

**POTÁSSIO EM SOLOS DE VÁRZEA
INUNDADOS E NUTRIÇÃO POTÁSSICA DO
ARROZ**

ANDREI RODRIGO CABBAU

2002

ANDREI RODRIGO CABBAU

**POTÁSSIO EM SOLOS DE VÁRZEA INUNDADOS E NUTRIÇÃO
POTÁSSICA DO ARROZ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Mestre".

Orientador:

Prof. VALDEMAR FAQUIN

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2002

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Cabbau, Andrei Rodrigo

Potássio em solos de várzeas inundados e nutrição potássica do arroz /
Andrei Rodrigo Cabbau. -- Lavras : UFLA, 2002.

47 p. : il.

Orientador: Valdemar Faquim.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Arroz. 2. Potássio. 3. Solo de várzea. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

CDD-633.18893

ANDREI RODRIGO CABBAU

**POTÁSSIO EM SOLOS DE VÁRZEA INUNDADOS E NUTRIÇÃO
POTÁSSICA DO ARROZ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 20 de setembro de 2002

Prof. Carlos Alberto Silva

UFLA

Prof. Luiz Amaldo Fernandes

UFMG



Prof. Valdemar Faquin

UFLA

(Orientador)

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL**

A minha avó Noemia, aos meus tios, José Humberto e Maria, pelo apoio e incentivo a minha formação e a Michelle, pelo amor, carinho, companheirismo, apoio e amizade.

DEDICO E OFEREÇO

“ Os momentos em que somos realmente felizes, perdem-se no tempo como lágrimas na chuva.”

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela oportunidade de realização do curso e pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Valdemar Faquin, pela orientação, apoio e ensinamentos transmitidos durante o curso.

Aos professores Carlos Alberto Silva e Luiz Amaldo Fernandes, pela amizade, co-orientação, esclarecimentos, sugestões e colaboração para a concretização deste trabalho.

Aos professores Nilton Curi e João José pelas sugestões e colaboração para a concretização deste trabalho.

Aos amigos Anderson, Alex, José Carlos, Tácito, Renato, Regina, Daniela, Adão, Hudson, Xande, Melissa, Gabriela, Rízia, Watson, Leandro, Virgílio, Renato (Tomate), Janaina, Eduardo, Cláudia, e Antônio, pela solidariedade e momentos convividos.

Aos companheiros de república, Cassiano e Ricardo, pela convivência diária, pelo apoio e principalmente pela amizade.

Ao amigo e bolsista de iniciação científica Rodrigo, pela ajuda prestada para realização desse trabalho.

A todo o corpo docente, discente e de funcionários do Departamento de Ciência do Solo, enfim todos que, de alguma maneira, contribuíram para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1. Características dos solos de várzea.....	3
2.1.1. Gleissolos.....	4
2.1.2. Organossolos.....	5
2.1.3. Neossolos.....	5
2.2. Alterações nos solos causadas pela inundação.....	6
2.3. O potássio no solo e o aproveitamento de suas formas pelas plantas.....	7
2.4. Potássio na planta.....	10
2.5. Fatores que afetam a disponibilidade de potássio.....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1. Caracterização física, química e mineralógica.....	12
3.2. Delineamento experimental, tratamentos e condução do experimento.....	14
3.3. Formas de potássio no solo.....	16
3.4. Variáveis analisadas.....	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
4.1. Formas de potássio dos solos.....	18
4.2. Aproveitamento das formas de potássio dos solos pelo arroz.....	21
4.3. Produção do arroz e níveis críticos de K.....	31
4.3.1. Produção de matéria seca de grãos e níveis críticos de K nos solos.....	31
4.3.2. Níveis críticos de K na planta.....	36
5. CONCLUSÕES.....	38
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
ANEXO.....	47

RESUMO

CABBAU, Andrei Rodrigo. Potássio em solos de várzea inundados e nutrição potássica do arroz. Lavras: UFLA, 2002. 47p. (Dissertação – Mestrado em Agronomia)*

O presente estudo foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, no período de fevereiro a junho de 2002, com o objetivo de estudar as formas de K nesses solos e a contribuição dessas formas para o cultivo do arroz inundado, bem como estabelecer os níveis críticos de K nos solos e na planta. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4x5 com quatro repetições, sendo quatro solos de várzea [Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX), Neossolo Flúvico (RU) e Organossolo Mésico (OY)] e cinco níveis de saturação por K da CTC potencial (natural, 4, 6, 8 e 10 %). No tratamento sem adição de K, a saturações por K natural de cada solo corresponderam a 1,49, 1,65, 1,30 e 1,55% para os solos RU e GX, GM e OY, respectivamente. Após 30 dias de incubação com calcário, subamostras dos solos foram analisadas para K total (Ktot), K não trocável (Knt), K trocável (Kt), K em solução (Ksol), K disponível pelo extrator Mehlich-1. Em seguida, amostras de três dm³ dos solos foram incubadas com os tratamentos e uma adubação básica com macro e micronutrientes por mais 30 dias. No final desse período, cultivaram-se duas plantas de arroz (*Oriza sativa* L. cv. Jequitibá) por vaso, nas quais foram avaliados: a matéria seca de grãos, os teores de K na matéria seca de grãos, a matéria seca da parte aérea, os teores de K na parte aérea e o perfilhamento na época da maturação, e os teores de K na folha bandeira à época do florescimento. Em subamostras dos solos dos vasos antes e após o cultivo, analisaram-se novamente o Ktot, Knt, Kt e Ksol. Os teores de K total, K trocável, K não trocável e K na solução, foram diferentes entre os solos, assim como suas respectivas contribuições para a nutrição do arroz. Os menores teores das frações de potássio total (Ktot) e potássio não trocável (Knt) foram observados nos solos GM e GX. Esses solos apresentaram os maiores valores de níveis críticos de K no solo, enquanto os níveis críticos de K foliares não diferiram entre os solos.

*Comitê Orientador: Valdemar Faquin – UFLA (Orientador); Luiz Arnaldo Fernandes – UFMG; Carlos Alberto Silva – UFLA; Antônio Eduardo Furtini Neto – UFLA.

ABSTRACT

CABBAU, Andrei Rodrigo. Potassium in lowland waterlogged soils and K nutrition of the rice. Lavras: UFLA, 2002. 47p. (Dissertation – Master in Agronomy)*

The present study was carried out from February to June 2002 under greenhouse, conditions, at the Soil Science Department of Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais State, Brazil, in order to study the effect of lowland soil potassium forms and their availability on the K nutrition of rice plants. The experimental design was a completely randomized factorial scheme (4x5) with four replicates, wich included four lowland soils (Mesic Organosoil – OY, Melanic Gleysoil – GM, Haplic Gleysoil – GX, and Fluvic Neosoil – RU) and five K levels (control, 4, 6, 8, and 10 % of the pH – 7.0 CEC saturated with K). Natural soil K saturations (percentage of pH-7.0 CEC) were 1.55 for the OY soil, 1.30 for the GM soil, 1.65 for the GX soil, and 1.49 for the RU soil. After 30 days of incubation with lime, soils samples were analyzed for total K (K_{tot}), nonexchangeable K (K_{ne}), exchangeable K (K_e), K in solution (K_{sol}) and available K (Melich-1 extractant). Three-dm³ soil samples were then incubated during 30 days with increasing levels of K plus the additional macro and micronutrients necessary for plant development. At the end of this period, two rice plants (*Oriza sativa* L. cv. Jequitibá) were cultivated in each pot. Grain yield, top dry matter weight, the K rate in top plants and branch out at the end of the cycle, as well as K content in plant leaves at the flowering period were determined and soil samples were again analyzed for K_{tot} , K_{ne} , K_e , and K_{sol} . The smallest K_{tot} and K_{nt} forms were observed to GM and GX soils. These soils presented the highest critical levels of soils K, while de leaf critical levels were similar to both soils.

*Guidance Committee: Valdemar Faquin – UFLA (Major Professor); Luiz Arnaldo Fernandes – UFMG; Carlos Alberto Silva – UFLA; Antônio Eduardo Furtini Neto – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

Com o progressivo aumento da população mundial, a demanda de alimentos toma-se cada vez mais elevada. Conseqüentemente, o avanço das fronteiras agrícolas é uma alternativa ainda possível para proporcionar uma oferta adequada de alimentos. Dentre as áreas a serem incluídas no processo produtivo, destacam-se os solos de várzeas.

A importância e necessidade de utilização desses solos de várzeas estão no fato de elas apresentarem um conjunto de características favoráveis que permitem sua exploração intensiva através do aproveitamento de seus recursos hídricos, sem dispêndios elevados de energia.

Em 1975, com a implantação do Programa Nacional de Aproveitamento Racional de Várzeas Irrigáveis - PROVÁRZEAS, em Minas Gerais, foi quantificada a existência de 1,5 milhão de hectares de várzeas no Estado, com duzentos mil hectares situados no sul do Estado, passíveis de serem incorporados ao processo produtivo. Essas áreas, devidamente drenadas e manejadas, oferecem possibilidades de diversificação de culturas com até duas ou mais colheitas anuais, dependendo das espécies cultivadas. Atualmente, a exploração de novas áreas de várzeas está proibida por lei, pois essas áreas, hoje, são consideradas de preservação permanente. Por isso, somente as várzeas já cultivadas anteriormente podem continuar no processo produtivo, usando-se técnicas adequadas no processo de exploração para evitar a degradação e a contaminação dessas áreas.

O arroz é uma espécie adaptada às condições de várzeas devido às suas características de plantas hidrófilas. Todas as regiões do mundo que apresentam altas produtividades de arroz usam as várzeas ou outras áreas facilmente irrigáveis para essa cultura, como se observa na Espanha, Austrália, Japão, Itália, Estados Unidos, Egito, entre outros. Em Minas Gerais, os proprietários de 3273

ha de várzeas sistematizadas constataram um aumento da renda líquida de 950% em 1978 utilizando racionalmente as áreas e empregando tecnologias adequadas (Provárzeas, 1981).

Devido aos processos de formação, os solos de várzea possuem grande heterogeneidade quanto à composição granulométrica e mineralógica. Além disso, esses solos passam por períodos sob inundação, o que lhes confere características e propriedades adversas àquelas verificadas em solos de boa drenagem (Ponnamperuma, 1972). Dentre essas características, destacam-se a reação do solo, as condições de óxido-redução, o acúmulo de matéria orgânica e o desenvolvimento de microrganismos anaeróbios. Desse modo, há a necessidade de conhecer suas características físicas e químicas para fornecer subsídios técnicos para a identificação de sua aptidão agrícola, preservação e exploração dos recursos naturais, evitando ou reduzindo problemas ambientais decorrentes do cultivo desses solos.

O ecossistema de várzeas no Brasil representou cerca de 40% da área total sob o cultivo do arroz, contribuindo com 60% da produção de 10 milhões de toneladas na safra 98/99. O potencial de expansão, em especial no Vale do Araguaia, é muito grande, mas exigente em estímulo governamental e altos investimentos. O restante da área sob o ecossistema de várzeas é cultivado sob o sistema de várzea úmida, sem controle de irrigação, por pequenos produtores em pequenas áreas, sendo mais expressivo nos Estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais (www.cnpaf.embrapa.br).

De maneira geral, os solos de várzea apresentam problemas relativos à fertilidade, portanto, para sua exploração racional, os mesmos devem ser estudados. Em estudos básicos realizados por Andrade (1997) com quatro classes de solo predominantes em várzeas do sul de Minas Gerais, demonstrou-se, que a toxidez por alumínio e deficiências severas de P, K, B e N foram as principais limitações ao crescimento e produção de feijoeiro. Posteriormente,

Villa (1999) estudou a resposta e o aproveitamento das formas de K pelo feijoeiro nesses solos, sob drenagem. Todavia, em solos irrigados por inundação, pouco se conhece sobre a dinâmica do K e de sua disponibilidade para as plantas.

