**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Caracterização do uso do rubídio como marcador de potássio no milho
(*Zea mays* L.)**

Rafaela Alenbrant Migliavacca

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2015**

Rafaela Alenbrant Migliavacca
Engenheira Agrônoma

Caracterização do uso do rubídio como marcador de potássio no milho (*Zea mays* L.)
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LAÉRCIO FAVARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2015

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Migliavacca, Rafaela Alenbrant

Caracterização do uso do rubídio como marcador de potássio no milho (*Zea mays* L.) /
Rafaela Alenbrant Migliavacca. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018
de 2011. - - Piracicaba, 2015.

75 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Traçador 2. Eficiência 3. Análogo 4. Substituição e adição de Rb I. Título

CDD 633.15
M634c

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICO

*Aos meus pais, Marli Alenbrant Migliavacca
e Euclides Migliavacca, meus maiores exemplos de vida.*

OFEREÇO

*A Deus, pelo sopro de vida, refúgio e fortaleza.
Auxílio sempre presente nas adversidades.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me conforta e ilumina, trazendo força e coragem para enfrentar os novos desafios.

Agradeço aos meus pais por todo o amor, carinho e dedicação. Fonte de apoio e confiança em todas as minhas decisões, sempre dispostos a oferecer suporte para a conclusão das etapas mais importantes da minha vida. Agradeço pelos valores e ensinamentos transmitidos durante os anos, principalmente a valorização da honestidade e da sinceridade acima de tudo.

Agradeço ao meu namorado, melhor amigo e colega de profissão Alfredo Jr., pelo amor, confiança, respeito, atenção e paciência. Pessoa admirável e um excelente profissional, que sempre me auxilia, apoia e incentiva independente da situação, principalmente nos momentos de fraqueza e fragilidade.

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. José Laércio Favarin, pelo entusiasmo, dedicação, conhecimento, motivação, disposição e paciência para me auxiliar em todos os momentos.

Agradeço aos professores Takashi Muraoka e Antonio Enedi Boaretto, integrantes da banca examinadora, pela disponibilidade, contribuição e considerações sugeridas.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Departamento de Produção Vegetal, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela grande oportunidade de estudo. Ao laboratório Multiusuário em Produção Vegetal do Departamento de Produção Vegetal e ao Laboratório de Nutrição de Plantas do Departamento de Ciência do Solo, por possibilitar a realização das análises.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida para a realização do Mestrado.

Agradeço aos meus colegas e amigos da pós-graduação: Tiago Tezzoto, Pedro Paulo de Carvalho Teixeira, Felipe Brendler Oliveira, Rodrigo Estevam Munhoz de Almeida, Clóvis Pierozan Junior, Silas Maciel de Oliveira, Bruno Cocco Lago, André Froes de Borja Reis, Ana Luisa Vasconcellos, Ana Paula Neto, Adriene Woods Pedrosa, Ana Paula Schwantes, Karla Vilaça, Felipe Fadel, Guilherme Felisberto, José Formiga, Walquíria Fernanda, Luís Henrique Soares, Beatriz Nastaro, Fábio Coutinho, Diogo Paes, Maurício Cherubin, Naiara Simarro Fagundes, Cristiano Bortoluzzi, André Felipe Moreira, Kélin Schwarz e Jacqueline Gerage pelos ensinamentos, auxílios e principalmente pelo companheirismo, pois sem eles a realização desse trabalho não seria possível. Agradeço também a todos os demais amigos que conquistei nessa etapa e ao longo da vida.

Agradeço a todos os estagiários que participaram do grupo Ecofisiologia e Nutrição de Plantas em Sistemas de Produção (ENUSP) e também aos membros do Grupo de Experimentação Agrícola (GEA).

Agradeço aos professores Takashi Muraoka, José Lavres Júnior, Francisco Antônio Monteiro e a todos os professores e colaboradores da universidade que me auxiliaram nas diferentes etapas desse trabalho. Aos funcionários do departamento de produção vegetal, Silvia Borghesi, Celestino Fereira, Marcelo Batista, Jouly Carmo, Elisabete Sarkis, Maria Celia Rodrigues e Wilson Góes da Silva.

Agradeço a secretária do programa de pós-graduação em fitotecnia Luciane Aparecida Lopes Toledo, pela dedicação e competência com a qual consegue enfrentar inúmeras situações.

As bibliotecárias Silvia Maria Zinsly e Eliana Maria Garcia, pelos conselhos e auxílios durante o processo de submissão junto ao Sistema de Submissão de Teses.

Agradeço aos meus primeiros orientadores Dra. Marizângela Rizzati Ávila e Professor Dr. Leandro Paiola Albrecht, que auxiliaram na descoberta da área da pesquisa,

com muita dedicação e paciência. Em especial agradeço ao professor Dr. Tiago Roque Benetoli da Silva, pela orientação durante a maior parte da graduação e contribuição para a minha formação acadêmica e pessoal, o que possibilitou meu ingresso na pós-graduação.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional, muito Obrigada!

EPÍGRAFE

“Um passo à frente e você não está mais no mesmo lugar”
(Chico Science)

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivos específicos	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Funções do K na planta	21
3.2 Relação entre o K e outros nutrientes	23
3.3 Eficiência de uso de fertilizantes	24
3.4 Uso de Rubídio como marcador de potássio	25
3.5 Demanda de K pela cultura do milho	28
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1 Instalação do Experimento	31
4.2 Avaliações	33
4.3 Análise estatística	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Resultados.....	37
5.2 Discussão.....	63
6 CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS	69

RESUMO

Caracterização do uso do rubídio como marcador de potássio no milho (*Zea mays* L.)

O conhecimento da dinâmica do potássio no sistema solo-planta é importante para entender a disponibilidade desse nutriente as culturas. O uso de isótopos possibilita especificar a quantidade do nutriente recuperada pela planta proveniente do fertilizante. O ^{42}K , isótopo radioativo do potássio, apresenta meia-vida de 12,4 horas o que impossibilita o seu uso em pesquisas relacionadas à eficiência dos fertilizantes. Como alternativa há o Rb que é análogo ao K, tem propriedades químicas semelhantes, e realiza algumas funções do K nas plantas. Entretanto, por não se tratar do mesmo elemento, persiste a dúvida em relação à quantidade de Rb que não prejudique o desenvolvimento das culturas a fim de usá-lo como marcador. Essa pesquisa tem como objetivo identificar as relações de massa entre o K e o Rb em estudos de aproveitamento do nutriente. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação com delineamento experimental em blocos ao acaso e quatro repetições. Para verificação do objetivo estudou-se dois métodos, da substituição de K por Rb e da adição de Rb. No método da substituição foram utilizados os seguintes tratamentos: sem Rb, 10%, 20%, 40%, 50%, 70%, 85% e 100% de Rb; no método de adição utilizou os seguintes tratamentos: sem Rb, 10%, 20%, 40%, 50%, 70%, 85% e 100% de Rb adicionado ao total aplicado de K (150 mg dm^{-3}). Para avaliação dos tratamentos o milho foi conduzido até o estágio V8, ao final do qual determinaram-se atributos relacionados ao desenvolvimento e a fotossíntese, os teores de Rb, de macronutrientes (K, N, P, S, Ca e Mg) e micronutrientes (Mn, Fe, Zn e Cu) na parte aérea e nas raízes da planta. A substituição do K pelo Rb prejudicou o desenvolvimento do milho, sem haver dano à planta na adição. Os teores de nutrientes na parte aérea e nas raízes variaram diferenciadamente em cada método. A eficiência de recuperação do K foi superior à do Rb. O desenvolvimento da planta foi limitado pela substituição de 10% do K por Rb. A adição máxima aceitável de Rb foi 30%, estabelecida pelo decréscimo nos teores de nutrientes.

Palavras-chave: Traçador; Eficiência; Análogo; Substituição e adição de Rb

ABSTRACT

Characterization of the use of rubidium as a potassium tracer in maize crop (*Zea mays* L.)

The knowledge of the potassium dynamics in the soil-plant system is important to understand the nutrient availability in cultures. The use of isotopes allows to specify the amount of nutrient recovered by the plant from the fertilizer. The ^{42}K , radioactive isotope of potassium has a half-life of 12.4 hours, which precludes its use in research related to the efficiency of fertilizers. Alternatively, Rb is analogous to K and has similar chemical properties, thus, it can perform certain K functions in plants. However, because it is not the same element, questions arise regarding the amount of Rb that does not harm the plant development when used for K labeling. This research aims to identify the relationship between the mass of K and Rb in nutrient utilization studies. The experiment was conducted in a greenhouse in a randomized block design with four replications. Two methods, replacing K by Rb and adding Rb, were used. In the replacement method, the following treatments were used: without Rb, 10%, 20%, 40%, 50%, 70%, 85% and 100% of Rb, and in the addition method: without Rb, 10%, 20%, 40%, 50%, 70%, 85% and 100% of the Rb added to total applied K (150 mg dm^{-3}). For the evaluation of treatments, maize plants were grown until the V8 stage, after which the attributes related to development and photosynthesis, contents of Rb, macronutrients (K, N, P, S, Ca and Mg) and some micronutrients (Mn, Fe, Cu and Zn) were determined in the shoots and roots of the plant. The replacement of K by Rb hindered the corn development, and no damage was observed to the plant with the addition of Rb. Nutrient concentration in the shoots and roots varied differently in each method. The efficiency of recovery was higher for K. The plant growth was limited by the replacement of 10% of K by Rb. The maximum acceptable addition of Rb was 30% established by the decrease in nutrient content.

Keywords: Tracer; Efficiency; Analogous; Replacement and addition of Rb

1 INTRODUÇÃO

A produção mundial de milho foi de 988,6 milhões de toneladas na safra 13/14, com projeção para 990,7 milhões de toneladas na safra 14/15. O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, e um dos que mais consome potássio importado (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2014; ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS, 2013). O aumento da produção depende de ganhos de produtividade, a qual depende de inúmeros fatores, entre os quais está o aproveitamento de potássio pelo milho (WHITE, 2013).

O potássio (K) é o cátion metálico mais abundante na planta, sua concentração no citoplasma garante a efetividade de atividades enzimáticas. Diferente do nitrogênio (N) e do fósforo (P), o K não faz parte de componentes estruturais, portanto bastante móvel na planta. O K é ativador de muitas enzimas, participa da fotossíntese, respiração, síntese de proteínas e do transporte de carboidratos. É um regulador eficiente do potencial osmótico, melhora a qualidade dos produtos e a resistência aos fatores bióticos (MENGEL, 2007; MARSCHNER, 2012; ZÖRB; SENBAYRAM; PEITER, 2014).

A demanda de K pelo milho é proporcional ao aumento da produtividade. A quantidade exigida varia com a fase de desenvolvimento. O acúmulo no milho é linear entre 20 e 60 dias depois da germinação. No fim do ciclo a quantidade total representa a metade ou até menos do que foi obtido até 60 dias (MALAVOLTA et al., 1976). A planta exporta 30% do total de K exigido. Seu suprimento varia de acordo com a quantidade e disponibilidade das formas em que se encontra no solo, o que interfere no comportamento do íon na solução. A dinâmica do K no sistema solo-planta varia com a dose e o modo de aplicação, o qual está sujeito à lixiviação, processo variável com a quantidade de água que infiltra no solo, dose de K, entre outros fatores (COELHO, 2005; ROSOLEM et al., 2006).

A quantidade de nutrientes utilizada para a produção pode ser estimada de diversas maneiras. Entretanto, o entrave de todas elas está na dificuldade para determinar a eficiência de aproveitamento, como por exemplo do K, proveniente do fertilizante. Uma alternativa é o uso de isótopos e traçadores, que possibilitam especificar quanto do nutriente recuperado pela planta veio do fertilizante (SINGH; SINGH; KAUR, 2013).

O Rb apresenta propriedades químicas semelhantes ao K. O isótopo radioativo do potássio (^{42}K) tem meia-vida de 12,4 horas, impossibilitando seu uso em pesquisas sobre eficiência e dinâmica do nutriente. Outra opção consiste no uso do ^{86}Rb radioativo, análogo ao K nos estudos de nutrição de plantas (MARSCHNER; SCHIMANSKY, 1971; HAEDER, 1982; MORA; BUR, 1972 apud CALVACHE et al., 1990). Entretanto, a meia-vida do ^{86}Rb

de 18,7 dias inviabiliza o uso em experimentos mais demorados. O rubídio Rb estável na natureza pode ser usado nessas pesquisas. Este elemento executa parte das funções do K, como a regulação do potencial osmótico celular (LIMA FILHO; MALAVOLTA, 2003; MARSCHNER, 2012).

Entre os experimentos que utilizam o rubídio como marcador de potássio encontrados na literatura, poucos relatam as quantidades utilizadas do marcador. Pelo fato do Rb não substituir o K em todas as funções, persiste a dúvida a respeito da quantidade a ser usada deste marcador em relação à dose de K fornecido ao milho, sem risco de prejuízo à planta.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo identificar as relações de massa entre o K e o Rb, para uso futuro como traçador, nas pesquisas sobre recuperação do nutriente proveniente do fertilizante. O objetivo desta pesquisa fundamenta-se na seguinte hipótese: “há um limite para a quantidade de Rb que não é prejudicial à planta, seja pelo método da substituição do K pelo Rb e/ou pelo método da adição de Rb, sem alteração da dose de K”.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a relação de massa entre K e Rb que permita usá-lo como marcador para estudos nutricionais no milho;
- Avaliar o efeito da adição de Rb e da substituição do K pelo Rb nos atributos relacionados ao desenvolvimento da planta;
- Verificar a relação entre o Rb e os teores dos macro e micronutrientes da planta;
- Calcular a eficiência de recuperação de K e Rb fornecidos ao substrato.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Funções do K na planta

A absorção de K pelas plantas ocorre por meio de dois mecanismos, um mecanismo de baixa afinidade (LATS *low-affinity transport system*) e outro de alta afinidade (HATS *high-affinity transport system*) (BUKSH et al., 2012). O LATS atua em altas concentrações de K e apresenta baixa afinidade no transporte, via difusão facilitada por canais seletivos até o citosol (ROSOLEM, 2005). O HATS apresenta alta afinidade e seletividade por K no transporte, mesmo sob baixas concentrações. Esse mecanismo é dependente de energia (ATP), pois opera contra gradiente eletroquímico, geralmente H^+ ou Na^+ via simporte, de modo que os íons são transportados juntos até o citosol. A proteína que facilita o transporte de alta afinidade apresenta a seguinte ordem de seletividade de íons: $K^+ > Cs^+ > Rb^+ > Na^+ > NH_4^+$ (RODRÍGUEZ-NAVARRO; RUBIO, 2006; VÉRY; SENTENAC, 2003).

O K é responsável pela ativação de mais de 70 enzimas envolvidas no desenvolvimento das plantas, em ação relacionada à mudança de conformação enzimática (PRAJAPATI; MODI, 2012; MARSCHNER, 1995). O K altera a forma física da molécula para expor os locais quimicamente ativos, em que ocorre a ligação com o substrato. As enzimas são catalizadoras das reações químicas e o K é utilizado para ativá-las, mas não é consumido durante o processo (MENGEL, 2007; MALAVOLTA, 2006).

