

MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE POTÁSSIO PARA A CULTURA DO TRIGO EM SOLOS DOS CAMPOS GERAIS, ESTADO DO PARANÁ¹

Roberto Martins²
Vander de Freitas Melo²
Beatriz Monte Serrat²

RESUMO

A definição de métodos mais adequados para estimar a disponibilidade de K do solo para o cultivo de plantas pode reduzir a quantidade de adubo aplicado, sem que ocorram perdas na qualidade e produtividade. O objetivo deste trabalho foi estudar diferentes métodos de determinação da disponibilidade de K para a cultura do trigo, com ênfase nas frações não-trocáveis, em solos dos Campos Gerais, Estado do Paraná, com diferentes estádios de intemperismo e originados de vários materiais de origem (Neossolo Litólico-arenito; Cambissolo Háptico-granito, silito/arcósio, micaxisto, diabásio e conglomerado; Nitossolo Háptico-micaxisto; Latossolo Bruno-embrechito e riolito; e Latossolo Vermelho-diabásio). Nos dez perfis selecionados foram abertas trincheiras de 40 cm (camada arável), de onde se coletaram amostras de solo para a execução do experimento em casa de vegetação e realização das análises químicas. As unidades experimentais foram constituídas por vasos com 4 dm³ de solo e dez plantas aptas, distribuídas em blocos ao acaso, com três repetições. Para avaliar o balanço nutricional de K no sistema solo-planta, determinou-se o teor total do nutriente no material vegetal (raiz, folha mais caule e grão) e o teor trocável na TFSA (Mehlich-1), antes e após o plantio. As formas não-trocáveis de K foram determinadas por extrações com ácido nítrico fervente em diferentes concentrações (0,25; 0,50; 1,00; 2,00; e 4,00 mol L⁻¹). Verificaram-se coeficientes de correlação altos e significativos entre o K acumulado na parte aérea das plantas e os teores no solo antes do plantio pelos métodos de extração com HNO₃ 4 mol L⁻¹ e acetato de amônio 1 mol L⁻¹ (r = 0,86** e 0,87**, respectivamente), indicando que as frações trocáveis e não-trocáveis do nutriente estão em equilíbrio na maioria dos solos. A contribuição de frações não-trocáveis

¹ Aceito para publicação em 1º.5.2004.

² Dep. de Solos, Universidade Federal do Paraná-UFPR. Rua dos Funcionários, 1.540, Juvevê, 80035-050 Curitiba, PR. vanderfm@ufpr.br

de K do solo na nutrição mineral do trigo foi mais expressiva nos Cambissolos Háplicos originados de granito, micaxisto e conglomerado e no Neossolo Litólico originado de arenito, chegando a 54% do total acumulado pelas plantas. Nos solos em que os teores trocáveis de K antes do plantio eram maiores, não houve contribuição da reserva do nutriente na nutrição das plantas.

Palavras-chave: K não-trocável, conteúdo de K, balanço nutricional.

ABSTRACT

METHODS OF DETERMINATION OF POTASSIUM AVAILABILITY FOR WHEAT IN SOILS OF CAMPOS GERAIS, PARANÁ, BRAZIL

Defining proper methods to estimate soil K availability for plant growth may reduce the amount of applied fertilizer without compromising yield and quality. The aim of this study was to evaluate different methods of determining K availability for wheat cropped in soils of Campos Gerais, Paraná, with different degrees of weathering and parent materials (Litosol-sandstone, Cambisol-granite, siltstone, mica-rich rock, diabase and conglomerate, Nitosol-mica-rich rock and Latosol-embrechite, riolite and diabase). Soil samples, collected from 0 to 40 cm (plow layer) in the ten profiles, were used in a greenhouse study and also for chemical analysis. The experimental units consisted of pots containing 4 dm³ of soil where 10 wheat plants were grown, arranged in a completely randomized design with three replications. To evaluate the nutritional balancing of K in the soil-plant system, the K content was determined in different plant parts (leaves plus stems, grains and roots) and for soil exchangeable form (Mehlich-1), before and after planting. Non-exchangeable K was estimated by boiling soil with nitric acid at different concentrations (0.25, 0.50, 1.00, 2.00 and 4.00 mol L⁻¹). High and significant correlation coefficient values were verified between K accumulated in the aerial part of the plants and K extracted from soil before planting by applying the extraction methods using nitric acid 4.00 mol L⁻¹ and ammonium acetate 1 mol L⁻¹ ($r = 0.86^{**}$ and 0.87^{**} , respectively), showing that exchangeable and non-exchangeable K fractions were in equilibrium in most of the soils. The contribution of non-exchangeable fractions of K to wheat mineral nutrition was more expressive in the Cambisols originated from granite, sandstone, mica-rich rock and conglomerate, reaching 54% of the total values accumulated by the plants. In the soils with higher exchangeable K contents before planting, there was no contribution of the nutrient reserve to plant nutrition.

Key words: non-exchangeable K, K content, nutritional balance.

INTRODUÇÃO

A avaliação da contribuição de frações não-trocáveis e estruturais de K na nutrição de culturas anuais, como trigo, arroz, milho, feijão e soja, pode ser importante na economia de adubos e no cultivo de plantas em melhor estado nutricional. Estudos têm sido realizados, por meio de técnicas de cultivos sucessivos e extrações químicas empregando HNO₃ fervente 1 mol L⁻¹, lavagens sucessivas com HCl 0,01 mol L⁻¹, ácidos orgânicos de baixo peso molecular (cítrico e oxálico) e resinas trocadoras de cátions (26).

Patella (21) constatou que o teor de K trocável de um solo originado de granito no Rio Grande do Sul diminuiu muito pouco na parcela sem adubação, durante 15 anos de cultivo com trigo, revelando a alta capacidade do solo estudado em repor o K absorvido pelas plantas a partir de frações inicialmente não-trocáveis. Outros autores concluíram que a contribuição de frações não-trocáveis de K no total absorvido pelas plantas, em cultivos sucessivos de milho e soja, pode chegar a até 86% (18, 19). Melo et al. (12) observaram que a contribuição de frações não-trocáveis de potássio foi importante para a nutrição do eucalipto, ao longo do seu ciclo de cultivo. De acordo com os autores, as árvores extraíram quantidades de K superiores às detectadas pelos métodos de rotina (K trocável), fato evidenciado pela maior correlação entre os teores de K no solo extraído com ácido nítrico fervente e seu conteúdo na planta. Da mesma forma, Nachtigall e Vahl (18) encontraram altos coeficientes de correlação ($r = 0,92^{***}$) entre a extração de K pelas plantas em cultivos sucessivos e o K extraído pelo ácido nítrico fervente. Apesar do alto poder de predição do método, o K não-trocável absorvido pelas plantas neste trabalho constituiu, aproximadamente, apenas 26% do K não-trocável extraído com HNO_3 1 mol L^{-1} fervente.