Assim, diante do grande potencial que representam os solos de várzea no Brasil e do grande impacto ambiental causado pelo uso inadequado dessas áreas, o presente trabalho teve o objetivo de estudar as formas de K nesses solos e a contribuição dessas formas para o cultivo do arroz inundado, bem como estabelecer os níveis críticos de K nos solos e na planta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Características dos solos de várzea

As várzeas ou planícies de inundação, por se localizarem às margens dos rios e serem áreas de baixada, estão sujeitas a períodos de inundação durante o ano. Com as inundações, esses solos sofrem constantes deposições de materiais carreados das encostas pela erosão das chuvas, transportados por cursos d'água ou por ambos os fatores (Curi et al., 1988). Devido ao fato de esses solos se desenvolverem a partir de sedimentos de origens diversas, apresentam grande variação quanto aos seus atributos químicos, físicos e biológicos.

Pelo grande período do ano em que ficam sob condições de excesso de umidade, e em função de sua localização na paisagem, os solos de várzea apresentam um acúmulo de matéria orgânica na camada superficial, havendo, também, o processo de gleização, através do qual o ferro é reduzido, conferindo ao solo uma coloração cinza, o que caracteriza uma insignificante presença de compostos oxidados (Curi et al., 1988).

As áreas de várzeas podem apresentar desde solos minerais até orgânicos. De modo geral, os solos dessas áreas podem ser agrupados nas

seguintes classes: Gleí Húmico, Gleí Pouco Húmico, Solos Orgânicos e Solos Aluviais (Provárzeas, 1981), que correspondem aos Gleissolos, Organossolos e Neossolos (EMBRAPA, 1999). São solos de baixa fertilidade natural, caracterizados por acidez média, teor e saturação por Al variando de baixo até muito alto, baixos teores de P e médios a altos de K (Mariano, 1998).

As várzeas podem ser utilizadas para cultivos intensivos, pois geralmente possuem uma boa topografia e facilidade de mecanização, tendo como grande vantagem a utilização dos recursos hídricos naturais, com reduzidos custos energéticos (Galvão, 1990).

2.1.1. Gleissolos

Os Gleissolos, que correspondem aos solos Gleí da antiga classificação, são solos hidromórficos, mal drenados, em áreas de planície de inundação, estando constantemente sob influência do lençol freático próximo à superfície, ou pelo menos durante um longo período. Apresentam, como consequência, um horizonte A escuro, rico em matéria orgânica, seguido de um horizonte subsuperficial de coloração acinzentada em virtude da redução do ferro que se processa em meio anaeróbio.

Pelas características da camada superficial, são identificadas quatro classes: Gleissolos Tiomórficos, Gleissolos Sálícos, Gleissolos Melânicos e Gleissolos Háplícos (EMBRAPA, 1999).

Os Gleissolos Tiomórficos são solos com horizontes sulfúricos e, ou, materiais sulfídricos, dentro de 100 cm, a partir da superfície do solo. Os Gleissolos Sálícos apresentam caráter sálico, dentro de 100 cm da superfície do solo. Os Gleissolos Melânicos possuem horizonte hístico com menos de 40 cm de espessura, ou horizonte A húmico, proeminente ou chemozêmico, enquanto os Gleissolos Háplícos não se enquadram nas classes anteriores, mas apresentam horizonte gleí (EMBRAPA, 1999).

2.1.2. Organossolos

Compreendem solos hidromórficos, essencialmente orgânicos, pouco desenvolvidos, constituídos por vegetais fibrosos de coloração preta a cinzenta muito escura (vulgarmente denominados de turfas), são muito mal drenados, encontrados sob condições de permanente encharcamento (Provárzeas, 1981) e correspondem aos solos Orgânicos da antiga classificação.

Esses solos, quando secos, pegam fogo com facilidade e sua drenagem deve ser feita com muito cuidado para evitar a queima excessiva da matéria e, com isso a sua subsidência (EMBRAPA, 1999).

Outra característica desses solos é a elevada capacidade de retenção de água. Possuem, em geral, massa específica aparente inferior a 1 g cm^{-3} devido aos altos teores de matéria orgânica (EMBRAPA, 1999).

Esses solos compreendem quatro classes: Organossolo Tiomórficos – presença de horizonte sulfúrico e, ou, materiais sulfídricos; Organossolos Fólicos – são solos saturados por água por no máximo 30 dias por ano durante o período chuvoso e que apresentam horizonte O hístico com acumulação de material orgânico, compreendendo no mínimo 30 cm de espessura quando sobrejacentes a contato lítico ou fragmento de rocha ou com no mínimo 40 cm de espessura; Organossolos Mésicos – solos que apresentam teor de matéria orgânica entre 200 e 650 g kg^{-1} de solo e densidade maior que $0,15 \text{ Mg m}^{-3}$; e Organossolos Háplicos – solos que apresentam teor de matéria orgânica maior ou igual a 650 g kg^{-1} de solo e densidade menor ou igual a $0,15 \text{ Mg m}^{-3}$ (EMBRAPA, 1999).

2.1.3. Neossolos

São solos pouco desenvolvidos e sem horizonte B diagnóstico. Os Neossolos que ocorrem nas várzeas são derivados de sedimentos aluviais com horizonte A assentado sobre horizonte C constituído de camadas estratificadas,

sem relação pedogenética entre si. Esses solos são classificados como Neossolos Flúvicos (EMBRAPA, 1999), que correspondem aos solos Aluviais da antiga classificação. Os Neossolos Flúvicos podem ser eutróficos ou distróficos, e a textura pode variar de arenosa até argilosa.

2.2. Alterações nos solos causadas pela inundação

Quando um solo é inundado, a lâmina d'água que se forma sobre a sua superfície acaba isolando-o do ar atmosférico. Com esse isolamento do solo, o oxigênio vai a zero, e os organismos aeróbicos morrem ou ficam em estado latente. Segundo Sanches (1976), quando um solo é inundado, o suprimento de oxigênio decresce a zero em menos de um dia. Nessas condições, a decomposição da matéria orgânica é feita por organismos anaeróbios, numa velocidade bem menor, acarretando em produtos finais bem diferentes daqueles obtidos na decomposição aeróbia, dando início a uma série de modificações químicas (Mariano, 1999).

As formas oxidadas no meio redutor servem como receptores de elétrons na respiração microbiana, na seguinte seqüência: nitratos, compostos contendo manganês, compostos fêrricos, produtos intermediários da decomposição da matéria orgânica, como ácidos orgânicos, metano, etileno, sulfatos e sulfitos.

Após um tempo de inundação, tanto os solos ácidos quanto os alcalinos tendem à neutralidade. Geralmente são atingidos valores de pH entre 6,5 e 7,5 quando o potencial redox se estabiliza (Patrick Jr e Reddy, 1978).

A alteração química mais importante que ocorre quando um solo é submerso é a redução do ferro, com um conseqüente aumento de sua solubilidade, o que acaba aumentando a concentração do ferro na água, elevando o pH, deslocando cátions dos sítios de troca e aumentando as solubilidades do fósforo e da sílica (Provárzeas, 1981).

Quanto mais rico um solo é em matéria orgânica, maior é sua condição de redução quando inundado, podendo ocorrer um acúmulo de ácidos orgânicos e H_2S , prejudiciais ao desenvolvimento e absorção de nutrientes pelas plantas (Rao e Mikkelsen, 1977).

2.3. O potássio no solo e o aproveitamento de suas formas pelas plantas.

De acordo com Lopes (1989), a maioria dos solos possuem milhares de quilogramas de K, mas somente uma pequena porcentagem, menos de 2%, é disponível durante o ciclo das culturas.

Segundo Raij (1982), as transformações que o potássio sofre, desde sua liberação até a absorção pelas plantas podem ser resumidas da seguinte forma:

$K \text{ não trocável} \leftrightarrow K \text{ trocável} \leftrightarrow K \text{ em solução} \rightarrow K \text{ planta.}$

Apesar de outros esquemas terem sido apresentados, todos são concordantes ao afirmarem que não há separação nítida entre as diversas formas de K, e sim que ocorre um equilíbrio entre elas.

Em razão da sua disponibilidade para as plantas, o K do solo é classificado em quatro categorias: estrutural (mineral), não trocável, trocável e da solução, que juntas fornecem o K total (Tisdale et al., 1993). Segundo Sparks (1980) e Raij (1982), devido às constantes retiradas de K pelas plantas, essas formas de K encontram-se em um equilíbrio dinâmico, o que tem ocasionado a utilização de extratores químicos específicos para quantificar cada uma dessas formas de K.

O potássio estrutural é definido como a fração do elemento contido na estrutura cristalina de minerais primários e secundários (Mielniczuk e Selbach, 1978), esse K é liberado à medida que os minerais do solo são intemperizados, mas esta liberação é muito lenta para o K ser disponível às plantas em crescimento (Lopes, 1989).

O potássio não trocável consiste no K adsorvido nas entrecamadas de minerais de argila 2:1 e o K contido em minerais primários mais facilmente intemperizáveis (Mielniczuk e Selbach, 1978). A quantificação dessa fração de K do solo geralmente é feita pela diferença entre a quantidade extraída com HNO₃ fervente (Knudsen et al., 1982) e a quantidade extraída com acetato de amônio 1 mol L⁻¹ pH 7,0 (Mielniczuk, 1978), sendo esta última fração denominada de K trocável. Portanto, K disponível é o K que está adsorvido à matéria orgânica e à argila do solo, sendo facilmente deslocado ou trocado por outros cátions do solo (Tisdale et al., 1993).

As frações de K total, K trocável e K não trocável apresentam consideráveis variações, tanto entre solos quanto entre regiões, devido à grande variabilidade no clima regional, ao material de origem e às condições de intemperismo - lixiviação a que os diferentes solos são submetidos. Para o K não trocável, Lana e Neves (1994), trabalhando com solos de São Paulo, encontraram valores entre 34 e 3.050 mg kg⁻¹. Em Minas Gerais, Prezotti e Defelipo (1987), trabalhando com Latossolo Vermelho-Escuro, Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho-Amarelo, encontraram valores entre 4 e 40 mg kg⁻¹. Também em Minas Gerais, Villa (1999), trabalhando com solos de várzea, verificou teores de K não trocável variando de 23 a 237 mg dm⁻³. Para o K total, Prezotti e Defelipo (1987) citam variações de 360 a 3.700 mg kg⁻¹ e Villa (1999) encontrou teores variando de 1.040 a 9.370 mg dm⁻³. Finalmente, para o K trocável, Nachtigall e Vahl (1989), trabalhando em solos do Rio Grande do Sul, relataram que essa fração de K contribuiu em média 0,9% para o K total; em Minas Gerais Prezotti e Defelipo (1987) encontraram valores entre 5 e 20% e Villa (1999), valores entre 0,8 e 11%.

Vários autores relataram a contribuição de formas de K consideradas não trocáveis como fonte de K para as plantas (Rosolem, Bessa e Pereira, 1993; Lana e Neves, 1994; Melo et al., 1995; Silva et al., 1995; Silva, 1999 e Villa, 1999).