A alta concentração de K nos compartimentos celulares é importante para a ativação das enzimas, estabilização da síntese de proteínas, neutralização de cargas negativas sobre as proteínas, formação do potencial de membrana e manutenção da homeostase do pH do citosol das células. Para a atividade metabólica da célula, uma concentração de K^+ de cerca de 100 mM deve ser mantida nos compartimentos ativos (DREYER; UOZUMI, 2011; MARSCHNER, 1995).

Enzimas específicas como a H-PPase vacular, que acumula prótons no lúmen do vacúolo, e a síntese de algumas enzimas envolvidas no metabolismo do carbono, como a piruvato quinase, fosfofrutoquinase e ADP-glicose dependem da concentração de K^+ . A sua concentração na planta pode afetar o metabolismo vegetal via regulação transcricional e pós-transcricional de enzimas metabólicas (MAATHUIS, 2009).

A mobilidade dos íons K^+ é importante para a regulação do potencial osmótico e expansão celular, com um grande aumento do vacúolo, o qual chega a ocupar entre 80% e 90% do volume da célula. A atuação do K nas ATPases reduz o pH do citoplasma, e permite, assim, a atuação de enzimas que quebram ligações dos componentes da parede celular, facilitando a elongação da célula (PRADO, 2008).

O K é o principal cátion que atua nos processos de turgor, movimento dos estômatos, fototropismo e gravitropismo. A homeostase é muito importante às plantas, pois garante o equilíbrio dinâmico da concentração de K^+ (DREYER; UOZUMI, 2011). Na síntese de proteínas, o K está relacionado à formação de polipeptídeos nos ribossomos, o que requer elevada concentração desse nutriente. Apesar da abundância de N, as plantas deficientes em K não são capazes de sintetizar proteínas (MENGEL, 2007). Ainda, ativa e sintetiza nitrato redutase, responsável por catalisar a formação de proteínas. Os processos que envolvem a atuação da nitrato redutase são fundamentais para a incorporação de N inorgânico em moléculas orgânicas complexas. A deficiência de K promove o acúmulo dos precursores das proteínas, como aminoácidos, aminas e nitratos (SILVA et al., 2011; PRAJAPATI; MODI, 2012).

A síntese de amido depende da atuação dos cátions monovalentes, entre os quais o K é o mais eficiente. Esse nutriente ativa a enzima sacarose fosfato sintase, catalisadora da transferência da glicose para as moléculas do amido. Plantas deficientes em K apresentam acúmulo de açúcares hexoses e decréscimo de carboidratos de maior cadeia como amido e sacarose nas folhas, em virtude da menor atividade da sacarose fosfato sintase (HAWKER; MARSCHNER; DOWNTON, 1974; ZÖRB; SENBAYRAM; PEITER, 2014).

O K regula a abertura e o fechamento dos estômatos, responsáveis pelas trocas gasosas de CO_2 , O_2 e vapor d'água. A alta concentração de K nas células guardas aumenta a capacidade de absorver água, o que permite que ocorram às trocas gasosas. Na baixa disponibilidade de água o K é bombeado para fora das células guardas e, assim, promove o fechamento estomático, com menor perda de água (COCHRANE; COCHRANE, 2009). Plantas com teores adequados de K possuem maior tamanho e número de estômatos por área foliar, o que facilita as trocas gasosas nos tecidos (MALAVOLTA, 2006). O acúmulo de K nas raízes gera gradiente osmótico capaz de atrair água. Sob deficiência de K as plantas diminuem a capacidade de absorção de água (PRAJAPATI; MODI, 2012).

A atuação no controle da abertura e fechamento dos estômatos faz com que o K relacione diretamente com a fotossíntese, entretanto sua atuação é complexa. A participação na produção de ATP na fotofosforilação provavelmente é mais importante que a atuação como regulador osmótico. Na deficiência de K as plantas reduzem a taxa de produção de ATP, assim todos os processos dependentes de energia são prejudicados (PRAJAPATI; MODI, 2012; MENGUEL, 2007). O K estimula a assimilação de CO_2 , facilita a difusibilidade desse gás no mesófilo foliar e, ainda, mantém o pH elevado no estroma, necessário a atividade

da rubisco, em detrimento da fotorrespiração. O ATP produzido é usado para acumular K nas células guarda dos estômatos (MARSCHNER; 2012).

O fornecimento de K é crucial no transporte a longa distância dos fotoassimilados por meio do floema, a fim de manter elevado o potencial osmótico nos tubos crivados, necessário para altas taxas de transporte (ZÖRB; SENBAYRAM; PEITER, 2014). É o cátion inorgânico mais abundante no floema e xilema, com a função de contrabalancear os ânions móveis presentes. O papel do K no balanço cátion-ânion também interfere no metabolismo do NO_3^- , pois atua, na maioria das vezes, como contra íon dominante do NO_3^- no transporte a longa distância no xilema e no armazenamento no vacúolo (MARSCHNER; 2012).

Os sintomas visíveis de deficiência de K são cloroses, seguidas de bronzeamento nas pontas das folhas mais velhas, os quais evoluem para necrose. A mobilidade do nutriente permite sua transferência de tecidos mais velhos para os mais jovens, o que mantém até certo grau de deficiência, o desenvolvimento da planta. O bronzeamento é ocasionado pelo acúmulo de putrescina nas folhas (ZÖRB; SENBAYRAM; PEITER, 2014; MARSCHNER; 2012).

A nutrição adequada de K aumenta a lignificação das paredes celulares, assim como a resistência das culturas aos estresses bióticos e abióticos, como alta luminosidade, estresse hídrico e salino, toxicidade de amônio, resistência ao frio e geadas, etc.... Em consequência desses fatores, os produtos vegetais apresentam qualidade superior no momento da colheita (ZÖRB; SENBAYRAM; PEITER, 2014; AMTMANN; TROUFFLARD; ARMENGAUD, 2008).

3.2 Relação entre o K e outros nutrientes

O aumento do suprimento de um cátion ocasiona a diminuição da absorção de outros, de modo que o total de cargas positivas sejam constantes, o que gera um efeito antagônico associado ao acúmulo de cátions no vacúolo, enquanto as concentrações no citosol não são afetadas (ROSOLEM, 2005).

O excesso de K interfere positiva ou negativamente na absorção de outros cátions pelas plantas. A absorção de um íon afeta a de outro íon, quando competem pelo mesmo sítio do carregador (MEURER, 2006). A alta eficiência na absorção das plantas pelo K prejudica a absorção de outros cátions. Em situações que predominam altas concentrações de K^+ na planta são verificadas baixas concentrações de Ca^{2+} (ROSOLEM, 2005).

A importância da interação entre K, Mg e Ca decorre da quantidade predominante desses cátions na planta. Altas concentrações de K inibem a absorção de Ca e, principalmente,

de Mg. O antagonismo entre o K e o Mg, faz com que a alta concentração de K na solução ocasione um efeito depressivo à absorção de Mg (ROSOLEM, 2005; MARSCHNER, 1995).

A absorção preferencial do K decorre do fato de ser um íon monovalente com menor grau de hidratação, comparativamente aos íons divalentes, em particular o Mg. A diminuição da absorção de Mg também está relacionada a competição com o Ca, pois a energia de hidratação e o tamanho do raio iônico do Mg^{2+} são superiores ao Ca^{2+} (PRADO, 2008).

O N é o nutriente limitante do crescimento primário em culturas agrícolas. O aumento da adubação nitrogenada requer aumento na disponibilidade de K para manter o status hídrico da planta, em especial, sob baixo teor de água (RÖMHELD; KIRKBY, 2010). A resposta da cultura ao K depende da dose de nitrogênio. Quanto maior o suprimento de $N-NH_4^+$ maior será a absorção de K, agilizando a assimilação do NH_4^+ , a fim de manter baixo seu teor na planta, em razão da toxidez pelo acúmulo nos tecidos vegetais (ROSOLEM, 2005). O N e o K também estão relacionados, pela função do K, na ativação da redutase do nitrato, no primeiro passo na redução assimilatória de $N-NO_3^-$. Há, portanto, correlação positiva entre a atividade da enzima redutase do nitrato e o K. Nos casos de deficiência desse nutriente há prejuízo na síntese proteica (PRADO, 2008; SILVA et al., 2011).

O K aumenta a absorção de NO_3^- e, ainda, acompanha seu transporte no floema. O NO_3^- é absorvido pela raiz por processo ativo. A translocação de fotoassimilados depende, também, de K (MARSCHNER, 1995; FAGERIA, 2001).

As relações do K com os micronutrientes são difíceis de serem estabelecidas. Uma das relações de maior interesse é a interação do K com o Mn. O K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} são importantes na regulação da absorção de Mn pelas plantas. Na literatura existem resultados muito divergentes. Algumas pesquisas indicam que a aplicação de K aumenta a absorção de Mn, enquanto outras prejudicam a ponto de causar deficiência (Mn) em soja, sob altas doses de K e em área que foi feita a calagem (ROSOLEM, 2005; ROSOLEM et al., 1992).

3.3 Eficiência de uso de fertilizantes

O consumo mundial de fertilizantes potássicos foi 21 milhões de toneladas em 2011 e deverá aumentar para 33,2 milhões de toneladas em 2016 (FAO, 2012). As reservas totais estão estimadas em 7 bilhões de toneladas de K, mas somente 205 milhões de toneladas de K são viáveis atualmente, suficientes para atender a demanda por muitos séculos (US GEOLOGICAL SURVEY, 2014). Os processos de mineração, processamento, distribuição e aplicação dos fertilizantes potássicos elevam os custos de produção. Fato que motiva a busca por alternativas que aumentem a eficiência de uso de K pelas plantas. O incremento da

eficiência de uso dos fertilizantes potássicos não apresentará apenas benefícios econômicos, mas proporcionará benefícios ambientais (WHITE, 2013).

Princípios de sustentabilidade requerem redução do uso de K, a fim de manter e/ou aumentar a produtividade das culturas, atingidos através da inclusão de ferramentas sofisticadas de apoio à decisão, que sejam adequadas às práticas agronômicas (WHITE; BROWN, 2010). Desse modo, são necessárias investigações a respeito da demanda de K pelas plantas e como ela pode ser suprida com o mínimo de fertilizantes.

Altos valores de eficiência de uso de fertilizantes podem reduzir os custos dos insumos e as perdas de nutrientes. As características genéticas, morfológicas e fisiológicas das plantas e suas interações com fatores externos como a umidade do solo, temperatura, radiação, biologia do solo, modo de aplicação e qualidade dos fertilizantes precisam ser avaliados para o uso eficiente dos nutrientes (BALIGAR; FAGERIA; HE, 2001).

Neste contexto, existe a necessidade de otimizar o uso dos fertilizantes, para aumento da produtividade, uso eficiente da água e preservação do ambiente. O uso de isótopos radioativos como ^{32}P e isótopos estáveis como ^{15}N são ferramentas para determinar a absorção de nutrientes. Estas técnicas são utilizadas nos estudos de processos sobre eficiência dos fertilizantes aplicados, e para avaliar o destino da fração não aproveitada (ZAPATA; HERA, 1997).

Além dos estudos de eficiência, os isótopos são utilizados nos estudos sobre qualidade de solo e água; desenvolvimento de variedades eficientes no uso de água e nutrientes; avaliação de técnicas de irrigação, erosão e formação do solo; capacidade de transporte de solutos no perfil do solo e gestão de recursos naturais utilizados na agricultura (BHAT; RASSOL; BRAT, 2010; LAMM, 1979). Alguns nutrientes possuem isótopos de meia-vida curta, dificultando sua aplicação nas pesquisas de eficiência do uso de fertilizantes, como é o caso do K, em que seu isótopo radioativo ^{42}K possui meia-vida de 12,4 horas. Por esse motivo, usa-se como marcadores de K o radioisótopo ^{86}Rb , com meia-vida de 18,7 dias e o Rb natural.

3.4 Uso de Rubídio como marcador de potássio

O uso de isótopos ou elementos marcadores possibilita determinar a quantidade do nutriente aproveitado pela planta, proveniente do fertilizante. O aproveitamento do K poderia ser determinado usando o seu radioisótopo ^{42}K . No entanto, sua meia-vida é extremamente curta (12,4 horas), o que impossibilita a avaliação de eficiência de uso pelas plantas. O ^{40}K também é um radioisótopo de K, que por outro lado, tem meia-vida muito longa, de $1,23 \times 10^9$

anos, mas também não se adequa em investigações agronômicas. O ^{86}Rb , radioativo, com meia-vida de 18,7 dias foi usado em alguns estudos como traçador de K (CALVACHE et al., 1990). Porém, esse radioisótopo não está disponível em muitos países como o Brasil. Em virtude disso, alguns autores recomendam a utilização do Rb natural, que não apresenta problemas de meia-vida.

Na absorção de nutrientes é comum haver competição entre íons, em que um determinado nutriente entra em um canal ou liga-se a uma proteína carreadora, em detrimento de outro. Essa competição ocorre particularmente entre íons com propriedades semelhantes (valência e diâmetro), como por exemplo, entre os cátions monovalentes K^+ *versus* Rb^+ , cério (Cs^+) *versus* sódio (Na^+) (MARSCHNER, 2012). Os cátions com raio atômico próximo ao do K podem substituí-lo, às vezes quase totalmente na ativação de enzimas (MALAVOLTA, 2006).

O Rb apresenta raio hidratado semelhante ao K e por isso ocupa os mesmos locais de ligação na membrana plasmática das células da raiz (ERDEI; TRIVEDI, 1991). Assim, os íons de K e Rb são transportados por sítios que não conseguem discriminá-los. Embora o Rb não possa substituir o K em todas as funções metabólicas, o mesmo pode substituir o nutriente na transferência de prótons no tonoplasto (NAKAOJI et al., 1991; MARSCHNER, 1995), mas não o faz em suas funções enzimáticas (VALDEZ-AGUILAR; REED, 2008).

O fato do Rb e K possuírem propriedades químicas semelhantes faz com que sejam considerados análogos em muitos estudos de nutrição vegetal (MARSCHNER; SCHIMANSKY, 1971). A maioria dos estudos que utilizam o Rb como traçador de K são conduzidos em solução nutritiva ou em sistemas de resina pura. No solo, as reações que ocorrem são independentes entre Rb e K, e variam de solo para solo, o que pode mascarar a competição entre Rb e K (FRIED et al., 1959). Há relatos de diferenças consistentes entre esses elementos em virtude das propriedades químicas dos solos (TYLER, 1997).

Em experimento com adição de diferentes concentrações de ^{85}Rb associado ao K no azevém, observou-se que à medida que aumentava a dose de Rb do fertilizante aumentava a sua concentração na planta, enquanto o K mantinha-se constante até 60 dias de desenvolvimento (CALVACHE et al., 1990).

No arroz, experimentos de absorção de potássio, indicaram que o ^{86}Rb pode ser usado como traçador em estudos nutricionais nessa cultura, feito em substrato não reativo, como solução nutritiva (KARIM et al., 1971). A sua aplicabilidade como marcador de K não pode ser aceita para todos os tecidos da planta, como relatados na cultura de milho (MASS; HEALD, 1958 apud KARIM et al., 1971).

