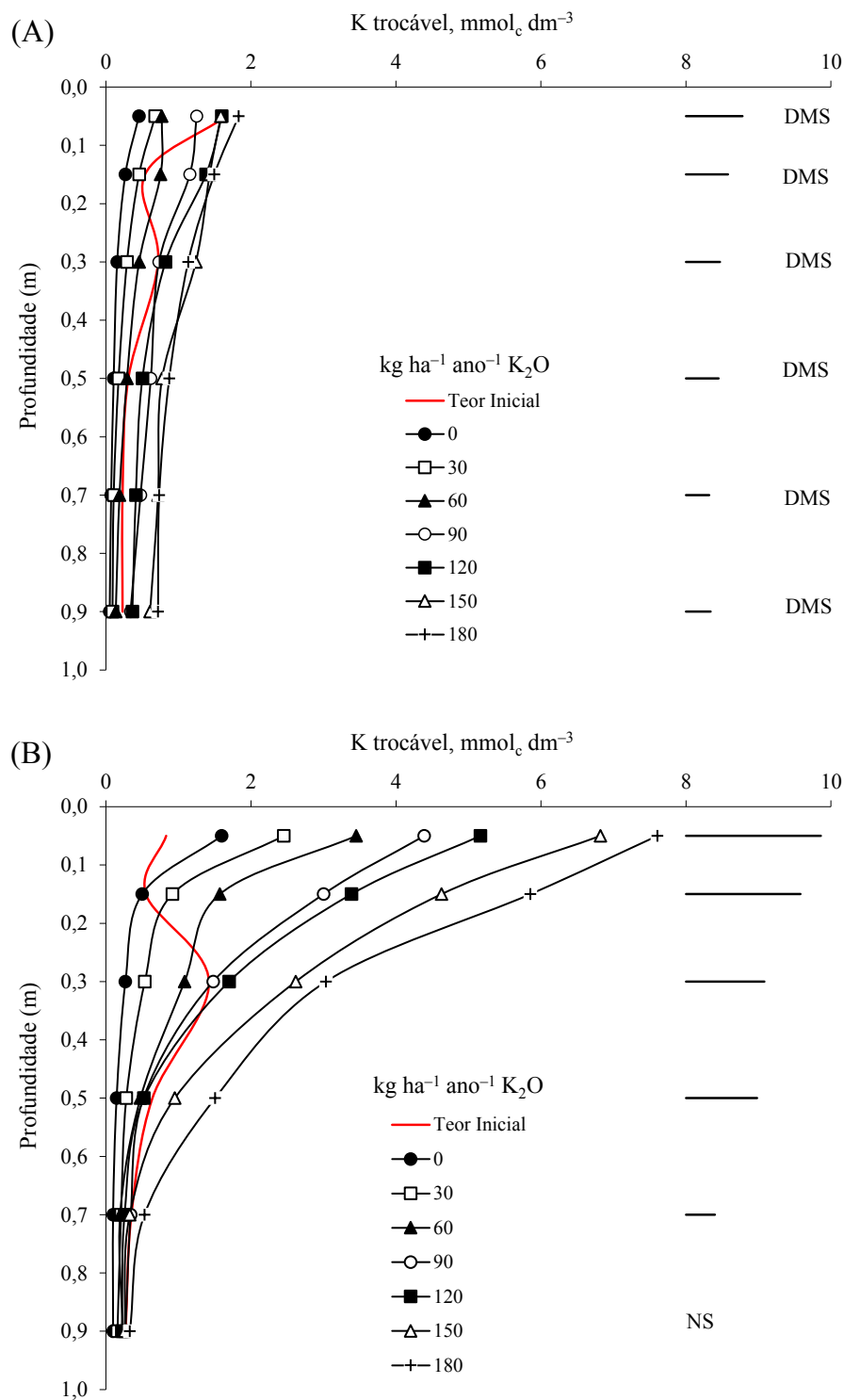


Figura 8. Teor de K trocável no perfil do solo no início e após 12 anos de experimento com a aplicação anual de 0 kg ha^{-1} (●), 30 kg ha^{-1} (□), 60 kg ha^{-1} (▲), 90 kg ha^{-1} (○), 120 kg ha^{-1} (■), 150 kg ha^{-1} (△) e 180 kg ha^{-1} (+) de K_2O em solo tropical de textura média (A) e textura argilosa (B). Barras horizontais mostram a diferença mínima significativa (DMS) em cada profundidade (teste t, $p < 0,05$).

A adubação potássica elevou os teores de K trocável em todas as camadas de solo, exceto na camada de $0,80\text{--}1,0 \text{ m}$ no solo argiloso (Figura 8). Os teores de K

trocável na camada de 0–0,10 e 0,10–0,20 m de profundidade no solo de textura média variaram de 0,46 a 1,83 e de 0,27 a 1,50 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente na ausência de adubação potássica e na dose de $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O (Figura 8A). De acordo com os limites de interpretação dos teores de K no solo, estabelecidos para as principais culturas anuais, estes valores se enquadram nas classes de disponibilidade “muito baixa”, “baixa” e “média” (RAIJ et al., 1997). No solo argiloso, os teores de K trocável variaram de 1,60 a 7,62 e de 0,50 a 5,85 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para as profundidades de 0–0,10 e 0,10–0,20 m, e, se enquadram nas classes de disponibilidade “baixa”, “média”, “alta” e “muito alta” (Figura 8B). A maior disponibilidade de K no solo argiloso deve-se aos maiores valores de CTC desse solo, o qual possui mais sítios de troca para a retenção de K.

A adubação potássica alterou a dinâmica de K nas duas classes de solo, resultando no aumento da movimentação do nutriente para as camadas mais profundas (Figura 8). O K teve maior mobilidade vertical no solo de textura média (Figura 8A). Quando não houve adição de K ao solo, os valores de K trocável foram de 0,46; 0,27 e 0,16 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ para as profundidades de 0–10; 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m, respectivamente, e, permaneceram constantes nas demais profundidades de solo, com valor médio na camada de 0,40–1,00 m de 0,08 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Figura 8A). A aplicação de 30 e $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O resultou no deslocamento mais expressivo de K até a profundidade de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m, respectivamente. Por sua vez, com a aplicação de doses superiores e iguais a $90 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O foi detectado altos teores de K trocável na camada de 0,60–1,00 m (Figura 8A).

Em estudo conduzido durante três anos em um Latossolo Vermelho com 120 g kg^{-1} de argila em São Manoel (SP), Rosolem e Nakagawa (2001) reportaram aumento na taxa de lixiviação de K no perfil de quando foram aplicadas doses acima de 80 kg ha^{-1} de K_2O por ano, independentemente do modo de aplicação do fertilizante. Estudos mostraram que a quantidade de K percolada no perfil do solo aumenta com o aumento da dose de fertilizante aplicada, devido ao aumento da concentração no nutriente na solução (ERNANI et al., 2007b; WERLE et al., 2008). A elevação dos teores de K trocável com o aumento da profundidade do solo foi devido ao aumento da concentração do nutriente na solução do solo, decorrente da adição das doses de fertilizante potássico. À medida que a solução mais concentrada em K vai se deslocando descendentemente no solo, estabelecem-se novos equilíbrios entre os cátions, e parte do K na solução percolante passa a ocupar algumas das cargas elétricas negativas dos constituintes sólidos do solo, deslocando delas os cátions que as estavam neutralizando (ERNANI; BARBER, 1993).

Essa movimentação de K no perfil do solo para profundidades abaixo daquelas exploradas pelas raízes, especialmente nas maiores doses (Figura 8A), indica que as perdas de K por lixiviação podem ser expressivas em solos de textura média. A intensificação das perdas de K por lixiviação pode ser atribuída à baixa capacidade deste solo de reter cátions. Em solos bem drenados, o K adicionado pela adubação e/ou liberado de formas não-trocáveis, encontra-se sujeito a perdas por lixiviação, devido à baixa energia de ligação nos sítios de troca, sobretudo em solos com baixa CTC (ROSOLEM et al., 2006a; ERNANI et al., 2007b; ROSOLEM et al., 2010). Além disso, a retenção de K^+ nas camadas superficiais do solo ocorre apenas quando as cargas negativas dos ácidos húmicos e das argilas estão livres, o que, em muitas situações, não ocorre. Isto explica a maior mobilidade do nutriente no perfil do solo, confirmando os resultados relatados por Rosolem et al. (2006b), os quais verificaram que o K, quando aplicado no solo na forma de KCl, foi rapidamente lixiviado pela água de chuva. Outro fator que também pode ter contribuído para a lixiviação de K no solo de textura média foi à menor produção de matéria seca das plantas de cobertura, verificadas neste solo (Apêndice 8). De acordo com Rosolem et al. (2006b), cobertura do solo pode impedir lixiviação de nutrientes para as camadas mais profundas, além de aumentar o teor de K na superfície do solo.

No solo argiloso, o aumento da dose de fertilizante potássico também resultou na movimentação de K para as camadas mais profundas do solo (Figura 8B), com aumento no teor de K trocável sendo detectado nas camadas de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m, com a aplicação de doses variando de 60 a 120 e de 150 a 180 $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de K_2O , respectivamente. Sanzonowicz e Mielniczuk (1985) aplicaram 250 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O em um Argissolo Vermelho-Amarelo arenoso do Rio Grande do Sul, e verificaram que cinco meses depois o K trocável havia deslocado até 0,40 m de profundidade. Em outro estudo, Ernani et al. (2002), aplicando doses de até 250 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O na superfície de um Cambissolo Húmico e de um Latossolo Vermelho de Santa Catarina, observaram que houve deslocamento de K nos dois solos até a camada de 0,10 a 0,20 m ao término de 12 percolações de água, o qual foi proporcional à dose aplicada. Uma maior movimentação de K para a camada 0,60–0,80 m no solo argiloso, apenas foi observada quando houve a aplicação de 180 $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de K_2O (Figura 8B), indicando que as perdas de K através da lixiviação para as camadas mais profundas, fora do alcance das raízes, em solos de textura muito argilosa são inexpressivas, mesmo com a aplicação de doses relativamente altas de fertilizante potássico.

As atrações sucessivas a que o K^+ é submetido durante o processo de descida, seja pelas cargas negativas e/ou, pelos grupos funcionais nos compostos orgânicos,

tendem a dificultar essa mobilidade. Ernani et al. (2007a) mencionam que, em anos com precipitação pluvial bem distribuída e em solos com média a alta CTC, a lixiviação de K normalmente não traz grandes problemas.

Resultados semelhantes são reportados na literatura. Borkert et al. (2005) avaliaram o efeito da adubação potássica na movimentação vertical do K^+ até 1,0 m de profundidade em um experimento conduzido por 26 anos (1978–2004) em três Latossolos argilosos no Estado do Paraná. Os referidos autores verificaram que na camada de 0–0,20 m, em função das doses aplicadas, foi criado um gradiente de K trocável variando de 0,5 até 5,3 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. Na camada de 0,20–0,40 m ocorreu pequeno acúmulo de K trocável nas doses de 160 e 200 kg ha^{-1} de K_2O , indicando que altas doses de K em solos argilosos, mesmo aplicadas na superfície, podem mover-se para a região de absorção das raízes. No entanto, na camada de 0,40–1,0 m, os teores de K trocável ficaram abaixo de 1,0 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, sugerindo que nos 26 anos da experimentação o íon K^+ não desceu além de 0,50 m de profundidade.

Neste estudo, considerando-se a lixiviação efetiva aquela que ocorre abaixo de 0,40 m de profundidade do solo, tem-se a dose crítica de 90 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ de K_2O para solo de textura média, e de 150 90 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ de K_2O para o solo argiloso, ou seja, acima dessas doses há expressiva lixiviação de K abaixo de 0,40 m no perfil do solo.