Além do efeito da diminuição dos teores dos nutrientes na solução do solo, aumentando a liberação de frações não-trocáveis, o processo de absorção de cátions pelas plantas acarreta a formação de microrregião com alta concentração de H^+ , acelerando o processo de liberação de K pelo intemperismo dos minerais (25). Além disso, ácidos orgânicos que são exsudados pelas raízes e produzidos no solo, por meio da decomposição de resíduos de plantas e de animais e pelo metabolismo de microrganismos, atacam os minerais do solo, liberando o nutriente para a solução (27).

Simard et al. (26) estudaram o efeito do ácido cítrico na liberação de K das frações silte e argila do solo, por meio de variações mineralógicas na extração, e estabeleceram a seguinte seqüência decrescente de resistência dos minerais ao intemperismo: feldspato > muscovitas > cloritas > biotita ~ vermiculita trioctedral. Nos solos em que as frações silte e argila tinham micas de natureza trioctedral, ocorreu a maior liberação de K com ácido cítrico, comparado às micas dioctedrais, e maior absorção de K não-trocável pelas plantas. Esses autores também encontraram alta correlação entre o K absorvido pelas plantas e o K extraído com HNO_3 1 mol L^{-1} ($r = 0,90^{***}$). Segundo eles, a extração com ácido nítrico fervente envolve forte reação de hidrólise, atacando a estrutura das argilas silicatadas.

O objetivo deste trabalho foi estudar diferentes métodos de determinação da disponibilidade de K para a cultura do trigo em solos dos Campos Gerais, Estado do Paraná, com ênfase nas frações não-trocáveis.

MATERIAL E MÉTODOS

Amostragem dos solos

O estudo foi realizado com solos do Paraná, distribuídos entre as coordenadas geográficas de 24°30' a 25°00' de latitude sul e 49°45' a 50°15' de longitude oeste, onde estão situadas as litologias que compõem o Grupo Castro (Quadro 1), envolvendo a região do ABC no município de Castro. O principal critério utilizado na amostragem dos solos foi o material de origem, mas também se levaram em consideração a topografia, textura e profundidade, o que resultou em diferentes classes de solos.

Para se verificar a relação entre reserva mineral e grau de intemperismo do solo, no micaxisto e no diabásio foram amostrados solos com diferentes estádios de desenvolvimento (Cambissolo, Nitossolo e Latossolo), perfazendo dez coletas (Quadro 1). Para cada unidade amostrada, procurando eliminar a interferência de possíveis adubações, o solo foi coletado em áreas onde não ocorreu intervenção antrópica. Foram abertas trincheiras coletando-se e misturando os horizontes entre 0 e 40 cm de profundidade, onde se verificam maior crescimento e distribuição radicular, simulando, assim, as condições de campo.

Instalação do experimento

A condução do experimento foi em casa de vegetação, sendo a unidade experimental constituída por um vaso com 4 dm³ de solo (seco ao ar é passado em peneira de 6 mm de malha), e a densidade de semeadura de trigo do cultivar BRS 49 de 400 sementes m⁻² (20), o que resultou, após o desbaste, em dez plantas por vaso. Os vasos foram regados periodicamente para atingir a capacidade de campo. As três repetições por tratamento foram delineadas em blocos casualizados, perfazendo 30 unidades experimentais.

A necessidade de calagem para cada amostra de solo foi determinada de acordo com os resultados da análise química de rotina (Quadro 2), aplicando-se a quantidade de calcário necessária para atingir 70% da saturação de bases (20). Utilizou-se calcário dolomítico, evitando, desta forma, que ocorresse desequilíbrio entre Ca e Mg. A adubação com macro e micronutrientes foi completa e aplicada em solução antes do plantio, sendo as recomendações feitas por Malavolta (10) e Raij et al. (23). A única exceção foi com o K, em que se omitiu a aplicação do nutriente. As quantidades totais de corretivo e fertilizantes foram: N - 20 mg dm⁻³ (sulfato de amônio); P (P₂O₅) - 60 mg dm⁻³ (superfosfato triplo); e calcário dolomítico—variando, entre os diferentes solos, de 2,0 a 4,0 g dm⁻³.

QUADRO 1 - Profundidade de horizontes, análise textural e material de origem dos perfis selecionados

Perfil	Classe de solo ¹	Horiz	Prof. de amostragem cm	Litologia ²	Textura ³		
					Areia	Silte	Argila
					-----g kg ⁻¹ -----		
1	Cambissolo Háptico	A	0 - 30	Granito	508	131	361
		AB	30 - 40+	(Gr)			
2	Latossolo Bruno	A	0 - 26	Embrechito	152	217	631
		AB	26 - 36	(Em)			
		B	36 - 40+				
3	Neossolo Litólico	A	0 - 40+	Arenito (Ar)	716	114	170
4	Cambissolo Háptico	A	0 - 25	Argilito/ Siltito/	355	165	480
		AB	25 - 35	Arcósio			
		B	35 - 40+	(Si/Arc)			
5	Nitossolo Háptico	A	0 - 40	Micaxisto (Mi)	338	135	527
6	Cambissolo Háptico	A	0 - 12	Micaxisto	477	215	308
		B	12 - 40+	(Mi)			
7	Latossolo Bruno	A	0 - 40+	Riolito (Ri)	232	182	586
8	Cambissolo Háptico	A	0 - 35	Dique	218	222	559
		B	35 - 40+	Diabásio (Di)			
9	Latossolo Vermelho	A	0 - 35	Dique	88	126	786
		B	35 - 40+	Diabásio (Di)			
10	Cambissolo Háptico	A	0 - 18	Conglomerado	643	98	259
		AB	18 - 30	(Co)			
		B	30 - 40+				

¹ As características das diferentes unidades de solo incluídas na amostragem estão descritas pela EMBRAPA (4).