As raízes de milho não conseguem distinguir entre os dois nutrientes (BALIGAR et al., 1979) e, em geral, os resultados obtidos para o Rb podem ser aplicados ao K na medida em que estes íons possuem propriedades bastante similares no ambiente solo-raiz. Em experimento com milho, aveia, trigo sarraceno, trevo doce e girassol o ^{86}Rb e o K foram absorvidos numa proporção de 0,85, determinada pela razão entre as concentrações em solução do Rb sobre o K, sem apresentar distribuição uniforme dentro da planta (WALKER; BARBER, 1962). Para Menzel e Heald (1955) o ^{86}Rb concentrou-se nas flores e folhas jovens das plantas e nas raízes de milho, aveia e trigo. As diferentes proporções de rubídio e potássio devem ser levadas em consideração na sua utilização como marcador.

A relação K/Rb nas fases iniciais de desenvolvimento do milho foi determinada em alguns experimentos de cinética de absorção. Nesta pesquisa obtiveram-se valores da relação entre 1,2 e 0,95, semelhante aos valores da solução. Ressalte-se que essa relação de concentração apresentou tendência de modificar-se no decorrer do desenvolvimento (BALIGAR et al., 1979).

A quantidade de Rb nas plantas está relacionada com a quantidade que ocorre naturalmente no solo, dessa forma o mesmo pode ser utilizado como indicador de K nativo do solo (HAFEZ; STOUT, 1973). Os fertilizantes potássicos normalmente contém muito pouco Rb, em relação à quantidade presente no solo. Portanto, as adições de fertilizantes potássicos podem reduzir a relação K/Rb no solo e na planta. A proporção de fertilizante em qualquer componente da planta pode ser estimada pela razão entre K/Rb por meio da quantidade natural de Rb presente no solo, de modo que o teor de Rb do fertilizante seja conhecido ou considerado negligenciável (CROUS et al., 2011).

O sucesso da utilização do Rb como traçador de K depende do comportamento fisiológico semelhante dos dois elementos. Para ser considerado eficaz devem ocorrer proporções semelhantes e constantes nos diferentes tecidos. Embora em alguns casos o Rb seja ineficaz como traçador em estudo da dinâmica de K, ele pode ser útil em estudos fisiológicos. Apesar da competição entre K e Rb, a relação entre eles pode proporcionar uma medida qualitativa de absorção de K (TAMI, 1992).

Entre os experimentos que utilizam o Rb como marcador de K encontrados na literatura, poucos relatam as quantidades do marcador utilizadas. Alguns experimentos trabalham com a substituição do K por Rb outros adicionam o Rb sem alterar a quantidade utilizada de potássio. Baligar (1979) em um experimento realizado em solução nutritiva com culturas distintas substituiu 1%, 2%, 10% e 30% da quantidade de K aplicada, diferente do

que foi relatado por Calvache e López (1999) que marcaram o KCl com 10% de átomos em excesso de ^{85}Rb .

3.5 Demanda de K pela cultura do milho

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, com produção de 79,3 milhões de toneladas na safra 2013/2014. Está atrás dos Estados Unidos e da China os quais produziram 353,7 milhões e 218,5 milhões de toneladas, respectivamente (USDA, 2014).

Do gasto total com a produção de milho aproximadamente 33% são destinados ao uso de fertilizantes. Em 2013, os gastos com fertilizantes para a produção do milho variaram entre R\$ 802,71 a R\$ 865,99 por hectare nos meses de maio a setembro (FARSUL, 2013). A redução dos custos com fertilizantes pode ser alcançada via ferramentas que ajudem compreender a dinâmica do K no sistema solo-planta, identificar modos e épocas de adubação e seleção de genótipos eficientes em relação ao aproveitamento dos nutrientes. Assim, é possível reduzir o impacto do uso de fertilizantes, em benefício do ambiente (JOHNSTON, 2003).

A taxa de absorção de K pelos cereais chega a $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ nos estádios fenológicos de maior demanda (THE POTASH DEVELOPMENT ASSOCIATION, 2005). O milho consome, em média, $4,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ por tonelada de massa fresca, o que equivale a uma quantidade de 175 kg ha^{-1} de K_2O para uma colheita de 40 Mg ha^{-1} de massa fresca. O consumo de K varia de acordo com os rendimentos. Quanto mais produz maior será a demanda de K pela cultura (THE POTASH DEVELOPMENT ASSOCIATION, 2008).

Embora o consumo de N seja superior ao K na maioria das culturas, durante os períodos de máximo crescimento, o milho contém mais K do que N. Uma produção de $9,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ consome 132 kg ha^{-1} de K, dessa quantia apenas 42 kg ha^{-1} é exportado pelos grãos, o restante fica na palha do milho (90 kg ha^{-1}), uma evidência da grande ciclagem desse nutriente no sistema (COELHO, 2005).

Em geral, as plantas apresentam uma demanda inicial elevada de K, acumulando grande parte da quantidade necessária ao seu desenvolvimento nos primeiros 52 dias após a emergência (KARLEN; FLANNERY; SANDER, 1988). O acúmulo máximo de K no milho ocorre na fase vegetativa, com maior taxa nos primeiros 30 a 40 dias. Isso indica uma intensa demanda pelo nutriente na fase inicial do milho (COELHO et al., 2005; VON PINHO et al., 2009). Não foram encontrados relatos de absorção de K nos estádios finais (VASCONCELLOS et al., 1983).

A ausência de participação do K nos componentes estruturais aumenta o seu potencial de ciclagem, principalmente nos sistemas em que resíduos são adicionados continuamente (ROSOLEM et al., 2007). Considera-se que mais de 80% do K contido nos resíduos vegetais sejam liberados em menos de 30 dias, e assim tanto o K reciclado quanto àquele do fertilizante ainda no solo estão sujeitos à lixiviação (MIELNICZUK, 2005). O conhecimento da quantidade de K proveniente do fertilizante é essencial para a compreensão da dinâmica desse nutriente. Nesse contexto, a época e o modo de aplicação dos fertilizantes potássicos influenciam a eficiência de uso do nutriente (COSTA et al., 2009; WHITE, 2013).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Instalação do Experimento

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação do departamento de produção vegetal da USP/ESALQ, em Piracicaba-SP. Os vasos foram preenchidos com areia lavada, cujos resultados obtidos pelas análises físico-químicas estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados das análises físico-químicas da areia utilizada no experimento

pH	P	S-SO ₄	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC
CaCl ₂	-----mg dm ⁻³ -----					mmol _c dm ⁻³ -----			
5,6	14	12	0,13	6	3	2	8	9	17
B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Silte	Argila	V	m
-----mg.dm ⁻³ -----					-----g kg ⁻¹ -----			-----%-----	
0,1	<0,4	18	24,4	1,1	938	12	50	53	18

Fósforo (P) quantificado por colorimetria, extraído por resina trocadora de íons; pH em CaCl₂; potássio (K) em espectrofotômetro de emissão atômica, extraído por resina trocadora de íons; Cálcio (Ca) e magnésio (Mg) determinados em espectrofotômetro de absorção atômica, extraído por resina trocadora de íons; alumínio trocável (Al) por colorimetria, extraído com cloreto de potássio; acidez potencial (H+Al) pelo método SMP; enxofre (S-SO₄) por turbidimetria com fosfato de cálcio; Boro (B) extração com água quente e determinação por colorimetria; cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe) extração com DTPA e determinação por espectrofotometria de absorção atômica; SB: soma de bases trocáveis; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação da CTC por bases; m: saturação por alumínio; areia, silte e argila determinados por densímetro

A escolha da areia como substrato foi definida por apresentar um baixo estoque de nutrientes, especialmente de K, objeto deste estudo. Ressalte-se que o nível de K obtido na análise é muito baixo, portanto não prejudicará as relações que serão estabelecidas entre K e Rb, conforme os tratamentos (Tabela 3).

Para a correção nutricional do substrato, as quantidades de nutrientes foram utilizadas com base na recomendação de Malavolta (1980) e Novais et. al. (1991) para experimentos em vaso com terra: N = 100-300; P = 200-300; K = 150-200; Ca = 200; Mg = 50; S = 40-50; B = 0,5-0,8; Cu = 1,3-1,5; Fe = 2-5; Mn = 3-4; Mo = 0,10-0,15 e Zn = 4-5; em mg dm⁻³. De acordo com testes preliminares optou-se pela aplicação inicial de 100 mg dm⁻³ de N; 150 mg dm⁻³ P; 200 mg dm⁻³ de Ca; 50 mg dm⁻³ de Mg; e 40 mg dm⁻³ de S. As doses de micronutrientes foram: 0,8 mg dm⁻³ de B; 1,3 mg dm⁻³ de Cu; 2 mg dm⁻³ de Fe; 3 mg dm⁻³ de Mn; 0,15 mg dm⁻³ de Mo; 4 mg dm⁻³ de Zn.

Os fertilizantes utilizados foram aplicados diluídos ou incorporados ao substrato (Tabela 2). As fontes de Ca, Mg e S (CaCO₃, MgCO₃ e CaSO₄) foram adicionadas e homogeneizadas com o substrato; as fontes de macronutrientes (exceto potássio) e de micronutrientes (exceto Fe-EDTA) foram diluídas em soluções distintas e aplicadas superficialmente por bloco.

Tabela 2 – Nutrientes, doses, fontes e teor de nutrientes e épocas de aplicação para o milho

Nutriente	Quantidade (mg dm ⁻³)	Fonte e % de nutriente	Épocas de aplicação
N	150	Uréia (45); MAP (11)	Implantação e cobertura*
P	100	MAP (60)	Implantação
Ca	200	CaCO ₃ (40); Sulfato de Cálcio (24)	Implantação
Mg	50	MgCO ₃ (28,8)	Implantação
S	50	Sulfato de Cálcio (18,6)	Implantação
B	0,8	Ácido bórico (17,4)	Implantação e cobertura**
Cu	1,3	Sulfato de Cobre (25,4)	Implantação e cobertura**
Fe	2	Fe-EDTA (20)	Implantação e cobertura**
Mn	3	Sulfato de Manganês (32,5)	Implantação e cobertura**
Zn	2	Sulfato de Zinco (22,7)	Implantação e cobertura**
Co	0,1	Cloreto de Cobalto (24,7)	Implantação e cobertura**
Mo	0,15	Ácido Molíbdico (59,2)	Implantação e cobertura**

* 100 mg dm⁻³ aplicados na implantação e 50 mg dm⁻³ em cobertura no estágio V4 (20 DAE)

** Quantidades aplicadas na implantação e em cobertura (10 DAE)

Para verificação do objetivo estudou-se dois métodos, da substituição de K por Rb e da adição de Rb. No método da substituição foram utilizados os seguintes tratamentos: sem Rb, 10%, 20%, 40%, 50%, 70%, 85% e 100% de Rb; no método da adição utilizou os seguintes tratamentos: sem Rb, 10%, 20%, 40%, 50%, 70%, 85% e 100% de Rb adicionado ao total aplicado de K (150 mg dm⁻³) (Tabela 3). As fontes utilizadas foram o cloreto de potássio (KCl) e o cloreto de rubídio (RbCl), para não variar o íon acompanhante (Cl⁻). Os tratamentos foram diluídos e aplicados superficialmente e individualmente em cada unidade experimental antes da semeadura do milho.

Tabela 3 – Relação das porcentagens e em mg dm⁻³ de substituição e adição entre K e Rb dos tratamentos

Métodos	Tratamentos	K	Rb	Relação	K	Rb
		%	%	K/Rb	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
Substituição de K por Rb	1	0	100	0/100	0	150
	2	15	85	15/85	22,5	127,5
	3	30	70	30/70	45	105
	4	50	50	50/50	75	75
	5	60	40	60/40	90	60
	6	80	20	80/20	120	30
	7	90	10	90/10	135	15
	8	100	0	100/0	150	0
Adição de Rb	9	100	10	100/10	150	15
	10	100	20	100/20	150	30
	11	100	40	100/40	150	60
	12	100	50	100/50	150	75
	13	100	70	100/70	150	105
	14	100	85	100/85	150	127,5
	15	100	100	100/100	150	150
	16	100	0	100/0	150	0

A semeadura do híbrido de milho DKB 390 VT PRO™2 foi realizada no dia 12 de novembro de 2013. Cada unidade experimental foi composta por um vaso de 9 L, com 4 plantas. Os vasos foram dispostos ao acaso sobre as bancadas, em delineamento de blocos ao

acaso, com quatro repetições. O milho foi conduzido até o estágio V8, aproximadamente 30 dias de desenvolvimento (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 2001), quando se dá a máxima absorção de nutrientes, com a planta tendo absorvido a maior quantidade de nutrientes necessária para completar o ciclo (VON PINHO et al., 2009).

Para evitar a drenagem e a lixiviação de nutrientes das unidades experimentais, utilizaram-se sacos plásticos, colocados dentro dos vasos, nos quais foi adicionado o substrato. A irrigação das plantas foi realizada diariamente com o auxílio de uma balança eletrônica, a fim de manter 70% da capacidade de retenção de água. Utilizou-se água deionizada para não alterar a composição química do substrato.

4.2 Avaliações

Para a verificação dos objetivos foram realizadas avaliações de altura de planta e diâmetro do colmo aos 5 e 30 dias após a emergência (DAE). A altura das plantas corresponde à medida feita a partir do nível do substrato até a última folha totalmente expandida. O diâmetro do colmo foi aferido com o auxílio de um paquímetro digital a 2 cm do nível do substrato.

O teor relativo de clorofila nas folhas foi estimado por meio de leituras feitas com Chlorophyll Meter SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development) aos 30 DAE. Esse método avalia quantitativamente a cor verde da folha, ao medir as transmissões de luz a 650nm e a 940 nm, faixas que possuem comportamento distinto em relação à absorção de luz pela molécula de clorofila. A partir desses dois valores, o equipamento calcula o índice SPAD, que se correlaciona ao teor de clorofila contida na folha (GIL; CECOM; FERREIRA, 2002; ZOTARELLI et al., 2003; MAGALHÃES et al., 2009). As leituras foram realizadas na última folha completamente expandida, em pontos situados no terço médio da folha a partir da base e a 2 cm de uma das margens da folha.

Os parâmetros fotossintéticos foram avaliados mediante uso de um sistema portátil de trocas gasosas IRGA LI 6400 (Portable Photosynthesis System LICOR, Nebraska, USA). As medidas foram feitas na última folha completamente expandida, com a aplicação de $1.600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de radiação fotossinteticamente ativa, para obter a taxa fotossintética (TF, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração interna de carbono (CC, $\mu\text{mol mol}^{-1}$), transpiração (TR, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e condutância estomática (CE, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Ao término do experimento coletaram-se todas as folhas para a determinação da área foliar (AF) pelo equipamento Licor modelo LI-3100. As raízes foram separadas e lavadas a fim de eliminar os resíduos de substrato. Após tais procedimentos, a parte aérea e as raízes

foram submetidas à secagem em estufa com circulação de ar a 65° C por 72 horas, com a finalidade de determinar a massa seca da parte aérea (MSPA) e a massa seca de raízes (MSRA).