A lixiviação de K depende, principalmente, da concentração do nutriente na solução e da quantidade de água que percola no perfil do solo. Dentre os fatores que interferem na concentração de K na solução do solo, destacam-se a CTC e a força de retenção desse nutriente pelo solo. De acordo com Mielniczuk (2005), solos que possuem maiores valores de CTC possuem mais sítios de troca para a retenção de K, o que reflete em menores perdas do nutriente por lixiviação. Por sua vez, no sistema de semeadura direta tem-se maior infiltração de água, no entanto, a concentração de K na solução é menor em decorrência da maior CTC, por causa do aumento da matéria orgânica e da presença contínua de plantas comerciais ou de cobertura do solo. Dentre as estratégias de manejo para minimizar as perdas de K por lixiviação, tem sido sugerida a alteração da química da solução do solo, com vistas em favorecer uma maior mobilidade dos cátions divalentes, situação possível com a manutenção de resíduos vegetais na superfície em sistemas conservacionistas, como o de semeadura direta, e em culturas perenes (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; ROSOLEM et al., 2006b). Ziglio et al. (1999) verificaram que, em sistemas com palha de aveia e mucuna em superfície, ocorreu lixiviação preferencial de cátions bivalentes, ao contrário do que normalmente se observa em cultivo convencional, sem palha na superfície. De acordo com Rosolem et al. (2004), isso ocorre porque os ligantes orgânicos têm ligação mais estável

quanto maior a valência do íon. Em outro estudo, Rosolem et al. (2006b) verificaram que os ácidos orgânicos liberados da palhada de milho presente na superfície do solo funcionaram como ligantes, proporcionando maior retenção do K nas camadas mais superficiais do solo, minimizando sua lixiviação. Portanto, tanto o parcelamento da adubação potássica como o cultivo de plantas de cobertura para produzir palhada no sistema de semeadura direta, podem constituir estratégias para minimizar perdas de K por lixiviação, sem comprometer a produtividade das culturas no sistema de rotação.

A baixa taxa de lixiviação de K no solo argiloso (Figura 8B) também pode estar relacionada com o método de aplicação da adubação potássica. A aplicação do fertilizante à lanço sobre a palhada de milho pode ter evitado a lixiviação em maior intensidade, devido a melhor exploração dos sítios de troca na CTC do solo. De acordo com Altmann (2012), a aplicação de K a lanço é imprescindível para os solos do cerrado, pois a concentração do adubo na linha favorece a lixiviação do nutriente. Quando a adubação é realizada no sulco de semeadura, o complexo de troca do solo pode ficar saturado, o que pode provocar maiores perdas por lixiviação em relação à mesma dose aplicada a lanço. Vilela et al. (2004) demonstraram, em um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, que a lixiviação de K foi maior na dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O aplicada no sulco do que quando aplicada a lanço. No entanto, deve-se ressaltar que a aplicação a lanço, na superfície, não mostrou-se eficiente para prevenir as perdas de K do solo de textura média (Figura 8A).

A variação na disponibilidade de K trocável (ΔK_{Solo}) no perfil do solo, após 12 anos de experimento com aplicação anual de doses de fertilizante potássico é mostrada na Tabela 6. Quando o valor entre o teor final e inicial de K trocável foi negativo indica que houve decréscimo no teor de K trocável do solo no final do experimento, e o esgotamento desta forma de K foi devido a sua utilização para suprir a demanda das plantas e, ou eventuais perdas do sistema por lixiviação e erosão. Por outro lado, valor positivo indica que houve incremento desta forma de K ao final do experimento. O incremento na disponibilidade de K trocável pode ter ocorrido pelo K adicionado e, ou pela liberação de formas não-trocáveis de K do solo.

A quantidade de K trocável, na camada de 0–0,10 m, no solo de textura média diminuiu após 12 anos de experimento, com exceção do tratamento com aplicação de 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O, em que o teor de K aumentou em 7 kg ha⁻¹ (Tabela 6). A redução da disponibilidade do K trocável variou de 67 a 5 kg ha⁻¹, respectivamente na ausência de adubação potássica e na dose de 120 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O. Mesmo com a aplicação anual de até 150 kg ha⁻¹ de K₂O, por 12 anos, não houve incremento no teor de K

trocável na camada superficial (0–0,10 m) do solo. A redução do K trocável nesta camada foi devido à absorção do nutriente pelas raízes, em virtude desta camada possuir maior atividade radicular, e também pela lixiviação de K para as camadas mais profundas.

Tabela 6. Variação (ΔK_{Solo}) entre a quantidade inicial (Agosto de 2000) e final (Maio de 2012) de K trocável, em kg ha^{-1} , no perfil do solo, em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa

Camada (m)	Adubação potássica ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O)						
	0	30	60	90	120	150	180
Solo de textura média							
0–0,10	-67 (± 5) ⁽¹⁾	-55 (± 7)	-50 (± 4)	-24 (± 6)	-5 (± 5)	-6 (± 4)	7 (± 5)
0,10–0,20	-16 (± 3)	-5 (± 5)	12 (± 3)	35 (± 1)	48 (± 4)	51 (± 8)	55 (± 4)
0,20–0,40	-67 (± 3)	-52 (± 7)	-34 (± 6)	-4 (± 6)	6 (± 6)	51 (± 6)	40 (± 5)
0,40–0,60	-23 (± 1)	-16 (± 5)	-3 (± 5)	31 (± 6)	19 (± 4)	48 (± 4)	58 (± 8)
0,60–0,80	-16 (± 1)	-13 (± 2)	-4 (± 6)	27 (± 3)	20 (± 3)	53 (± 2)	55 (± 1)
0,80–1,00	-19 (± 1)	-15 (± 4)	-10 (± 3)	12 (± 2)	14 (± 2)	40 (± 4)	52 (± 2)
Σ (0–1,0)	-208 (± 4)	-155 (± 3)	-89 (± 5)	77 (± 4)	102 (± 3)	238 (± 5)	267 (± 4)
Solo de textura argilosa							
0–0,10	39 (± 4)	81 (± 9)	130 (± 7)	176 (± 8)	214 (± 11)	296 (± 7)	334 (± 5)
0,10–0,20	1 (± 4)	24 (± 4)	60 (± 9)	138 (± 6)	159 (± 10)	227 (± 11)	293 (± 9)
0,20–0,40	-111 (± 7)	-83 (± 5)	-25 (± 12)	17 (± 10)	41 (± 7)	138 (± 10)	182 (± 14)
0,40–0,60	-49 (± 5)	-35 (± 7)	-15 (± 5)	-11 (± 5)	-10 (± 4)	33 (± 14)	90 (± 12)
0,60–0,80	-21 (± 4)	-10 (± 4)	-11 (± 3)	3 (± 3)	-5 (± 4)	2 (± 4)	22 (± 5)
0,80–1,00	-21 (± 5)	-15 (± 4)	-8 (± 4)	-4 (± 3)	-9 (± 3)	-5 (± 2)	2 (± 4)
Σ (0–1,0)	-162 (± 5)	-38 (± 6)	131 (± 7)	319 (± 6)	389 (± 6)	690 (± 9)	924 (± 7)

$\Delta K_{\text{Trocável}} = K_{\text{Solo final}} - K_{\text{Solo inicial}}$, onde $K_{\text{Solo inicial}}$ no perfil do solo de textura média e argilosa, são 290 e 331 kg ha^{-1} , respectivamente. Valor negativo e positivo indica que houve redução e aumento de K trocável no perfil do solo, respectivamente. ⁽¹⁾ Valores entre parênteses representam o intervalo de confiança da média a 95 % ($p = 0,05$).

Estudos realizados com o objetivo de determinar a presença de raízes ativas ao longo do perfil do solo por métodos indiretos (ENCIDE-OLIBONE et al., 2008) mostram que a atividade radicular de milho e de soja é alta na camada de 0–0,10 m de profundidade (BARRIOS et al., 2006; PIVETTA et al., 2011). Assim, essa maior atividade radicular na profundidade até 0,10 m resultou numa intensa absorção de K nesta camada, reduzindo o teor do nutriente no solo. Além disso, o baixo teor de argila nesta camada (140 g kg^{-1}) e a baixa CTC do solo (57 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), pode ter resultado numa maior movimentação vertical do K no perfil do solo. Trabalhando com este mesmo solo em experimentos de vaso, Rosolem et al. (2012) verificaram que a aplicação de 150 e 300 mg dm^{-3} de K não foi suficiente para suprir o nutriente às plantas de *Brachiaria ruziziensis* ao longo de cinco cortes sucessivos e manter constantes os teores do nutriente no solo.

A aplicação de doses de até 60 $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O resultou na redução na quantidade de K trocável no perfil do solo de textura média, exceto na camada de

0,10–0,20 m onde houve aumento com a aplicação anual de 60 kg ha⁻¹ de K₂O (Tabela 6). Quando não houve adição de K no solo, a redução na quantidade de K trocável no perfil do solo até 1,0 m de profundidade foi de 208 kg ha⁻¹ de K (em torno de 72 %), quantidade esta que representa à redução média anual de 17 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K. Com a aplicação de 30 e 60 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O houve decréscimo de 155 e 89 kg ha⁻¹ de K, representando redução de 53 e 31 %, com liberação média anual de 13 e 7 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K na camada de 0–1,0 m, respectivamente. Por outro lado, a aplicação de 90, 120, 150 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O resultou no incremento de K trocável no solo de 77, 102, 238 e 267 kg ha⁻¹ de K na profundidade até 1,0 m, o que representa aumento na quantidade de K trocável armazenada no solo de 26, 35, 82 e 92 %, respectivamente. Este aumento na quantidade de K trocável indica que houve retenção média anual de 6, 9, 20 e 22 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K, respectivamente para essas doses.

No solo argiloso, houve aumento no teor de K trocável nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m em todos os níveis de adubação potássica (Tabela 6). O aumento na disponibilidade de K na camada superficial do solo ao longo dos cultivos foi devido à aplicação de fertilizante a lanço, em superfície, e a liberação do nutriente dos resíduos vegetais na superfície do solo, diminuindo a movimentação do nutriente no perfil do solo pela lixiviação. Quando não houve adição de K, o aumento na quantidade de K trocável na camada de 0–0,20 m, após 12 anos, foi de 40 kg ha⁻¹ (Tabela 6). É possível identificar dois fatores essenciais para justificar isso: o primeiro, esta associado ao baixo teor desse nutriente no início do experimento – teor inicial na camada de 0–0,10 e 0,10–0,20 m de 0,84 e 0,55 mmol_c dm⁻³ – (Tabela 1); o segundo, esse aumento na camada superficial deve-se ao processo de reciclagem do nutriente – proveniente de camadas mais profundas e, ou de formas não-trocáveis – promovido pelas culturas de cobertura.

De acordo com Borkert et al. (2003) e Foloni e Rosolem (2008), a aveia-preta e o milho são espécies de cobertura com elevada capacidade de reciclar K do solo, principalmente em decorrência da alta produção de matéria seca, além de possuir sistema radicular vigoroso e profundo, permitindo trazer o K contido em camadas mais profundas do solo. No presente estudo, houve redução de 111 e 49 kg ha⁻¹ de K trocável nas camadas de 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m de profundidade (Tabela 6), indicando que o K inicialmente em subsuperfície foi utilizado pelas culturas. Este K, após ser absorvido pelas plantas de cobertura, foi lavado dos resíduos vegetais mantidos na superfície e retornou a camada superficial do solo. Portanto, o cultivo de espécies com elevada capacidade de extrair

K do solo e, ou, capazes de explorar camadas profundas do solo, é de extrema importância para a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola.

A aplicação de doses de até 30 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O resultou na redução do teor de K trocável no perfil do solo argiloso (Tabela 6). Quando não houve adição de K no solo, a redução na quantidade de K trocável foi de 162 kg ha⁻¹ de K (em torno de 49 %) até a profundidade de 1,0 m, representando redução média anual de 14 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K. Com a aplicação de 30 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O houve diminuição de 38 kg ha⁻¹ de K (em torno de 11 %), representando redução média anual de 3 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K. Por outro lado, a aplicação de doses de 60 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O ou superiores resultou no incremento do teor de K trocável em todo o perfil do solo (Tabela 6). A aplicação de 60, 90, 120, 150 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O resultou num aumento de 131, 319, 389, 690 e 924 kg ha⁻¹ de K na profundidade até 1,0 m, representando aumento na quantidade de K trocável armazenada no solo de 40, 96, 118, 208 e 279 %, respectivamente. Este aumento na quantidade de K trocável indica que houve retenção média anual de 11, 27, 32, 58 e 77 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K, respectivamente para essas doses.

A menor variação no teor de K trocável nas camadas de 0,60–0,80 e 0,80–1,00 m de profundidade no solo argiloso indica que as perdas de K do sistema foram reduzidas (Tabela 6), havendo certo equilíbrio na preservação e, ou manutenção dos teores iniciais no decorrer dos cultivos.