Gama (1967) e Oliveira et al. (1971), trabalhando com cultivos sucessivos em casa de vegetação, observaram que as plantas retiraram quantidades de K maiores que a quantidade inicialmente existente na forma trocável. Patella (1980), do mesmo modo, trabalhando com cultivos sucessivos, verificou que o K extraído pelo Mehlich 1 na testemunha, sem adubação potássica, praticamente não diminuiu, indicando que o solo possui capacidade de repor o K trocável utilizando formas não trocáveis. Villa (1999) concluiu que embora tenha ocorrido um aproveitamento do K não trocável pelo feijoeiro cultivado em quatro solos de várzea, as formas trocáveis foram as que mais contribuíram no fornecimento do nutriente à cultura. Mesmo as plantas sendo capazes de utilizar formas não trocáveis de K, não se pode descuidar da adubação potássica, pois o uso das formas não trocáveis de K causa um empobrecimento dos solos em K, acarretando a necessidade de se aumentarem as doses de K aplicadas no solo, tanto para suprir a demanda das plantas (Grimme, 1976) quanto para repor o K não trocável retirado pelos cultivos (Fernandes et al., 1993).

Segundo Rajj (1981) e Ritchey (1982), em solos de regiões tropicais, altamente intemperizados, o K trocável pode ser utilizado como índice de disponibilidade de K para as plantas, pois nesses solos praticamente não ocorre a presença de argilas expansivas e de minerais de fácil intemperização que contenham potássio.

O potássio da solução, como o próprio nome já diz, é o K que se encontra na solução do solo, livre de forças de adsorção e em condições normais de umidade (Reitemeier, 1951). Essa fração representa a disponibilidade momentânea de K para as plantas (Tisdale et al., 1993). Tanto o K que é absorvido pelas plantas quanto o K perdido por lixiviação dependem diretamente da sua concentração na solução do solo (Mielniczuk, 1978).

Segundo Lopes (1989), o teor de K na solução do solo é capaz de suprir a demanda das plantas por apenas um ou dois dias. Devido a esse, fato adota-se a forma trocável para avaliar a disponibilidade de K para as plantas (Parra, 1989).

Denomina-se nível crítico a quantidade de K no solo abaixo da qual a produção das culturas é limitada, e esse nível crítico varia em função dos atributos químicos, físicos e mineralógicos do solo.

Os solos de regiões tropicais geralmente são altamente intemperizados, com baixa reserva de K e também com baixa CTC. Por essas razões, vários trabalhos têm sido realizados com a intenção de se chegar a uma recomendação de adubação potássica mais adequada.

2.4. Potássio na planta

O potássio é absorvido pelas raízes na forma iônica, K^+ , sendo o processo essencialmente ativo. A absorção atinge seu máximo na presença de Ca^{+2} no meio, embora o excesso tenha efeito inibidor, como acontece, por exemplo, quando se usa calcário ou gesso em excesso (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1997).

O potássio participa da fotossíntese, da respiração e da síntese da clorofila. Na carência de potássio, a planta acumula carboidratos solúveis e açúcares redutores (Barbosa Filho, 1987).

Segundo Faquin (1997), a principal função bioquímica do K na planta é a de ativador de enzimas, tais como as sintetases, oxiredutases, desidrogenases, transferases e quinases, além de contribuir para a regulação osmótica. Outras funções importantes do potássio são a participação na abertura e no fechamento dos estômatos, o transporte de carboidratos e a aceleração da lignificação das células esclerenquimáticas, aumentando a espessura das paredes celulares do colmo e conferindo ao arroz uma maior resistência ao acamamento, a doenças e a pragas (Barbosa Filho, 1987).

O K é o segundo nutriente mais exigido pelas plantas, ficando atrás somente do nitrogênio; é o cátion mais abundante nos tecidos vegetais, mesmo não participando da estrutura de nenhum composto estrutural (Malavolta, 1982; Huber e Army, 1985; Marschner, 1995).

O K é também responsável por uma melhor qualidade dos produtos colhidos e maior resistência a geadas, seca e temperaturas altas (Malavolta 1981; Malavolta e Crocomo, 1982).

De maneira geral, a absorção de nutrientes segue a curva de crescimento de cada planta. No arroz, na fase de emborrachamento, a planta já absorveu cerca de 75% do potássio necessário para o seu desenvolvimento (Barbosa Filho, 1987).

2.5. Fatores que afetam a disponibilidade de potássio

A disponibilidade de um nutriente no solo está ligada ao teor do nutriente passível de ser absorvido pelas raízes e metabolizado pelas plantas.

São condições para uma baixa disponibilidade de K: pH - com o abaixamento do pH, a absorção de K^+ cai drasticamente, principalmente na ausência de Ca^{2+} (Faquin, 1997); também ocorre uma diminuição na CTC, que será tanto maior quanto maiores forem as presenças de espécies de minerais de argila com dominância de cargas dependentes de pH e, ou, matéria orgânica (Lopes, 1989); terraplenagem - o movimento de terra no preparo do terreno para o plantio, tabuleiros, pode remover a camada superficial do solo onde se encontra o potássio acumulado pelos restos vegetais; pobreza do solo - pode ser natural ou induzida pela extração e remoção nas colheitas; umidade - Barber (1966) calculou que aproximadamente 70-80% do K absorvido pelas culturas chega até a raiz por difusão, 10-5% pelo fluxo de massa e apenas 2 a 5% pela interceptação radicular, por isso o teor de umidade do solo é muito importante;

inibição - a absorção de K pode ser inibida tanto pelo alto teor de Ca quanto de Mg (Faquin, 1997).

Alterações na absorção de K em função da disponibilidade de Ca e de Mg no solo são bastante freqüentes e foram observadas por diversos autores (Omar & El Kobbia, 1966; Rosolem, 1982; Mascarenhas et al., 1988). Os autores relataram que a maior disponibilidade desses dois cátions no solo afeta a absorção de K, diminuindo as suas concentrações no tecido das plantas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação, no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras. Foram utilizadas amostras de quatro solos de várzea: Neossolo Flúvico (RU), Gleissolo Háplico (GX), Gleissolo Melânico (GM) e Organossolo Mésico (OY) artificialmente drenado; esses solos, na classificação antiga, correspondem ao Aluvial, Glei Pouco Húmico, Glei Húmico e Orgânico, respectivamente. Essas amostras foram provenientes de uma propriedade particular, no município de Lavras – MG, nas coordenadas 21° 16' 53,7"S e 44° 57' 54,9"W a 927m de altitude.

As amostras foram coletadas na camada de 0-20 cm nos diferentes solos, sob vegetação natural, tomando-se o cuidado de retirar a vegetação e os restos orgânicos presentes na superfície. Estas amostras foram destorroadas, secas ao ar e passadas em peneira com malha de 4 mm de abertura.

3.1. Caracterização física, química e mineralógica.

Amostras de 4 dm³ dos solos foram corrigidas pela aplicação de calcário dolomítico comercial calcinado e micro pulverizado, com PRNT = 100%, CaO =

35% e MgO = 14%, cujas doses foram estimadas pelo método da saturação por bases (V) para elevar a V a 50% (CFSEMG, 1999).

Após a incubação por 30 dias, com a umidade na capacidade de campo, os solos foram secos ao ar e analisados quanto aos atributos químicos, físicos e mineralógicos (Tabela 1).

A granulometria dos solos foi determinada pelo método da pipeta (Day, 1965), empregando-se NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação rápida, sendo a fração areia (2 – 0,053 mm) separada através da tamisagem.

Tabela 1. Principais atributos químicos, físicos e mineralógicos dos solos usados no experimento, após a aplicação da calagem.

Químicos												
Solo	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	m	V
		---mg dm ⁻³ ---			-----cmol _c dm ⁻³ -----					-----%-----		
RU	5,5	2,2	42	1,6	1,0	0,3	4,5	2,7	3,0	7,2	10	37,6
GX	5,8	3,7	42	1,4	1,0	0,2	4,0	2,5	2,7	6,5	7	38,6
GM	5,9	6,8	75	3,9	2,7	0,2	7,9	6,8	7,0	14,7	3	46,2
OY	5,2	6,5	81	3,4	1,8	0,3	7,9	5,4	5,7	13,3	5	40,6
Físicos												
	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Matéria orgânica	Ds	Dp	Superfície específica				
-----g kg ⁻¹ -----						---g cm ⁻³ ---		---m ² g ⁻¹ ---				
RU	50	210	410	330	20	0,81	2,67	135,6				
GX	80	510	220	190	36	1,09	2,59	123,2				
GM	60	290	280	370	199	0,42	1,78	329,4				
OY	10	70	510	410	60	0,62	2,07	175,8				
Mineralógicos ¹												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe _d	Fe _o	Ct	Gb	Ki		
-----g kg ⁻¹ -----												
RU	211,4	225,7	76,1	9,7	0,49	11,7	0,47	145,2	47,9	1,59		
GX	85,7	113,4	12,3	6,7	0,12	2,1	0,58	63,4	18,1	1,28		
GM	124,3	174,8	12,6	5,8	1,48	2,5	0,55	47,2	51,8	1,21		
OY	242,5	248,1	44,0	7,5	0,45	6,1	0,51	118,7	56,2	1,66		

¹ SiO₂ – óxido de silício; Al₂O₃ – óxido de alumínio; Fe₂O₃ – óxido de ferro; TiO₂ – óxido de titânio; P₂O₅ – óxido de fósforo; Fe_d – ferro ditionito; Fe_o – ferro oxalato; Ct – caulinita; Gb – gibsita; Ki – relação molecular sílica/alumina.

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico (Blake e Hartge, 1986) e a densidade do solo, pelo método do torrão parafinado descrito em Ferreira e Dias Júnior (1996). A superfície específica foi determinada pelo método do etileno-glicol-monoetil-éter (EMEG), de acordo com Heilman et al. (1965), e os óxidos, pelo ataque sulfúrico (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 e P_2O_5), segundo EMBRAPA (1997).

O pH em água, Ca, Mg, Al, P e K foram determinados conforme EMBRAPA (1997); Ca, Mg e Al foram extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e P, K e os micronutrientes Cu, Zn, Mn e Fe foram extraídos com solução de HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ (Mehlich 1). Também foram realizadas as determinações da acidez potencial (H+Al) e carbono orgânico, conforme Rajj et al. (1987).

Na fração argila, foram quantificados os teores de caulinita e gibbsita, através de análise termo-diferencial (ATD), sendo as amostras da mesma fração submetidas à difração de raios-X (método do pó) (Klug e Alexander, 1974) e os óxidos de ferro livre totais (Fe_d) usando o ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) (Mehra e Jackson, 1960).

Com base nas análises químicas, foram estabelecidas as doses de potássio a serem aplicadas nos solos para atingir 4, 6, 8 e 10% da CTC a pH 7,0 (saturação por K da CTC potencial).

3.2. Delineamento experimental, tratamentos e condução do experimento.

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4×5 , sendo quatro solos de várzea (RU, GX, GM e OY) e cinco níveis de saturação por K da CTC potencial (natural, 4, 6, 8 e 10%), com quatro repetições. Com base nas análises químicas dos solos (Tabela 1), as doses de K usadas para atingir 4, 6, 8 e 10% da CTC potencial foram, respectivamente: 127, 231, 335 e 439 mg dm^{-3} de K, para o solo OY; 155, 270, 385 e 500 mg dm^{-3} de

K para o solo GM; 60, 110, 161 e 212 mg dm⁻³ de K para o solo GX e 71, 127, 183 e 240 mg dm⁻³ de K para o solo RU. No tratamento sem adição de K, as plantas foram cultivadas com a saturação por K natural de cada solo, que corresponderam a 1,55, 1,30, 1,65 e 1,49% para os solos OY, GM, GX e RU, respectivamente, valores calculados com os dados dos teores de K e da CTC potencial apresentados na Tabela 1.