As amostras da parte aérea e das raízes foram moídas em moinho de facas tipo Wiley, e utilizadas para determinar os teores de nutrientes. Os macronutrientes P, S, K, Ca e Mg e os micronutrientes Mn, Fe, Cu e Zn foram determinados por meio da técnica de análise por fluorescência de raios-X, com um espectrômetro de raios-X de energia dispersiva (EDX-RF, Shimadzu, São Paulo), de acordo com metodologia descrita por Tezotto (2010). O nitrogênio total (N total) foi determinado por meio da digestão sulfúrica pelo método micro-kjeldahl.

A quantificação da abundância de Rb na parte aérea e raiz também foi obtida pelo método de fluorescência de Raio-X (EDX-RF, Shimadzu, São Paulo) (TEZOTTO, 2013). A calibração do equipamento para a leitura de Rb foi feita por ajuste de curva de calibração composta por doses de Rb adicionadas a amostras de plantas de milho, o que resultou em uma equação de intensidade de emissão e concentração do elemento no tecido vegetal (LAGO, 2014).

A partir dos valores obtidos para altura e diâmetro aos 5 DAE e 30 DAE determinou-se a taxa de crescimento em altura (TXCALT, cm dia⁻¹), pela expressão a seguir:

$$TXCALT = \Delta A / \Delta t$$

em que, ΔA (cm) corresponde à diferença de altura entre o intervalo de avaliação, e Δt (dias) refere-se ao intervalo de tempo entre as avaliações. Com base nesse método calculou-se a taxa de crescimento do diâmetro das plantas (TXCDIA, mm dia⁻¹), obtida pela diferença entre as avaliações do diâmetro (ΔD , mm) aos 5 DAE e 30 DAE, divididas pelo tempo entre as medições (Δt , dias).

$$TXCDIA = \Delta D / \Delta t$$

A eficiência de recuperação do K e do Rb foi calculada pela relação entre o acúmulo total (A_c , g) do elemento na parte aérea e a quantidade de cada elemento fornecida, de acordo com a expressão a seguir:

$$A_c = \frac{\text{Teor na Parte Aérea} \times MSPA}{1000}$$

O teor dos elementos na parte aérea foi expresso em g kg^{-1} e a massa seca da parte aérea em g/vaso . A partir do valor obtido calculou-se a eficiência de recuperação dos elementos, conforme apresentado a seguir:

$$Ef = \frac{Ac}{Qa} \times 100$$

A eficiência de recuperação foi obtida pela razão entre o acúmulo do elemento na parte aérea (Ac , g) e a quantidade total do elemento aplicado por vaso (Qa , g). O quociente multiplicado por 100 fornece o resultado de Ef em %.

4.3 Análise estatística

Os resultados foram analisados com auxílio do software estatístico SAS® (SAS INSTITUTE, 2009). A normalidade dos dados da análise de variância (ANOVA) foi verificada mediante teste Shapiro-Wilk, a homogeneidade de variância e as transformações necessárias realizaram-se pelo teste Box-Cox. O teste F ($P < 0,05$) foi utilizado para verificar a significância das variáveis analisadas separadamente (substituição de K por Rb e adição de Rb). A análise de regressão foi utilizada para o ajuste de modelos polinomiais entre as variáveis dependentes em função da quantidade de Rb usada na substituição de K por Rb ou em função da quantidade de Rb adicionada a uma quantidade fixa de K ($P < 0,05$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados

A substituição do K pelo Rb prejudicou o desenvolvimento do milho, sem haver dano à planta na adição de Rb

A substituição de Rb por K reduziu a taxa de crescimento em altura (TXCALT) e a taxa de crescimento do diâmetro (TXCDIA) do milho. A máxima substituição do K pelo Rb na planta limitou seu desenvolvimento até 15 DAE. Após esse período, as plantas iniciaram a senescência e morreram (Figura 1). As plantas que não receberam K praticamente não se desenvolveram, e o pouco que se deu pode ser atribuído às reservas contidas na semente, em virtude da essencialidade do nutriente (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Esta constatação comprova que o rubídio não realiza todas as funções do K (MARSCHNER, 1995). Os sintomas de clorose e desenvolvimento restrito podem estar relacionados à toxidez de Rb, pelo excesso do elemento associado à ausência de K (VALDEZ-AGUILAR; REED, 2008).

Figura 1– Planta de milho aos 15DAE submetidas aos tratamentos de 100% (A) de substituição de K por Rb (T1B3) e 85 % (B) de substituição de K por Rb (T2B3) comparados com a testemunha, sem substituição de K e sem adição de Rb (T16B3)

A substituição de K por rubídio reduziu a TXCALT, com ajuste quadrático pela análise de regressão (Figura 2). A máxima taxa de crescimento em altura foi $1,82 \text{ cm dia}^{-1}$ obtida com a adição de $52,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Rb, que equivale a uma substituição de 35% do total de K aplicado. Quando adicionou o equivalente a $52,5 \text{ mg dm}^{-3}$ determinou-se, por ajuste polinomial quadrático da curva do teor de Rb, $1,4 \text{ g kg}^{-1}$ de Rb na parte aérea.

A adição de Rb não alterou a TXCALT, em que a média entre os tratamentos foi $1,71 \text{ cm dia}^{-1}$ (Figura 2). O teor de Rb na parte aérea apresentou comportamento linear. O máximo de Rb na parte aérea foi $8,9 \text{ g kg}^{-1}$, o qual não influenciou a TXCALT das plantas na adição à

quantidade fixa de K. Esses valores indicaram que a adição da mesma quantidade de Rb e K não alterou a taxa de crescimento em altura do milho.

Figura 2 – Taxa de crescimento em altura do milho (TXCALT, cm dia⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

A taxa de crescimento do diâmetro do milho (TXCDIA) apresentou o mesmo comportamento da TXCALT. O teste F foi significativo ($P < 0,01$) para a substituição de K por Rb e não significativo para adição de Rb (Figura 3). O ponto máximo (PM) da curva de regressão dos tratamentos de substituição foi 15 mg dm⁻³ de Rb, que corresponde a 10 % de substituição. Essa substituição atinge o máximo da função (MF) de 0,48 mm dia⁻¹ que é o valor máximo obtido para a TXCDIA. O MF da substituição é semelhante ao valor obtido entre os tratamentos de adição de Rb, entretanto na substituição de 10% o teor de Rb na parte aérea do milho foi 0,3 g kg⁻¹ e na adição chegou a 8,9 g kg⁻¹ sem interferir na TXCDIA.

Figura 3 – Taxa de crescimento do diâmetro do milho (TXCDIA, mm dia⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

O resultado da área foliar (AF) do milho foi prejudicado pela substituição de K por Rb, mas não alterou para a adição de Rb (Figura 4). Esse resultado está diretamente relacionado à TXCALT e a TXCDIA que também apresentaram esse comportamento. As plantas que apresentaram as menores taxas de crescimento em altura e diâmetro foram, consequentemente, as que tinham os menores valores de AF.

Figura 4 – Área foliar total do milho (AF, cm²/vaso) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

A regressão polinomial quadrática da área foliar na substituição de K por Rb apresentou valor máximo de 12.003,94 cm²/vaso na adição de 39,76 mg dm⁻³ de Rb

(substituição de 26,5%). O teor de Rb na parte aérea para essa condição foi $0,434 \text{ g kg}^{-1}$. Na adição, a média dos valores de AF foi de $11.087,45 \text{ g kg}^{-1}$, mas o teor de Rb na parte aérea pode chegar a $8,9 \text{ g kg}^{-1}$ na adição de 150 mg dm^{-3} (100%).

Em relação à massa seca da parte aérea das plantas (MSPA) a análise de variância foi significativa ($P < 0,01$) para a substituição de K por Rb (Figura 5). Pelo ajuste feito pela regressão polinomial de segundo grau ($R^2 = 0,9811^{**}$) obteve-se o máximo de $87,59 \text{ g/vaso}$ de MSPA na adição de $32,51 \text{ mg dm}^{-3}$ de Rb (substituição de 21,6% de K por Rb), e o teor de Rb foi $0,156 \text{ g kg}^{-1}$ na parte aérea.

O acréscimo de Rb não influenciou a quantidade de matéria seca produzida. A média entre os tratamentos do acréscimo de Rb foi $82,39 \text{ g/vaso}$. O teor de Rb na parte aérea do milho aumentou à medida que aumenta o fornecimento do elemento.

Figura 5 – Massa seca da parte aérea do milho (MSPA, g/vaso) e teor de Rb na parte aérea (g kg^{-1}), em função das quantidades de Rb (mg dm^{-3}) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

A massa seca de raízes (MSRA) apresentou o mesmo comportamento da MSPA. O teste F foi significativo ($P < 0,01$) para a substituição de K por Rb, com ajuste quadrático e maior MSRA na adição de $23,18 \text{ mg dm}^{-3}$ Rb substituído pelo K (substituição de 15,4%) que obteve o MF de $24,41 \text{ g/vaso}$ MSRA, com $0,37 \text{ g kg}^{-1}$ de Rb na raiz (Figura 6). Entretanto, na adição de Rb, os resultados de MSRA não foram significativos, com média de $21,23 \text{ g/vaso}$ entre os tratamentos. A quantidade máxima de Rb na raiz foi alcançada com o acréscimo de 150 mg dm^{-3} (100%) de Rb, com $3,12 \text{ g kg}^{-1}$ de Rb presente na raiz.

Figura 6 – Massa seca de raízes do milho (MSRA, g/vaso) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

A limitação do desenvolvimento das raízes foi ocasionada pela substituição de K por Rb (Figura 7), assim como nos demais parâmetros apresentados. Valdez-Aguilar e Reed (2008) também verificaram diminuição da matéria seca total, matéria seca das folhas e das raízes quando substituíram o K por Rb no feijoeiro. Este fato comprova o prejuízo causado as culturas sob baixa quantidade de K insuficiente para seu pleno desenvolvimento, e o fato do Rb não ser capaz de substituir o nutriente em todas suas funções.

Figura 7– Raízes de milho aos 30DAE submetidas aos tratamentos de 85% de substituição de K por Rb (T2B4) comparados com a testemunha, sem substituição de K e sem adição de Rb (T16B4)

Ao comparar os teores de Rb na parte aérea e raiz (Figuras 5 e 6), observa-se que os valores encontrados na parte aérea são superiores aos da raiz. Nos tratamentos de substituição de K por Rb o teor máximo de Rb na parte aérea foi 22,33 g kg⁻¹, enquanto na raiz foi 3,04 g kg⁻¹. Da mesma forma, nos tratamentos de adição de Rb, o teor máximo na parte aérea foi

8,9 g kg⁻¹ e na raiz 3,12 g kg⁻¹ de Rb. Em pesquisas realizadas com plântulas de tomate cultivadas em diferentes doses de Rb observou-se redução do crescimento, em razão da substituição de K por Rb. Assim como na presente pesquisa, as concentrações de Rb e K não foram semelhantes nas raízes e partes superiores, o que indica um comportamento distinto entre os cátions (MAYNARD; BAKER, 1965).

A adição de Rb e a substituição de até 85% de K por Rb não alteraram os parâmetros fotossintéticos

A taxa fotossintética do milho (TF, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a concentração interna de carbono (CC, $\mu\text{mol mol}^{-1}$), a transpiração (TR, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a condutância estomática das folhas de milho (CE, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) não foram afetados pela adição de Rb e pela substituição de K por Rb até 85% de substituição.

Os valores médios da taxa fotossintética obtidos pela adição de Rb e pela substituição de K por Rb até 85% foram muito próximos. A TF média dos tratamentos de substituição do K pelo Rb foi $19,29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, próximo ao valor médio verificado na adição de Rb de $19,12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 8).

Figura 8 – Taxa Fotossintética do milho (TF, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Os valores médios da concentração interna de carbono das folhas de milho foram $105,81 \mu\text{mol mol}^{-1}$ até 85% de substituição de K por Rb e $110,2 \mu\text{mol mol}^{-1}$ quando adicionou-se Rb (Figura 9).

Figura 9 – Concentração interna de carbono das folhas de milho (CC, $\mu\text{mol mol}^{-1}$) e teor de Rb na parte aérea (g kg^{-1}), em função das quantidades de Rb (mg dm^{-3}) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

A transpiração foliar apresentou o mesmo valor médio de $4,014 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na adição e na substituição de K por Rb até 85% (Figura 10). O Rb não afetou os valores da taxa de transpiração das plantas. Mesmo quando o desenvolvimento do milho foi prejudicado, os valores de transpiração não diferiram até 85% de substituição de K por Rb.

Figura 10 – Transpiração das folhas de milho (TR, $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e teor de Rb na parte aérea (g kg^{-1}), em função das quantidades de Rb (mg dm^{-3}) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

A condutância estomática também não foi alterada pela adição de Rb ou substituição de K por Rb até 85% de substituição (Figura 11). O valor médio obtido com a adição de Rb

foi $0,175 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, enquanto na substituição de K por Rb foi obtido $0,168 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, valores muito próximos entre si.

Figura 11 – Condutância estomática das folhas de milho (CE, $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e teor de Rb na parte aérea (g kg^{-1}), em função das quantidades de Rb (mg dm^{-3}) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

A capacidade fotossintética é uma característica intrínseca de cada espécie vegetal. De acordo com o ciclo da planta as trocas gasosas se alteram e dependem das variações ambientais diárias como luz e temperatura (LARCHER, 2000). Os valores de TF do milho avaliados por Rodrigues et al. (2012) no estágio V6 em condições de vaso estão entre 25 e 30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, a CC entre 100 e 110 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, a TR entre 4 e 5 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e a CE entre 0,2 e 0,25 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Apesar de esses valores representarem a avaliação feita no estágio V6 do milho, os resultados são muito próximos aos obtidos no presente experimento, em que as avaliações foram realizadas no estágio V8 da cultura.

O SPAD não se correlacionou com o teor de nitrogênio na parte aérea do milho

Os valores obtidos pelo Chlorophyll Meter SPAD-502 geram um índice adimensional que corresponde ao teor do pigmento na folha. Com esse índice é possível estimar a concentração de nitrogênio. Seu uso é indicado para um diagnóstico rápido e não destrutivo. A adição de Rb apresentou comportamento linear decrescente, isto significa que o aumento do teor de Rb na parte aérea diminuiu os valores obtidos com o SPAD (Figura 12).

Figura 12 – Índice SPAD (30 DAE) do milho e teor de Rb na parte aérea (g kg^{-1}), em função das quantidades de Rb (mg dm^{-3}) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

No caso da substituição de K por Rb o modelo de ajuste foi quadrático, cujo PM foi $19,9 \text{ mg dm}^{-3}$, ou seja, 13% de substituição de K por Rb. A leitura SPAD obtida nessa situação foi 43,7. O teor de Rb na parte aérea para uma substituição de 13% foi $0,149 \text{ g kg}^{-1}$ de Rb, enquanto que na adição de 75 g kg^{-1} (50%) de Rb obteve $4,36 \text{ g kg}^{-1}$ de Rb, de acordo com a equação linear ($R^2=0,98^{**}$) dos teores de Rb na parte aérea do milho.