A relação entre a aplicação anual de K e a alteração na disponibilidade de K trocável (ΔK_{Solo}) na camada de 0–1,0 m de profundidade é mostrada na Figura 9. A dose anual para manter constante a reserva de K trocável no solo foi considerada o ponto onde o ΔK foi igual a zero. A aplicação de doses inferiores a 78 e 36 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O não foram suficientes para suprir o nutriente às plantas e manter constantes os níveis do nutriente no perfil do solo de textura média e argilosa, respectivamente, acarretando decréscimos na disponibilidade no decorrer dos cultivos. Essa redução caracteriza o esgotamento da reserva inicial de K trocável do solo ou daquele adicionado pela adubação, em função da exportação desse nutriente nas colheitas de grãos e das perdas por lixiviação. De acordo com Fernandes et al. (1993), com o esgotamento do K nativo, o solo depauperado requer doses maiores de K, suficientes não só para satisfazer à demanda da planta, mas também para repor as perdas por lixiviação e as formas consideradas não-trocáveis, que foram utilizadas pela cultura.

Os dados aqui apresentados confirmam os resultados de experimentos realizados na década de 80 por Rosolem et al. (1984). Estes autores avaliaram a resposta da soja, por três anos, à aplicação anual de K em um Latossolo Vermelho arenoso e constataram

acentuado decréscimo nos teores de K trocável do solo, no transcorrer dos cultivos, sendo necessária a aplicação de, no mínimo, 80 kg ha⁻¹ de K₂O por ano, para manter o nível inicial de K no solo. Neste estudo estimou-se uma dose de, no mínimo, 78 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O (Figura 9), para suprir as quantidades extraídas pelas culturas ao longo dos anos, repor as perdas por lixiviação e manter equilibrado o nível de K trocável no solo de textura média.

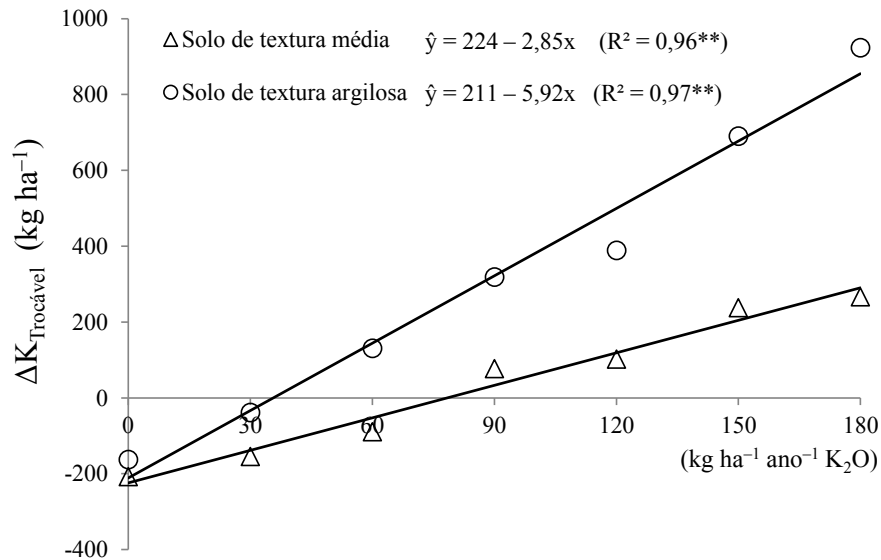


Figura 9. Variação (ΔK_{Solo}) total entre a quantidade inicial (Agosto de 2000) e final (Maio de 2012) de K trocável, em kg ha⁻¹, na camada 0–1,0 m de profundidade em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa. **: significativo a 5 % de probabilidade.

A menor dose de K (36 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O) requerida para manter o nível inicial de K trocável no solo argiloso foi atribuída à reduzida perda deste nutriente por lixiviação, como mencionada anteriormente. Em experimento conduzido por 12 anos em um Latossolo Húmico com 690 g kg⁻¹ de argila de Campos Novos (SC), Scherer (1998b) constatou que a aplicação anual de 40 kg ha⁻¹ de K₂O não foi suficiente para manter constantes os teores de K do solo. No entanto, este mesmo autor verificou que a aplicação de 60 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O foi suficiente para atender à demanda da cultura da soja e manter o teor de K no solo próximo ao nível crítico. Em experimento conduzido por oito anos (1991–1998) em um Latossolo Vermelho na Índia, com 490 g kg⁻¹ de argila, Singh et al. (2002) verificaram que a atual recomendação de 40 kg ha⁻¹ de K₂O para a rotação arroz–trigo representa ameaça para a sustentabilidade do sistema de produção, devido ao esgotamento das reservas de K do solo. Estes autores, ainda, concluíram que a sustentabilidade do sistema de

produção, a longo prazo, somente pode ser atingida com a utilização de culturas de cobertura para reciclar K no solo ou com a aplicação de níveis mais elevados de fertilizantes potássicos.

Os coeficientes de variação da disponibilidade do K trocável dos solos foram de 2,85 e 5,92, respectivamente para o solo de textura média e argilosa (Figura 9). Estes coeficientes indicam que para cada quilograma de K_2O por hectare adicionado anualmente houve redução na alteração da disponibilidade de K trocável, após 12 anos, de 2,85 e 5,92 $kg\ ha^{-1}$, para o solo de textura média e argilosa, ou seja, redução média anual na variação do K trocável dos solos, respectivamente de 0,24 e 0,49 $kg\ ha^{-1}$.

Os teores de K não-trocável no perfil dos solos em função a aplicação anual de doses de fertilizante potássico são mostrados na Figura 10. Os teores de K não-trocável no perfil dos solos foram alterados pela adubação potássica. Em geral, o aumento da dose de fertilizante potássico elevou os teores de K não-trocável nas duas classes de solo (Figura 10). O aumento no teor de K não-trocável com a adubação potássica pode ser atribuído ao fato de a aplicação anual promover maior retenção e, ou fixação de K no solo, além de provocar alterações nos minerais potássicos existentes no solo (PERNES-DEBUYSER et al., 2003; SIMONSSON et al., 2009).

A distribuição dos teores de K não-trocável no perfil do solo (Figura 10) apresentou comportamento similar a distribuição do K trocável (Figura 8) em ambos os solos. Os maiores teores de K não-trocável foram encontrados na camada superficial, resultando em gradientes decrescentes de concentração de K não-trocável a partir da superfície do solo. Estes resultados eram esperados devido à tendência natural de equilíbrio das diferentes formas de K no solo.

Estudos mostraram que o K não-trocável está estreitamente relacionado com a fração trocável devido ao equilíbrio dinâmico do nutriente no solo (BORTOLUZZI et al., 2005; CHIBA et al., 2008). Em geral, solos que possuem maiores teores de K trocável, suprimento a curto prazo, possuem também maiores teores de K não-trocável, suprimento a médio prazo. Rosolem et al. (2006a) verificaram, ainda, que a passagem do K da forma trocável para a não-trocável ou vice-versa pode ser rápida, dependendo da concentração do nutriente na solução do solo, fazendo com que seja possível a ocorrência de perdas por lixiviação das formas inicialmente não disponíveis, como confirmando, posteriormente, no estudo de Werle et al. (2008). Estes autores verificaram que 68 % de K percolado na dose de 120 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O foi proveniente do K não-trocável, e atribuíram este resultado a dois fatos: i) parte considerável do adubo aplicado é convertida em formas não-trocáveis; e ii) a passagem do K não-trocável para formas trocáveis e sujeitas a lixiviação é rápida, alterando de forma intensa a dinâmica desse

nutriente no perfil do solo. Isso torna a reposição da reserva de K não-trocável muito difícil, pois o próprio K considerado não-trocável pode ser lixiviado.

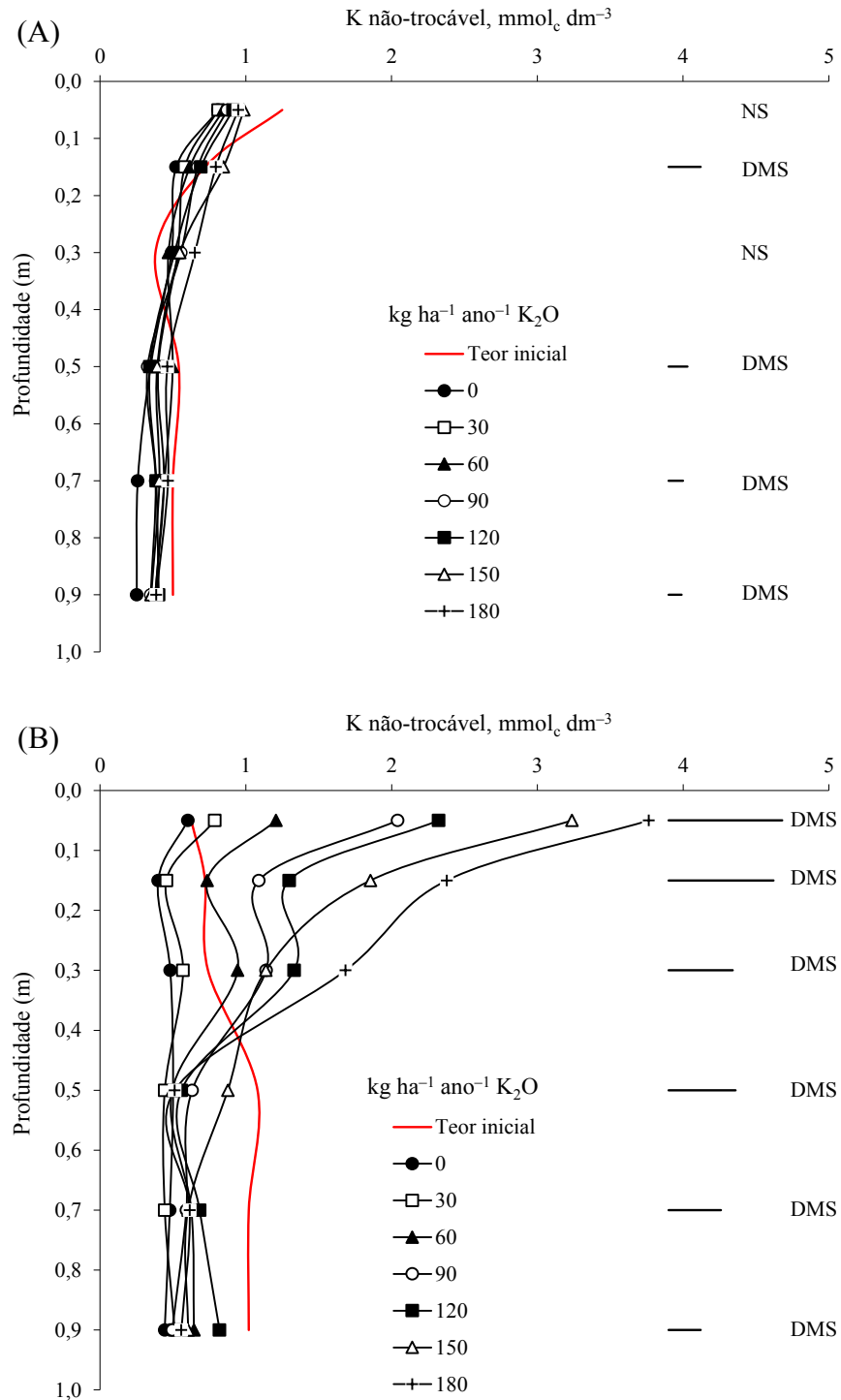


Figura 10. Teor de K não-trocável no perfil do solo no início e após 12 anos de experimento com a aplicação anual de 0 kg ha^{-1} (●), 30 kg ha^{-1} (□), 60 kg ha^{-1} (▲), 90 kg ha^{-1} (○), 120 kg ha^{-1} (■), 150 kg ha^{-1} (△) e 180 kg ha^{-1} (+) de K_2O em solo tropical de textura média (A) e argilosa (B). Barras horizontais mostram a diferença mínima significativa (DMS) em cada profundidade (teste t, $p < 0,05$).

Teores de K não-trocável superiores aos obtidos neste estudo foram reportados por Chaves e Dias (1996) em solos da Paraíba (37–129 mmol_c dm⁻³), por Castilhos et al. (2002) em solos do Rio Grande do Sul (5,9–35,0 mmol_c dm⁻³), e por Taiwo et al. (2009) em solos da Nigéria (140–1030 mmol_c dm⁻³). Por sua vez, teores semelhantes de K não-trocável foram encontrados por Silva et al. (1995) em solos do Norte do Paraná (0,4 a 1,7 mmol_c dm⁻³) e por Villa et al. (2004) em solos de Minas Gerais (0,6–6,0 mmol_c dm⁻³). Estas diferenças na reserva não-trocável de K do solo são atribuídas aos diferentes materiais de origem dos solos.

