

FRANCISCO SANDRO RODRIGUES HOLANDA

EFEITO DE SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E SUCESSÃO DE CULTURAS: 1. ESTRATIFICAÇÃO DE FÓSFORO, POTÁSSIO, pH E MATÉRIA ORGÂNICA NO PERFIL DO SOLO; 2. ABSORÇÃO DE P E K PELA CULTURA DO MILHO (*Zea mays* L.).

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de "Doutor".

Orientadora

Prof^ª JANICE GUEDES DE CARVALHO

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
1996**

FICHA CATALOGRÁFICA PREPARADA PELA SEÇÃO DE CATALOGAÇÃO E
CLASSIFICAÇÃO DA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFLA

Holanda, Francisco Sandro Rodrigues.

Efeito de sistemas de preparo de solo e sucessão de culturas: 1. Estratificação de fósforo, potássio, pH e matéria orgânica no perfil do solo; 2. Absorção de P e K pela cultura do milho (*Zea mays* L.) / Francisco Sandro Rodrigues Holanda.

-- Lavras : UFLA, 1996.

86 p. : il.

Orientadora: Janice Guedes de Carvalho.

Tese(Doutorado) - UFLA.

Bibliografia.

1. Milho - Fósforo - Absorção. 2. Potássio. 3. Solo - Manejo. 4. Estratificação. 5. Rotação de cultura. 6. Sistema de cultivo. 7. Sucessão de cultura. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-633.15895

FRANCISCO SANDRO RODRIGUES HOLANDA


EFEITO DE SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E SUCESSÃO DE CULTURAS:

I. ESTRATIFICAÇÃO DE FÓSFORO, POTÁSSIO, pH E MATÉRIA ORGÂNICA;


II. ABSORÇÃO DE P E K PELO MILHO (*Zea mays* L.)

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Agronomia, área de concentração em Fitotecnia para obtenção do título de "Doutor".


APROVADA em 08 de abril de 1996


Prof. David Bruce Mengel


Prof. Alfredo Scheid Lopes


Prof. Augusto Ferreira de Souza


Prof.ª Maria Laene M. de Carvalho


Prof.ª Janice Guedes de Carvalho
Orientadora

"The nation that destroys its soil,
destroys itself." - Franklin D. Roosevelt

because,

"We do not inherit the Earth from our parents,
we borrow it from our children." - Unknown

Aos meus muito queridos pais
Sr. Assis e D. Stela, que sempre me guiaram,
repreendendo ou aplaudindo,
responsáveis por tudo que fiz de bom.

DEDICO

À minha esposa, Tânia,
companheira e incentivadora.

Ao meu filho, Vitor
o melhor de todos os presentes
de Deus.

Aos filhos que virão

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À DEUS pela onipresença;

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), através do corpo docente, discente e funcionários, pela oportunidade de tornar possível a realização do curso;

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de Doutorado-Sanduiche.

À todo corpo docente, discente e funcionários da Purdue University, localizada no Estado de Indiana, Estados Unidos da América, por todo o apoio concedido durante a vigência da minha bolsa de Doutorado-Sanduiche.

Ao Prof. Dr. Alfredo Scheid Lopes, Prof^ª Dra. Maria Laene M. de Carvalho, Prof. Dr. Augusto Ferreira de Souza, pela valiosa contribuição na defesa de tese;

Um especial agradecimento à Prof^ª Dra. Janice Guedes de Carvalho, pelo incentivo, orientação, valiosa e muito querida amizade;

Ao Prof. Dr. David Bruce Mengel, pela orientação e todo apoio e ensinamentos durante a minha estada na Purdue University;

À Dra. Judy Santini pela orientação em todo o trabalho de interpretação estatística dos dados trabalhados nesta tese;

À Joy Mykytiuk pela grande e incondicional ajuda em todos os necessários momentos;

Aos amigos, Guilherme, Luiza & TNT, Cassiano, Dione & Raissa. Que bom ter conhecido vocês!!!

Aos amigos, Ian e Cristiana, Larry Mykytiuk, Helena Blume, Brenda Hofman, Travis e Leta Murray, Ty Stall, Lou Jones, John Charlesworth, Burt Lofton, Dr. Christmas. Obrigado pelo bons momentos que vocês nos propiciaram durante todo o período em West Lafayette;

Ao Prof. Dr. Geraldo Aquino Guedes, Dra. Jussara Rigitano e ao Prof. Dr. Fabiano Ribeiro do Vale, por todas as gestões no sentido de tornar um fato o meu projeto de bolsa Doutorado-Sanduiche;

Aos amigos, Magela, Luciane & Pedro, Miralda Bueno, Andreia, Kênia, Cristina, Valdecir e Dolores Dalpasquale, muito obrigado pela amizade e todo o apoio recebido nos momentos fáceis e difíceis;

À D. Luzanira, por sempre acreditar e sempre nos incluir nas suas orações;

Aos meus queridos irmãos pelo incentivo e apoio tantas vezes necessários;

Aos colegas, amigos e todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que este projeto se tornasse uma realidade.