² Litologias do Grupo Castro com diferentes composições mineralógicas. Riolitos e outras rochas da seqüência vulcânica ácida são essencialmente compostos por quartzo, feldspatos alcalinos (ortoclásio e sanidina), sericita e vidro vulcânico. Granito Cunhaporanga com quartzo, microclínio, oligoclásio, hornblenda e biotita. Arenitos estratificados em finas camadas de siltito e argilito com elevada quantidade de minerais micáceos. Conglomerados com matriz arenosa e grosseira (fragmentos de rocha), feldspática e lítica (5).

³ Amostra de 0 a 40 cm (3).

QUADRO 2 - Características químicas da camada de 0 a 40 cm de profundidade, antes da calagem e adubação dos solos¹

Perfil	Classe	pH	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	P	CO	pH	V
		CaCl ₂	-----cmol _c dm ⁻³ -----				mg dm ⁻³	g dm ⁻³	SMP	%	
1	Cambissolo Háptico	3,9	2,6	9,0	0,5	0,3	0,05	3,5	17,8	5,2	5,7
2	Latossolo Bruno	4,2	1,4	9,0	0,5	0,4	0,08	1,5	23,2	5,2	6,0
3	Neossolo Litólico	4,0	2,6	8,4	0,3	0,2	0,11	1,2	15,4	5,3	4,6
4	Cambissolo Háptico	4,2	2,8	9,7	0,8	0,5	0,19	0,6	17,8	5,1	9,2
5	Nitossolo Háptico	4,2	2,1	8,4	0,6	0,4	0,06	1,0	18,4	5,3	7,2
6	Cambissolo Háptico	4,2	2,7	7,2	0,3	0,2	0,12	0,8	8,8	5,5	5,5
7	Latossolo Bruno	4,1	3,7	11,3	0,4	0,3	0,19	0,8	14,8	4,9	4,9
8	Cambissolo Háptico	4,9	0,3	2,7	6,1	4,3	0,33	1,0	8,8	6,3	70,4
9	Latossolo Vermelho	4,1	3,7	6,7	0,9	0,5	0,22	0,8	19,6	5,6	14,3
10	Cambissolo Háptico	4,4	2,8	7,2	3,9	1,1	0,16	1,5	10,0	5,5	36,0

¹ Métodos de extrações e cálculos, segundo Pavan et al. (22).

Amostragem e análise química do material vegetal

A coleta do material vegetal foi feita mediante o corte das plantas de trigo após o término de seu ciclo (130 dias), sendo coletados separadamente os grãos, parte aérea (folha mais caule) e raízes. O material vegetal foi seco em estufa a 70°C até peso constante para a determinação da produção de matéria seca (g/vaso) dos diferentes constituintes. Os teores de K foram determinados por fotometria de emissão de chama após fusão seca de parte do material vegetal em mufla a 550°C, por três horas, e posterior ataque com HCl 3 mol L⁻¹, de acordo com a metodologia apresentada por Jones Jr. e Case (8).

Análises químicas das diferentes frações de K do solo

Antes do plantio o K foi extraído na terra fina seca ao ar (TFSA) por diferentes métodos químicos, e determinado conforme descrito. Para avaliar os teores de K trocável, utilizaram-se os extratores de Mehlich-1 (HCl 0,05 N + H₂SO₄ 0,025 N) (22) e o acetato de amônio 1 mol L⁻¹ (1). Na extração de K não-trocável foi utilizado o HNO₃ fervente como extrator (9), em diferentes concentrações: 0,25 mol L⁻¹; 0,5 mol L⁻¹; 1,0 mol L⁻¹; 2,0 mol L⁻¹; e 4,0 mol L⁻¹ (12). O tratamento com NaHSO₄ em sistema aberto (14, 15) foi utilizado para determinar o K estrutural, preferencialmente nas partículas de mica de menor tamanho e pior cristalinidade (16), consideradas mais suscetíveis ao intemperismo, o que representa uma reserva mais eficiente e a curto prazo do nutriente para as plantas. Para se obterem os teores totais de K na TFSA foi utilizado o método da digestão com HF, HNO₃ e H₂SO₄ concentrados, apresentado por Jackson et al. (7), com adaptações propostas por Melo et al. (13).

Para determinar o balanço nutricional de K no sistema solo-planta, os teores trocáveis do nutriente (Mehlich-1) também foram determinados em amostras de TFSA após o plantio.

Balanço nutricional de K

Os conteúdos de K trocável foram calculados, tanto antes quanto após o plantio, pelo produto entre os teores e as massas totais dos solos nos vasos de 4 dm³. Pela diferença entre os conteúdos de K no solo, antes e após o plantio, encontrou-se a quantidade de K trocável removida do solo pelo cultivo. Em seguida, determinou-se o conteúdo total de K absorvido pelas plantas, considerando a produção de matéria seca e o teor do nutriente de cada componente (parte aérea, grãos e raízes). A partir da comparação entre a quantidade de K absorvida pelas plantas e a quantidade

de K trocável removido do solo durante o cultivo, fez-se a estimativa da contribuição das frações não-trocáveis de K na nutrição do trigo (14).

Análise estatística

Foram realizadas análises de variância com os dados de produção de matéria seca e conteúdo de K na planta e análise de correlação linear simples (Pearson) entre os teores dos nutrientes no solo e o conteúdo na planta, utilizando-se o programa estatístico SAEG, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa (MG).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção e conteúdo de K nas diferentes partes da planta

No período de condução do experimento em casa de vegetação, a temperatura mais elevada interferiu no desenvolvimento do trigo, com relação ao perfilhamento, limitando a produção das plantas (Figura 1).

Não foram observados sintomas de deficiência de K nas plantas durante o cultivo. As contribuições dos diferentes órgãos da planta de trigo para o conteúdo total de K absorvido obedeceram à seguinte ordem decrescente: parte aérea (folhas mais caules) > grãos > raízes, o que correspondeu em média a 79, 19 e 2%, respectivamente. Esses percentuais estão de acordo com os encontrados em trabalhos de outros autores (6, 29).