A alteração da reserva de K não-trocável ($\Delta K_{\text{N\~{a}o-troc\~{a}vel}}$) no perfil do solo, após 12 anos de experimento com aplicação anual de doses de fertilizante potássico é mostrada na Tabela 7. Quando a diferença entre a quantidade final e inicial de K não-trocável do solo apresentou valores negativos indica que houve redução na reserva de K não-trocável do solo, demonstrando que esta forma foi utilizada pelas plantas no decorrer dos cultivos sucessivos. Por sua vez, valor positivo indica que houve aumento na reserva desta forma de K ao final do experimento, ou seja, houve fixação de K nas estruturas dos minerais potássicos do solo.

Tabela 7. Variação ($\Delta K_{\text{N\~{a}o-troc\~{a}vel}}$) entre a quantidade inicial (Agosto de 2000) e final (Maio de 2012) de K não-trocável, em kg ha⁻¹, no perfil do solo, em função da adubação potássica em solo de textura média e argilosa

Camada (m)	Adubação potássica (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ de K ₂ O)						
	0	30	60	90	120	150	180
Solo de textura média							
0–0,10	-26 (±6) ⁽¹⁾	-28 (±4)	-19 (±7)	-17 (±6)	-12 (±4)	-5 (±5)	-4 (±6)
0,10–0,20	-9 (±5)	-7 (±4)	1 (±5)	4 (±5)	8 (±7)	22 (±7)	21 (±6)
0,20–0,40	9 (±5)	11 (±6)	12 (±7)	23 (±5)	21 (±7)	28 (±6)	47 (±7)
0,40–0,60	-21 (±4)	-17 (±6)	1 (±4)	-19 (±6)	-15 (±6)	-7 (±6)	5 (±5)
0,60–0,80	-25 (±6)	-7 (±6)	0 (±6)	-7 (±7)	-4 (±5)	1 (±7)	12 (±8)
0,80–1,00	-27 (±4)	-14 (±4)	-7 (±4)	-12 (±5)	-3 (±4)	-7 (±4)	0 (±6)
Σ (0–1,0)	-100 (±5)	-62 (±5)	-12 (±6)	-28 (±6)	-5 (±6)	34 (±6)	80 (±7)
Solo de textura argilosa							
0–0,10	0 (±4)	9 (±8)	30 (±6)	71 (±9)	84 (±7)	129 (±8)	155 (±5)
0,10–0,20	-13 (±7)	-9 (±4)	6 (±7)	25 (±8)	37 (±9)	67 (±7)	96 (±10)
0,20–0,40	-22 (±5)	-12 (±6)	27 (±5)	48 (±11)	69 (±8)	48 (±8)	106 (±6)
0,40–0,60	-57 (±8)	-62 (±5)	-57 (±8)	-43 (±8)	-51 (±6)	-18 (±6)	-55 (±9)
0,60–0,80	-53 (±7)	-57 (±6)	-39 (±5)	-42 (±5)	-33 (±9)	-41 (±12)	-40 (±8)
0,80–1,00	-57 (±6)	-50 (±4)	-37 (±7)	-52 (±7)	-20 (±5)	-41 (±8)	-46 (±7)
Σ (0–1,0)	-201 (±7)	-182 (±5)	-70 (±6)	7 (±8)	86 (±7)	144 (±9)	216 (±8)

$\Delta K_{\text{N\~{a}o-troc\~{a}vel}} = K_{\text{N\~{a}o-troc\~{a}vel \text{ final}}} - K_{\text{N\~{a}o-troc\~{a}vel \text{ inicial}}}$, onde $K_{\text{Solo \text{ inicial}}}$ no perfil do solo de textura média e argilosa, são 319 e 447 kg ha⁻¹, respectivamente. Valor negativo e positivo indica que houve redução e aumento da reserva de K não-trocável no perfil do solo, respectivamente. ⁽¹⁾ Valores entre parênteses representam o intervalo de confiança da média a 95 % ($p = 0,05$).

A quantidade de K não-trocável, na camada de 0–0,10 m, no solo de textura média diminuiu após 12 anos de experimento, com valores variando de 4 a 77 kg ha⁻¹ (Tabela 7). A redução da reserva de K não-trocável pode ser atribuída a maior atividade das raízes nesta camada, como mencionada anteriormente. As plantas absorvem primeiramente o K da solução do solo, cuja concentração depende do equilíbrio mantido com K trocável, adsorvido nos sítios de troca. Uma vez o K trocável esgotado, dá-se a liberação do K retido com maior energia, ou contido nas entrecamadas e nas estruturas dos minerais de argila e acelera-se a intemperização dos minerais potássicos (SPARKS, 2000; CURI et al., 2005).

No solo argiloso, o aumento na reserva de K não-trocável nas camadas de 0–0,10 e 0,10–0,20 m na maioria dos tratamentos (Tabela 7) está relacionado com a manutenção do equilíbrio desta forma com o K trocável. Assim, como houve aumento no teor de K trocável nestas camadas (Tabela 6) a tendência natural do solo é também manter mais K na forma não-trocável, estabelecendo um novo patamar de equilíbrio entre estas formas. Este aumento na reserva de K não-trocável possivelmente ocorreu por meio do processo de adsorção específica de K⁺ pela fase mineral do solo, como reportado por Velde e Peck (2002). Esse processo, no entanto, é limitado aos minerais cuja estrutura é susceptível de receber K. Esse patamar é determinado, provavelmente, pela capacidade dos sítios de troca do complexo em adsorver K⁺, onde seu aumento somente é possível pelo incremento no número desses sítios.

A aplicação de doses de até 120 e 60 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O resultou na redução na quantidade de K não-trocável na profundidade até 1,0 m no solo de textura média e argilosa, respectivamente (Tabela 7). Quando não houve adição de K no solo, a redução na quantidade de K não-trocável no perfil do solo foi de 100 e 201 kg ha⁻¹ de K, indicando que houve liberação média anual de 8 e 17 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K não-trocável, respectivamente no solo de textura média e argilosa. A aplicação de 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O no solo de textura média resultou num decréscimo de 62, 12, 28 e 5 kg ha⁻¹ de K não-trocável, representando liberação média anual de, apenas, 5, 1, 2 e 0,5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K não-trocável, respectivamente. No solo argiloso, a aplicação de 30 e 60 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O resultou num decréscimo de 182 e 70 kg ha⁻¹ de K não-trocável, representando liberação média anual de 15 e 6 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K não-trocável, respectivamente.

A menor liberação de K não-trocável no solo de textura média pode ser explicado pelo seu material de origem grosseiro, pobre em minerais de argila capazes de disponibilizar K. Tal inferência é justificada pelo predomínio da fração areia (67 a 77 %) deste solo, a qual apresenta mineralogia composta quase que exclusivamente por quartzo

(MELO et al., 2002; 2004). Estudos mostraram que a reserva de K não-trocável dos solos encontram-se na fração silte e argila (AL-KANANI et al., 1984; SIMARD et al., 1989; RICCI et al., 1989; MELO et al., 2003). O K não-trocável pode constituir uma fonte considerável de K às plantas em curto e médio prazo (ROSOLEM; NAKAGAWA, 1985; ROSOLEM et al., 1993; KAMINSKI et al., 2007; SIMONSSON et al., 2007; GARCIA et al., 2008; ROSOLEM et al., 2012). No entanto, a cinética de liberação desta forma de K para a solução do solo é muito variável, dependendo principalmente de fatores relacionados com a mineralogia do solo e a sua proporção em cada fração granulométrica e com a seletividade da fase mineral pelo K (MELLO et al., 1995; CASTILHOS; MEURER, 2001).

Por outro lado, a aplicação de 150 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O no solo de textura média resultou no incremento de K não-trocável até 1,0 m de profundidade de 34 e 80 kg ha⁻¹ de K (Tabela 7), o que representa fixação média anual de 3 e 7 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K, respectivamente. No solo argiloso, a aplicação de 90, 120, 150 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O resultou no aumento de 7, 86, 144 e 216 kg ha⁻¹ na quantidade de K não-trocável até 1,0 m de profundidade (Tabela 7), representando fixação média anual de, aproximadamente, 1, 7, 12 e 18 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K, respectivamente.

A redução na reserva de K não-trocável na camada de 0,40–1,0 m de profundidade em todos os níveis de adubação (Tabela 7) indica que as plantas foram capazes de extrair esta forma de K das camadas inferiores do solo, a qual, posteriormente, retornou a superfície do solo através do processo de reciclagem do nutriente. Fato este confirmado pelos resultados encontrados nas camadas superficiais do solo, onde houve aumento na quantidade de K trocável (Tabela 6 e Figura 8) e de K não-trocável (Tabela 7 e Figura 10) no solo argiloso.

A relação entre a aplicação anual de K e a alteração da reserva de K não-trocável ($\Delta K_{\text{Não-trocável}}$) na camada de 0–1,0 m de profundidade é mostrada na Figura 11. A dose anual para manter constante a reserva de K não-trocável no solo foi considerada o ponto onde o $\Delta K_{\text{Não-trocável}}$ foi igual a zero. A aplicação de doses inferiores a 105 e 90 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O resultou na redução na quantidade de K não-trocável no solo de textura média e argilosa, respectivamente (Figura 11). Essa redução indica que houve disponibilização de K inicialmente presente em formas não-trocáveis, o qual tornou-se disponível para as plantas. Esse fenômeno acontece, principalmente, em baixas concentrações de K da solução, o que ocorre na região rizosférica, dada a criação de um gradiente de concentração que causa a liberação do K não-trocável para a fase solúvel, e depois trocável. Rosolem et al. (1988) constataram que a disponibilização do K não-trocável para a cultura da soja somente ocorreu

quando os teores de K trocável eram inferiores a $1,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Estudos mostraram que o K não-trocável, inclusive, é responsável por manter equilibrados os níveis de K trocável do solo no decorrer dos cultivos, mesmo quando há aportes desse nutriente via adubação (ROSOLEM et al., 1993; 2012).

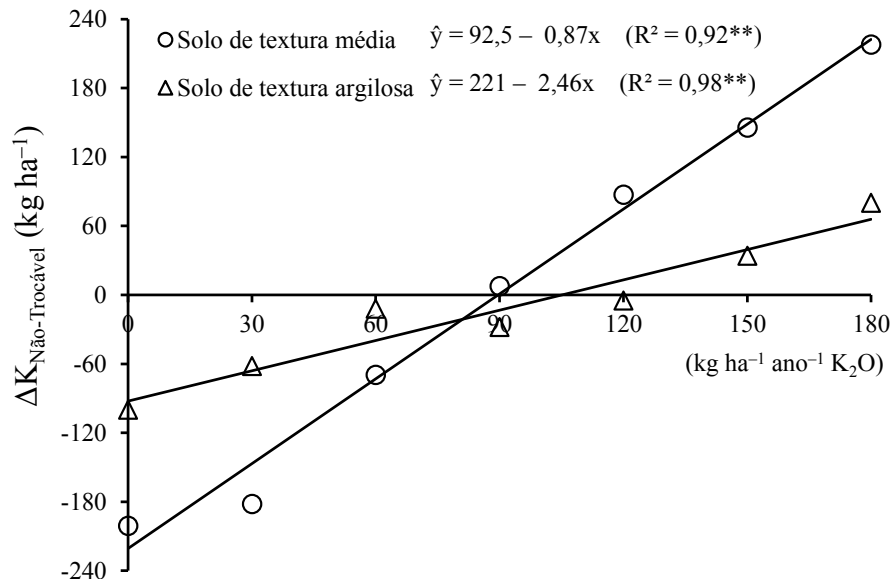


Figura 11. Variação ($\Delta K_{\text{N\~{a}o-troc\~{a}vel}$) total entre a quantidade inicial (Agosto de 2000) e final (Maio de 2012) de K não-trocável, em kg ha^{-1} , na camada 0–1,0 m de profundidade em função da adubação potássica em solo tropical de textura média e argilosa. **: significativo a 5 % de probabilidade.