Juntamente com as doses de K, foi aplicada uma adubação básica de sementeira com 80 mg de N, 300 mg de P, 40 mg de S, 0,5 mg de B, 1,5 mg de Cu e 5,0 mg de Zn por dm³ de solo, na forma de reagentes p.a.: KNO₃, KH₂PO₄, K₂SO₄, NH₄NO₃, NH₄H₂PO₄, H₃BO₃, CuSO₄, ZnSO₄ e (NH₄)₂SO₄. Após a adubação, as amostras foram incubadas por mais 30 dias com umidade mantida a 70% do Volume Total de Poros (VTP). Após os 30 dias, com o solo seco, antes da inundação e do plantio do arroz, subamostras foram tomadas para novas análises químicas.

Em vasos com capacidade de cinco dm³, foram acondicionadas amostras de três dm³ dos solos com os tratamentos. Posteriormente, os vasos foram inundados com água deionizada, mantendo-se uma lâmina de três cm sobre a superfície do solo, sobre o qual, após 10 dias, foi conduzido o experimento com arroz.

Para tal foram transplantadas, no dia 1/02/2002, cinco mudas de arroz (*Oriza sativa* L. cv. Jequitibá), previamente germinadas em papel toalha, sendo desbastadas após 12 dias, para duas mudas, que foram conduzidas até o final do experimento (15/06/02), num total de 135 dias. As adubações em coberturas com nitrogênio foram realizadas a partir dos 34 dias, à medida da necessidade, igualmente para todos os tratamentos, aplicando-se 530 mg dm⁻³ de N, na forma de uréia, parcelados em 9 aplicações; aplicaram-se também 60 mg dm⁻³ de S, na forma de (NH₄)₂SO₄, parcelados em 3 aplicações. As fontes, na forma de

solução nutritiva, foram sempre aplicadas a três cm de profundidade da superfície do solo.

O experimento foi colhido na maturação dos grãos, após a qual novas subamostras dos solos foram tomadas para novas análises químicas.

3.3. Formas de potássio nos solos

Nas subamostras coletadas dos solos após a incubação com os tratamentos e a adubação básica, antes do cultivo, e nas coletadas após o cultivo, analisaram-se as seguintes formas de K: potássio total (Ktot), potássio não-trocável (Knt), potássio trocável (Ktr), potássio em solução (Ksol) e potássio disponível pelo Mehlich 1 (K M-1).

Os teores de potássio total (Ktot) foram obtidos através de digestão lenta em banho de areia de 0,1 g de terra fina seca em estufa obtida em peneira de 0,1 mm, em béquer de teflon de 100 mL com 10 mL de HF concentrado, 1,5 mL de HClO₄ concentrado e 3 mL de HNO₃ concentrado. Após a completa evaporação dos extratores e resfriamento, foram adicionados 5 mL de água destilada e 5 mL de HCl 6 mol L⁻¹ para dissolução do resíduo. Em seguida, a solução foi transferida para um balão volumétrico de 100 mL, completando-se o volume com água destilada (Jackson, 1970). Para a extração do K com ácido nítrico, foram adicionados 25 mL de HNO₃ 1 mol L⁻¹ em béquer de teflon de 100 mL contendo 2,5 g de TFSA, seguido por fervura em chapa quente por 10 minutos. O resíduo, após o resfriamento, foi filtrado em papel de filtro, utilizando-se HNO₃ 0,1 mol L⁻¹ e completando-se o volume para 100 mL (Knudsen et al., 1982). O potássio trocável foi determinado pelo acetato de amônio 1 mol L⁻¹ pH 7,0 (Mielniczuk, 1978) e o potássio disponível, pelo Mehlich 1 (EMBRAPA, 1997). A fração de potássio não trocável foi obtida pela diferença entre a fração extraída com HNO₃ 1 mol L⁻¹ por 10 minutos de fervura e aquela obtida com NH₄Ac 1 mol L⁻¹ pH 7,0. O potássio da solução foi avaliado indiretamente,

agitando-se 2,5 g de solo com 25 mL de CaCl_2 1 mmol L^{-1} por uma hora, deixando em repouso por duas horas, seguindo-se a centrifugação do material e a determinação da concentração do potássio em solução por fotometria de chama (Mielniczuk, 1978).

As quantidades de K consideradas liberadas de formas não prontamente disponíveis (Knt) e de formas prontamente disponíveis (Ktr) durante o cultivo foram calculadas por diferença entre as quantidades iniciais e finais do nutriente nos solos, antes e após o cultivo, bem como pelo total absorvido pelo arroz (Fernandes et al., 1993).

3.4. Variáveis analisadas

Na época do pleno florescimento, aos 90 dias, foram coletadas folhas bandeira das plantas de arroz, nas quais foram analisados os teores de potássio no tecido foliar (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1997) com o objetivo de estimar os níveis críticos foliares do nutriente.

No final do ciclo, as plantas foram colhidas e separadas em grãos e parte aérea (palha), as quais foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65-70°C até peso constante. Após a pesagem da matéria seca, os materiais vegetais foram analisados quimicamente para K, de acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira, 1997. As quantidades de K extraídas dos solos e acumuladas na parte aérea, bem como nos grãos, foram calculadas com base no teor do mesmo nos tecidos e na produção de matéria seca de cada parte.

As variáveis estudadas foram submetidas à análise de variância e a estudos de regressão utilizando o programa estatístico SISVAR. Através do ajuste de equações de regressão entre a produção de grãos e as saturações por K da CTC potencial estabelecidas nos tratamentos, foram estimadas as saturações por K necessárias para atingir a produção máxima e 90% da máxima em cada solo. Substituindo-se esses valores nas equações que relacionam o K disponível

nos solos pelo extrator Mehlich 1, em função das saturações por K estabelecidas nos tratamentos, foram estimados os níveis críticos de K disponível para 90% da produção máxima para os diferentes solos. Da mesma maneira, foram estimados os níveis críticos de K nos tecidos das folhas do arroz, coletadas na época do florescimento, pela substituição das saturações por K para 90% da produção máxima de grãos, nas equações de regressão que relacionam as saturações por K e os teores de K nas folhas do arroz na época do florescimento. Foram realizadas, também, correlações entre as formas de K nos solos e o K acumulado pelas plantas e com a produção de grãos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Formas de potássio dos solos

Na Tabela 2 encontram-se as formas de potássio e a contribuição percentual de cada forma para o K total dos solos estudados. Em relação ao potássio total (Ktot), observa-se que os teores foram diferentes entre os solos estudados, variando de 2646 mg dm⁻³ no Gleissolo Melânico (GM) a 8716 mg dm⁻³ no Neossolo Flúvico (RU). Prezotti e Defelipo (1987) e Villa (1999) também encontraram uma ampla variação para os teores de K total em várias classes de solos de Minas Gerais.

Para o solo RU, o K não trocável (Knt) foi a fração que mais contribuiu para o Ktot. Já para os demais solos, as frações que mais contribuíram foram as trocáveis e em solução. Para o solo GM, em relação aos demais solos estudados, a maior contribuição das formas mais prontamente disponíveis - K trocável (Ktr) e K disponível pelo Mehlich-1 (K M-1) - para o K total não indica elevados teores do nutriente no solo, pois essa contribuição está relacionada aos teores relativamente mais baixos obtidos para o K total desses solos. Villa (1999),

trabalhando com os mesmos solos do presente estudo, também encontrou resultados semelhantes para estas formas de K.

Segundo Villa (1999), os maiores valores da fração do Knt para os solos RU e OY sugerem que essa forma de reserva de potássio está relacionada com os teores mais elevados de silte (Tabela 1) e K total (Tabela 2) desses solos, os quais, por sua vez, estão relacionados com maiores valores de Ki (Tabela 1), indicando que são solos menos intemperizados que o GX e GM. Portanto, pode-se concluir que solos mais intemperizados (menor Ki) e com menores teores de silte vão apresentar, também, menores teores de Knt e K total.

Tabela 2. Teores de K total (Ktot), K não-trocável (Knt), K trocável (Ktr), K na solução (Ksol) e K disponível pelo extrator Mehlich 1 (K-M1) para os quatro solos de várzea após a incubação com calcário, na dose zero de K aplicado.

Solo	Ktot	Knt	Ktr	Ksol	K-M1
----- mg dm ⁻³ -----					
RU	8716	168 (1,9) ¹	99 (1,1)	35 (0,4)	52 (0,6)
GX	3342	41 (1,2)	79 (2,4)	36 (1,1)	44 (1,3)
GM	2646	35 (1,3)	137 (5,2)	53 (2,0)	88 (3,3)
OY	7228	75 (1,0)	127 (1,8)	52 (0,7)	86 (1,2)

¹número entre parênteses representa a contribuição percentual de cada fração do K para o Ktot.

A classificação do K do solo em trocável e não trocável, segundo Fernandes et al. (1993), em certas situações não se tem mostrado adequada. Um desses casos é quando acontece de a fração não trocável de K ser menor que a fração trocável, indicando que a extração com HNO₃ 1 mol L⁻¹ a quente pode não ser o melhor método para avaliar a reserva de potássio em certos solos.

Nesse estudo, esse fato ocorreu para os solos GX, GM e OY (Tabela 2), aspecto também observado por Villa (1999).

A maior capacidade de extração de potássio pelo acetato de amônio 1 mol L⁻¹ pH 7,0 em comparação ao HNO₃ 1 mol L⁻¹ a quente pode estar relacionada à presença de micas resistentes ao intemperismo nas frações silte e argila. Segundo Rich (1968), as micas podem estar revestidas por uma camada de alumínio, que atuaria impedindo a intemperização do mineral; portanto, quando se faz a extração com acetato de amônio 1 mol L⁻¹ pH 7,0, ocorre a precipitação do alumínio, liberando o potássio contido nas entrecamadas, que se encontrava anteriormente complexado.

Diversos trabalhos têm demonstrado expressiva contribuição de formas não trocáveis de K na nutrição das plantas (Patella, 1980; Richards et al., 1988; Nachtigall & Vahl, 1991 a, b; Silva et al., 1995; Melo et al., 1995). Essa fração pode ser absorvida pelos vegetais, fazendo com que, em determinados solos, a omissão da adubação potássica não resulte em redução na produção (Rosolem, Bessa e Pereira, 1993; Mengel e Rahmatullah, 1994).

Silva et al. (1995), trabalhando com um Latossolo Roxo álico (LRa) sem adubação potássica, durante dez anos com soja-trigo, verificaram que do teor total de K reduzido do solo, 72,6% eram provenientes de formas não trocáveis do elemento. Por isso, mesmo sendo consideradas como não trocáveis, frações mais facilmente disponíveis parecem estar associadas ao Knt, ou como já citado anteriormente, o extrator HNO₃ 1 mol L⁻¹ a quente não é o mais adequado para quantificar o Knt em alguns solos.

Todos os solos estudados apresentaram concentrações de potássio na solução de equilíbrio (Ksol) (Tabela 2) superiores à concentração considerada por Rajj (1981) como suficiente para o desenvolvimento vegetal, que é de 11,7 mg dm⁻³, comportamento observado também em solos de Minas Gerais (Prezotti e Defelipo, 1987; Villa, 1999).

De acordo com a CFSEMG (1999), os solos OY e GM estão com a CTC efetiva em nível considerado adequado e os solos GX e RU, em nível médio (Tabela 1). Os solos RU e GX, por possuírem as menores CTC efetivas, apresentam as maiores suscetibilidades a perdas de K por lixiviação, pois essa condição de baixa CTC favorece a manutenção de maiores quantidades de K na solução do solo. Para o potássio disponível (K-M1) (Tabela 2), os solos RU e GX foram classificados como de nível médio, e os solos GM e OY, como de nível bom (CFSEMG, 1999).