Embora o índice SPAD seja uma ferramenta adequada para indicar o teor de clorofila, a correlação entre esse índice e o teor de N pode ser pouco precisa em alguns estádios de desenvolvimento do milho (ARGENTA et al., 2001). Na substituição, enquanto o teor de N na parte aérea aumentou o índice SPAD diminuiu (Figura 13). Visualmente, as plantas com as menores doses de K e maiores de Rb exibiram um tom verde menos intenso que a testemunha, sem substituição, à semelhança do obtido com o SPAD. Apesar da significância dos valores do índice SPAD na adição de Rb, a variação entre os tratamentos foi pequena e os valores próximos aos encontrados na literatura para o milho (HURTADO et al., 2011; GODOY; BÔAS; GRASSI FILHO, 2003).

Os pontos de máxima dos parâmetros relacionados ao desenvolvimento da planta, da taxa fotossintética e do índice SPAD, concluem que o máximo de substituição aceitável é 10% da quantidade total de K. Quanto maior a substituição, menores foram os valores de TXCDIA, SPAD, MSRA, MSPA, AF e TXCALT, podendo, inclusive, levar à morte da planta (Tabela 4).

Tabela 4 – Análise de variância da taxa de crescimento da altura (TXCALT), taxa de crescimento do diâmetro (TXCDIA), taxa fotossintética (FT), concentração interna de carbono (CC), transpiração (TR), condutância estomática (CE), índice SPAD, área foliar (AF), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raízes (MSRA) e massa seca total (MST) do milho, em função das quantidades de Rb (mg dm^{-3}) utilizadas na substituição de K por Rb

K	Rb	TXCALT	TXCDIA	TF	CC	TR	CE	SPAD	AF	MSPA	MSRA	MST
mg dm^{-3}		cm dia^{-1}	mm dia^{-1}	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol mol}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$		-	cm^2/vaso	-----g/vaso-----		
0	150	-	-	-	-	-	-	-	-	0,62	0,24	0,86
22,5	127,5	0,86	0,30	16,2	122,7	3,8	0,15	36,4	3342,06	18,79	3,62	22,41
45	105	1,67	0,38	20,4	102,2	4,0	0,19	41,9	8648,67	57,48	12,02	69,51
75	75	1,70	0,43	19,3	102,4	4,0	0,14	42,8	10734,71	76,54	21,67	98,21
90	60	1,70	0,46	18,4	103,0	3,7	0,15	41,3	11374,61	84,61	23,23	107,8
120	30	1,56	0,47	18,6	100,9	4,3	0,15	42,8	11236,22	86,80	25,82	112,6
135	15	1,77	0,46	21,2	105,4	3,9	0,19	42,3	11457,38	81,86	21,38	103,2
150	0	1,60	0,49	20,6	103,9	4,1	0,18	44,3	10697,47	82,97	24,32	107,2
Pr>F		<0,001**		0,56 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,007**		<0,001**		
F		9,37	41,29	0,83	0,81	0,49	0,70	6,77	74,42	94,89	101,25	123,2
CV %		13,13	3,90	19,4	15,07	14,3	28,2	4,63	7,06	7,22	10,45	6,60

* e **: Significativos a 5 e 1 %. ^{ns}: não significativo

A adição de Rb não afetou os parâmetros relacionados ao desenvolvimento do milho (Tabela 5). Apenas o índice SPAD foi significativo para a adição de Rb, em que a leitura SPAD diminuiu com o aumento da dose de Rb fornecida às plantas.

Tabela 5 – Análise de variância da taxa de crescimento da altura (TXCALT), taxa de crescimento do diâmetro (TXCDIA), taxa fotossintética (FT), concentração interna de carbono (CC), transpiração (TR), condutância estomática (CE), índice SPAD, área foliar (AF), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raízes (MSRA) e massa seca total (MST) do milho, em função da adição de Rb em uma quantidade fixa de K

K	Rb	TXCALT	TXCDIA	TF	CC	TR	CE	SPAD	AF	MSPA	MSRA	MST
mg dm^{-3}		cm dia^{-1}	mm dia^{-1}	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\mu\text{mol mol}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$		-	cm^2/vaso	-----g/vaso-----		
150	0	1,65	0,51	18,97	101,67	4,15	0,16	43,10	11078,32	86,11	23,15	109,2
150	15	1,73	0,47	19,37	110,00	3,93	0,17	43,8	11322,34	83,31	21,71	105,0
150	30	1,71	0,48	19,61	102,35	3,95	0,16	43,56	10936,69	81,62	21,32	102,9
150	60	1,72	0,48	18,10	111,1	4,25	0,15	43,36	11378,69	82,18	19,66	101,8
150	75	1,70	0,49	17,07	103,85	3,67	0,15	43,08	11358,415	82,42	20,87	103,2
150	105	1,63	0,47	18,64	134,84	3,55	0,20	42,37	11315,745	82,23	22,02	104,2
150	127,5	1,73	0,48	22,17	107,85	4,39	0,20	41,96	10858,195	82,82	20,81	103,6
150	150	1,80	0,44	19,07	110,00	4,20	0,16	40,06	10451,235	78,47	20,31	98,7
Pr>F		0,8223 ^{ns}	0,0676 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,005**	0,053 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,459 ^{ns}
F		0,50	2,28	0,74	1,09	0,87	0,70	6,27	3,73	1,10	0,77	1,00
CV %		8,80	3,91	17,84	17,64	16,05	29,5	2,272	2,48	4,86	11,63	5,72

* e **: Significativos a 5 e 1 %. ^{ns}: não significativo

Os teores de nutrientes na parte aérea variaram diferenciadamente em cada método

O teor de K na parte aérea diminuiu nas condições de substituição de K por Rb, assim como na adição de Rb (Figura 13). A substituição de K por Rb foi significativa para o teste F ($P<0,01$), com ajuste linear da regressão. O aumento da dose de Rb reduziu o teor de K na parte aérea do milho.

Figura 13 – Teor de potássio na parte aérea do milho (K, g kg⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Na adição de Rb, o teor de K na parte aérea apresentou ajuste quadrático. O máximo teor de K na parte aérea do milho foi 10,63 g kg⁻¹ na dose de 50 mg dm⁻³ de Rb, correspondente à adição de 33,3% do elemento. Nessa adição, o teor de Rb na parte aérea foi 2,84 g kg⁻¹, de acordo com a equação ajustada (Figura 13). O decréscimo do teor de K pela adição da maior dose de Rb pode estar relacionado à inibição competitiva entre esses cátions, os quais competem pelo mesmo sítio no transportador (PRADO, 2008).

Os teores de N, P e S na parte aérea do milho foram influenciados pela substituição de K por Rb. O comportamento exponencial quadrático da substituição de K por Rb pode ser explicado pelo efeito negativo do Rb nas plantas. O desenvolvimento reduzido do milho ocasionou acúmulo de nutrientes, o que caracteriza efeito de concentração. Na substituição (Figura 14), o teor de N na parte aérea foi 15,56 g kg⁻¹ na dose de 44,86 mg dm⁻³ de Rb (29,9% de substituição), abaixo da média dos tratamentos com adição de Rb, os quais apresentaram resultados não significativos e teor médio de 18,55 g kg⁻¹ de N.

Figura 14 – Teor de nitrogênio na parte aérea do milho (N, g kg⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

A máxima adição de Rb diminuiu os teores de P e S na parte aérea. O PM da curva ajustada para o P foi 52,5 mg dm⁻³ de Rb (Figura 15), equivalente a adição de 35% de Rb. Nesse ponto, o teor de P na parte aérea foi 2,04 g kg⁻¹ e 2,99 g kg⁻¹ de Rb.

Na substituição de K por Rb, os teores de P na parte aérea sofreram uma pequena diminuição e, posteriormente, aumentaram como evidencia a equação polinomial quadrática ($R^2=0,93^{**}$). O máximo teor de P foi 1,65 g kg⁻¹ na quantidade de 65 mg dm⁻³ de Rb (43,33% de substituição), e corresponde a 2,95 g kg⁻¹ de Rb (Figura 14).

Figura 15 – Teor de fósforo na parte aérea do milho (P, g kg⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

O teor de S na parte aérea também se ajustou a equação polinomial quadrática para a adição de Rb (Figura 16). Nesse caso, o teor máximo de S na parte aérea foi $1,42 \text{ g kg}^{-1}$, obtido na dose de 45 mg dm^{-3} de Rb (30 % de adição) e alcançando um teor de $2,56 \text{ g kg}^{-1}$ de Rb na parte aérea. O contrário se deu com os teores de S durante a substituição de K por Rb. O teor de $1,23 \text{ g kg}^{-1}$ de S nessa situação foi obtido na substituição de $76,66 \text{ mg dm}^{-3}$ de Rb (51,1% de substituição), com a qual obtém $4,94 \text{ g kg}^{-1}$ de Rb.

Figura 16 – Teor de enxofre na parte aérea do milho (S, g kg^{-1}) e teor de Rb na parte aérea (g kg^{-1}), em função das quantidades de Rb (mg dm^{-3}) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

A competição entre os nutrientes K, Ca e Mg pode ser observada pelos resultados obtidos para Ca e Mg na parte aérea do milho. O aumento da quantidade de Rb aplicada nos tratamentos de adição de Rb e na substituição de K por Rb reduziu o teor de Ca e Mg. Como o Rb é um íon monovalente, o mesmo pode ser preferencialmente absorvido em relação ao Ca e Mg, à semelhança do que ocorre do K para com o Ca e Mg (MALAVOLTA, 2006).

Na substituição de K por Rb, os teores de Ca ajustaram a um modelo quadrático ($R^2 = 0,83^{**}$). Houve diminuição do teor de Ca possivelmente pela inibição competitiva entre os cátions (Rb e Ca) e, posteriormente, aumentou o teor de Ca em razão do efeito de concentração, propiciado pelo pequeno desenvolvimento da planta (Figura 17). O PM obtido pela equação foi $79,44 \text{ mg dm}^{-3}$ de Rb (52,9% de substituição), que corresponde a $2,19 \text{ g kg}^{-1}$ de Ca e $5,49 \text{ g kg}^{-1}$ de Rb na parte aérea.

Figura 17 – Teor de cálcio na parte aérea do milho (Ca, g kg⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Nos tratamentos de adição, o teor de Ca e Mg diminuíram com o aumento de Rb. A variação do teor de Ca não foi muito expressiva, entretanto para o Mg, o teor variou de 3,22 g kg⁻¹ nas plantas sem Rb para 2,09 g kg⁻¹ na máxima adição de Rb (Figura 18). A substituição do K por Rb diminuiu os teores de Mg na parte aérea do milho, diferentemente do Ca, os teores de Mg na substituição apresentaram comportamento linear. À medida que aumenta o teor de Rb diminui o teor de Mg na parte aérea do milho.

Figura 18 – Teor de magnésio na parte aérea do milho (Mg, g kg⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Os teores Mn, Fe e Zn na parte aérea do milho foram influenciados pela substituição de K por Rb, porém a adição de Rb não alterou os teores desses nutrientes. Provavelmente esse comportamento está relacionado à baixa disponibilidade de K e as altas concentrações de Rb nas plantas.

O teor de Mn nas plantas pode aumentar e também diminuir em consequência da absorção de outros nutrientes, como o K (FAGERIA, 2001; ROSOLEM et al., 1992). Em arroz há uma ação antagônica do Mn para com o K e o Zn (LIDON, 2000). Na substituição de K por Rb, os teores de Mn na parte aérea do milho tiveram um leve aumento, seguido de um decréscimo e, posteriormente, aumentou novamente, fato que pode estar associado ao baixo desenvolvimento das plantas (Figura 19).

Figura 19 – Teor de manganês na parte aérea do milho (Mn, mg kg⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Os teores de Fe e Zn na parte aérea do milho se ajustaram a equação quadrática pela análise de regressão ($P < 0,01$). O Fe apresentou PM de 48,89 mg dm⁻³, equivalente a 32,5% de substituição de K por Rb, que corresponde a 34,86 mg kg⁻¹ de Fe e 1,06 g kg⁻¹ de Rb (Figura 20). No caso dos tratamentos com adição de Rb, os teores de Fe e Zn na parte aérea do milho não foram modificados.

Figura 20 – Teor de ferro na parte aérea do milho (Fe, mg kg⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Na substituição de K por Rb, o PM obtido pela equação ajustada para teores de Zn foi de 51,36 mg dm⁻³ (34,2% de substituição) de Rb, correspondendo a 16,46 mg kg⁻¹ de Zn e 1,29 g kg⁻¹ de Rb (Figura 21).

Figura 21 – Teor de zinco na parte aérea do milho (Zn, mg kg⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Os teores de Cu na parte aérea não foram afetados pela substituição de K por Rb, até 85% de substituição. Na adição de Rb, os teores de Cu variaram entre 24,9 e 29,2 mg kg⁻¹ com comportamento quadrático, apesar da variação não ser muito alta. O teor máximo foi

atingido na dose de 76,7 mg dm⁻³ de Rb (adição de 51,13%), que equivale a 28,78 mg kg⁻¹ de Cu e 4,36 g kg⁻¹ de Rb (Figura 22).

Figura 22 – Teor de cobre na parte aérea do milho (Cu, mg kg⁻¹) e teor de Rb na parte aérea (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

A substituição de K por Rb alterou os teores dos macro e micronutrientes do milho, com exceção do Cu, que não foi significativo até 85% de substituição (Tabela 6). Os teores mínimos e máximos dos macronutrientes obtidos pela substituição de K por Rb foram entre 3,8 g e 10,1 g kg⁻¹ de K; 16,1 g e 27,3 g kg⁻¹ de N; 1,7 g e 2,52 g kg⁻¹ de P; 1,2 g e 1,55 g kg⁻¹ de S; 2,08 g e 2,76 g kg⁻¹ de Ca e entre 2,56 g e 3,45 de Mg. Para os micronutrientes, os valores encontram-se entre 72,8 mg e 103,2 mg kg⁻¹ de Mn; 34,8 mg e 71,9 mg kg⁻¹ de Fe; 15,4 mg e 28,0 mg kg⁻¹ de Zn e entre 24,5 mg e 26,5 mg kg⁻¹ de Cu.

Tabela 6 – Análise de variância dos teores de macronutrientes (N, Mg, P, S, K, Ca), rubídio e micronutrientes (Mn, Fe, Cu, Zn) da parte aérea do milho, em função das quantidades de Rb utilizadas na substituição de K por Rb

K	Rb	K	N	P	S	Ca	Mg	Rb	Mn	Fe	Zn	Cu
-----mg dm ⁻³ -----												
0	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22,5	127,5	3,80	27,3	2,52	1,41	2,40	2,78	22,3	103,2	71,9	28,0	26,5
45	105	4,53	19,6	2,15	1,25	2,24	2,56	8,83	77,1	39,6	18,2	25,6
75	75	5,73	17,5	1,77	1,20	2,28	2,95	4,63	78,1	38,7	17,1	25,7
90	60	6,25	16,4	1,70	1,21	2,08	2,84	3,23	72,8	34,8	15,4	22,8
120	30	8,53	17,3	1,95	1,50	2,54	3,24	1,79	93,4	44,6	20,0	28,7
135	15	9,41	16,1	1,90	1,42	2,50	3,11	0,69	84,6	42,2	20,3	25,6
150	0	10,1	18,0	2,02	1,55	2,76	3,45	0,003	85,8	40,6	18,7	24,5
Pr>F		<0,001**	<0,001**	<0,001**	0,004**	0,001**	0,04*	<0,001**	0,04*	0,001**	0,001**	0,22 ^{ns}
F		206,16	7,88	12,28	4,79	5,93	2,74	314,49	2,74	9,17	5,81	1,54
CV %		5,99	14,17	7,81	10,33	9,14	12,04	17,43	12,87	17,24	17,66	7,06

* e **: Significativos a 5 e 1 %

A adição de Rb no milho alterou os teores de macronutrientes na parte aérea, mas não influenciou o teor de micronutrientes, com exceção do Cu, que variou entre 24,9 mg e 29,7 mg kg⁻¹ (Tabela 7). Os teores de K da parte aérea em função da adição de Rb variaram entre 9,95 g e 10,77 g kg⁻¹; N entre 15,3 g e 21,6 g kg⁻¹; P entre 1,7 g e 2,22 g kg⁻¹; S entre 1,2 g e 1,47 g kg⁻¹; Ca entre 2,05 g e 2,66 g kg⁻¹ e o de Mg entre 2,09 g e 3,22 g kg⁻¹.