O cultivo de plantas, como a soja, a aveia preta e o milho, com capacidade de extrair quantidades consideráveis de K, e a adição de fertilizantes potássicos, podem influir na relação entre as reservas de K do solo e na sua disponibilidade, acarretando alterações dos minerais potássicos do solo (VELDE; PECK, 2002; PERNES-DEBUYSER et al., 2003; SIMONSSON et al., 2009). Hinsinger e Jaillard (1993) verificaram a formação de vermiculita, em detrimento de ilita, no solo da região da rizosfera das raízes de azevém (*Lolium multiflorum*) em apenas 32 dias de cultivo. Nessa condição, a liberação de K não-trocável das entrecamadas da ilita, induzida pela ação das raízes das plantas, foi quase completa.

Segundo Pernes-Debuyser et al. (2003), a alteração dos minerais potássicos pelo intemperismo pode ser minimizada com a adição de fertilizantes potássicos. No entanto, há evidências de que a disponibilização do K não-trocável depende mais da demanda da planta para o nutriente do que das propriedades do solo, como textura e mineralogia (KAMINSKI et al., 2010). Garcia et al. (2008) constataram que a presença de

Brachiaria brizantha em consórcio com o milho resultou em aumento na taxa de liberação do K não-trocável do solo em comparação ao cultivo de milho solteiro, indicando que as plantas de braquiária possuem capacidade de induzir a liberação de K inicialmente presente em formas não-trocáveis no solo. Esta capacidade de induzir a liberação de K não-trocável também foi confirmada para a *Brachiaria ruziziensis*, como reportado por Rosolem et al. (2012). Desta forma, espécies capazes de intensificar a liberação de formas não-trocáveis de K no solo devem ser mais bem investigadas.

A liberação de K não-trocável na região da interface solo-raiz pode ocorrer basicamente por meio de dois mecanismos distintos: o primeiro, está associado à maior concentração de ácidos orgânicos na interface raiz-solo, liberados pelas raízes, que influenciam na liberação de formas não-trocáveis de K do solo (MELO et al., 2005). O segundo mecanismo está relacionado com a troca, na interface solo-raiz, dos íons H^+ liberados pelas raízes (extrusão de prótons com a absorção de cátions) com o K^+ das entrecamadas dos filossilicatos, em solos mais ácidos, e por Ca^{2+} em equilíbrio na solução de solos mais alcalinos (RAHMATULLAH; MENGEL, 2000). Estudos mostraram que há grande liberação de formas não-trocáveis de K da fração areia fina, de minerais secundários, como a caulinita, atribuída à ocorrência de camadas residuais de mica preservadas no interior da estrutura do mineral, mesmo em solos com maior grau de intemperismo, como os Latossolos (MELO et al., 2001; 2004).

Por sua vez, a aplicação de doses superiores a 105 e 90 $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de K_2O , respectivamente para o solo de textura média e argilosa, resultou na fixação de K na fração não-trocável do solo (Figura 11). Chiba et al. (2008) avaliando as alterações das diversas formas de K em um Latossolo Vermelho de Jaboticabal (SP), verificaram que a adição anual de 900 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O , elevou os teores de K não-trocável na camada 0–0,20 m em aproximadamente 40 %, após o segundo ciclo da cultura da bananeira. Em um Argissolo Vermelho arenoso do Rio Grande do Sul, Bortoluzzi et al. (2005) verificaram que os teores de K não-trocável foram incrementados com a adição de doses de fertilizantes potássicos, refletindo no aumento das fases minerais ilita e interestratificado do tipo ilita-esmectita, enquanto que nas menores doses ou onde não houve adição de K os teores da fração não-trocável diminuíram. Resultados estes também verificados no presente estudo, onde as reservas de K não-trocável dos dois solos aumentaram nas doses mais altas e diminuíram nas doses mais baixas ou onde não houve adição de fertilizante potássico (Tabela 7 e Figura 11). Segundo Mielniczuk (1978), a intemperização provoca a abertura das camadas dos minerais de argila devido à baixa concentração de K na solução. No entanto, com o aumento da

concentração de K na solução (adubação), o K^+ pode, dependendo do tipo de mineral presente no solo, deslocar os íons Ca^{2+} e Mg^{2+} das entrecamadas, as quais se juntam fixando o K no interior do mineral.

O cultivo sem reposição de K, por 12 anos, diminuiu a reserva de K trocável do solo de textura média e argilosa em 208 e 162 $kg\ ha^{-1}$ (Tabela 6), enquanto que a reserva não-trocável foi reduzida em torno de 100 e 201 $kg\ ha^{-1}$ (Tabela 7), respectivamente. Estes dados indicam que houve liberação total de K durante os 12 anos de 308 e 363 $kg\ ha^{-1}$ no solo de textura média e argilosa, respectivamente. Por sua vez, a quantidade de K exportada pelos grãos, durante os 12 anos, foi de 241 e 470 $kg\ ha^{-1}$, respectivamente para o solo de textura média e argilosa (Tabela 5). Estas observações mostram que houve excedente de 67 $kg\ ha^{-1}$ de K (5,6 $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$) no solo de textura média, que provavelmente foi lixiviado no perfil do solo. Por sua vez, o déficit de 107 $kg\ ha^{-1}$ de K (8,9 $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$) encontrado no solo argiloso indica que houve aporte de K oriundo de outras fontes não computadas neste estudo. Dentre estas fontes, pode-se citar o aporte de K via sementes e deposição. Considerando que as cultivares de soja recomendadas para o Estado de São Paulo têm o tamanho das sementes de, aproximadamente, 18 g por 100 sementes. A semeadura de “stand” inicial de, aproximadamente, 350.000 plantas por hectare necessita de 63 $kg\ ha^{-1}$ de sementes, e utilizando o teor médio de K nos grãos de soja de 16 $g\ kg^{-1}$ (Tabela 5), têm-se aporte de K na semeadura da soja de 1,0 $kg\ ha^{-1}$ por safra. Ressalta-se, ainda, que no cálculo final para estimar o aporte anual via sementes deve-se computar o K oriunda das sementes das plantas de cobertura (aveia-preta e milheto). Para a deposição, estimativas reportadas por Persson et al. (2004 apud SIMONSSON et al., 2007) indicam haver aporte anual de 2 $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de K.

6.4 Balanço de Potássio no Sistema Solo-Planta

O balanço de K no sistema solo-planta em função da aplicação anual de doses de fertilizante potássico é mostrado na Tabela 8. Considerando o balanço de K na lavoura, a exportação anual de K através das colheitas de grãos foi superior à quantidade do nutriente adicionada nas doses até 30 e 60 $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de K_2O no solo de textura média e argilosa, respectivamente (Tabela 8). Quando não houve adição de K ao solo, o déficit foi de 21 e 40 $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de K, respectivamente no solo de textura média e argilosa. Com a aplicação anual de 30 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O o déficit do nutriente no campo foi de 9 e 25 $kg\ ha^{-1}$

ano⁻¹ no solo de textura média e argilosa, respectivamente. Por sua vez, a aplicação anual de 60 kg ha⁻¹ de K₂O no solo argiloso resultou num déficit de 5 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K. O maior déficit de K no solo argiloso foi devido a maior produtividade de grãos obtida neste solo (Tabela 2), resultando no aumento da quantidade de K exportada da lavoura. Estudos realizados na Índia por Singh et al. (2002) e por Bhattacharyya et al. (2006) mostraram que a exportação de K pelas culturas foi maior que a quantidade do nutriente adicionado, resultando no saldo negativo no balanço de K no solo. Estes autores, ainda, concluíram que se a adubação potássica, a longo prazo, não for revista às doses atualmente recomendadas (40 kg ha⁻¹ de K₂O) podem ameaçar a sustentabilidade dos sistemas de cultivo de arroz-trigo e soja-trigo, respectivamente, por promover o esgotamento das reservas de K do solo.

Tabela 8. Valores de entrada (adubação) e saída (exportação) de K no sistema de produção, balanço de K na lavoura (adubação – exportação), alteração da disponibilidade de K trocável do solo (ΔK_{Solo}) na camada de 0–1,0 m de profundidade durante o experimento (2000–2012) e balanço de K no sistema solo-planta em solo tropical de textura média e argilosa

Dose de K ₂ O (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Entrada de K ⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Saída de K ⁽²⁾ (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Balanço de K na lavoura ⁽³⁾ (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	ΔK_{Solo} ⁽⁴⁾ (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Balanço de K no sistema solo- planta ⁽⁵⁾ (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
	Adubação	Exportação			
Solo de textura média					
0	0	21 (±3) ⁽⁶⁾	-21 (±3)	-17 (±4)	-4 (±3)
30	25	34 (±4)	-9 (±4)	-13 (±3)	+4 (±4)
60	50	43 (±2)	+7 (±2)	-7 (±5)	+14 (±4)
90	75	49 (±3)	+26 (±3)	+6 (±4)	+20 (±4)
120	100	48 (±2)	+52 (±2)	+9 (±3)	+43 (±3)
150	125	44 (±3)	+81 (±3)	+20 (±5)	+61 (±5)
180	150	43 (±4)	+107 (±4)	+22 (±4)	+85 (±4)
Solo de textura argilosa					
0	0	40 (±4)	-40 (±4)	-14 (±5)	-26 (±5)
30	25	50 (±3)	-25 (±3)	+3 (±5)	-22 (±4)
60	50	55 (±5)	-5 (±5)	+11 (±7)	-16 (±6)
90	75	59 (±3)	+16 (±3)	+27 (±6)	-11 (±4)
120	100	60 (±4)	+40 (±4)	+32 (±6)	+8 (±5)
150	125	58 (±4)	+67 (±4)	+58 (±8)	+9 (±6)
180	150	58 (±5)	+92 (±5)	+77 (±6)	+15 (±5)

⁽¹⁾ K adicionado anualmente pelo fertilizante.

⁽²⁾ K extraído pelos grãos (média anual obtida a partir do total extraído durante os 12 anos, Tabela 5)

⁽³⁾ Balanço de K na lavoura = $K_{\text{Adubação}} - K_{\text{Exportado}}$

⁽⁴⁾ $\Delta K_{\text{Solo}} = K_{\text{Solo final}} - K_{\text{Solo inicial}}$ (média anual obtida a partir da alteração total ocorrida nos 12 anos, Tabela 6)

⁽⁵⁾ Balanço de K no sistema solo-planta = $K_{\text{Adubação}} - K_{\text{Exportado}} - \Delta K_{\text{Solo}}$, onde valor negativo indica que houve liberação líquida de K não-trocável do solo, enquanto que um valor positivo indica ter havido perdas de K por lixiviação e, ou fixação de K nos minerais potássicos do solo.

⁽⁶⁾ Valores entre parênteses mostram o intervalo de confiança da média a 95 % ($p = 0,05$).

A aplicação anual de doses variando de 60 a 180 kg ha⁻¹ de K₂O no solo de textura média resultou num excedente de K na lavoura de 7 a 107 kg ha⁻¹ ano⁻¹. No solo argiloso, o excedente de K na lavoura variou de 16 a 92 kg ha⁻¹ ano⁻¹ com a aplicação de 90 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O, respectivamente (Tabela 8). Em sistemas de rotação com o cultivo de, apenas, uma cultura comercial, como neste estudo, a exportação média anual de K pela colheita de grãos está em torno de 45 e 60 kg ha⁻¹ de K, variando com o potencial de produção do solo (Tabela 8).

O saldo negativo de -4 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K no sistema solo-planta encontrado no tratamento sem adubação potássica no solo de textura média indica que houve contribuição do K proveniente de formas não-trocáveis na nutrição potássica das plantas no decorrer dos cultivos. Por sua vez, quando foi adicionado K verificou-se saldo positivo do balanço de K no sistema solo-planta em todos os níveis de adubação, indicando que houve perdas de K por lixiviação e, ou fixação de K nos minerais potássicos do solo. No entanto, esta segunda hipótese pouco explica estes resultados encontrados no solo de textura média. Como mostrado na Tabela 7, apenas, houve fixação de 3 e 7 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K na fração não-trocável do solo quando foi adicionado 150 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O. Para estas mesmas doses, no entanto, o saldo foi de 61 e 85 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K, respectivamente (Tabela 8). Portanto, analisando a alteração média anual da reserva de K não-trocável (Tabela 7) e o saldo do balanço de K no sistema solo-planta (Tabela 8) verifica-se que as perdas de K por lixiviação no solo de textura média, considerando a camada de 0-1,0 m de profundidade, variaram de 4 a 78 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K com a aplicação de 30 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O, representando de 16 a 52 % do K adicionado ao solo, respectivamente. Desta forma, devido o elevado potencial de lixiviação de K desse solo o parcelamento da adubação potássica pode constituir excelente estratégia de manejo para minimizar perdas de K por lixiviação.