4.2. Aproveitamento das formas de potássio dos solos pelo arroz

Na Tabela 3 encontram-se os teores de K dos solos nas suas diferentes formas, após a aplicação dos tratamentos e antes do cultivo.

Com o aumento das doses de K estabelecidas nos tratamentos de saturação por K, de maneira geral aumentaram também os teores de K das formas avaliadas, com exceção do potássio não trocável (Knt) e do potássio total (Ktot).

Os solos GM e OY, que possuem CTC potencial maiores que os demais solos (Tabela 1), foram os solos que apresentaram os maiores teores de K trocável (Tabela 3), pois esses necessitaram de uma quantidade maior de K para atingir a mesma saturação por esse nutriente.

O solo GM foi o que apresentou os maiores valores das frações de potássio na solução (Ksol) e de potássio disponível pelo Mehlich-1 (K-M1). Contudo, esse foi o solo que apresentou a menor quantidade de potássio total (Ktot).

Na Tabela 4 são apresentados os teores de Ktr e Knt após o cultivo, o K total liberado durante o cultivo (Ktr + Knt liberados) e o K absorvido pelo arroz. Os valores de potássio trocável e não trocável liberados durante o cultivo foram

obtidos através da subtração entre os valores iniciais (Tabela 3) e finais (Tabela 4) de cada forma.

O valor de K liberado total (Tabela 4) foi obtido através da soma entre o K trocável liberado e o K não trocável liberado, multiplicada pelo volume de solo que havia nos vasos (3 dm³).

Tabela 3. Teores de Ktotal (Ktot), K não trocável (Knt), K trocável (Ktr), K solução (Ksol) e K disponível pelo Mehlich 1 (K-M1) após a aplicação dos tratamentos e antes do cultivo, para os quatro solos de várzea.

Solo	Sat. K (%)	Ktot	Knt	-----mg dm ⁻³ -----		
				Ktr	Ksol	K-M1
RU	Natural	8716	168	99	35	52
	4	9015	150	159	63	116
	6	8816	145	193	85	153
	8	9015	139	261	107	200
	10	9512	172	308	139	255
GX	Natural	3342	41	79	36	44
	4	3442	52	109	56	83
	6	3541	50	163	96	124
	8	3541	46	203	129	150
	10	4139	50	265	134	199
GM	Natural	2646	35	137	53	88
	4	2944	38	354	165	277
	6	3044	45	645	260	407
	8	2944	39	685	265	504
	10	2944	45	934	380	594
OY	Natural	7228	75	127	52	86
	4	7320	67	267	144	196
	6	7721	79	496	195	288
	8	7920	84	546	235	369
	10	8219	77	585	275	404

Tabela 4. Teores de K trocável e não trocável após o cultivo (final), quantidades de potássio liberadas e absorvidas durante o experimento em função da saturação por K (Sat. K).

Solo	Sat. K	K trocável		K não trocável		K Total Liberado	K Total Absorvido
		Final	Liberado	Final	Liberado		
		mg dm ⁻³				mg vaso ⁻¹⁽¹⁾	
		(%)					
RU	Nat	23 (76) ⁽²⁾	75	146 (13) ⁽²⁾	23	294	220(75) ⁽³⁾
	4	27 (83)	131	129 (14)	21	456	461(101)
	6	41 (78)	151	112 (23)	33	552	613(111)
	8	51 (80)	209	119 (14)	20	687	692(101)
	10	87 (72)	221	156 (9)	16	711	706(99)
GX	Nat	27 (65)	51	26 (37)	15	198	112(57)
	4	31 (71)	77	28 (46)	24	303	322(106)
	6	37 (77)	125	19 (62)	31	468	569(122)
	8	39 (81)	163	17 (63)	29	576	723(126)
	10	33 (87)	231	23 (54)	27	774	872(113)
GM	Nat	25 (81)	111	12 (66)	23	402	162(40)
	4	59 (83)	294	19(50)	19	939	719(77)
	6	63 (90)	581	22 (52)	23	1812	1048(58)
	8	91 (87)	593	24 (38)	15	1824	1267(69)
	10	117 (87)	816	21 (53)	24	2520	1440(57)
OY	Nat	37 (70)	89	37 (51)	38	381	293(77)
	4	29 (89)	237	41 (39)	26	789	762(97)
	6	43 (91)	452	34 (57)	45	1491	973(65)
	8	63(88)	482	25 (69)	57	1617	1137(70)
	10	101 (83)	484	32 (58)	45	1587	1128(71)

⁽¹⁾vaso de 3 dm³

⁽²⁾número entre parênteses representa a porcentagem de redução do K inicial com o cultivo

⁽³⁾número entre parênteses representa a porcentagem do K absorvido em relação ao K liberado total

Pela Tabela 4, observa-se que a capacidade de liberação de K, tanto das formas trocáveis quanto das formas não trocáveis, variaram bastante entre os solos durante o cultivo do arroz. O K trocável liberado aumentou em todos os

solos, seguindo a elevação das saturações por K, enquanto, para o K não trocável liberado, a variação foi totalmente aleatória; porém, pode-se notar, com exceção do solo GX, que os tratamentos sem adição de K tenderam a liberar mais Knt do que os tratamentos com 4% de saturação por K. Este fato demonstra que o arroz reduziu a eficiência de utilização de formas menos disponíveis de K com o aumento da disponibilidade de K. Silva et al. (1996) e Barros et al. (1986), trabalhando com espécies florestais, também verificaram comportamento semelhante.

A quantidade de potássio liberada durante o cultivo do arroz nos solos RU e GX, na maioria dos tratamentos, não foi suficiente para atender a demanda por K das plantas (Tabela 4), ocorrendo, desse modo, em uma quantidade absorvida maior do que a liberada, fato também observado por Villa (1999), Nachtigall e Vahl (1989) e Fernandes et al. (1993). Segundo Fernandes et al. (1993), esse fato se deve à presença de formas de K não extraídas pelo HNO_3 contribuindo para o suprimento de K ao arroz. Assim, é também possível que minerais da fração silte ou areia fina estejam contribuindo para o suprimento de K ao arroz (Munn et al., 1976), ou ainda que existam formas de K no solo não consideradas na descrição clássica do seu comportamento no solo (Fernandes et al., 1993).

Na Tabela 5 são apresentados os valores de Ktr inicial, liberado e porcentagem de Ktr liberado. Verifica-se que as porcentagens do Ktr liberado foram praticamente semelhantes em todos os solos.

Villa (1999), estudando as formas de K nos mesmos solos do presente estudo, porém com feijoeiro em condições de drenagem, verificou resultados semelhantes. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de existir, nos solos, um valor de Ktr mínimo que, ao ser atingido, se mantém praticamente constante, mesmo havendo extração pelas plantas em cultivos posteriores (Nachtigall & Vahl, 1991b) e em diferentes condições de disponibilidade de oxigênio.

Tabela 5. Quantidades de Ktr inicial, liberado e porcentagem do Ktr inicial que foi liberado no cultivo do arroz.

Solo	Sat. K (%)	K trocável Inicial	K trocável Liberado	Porcentagem de Ktr Liberado ⁽¹⁾
		mg vaso ⁻¹⁽²⁾		%
RU	Natural	297	227	76
	4	477	394	83
	6	578	454	78
	8	782	627	80
	10	925	663	72
GX	Natural	238	155	65
	4	327	233	71
	6	489	376	77
	8	608	490	81
	10	794	693	87
GM	Natural	411	334	81
	4	1062	884	83
	6	1935	1745	90
	8	2055	1781	87
	10	2802	2450	87
OY	Natural	381	269	70
	4	800	711	89
	6	1487	1356	91
	8	1636	1446	88
	10	1756	1452	83

⁽¹⁾ porcentagem de Ktr liberado em relação ao Ktr inicial

⁽²⁾ vaso de 3 dm³

Nachtigall & Vahl (1991b), trabalhando com solos do Rio Grande do Sul, encontraram uma ampla variação de Ktr mínimo (de 3,5 a 118 mg dm⁻³),

mostrando que não se deve levar em conta apenas o teor de Ktr como índice de disponibilidade de potássio para as plantas, pois em alguns casos pode-se subestimar a quantidade de potássio a ser aplicada.

Na Tabela 6 são apresentados os valores de Knt inicial, liberado e porcentagem de Knt liberado. Verifica-se que as porcentagens do Knt liberado também foram praticamente semelhantes em todos os solos, com exceção do solo RU, em que esta porcentagem foi menor em relação aos demais solos, por possuir as maiores quantidades de Knt inicial.

Na Tabela 7 pode-se verificar que houve uma correlação positiva entre a quantidade de potássio trocável inicial e a de potássio trocável liberado, fato também verificado por Villa (1999). Através desse resultado, pode-se inferir que quanto maior o teor inicial de potássio trocável, maior é a disponibilidade desse nutriente para as plantas ou para sua transformação em forma não extraída pelo acetato de amônio 1 mol L^{-1} pH 7,0, o que se assemelha aos resultados obtidos por Terman (1977), Soares (1978), Ramaswamy et al. (1979), Muthuswamy & Chiranjivi Rao (1979), Sanzonowicz & Vargas (1980), Santos & Cabral (1982) e Bull (1983), que também observaram que o potássio acumulado nas plantas aumentou conforme o aumento do teor do elemento no solo. Já para o potássio não trocável, não houve correlação significativa entre a quantidade de potássio não trocável inicial e a de potássio não trocável liberado.

O potássio absorvido (K abs) se correlacionou positivamente com o Ktr inicial e final, o Ktr liberado e com a MSGR; já para o Knt inicial, final e o liberado não houve correlação significativa. Esse resultado mostra que as formas menos disponíveis de K influenciaram muito pouco no K absorvido. Para a MSGR, o comportamento foi semelhante, isto é, para o Ktr inicial, final e o liberado houve correlação significativa, enquanto para o Knt inicial, final e o liberado, a correlação não foi significativa, mostrando que as formas mais prontamente disponíveis de K influenciaram mais na MSGR.

Tabela 6. Quantidades de Knt inicial, liberado e porcentagem do Knt inicial que foi liberado no cultivo do arroz.

Solo	Sat. K (%)	K não trocável Inicial	K não trocável Liberado	Porcentagem de Knt Liberado ⁽¹⁾
		-----mg vaso ⁻¹⁽²⁾ -----		-----%-----
RU	Natural	504	69	14
	4	450	63	14
	6	435	99	23
	8	417	60	14
	10	516	48	9
GX	Natural	123	45	37
	4	156	72	46
	6	150	93	62
	8	138	87	63
	10	150	81	54
GM	Natural	105	69	66
	4	114	57	50
	6	135	69	51
	8	117	45	38
	10	135	72	53
OY	Natural	225	114	51
	4	201	78	39
	6	237	135	57
	8	252	171	68
	10	231	135	58

⁽¹⁾ porcentagem de Knt liberado em relação ao Knt inicial

⁽²⁾ vaso de 3 dm³

Tabela 7. Coeficientes de correlação entre K trocável (Ktr) inicial, final e liberado; K não trocável (Knt) inicial, final e liberado; K absorvido (Kabs), matéria seca de grãos (MSGR) e número de perfilhos.