OBRIGADO A TODOS, MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xi
SUMMARY	xiii
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 CAPÍTULO I - INFLUÊNCIA DE SUCESSÃO DE CULTURAS E SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO NA ESTRATIFICAÇÃO DE FÓSFORO, POTÁSSIO, pH E MATÉRIA ORGÂNICA NO PERFIL DO SOLO	4
RESUMO	4
SUMMARY	5
2.1 INTRODUÇÃO	6
2.2 REVISÃO DE LITERATURA	8
2.2.1 Efeito do sistema de preparo de solo nas propriedades químicas do solo	8
2.2.2 Efeito da sucessão de culturas na estratificação de nutrientes no perfil do solo	11
2.3 MATERIAL E MÉTODOS	13
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
2.4.1 Fósforo	17
2.4.2 Potássio	22
2.4.3 pH	24
2.4.4 Matéria Orgânica	27
2.4.5 Efeito de sucessão de culturas e sistemas de preparo de solo na produção de milho	28
2.5 CONCLUSÕES	33

3 CAPÍTULO II - SIMULAÇÃO DE ABSORÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO NA CULTURA DO MILHO (<i>Zea mays</i> L.) ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO: EFEITO DE SUCESSÃO DE CULTURAS E SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO	34
RESUMO	34
SUMMARY	35
* 3.1 INTRODUÇÃO	36
3.2 REVISÃO DE LITERATURA	38
3.2.1 Absorção de nutrientes pelo sistema radicular	38
3.2.2 O Modelo Matemático de Absorção de Nutrientes	40
3.2.2.1 Condições do modelo	41
3.2.3 Cinética de absorção radicular	42
3.2.4 Características morfológicas da raiz	43
3.2.5 O fornecimento de nutrientes pelo solo	44
3.2.5.1 Determinação do coeficiente de difusão efetiva (D_e)	45
3.2.5.2 Determinação do poder tampão do solo	46
3.2.6 Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de absorção	47
3.3 MATERIAL E MÉTODOS	47
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
3.4.1 Avaliação dos parâmetros radiculares	51
3.4.2 Suprimento de nutrientes pelo solo	57
3.4.3 Análise de sensibilidade	60
3.5 CONCLUSÕES	62
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXO	72

LISTA DE QUADROS

Quadro		Página
1	Resumo das práticas culturais executadas no cultivo do milho, e soja em experimento de longa duração nos anos de 1981, 1986, 1994 e 1995	15
2	Resumo da análise de variância dos parâmetros químicos fósforo (P), potássio (K), pH e matéria orgânica (M.O.) em 1994	18

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Valores médios de pH, fósforo (P), potássio (K) e matéria orgânica (MO) em diferentes profundidades (cm) e sistemas de preparo de solo, em 1981, 1986 e 1994	20
2	Características morfológicas da raiz usadas para cálculo de absorção de fósforo (P) e potássio (K) em três sistemas de preparo do solo sucessão de culturas e em diferentes profundidades	52
3	Densidade média e peso fresco de raiz na linha e entrelinhas em três sistemas de preparo de solo e sucessão de culturas, em diferentes profundidades 92 dias após o plantio	53
4	Características do solo usadas no cálculo de absorção de fósforo (P) em três sistemas de preparo do solo e sucessão de culturas, em diferentes profundidades e dois níveis de umidade volumétrica ($\theta_1 = 0,27$ e $\theta_2 = 0,13$)	55
5	Características do solo usadas no cálculo de absorção de potássio (K) em três sistemas de preparo do solo e sucessão de culturas, em diferentes profundidades e dois níveis de umidade volumétrica ($\theta_1=0,27$ e $\theta_2=0,13$)	56
6	Absorção calculada de fósforo (P) e potássio (K) em milho, sob três sistemas de preparo de solo e sucessão de culturas, em diferentes profundidades e conteúdos de umidade volumétrica ($\theta = 0,27$ e $\theta = 0,13$), em 92 dias após o plantio, em 1994	57
7	Distância média de difusão de P e K sob três sistemas de preparo do solo e sucessão de culturas, em diferentes profundidades e conteúdo de umidade volumétrica ($\theta_1=0,27$ e $\theta_2=0,13$)	59

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Representação esquemática da técnica de amostragem de solo em cinco profundidades no perfil do solo e onze posições entre linhas de plantio de milho	16
2	Concentração média de fósforo (P) em diferentes profundidades e posições, em solo cultivado com milho e em diferentes sistemas de preparo de solo (convencional, plantio-direto e cultivo mínimo), em 1994	19
3	Concentração de potássio (K) em diferentes posições e profundidades (cm), em solo cultivado com milho contínuo ou em sucessão com soja e em diferentes sistemas de preparo do solo (convencional, plantio direto e cultivo mínimo), em 1994	23
4	Valores de pH em diferentes posições e profundidades (cm) em solo cultivado com milho contínuo ou em sucessão com soja e em diferentes sistemas de preparo do solo (convencional, plantio direto e cultivo mínimo) ...	26
5	Teor de matéria orgânica (g.kg^{-1}) em diferentes posições e profundidades, em solo cultivado com milho contínuo ou em sucessão com soja e em diferentes sistemas de preparo do solo (convencional, plantio direto e cultivo mínimo), em 1994	29
6	Produção de milho cultivado sob diferentes sistemas de preparo de solo (convencional, cultivo mínimo e plantio direto) e sucessão de culturas (soja-milho e milho contínuo) de 1980 a 1995, no solo argilo siltoso Chalmers	32
7	Análise de sensibilidade dos parâmetros de absorção calculada de P usando o Modelo de Barber & Cushman. Efeito sobre sucessão soja-milho, em preparo de solo convencional, na camada de 0-5 cm	61
8	Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no cálculo de absorção de K, usando o Modelo de Barber e Cushman. Efeito sobre a sucessão soja-milho em preparo de solo convencional, de 0-5 cm	61