Em experimentos conduzidos por 30 anos (1665-1996) em diferentes países da Europa Ocidental, Blake et al. (1999) constataram que menos de 62 % do K adicionado foi detectado no perfil do solo até a profundidade de 0,80 m e/ou absorvido pelas plantas, indicando haver grandes perdas por lixiviação. Simonsson et al. (2007) estimaram perdas de K por lixiviação de 2 a 24 kg ha⁻¹ ano⁻¹ para profundidades abaixo de 1,0 m, a qual foi proporcional à dose aplicada. Segundo Early et al. (1998), em regiões que prevalecem altas condições de precipitação pluvial durante a maior parte do ano, as perdas anuais de K por lixiviação podem variar de 2 a 66 kg ha⁻¹ de K. Wilkinson e Lowrey (1973, apud FERREIRA et al., 2009), porém, mencionaram que as perdas no nutriente por lixiviação podem ser ainda maiores, chegando a 139 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K. Johnston e Goulding (1992)

sugeriram que aproximadamente $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de K é perdido para cada 100 mm de água da chuva lixiviada através do perfil do solo em condições de campo, porém, este valor pode ser maior em condições de alta concentração de outros cátions, como o Ca^{2+} , na solução do solo, em decorrência do deslocamento do K^+ das cargas negativas pelo Ca^{2+} .

A aplicação de doses de até $90 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O no solo argiloso resultou no saldo negativo do balanço de K no sistema solo-planta (Tabela 8), indicando que o déficit encontrado foi suprido por formas não-trocáveis de K do solo. Esta inferência é suportada pelos resultados encontrados na variação da reserva do K não-trocável do solo, onde houve liberação desta forma de K do solo com a aplicação de até $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O (Tabela 7). Por sua vez, o déficit de $-11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K com a adição de $90 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K_2O não pode ser explicado, apenas, pela contribuição do K não-trocável, pois a liberação média anual desta forma foi menor que $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K (Tabela 7). Estes resultados indicam que houve aporte de K oriundo de outras fontes não computadas neste estudo, como mencionadas anteriormente.

Estudos realizados em diferentes países indicam haver balanço negativo de K no sistema solo-planta. Dobermann et al. (1996) em 11 experimentos com fertilização potássica a longo prazo em cinco países asiáticos, verificaram que na maioria dos locais o balanço de K foi negativo, com remoção média de -34 a $-63 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K. Estes autores, ainda, constataram que houve esgotamento das reservas de K do solo em muitos dos locais. Em experimento conduzido por 18 anos (1987–2004) em três solos do Sul da Suécia, Andrist-Rangel et al. (2007) também encontraram saldo negativo no balanço de K no sistema solo-planta, variando de -22 a $-75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ K, dependendo do tipo de solo. Em experimento conduzido, por dois anos, em um Latossolo Vermelho argiloso (630 g kg^{-1} de argila) da região Oeste do Paraná, Steiner et al. (2012) também constataram saldo negativo no balanço de K no sistema solo-planta (-39 a $-82 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ K) até a profundidade de 0,40 m e, segundo estes autores o déficit havido foi suprido por K das camadas mais profundas e das formas não-trocáveis do nutriente do solo.

Estes resultados demonstram a importância das formas de K inicialmente não-trocáveis no suprimento do nutriente às plantas nos sistemas de produção agrícola. Em solo do Rio Grande do Sul, Simonete et al. (2002) estimaram que, mesmo considerando o efeito residual da adubação potássica do azevém na cultura do arroz cultivado em sucessão, houve contribuição da forma não-trocável de pelo menos 30 % do K acumulado pelas plantas. A contribuição de formas de K inicialmente consideradas não-trocáveis às plantas comumente são reportadas na literatura, mesmo quando há adição de fertilizante

potássico (KAMINSKI et al., 2007; GARCIA et al., 2008; SIMONSSON et al., 2009). Rosolem et al. (1993) constataram, ainda, que a forma não-trocável, independente do solo, foi a principal fonte de K para a soja.

O saldo positivo no balanço de K no sistema solo-planta com a aplicação de doses entre 120 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O no solo argiloso indica que houve fixação de K nos minerais potássicos do solo (Tabela 8), resultando no aumento da fração não-trocável do nutriente no solo (Tabela 7 e Figura 11). A aplicação de 120, 150 e 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O resultou num excedente de 8, 9 e 15 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K (Tabela 8), enquanto que a quantidade média anual de K fixado na fração não-trocável foi de 7, 12 e 18 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K (Tabela 7 e Figura 11). Portanto, como mencionado anteriormente, não houve evidências de perdas de K por lixiviação no solo argiloso. Em sistemas de produção sem pousio entre uma cultura e outra (sistema planta-colhe-planta), o K absorvido permanece a maior parte do tempo no tecido vegetal, protegido de perdas por erosão e lixiviação. Portanto, o cultivo de plantas com elevada capacidade de extrair K do solo e/ou capazes de explorar camadas profundas do solo, é de extrema importância para a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola, por minimizar as perdas K e melhorar a sua disponibilidade no solo.

7 CONCLUSÕES

1. Teores iniciais de 1,30 e 0,75 mmol_c dm⁻³ de K trocável na camada de 0–0,20 m de profundidade em solos tropicais de textura média e argilosa são suficientes para se obter produtividade de grãos de soja superior a 90 % do rendimento máximo nos três e quatro primeiros anos de cultivo, respectivamente.

2. A aplicação anual de 80 e 40 kg ha⁻¹ de K₂O é suficiente para atender à demanda de K das culturas e manter estável o teor de K trocável, respectivamente, para os solos tropicais de textura média e argilosa, e acima dessas doses há acúmulo de K trocável no perfil do solo, considerando-se a camada até 1,0 m de profundidade.

3. O aumento da dose de fertilizante potássico intensifica as perdas de K por lixiviação para a camada abaixo de 1,0 m de profundidade nos solos tropicais de textura média, que representara de 16 a 52 % do K adicionado ao solo.

4. A aplicação anual de até 180 kg ha⁻¹ de K₂O em solo tropical de textura argilosa não resulta em lixiviação de K para as camadas inferiores a 1,0 m de profundidade.

5. A partir de 105 e 90 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O para os solos tropicais de textura média e argilosa, respectivamente, há incremento da reserva de K não-trocável no perfil do solo, considerando-se a camada até 1,0 m de profundidade.

6. Não há incremento de K não-trocável abaixo de 0,40 m de profundidade em solo argiloso sob sistema de semeadura direta, e em solo de textura média o incremento abaixo de 0,40 m de profundidade ocorre somente a partir de 150 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-KANANI, T.; MACKENZI, A. F.; ROSS, G. J. Potassium status of some Quebec Soils: K release by nitric acid and sodium tetraphenylboron as related to particle size and mineralogy. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 64, n. 8, p. 99-106, Feb. 1984.
- ALTMANN, N. Adubação de sistemas integrados de produção em plantio direto: resultados práticos no cerrado. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 140. Dez. 2012.
- ANDRIST-RANGEL, Y. et al. Long-term K dynamics in organic and conventional mixed cropping systems as related to management and soil properties. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 122, n. 4, p. 413-426, Dec. 2007.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 7-8, p. 921-950, May. 2001.
- BARRIOS, M. B. et al. Soil physical properties and root activity in a soybean second crop/maize rotation under direct sowing and conventional tillage. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 4, n. 4, p. 355-362, Oct./Dec. 2006.
- BAYER, C.; MIELNICZUCK, J. Características químicas de solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 105-112, Jan./Mar. 1997.
- BHATTACHARYYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; GHOSH, B. N.; SRIVASTVA, A. K.; GUPTA, H. S. Potassium balance as influenced by farmyard manure application under continuous soybean-wheat cropping system in a Typic Haplaquept. **Geoderma**, Amsterdam, v. 137, n. 1-2, p. 155-160, Dec. 2006.

- BLAKE, L. et al. Potassium content in soil, uptake in plants and the potassium balance in three European long-term field experiments. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 216, n. 1-2, p. 1-14, Nov. 1999.
- BORKERT, C.M. et al. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 143-153, Jan. 2003.
- BORKERT, C. M., SFREDO, G. J., SILVA, D. N. Calibração de potássio nas folhas de soja em Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 2, p. 227-230, Abr./Jun. 1993.
- BORKERT, C.M. et al. Resposta da soja à adubação e disponibilidade de potássio em Latossolo Roxo distrófico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 12, p. 1235-1249, Dez. 1997a.
- BORKERT, C.M. et al. Resposta da soja à adubação e disponibilidade de potássio em Latossolo Roxo álico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 11, p. 1119-1129, Nov. 1997b.
- BORKERT, C. M. et al. O potássio na cultura da soja. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato, 2005. v. 1, cap. 24, p. 671-722.
- BORTOLUZZI, E. C. et al. Alterações na mineralogia de um Argissolo do Rio Grande do Sul submetido à fertilização potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 327-335, Mai./Jun. 2005.
- BRENNAN, R. F.; BOLLAND, M. D. A. Soil and tissue tests to predict the potassium requirements of canola in south-western Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 46, n. 5, p. 675-679, May. 2006.
- BRUNETTO, G. et al. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 565-571, Jul./Aug. 2005.
- CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus and potassium balance in a corn-soybean rotation under no-till and chiseling. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Amsterdam, v. 96, n. 1, p. 123-131, May. 2013.
- CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após a dessecação química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 99-108, Jan./Feb. 2005.
- CARVALHO, W.A.; ESPÍNDOLA, C.R.; PACCOLA, A.A. **Levantamento de Solos da Fazenda Lageado - Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP**, Campus de Botucatu, 1983.

- CASTILHOS, D.D. et al. Mineralogia e fontes de potássio em solos do Rio Grande do Sul cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 579-587, Mai./Jun. 2002.
- CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. J. Cinética de liberação de potássio em Planossolo do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 979-983, Nov./Dez. 2001.
- CHAVES, L. H. G.; DIAS, M. M. Formas de potássio em Regossolos do Estado da Paraíba. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 7, p. 523-528, Jul. 1996.
- CHIBA, M.K. et al. Potássio nas frações texturais de Latossolo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 581-587, Out./Dez. 2008.
- COELHO, C. M. O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato, 2005. v. 1, cap. 22, p. 613-658.
- CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 1, p. 1-11, Jan./Mar. 2009.
- CURI, N.; KAMPF, N.; MARQUES, J. J. Mineralogia e formas de potássio em solos brasileiros. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato, 2005. v. 1, cap. 4, p. 71-91.
- DERPSCH, R.; CALEGARI, A. **Plantas para adubação verde de inverno**. Londrina, Instituto Agronômico do Paraná, 1992. 80 p. (Circular Técnica, 73).
- DOBERMANN, A.; CRUZ, P. C. S.; CASSMAN, K. G. Fertilizer inputs, nutrient balance, and soil nutrient-supplying power in intensive, irrigated rice systems. I. Potassium uptake and K balance. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Amsterdam, v. 46, n. 1, p. 1-10, Jan. 1996.
- EARLY, M. S. B.; CAMERON, K. C.; FRASER, P. M. The fate of potassium, calcium, and magnesium in simulated urine patches on irrigated dairy pasture soil. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Lincoln, v. 41, n. 1, p. 117-124, Jan./Mar. 1998.
- ELKHATIB, E. A.; HERN, J. L. Kinetics of potassium desorption from Appalachian soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 145, n. 1, p. 11-19, Jan. 1988.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos e análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212p. (Documentos, 1).

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.

Recomendações técnicas para o cultivo do milho. 2.ed. Brasília: Embrapa/SPI, 1996. 204p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.

Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 2000/01.

Londrina: Embrapa Soja/Fundação MT, 2000, 245 p.

ENCIDE-OLIBONE, A. P.; ROSOLEM, C. A.; OLIBONE, D. Atividade radicular da soja: definição de um método. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 899-903, Mar./Abr. 2008.

ERNANI, P. R.; DIAS, J.; FLORES, J. A. Annual additions of potassium to the soil increased apple yield in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 33, n. 7-8, p. 1291-1304. Mai. 2002.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007a, v. 1, cap. 9, p.551-594.

ERNANI, P. R.; BAYER, C.; ALMEIDA, J. A. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 393-402, mar./Abr. 2007b.

ERNANI, P. R.; BARBER S. A. Composição da solução do solo e lixiviação de cátions afetadas pela aplicação de cloreto e sulfato de cálcio em um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, n. 1, p. 41-46, Jan./Fev. 1993.