	Ktr inicial	Ktr final	Ktr liberado	Knt inicial	Knt final	Knt liberado	K abs.	MSGR
Ktr ini	-	-	-	-	-	-	-	-
Ktr final	0,86**	-	-	-	-	-	-	-
Ktr lib	0,99**	0,82**	-	-	-	-	-	-
Knt ini	-0,27ns	-0,08ns	-0,29ns	-	-	-	-	-
Knt final	-0,31ns	-0,09ns	-0,33ns	0,97**	-	-	-	-
Knt lib	0,19ns	0,06ns	0,21ns	-0,02ns	-0,25ns	-	-	-
K abs.	0,93**	0,80**	0,93**	-0,21ns	-0,27ns	0,29ns	-	-
MSGR	0,84**	0,65**	0,85**	-0,25ns	-0,34ns	0,42ns	0,95**	-
Perfilhos	0,16ns	-0,02ns	0,18ns	-0,88**	-0,86**	0,02ns	0,01ns	0,07ns

** e ns significativo ao nível de 1% e não significativo, respectivamente.

O número de perfilhos obteve correlação significativa e negativa, somente com os teores de Knt inicial e o Knt final. Barbosa Filho (1987) cita que o potássio tem pouco efeito no perfilhamento, a não ser em casos de extrema carência. Somente no solo GX, as saturações por K influenciaram significativamente o número de perfilhos.

A contribuição do Knt dos solos para as plantas (Tabela 8) foi calculada pela diferença entre o K total acumulado pela parte aérea das plantas e o K trocável liberado durante o cultivo, conforme descrito por Mielniczuk & Selbach (1978). Para alguns tratamentos foram verificadas contribuições negativas, como verificado principalmente para o solo GM. Segundo Nachtigall & Vahl (1991a), a contribuição negativa do Knt para as plantas significa que a quantidade de K absorvido pelas mesmas foi menor do que seu decréscimo de K trocável durante o cultivo. Comportamento semelhante foi observado por Hoagland & Martin (1933), citados por Nachtigall & Vahl (1991a), concluindo que os resultados não poderiam ser explicados com base no K contido nas raízes, excluídas na análise,

porque a proporção de K da planta contida nas raízes é muito baixa. Já Silva (1996), trabalhando com espécies florestais, cita que plantas mal supridas em potássio retêm maior quantidade do nutriente nas raízes, ao invés de transportá-lo para a parte aérea, sendo esse comportamento mais acentuado nas espécies pioneiras.

Tabela 8. Quantidade de K total acumulado, K trocável liberado e a contribuição do K não trocável, após o cultivo do arroz para os quatro solos de várzea.

Solo	Sat K (%)	K Total Acumulado	K Trocável Liberado	Contribuição Knt
RU	Natural	219	227	-8(-3) ¹
	4	460	394	66(14)
	6	612	454	158(26)
	8	692	628	64(9)
	10	705	663	42(6)
GX	Natural	112	155	-43(-39)
	4	322	233	89(28)
	6	570	377	193(34)
	8	723	490	233(32)
	10	871	693	178(20)
GM	Natural	163	335	-172(-106)
	4	720	885	-165(-23)
	6	1048	1745	-697(-67)
	8	1266	1781	-515(-41)
	10	1440	2450	-1010(-70)
OY	Natural	293	269	24(8)
	4	762	711	51(7)
	6	973	1357	-384(-40)
	8	1136	1446	-310(-27)
	10	1128	1452	-324(-29)

1 número entre parênteses representa a contribuição percentual do Knt para o total acumulado.

No solo GM à exceção das saturações natural e 4% no OY, não houve contribuição da forma de potássio não trocável (Knt) para o arroz, como pode ser verificado na Tabela 8, em que as contribuições de Knt foram negativas em todas as saturações de potássio. Esse fato pode ser explicado pelas maiores doses de K aplicadas nesses solos para se atingirem as porcentagens de saturação por K estabelecidas nos tratamentos. Maiores teores disponíveis de K (Ktr e Ksol) foram observados nesses solos (Tabela 3), os quais atenderam a exigência das plantas, não exigindo a contribuição do Knt. Já para os solos RU e GX, com exceção das saturações naturais, devido às menores doses de K aplicadas, as formas mais disponíveis de K não foram suficientes para suprir a exigência das plantas, sendo necessária, assim, a utilização de formas menos disponíveis de K.

Rosolem et al. (1988) verificaram que quando o solo apresentava originalmente menos que 58 mg dm^{-3} de K trocável, ocorria liberação de formas não trocáveis, com aproveitamento do nutriente pelas plantas. Por outro lado, quando o teor de K trocável era maior que 58 mg dm^{-3} , além da absorção pela planta, ocorreu indisponibilidade do K, que passou para formas menos disponíveis que o não trocável. Rosolem et al. (1988) também notaram que independentemente da quantidade de K trocável inicial no solo, a sua velocidade de liberação foi constante. Como a planta somente pode absorver parte desse nutriente, houve transferência do potássio para formas indisponíveis, tanto para o $\text{NH}_4\text{Ac } 1 \text{ mol L}^{-1} \text{ pH } 7,0$ quanto para o $\text{HNO}_3 \text{ } 1 \text{ mol L}^{-1}$.

Nota-se também que os solos GM e OY, que possuem maiores valores de CTC, matéria orgânica, argila e superfície específica (Tabela 1), foram os que menos liberaram Knt para as plantas (Tabela 8), ocorrendo, assim, uma maior competição entre o solo e as plantas pelo potássio não trocável.

4.3. Produção do arroz e níveis críticos de K

A análise de variância para matéria seca de grãos (MSGR) mostrou que os tratamentos (solo e saturação por K e a interação entre eles) influenciaram significativamente ($P < 0,01$) a variável analisada (Tabela 1A). Isto ocorreu mesmo com os solos estudados apresentando teores médios a altos de potássio (Tabela 2), possivelmente pelo fato de o experimento ter sido conduzido em vasos, onde as raízes das plantas ficaram limitadas a explorar apenas os três dm^3 de solo contidos nos mesmos.

4.3.1. Produção de matéria seca de grãos e níveis críticos de K nos solos

Nos solos GX e GM, as plantas tiveram uma resposta linear à aplicação de K; já para os solos RU e OY, as equações quadráticas foram as que melhor explicaram a produção de matéria seca de grãos em função das saturações de K dos solos (Figura 1).

A resposta linear à aplicação de K para os solos GX e GM mostra que as saturações utilizadas nos tratamentos foram insuficientes para se atingir a produção máxima.

Para todos os solos, nos tratamentos com saturações mais baixas de K, 0, 4 e 6%, foram observados sintomas típicos de deficiência de K. No tratamento sem aplicação de K, em todos os solos, ocorreram as maiores quantidades de grãos chochos e, conseqüentemente, baixo peso de MSGR nesses tratamentos. De acordo com Faquin (1997), o K apresenta função de transportador de fotoassimilados das folhas para os órgãos de reserva da planta, função essa que pode explicar o chochamento dos grãos das plantas deficientes no nutriente.

Para os solos RU e OY, a partir das equações apresentadas na Figura 1, foram estimadas as produções de MSGR e as saturações por K correspondentes à produção máxima e 90% da produção máxima (nível crítico), também considerado como a de máxima eficiência econômica (Alvares V. et al., 1988;

Malavolta et al., 1997; Spencer e Glendinning, 1980). Para os solos GX e GM que apresentaram relação linear entre a saturação por K e a MSGR, foram consideradas como máximas as médias das produções obtidas nas saturações do nutriente estabelecidas no tratamento 10% da CTC potencial (Tabela 9).

Entre os solos estudados, observa-se uma grande variação dos valores estimados para a saturação por K dentro de cada índice de produção (Tabela 9). No índice de 90% da produção máxima, as menores saturações por K observadas para os solos RU 4,0% e OY 4,4% (Tabela 9) ocorreram devido aos maiores incrementos na produção com as saturações mais baixas de K, o que resultou num ajuste do modelo quadrático aos solos (Figura 1). Já para os solos GX e GM, a saturação de K correspondente a 90% foi, respectivamente, 8,1% e 7,8%. Essas maiores saturações ocorreram devido ao ajuste linear dos dados (Figura 1), uma vez que as quantidades de K aplicadas não foram suficientes para atingir a produção máxima. Devido a esse fato, critica-se esse método de considerar como máxima a produção obtida na maior saturação por K.

Na Tabela 9 também se observa que as saturações por K para 90% da máxima produção de MSGR correspondem a 50% para o solo RU, 81% para o GX, 78% para o GM e 55% para o solo OY, da saturação por K, para a máxima produção. Essa redução na saturação de K na CTC acaba gerando uma economia com adubação, principalmente para os solos RU e OY, em que essa redução foi maior.

Os resultados apresentados na Figura 1 e Tabela 9 evidenciam a diferença na capacidade produtiva de arroz dos solos. Nos dois níveis de produção estabelecidos (90% e máxima), o solo GM foi o que obteve a maior produção de MSGR. Villa (1999), trabalhando com feijão, também verificou que no solo GM proporcionou maior produção de MSGR. Esse melhor desempenho do solo GM confirma os dados apresentados na Tabela 1, em que esse solo apresenta maiores valores de t, T, SB e V em relação aos demais solos e que não

há diferenças significativas quanto à capacidade de fornecimento de K pelos solos em ambientes bem aerados e inundados.

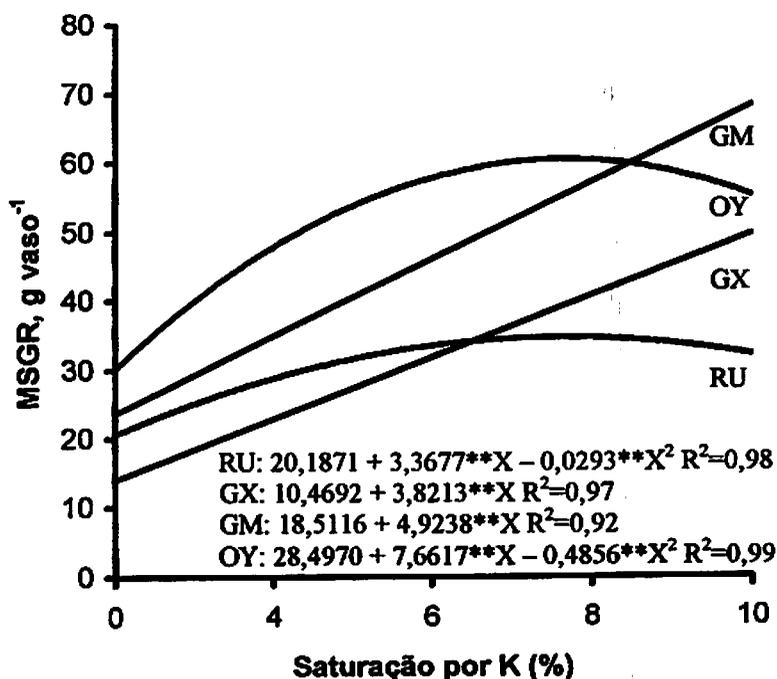


Figura 1. Produção de matéria seca de grãos (MSGR) pelo arroz em função da saturação por K da CTC potencial dos solos de várzea. (**significativo ao nível de 1%)

A partir das equações das Tabelas 10 e 11, foram calculados os teores de K disponível pelo extrator Mehlich 1 e as doses de K aplicadas aos solos, correspondentes à produção máxima e a 90% dessa produção (nível crítico), respectivamente.