RESUMO

HOLANDA, Francisco Sandro Rodrigues. **Efeito de sistemas de preparo de solo e sucessão de culturas: 1. Estratificação de fósforo, potássio, pH e matéria orgânica no perfil do solo; 2. Absorção de P e K pela cultura do milho (*Zea mays* L.).** Lavras: UFLA, 1996. 86p. (Tese - Doutorado em Fitotecnia).*

As culturas de milho e soja cultivadas continuamente ou em sucessão bem como o tipo de preparo do solo, contribuem para alterar a distribuição de P, K, pH e matéria orgânica no perfil do solo. É caracterizada a estratificação de propriedades físicas e químicas em sistemas conservacionistas (plantio direto e cultivo mínimo) ou a uniforme distribuição de nutrientes em sistemas convencionais. O conhecimento da distribuição de tais elementos no perfil do solo, bem como do mecanismo de suprimento dos mesmos a partir do solo e absorção pelas plantas, são ferramentas de grande importância para a formulação de práticas visando a maximização da produção. O objetivo deste estudo foi determinar os efeitos, em experimentos de longa duração, de diferentes sistemas de preparo de solo (sistema convencional, plantio direto e cultivo mínimo) e sucessão de culturas (soja-milho ou milho cultivado continuamente), na distribuição de P, K, pH e matéria orgânica no perfil do solo, bem como na taxa de previsão de absorção de fósforo e potássio pela cultura do milho, usando como ferramenta principal o modelo matemático de

* Orientador: Janice Guedes de Carvalho. Membros da Banca: David Bruce Mengel, Alfredo Scheid Lopes, Maria Laene M. de Carvalho, Augusto Ferreira de Souza.

Barber e Cushman. O delineamento experimental consistiu de 08 (oito) tratamentos arranjados em parcelas subdivididas (splitplot), com três repetições. As sucessões de culturas se constituiu na parcela principal e os sistemas de preparo do solo foram consideradas as subparcelas. Foram estudadas amostras da fase sólida e solução do solo provenientes de cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-25 cm). Ocorreu maior concentração de P nas primeiras camadas do perfil do solo a despeito do sistema de preparo do solo considerado. A estratificação de fósforo foi melhor caracterizada em plantio direto como resultado de ausência de incorporação do fertilizante fosfatado e/ou potássico. Ocorreu uma maior uniformidade na distribuição de P e K no sistema convencional. A contínua adubação nitrogenada em milho cultivado continuamente, contribuiu para ocorrência de pH mais baixo principalmente em sistemas conservacionistas. O sistema convencional apresentou valores de matéria orgânica mais baixos possivelmente relacionado com maior oxidação dos resíduos vegetais, em consequência da total movimentação das partículas do solo. Os valores de absorção calculada de K variaram com dados de concentração do elemento no solo, parâmetros radiculares e conteúdo de umidade volumétrica. A distância média de difusão foi maior para potássio quando comparado com fósforo. A absorção calculada diminuiu com a profundidade do solo em todos os tratamentos. A taxa de crescimento radicular e a distância média entre raízes adjacentes foram os parâmetros que mais apresentaram sensibilidade em relação à absorção calculada de P e K.

SUMMARY

EFFECT OF CROP ROTATIONS AND TILLAGE SYSTEMS: 1. PHOSPHORUS, POTASSIUM PH AND ORGANIC MATTER STRATIFICATION; 2. P AND K UPTAKE BY CORN (*Zea mays* L.).

Continuous or alternate corn or soybean crop and tillaging contribute to alter the distribution of P, K, pH and organic matter in the soil profile. The physical and chemical soil properties stratification is better characterized in conservation systems in contrast with a uniform nutrient distribution commonly found in conventional tillage systems. The purpose of this study was to determine the effect of different tillage systems (Moldboard plow, chisel plow and no-till) and crop rotations (soybean-corn rotation and continuous corn) on nutrient, pH and organic matter distribution and on the rate of phosphorus and potassium uptake, by Barber and Cushman mathematical model. This continuous long term study consisted of 8 treatments arranged in a randomized split-plot design and replicated three times. The crop rotations were used as the main plot and the primary tillage operations were used as a subplot. We took samples from the solid and solution phase from five depths down the profile (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 and 20-25 cm). Despite the tillage systems there was a higher P concentration in the surface soil layers. As a consequence of less soil movement, there was a remarkable P and K stratification in no-till system. The continuous and heavy nitrogen fertilization concurred to lower pH values in continuous corn, mainly in conservation systems. In conventional tillage systems, we have found

lower organic matter values possibly due to a higher residue decomposition by soil particles movement. There were differences in K predicted uptake based in changes in soil solution and solid phase concentration, root parameters and volumetric moisture. It was found a higher K mean diffusion distance when compared to P. It was found a decreasing predicted uptake toward soil depth in all treatments. Root growth and mean distance between roots were the parameters which presented the most variable results regarding to the sensibility analysis on P and K predicted uptake.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A produção agrícola sob o ponto de vista de uma agricultura sustentável, deve buscar a execução de práticas de cultivo que minimizam as interações negativas do solo e clima e assegure cada vez mais produções crescentes adequadas, conserve os recursos naturais e proteja o meio ambiente (Morrison e Chichester, 1994). Naturalmente que a colocação em prática de tais conceitos envolvem a tomada de decisão que na maioria das vezes leva a uma troca de práticas convencionais há tempos adotadas, por práticas chamadas conservacionistas. Para um sistema de produção ser largamente aceito, é fundamental que ele permita a manutenção de características físicas do solo que permita a reposição de nutrientes que são removidos e perdidos, e produza igual ou maior produção de grãos (Blevins et al., 1983).