Tabela 7 – Análise de variância dos teores de macronutrientes (N, Mg, P, S, K, Ca), rubídio e micronutrientes (Mn, Fe, Cu, Zn) da parte aérea do milho, em função da adição de Rb em uma quantidade fixa de K

K	Rb	K	N	P	S	Ca	Mg	Rb	Mn	Fe	Zn	Cu
--mg dm ⁻³ --		--g kg ⁻¹ --							--mg kg ⁻¹ --			
150	0	9,95	21,4	1,92	1,40	2,52	3,22	0,01	88,2	44,5	22,0	26,2
150	15	10,05	18,5	1,82	1,35	2,41	2,99	0,70	80,1	40,2	19,9	24,9
150	30	11,36	15,3	2,22	1,47	2,66	3,31	1,85	90,2	46,4	23,0	29,2
150	60	10,77	16,5	2,20	1,40	2,47	2,97	3,59	83,5	45,0	21,4	29,7
150	75	10,37	16,9	1,92	1,40	2,25	2,45	4,30	80,8	47,4	20,1	27,9
150	105	9,86	18,6	1,77	1,37	2,26	2,51	5,49	75,3	43,1	19,6	27,1
150	127,5	9,64	19,4	1,75	1,26	2,11	2,15	7,04	75,4	45,0	19,2	27,4
150	150	9,12	21,6	1,70	1,20	2,05	2,09	8,90	73,9	40,2	17,7	25,8
Pr>F		<0,001**	0,34 ^{ns}	0,004**	0,005**	<0,001**	<0,001**	<0,001**	0,13 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,003**
F		10,99	1,20	6398	4,16	12,28	14,19	222,36	1,8	1,82	1,83	4,58
CV %		4,11	22,71	6,89	6,25	5,1	9,26	15,46	2,49	7,96	4,1	5,63

* e **: Significativos a 5 e 1 %. ^{ns}: não significativo

A substituição de K por Rb prejudicou o crescimento das plantas, principalmente nas maiores substituições, em virtude da essencialidade do K para o desenvolvimento do milho. Os teores de N, P, S, Ca, Mn, Fe e Zn na parte aérea do milho reduziram em função da substituição de K por Rb e, posteriormente, aumentou por efeito de concentração de nutrientes.

Fatores externos e internos que interferem na taxa de crescimento e na absorção de nutrientes proporcionam mudanças no desenvolvimento das plantas, o que promove diferentes concentrações dos nutrientes nos tecidos vegetais. Em casos de paralização ou redução do crescimento da planta, a absorção dos nutrientes continua, e o resultado é a concentração dos elementos ou efeito de concentração (PRADO, 2008).

Os teores de nutrientes nas raízes variaram diferenciadamente em cada método

Nas raízes, os teores de K assim como os de Rb foram menores que os teores verificados na parte aérea. O acréscimo de Rb não alterou o teor de K nas raízes do milho, entretanto na substituição o teor decresceu conforme o esperado, pois o fornecimento de K foi menor na medida em que aumentou a quantidade de Rb aplicada (Figura 23).

Figura 23 – Teor de potássio na raiz do milho (K, g kg⁻¹) e teor de Rb na raiz (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Diferentemente do que ocorreu na parte aérea do milho, os teores de Rb nas raízes foram semelhantes tanto na adição de Rb quanto na substituição de K por Rb. O comportamento linear nas duas situações fez com que o teor de Rb aumentasse com o aumento da dose de Rb fornecida ao milho, com máximo de 3,04 g e 3,12 g kg⁻¹ na substituição e na adição de Rb, respectivamente.

O teor de N nas raízes do milho permaneceu estável com a adição de Rb, com valor médio de 14,69 g kg⁻¹. Na substituição de K por Rb, o teor de N nas raízes apresentou ajuste quadrático, com PM igual a 44,9 mg dm⁻³ de Rb (substituição de 29,9%), que corresponde a 12,36 g kg⁻¹ de N e 0,9 g kg⁻¹ de Rb na raiz (Figura 24). O teor de N na raiz e na parte aérea do milho foi semelhante. Na substituição de K por Rb o PM de N na parte aérea foi 44,86 e 44,9 g kg⁻¹ na raiz.

Figura 24 – Teor de nitrogênio na raiz do milho (N, g kg⁻¹) e teor de Rb na raiz (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

O modelo de ajuste do teor de P nas raízes foi o mesmo ao da parte aérea. Na substituição de K por Rb o teor de P nas raízes diminuiu e, posteriormente, aumentou, com ajuste quadrático pela regressão ($P < 0,01$). O PM foi 25,75 mg dm⁻³ de Rb (substituição de 17%), equivale a 1,3 g kg⁻¹ de P e 0,42 g kg⁻¹ de Rb nas raízes, com base nas equações estabelecidas para cada elemento (Figura 25).

Figura 25 – Teor de fósforo na raiz do milho (P, g kg⁻¹) e teor de Rb na raiz (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Na adição de Rb o teor de P nas raízes variou menos, mas significativamente. O PM da curva ajustada para os teores de P na raiz em decorrência da adição de Rb foi 82 mg dm^{-3} de Rb (54,6% de adição). Nesse ponto o teor de P foi $1,49 \text{ g kg}^{-1}$ e o de Rb $1,66 \text{ g kg}^{-1}$.

Observou-se ajuste quadrático para S na raiz pela adição de Rb, o mesmo observado na parte aérea do milho (Figura 26). O PM obtido foi $80,12 \text{ mg dm}^{-3}$ de Rb adicionado (adição de 53,4%), que corresponde a $8,07 \text{ g kg}^{-1}$ de S e $1,74 \text{ g kg}^{-1}$ de Rb nas raízes.

Figura 26 – Teor de enxofre na raiz do milho (S, g kg^{-1}) e teor de Rb na raiz (g kg^{-1}), em função das quantidades de Rb (mg dm^{-3}) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Na substituição de K por Rb, contrariamente ao acontecido na parte aérea, o teor de S também variou conforme modelo quadrático, em que após um pequeno aumento seguiu uma diminuição do teor. O teor máximo de S foi $7,93 \text{ g kg}^{-1}$ (substituição de 30% ou 45 mg dm^{-3} de Rb), equivalente a $0,9 \text{ g kg}^{-1}$ de Rb nas raízes.

O teor de Ca na raiz não alterou com a substituição do K pelo Rb até 85% de substituição (Figura 27). No entanto, na adição, o Rb diminuiu o teor de Ca radicular. Com base no ajuste quadrático, o máximo teor de Ca ($4,83 \text{ g kg}^{-1}$) ocorre com a dose de 77 mg dm^{-3} de Rb (51,3% de acréscimo), superior à média dos tratamentos de substituição que foi $3,87 \text{ g kg}^{-1}$ de Ca. Na dose de 77 mg dm^{-3} de Rb o teor de Rb na raiz foi $1,67 \text{ g kg}^{-1}$.

Figura 27 – Teor de cálcio na raiz do milho (Ca, g kg⁻¹) e teor de Rb na raiz (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

O Rb assim como K prejudicou o Mg nas raízes do milho (Figura 28), como ocorrido na parte aérea. O ajuste quadrático para os teores de Mg na adição de Rb apresentou máximo teor de Mg (5,04 g kg⁻¹) quando adicionou-se 94,5 mg dm⁻³ de Rb (adição de 63%). Na mesma dose de Rb foi obtido 2,04 g kg⁻¹ de Rb na raiz.

Figura 28 – Teor de magnésio na raiz do milho (Mg, g kg⁻¹) e teor de Rb na raiz (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

O máximo teor de Mg na substituição de K por Rb foi $4,43 \text{ g kg}^{-1}$, que se deu com a dose 41 mg dm^{-3} de Rb (substituição de 27,3%). Nesta dose o teor de Rb foi $0,8 \text{ g kg}^{-1}$, inferior ao obtido com a adição de Rb.

As quantidades de Rb presentes nas raízes do milho pouco influenciaram os teores de micronutrientes. A substituição de K por Rb e a adição de Rb não alterou o teor de Mn até 85% de substituição (Figura 29), cujas médias foram $234,34 \text{ mg kg}^{-1}$ na substituição e $243,75 \text{ mg kg}^{-1}$ na adição.

Figura 29 – Teor de manganês na raiz do milho (Mn , mg kg^{-1}) e teor de Rb na raiz (g kg^{-1}), em função das quantidades de Rb (mg dm^{-3}) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

O teor de Fe nas raízes de milho foi contrário ao teor na parte aérea. A substituição de K por Rb não modificou os teores de Fe, até 85% de substituição (Figura 30). Entretanto na adição o teor de Fe ajustou-se ao modelo quadrático, em que o máximo teor deste micronutriente foi $651,88 \text{ mg kg}^{-1}$ para a dose de $110,6 \text{ mg dm}^{-3}$ de Rb (73,7% de adição). Na mesma dose de Rb o teor deste elemento foi $2,38 \text{ g kg}^{-1}$.

Figura 30 – Teor ferro na raiz do milho (Fe, mg kg⁻¹) e teor de Rb na raiz (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Os teores de Zn na raiz diferiram dos teores na parte aérea do milho (Figura 31). O Zn radicular apresentou um modelo quadrático em relação ao acréscimo de Rb. O máximo teor de Zn 46,12 mg kg⁻¹ obteve-se com a dose de 68,63 mg dm⁻³ de Rb (45,7% de adição), para a qual o teor de Rb nas raízes foi 1,5 g kg⁻¹.

Figura 31 – Teor zinco na raiz do milho (Zn, mg kg⁻¹) e teor de Rb na raiz (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Na substituição os teores diminuíram e posteriormente aumentaram, em decorrência ao efeito de concentração, após o teor de 38,76 mg kg⁻¹ de Zn, obtido na adição de 35,96 mg dm⁻³ de Rb (23,9% de substituição) e corresponde a 0,68 g kg⁻¹ de Rb.

Os teores de Cu na raiz não foram influenciados pela adição de Rb ou pela substituição de K por Rb até 85% de substituição, com teores médios de 55,29 mg kg⁻¹ na substituição e 55,04 mg kg⁻¹ na adição de Rb (Figura 32).

Figura 32 – Teor cobre na raiz do milho (Cu, mg kg⁻¹) e teor de Rb na raiz (g kg⁻¹), em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

Os teores de macronutrientes nas raízes de milho foram influenciados pela substituição de K por Rb. O K variou entre 0,91 g e 2,67 g kg⁻¹; N entre 12,8 g e 20,6 g kg⁻¹; P entre 1,27 g e 2,97 g kg⁻¹; S entre 3,72 g e 8,8 g kg⁻¹; Ca entre 3 g e 4,45 g kg⁻¹ e o Mg entre 1,33 g e 4,57 g kg⁻¹. Os micronutrientes não apresentaram variações significativas, exceto o Zn, em que os teores variaram entre 41,3 mg e 85,3 mg kg⁻¹ nas raízes de milho (Tabela 8).

Tabela 8 – Análise de variância dos teores de macronutrientes (N, Mg, P, S, K, Ca), rubídio e micronutrientes (Mn, Fe, Cu, Zn) da raiz do milho, em função das quantidades de Rb utilizadas na substituição de K por Rb

K	Rb	K	N	P	S	Ca	Mg	Rb	Mn	Fe	Zn	Cu
-mg dm ⁻³		g kg ⁻¹							-mg kg ⁻¹			
0	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22,5	127,5	0,91	20,6	2,97	3,72	3,12	1,33	3,04	281,7	587,5	85,3	59,6
45	105	1,45	15,4	2,00	4,62	3,00	1,42	2,84	222,5	824,5	55,6	52,7
75	75	1,78	13,4	1,52	8,07	4,34	4,28	1,55	231,9	699,0	43,9	56,8
90	60	1,78	11,9	1,52	8,48	4,45	4,57	0,85	250,6	588,5	44,8	55,2
120	30	2,01	13,8	1,30	6,98	3,86	4,01	0,48	193,4	672,6	41,5	51,1
135	15	2,54	14,7	1,50	6,89	4,34	4,03	0,24	205,7	678,6	43,8	59,8
150	0	2,67	12,8	1,27	7,05	3,97	3,89	0,002	254,4	887,0	41,3	51,4
Pr>F		<0,001**	0,002*	<0,001**	<0,001**	0,1 ^{ns}	<0,001**	<0,001**	0,66 ^{ns}	0,75 ^{ns}	0,003*	0,17 ^{ns}
F		21,52	8,27	14,84	15,03	2,11	22,1	99,23	0,68	0,56	5,08	1,72
CV %		12,45	13,6	21,37	13,77	33,83	17,37	32,25	5	24,21	5,88	17,79

* e **: Significativos a 5 e 1 %. ^{ns}: não significativo

Os teores de K e N nas raízes de milho não foram alterados pela adição de Rb. O P variou entre 1,1 g e 1,5 g kg⁻¹; S entre 5,48 g e 8,12 g kg⁻¹; Ca entre 3,53 g e 5,09 g kg⁻¹ e o Mg entre 3,37 g e 5,05 g kg⁻¹. Os teores de micronutrientes variaram entre 35,3 mg e 49,1 mg

kg⁻¹ de Zn e 582 mg a 1.022,7 mg kg⁻¹ para o Fe. Os teores de Mn e Cu nas raízes de milho não modificaram para a adição de Rb (Tabela 9).