FASSBENDER, H. W. **Química de suelos, com énfasis em suelos de America Latina.** Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1984. 398 p.

FEHR, W. R.; CAVINESS, E. **Stages of soybean development.** Ames: Iowa State University, 1977. 12p.

FERNANDES, D. M. et al. Nutrição da soja e formas de potássio no solo em função de cultivares e adubação potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 405-410, Mai./Jun. 1993.

FERREIRA, E. V. O. et al. Ciclagem e balanço de potássio e produtividade de soja na integração lavoura-pecuária sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 161-169, Jan./Fev. 2011.

FERREIRA, E. V. O. et al. Concentração do potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1675-1684, Nov./Dez. 2009.

FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1549-1561, Jul./Ago. 2008.

FRANCHINI, J. C. et al. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2267-2276, Dez. 1999.

GARCIA, R. A. et al. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 28, n. 4, p. 579-585, May. 2008.

GOMMERS, A.; THIRY, Y.; DELVAUX, B. Rhizospheric mobilization and plant uptake of radiocesium from weathered soils: I. Influence of potassium depletion. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 34, n. 6, p. 2167-2173, Nov. 2005.

HALLIDAY, D. J.; TRENKEL, M. E.; WICHMANN, W. **IFA world fertilizer use manual**. Paris: International Fertilizer Industry Association - IFIA, 1992. 632 p.

HANÁČKOVÁ, E.; MACÁK, M.; CANDRÁKOVÁ, E. The nutrients balance of crop rotation as an indicator of sustainable farming on arable land. **Journal of Central European Agriculture**, Zagreb, v. 9, n. 3, p. 431-438, Nov. 2008.

HAVLIN, J. L.; WESTFALL, D. G. Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. **Soil Science Society of Americana Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 366-370, Oct. 1985.

HINSINGER, P.; JAILLARD, B. Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 44, n. 3, p. 525-534, Sep. 1993.

JOHNSTON, A. E.; GOULDING, K. W. T. **Potassium in ecosystems, biogeochemical fluxes of cations in agro-and forest-systems**. Basel: International Potash Institute, 1992.

KAMINSKI, J. et al. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1003-1010, Set./Out. 2007.

KAMINSKI, J. et al. Potassium availability in a Hapludalf soil under long term fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 783-791, May./Jun. 2010.

KNUDSEN, D.; PETERSON, G. A.; PRATT, P. F. Lithium, sodium, and potassium. In: PAGE, A. L. (Ed.). **Methods os soil analysis**. Chemical and microbiological properties. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Parte 2, p. 225-246.

LUCHESI, E. B.; LENZI, E.; FAVERO, L. O. B. **Química dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001. 159 p.

MAGALHÃES, P. C. C; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da Produção de Milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA/MAPA, 2006, 10 p. (Circular Técnica, 76).

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, A. S. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MELO, V. F. et al. Reserva mineral e caracterização mineralógica de alguns solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 159-164, Mar./Abr. 1995.

MELO, V. F. et al. Mineralogia e formas de potássio e magnésio em diferentes classes de pesos e tamanhos da fração areia de solos do triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 219-231, Mar./Abr. 2004.

MELO, V. F. et al. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solo do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 807-819, Set./Out. 2003.

MELO, V. F. et al. Cinética de liberação de potássio e magnésio pelos minerais da fração areia de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 533-545, Jul./Ago. 2005.

MELO, V. F. et al. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do grupo barreiras no município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 29-41, Jan./Fev. 2002.

MELO, V. F. et al. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich Brazilian soils. **Soil Science Society of Americana Journal**, Madison, v. 65, n. 4, p. 1324-1333, Jul. 2001.

MEURER, E. J.; INDA JÚNIOR, A. V. Potássio e adubos potássicos. In: BISSANI, C.A. et al. (Eds.). **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênese, p. 139-151, 2004.

MIELNICZUK, J. **O potássio no solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato, 1978. 79 p. (Boletim Técnico, 2).

MIELNICZUK, J.; SELBACH, P.A. Capacidade de suprimento de potássio de seis solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.2, p.115-120, 1978.

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato, 2005. v. 1, cap. 7, p.165-178.

NACHTIGALL, G. R.; VAHL, I. C. Capacidade de suprimento de potássio dos solos da Região Sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 37-42, Jan./Fev. 1991.

ÖBORN, I. et al. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. **Soil Use and Management**, Bedfordshire, v. 21, n. 1, p. 102-112, Mar. 2005.

OENEMA, O.; KROS, H.; DE VRIES, W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 20, n. 1-2, p. 3-16, Jan. 2003.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil and Tillage Research**, Philadelphia, v. 38, n. 1-2, p. 47-57, Aug. 1996.

PAYTON, M. E.; MILLER, A. E.; RAUN, W. R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, n. 5-6, p. 547-551, Mar. 2000.

PERNES-DEBUYSER, A. et al. Soil mineralogy evolution in the INRA 42 plots experiment (Versailles, France). **Clay and Clay Minerals**, Chantilly, v. 51, n. 5, p. 577-584, Oct. 2003.

PERSSON, C.; RESSNER, E.; KLEIN, T. Nationell miljöövervakning – MATCH Sverige-modellen. SMHI-rapport, vol. 113. SMHI, Norrköping. 2004.

PITOL, C. et al. **Crambe: Tecnologia e Produção**. Maracaju: Fundação MS, 2010. 60 p.

PIVETTA, L. A. et al. Crescimento e atividade de raízes de soja em função do sistema de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 11, p. 1547-1554, Nov. 2011.

RAHMATULLAH, K. M.; MENGEL, K. Potassium release from mineral structures by H⁺ ion resin. **Geoderma**, Amsterdam, v. 96, n. 4, p. 291-305, Jul. 2000.

RAIJ, B. van. **Potássio: necessidade e uso na agricultura moderna**. Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato, 1991, 45 p.

RAIJ, B. van. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2^a ed. Campinas: Instituto Agronômica de Campinas, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J. A. Disponibilidade de potássio para capim braquária cultivado em solos. **Bragantia**, Campinas, v. 43, n. 2, p. 531-539, 1984.

RAIJ, B. van. et al. (Eds.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2001. 285 p.

RHEINHEIMER, D.S. et al. **Situação da fertilidade dos solos no Estado do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Departamento de Solos, 2001. 41 p. (Boletim Técnico, 2).

RICCI, M.S.F. et al. As frações granulométricas do solo como reserva de potássio para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 2, p.181-186, Mar./Abr. 1989.

ROSOLEM, C. A. Adubação Potássica em Semeadura Direta. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO. 1997, Dourados. EMBRAPA: Resumos e Palestras. Dourados, 1997. 12 p.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C. Phosphorus and potassium budget in the soil–plant system in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, Philadelphia, v. 126, , p. 127-133, Jan. 2013.

ROSOLEM, C. A.; NAKAGAWA, J. Residual and annual potassic fertilization for soybeans. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Amsterdam, v. 59, n. 2, p. 143-149, Fev. 2001.

ROSOLEM, C. A.; STEINER, F. Adubação potássica para o crambe. *Bioscience Journal*, Uberlandia, v. 30, p. 140-146, Jun. 2014.

ROSOLEM, C. A.; NAKAGAWA, J.; MACHADO, J. R. Adubação potássica da soja em Latossolo Vermelho Escuro fase arenosa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 11, p. 1319-1326, Nov. 1984.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; RIBEIRO, D. B. O. Formas de potássio no solo e nutrição potássica da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 121-125, 1988.

ROSOLEM, C. A.; BESSA, A. M.; PEREIRA, H. F. M. Dinâmica do potássio no solo e nutrição potássica da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 9, p. 1045-1054, Set. 1993.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Lixiviação de potássio da palha de coberturas de solo em função da quantidade de chuva recebida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 355-362, Mar./Abr. 2003.

ROSOLEM, C. A. et al. Soil acidity, pH and aluminum management in tropical soils: The brazilian experience. In: WORLD SOYBEAN RESEARCH CONFERENCE, 7., Foz do Iguaçu, 2004. **Proceedings**. Foz do Iguaçu, Embrapa, 2004. p. 310-318.

ROSOLEM, C. A. Et al. Lixiviação de K no solo de acordo com suas doses aplicadas sobre palha de milheto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 813-819, Set./Out. 2006a.

- ROSOLEM, C.A. et al. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 5, p. 1033-1040, Mai. 2006b.
- ROSOLEM, C. A.; VICENTINI, J. P. T. M. M.; STEINER, F. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1507-1515, Set./Out. 2012.
- ROSOLEM, C. A. et al. Potassium leaching as affected by soil texture and residual fertilization in tropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 41, n. 16, p. 1934-1943, Oct. 2010.
- ROSOLEM, C. A.; NAKAGAWA, J. Potassium uptake by soybean as affected by exchangeable potassium in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 16, n. 7, p. 707-726, Jul. 1985.
- SALTON, J. C.; KICHEL, A. N. **Milheto**: alternativa para cobertura do solo e alimentação animal. Dourados: Embrapa, 1997. 32 p.
- SANZONOWICZ, C.; MIELNICZUK, J. Distribuição de potássio no perfil de um solo influenciado pela planta, fontes e métodos de aplicação de adubos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, p. 45-50, 1985.
- SCHERER, E. E. Níveis críticos de potássio para a soja em Latossolo Húmico de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 57-62, Jan./Fev. 1998a.
- SCHERER, E. E. Resposta da soja à adubação potássica em Latossolo Húmico distrófico num período de doze anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 49-55, Jan./Fev. 1998b.
- SFREDO, G. J.; CAMPO, R. J.; SARRUGE, J. R. **Girassol**: nutrição mineral e adubação. Londrina: Embrapa Soja, 1984. 36 p. (Circular Técnica, 8).
- SILVA, D. N. et al. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 3, p. 433-439, Mai./Jun. 1995.
- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. Et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 275-374.
- SIMARD, R. R.; ZIZKA, J.; KIMPE, C. R. The kinetics of nonexchangeable potassium and magnesium release from Quebec soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 69, n. 3, p. 663-675, Aug. 1989.

- SIMONETE, M. A. et al. Efeito residual da adubação potássica do azevém sobre o arroz subsequente em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 721-727, Mai./Jun. 2002.
- SIMONSSON, M. et al. Potassium release and fixation as a function of fertilizer application rate and soil parent material. **Geoderma**, Amsterdam, v. 140, n. 1-2, p. 188-198, Jun. 2007.
- SIMONSSON, M.; HILLIER, S.; ÖBORN, I. Changes in clay minerals and potassium fixation capacity as a result of release and fixation of potassium in long term field experiments. **Geoderma**, Amsterdam, v. 151, n. 3-4, p. 109-120, Jul. 2009.
- SINGH, M.; SINGH, V. P.; REDDY, D. D. Potassium balance and release kinetics under continuous rice-wheat cropping system in Vertisol. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 77, n. 2-3, p. 81-91, Sep. 2002.
- SPARKS, D. L. Bioavailability of soil potassium. In: SUMNER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000, Section D. p. 48.
- STEINER, F. et al. Formas de potássio em solos do Estado do Paraná e sua disponibilidade para as plantas em cultivos sucessivos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, no prelo, 2014.
- STEINER, F. et al. Phosphorus and potassium balance in soil under crop rotation and fertilization. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 6, p. 2173-2186, Nov./Dez. 2012.
- TAIWO, A. A. et al. Potassium supplying capacity of some tropical alfisols in southwest Nigeria as measured by intensity, quantity and capacity factors. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Amsterdam, v. 84, n. 2, p. 105-118, Fev. 2009.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n. 1).
- VELDE, B.; PECK, T. Clay minerals changes in the Morrow experimental plots, University of Illinois. **Clay and Clay Minerals**, Chantilly, v. 50, n. 3, p. 364-370, Jun. 2002.
- VILELA, L.; SOUSA, D. M. G.; SILVA, J. E. Adubação potássica. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2.ed. Brasília: Embrapa, 2004, p. 169-183.
- VILLA, M. R.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Formas de potássio em solos de várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 649-658, Jul./Ago. 2004.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2297-2305, Nov./Dez. 2008.

WILKINSON, S. R.; LOWERY, R. W. Cycling of mineral nutrients in pasture ecosystems. In: BUTTLER, G. W.; BALLEY, R. W. (Eds.). **Chemistry and biochemistry of herbage**. New York: Academic Press, 1973. p. 247-315.

ZIGLIO C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 257-262, Mar./Abr. 1999.