Muitos sistemas conservacionistas são normalmente focalizados em função da quantificação dos atributos de sustentabilidade e aceitabilidade ambiental das várias práticas relacionadas com os mesmos. Neste sentido, existe a necessidade de se conhecer, ao longo do tempo os efeitos de tais sistemas de cultivo, envolvendo o preparo do solo e sucessão de culturas sobre as propriedades químicas e a disponibilidade de nutrientes na camada arável do solo, para adequada orientação sobre as quantidades e critérios de fornecimento dos fertilizantes. Normalmente os parâmetros de solo usados para quantificar os efeitos a longo prazo de cultivos

alternados e rotações de cultura incluem, pH, estratificação de nutrientes, concentração de $N-NO_3^-$, P e K.

Em experimentos de longa duração, depois de muitos anos de aplicação superficial de fertilizantes fosfatados e/ou potássicos, o solo passa a mostrar variados graus de incorporação de acordo com o preparo do solo utilizado. Sistemas convencionais resultam numa distribuição de P e K na camada de solo mecanizada, enquanto que em cultivo mínimo a incorporação de tais elementos não passa da metade daquela normalmente observada no preparo convencional. Já em plantio direto, com a total ausência de movimentação do solo, fica caracterizada a acumulação dos elementos nas camadas superficiais. A estratificação de matéria orgânica e propriedades químicas do solo refletem a ausência ou menor perturbação física do perfil do solo (Cruse et al., 1983). O grau e a extensão das mudanças são determinados grandemente pela quantidade de resíduos culturais produzidos anualmente pelo sistema, o grau de redução no cultivo (preparo do solo) e a extensão de tempo em que o sistema é praticado.

A cobertura vegetal e o preparo do solo afetam a densidade radicular, tamanho da raiz e demais parâmetros morfológicos. Quando o resíduo deixado pela cultura em sucessão for adequado para manter a umidade próxima à superfície do solo, pouca correlação entre peso radicular, devido ao preparo do solo, e produção de grãos normalmente é encontrada.

O preparo do solo afetando a aeração do próprio solo, afetará a porosidade, densidade e conseqüentemente a morfologia do sistema radicular. O tipo de interação da raiz das plantas com o solo vai influenciar o fluxo de nutrientes para dentro da raiz, que para nutrientes como P e K é caracterizado pela difusão, ao longo de um gradiente de concentração, normalmente descrita pela cinética de Michaelis-Menten. Neste processo, fatores do solo- água volumétrica,

poder tampão e fator tortuosidade, dentre outros, e da planta- superfície radicular e capacidade de absorção de nutrientes, condicionam a maior ou menor difusão.

A compreensão do mecanismo de suprimento de P e K a partir do solo e absorção pelas raízes é útil para a formulação de práticas de adubação que maximizarão a produção. Neste sentido, foi elaborado por Barber e Cushman, um modelo matemático de simulação de absorção de nutrientes com 11 parâmetros, que supõe que o influxo de nutrientes está relacionado com a concentração externa dada pela cinética de Michaelis-Menten, e que o elemento alcança o sistema radicular por uma combinação de difusão e fluxo de massa. Este processo é combinado com a taxa de aumento na área superficial radicular para obtenção da absorção prevista. Adicionalmente, o modelo também presupõe que o elemento não trocável ou fixado não contribui significativamente para a quantidade do elemento disponível. O objetivo deste estudo foi determinar os efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo e sucessão de culturas, na distribuição de fósforo (P), potássio (K), pH e matéria orgânica (M.O.), no perfil do solo, bem como determinar a taxa prevista de absorção de P e K pela cultura do milho (*Zea mays* L.)

2 CAPÍTULO I

INFLUÊNCIA DE SUCESSÃO DE CULTURAS E SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO NA ESTRATIFICAÇÃO DE FÓSFORO, POTÁSSIO, pH E MATÉRIA ORGÂNICA NO PERFIL DO SOLO

RESUMO

O cultivo alternado de milho e soja bem como o preparo do solo contribuem para alterar a distribuição de P, K, pH e matéria orgânica no perfil do solo. Normalmente ocorre estratificação de propriedades físicas e químicas em sistemas conservacionistas ou a uniforme distribuição de nutrientes em sistemas convencionais. O objetivo deste estudo foi determinar os efeitos de diferentes sistemas de preparo de solo (sistema convencional, plantio direto e cultivo mínimo) e sucessão de cultura (soja-milho ou milho continuamente) na distribuição de P, K, pH e matéria orgânica no perfil do solo, em experimentos de longa duração. O delineamento experimental consistiu de 08 (oito) tratamentos arranjados em parcelas subdivididas (split-plot), com três repetições. A sucessão de culturas se constituiu na parcela principal e os três sistemas de preparo do solo foram consideradas as subparcelas. Foram estudadas amostras de solo provenientes de cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-25 cm) em 11 posições situadas entre duas linhas de plantio. Ocorreu maior concentração de P nas primeiras camadas de

solo a despeito do sistema de preparo do solo. A estratificação de fósforo foi melhor caracterizada em plantio direto como resultado de ausência de incorporação do fertilizante fosfatado. Ocorreu uma maior uniformidade na distribuição de P e K no sistema convencional. A frequente e pesada adubação nitrogenada, contribuiu para ocorrência de acidez localizada em milho cultivado continuamente, principalmente em sistemas conservacionistas. O sistema convencional apresentou valores de matéria orgânica mais baixos, possivelmente relacionados com maior oxidação dos resíduos vegetais em consequência da movimentação das partículas do solo. O sistema de cultivo mínimo se comportou como intermediário entre o sistema convencional e o plantio direto.