Os coeficientes lineares das equações mostrados na Tabela 10 mostram haver uma grande diferença entre os solos para o K disponível na saturação

natural de cada solo, sendo os solos GX e RU os que proporcionaram os menores teores de K disponível pelo Mehlich 1. Os teores de K disponível pelo Mehlich 1 (K-M1) para a obtenção de 90% da produção máxima apresentaram também grande variação entre os solos (Tabela 10), maior que as observadas para as saturações por K (Tabela 9). Para o solo GM, faz-se novamente a crítica em relação ao se considerar como máxima a produção obtida na maior saturação por K; como pode ser visto na Tabela 10, o teor de K para o solo GM foi superestimado, pois a dose máxima aplicada nesse solo foi de 500 mg dm^{-3} , mais os 75 mg dm^{-3} iniciais, não chegariam a 600 mg dm^{-3} . Os altos teores de K apresentados na Tabela 10, ocorreram devido ao fato de o experimento ter sido conduzido em vaso, no qual o volume de solo é limitado, por isso as doses de K são elevadas.

Tabela 9. Produção estimada de matéria seca de grãos (MSGR) correspondente à produção máxima e 90% da máxima e as saturações por K estimadas para promover essas produções.

Solo	MSGR (g vaso^{-1})		Saturação por K (%)	
	90%	Máxima	90%	Máxima
RU	30,4	33,8	4,0(50) ⁽¹⁾	8,0
GX	41,5	46,1	8,1(81)	10,0
GM	57,0	63,3	7,8(78)	10,0
OY	52,8	58,6	4,4(55)	7,9

⁽¹⁾ representa a porcentagem em relação à saturação máxima, necessária para atingir 90% da máxima produção

Na Tabela 11, nota-se também uma grande diferença nas doses de K estimadas para atingir as saturações por K correspondentes à produção máxima e 90% da máxima. Assim, a recomendação de adubação potássica, objetivando atingir determinada faixa de saturação da CTC pelo nutriente, não pode ser

generalizada para todos os solos e culturas. Nesse caso, a melhor maneira seria estabelecer classes de valores de CTC, com recomendação específica de adubação potássica para cada classe, visando a atingir os valores ideais de saturação por K para determinada cultura.

Em solos do Rio Grande do Sul, Silva e Meurer (1988) obtiveram ótimas relações entre a porcentagem de saturação por K e o K absorvido pelas plantas, quando os solos foram agrupados em classes de CTC.

Tabela 10. Equações de regressão ajustadas para o K disponível pelo extrator Mehlich 1 (Y, em mg dm^{-3}) em função da saturação por K da CTC potencial (X, em %) e os teores estimados de K nos solos (K-M1), correspondentes à produção máxima e 90% da máxima.

Solo	Equação	R ²	Teores de K (mg dm^{-3})	
			90%	máxima
RU	$Y=42,9730+20,0405^{**}X$	0,98	121	203
GX	$Y=34,2973+15,3041^{**}X$	0,97	157	187
GM	$Y=85,4865+51,5203^{**}X$	0,99	487	600
OY	$Y=81,0000+33,5000^{**}X$	0,99	225	346

** significativo ao nível de 1%

Tabela 11. Equações de regressão ajustadas para o K disponível pelo extrator Mehlich 1 (Y, em mg dm^{-3}) em função das quantidades de K aplicadas aos solos (X, em mg dm^{-3}) e as doses estimadas de K aplicadas aos solos, correspondentes à produção máxima e 90% da máxima.

Solo	Equação	R ²	Doses de K (mg dm^{-3})	
			90%	máxima
RU	$Y=52,3642+0,8280^{**}X$	0,99	68	183
GX	$Y=42,0857+0,7175^{**}X$	0,99	161	212
GM	$Y=108,5597+1,0132^{**}X$	0,99	372	498
OY	$Y=99,3320+0,7477^{**}X$	0,98	142	329

** significativo ao nível de 1%

4.3.2. Níveis críticos de K na planta

Na época do florescimento, a concentração de K no tecido foliar do arroz para os solos RU e GX aumentou linearmente com o aumento das saturações por K, como se observa nas equações da Tabela 12. Já para os solos GM e OY, não houve diferença significativa entre as saturações de K.

Foram substituídas nas equações da Tabela 12, para os solos RU e GX, as saturações por K correspondentes a 90% da MSGR máxima (Tabela 9), estimando-se, assim, os níveis críticos foliares de K para esses solos. Para os solos GM e OY, como não houve efeito significativo entre as saturações por K para estimar esses valores, considerou-se a média dos valores obtidos nas saturações por K para esses solos.

Tabela 12. Equações de regressão ajustadas para os teores foliares de K (Y, em g kg⁻¹) na época do florescimento, como variável dependente das saturações por K estabelecidas nos tratamentos (X, em %) e os níveis críticos foliares para 90% da MSGR máxima.

Solo	Equação	R ²	Níveis críticos (g kg ⁻¹)
RU	Y=8,5783+0,2627** X	0,80	9,6
GX	Y=9,2599+0,2315* X	0,94	11,1
GM	Y=10,2	ns	10,2
OY	Y=11,5	ns	11,5

**,* significativo ao nível de 1 e 5%, respectivamente.

O solo GX, que é mais arenoso que o RU e também possui menor CTC efetiva (Tabela 1), apresentou o nível crítico ligeiramente maior que o RU (Tabela 12). Também Prezotti et al. (1988), trabalhando com eucalipto, encontraram os menores níveis críticos de K nas plantas cultivadas em solos arenosos, valores atribuídos ao fato de que grande parte do nutriente permanece

em solução, mesmo quando se aplica pequena quantidade de fertilizante potássico. Esse potássio que permanece na solução é prontamente absorvido, o que acaba gerando um nível crítico relativamente menor.

Tabela 13. Teores médios de K nas folhas bandeira na época do florescimento e parte aérea e MSGR de arroz, no final do ciclo (g kg^{-1}), em função das saturações de K estabelecidas nos tratamentos (%).

Solo	Sat K	Teores de Potássio				
		Folha bandeira	Parte aérea		MSGR	
	%	g kg^{-1}	g kg^{-1}	K abs (mg vaso^{-1})	g kg^{-1}	K abs (mg vaso^{-1})
RU	Natural	8,4	1,2(22,6) ¹	26	9,4(20,5) ¹	192
	4	10,3	7,9(25,0)	194	9,0(29,3)	262
	6	9,4	12,7(25,2)	318	8,8(33,2)	293
	8	10,6	13,9(27,3)	375	9,0(34,8)	312
	10	11,3	16,1(25,6)	409	9,1(32,3)	295
GX	Natural	9,4	1,6(32,5)	50	7,1(8,7)	62
	4	10,1	1,8(39,4)	71	9,6(26,2)	250
	6	10,3	4,9(37,8)	185	10,3(37,2)	381
	8	11,0	7,5(42,4)	315	9,9(41,2)	406
	10	11,8	9,4(46,4)	432	9,5(46,1)	437
GM	Natural	10,2	2,0(39,3)	79	6,6(12,7)	84
	4	9,2	6,4(52,1)	334	8,5(45,5)	383
	6	10,8	11,3(52,4)	592	8,6(52,6)	457
	8	10,8	12,9(56,6)	727	9,6(56,3)	539
	10	10,1	15,3(56,0)	855	9,2(63,4)	585
OY	Natural	11,5	1,3(46,6)	59	8,2(28,3)	230
	4	11,0	5,7(54,1)	306	8,7(52,0)	453
	6	11,2	10,3(49,9)	515	8,1(56,8)	459
	8	11,4	12,9(50,7)	654	8,3(58,1)	483
	10	10,1	13,5(50,9)	679	7,8(56,9)	443

¹número entre parênteses representa o peso em gramas da parte aérea e da MSGR, respectivamente.

Na Tabela 13 são apresentados os teores médios de K nas folhas bandeira na época do florescimento, na parte aérea e na MSGR na maturidade, em função das saturações de K estabelecidas nos tratamentos.

Pode-se inferir, portanto, que os atributos dos solos que influenciam o crescimento das plantas afetam também a eficiência de utilização dos nutrientes, conferindo-lhes diferentes quantidades de K absorvido durante o ciclo, embora com teores similares na época do florescimento, como pode ser visto na Tabela 13. Raij et al. (1996) estipularam uma faixa de suficiência para o teor de K nas folhas bandeira na época do florescimento de 13-30 g kg⁻¹. Na Tabela 13, observa-se que todos os níveis de K nos diferentes tratamentos ficaram abaixo dessa faixa, indicando que, por se tratar de vasos, nos quais as raízes exploram uma quantidade relativamente pequena de solo, as saturações por K dos tratamentos poderiam ter sido maiores.

5 CONCLUSÕES

O arroz inundado respondeu significativamente, em produção de grãos, à aplicação de K nos solos de várzea estudados.

Os teores de K total, K trocável, K não trocável e K na solução foram diferentes entre os solos, assim como suas respectivas contribuições para a nutrição do arroz.

No solo RU, o K não trocável (K_{nt}) foi a fração que mais contribuiu para o K_{tot}. Já para os demais solos, as frações que mais contribuíram foram as trocáveis e em solução.

Com o aumento das doses de K nos tratamentos, aumentaram os teores de K trocável e do K na solução; já para o K não trocável, praticamente não houve alteração.

Os menores teores das frações de potássio total (Ktot) e potássio não trocável (Knt) foram observados nos solos GM e GX, os quais possuem os menores valores de Ki (solos mais intemperizados).

As diferentes características dos solos nos seus atributos levaram a níveis críticos de K diferentes entre os solos; porém nas plantas os níveis críticos não variaram.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F. de; BRAGA, J. M.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; RIBEIRO, A. C.; DEFELIPO, B. V. Avaliação da fertilidade do solo: metodologia In: SIMPÓSIO DA PESQUISA NA UFV, 1., 1988, Viçosa. Resumos... Viçosa: UFV, 1988. p. 68-69.

ANDRADE, C. A. de B. Limitações de fertilidade e efeito do calcário para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em solos de várzea do sul de Minas Gerais. 1997. 107 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

BARBER, S. A. The role of root interception, mass flow and diffusion in regulating the uptake of ions by plants from soil. Technical Reports Series International Atomic Energy Agency, Viena, v. 65, p. 30-45, 1966.

BARBOSA FILHO, M. P. Nutrição e adubação do arroz (sequeiro e inundado). Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 129 p. (Boletim técnico, 9).

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; CARMO, D. N.; NEVES, J. C. Classificação nutricional de sítios florestais – descrição de uma metodologia. Revista Árvore, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 112-120, jan./jun.1986.

BLAKE, G. R. ; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (Ed.) Methods of soil analysis. Madison, ASA, 1986. v. 1, p. 377-382.

BÜLL, L. T. Formas de potássio e suas relações com parâmetros vegetais em alguns solos da região de Botucatu. 1983. 100 p. Dissertação (Mestrado em solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

COMISSÃO DE FERTILIZANTES DO ESTADO DE MINAS GERAIS
Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª.
Aproximação. 1999. 359 p.

CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. Solos de várzea de Minas Gerais.
Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 13, n. 152, p. 3-10, mar. 1988.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: **BLACK, C. A.**
(Ed.). **Methods of soil analysis.** Madison: ASA, 1965. v. 1, p. 545-566.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Arroz e Feijão.
Apresenta informações sobre a cultura do arroz. Disponível em: <http://www.cnpaf.embrapa.br>. Acesso em 02 set. 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro
Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de**
classificação de solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de
Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço
Nacional de Levantamento e Conservação de Solo. **Manual de métodos de**
análise de solo. Rio de Janeiro: Ministério da agricultura, 1997. 212 p.

FAQUIN, V. Nutrição mineral de plantas. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 227
p.

FASSBENDER, H. W. Química de suelos: com énfasis en suelos de América
Latina. 2. ed. San José, Costa Rica: IICA, 1994. 420 p.