APÊNDICES

Apêndice 1. Resultados da análise química do solo de textura média nas camadas de 0–0,05; 0,05–0,10 e 0,10–0,20 m no 2º ano de experimento (Setembro de 2001) no tratamento sem adição de fertilizante potássico

Camada	pH	MO	P _{resina}	H + Al	K	Ca	Mg	CTC	V
m		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----					%
0–0,05	6,2	22	24,2	18	3,7	38	12	89,7	80
0,05–0,10	5,4	21	13,1	24	1,5	18	9	52,5	54
0,10–0,20	5,3	20	4,7	26	0,9	18	9	53,9	52

Fonte: Foloni e Rosolem (2008).

Apêndice 2. Resultados da análise química do solo (0–0,20 m) das duas áreas experimentais no 4º ano de experimento (Maio de 2004) com diferentes históricos de fertilização potássica

Aplicação de K ₂ O	pH	MO	P _{resina}	H + Al	K	Ca	Mg	CTC	V
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----					%
Solo de textura média									
0	4,7	n.d.	n.d.	36	0,8	11,7	5,3	54	33
30	4,7	n.d.	n.d.	35	0,8	12,8	6,7	55	37
60	4,8	n.d.	n.d.	34	1,0	15,6	6,1	57	40
90	4,7	n.d.	n.d.	32	1,3	12,8	5,4	52	38
120	4,8	n.d.	n.d.	38	1,5	14,0	5,3	59	35
150	4,6	n.d.	n.d.	39	1,9	13,0	4,7	59	33
180	4,7	n.d.	n.d.	35	2,6	12,6	4,8	55	36
Solo de textura argilosa									
0	4,9	n.d.	n.d.	70	1,3	22,2	14,8	108	35
30	4,8	n.d.	n.d.	64	1,4	23,8	13,7	103	38
60	4,9	n.d.	n.d.	59	1,6	31,9	15,6	108	45
90	5,0	n.d.	n.d.	60	0,7	27,0	12,4	100	40
120	4,8	n.d.	n.d.	60	2,3	32,0	15,2	110	45
150	4,9	n.d.	n.d.	62	1,3	31,8	13,8	109	43
180	4,7	n.d.	n.d.	61	4,6	32,1	12,7	110	45

Fonte: Tozi et al. (dados não publicados). n.d.: não determinado.

Apêndice 3. Resultados da análise química do solo (0–0,20 m) das duas áreas experimentais no 7º ano de experimento (Maio de 2007) com diferentes históricos de fertilização potássica

Aplicação de K ₂ O	pH	MO	P _{resina}	H + Al	K	Ca	Mg	Knt ⁽¹⁾	CTC	V
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----						%
Solo de textura média										
0	4,3	15	25	42	0,8	14	5	2,3	62	32
60	4,8	15	24	33	0,8	18	6	3,2	57	43
120	4,3	15	22	41	1,1	11	3	4,0	56	27
180	4,4	13	16	35	1,6	8	3	3,3	48	27
Solo de textura argilosa										
0	4,5	24	26	67	1,9	28	11	5,3	108	38
60	4,7	26	25	60	4,2	33	12	7,5	108	45
120	4,5	26	25	69	3,3	25	9	7,9	106	36
180	4,5	28	26	69	4,4	27	10	7,8	111	37

⁽¹⁾ K não-trocável, obtido pela diferença entre K extraído com HNO₃ 1,0 mol L⁻¹ fervente e o K trocável.

Fonte: Werle et al. (2008).

Apêndice 4. Resultados da análise química do solo (0–0,20 m) das duas áreas experimentais no 10º ano de experimento (Maio de 2010) com diferentes históricos de fertilização potássica

Aplicação de K ₂ O kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	pH	MO g dm ⁻³	P _{resina} mg dm ⁻³	H + Al ----- mmol _c dm ⁻³ -----	K	Ca	Mg	CTC	V %
Solo de textura média									
0	5,3	18	42	30	0,4	23	7	60	50
30	5,5	18	38	28	0,6	20	7	56	50
60	5,4	20	36	26	0,8	21	6	54	52
90	5,6	19	38	28	1,2	24	6	59	53
120	5,3	21	37	30	1,5	20	7	59	49
150	5,4	20	35	27	1,5	23	6	58	53
180	5,4	21	32	30	1,7	22	6	60	50
Solo de textura argilosa									
0	5,2	25	31	53	0,6	36	15	105	49
30	5,4	25	29	51	1,0	40	17	109	53
60	5,3	26	25	58	1,6	43	15	118	51
90	5,2	27	24	53	2,4	39	13	108	51
120	5,1	28	25	55	2,3	37	15	111	50
150	5,2	28	23	60	3,4	41	13	118	49
180	5,3	29	24	56	4,6	39	12	112	50

Fonte: Rosolem e Steiner (2014).

Apêndice 5. Potássio acumulado na palhada de soja na colheita e liberação ocorrida nos intervalos avaliados, no ano agrícola de 2011/12, com a aplicação de 180 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de K₂O em solo tropical de textura média e argilosa

Solo	K acumulado na palhada de soja na colheita	Dias após a colheita			
		10	20	40	60
----- kg ha ⁻¹ -----					
Textura média	45,2 (100) ⁽²⁾	8,1 (18)	2,3 (5)	0,8 (2)	0,6 (1)
Textura argilosa	58,6 (100)	14,6 (25)	3,9 (7)	1,0 (2)	0,9 (2)

⁽¹⁾ Valores entre parênteses mostram a porcentagem de K remanescente na palhada de soja após a colheita.

Apêndice 6. Resultados das propriedades químicas e físicas do perfil dos solos após 12 anos de experimento (Maio/2012) com adubação potássica (Valor médio das sete doses)

Propriedades químicas ⁽¹⁾									
Camada	Ph	MO	P _{resina}	H + Al	K	Ca	Mg	CTC	V
(m)		g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³					%
Solo de textura média									
0–0,10	5,8±0,2	20±0,7	55±3,3	24±3,2	1,2±0,5	24±3,9	8,2±1,6	57±3,7	59±4
0,10–0,20	5,3±0,2	18±0,9	25±5,5	33±3,3	1,0±0,4	19±2,0	6,1±0,9	58±3,3	44±3
0,20–0,40	4,7±0,1	17±1,4	7±0,8	45±3,6	0,7±0,3	8±1,2	3,3±0,5	58±2,8	34±3
0,40–0,60	4,4±0,1	16±0,8	5±0,4	49±4,1	0,5±0,3	7±0,7	3,1±0,3	59±2,7	17±3
0,60–0,80	4,0±0,1	14±0,6	5±0,3	52±4,6	0,4±0,2	6±1,0	2,1±0,4	61±3,1	15±3
0,80–1,00	4,2±0,1	14±0,8	4±0,2	50±4,3	0,3±0,2	6±1,4	2,3±0,5	59±3,2	15±3
Solo de textura argilosa									
0–0,10	5,4±0,2	28±0,7	74±9,8	45±4,8	4,5±1,7	43±4,5	17±3,0	109±4,7	59±5
0,10–0,20	5,1±0,2	25±1,0	21±2,4	54±7,0	2,8±1,6	39±4,0	13±2,6	108±5,0	50±5
0,20–0,40	4,6±0,2	23±0,4	12±1,3	62±3,1	1,5±0,8	31±3,1	11±1,9	106±4,4	42±4
0,40–0,60	4,2±0,1	18±0,3	9±0,6	69±4,2	0,6±0,3	29±4,0	10±1,6	109±4,9	37±5
0,60–0,80	4,1±0,1	15±0,4	8±1,1	73±3,8	0,3±0,1	27±3,5	9±1,9	108±4,6	33±5
0,80–1,00	4,3±0,1	14±0,4	8±0,8	82±4,1	0,2±0,1	19±2,9	6±1,3	107±4,2	23±4
Propriedades físicas ⁽²⁾									
Camada	Granulometria			Ds ⁽³⁾	Da ⁽⁴⁾	Dp ⁽⁵⁾	θ _{CC} ⁽⁶⁾		
	Argila	Silte	Areia					cm ³ cm ⁻³	
(m)	g kg ⁻¹			g cm ⁻³	g cm ⁻³				
Solo de textura média									
0–0,10	140±10	90±5	770±20	1,38±0,03	1,35±0,04	2,62±0,04	0,260±0,03		
0,10–0,20	170±10	80±5	750±25	1,47±0,03	1,35±0,02	2,64±0,03	0,275±0,02		
0,20–0,40	250±10	90±5	660±20	1,40±0,03	1,30±0,03	2,65±0,03	0,310±0,02		
0,40–0,60	240±15	90±5	670±15	1,36±0,02	1,30±0,03	2,64±0,04	0,300±0,02		
0,60–0,80	230±10	100±5	670±20	1,38±0,02	1,30±0,02	2,65±0,04	0,315±0,02		
0,80–1,00	240±10	90±5	670±15	1,35±0,02	1,30±0,03	2,64±0,03	0,320±0,02		
Solo de textura argilosa									
0–0,10	620±15	195±5	185±5	1,26±0,02	1,30±0,03	2,50±0,03	0,375±0,02		
0,10–0,20	670±25	150±5	180±5	1,42±0,03	1,30±0,03	2,45±0,04	0,390±0,01		
0,20–0,40	680±20	170±10	150±5	1,36±0,03	1,30±0,02	2,42±0,05	0,425±0,01		
0,40–0,60	730±10	140±10	130±10	1,31±0,02	1,25±0,02	2,44±0,04	0,425±0,02		
0,60–0,80	720±15	145±10	135±10	1,28±0,02	1,25±0,02	2,44±0,03	0,430±0,02		
0,80–1,00	700±20	165±10	135±5	1,27±0,01	1,20±0,03	2,46±0,03	0,425±0,01		

⁽¹⁾ Dados representam os valores médios (n = 28) ± desvio padrão da média. ⁽²⁾ Dados representam os valores médios (n = 3). ⁽³⁾ Ds: densidade do solo, método a anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). ⁽⁴⁾ Da: Densidade aparente do solo, método da proveta (EMBRAPA, 1997). ⁽⁵⁾ Dp: Densidade de partículas, método do balão volumétrico, com emprego de álcool etílico (EMBRAPA, 1997). ⁽⁶⁾ θ_{CC}: umidade volumétrica do solo na capacidade de campo – determinado pelo método direto segundo Luchese et al. (2001).

Apêndice 7. Parâmetros de ajuste da equação da relação quantidade/intensidade, quociente de atividade de equilíbrio (QAKe), potássio em equilíbrio (Ke) e poder tampão de potássio (PTK) dos solos das duas áreas de experimento

Solo	Parâmetros da equação de regressão ⁽¹⁾			QAKe	Ke	PTK
	Intercepto (α)	Coefficiente de inclinação (β)	R ²			
				(mmol L ⁻¹) ^½	mmol _c kg ⁻¹	(mmol _c kg ⁻¹)/(mmol L ⁻¹) ^½
Textura média	-3,060	4,455	0,99**	0,69	3,06	4,45
Textura argilosa	-7,452	11,904	0,97**	0,63	7,45	11,90

⁽¹⁾ α e β parâmetros de ajuste à equação linear da relação Q/I ($y = \alpha + \beta x$) para a determinações do QAKe, Ke e PTK. R² é o coeficiente de determinação do ajuste da relação Q/I. ** significativo ao nível de 1 % pelo teste t.

Apêndice 8. Produção de matéria seca das culturas de aveia-preta e milho, no ano agrícola de 2011, em função do efeito residual da aplicação de doses de K na cultura de verão (soja) em solo tropical de textura média e argilosa

Solo	Aplicação de K ₂ O	Produção de matéria seca	
		Aveia-preta ⁽¹⁾	Milho ⁽²⁾
	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹	kg ha ⁻¹	
Textura média	0	758	210
	30	1.012	273
	60	1.164	367
	90	1.285	357
	120	1.186	384
	150	1.192	426
	180	1.330	422
Textura argilosa	0	2.356	519
	30	3.168	745
	60	3.362	861
	90	4.406	1.156
	120	4.053	1.046
	150	4.070	1.132
	180	4.182	1.163

⁽¹⁾ Produção de matéria seca de aveia-preta na fase de enchimento dos grãos (96 dias após a semeadura).

⁽²⁾ Produção de matéria seca de milho na fase inicial de crescimento (45 dias após a semeadura).



Apêndice 9. Sintomas típicos de deficiência de potássio em folhas de soja cultivado em um Latossolo Vermelho de textura média após 12 anos sem a adição de fertilizante potássico.