SUMMARY

INFLUENCE OF CROP ROTATION AND TILLAGE SYSTEMS ON NUTRIENT STRATIFICATION IN THE SOIL PROFILE

Alternate cropping and tillaging contribute to alter the distribution of nutrient, pH and organic matter in the soil profile. Frequently there are stratification of soil chemical and physical properties in conservation systems or a uniform nutrient distribution in conventional tillage systems. The purpose of this study was to determine the effect of different tillage systems (Moldboard plow, no-till and chisel plow) and crop rotations (soybean-corn rotation and continuous corn) on nutrient, pH and organic matter distribution. This continuous long term study consisted of 8 treatments arranged in a randomized split-plot design and replicated three times. The two crop rotations were used as the main plot and the three primary tillage operations were

used as a subplot. We took soil samples from five depths down the profile (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 and 20-25 cm) and eleven positions across from row to row. In despite of tillage systems there was a higher P concentration in the surface soil layers. As a consequence of less soil movement, there was a remarkable P stratification in no-till system. The continuous and heavy nitrogen fertilization concurred to a very located pH decrease in continuous corn mainly in conservation systems. In conventional tillage systems, we found lower organic matter values possibly due to a higher residue decomposition allowed by soil particles movement. The chisel plow system behaves as a intermediate tillage system somewhat between moldboard plow and no-till.

2.1 INTRODUÇÃO

A combinação sucessão de culturas e sistema de preparo de solo por muitos anos, contribui para alterar a distribuição de nutrientes como fósforo (P) e potássio (K), matéria orgânica e pH no perfil do solo. Tais mudanças geralmente ocorrem a longo prazo e tem levado aos pesquisadores a investigarem tais parâmetros químicos e físicos e as suas interrelações, afetando a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

O sistema de preparo de solo convencional que consiste de operações que visam basicamente o preparo para o plantio, produz condições de solo relativamente homogêneas e em alguns casos redistribuem o fertilizante ou corretivo a lanço na profundidade do solo atingida pelo implemento.

Em plantio direto o solo não é movimentado pelo cultivo e as linhas de plantio permanecem quase na mesma posição ano após ano (Larson, 1964). Em solos argilo-siltosos, os fertilizante fosfatados e potássicos tendem a se acumular próximo à superfície do solo, e uma

adubação pesada não compensa a redução de produção normalmente ocorrente nos primeiros anos de sistemas conservacionistas tais como, plantio direto e cultivo mínimo (Ketcheson, 1980). Em plantio direto, a incorporação mecânica de fertilizantes e o revolvimento do solo não é permitido e os nutrientes retirados pelo sistema radicular em profundidade e incorporados na planta, são subseqüentemente depositados na superfície do solo como resíduo a ser naturalmente decomposto (Dick, 1983).

A importância das sucessões de culturas relacionadas com mudanças químicas e físicas do solo tem sido bastante reconhecidas. Crookston, Kurlle e Lueschen (1988) explicam o "efeito rotação" como uma combinação de fatores benéficos que provocam mudanças no status de fertilidade do solo, como também mudanças na incidência de pragas e doenças. Qualquer um deles de maior ou menor importância, em determinado ambiente ou seqüência de cultura. De acordo com Griffith et al. (1988), a resposta de rotação não é consistente nos primeiros anos, mas é favorecida nos anos subseqüentes em todos os sistemas de preparo do solo. Conseqüentemente, resposta em produção relacionada com condições físicas do solo deve ser interpretada em relação às espécies e principalmente à seqüência trabalhada. Por outro lado, Bruce, Langdale e Dillard (1990), sugerem que os efeitos específicos da sucessão de culturas parecem ser prontamente anulados pelo sistema de preparo do solo.

A despeito de toda a discussão sobre vantagens e desvantagens de cada um dos sistemas já testados, existe uma marcante mudança relacionada ao contínuo cultivo do milho (*Zea mays* L.) quando comparado com milho e soja [*Glycine max* (L.) Merr.] em sucessão (Mannering e Griffith, 1981). Na verdade, a substituição de práticas tradicionais como aração, gradagem e ausência de rotação, sugerem um ajustamento nas recomendações de fertilizantes para milho e

soja e um melhor conhecimento a respeito do papel das operações de preparo do solo na disponibilidade de nutrientes.

A proposta deste trabalho foi caracterizar a eficiência das interações entre o preparo do solo e a sucessão de culturas em experimentos de longa duração, em alterar ou não a distribuição espacial de P, K, pH e matéria orgânica no perfil do solo, e conseqüentemente na produção.

2.2 REVISÃO DE LITERATURA

2.2.1 Efeito do sistema de preparo de solo nas propriedades químicas do solo

Embora fatores econômicos sejam determinantes para a tomada de decisão em relação à troca de sistema de preparo do solo, devem ser analisados os efeitos destas práticas influenciando as propriedades do solo, incluindo disponibilidade de nutrientes para as plantas, e conseqüentemente o comportamento da cultura, (Bauder, Randall e Schuler, 1985). Em contraposição Grant e Lafond (1994) e Mahli, Mcandrew e Carter (1992), não encontraram nenhuma diferença na disponibilidade de P e K, em solos submetidos à sucessões de culturas e/ou diferentes sistemas de preparo do solo. Contudo, Dick (1983) estudando a relação entre sistema de preparo do solo e disponibilidade de nutrientes, encontrou que a distribuição de carbono, nitrogênio, fósforo orgânico e pH no perfil do solo (0-30 cm), mudaram como resultado de várias intensidades de preparo do solo, continuamente aplicados.