Tabela 9 – Análise de variância dos teores de macronutrientes (N, Mg, P, S, K, Ca), rubídio e micronutrientes (Mn, Fe, Cu, Zn) da raiz do milho, em função da adição de Rb em uma quantidade fixa de K

K	Rb	K	N	P	S	Ca	Mg	Rb	Mn	Fe	Zn	Cu
--mg dm ⁻³ --		-----g kg ⁻¹ -----							-----mg kg ⁻¹ -----			
150	0	2,10	16,0	1,1	5,64	3,64	3,37	0,006	239,50	1022,7	40,7	56,19
150	15	2,36	11,1	1,2	5,48	3,63	3,25	0,22	193,88	960,8	36,1	53,06
150	30	2,68	12,1	1,5	8,12	4,83	4,82	0,57	254,54	640,4	49,1	60,17
150	60	2,64	13,2	1,4	7,89	5,09	4,51	1,18	260,31	712,5	45,8	56,80
150	75	2,49	14,8	1,4	8,17	4,44	5,05	1,48	289,92	748,9	44,7	54,65
150	105	2,45	13,1	1,3	7,41	4,25	4,30	2,03	231,02	746,4	42,9	53,90
150	127,5	2,92	15,3	1,5	7,84	3,96	5,24	2,68	266,53	582,0	43,1	55,89
150	150	2,53	14,1	1,2	6,43	3,53	3,88	3,12	214,28	696,4	35,3	55,77
Pr>F		0,50 ^{ns}	0,019 ^{ns}	0,027*	0,003**	<0,001**	0,014*	<0,001**	0,117 ^{ns}	0,012*	0,0072**	0,45 ^{ns}
F		0,93	3,36	2,91	4,59	11,09	3,36	110,34	1,92	3,49	3,9	1,02
CV %		23,12	12,19	14,02	14,55	9,11	18,92	28,07	32,68	21,32	11,3	11,47

* e **: Significativos a 5 e 1 %. ^{ns}: não significativo

A eficiência de recuperação do K foi superior à do Rb, independentemente da substituição de K por Rb ou da adição de Rb

As eficiências de recuperação do K e do Rb diferiram, quando se compara o método da substituição de K por Rb do método da adição de Rb. No método da substituição as eficiências de K e Rb se ajustaram ao modelo quadrático, enquanto pelo método da adição o ajuste foi quadrático para o K e não significativo para o Rb.

Na substituição, a máxima eficiência de recuperação do K foi 73,97% obtida pela aplicação de 47,27 mg dm⁻³ de Rb (substituição de 31,5% de K por Rb), enquanto que a máxima eficiência do Rb foi 58,05% para a dose de 63,08 mg dm⁻³ de Rb (substituição de 42% de K por Rb) (Figura 33).

Figura 33 – Eficiência de recuperação dos elementos K e Rb, em função das quantidades de Rb (mg dm⁻³) utilizadas na substituição de K por Rb e na adição de Rb em uma quantidade fixa de K

O método da adição de Rb não modificou a eficiência de recuperação do Rb, com valor médio de 54,8%. Por sua vez, a eficiência de recuperação do K, pelo mesmo método, ajustou-se ao modelo quadrático, cuja eficiência máxima 69,12% foi obtida na dose de 51,78 mg dm⁻³ de Rb (adição de 34,52 % de Rb, além da dose total de K) (Tabela 10).

Tabela 10 – Análise de variância das eficiências de recuperação de K e Rb em função das quantidades de Rb utilizadas na substituição de K por Rb e em função da adição de Rb

Substituição		Eficiência		Adição		Eficiência	
K	Rb	K	Rb	K	Rb	K	Rb
-----mg dm ⁻³ -----		-----%-----		-----mg dm ⁻³ -----		-----%-----	
0	150	-	-	150	0	66,91	-
22,5	127,5	37,84	39,09	150	15	65,64	50,87
45	105	67,93	56,46	150	30	72,75	59,34
75	75	69,59	55,40	150	60	69,22	57,72
90	60	68,99	53,24	150	75	67,11	55,62
120	30	72,32	61,12	150	105	63,48	50,53
135	15	67,06	44,66	150	127,5	62,27	53,58
150	0	66,11	-	150	150	55,92	56,28
Pr>F		0,001**	0,0074**	Pr>F		<0,001**	0,38 ^{ns}
F		6,56	4,9	F		19,28	1,14
CV %		9,93	14,32	CV %		4,05	10,81

* e **: Significativos a 5 e 1 %. ^{ns}: não significativo

5.2 Discussão

As eficiências de recuperação obtidas na presente pesquisa são maiores que os valores de eficiência do K em condições de solo, porque foi utilizada areia como substrato. Em condições de solos tropicais a eficiência de recuperação de K pelas culturas anuais é, em média, cerca de 40% em relação à quantidade total aplicada do nutriente (BALIGAR; BEMMETT, 1986). A interação dos cátions com as partículas do solo faz com que a eficiência de recuperação pelas plantas seja afetada. Em condições de campo podem ocorrer diferenças entre o K e o Rb, relacionadas às propriedades químicas dos solos (TYLER, 1997).

Na análise conjunta dos resultados dos parâmetros TXCALT, TXCDIA, AF, MSPA e MSRA, a adição de Rb não apresentou resultados significativos, o que demonstra morfolologicamente a ausência de efeitos negativos ao excesso de Rb. O oposto foi verificado na substituição de K por Rb, pois esse método prejudicou o desenvolvimento do milho. O ajuste quadrático das equações indica que a TXCDIA foi o indicador de que a substituição não deve ser maior que 10% (15 mg dm⁻³ de Rb). Pela MSRA este limite chegou a 15,45% (23,2 mg dm⁻³ de Rb), pela MSPA foi igual a 21,6% (32,4 mg dm⁻³ de Rb), AF com 26,5% (39,8 mg dm⁻³ de Rb) e a TXCALT com 35% (52,5 mg dm⁻³ de Rb).

O fato de a taxa de crescimento do diâmetro ser um dos primeiros parâmetros afetados pelo método da substituição de K por Rb explica-se pelo abaixamento do potencial hídrico

celular, intensificando o fluxo de água e, em consequência, a expansão celular. O K também ajuda na regulação do pH citoplasmático e permite a atuação de enzimas que quebram as ligações entre os componentes da parede celular, necessária para a expansão (PRADO, 2008).

O K é necessário para a ativação enzimática, fotossíntese, respiração, síntese de proteínas e transporte de carboidratos. Assim, sua diminuição prejudica o desenvolvimento da planta (MARSCHNER, 2012). Os parâmetros relacionados ao desenvolvimento das plantas avaliados, na presente pesquisa, diminuíram com o aumento de Rb em substituição ao K. A substituição de todo K por Rb causou a morte do milho, tanto pelo prejuízo ao metabolismo da planta quanto à toxidez do excesso de Rb.

A complexidade da atuação do K na fotossíntese faz com que os resultados da falta desse nutriente sejam inconsistentes para as culturas (ZÖRB; SENBAYRAM; PEITER, 2014). Os resultados obtidos indicam que o Rb pode estar relacionado à fotossíntese, uma vez que a substituição de parte do K por Rb não afetou os indicadores da atividade fotossintética do milho. É provável que o Rb substitua o K na regulação osmótica sobre abertura e fechamento estomático, visto que os valores de TF, CC, CE e TR não foram alterados pela substituição de até 85% de K por Rb. A utilização do ^{86}Rb como traçador de K para determinar sua presença nas células guardas dos estômatos em *Vicia faba* (FISCHER, 1968; FISCHER, 1971), corroboram a atuação do Rb na regulação do potencial osmótico dos estômatos e, conseqüentemente, da fotossíntese. Os resultados obtidos por Valdez-Aguilar e Reed (2008) indicam que o Rb pode ter papel importante na regulação da água, outra evidência de sua participação no controle do potencial osmótico. Contudo, o excesso de Rb nas plantas não promoveu aumento da fotossíntese em milho, pois a mesma não foi alterada com o aumento do teor de Rb na planta.

O teor de Rb na parte aérea do milho aumentou com a dose fornecida do elemento. No método da substituição, o teor de Rb na parte aérea chegou a $22,33 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto no método da adição o teor máximo de Rb determinado na parte aérea foi $8,9 \text{ g kg}^{-1}$. Em situações de baixa disponibilidade de K no solo, foi relatado aumento da concentração de Rb nas plantas (DROBNER; TYLER, 1998). No solo, as perdas de K por lixiviação aumentam a absorção de Rb por plantas e fungos (NYHOLM; TYLER, 2000). O aumento na absorção de Rb explicaria a toxicidade observada quando todo K foi substituído por Rb, cuja absorção não sofreu competição de K. A ocorrência de toxicidade também foi relatada por Valdez-Aguilar e Reed (2008) na cultura do feijoeiro.

Em relação à composição química das plantas, o aumento do teor de Rb desbalanceou a quantidade de nutrientes na parte aérea e nas raízes do milho. Os teores na parte aérea de N,

P, S, Ca, Mn, Fe e Zn primeiramente reduziram em razão da substituição de K por Rb, mas posteriormente aumentaram, como resultado do efeito de concentração, em virtude do desenvolvimento inferior da planta. Os teores de K e Mg também diminuíram em decorrência da substituição de K por Rb. Na cultura do feijoeiro, a substituição parcial de K por Rb diminuiu os teores de N, Ca, Mg, Zn e Mn (VALDEZ-AGUILAR; REED, 2008). Essa diminuição de nutrientes foi ocasionada pela competição dos cátions pelos transportadores (ROSOLEM, 2005).

Em relação aos teores de nutrientes, o método da substituição de K por Rb modificou os teores da parte aérea do milho. Para este método tolera-se até 10% de substituição de K por Rb, sem prejuízo do desenvolvimento das plantas. Os teores de nutrientes na parte aérea do milho quando o K foi substituído em 10% por Rb foram semelhantes às plantas que receberam todo K (Tabela 6). O teor de Rb na parte aérea para uma substituição de 10% foi 0,69 g kg⁻¹ e 9,41 g kg⁻¹ de K, enquanto na raiz o teor de Rb foi 0,24 g kg⁻¹ e 2,67 g kg⁻¹ de K.

O método da adição de Rb alterou o teor de nutrientes da parte aérea do milho, mas não influenciou o desenvolvimento das plantas. Os fatores limitantes para o uso desse método foram à redução do teor de S após o teor máximo obtido aos 30% de adição, seguido do K com teor máximo de 33,3% de adição de Rb e a eficiência de recuperação do nutriente, com maior eficiência na adição de 34,52% de Rb.

Na adição de 30% de Rb os teores dos nutrientes obtidos na parte aérea do milho foram próximos de 10,63 g kg⁻¹ de K; 18,55 g kg⁻¹ de N; 2,05 g kg⁻¹ de P; 1,42 g kg⁻¹ de S; 2,42 g kg⁻¹ de Ca; 2,92 g kg⁻¹ de Mg; 80,97 g kg⁻¹ de Mn; 44,69 mg kg⁻¹ de Fe; 20,41 mg kg⁻¹ de Zn e 28,28 mg kg⁻¹ de Cu, obtidos pelas equações ajustadas para cada nutriente. Valores que estão muito próximos aos das plantas sem Rb, que foram de 9,95 g kg⁻¹ de K; 21,4 g kg⁻¹ de N; 1,92 g kg⁻¹ de P; 1,40 g kg⁻¹ de S; 2,52 g kg⁻¹ de Ca; 3,22 g kg⁻¹ de Mg; 88,2 g kg⁻¹ de Mn; 44,5 mg kg⁻¹ de Fe; 22,0 mg kg⁻¹ de Zn e 26,2 mg kg⁻¹ de Cu (Tabela 7). Nesse caso, o teor de Rb na parte aérea foi 2,55 g kg⁻¹ e 10,63 g kg⁻¹ de K. Na raiz o teor de Rb foi 1,0 g kg⁻¹ e 2,55 g kg⁻¹ de K.

A substituição de K por Rb influenciou os teores de macronutrientes nas raízes de milho. Os teores de N e P em um primeiro momento diminuíram e, posteriormente, aumentaram por efeito de concentração. Os demais macronutrientes apresentaram seus teores reduzidos, exceto o Ca que assim como os micronutrientes (com exceção do Zn), não foram alterados significativamente pela substituição de K por Rb. Nas raízes do feijoeiro, os teores de N, P, Ca, Fe, Zn, Cu, Mn diminuíram com a substituição de K por Rb (VALDEZ-AGUILAR; REED, 2008).

Na substituição de 10% de K por Rb, os teores obtidos na raiz do milho foram 2,54 g kg⁻¹ de K; 14,7 g kg⁻¹ de N; 1,5 g kg⁻¹ de P; 6,89 g kg⁻¹ de S; 4,34 g kg⁻¹ de Ca; 4,03 g kg⁻¹ de Mg e 43,8 mg kg⁻¹ de Zn. Os teores de N, P, S, Ca e Mg nas raízes das plantas sem Rb foram 12,8 g kg⁻¹; 1,27 g kg⁻¹; 7,05 g kg⁻¹; 3,97 g kg⁻¹ e 3,89 g kg⁻¹, respectivamente. Em relação aos micronutrientes os teores de Mn, Fe e Cu não diferiram para a substituição de K por Rb. O teor de Zn nas plantas sem Rb foi 41,3 mg kg⁻¹. Os teores encontrados nas raízes pela substituição de 10% de K por Rb estão próximos aos teores das raízes nas plantas sem Rb (Tabela 8).

A adição de Rb influenciou os teores de P, S, Mg, Ca, Zn e Fe nas raízes do milho. Os teores de N, Mn e Cu não apresentaram diferenças significativas. O P, S, Mg, Ca e Zn apresentaram ajuste quadrático, com aumento no início e queda posterior dos teores nas raízes do milho. O Fe também se ajustou ao modelo quadrático, entretanto seu teor diminuiu inicialmente e, depois, aumentou com a adição de Rb.

Pelo método da adição, quando acrescentou 30% de Rb ao total de K, os teores de nutrientes nas raízes do milho foram 2,5 g kg⁻¹ de K; 14,69 g kg⁻¹ de N; 1,4 g kg⁻¹ de P; 7,58 g kg⁻¹ de S; 4,62 g kg⁻¹ de Ca; 4,55 g kg⁻¹ de Mg; 243,75 mg kg⁻¹ de Mn; 766,4 mg kg⁻¹ de Fe; 45,28 mg kg⁻¹ de Zn e 55,04 mg kg⁻¹ de Cu, de acordo com as equações ajustadas. Nas plantas sem Rb os teores de nutrientes foram: 1,1 g kg⁻¹ de P; 5,64 g kg⁻¹ de S; 3,64 g kg⁻¹ de Ca; 3,37 g kg⁻¹ de Mg; 1022,7 mg kg⁻¹ de Fe e 40,7 mg kg⁻¹ de Zn. Os teores de P, S, Ca, Mg, Fe e Zn na raiz das plantas sem adição de Rb são muito próximos àqueles obtidos a 30% de adição (Tabela 9).

6 CONCLUSÕES

A substituição do K pelo Rb prejudicou o desenvolvimento do milho. No método da adição, o Rb não ocasionou danos às plantas de milho.

A adição de Rb e a substituição de até 85% de K por Rb não alteraram os parâmetros fotossintéticos.

Os teores de nutrientes na parte aérea e nas raízes variaram diferenciadamente em cada método.

A eficiência de recuperação do K foi superior à do Rb, independentemente da substituição de K por Rb ou da adição de Rb.

O desenvolvimento da planta foi limitado pela substituição de 10% do K por Rb. Para essa substituição, os teores de macro e micronutrientes na parte aérea e na raiz estão próximos aos encontrados nas plantas sem Rb.

A adição de Rb não afetou o desenvolvimento das plantas de milho. A adição máxima aceitável de Rb foi 30%, estabelecida pelo decréscimo nos teores de nutrientes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo, 2013. p. 173.

AMTMANN, A.; TROUFFLARD, S.; ARMENGAUD, P. The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. **Physiologia plantarum**, Copenhagen, v. 133, n. 4, p. 682–691, 2008.