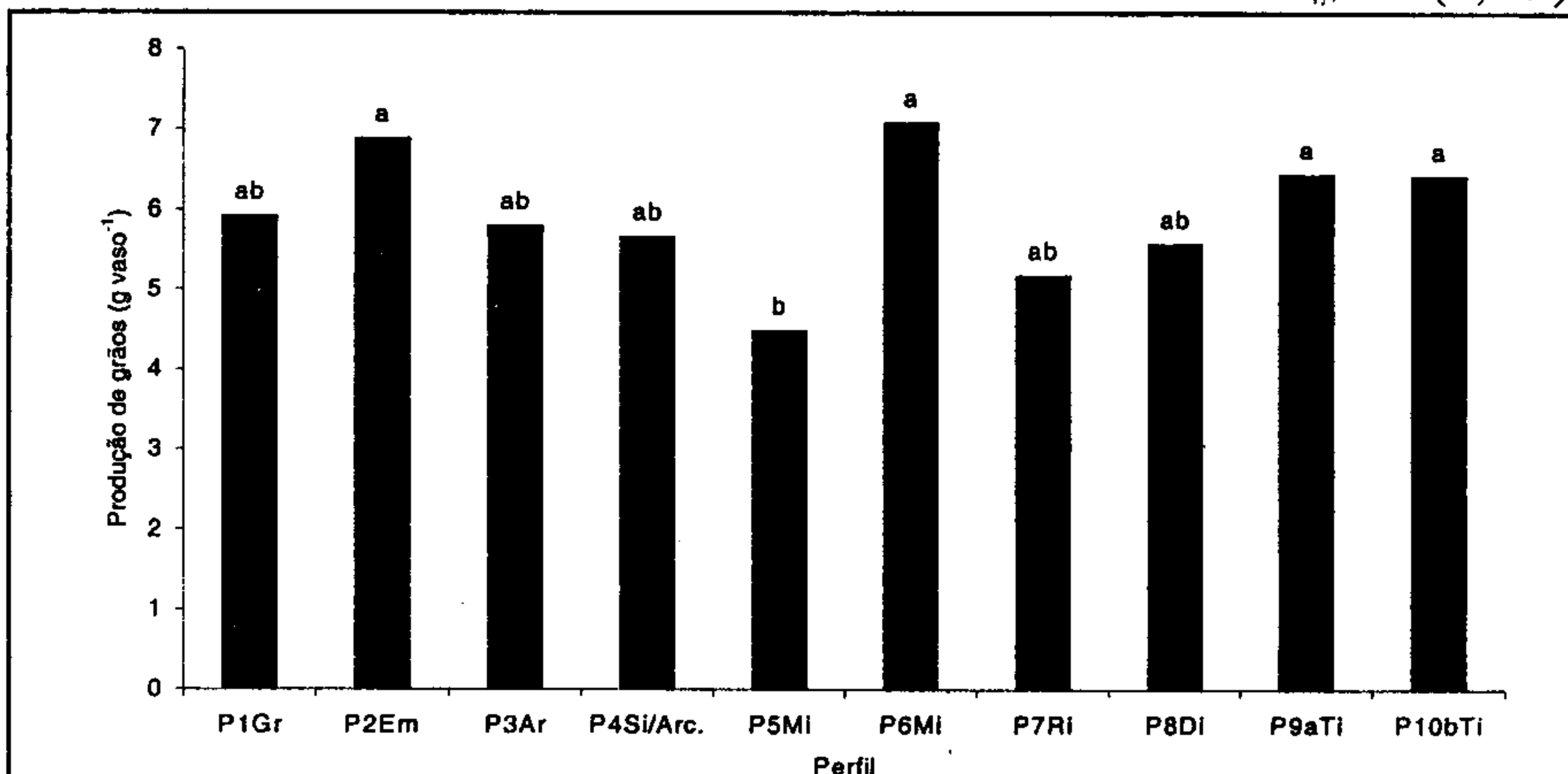


FIGURA 1 - Rendimento médio de grãos do trigo nos solos dos perfis selecionados (material de origem: Gr = granito, Em = embrechito, Ar = arenito, Si/Arc. = silito/arcósio, Mi = micaxisto, Ri = riolito, Di = dique de diabásio e Co = conglomerado) (Letras iguais não diferem estatisticamente, a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey).

Martins et al. (11), trabalhando com os mesmos perfis deste estudo, concluíram que a reserva de K nos solos foi determinada pelo material de origem e estágio de desenvolvimento, sendo mais expressiva nos Cambissolos, principalmente nos originados de micaxisto e conglomerado. O Cambissolo Háptico (Perfil 10), originado de conglomerado, rico em feldspato potássico e com mica (5), apresentou os maiores teores de K ($11.225,6 \text{ mg kg}^{-1}$) (11) associado a minerais micáceos de menor tamanho e pior cristalinidade (extração com NaHSO_4), alto teor de K total ($14.106,0 \text{ mg kg}^{-1}$) (11), obtido pela digestão da amostra com HF, HNO_3 e H_2SO_4 concentrados, e maior absorção e acúmulo do nutriente na planta (folhas + caules + grãos + raízes) ($253,9 \text{ mg vaso}^{-1}$) (Quadro 3). Por outro lado, as plantas cultivadas no solo do Perfil 1 (Cambissolo Háptico) apresentaram o menor acúmulo total de K ($82,1 \text{ mg vaso}^{-1}$) (Quadro 3), associado a traços de mica na fração argila do solo e baixo teor de K total na TFSA ($801,1 \text{ mg kg}^{-1}$) (11).

QUADRO 3 - Conteúdo médio de K absorvido do solo e acumulado nas diferentes partes da planta de trigo nos perfis selecionados¹

Perfil	Classe	Parte aérea (folhas+caules)		Grãos		Raízes		Total acumulado (parte aérea+grãos+raízes)	
		-mg vaso ⁻¹							
1	Cambissolo Háptico	52,6	e	28,6	abcd	0,8	d	82,1	e
2	Latossolo Bruno	90,4	d	33,5	ab	1,4	d	125,2	d
3	Neossolo Litólico	138,8	c	30,3	abc	4,5	ab	173,5	bc
4	Cambissolo Háptico	164,6	bc	26,3	bcd	5,5	ab	196,3	bc
5	Nitossolo Háptico	77,3	d	23,1	d	1,6	cd	102,0	de
6	Cambissolo Háptico	129,6	c	31,5	abc	2,7	bcd	163,8	c
7	Latossolo Bruno	179,3	ab	26,6	bcd	6,1	ab	212,0	ab
8	Cambissolo Háptico	151,1	bc	25,9	cd	3,0	abcd	180,1	bc
9	Latossolo Vermelho	207,4	a	32,2	abc	6,6	a	246,1	a
10	Cambissolo Háptico	214,0	a	35,8	a	4,2	abc	253,9	a

¹ Letras iguais não diferem estatisticamente, a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Correlações entre teores de K no solo antes do plantio e o conteúdo na planta

O conteúdo de K no trigo foi mais bem correlacionado com os teores do nutriente no solo obtidos por meio das extrações com HNO_3 4 mol L^{-1} e acetato de amônio 1 mol L^{-1} (Quadro 4). Isto representa que, nas condições experimentais do trabalho, esses extratores foram mais adequados para estimar a disponibilidade de K durante o crescimento das plantas. Mesmo havendo alta correlação, as quantidades de K extraídas pelo HNO_3 4 mol L^{-1} foram bem superiores ao K absorvido pelas plantas, comportamento também observado por Melo et al. (12) e Nachtigall e Vahl (19).