De acordo com Mannering e Griffith (1981), o sistema convencional é caracterizado por aração com aiveca no outono, seguido por gradagem na primavera e grade mais

leve antecedendo o plantio. São considerados sistemas conservacionistas, aqueles em que na época do plantio pelo menos 30% do solo está coberto com restos da cultura anterior.

É consenso entre os pesquisadores que plantio direto, provoca um aumento na concentração de nutrientes na superfície do solo e uma rápida diminuição em profundidade, caracterizando estratificação dos mesmos no perfil do solo (Robbins e Voss, 1991 e Cruz, 1982). Ocorre diminuição de pH na superfície do solo (Jacobsen e Westerman, 1991) que conseqüentemente afeta a disponibilidade de nutrientes para a planta cultivada (Grant e Bailey, 1994) Por outro lado, o sistema convencional de preparo do solo resulta em um solo mais homogêneo quanto ao status de fertilidade.

No sentido de manter o solo não movimentado, o sistema de plantio-direto pode elevar a concentração de nutrientes como P e K, nas camadas superiores do solo (Follet e Peterson, 1988; Lal, 1976; Eckert e Johnson, 1985), resultando em aumento de P e K disponível, próximo à superfície, enquanto que grandes quantidades são encontradas nas camadas inferiores, em solos submetidos ao sistema convencional (Hargrove et al., 1982; Haynes e Knight, 1989).

Muitos estudos atribuem a estratificação do P ao lento movimento de fertilizantes fosfatados no perfil do solo, aplicados superficialmente a lanço. O fósforo é relativamente imóvel no solo e tende a se manter próximo ao local de aplicação a menos que o solo seja movimentado. Eckert e Johnson (1985) mostraram que a despeito do método de aplicação, a fertilização fosfatada de uma maneira geral promove as maiores concentrações nas camadas superiores, demonstrando que fósforo aplicado, superficialmente a lanço, não e por si só o pré-requisito necessário para estratificação de P. Aplicação subsuperficial em faixas pode ter um impacto positivo adicional quando usado em conjunção com plantio direto, reduzindo acumulações superficiais de fósforo e conseqüentemente levando a uma maior eficiência de adubação.

A reduzida movimentação do solo pode diminuir a adsorção do fósforo adicionado como fertilizante, promover uma atividade microbiana mais intensa, e assim conduzir a uma maior extração (Simard e Lapierre, 1994). Consequentemente, ocorre um mais alto nível de P na superfície do solo e diminuição em profundidade (Cruse et al., 1993). Grant e Bailey (1994), observaram que em plantio direto e sistema convencional de preparo do solo, o fósforo disponível ficou concentrado na camada superficial de 15 cm, com a maior disponibilidade ocorrendo na profundidade de adubação.

Grant e Bailey (1994) relatam ainda que, a concentração de potássio decresce até a profundidade de 15-25 cm e depois permanece relativamente constante. Em plantio direto, as mais altas concentrações de K presumivelmente resultam da retenção de K a partir dos fertilizantes e resíduos de culturas na superfície do solo, devido à falta de movimentação.

Para uma produção adequada é necessária a adição de fertilizantes bem como a adoção de sistemas conservacionistas, que devem ter um grande impacto no pH do solo e extração de nutrientes (Simard e Lapierre, 1994). Estratificação de propriedades químicas e físicas do solo em sistemas conservacionistas, combinadas com aplicações superficiais de N-amoniacal (Follet e Peterson, 1988), contribuem para a acidificação do solo (Dick, 1983; Eckert, 1985; Hargrove et al., 1982; Mahler e Harder, 1984, Fox e Hofman, 1981, e Phillips, 1990). A mesma cultura sendo cultivada por muitos anos, deve eventualmente levar ao aumento da necessidade de calagem baseada na acidificação provocada por uma pesada e frequente adubação nitrogenada (Jacobsen e Westerman, 1991). O pH pode ser afetado pelo preparo do solo, devido à mudanças na distribuição de nutrientes e matéria orgânica (Follet e Peterson, 1988). A informação sobre os efeitos interativos do preparo reduzido do solo, extração de N e P, como

também pH, é necessária para selecionar sistemas que possam otimizar a produção e a disponibilidade de nutrientes naturais ou adicionados ao solo (Simard e Lapierre, 1994).

Os resultados de pH envolvendo sistemas de preparo do solo, ainda são muito controversos. Hargrove et al. (1982) e Blevins, Thomas e Cornelius (1977) encontraram que o pH na camada superficial de 5 cm foi similar a despeito do sistema de preparo do solo, e que diminuiu com a profundidade sob sistemas conservacionistas, quando comparado com sistemas convencionais, sendo explicado pela ineficiência da calagem superficial em tratamento de cultivo mínimo ou plantio direto. Contudo, Moschler et al. (1973) não encontraram substancial diminuição no pH com a profundidade do solo preparado para plantio. A despeito da controvérsia, Karlen, Berry e Colvin (1991) comparando diferentes sistemas de cultivo, encontraram valores de pH em sistema convencional mais alto e pH mais baixo em sistemas conservacionistas, sendo os mesmos estatisticamente diferentes.