ARGENTA, G.; SILVA, P.D.; BORTOLINI, C.G.; FORSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L. Relação da leitura do clorofilmetro com os teores de clorofila extraível e nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 13, n. 2, p. 158–167, 2001.

BALIGAR, V.C.; NIELSEN, N.E.; BARBER, S.A. Kinetics of absorption of K, Rb and Cs from solution culture by intact plant roots. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 1, p. 25-37, 1979.

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, 2001.

BALIGAR, V.C.; BEMMETT, O.L. NPK-fertilizer efficiency - a situation analysis for the tropics. **Fertilizer Research**, Sydney, v. 10, p. 147–164, 1986.

BHAT, M.I.; RASSOL, F; BRAT, M.A. Applications of stable and radioactive isotopes in soil science. **Current Science**, Bangalore, v. 98, n. 11, p. 1458–1471, 2010.

BUKSH, M.A.H.A.; AHMAD, R.; IQBAL, J.; MAQBOOL, M.M.; ALI, A.; ISAUQUE, M.; HUSSAIN, S. Nutritional and physiological significance of potassium application in maize hybrid crop production. **Pakistan Journal of nutrition**, Islamabad, v. 11, n. 2, p. 187–202, 2012.

CALVACHE, M.; PINO, I.; BUNEDER, M. Possibilidades de uso de Rb-85 como traçador de potássio. **Nucleotécnica**, Santiago, n.18, p. 43-45, 1990.

CALVACHE, M.; ESPINOSA, J.; CÓRDOVA, J.; GANGOTENA, D. Determinacion del potasio disponible en diferentes fuentes marcadas (comerciales), utilizando Rb-85 como trazador. **Nucleociencias**, Quito, v. 2, p. 5-11, 1991.

CALVACHE, M.; LÓPEZ, M. Evaluación de la eficiencia de la fertilización potásica en el cultivo de palma africana utilizando 85Rb como trazador. **Informaciones Agronómicas**, Quito, n. 38, p. 8-10, 1999.

COCHRANE, T.T.; COCHRANE, T.A. The vital role of potassium in the osmotic mechanism of stomata aperture modulation and its link with potassium deficiency. **Plant Signaling & Behavior**, Georgetown, v. 4, n. 3, p. 240–243, 2009.

COELHO, A.M. O potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. cap. 22, p. 613-658.

- COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; ANDRIGUETTI, M.H. Distribuição de potássio e de raízes no solo e crescimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, n. 1, p. 1291–1301, 2009.
- CROUS, J.W.; MORRIS, A.R.; SCHOLLES, M.C. Investigating the utilization of potassium fertilizer in a *Pinus patula* Schiede Ex Schltdl & Cham plantation. **Forest Science**, Bethesda, v. 57, n. 3, p. 222–231, 2011.
- DREYER, I.; UOZUMI, N. Potassium channels in plant cells. **The FEBS Journal**, Oxford, v. 278, n. 22, p. 4293–4303, 2011.
- DROBNER, U.; TYLER, G. Conditions controlling relative uptake of potassium and rubidium by plants from soils. **Plant and Soil**, Crawley, v. 201, p. 285–293, 1998.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.
- ERDEI, L.; TRIVEDI, S. Caesium/potassium selectivity in wheat and lettuce of different potassium status. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 138, n. 6, p. 696–699, 1991.
- FAGERIA, V.D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, n. 8, p. 1269–1290, 2001.
- FAO. 2012. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 05 ago. 2014.
- FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA DO RIO GRANDE DO SUL. **Relatório econômico 2013, perspectivas para 2014**. Disponível em: <http://www.farsul.org.br/arquivos/relatorio_2013.pdf>. Acesso em: 07 out. 2014.
- LIMA FILHO, O.F.; MALAVOLTA, E. Studies on mineral nutrition of the coffee plant (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho). LXIV. Remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. **Brazilian Journal Biology**, São Carlos, v. 63, n. 3, p. 481–490, 2003.
- FISCHER, R.A. Stomatal opening: role of potassium uptake by guard cells. **Science**, New York, v. 160, n. 3829, p. 784–785, 1968.
- FISCHER, R.A. Role of potassium in stomatal opening in the leaf of *Vicia faba*. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 47, p. 555–558, 1971.
- FRIED, M.; HAWKES, G.; MACKIE, W.Z. Rubidium-potassium relations in the soil-plant system. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 23, n. 9, p. 360–362, 1959.
- GIL, P.T. de; CECON, P.C.R.F.P.R.; FERREIRA, F.A. Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. **Horticultura Brasileira**, Vitória da Conquista, v. 20, n. 4, p. 611–615, 2002.

GODOY, L.J.G. de; BÔAS, R.L.V.; GRASSI FILHO, H. Adubação nitrogenada na cultura do milho baseada na medida do clorofilômetro e no índice de suficiência em nitrogênio (ISN). **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 373–380, 2003.

HAFEZ, A.A.R.; STOUT, P.R. Use of indigenous soil-rubidium absorbed by cotton plants in determining labile soil-potassium pool sizes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 33, p. 572–597, 1973.

HAWKER, J.S.; MARSCHNER, H.; DOWNTON, W.J.S. Effects of sodium and potassium on starch synthesis in leaves. **Australian Journal Plant Physiology**, Sydney, v. 1, n. 4, p. 491–501, 1974.

HOMMELS, C.H.; PRINS, H.B.A.; KUIPER, P.J.C.; TANCZOS, O.G. K⁺(Rb⁺) uptake by intact *Taraxacum* plants: effects of nutrient status on K⁺ uptake. **New Phytologist**, London, v. 114, n. 4, p. 685–694, 1990.

HURTADO, S.M.C.; RESENDE, Á.V.D.; SILVA, C.A.; CORAZZA, E.J.; SHIRATSUCHI, L.S. Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 6, p. 1011–1017, 2011.

JOHNSTON, A.E. **Understanding potassium and its use in agriculture**. Brussels: European Fertilizer Manufacturers' Association, 2003. 41 p.

KARIM, M.; RAHMAN, S.; RAHMAN, M. Rb⁸⁶ as tracer for potassium: I. Uptake of Rb and K by rice plant in nutrient solution. **Plant and Soil**, Crawley, v. 35, p. 179–182, 1971.

KARLEN, D.L.; FLANNERY, R.L.; SANDER, E.J. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 232–242, 1988.

LAGO, B.C. **Eficiência de uso do K em razão do sistema de adubação na rotação aveia-milho**. 2014. 41 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

LAMM, C.G. Applications of isotopes and radiation in agriculture. **IAEA Bulletin**, Vienna, v. 21, n. 2/3, p. 29, 1979.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Editora Rima, 2000. 531p.

LIDON, F.J.C. Rice adaptation to excess manganese: nutrient accumulation and implications of the quality of crops. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 156, n. 5/6, p. 652–658, 2000.

LIMA FILHO, O.F.; MALAVOLTA, E. Studies on mineral nutrition of the coffee plant (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho): LXIV. Remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 63, n. 3, p. 481–490, 2003.

MAATHUIS, F.J.M. Physiological functions of mineral macronutrients. **Current opinion in Plant Biology**, London, v. 12, n. 3, p. 250–258, 2009.

MAGALHÃES, P.C.; SOUZA, T.C.D.; ALBUQUERQUE, P.E.P.D.; KARAM, D.; MAGALHÃES, M.M.; CANTÃO, F.R.D.O. Caracterização ecofisiológica de linhagens de milho submetidas a baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 8, n. 3, p. 223–232, 2009.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 251 p.

_____. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E.; BASSO, L.C.; OLIVEIRA, G.D. Estudos sobre a nutrição mineral do milho. II. Efeito de doses crescentes de N, P e K no crescimento, produção e composição mineral da variedade piranão em condições controladas. **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, Piracicaba, v. 33, p. 479-499, 1976.

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

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. London: Academic Press, 2012. 651 p.

MARSCHNER, H.; SCHIMANSKY, Ch. Suitability of using rubidium-86 as a tracer for potassium in studying potassium uptake by barley plants. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Weinheim, v. 128, n. 2, p. 129-143, 1971.

MAYNARD, D.N.; BAKER, J.H. The influence of rubidium-potassium levels on growth and ion accumulation in tomato: short communication. **Plant and Soil**, Crawley, v. 13, p. 137-140, 1965.

MENGEL, K. Potassium. In: BARKER, A.V.; PILBEAM, D.J. (Ed.). **Handbook of plant nutrition**. Boca Raton: CRC Press, 2007. chap. 4, p. 91-120.

MENZEL, R.G.; HEALD, W.R. Distribution of potassium, rubidium, cesium, calcium, and strontium within plants grown in nutrient solutions. **Soil Science**, Baltimore, v. 80, n. 4, p. 287-294, 1955.

MEURER, E.J. Potássio. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. cap. 11, p.282-295.

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. cap. 7, p. 165-176.

NAKAOJI, K.; HARADA, H.; WAKIUCHI, N.; SUEYOSHI, K.; OJI, Y.; SHIGA, H. Proton-translocating inorganic pyrophosphatase in tonoplast vesicles from barley roots. **Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 62, n. 4, p. 393-398, 1991.

NYHOLM, N.E.I.; TYLER, G. Rubidium content of plants, fungi and animals closely reflects potassium and acidity conditions of forest soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 134, p. 89–96, 2000.

NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A.J.; GARRIDO, W.E.; ARAÚJO, J.D.; LOURENÇO, S. (Coord.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: EMBRAPA; SEA, 1991. p. 189-253.

OLIVEIRA, R.P.; MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; NAUMOV, A. Considerações sobre o uso do solo e a regionalização do balanço de potássio na agricultura brasileira. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. cap. 6, p. 119-158.

PRADO, R.M. **Nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora UNESP, 2009. 408 p.

PRAJAPATI, K.; MODI, H.A. The importance of potassium in plant growth: a review. **Indian Journal of Plant Sciences**, New Delhi, v. 1, n. 2/3, p. 177-186, 2012.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. Como a planta de milho se desenvolve. **Informativo da POTAFOS**, Piracicaba, v. 15, n. 103, p. 20, 2001.

RODRIGUES, L.F.O.S.; SILVA, M.B.; GONÇALVES, E.D.V.; MATTIELLO, V.D.; BERTTÉ, L.N.; MEINERZ, C.C.; GUIMARÃES, V.F. Trocas gasosas em milho inoculado com *Azospirillum brasilense* e submetido ao déficit hídrico. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 29., 2012, Águas de Lindóia. **Anais...** Sete Lagoas: ABMS, 2012. p. 302-308.

RODRÍGUEZ-NAVARRO, A.; RUBIO, F. High-affinity potassium and sodium transport systems in plants. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n. 5, p. 1149-1160, 2006.

RÖMHELD, V.; KIRKBY, E.A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. **Plant and Soil**, Crawley, v. 335, n. 1/2, p. 155-180, 2010.

ROSOLEM, C.A. Interação do potássio com outros íons. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. cap. 9, p. 239-256.

ROSOLEM, C.A.; BESSA, M.A.; AMARAL, P.G.; PEREIRA, H.F.M. Manganês no solo, sua avaliação e toxidez de manganês em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 2, p. 277-285, 1992.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S.; GARCIA, R.A. Potássio lixiviado da palha de aveia-preta e milheto após a dessecação química. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1169-1175, 2007.

ROSOLEM, C.A.; SANTOS, F.P.; FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milheto e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1033-1040, 2006.
SAS INSTITUTE. **The SAS system for Windows**: v.9.2. Cary, 2009.

SILVA, S.M.; OLIVEIRA, L.J.; FARIA, F.P.; REIS, E.F.; CARNEIRO, M.A.C.; SILVA, S.M. Atividade da enzima nitrato redutase em milho cultivado sob diferentes níveis de adubação nitrogenada e potássica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 11, p. 1931-1937, 2011.

SINGH, B.; SINGH, J.; KAUR, A. Applications of radioisotopes in agriculture. **International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research**, Baoding, v. 4, n. 3, p. 167–174, 2013.

TAMI, M. **Diagnostic approaches to evaluate nutrient status, partitioning, mineral dynamics, and relationships with yield and fruit quality of 'valencia' orange trees**. 1992. 184 p. Thesis (Doctor in Philosophy) – Oregon State University, Corvallis, 1992.

TEZOTTO, T. **Metabolismo e qualidade da bebida em cafeeiro expostos ao cádmio, níquel e zinco**. 2010. 123 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

TEZOTTO, T.; FAVARIN, J.L.; PAULA NETO, A.; GRATÃO, P.L.; AZEVEDO, R.A.; MAZZAFERA, P. Simple procedure for nutrient analysis of coffee plant with energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry (EDXRF). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 4, p. 263-267, 2013.

THE POTASH DEVELOPMENT ASSOCIATION. **Watch your P's & K's for cereals**. 2005. Disponível em: < <http://www.pda.org.uk/potash-leaflets.html#lf6>>. Acesso em: 05 out. 2014.

_____. **Forage maize fertiliser requirements**. 2008. Disponível em: <<http://www.pda.org.uk/potash-leaflets.html#lf6>>. Acesso em: 05 out. 2014.

TYLER, G. Influence of acidity and potassium saturation on plant uptake of indigenous soil rubidium. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 38, p. 181–186, 1997.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Disponível em: <<http://www.usda.gov>>. Acesso em: 07 out. 2014.

UNITED STATES Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2014**. United States Government Printing Office, 2014. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2014.

VALDEZ-AGUILAR, L.A.; REED, D.W. Influence of potassium substitution by rubidium and sodium on growth, ion accumulation, and ion partitioning in bean under high alkalinity. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 31, n. 5, p. 867–883, 2008.

VASCONCELLOS, C.A.; BARBOSA, J.V.A.; SANTOS, H.L. dos; FRANÇA, G.E. de. Acumulação de massa seca e de nutrientes por dois híbridos de milho com e sem irrigação suplementar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 18, n. 8, p. 887-901, 1983.

VÉRY, A.A.; SENTENAC, H. Molecular mechanisms and regulation of K⁺ transport in higher plants. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 54, n. 1, p. 575–603, 2003.

VON PINHO, R.G.; BORGES, I.D.; PEREIRA, J.L.A.R.; REIS, M.C. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 8, n. 2, p. 157-173, 2009.

WALKER, J.M.; BARBER, S.A. Absorption of potassium and rubidium from the soil by corn roots. **Plant and Soil**, Crawley, v. 17, n. 2, p. 243-259, 1962.

WHITE, P.J. Improving potassium acquisition and utilisation by crop plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 176, n. 3, p. 305–316, 2013.

WHITE, P.J.; BROWN, P.H. Plant nutrition for sustainable development and global health. **Annals of botany**, Oxford, v. 105, n. 7, p. 1073–1080, 2010.

ZAPATA, F.; HERA, C. Role of isotopes in mineral plant nutrition studies. **Romanian Agricultural Research**, Fundulea, v. 7/8, n. 8, p. 49–54, 1997.

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture-status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 171, n. 9, p. 656–669, 2014.

ZOTARELLI, L.; CARDOSO, E.G.; PICCININ, J.L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; TORRES, E.; ALVES, B.J.R. Calibração do medidor de clorofila Minolta SPAD-502 para avaliação do conteúdo de nitrogênio do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 9, p. 1117–1122, 2003.