QUADRO 4 - Coeficientes de correlação linear (r) entre os teores de K no solo antes do plantio e o conteúdo do nutriente na parte aérea (folhas+caules) (CKPA) e o total absorvido (parte aérea+grãos+raízes) nos perfis selecionados¹

Extração	CKPA	CKT
K-d	0,83**	0,80**
K-d'	0,86**	0,83**
K-1	0,81**	0,78**
K-2	0,72**	0,69**
K-3	0,71**	0,70**
K-4	0,80**	0,80**
K-5	0,87**	0,86**
K-6	0,76**	0,76**
K-t	0,57*	0,57*

K-d = K trocável extraído com Mehlich-1; K-d' = K trocável extraído com acetato de amônio 1 mol L⁻¹; K-1, 2, 3, 4, 5 = K não-trocável extraído com ácido nítrico fervente nas concentrações de 0,25, 0,50, 1,00, 2,00 e 4,00 mol L⁻¹, respectivamente; K-6 = K associado a minerais micáceos extraído com NaHSO₄; e K-t = K total extraído pela digestão com HF + HNO₃ + H₂SO₄ concentrados. **, * e ° = significativos a 1; 5; e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste de Tukey.

Os teores totais obtidos por meio da digestão com HF, HNO₃ e H₂SO₄ concentrados não se correlacionaram bem com o acúmulo de K na planta (Quadro 4), por ser um método de extração mais forte, liberando, além das frações trocáveis e não-trocáveis, as frações estruturais do nutriente, normalmente não utilizadas pelo trigo durante seu ciclo. O Cambissolo Háplico originado de micaxisto (Perfil 6) apresentou o maior teor de K total (22.374,3 mg kg⁻¹) (11) e apenas valor intermediário de acúmulo de K na planta em relação aos demais solos (Quadro 3).

A reserva de K está associada, principalmente, à mica e ao feldspato potássico nas frações do solo (15, 28), que, naturalmente, por meio do intemperismo, liberam o nutriente para a solução do solo, tornando-o disponível para as plantas. Segundo Martins et al. (11), os teores de mica na fração argila dos solos variaram de 7,3 g kg⁻¹ a 307,2 g kg⁻¹. Neste estudo, a correlação entre o K extraído pelo NaHSO₄ em sistema aberto, mesmo apresentando valor de "r" inferior ao das maiores concentrações nítricas, foi significativo (Quadro 4), sugerindo que houve contribuição de frações estruturais de K advindas da mica, na nutrição do trigo. O tratamento com NaHSO₄ em sistema aberto extrai, preferencialmente, partículas de mica de menor tamanho (fração argila fina) e baixo grau de cristalinidade (16) e, portanto, mais suscetíveis ao intemperismo, o que justifica o maior coeficiente de correlação com a absorção pela planta, quando comparado com o método de extração total (Quadro 4). Além do efeito da diminuição dos teores de K na solução, a absorção de cátions pelas plantas e a exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes acarretam uma

redução no pH, principalmente do solo rizosférico, acelerando o intemperismo dos minerais (25, 27). A liberação de K das micas é consequência de dois processos (28): transformação de micas com K entre camadas para minerais 2:1 expansíveis, pelo intemperismo e troca do nutriente por cátions hidratados; e dissolução das micas, seguida pela formação dos produtos do intemperismo. A importância relativa desses processos depende da estabilidade das micas e da natureza do ambiente do solo.

Analisando os coeficientes de correlação entre os teores de K no solo, extraídos pelos diferentes métodos (Quadro 5), evidencia-se estreita relação entre as frações trocável e não-trocável de K (r entre acetato de amônio 1 mol L^{-1} e HNO_3 $4 \text{ mol L}^{-1} = 0,78^{**}$), indicando que estas frações do nutriente estão em equilíbrio na maioria dos solos. Essa relação fica mais expressiva se forem excluídos os Perfis 3 (Neossolo Litólico) e 6 (Cambissolo Háptico), o que eleva o coeficiente de correlação para $0,92^{**}$. Nestes solos, provavelmente, a reserva de K está associada a minerais mais estáveis, o que dificulta a passagem do nutriente para a forma trocável (menor relação K-acetato de amônio 1 mol L^{-1} /K- HNO_3 4 mol L^{-1}).

QUADRO 5 - Coeficientes de correlação linear (r) entre os teores de K no solo dos perfis selecionados¹

	K-d	K-d'	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6
K-d'	0,99**							
K-1	0,95**	0,96**						
K-2	0,78**	0,80**	0,90**					
K-3	0,59*	0,64*	0,77**	0,92**				
K-4	0,67*	0,71**	0,82**	0,89**	0,97**			
K-5	0,74**	0,78**	0,85**	0,88**	0,91**	0,94**		
K-6	0,46°	0,49°	0,59*	0,62*	0,74**	0,75**	0,81**	
K-t	0,27	0,31	0,45°	0,65*	0,82**	0,75**	0,76**	0,90**