FERNANDES, D. M.; ROSSETTO, C. A. V.; ISHIMURA, I. ; ROSOLEM, C.
A. Nutrição da soja e formas de potássio no solo em função de cultivares e
adubação potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 17, n.**
3, p. 405-410, set./dez. 1993.

FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M de S. Estabilidade de agregados In:
Roteiro das aulas práticas de Física do solo. Lavras: UFLA, 1996.

GALRÃO, E. Z. Aplicação de micronutrientes e calcário no rendimento da soja
em solos de várzea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 14, n.**
3, p. 381-384, set./dez. 1990.

GAMA, N. V. Liberação e absorção de potássio em alguns solos. *Agronomia Lusitana*, Oeiras - Portugal, v. 29, n. 1-2, p. 99-115, mar. 1967.

GRIMME, H. Soil factors of potassium availability. *Indian Society of Science*, New Delhi, v. 10, n. 1, p. 3-22, 1976.

HEILMAN, M. D.; CARTER, D. L.; GONZALES, C. L. The ethylene glycol monoethyl ether (EMEG) technique for determining soil surface area. *Soil Science*, Baltimore, v. 100, n. 6, p. 409-413, June 1965.

HOAGLAND, D. R.; MARTIN, J. C. Absorption of potassium by plants in relation to replaceable, non-replaceable, and soil solution potassium. *Soil Science*, Baltimore, v. 36, n. 1, p. 1-33, Jan. 1933.

HUBER, D. M.; ARMY, D. E. Interaction of potassium with plant disease. In: **NUNSON, R. D. (Ed.)**. Potassium in agriculture. Madison: American Society of Agronomy, 1985. Cap. 20, p. 467-488.

JACKSON, M. L. Análisis química de suelos. 2. ed. Barcelona: Omega, 1970. 66 p.

KLUG, H. P. ; ALEXANDER, L. E. X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials. New York: John Wiley, 1974. 716 p.

KNUDSEN, D.; PETERSON, G. A.; PRATT, P. F. Lithium, sodium and potassium. In: **PAGE, A. L. (Ed.)**. Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p. 225-246.

LANA, M. C. do; NEVES, J. C. Capacidade de suprimento de potássio em solos sob reflorestamento com eucalipto no Estado de São Paulo. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 18, n. 2, p. 115-122, maio/ago. 1994.

LOPES, A. S. Manual de fertilidade do solo. São Paulo: ANDA/POTAFOS, 1989. 153 p.

MALAVOLTA, E. Manual de química agrícola: adubos e adubação. São Paulo: Ceres, 1981. 604 p.

- MALAVOLTA, E.; CROCOMO, O. J. Funções do potássio nas plantas. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 8., 1982 Londrina. Anais... Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1982. p. 95-162.**
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas - princípios e aplicações. Piracicaba: Potafos, 1997. 210 p.**
- MARIANO, E. D. Resposta, níveis críticos e eficiência de extratores para boro em feijoeiro cultivado em solos de várzea. 1998. 82 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Olanas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.**
- MARIANO, I. O. dos. S. Efeito residual da adubação fosfatada e da calagem, níveis críticos e disponibilidade de fósforo para o arroz em solos inundados. 1999. 74 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.**
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.**
- MASCARENHAS, H. A. A.; BULISANI, E. A.; MIRANDA, M. A. C.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; BRAGA, N. R. Deficiência de potássio em soja no Estado de São Paulo: melhor entendimento do problema e possíveis soluções. O Agrônomo, Campinas, v. 40, p. 34-43, 1988.**
- MEHRA, O. P.; JACKSON, N. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays and Clays Minerals, New York, v. 3, p. 317-327, 1960.**
- MELO, V. F.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M.; NOVAIS, R. F.; FONTES M. P. F. Formas de potássio e de magnésio em solos do Rio Grande do Sul, e sua relação com o conteúdo na planta e com a produção em plantios de eucalipto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 19, n. 2, p. 165-171, maio/ago. 1995.**
- MENGEL, K.; RAHMATULL, A. H. Exploitation of potassium by various crop species from primary minerals in soils rich in micas. Biology and Fertility of Soils, Berlin, v. 17, n. 1, p. 75-79, Jan. 1994.**
- MIELNICZUK, J. O potássio no solo. Piracicaba: Instituto de Potassa e do Fosfato, 1978. 80 p. (Boletim Técnico, 2)**

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

MUNN, D. A.; WILDING, L. P.; McLEAN, E. O. Potassium release from sand, silt and clay soil separates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, n. 3, p. 363-366, May/June 1976.

MUTHUSWAMY, P.; CHIRANJIVI RAO, K. Influence of nitrogen and potash fertilization on tuber yield and starch production in Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) varieties. **Potash Review**, Berne, v. 27, n. 5, p. 1-2, 1979.

NACHTIGALL, G. R.; VAHL, L. C. Capacidade de suprimento de potássio dos solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 37-42, jan./abr. 1991a.

NACHTIGALL, G. R.; VAHL, L. C. Dinâmica da liberação de potássio dos solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 43-47, jan./abr. 1991b.

NACHTIGALL, G. R.; VAHL, L. C. Formas de potássio em solos da região sul do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 1, p. 7-12, jan./abr. 1989.

OLIVEIRA, V.; LUDWICK, A. E. ; BEATTY, M. T. Potassium removed from some Southern soils by exhaustive cropping and chemical extraction methods. **Soil Science Society America Proceedings**, Madison, v. 35, n. 5, p. 763-767, Sept./Oct. 1971.

OMAR, M. A; EL KOBBA, T. Some observations on the interrelationships of potassium and magnesium. **Soil Science**, Baltimore, v. 101, n. 6, p.437-441, June 1966.

PARRA, M. S. Nutrição e adubação. In FUNDAÇÃO INSTITUTO AGRÔNOMICO DO PARANÁ. **O feijão no Paraná**. Londrina: IAPAR, 1989. 303 p. (IAPAR. Circular, 63).

PATELLA, J. F. Influência de quinze anos de adubação NPK sobre o rendimento do trigo e algumas propriedades solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 1, p. 31-35, jan./abr. 1980.

- PATRICK JR., W. H.; REDDY, C. N. Chemical changes in rice soils. In: BRADY, N. C. **Soils and rice**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1978. p. 361-379.
- PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 24, p. 28-96, 1972.
- PREZOTTI, L. C.; DEFELIPO, B. V. Formas de potássio em solos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 2, p. 109-114, maio/ago. 1987.
- PREZOTTI, L. C.; DEFELIPO, B. V.; VENEGAS, V. H. A.; BARROS, N. F. de. Nível crítico de potássio no solo para a produção de mudas de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 1, p. 65-70, jan./abr. 1988.
- PROVARZEAS. Programa nacional para o aproveitamento de terras de várzea irrigáveis - PROVARZEAS - Brasil. Brasília, DF, 1981. n. p.
- RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato - Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142 p.
- RAIJ, B. van. Disponibilidade de potássio em solos do Brasil. In: POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1982, Londrina. **Anais...** Piracicaba, 1982. p. 67-76.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. N. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo; Fundação IAC, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargil, 1987. 170 p.
- RAMASWAMY, N.; SUNDARARAJAN, S.; KADER, M. D. A. Effect of application of different levels of potash on the yield of Dwarf Covendish banana. **Potash Review**, Wageningen, v. 27, n. 5, p. 1-2, 1979.
- RAO, D. N.; MIKKELSEN, D. S. Effect of acetic, propionic and butyric acids on Young rice seedling's growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 69, n. 6, p. 923-928, Nov./Dec. 1977.

REITEMEIER, R. F. The chemistry of soil potassium. *Advances in Agronomy*, New York, v. 3, p. 133-164, 1951.

RICH, C. I. Mineralogy of soil potassium. In: KILMER, V. J.; YOUNTS, S. E.; BRADY, N. C. *The role of potassium in agriculture*. Madison: SSSA, 1968. p. 79-108.

RICHARDS, J. E.; BATES, T. E.; SHEPPARD, S. C. Studies on the potassium-supplying capacities of Southern Ontario soils. I: Field and greenhouse experiments. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v. 68, n. 2, p. 183-197, May 1988.

RITCHEY, K. D. **O potássio nos oxissolos e ultissolos dos trópicos úmidos**. Piracicaba, SP: Instituto da Potassa / Fosfato (EUA), Instituto Internacional da Potassa (Suíça), 1982. 69 p. (Boletim Técnico, 7).

ROSOLEM, C. A. **Nutrição mineral e adubação da soja**. Piracicaba: Instituto de Potassa e do Fosfato, 1982 80 p. (Boletim Técnico, 6).

ROSOLEM, C. A.; BESSA, A. M.; PEREIRA, H. F. M. Dinâmica do potássio no solo e nutrição potássica da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 28, n. 9, p. 1041-1054, set. 1993.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; RIBEIRO, D. B. O. Formas de potássio no solo, nutrição potássica da soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 12, n. 2, p. 121-125, maio/ago. 1988.

SANCHEZ, P. A. *Properties and management of soils in the tropics*. New York: J. Wiley, 1976. 618 p.

SANTOS, J. Q.; CABRAL, F. M. The response of berseem (*Trifolium alexandrinum* L.) to liming and potassium. *Potash Review*, Berne, v. 7, n. 5, p. 1-3, 1982.

SANZONOWICZ, C.; VARGAS, A. A. T. Efeito do calcário e do potássio na produção e na composição química do *Stylosanthes guyanensis* em um Latossolo Vermelho-Escuro de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 4, n. 3, p. 165-169, set./dez. 1980.

SILVA, D. N. da; MEURER, E. J.; KAMPF, N.; BORKERT, C. M. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolos do estado do Paraná e suas relações

com a disponibilidade para as plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 19, n. 3, p. 433-439. set./dez. 1995.

SILVA, I. R. Crescimento inicial, absorção de macromolimentos e eficiência nutricional em espécies florestais nativas submetidas à adubação potássica. 1999. 53 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SILVA, I. R. da; FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R. do; CURTI, N. Eficiência nutricional para potássio em espécies florestais nativas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 20, n. 2, p. 257-264, maio/ago.1996.

SOARES, E. Influência do teor de potássio trocável do solo na absorção de cálcio e magnésio pela soja (*Glicine max* L. Merrill). 1978. 116 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SPARKS, D. L. Chemistry of soil potassium in Atlantic Coastal Plain soils: a review. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 11, n. 5, p. 435-449, 1980.

SPENCER, K. ; GLENDINNING, J. S. Critical soil test values for predicting the phosphorus and sulfur status of subhumid temperate pastures. *Australian Journal of Soil Research*, Victoria, v. 18, n. 4, p. 435-445, 1980.

TERMAN, G. L. Yields and nutrient accumulation by determinate soybean, as affected by applied nutrients. *Agronomy Journal*, Madison, v. 69, n. 6, p. 234-238, Nov./Dec. 1977.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. Soil fertility and fertilizers. 5. ed. New York: Macmillan, 1993. 634 p.

VILLA, M. R. Potássio em solos de várzea e nutrição potássica do feijoeiro. 1999. 57 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

ANEXO

TABELA 1A Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) da produção de material seca de grãos (MSGGR) em função das saturações por K e solos estudados.

Tabela 1A. Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) da produção de matéria seca de grãos (MSGGR) em função das saturações por K e solos estudados.

Fonte de variação	G.L.	Quadrado Médio MSGR
Solo	3	2073**
Saturação por K	4	2733**
Saturação por K x solo	12	160**
Resíduo	60	9
TOTAL	79	
C.V. (%)		7,85

** significativo a 1%