Indubitavelmente, a acumulação de resíduos e matéria orgânica é uma das mais importantes contribuições dos sistemas conservacionistas para a superfície do solo. De acordo com Logan, Lal e Dick (1991) o efeito positivo é a melhoria nas propriedades físicas e no manejo d'água, e como efeitos negativos citam-se a ineficiência de certos herbicidas, e a existência de um habitat permanente para a multiplicação de patógenos.

2.2.2 Efeito da sucessão de culturas na estratificação de nutrientes no perfil do solo

A alternância de culturas pode modificar os níveis de nutrientes para a nutrição das plantas. Milho e soja podem exibir os mais altos potenciais de produção quando cultivados em sucessão e cultivo mínimo. O "efeito rotação", troca do cultivo contínuo pela sucessão de

culturas, pode ter uma ação sobre os resultados de produção. De acordo com Campbell et al. (1991), os benefícios de uma sucessão (ou rotação) adequada incluem uma melhoria na resistência do solo à erosão, bem como melhoria na fertilidade e benefícios agronômicos diretos e indiretos ao produtor, como os efeitos favoráveis provenientes do N fixado por leguminosas de cultivo prévio. Em estudos de longa duração, solos escuros como Chalmers (argilo-siltoso) têm demonstrado que o plantio direto conduz a uma melhor taxa de crescimento, que pode ser grandemente reduzido pelo cultivo mínimo, e só levemente reduzido pelo cultivo de milho seguido de soja (Griffith et al., 1988).

Welch (1976) concluiu que milho cultivado continuamente produz resíduos que liberam substâncias que inibem o seu próprio crescimento em sucessão e que o resíduo da soja deve exercer efeito inverso. Crookston e Kurle (1989) concordam com os autores citados, ressaltando que se o milho for a cultura prévia, a soja tenderá elevar a produção em relação ao cultivo contínuo, devido ao resíduo da cultura anterior. Contudo, existe um comportamento favorável do plantio direto com milho, explicado parcialmente pela umidade mais elevada na superfície do solo, pelo maior volume de palha presente de mais difícil decomposição e pelas condições mais favoráveis à infiltração de água. De acordo com Crookston et al. (1991), a acumulação de nutrientes pela soja, em geral não é afetada pela sucessão, quando comparada com a monocultura, e ambos milho e soja exibiram tal efeito. Alternância anual de duas culturas resultou em produção significativamente mais alta em relação à produção obtida com a monocultura, embora tenha sido mais baixa no primeiro ano de cultivo.

A sucessão de culturas parece afetar a distribuição de nutrientes no perfil do solo, que pode levar à estratificação daqueles relativamente imóveis no solo. Estudo de sistemas

conservacionistas mostraram que a estratificação foi bem maior durante os primeiros dois anos, mas não parece afetar negativamente a produção de milho ou soja (Erbach, 1982).

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

Há 20 anos têm sido conduzidos trabalhos de pesquisa com continuidade até o presente, em parcelas de longa duração, na Fazenda Experimental do Departamento de Agronomia da Universidade de Purdue, localizada na cidade de West Lafayette, no Estado de Indiana, situada no cinturão de produção de milho e soja (corn-belt) dos Estados Unidos. Os experimentos constam de vários sistemas de preparo do solo, e milho (*Zea mays* L.) e soja [*Glycine max* (L.) Merr.] cultivados continuamente ou em sucessão, no solo denominado de Chalmers, solo argilo siltoso (fine-silty, mesic, mixed Typic haplaquoll).

No sentido de alcançar os objetivos propostos, esta pesquisa considerou informações já existentes relativas aos anos de 1981 e 1986 e novas informações geradas relativas ao ano agrícola de 1994, embora a maior parte da discussão esteja centrada nos dados mais recentemente gerados.

Dando continuidade ao programa de pesquisa atualmente desenvolvido, este estudo consistiu de 06 tratamentos arrançados em delineamento experimental definido como parcelas subdivididas, com três repetições. A parcela experimental constava da sucessão de cultura (soja-milho) e milho cultivado continuamente. A sub-parcela constituiu de três sistemas de preparo do solo (convencional, plantio-direto e cultivo mínimo). A parcela útil colhida tinha 10,2 m de largura (12 fileiras) por 50 m de comprimento.

Anualmente é feito o preparo primário do solo no outono, em meados de outubro, e preparo secundário na primavera, no início de maio, de acordo com as operações apresentadas na Quadro 1, para milho cultivado continuamente ou alternado com soja. As operações primárias de preparo do solo (aração) e amostragem do solo para análise das características químicas, foram executadas depois da colheita de grãos.

O híbrido de milho, Beck's 65X foi plantado em 1981 e 1986, e Beck's 6565 em 1994 com uma população de 26.000 plantas por hectare. As variedades de soja usadas foram Century em 1981 e 1986 e Edison em 1994, plantadas normalmente na segunda metade do mês de maio, consumindo 50 kg/ha de semente. Os dados analisados nesta pesquisa dizem respeito diretamente às parcelas ocupadas com a cultura do milho, seja em sucessão com a soja ou continuamente cultivado.

Plantas daninhas foram controladas com herbicidas seguindo as recomendações, descritas por Griffith et al. (1988).