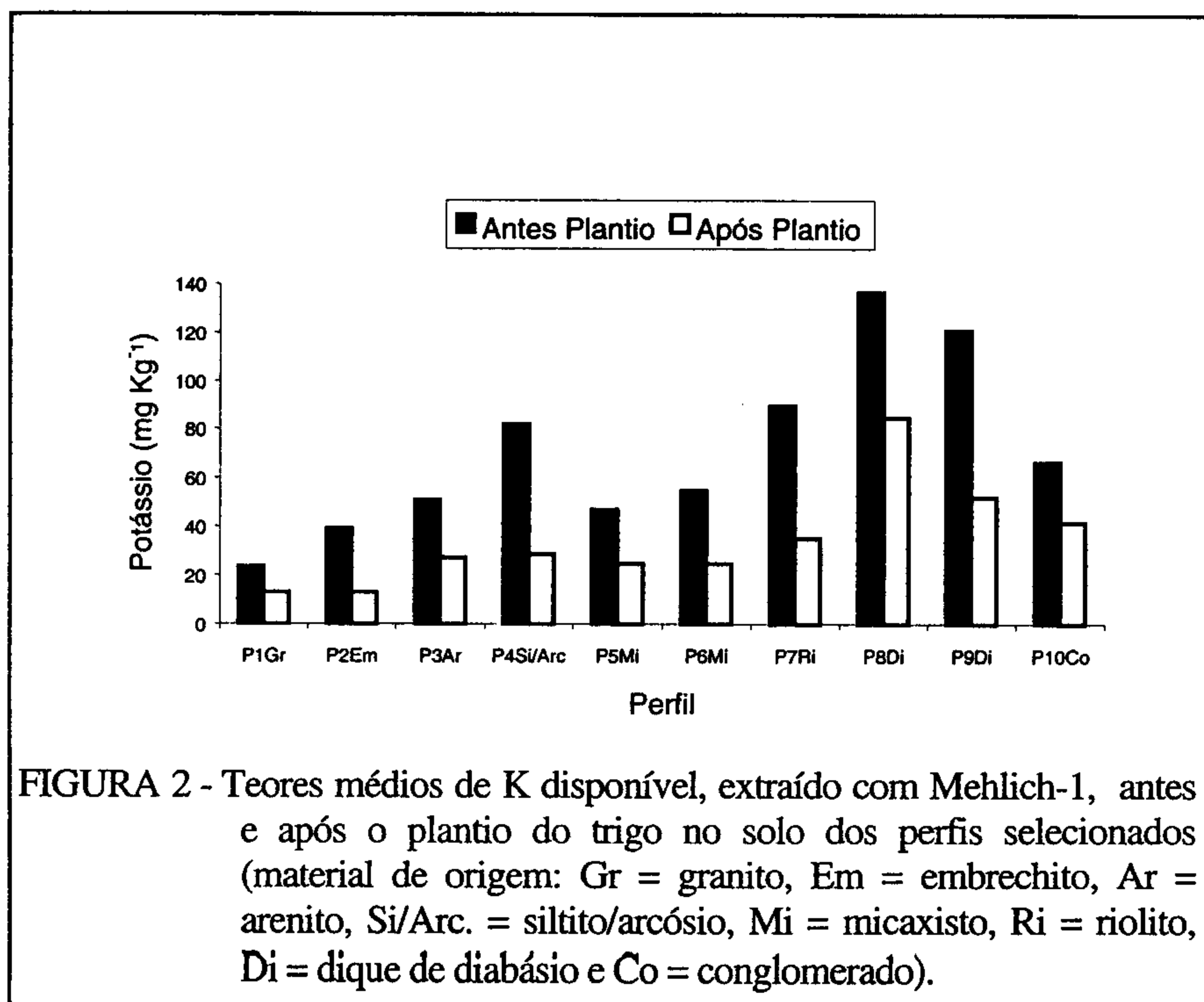
¹ K-d = K trocável extraído com Mehlich-1; K-d' = K trocável extraído com acetato de amônio 1 mol L^{-1} ; K-1, 2, 3, 4, 5 = K não-trocável extraído com ácido nítrico fervente nas concentrações de 0,25, 0,50, 1,00, 2,00 e 4,00 mol L^{-1} , respectivamente; K-6 = K associado a minerais micáceos extraído com NaHSO_4 ; e K-t = K total extraído pela digestão com HF + HNO_3 + H_2SO_4 concentrados. **, * e ° = significativos a 1; 5; e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste de Tukey.

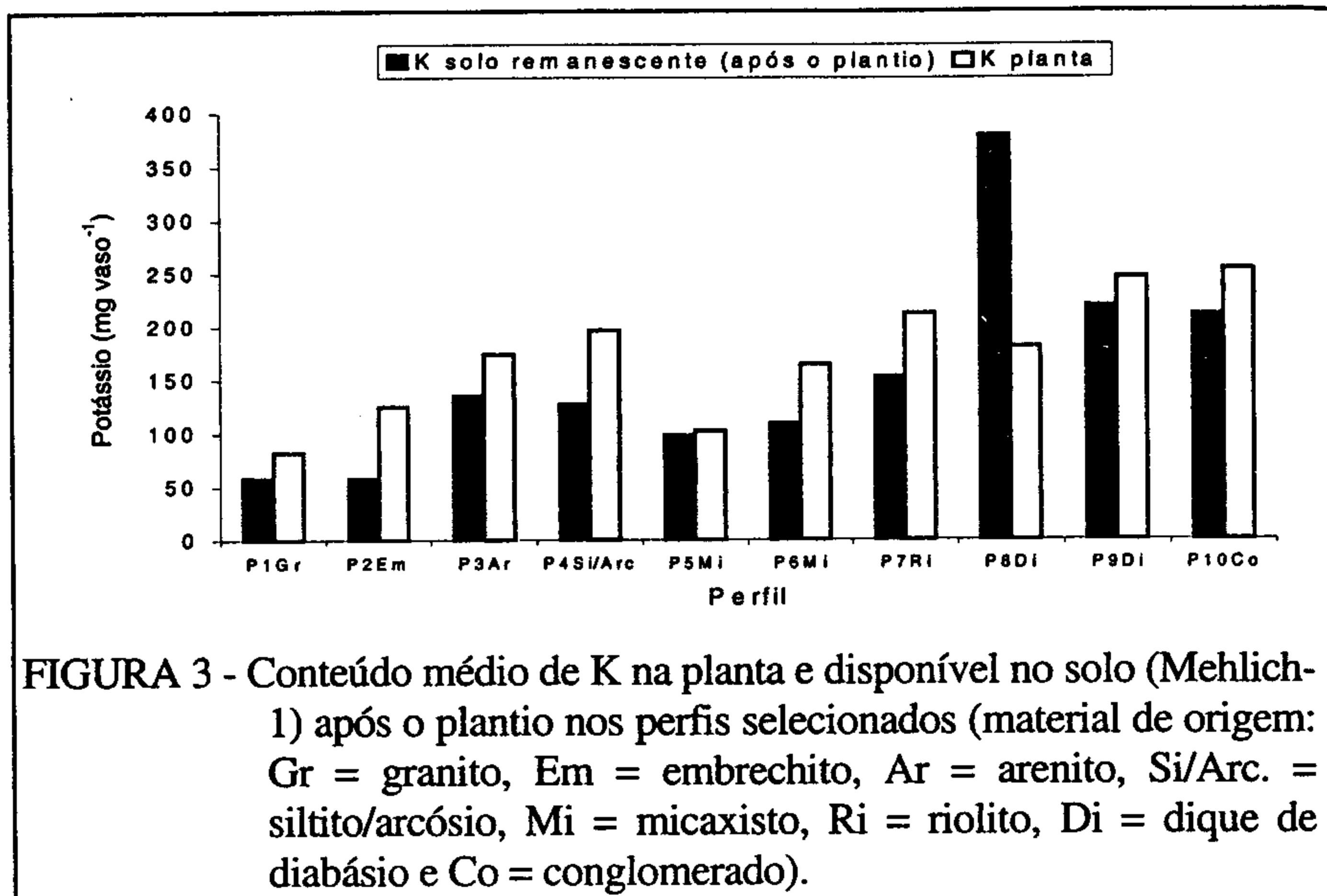
Balanço nutricional de potássio

As diferenças entre as rochas de origem dos solos (Quadro 1) causaram variações entre os teores de K disponíveis nos solos (Figura 2), e apenas os solos dos Perfis 4 (Cambissolo Háptico), 7 (Latosolo Bruno), 8 (Cambissolo Háptico) e 9 (Latosolo Vermelho) apresentaram teores de K

trocável antes do plantio acima do nível crítico de implantação da cultura do trigo (80 mg dm^{-3}) (24).

De acordo com o balanço nutricional, considerando os teores de K trocável no solo (Mehlich-1), para se ter a mesma produção e acúmulo do nutriente nas plantas de trigo, no cultivo subsequente, apenas no solo do Perfil 8 (Cambissolo Háplico) a quantidade de K na camada superficial (0 – 40 cm) seria suficiente, refletindo a melhor fertilidade deste solo em K na forma trocável (Figura 3). Nos solos dos demais perfis, em um cultivo subsequente, o K trocável na camada superficial seria insuficiente, necessitando a sua absorção de camadas mais inferiores, se existente em quantidade adequada, contribuição de frações não-trocáveis, ou ainda a adição desse nutriente via adubação. O K na forma disponível remanescente no solo representa menos que 50% do extraído pelo trigo no Perfil 2 (Latosolo Bruno), entre 50 e 70% nos Perfis 1, 4 e 6 (Cambissolo Háplico), entre 70 e 90% nos Perfis 3 (Neossolo Litólico), 7 (Latosolo Bruno), 9 (Latosolo Vermelho) e 10 (Cambissolo Háplico) e acima de 90% no Perfil 5 (Nitossolo Háplico) (Figura 3).





A quantidade de K trocável extraída do solo foi menor que a de K absorvida pela planta. De modo geral, a contribuição percentual de K não-trocável, em relação ao total absorvido desse nutriente pelas plantas de trigo, variou de 0,5 a 54,0%, o que equivale a 1,1 e 137,0 mg vaso⁻¹, respectivamente (Quadro 6), evidenciando a importância de reserva de K na nutrição da cultura. As menores contribuições de frações não-trocáveis de K no total absorvido pelas plantas foram verificadas nos solos com maiores teores trocáveis do nutriente antes do plantio (Quadros 2 e 6, Perfis 4, 7, 8 e 9). Um fator determinante que concorreu para reduzir a participação de K não-trocável na nutrição do trigo foi a baixa produção (Figura 1). A alta produtividade está associada à maior absorção de K, o que favorece a passagem de K não-trocável para a solução do solo e intensifica o intemperismo dos minerais primários fontes do nutriente. Nachtigall e Vahl (18), trabalhando com milho e azevém em cultivos sucessivos, observaram que a contribuição de frações não-trocáveis de K na nutrição das plantas variava de 1 a 84%, o que correspondeu a 1,4 e 519,0 kg ha⁻¹. Castilhos e Meurer (2), trabalhando com o suprimento de K de solos do Rio Grande do Sul na cultura do arroz irrigado por alagamento, verificaram que pelo menos 37,5% do K total acumulado pela planta foi proveniente da forma não-trocável do nutriente.

Em alguns solos, a redução do conteúdo de K trocável com o cultivo

foi maior que a absorção pelas plantas (Quadro 6, Perfis 4, 8 e 9), o que pode indicar perda do nutriente durante o experimento. Contudo, trabalhou-se em sistema fechado, em que eventuais excessos de irrigação eram coletados em pratos colocados sob os vasos, e o líquido era integralmente retornado à unidade experimental. Outros autores (18, 19) constataram comportamento semelhante, concluindo que os resultados poderiam ser parcialmente explicados com base no K contido nas raízes, normalmente não incluídas na análise. Entretanto, neste estudo, o sistema radicular foi analisado, e o conteúdo de K considerado no balanço do nutriente. A determinação de K nas raízes de plantas é problemática, visto que é necessário lavá-las com água destilada para remover as partículas de solo. Neste processo pode haver remoção de parte do K acumulado, uma vez que esse nutriente não forma compostos orgânicos dentro da planta (2). Outra possibilidade é a fixação de parte do K trocável por minerais com alta densidade de carga negativa permanente, notadamente vermiculita e interestratificados mica-vermiculita, inicialmente não detectados na fração argila destes solos (11).

QUADRO 6 - Balanço nutricional de K nos perfis selecionados					
Perfil	Classe	Conteúdo total de K na planta (folhas+caules+grãos+raízes) ¹	K trocável ²	K não-trocável ³	K não-trocável ³
		mg vaso ⁻¹			%
1	Cambissolo Háplico	82,1	46,4	35,7	43,5
2	Latossolo Bruno	125,2	111,8	13,4	10,7
3	Neossolo Litólico	173,5	113,9	59,6	34,4
4	Cambissolo Háplico	196,3	231,7	nc	nc
5	Nitossolo Háplico	102,0	86,9	15,1	14,8
6	Cambissolo Háplico	163,8	127,8	36,0	22,0
7	Latossolo Bruno	212,0	210,9	1,1	0,5
8	Cambissolo Háplico	180,1	230,3	nc	nc
9	Latossolo Vermelho	246,1	277,3	nc	nc
10	Cambissolo Háplico	253,9	116,9	137,0	54,0

¹ conteúdo total de K nas plantas, calculado pelo somatório dos produtos entre os teores de K e matéria seca das diferentes partes da planta (parte aérea, grãos e raízes); ² remoção média de K trocável do solo pelo cultivo, obtida pela diferença entre os conteúdos de K trocável no solo (Mehlich-1) antes e após o cultivo. Os conteúdos de K trocável foram calculados, tanto antes quanto após o plantio, por meio do produto entre os teores e as massas totais dos solos nos vasos de 4 dm³; ³ estimativa da contribuição das frações não-trocáveis de K na nutrição do trigo: K não-trocável (mg vaso⁻¹) = Conteúdo total de K na planta - K trocável; K não trocável (%) = K não trocável/Conteúdo total de K na planta x 100. "nc" = não houve contribuição de frações não-trocáveis de K na nutrição do trigo.

CONCLUSÕES

1. Os métodos de extrações com HNO_3 4 mol L^{-1} e acetato de amônio 1 mol L^{-1} são mais adequados para estimar a disponibilidade de K do solo para a cultura do trigo (coeficientes de correlação entre o K acumulado na parte aérea e os teores obtidos no solo antes do plantio por estes extratores iguais a 0,86** e 0,87**, respectivamente), indicando que as frações trocáveis e não-trocáveis do nutriente estão em equilíbrio na maioria dos solos.

2. A contribuição de frações não-trocáveis de K do solo na nutrição mineral do trigo é mais expressiva nos Cambissolos Háplicos originados de granito, micaxisto e conglomerado e no Neossolo Litólico originado de arenito, chegando a 54% do total acumulado pelas plantas. Nos solos em que os teores trocáveis de K antes do plantio são maiores, não há contribuição da reserva do nutriente na nutrição das plantas.

REFERÊNCIAS

1. BRAGA, J. M. Avaliação da fertilidade do solo: análise química. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1980. 64p.
2. CASTILHOS, R. M. V. & MEURER, E. J. Suprimento de potássio de solos do Rio Grande do Sul para arroz irrigado por alagamento. Rev. Bras. Ci. Solo, 26:977-982, 2002.
3. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
4. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. O solo e sua ambiência no foco de agricultura de precisão. Colombo, 2001. 86 p. (Relatório interno)
5. FUCK, R. O.; TREIN, E. & MARINI, O. J. Geologia e petrografia dos migmatitos do Paraná. B. Paran. Geociências, 23/25:5-41, 1967.
6. HOCKING, P. J. Dry-matter production, mineral nutrient concentrations, and nutrient distribution and redistribution in irrigated spring wheat. Plant Nut., 17:1289-1308, 1994.
7. JACKSON, M. L.; LIM, C. H. & ZELAZNY, L. W. Oxides, hydroxides, and aluminosilicates. In: Klute, A. (ed) Methods of soil analysis. Parte 1: Physical and mineralogical methods. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.101-150.
8. JONES JR, J. B. & CASE, V. W. Sampling, handling, and analysing plant tissue samples. In: Westerman, R.L. (ed). Soil testing and plant analysis. Madison, Soil Science Society of America Book Series, 1990. p.389-428.
9. KNUDSEN, D.; PETERSON, G. A. & PRATT, P. F. Lithium, sodium and potassium. In: Page, A. L. (ed). Methods of soil analysis. Parte 2. Chemical and microbiological properties. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.225-246.
10. MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Agronômica Ceres, 1980. 251p.
11. MARTINS, R.; MELO, V. F. & SERRAT, B. M. Reserva Mineral de potássio em solos dos Campos Gerais, estado do Paraná. Revista Ceres, 51: 521-533, 2004.
12. 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. Rev. Bras. Ci. Solo, 19:165-171, 1995.

13. MELO, V. F.; NOVAIS, R. F.; FONTES, M. P. F. & SCHAEFER, C. E. G. R. Potássio e magnésio em minerais das frações areia e silte de diferentes solos. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 24:269-284, 2000.
14. MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; NOVAIS, R. F.; SINGH, B. & FONTES, M. P. F. Distribuição de K, Mg, e outros metais nos minerais de sedimentos do Grupo Barreiras no Município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 26:43-51, 2002a.
15. MELO, V. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; NOVAIS, R. F.; SINGH, B. & FONTES, M. P. F. Potassium and magnesium in clay minerals of some brazilian soils as indicated by a sequential extraction procedure. *Comm. Soil Sci. Plant An.*, 33:2203-2225, 2002b.
16. MELO, V. F.; CORRÊA, G. F.; MASCHIO, P. A.; RIBEIRO, A. N. & LIMA, V. C. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 27:807-819, 2003.
17. MIELNICZUK, J. & SELBACH, P. A. Capacidade de suprimento de potássio de seis solos do Rio Grande do Sul. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 2:115-120, 1978.
18. NACHTIGALL, G. R. & VAHL, L. C. Capacidade de suprimento de potássio dos solos da região Sul do Rio Grande do Sul. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 15:37-42, 1991a.
19. NACHTIGALL, G. R. & VAHL, L. C. Dinâmica de liberação de potássio dos solos da região Sul do Rio Grande do Sul. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 15:43-47, 1991b.
20. OCEPAR. Recomendações técnicas para a cultura do trigo no Estado do Paraná. Cascavel, OCEPAR, 1995. 115p. (Boletim nº 37)
21. PATELLA, J. F. Influência de quinze anos de adubação NPK sobre o rendimento do trigo e algumas propriedades do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 4:31-35, 1980.
22. PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. C.; MIYAZAWA, M. & ZOCOLER, D. C. Manual de análise química de solo e controle de qualidade. Londrina, IAPAR, 1992. 39 p. (Circular técnica nº 76)
23. RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO J. A. & FURLANI A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agrônomo, 1996. 285p. (Boletim técnico nº 100)
24. RECOMENDAÇÕES DA COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO. Algumas considerações sobre a cultura de trigo. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/rcsbpt00/index.htm>> Acesso em: 25 set. 2002.
25. RICE, H. B. & KAMPRATH, E. J. Availability of exchangeable and nonexchangeable Mg in sandy Coastal Plain soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32:386-388, 1968.
26. SIMARD, R. R.; KIMPE, C. R. & ZIZKA, J. Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1421-1428, 1992.
27. SONG, S. K. & HUANG, P. M. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 52:383-390, 1988.
28. SPARKS, D. L. Potassium dynamics in soils. New York, Springer-Verlag. *Advances in Soil Science*, v.6, 1987. 63p.
29. WALDREN, R. P. & FLOWERDAY, A. D. Growth stages and distribution of dry matter, N, P and K in winter wheat. *Agronomy Journal*, 71:391-397, 1979.