As amostras de solo foram retiradas em 11 posições (Figura 1) (Phillips, 1990), na linha transversa entre linhas de plantio, em cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, e 20-25 cm) com as posições 1 e 11 correspondendo às linhas de plantio. As posições foram distanciadas em 7,5 cm, numa linha transversal de 75 cm, correspondente à distância entre duas linhas. Uma barra de madeira com 11 furos distanciados em 7,5 cm foi utilizado no sentido de assegurar uma correta e precisa técnica de amostragem. Quatro subamostras foram retiradas de cada parcela que misturadas formaram uma amostra composta de solo, posteriormente analisada. Em seguida, as amostras de solo foram secas, destorroadas e analisadas para P, K, pH, e matéria orgânica. P e K disponível foram medidos através do método extrator Mehlich-3 (Mehlich, 1984). O pH foi

QUADRO 1. Resumo das práticas culturais executadas no cultivo do milho, e soja em experimento de longa duração nos anos de 1981, 1986, 1994 e 1995.

Ano	Milho	Soja	Milho ou Soja	
	Adubação		Preparo primário	Prepário secundário*
1981	250 kg/ha NH ₃ no pré-plantio 100 kg/ha 28-28-0 como starter 0-90-180 a lanço/outono de 1990	Não Não	Aração com aiveca no outono no preparo de solo convencional Escarificação no outono no cultivo mínimo	Gradagem e uso de cultivador em preparo convencional Uso de cultivador em cultivo mínimo
1986	250 kg/ha NH ₃ no pré-plantio 113 kg/ha 18-46-0 como starter 0-115-210 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) kg/ha a lanço no outono de 1984	Não Não Idem	Aração com aiveca no outono no preparo de solo convencional Escarificação no outono no cultivo mínimo	Gradagem e uso de cultivador em preparo convencional Uso de cultivador em cultivo mínimo
1994	200 kg/ha NH ₃ entre fileiras 95 kg/ha 34-0-0 como starter	Não Não	Aração com aiveca no outono no preparo de solo convencional Escarificação no outono no cultivo mínimo	Gradagem e uso de cultivador em preparo convencional Uso de cultivador em cultivo mínimo
1995	180 kg/ha NH ₃ entre fileiras Aplicação de inibidor de nitrificação 95 kg/ha 34-0-0 como starter	Não Não	Aração com aiveca no outono no preparo de solo convencional Escarificação no outono no cultivo mínimo	Gradagem e uso de cultivador em preparo convencional Uso de cultivador em cultivo mínimo

(*) Preparação do solo para plantio

Fonte: Purdue University, Agronomy Department, West Laffayette, IN - Tillage Research Annual Report

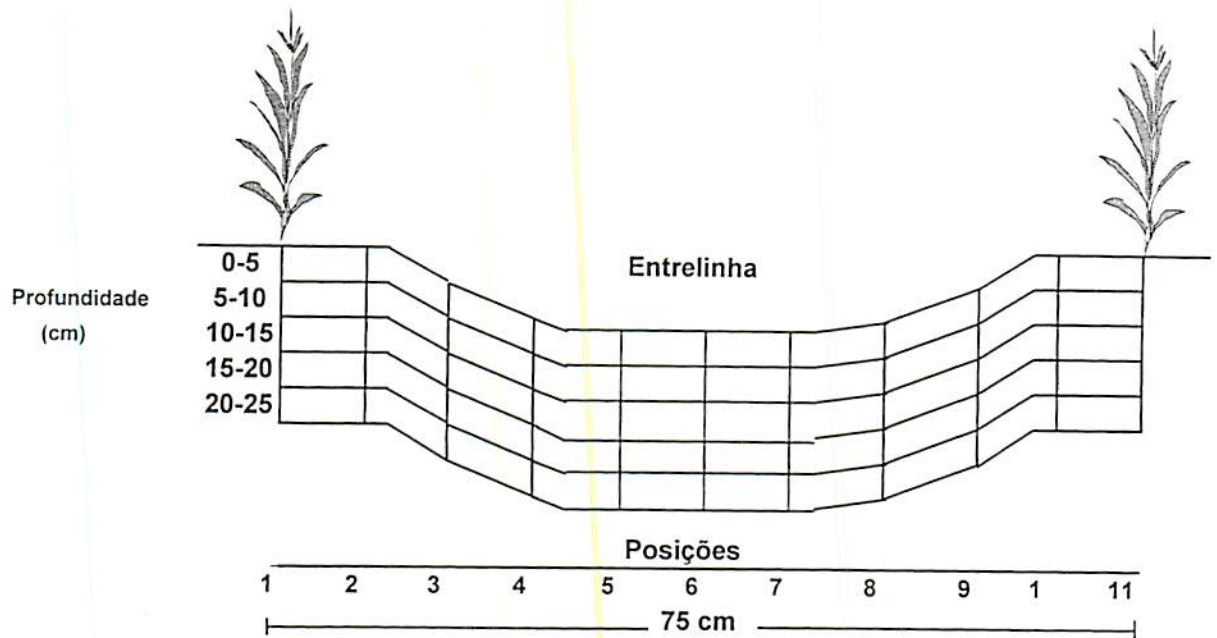


FIGURA 1. Representação esquemática da técnica de amostragem de solo em cinco profundidades no perfil do solo e onze posições entre linhas de plantio de milho.

medido em água desmineralizada, na proporção solo:solução de 1:1. O conteúdo de matéria orgânica do solo foi determinado pela combustão a 360°C por duas horas (Storer, 1984).

Os parâmetros avaliados foram:

- a) Concentração de fósforo no solo;
- b) Concentração de potássio no solo;
- c) pH no solo;
- d) Teor de matéria orgânica e,
- e) Produção de grãos

Os dados foram analisados usando procedimentos estatísticos determinados pelo programa SAS (SAS, 1985). Análises de variância foram calculadas para cada uma das variáveis dependentes.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Fósforo

A concentração de fósforo se apresentou relativamente diferente entre os três sistemas de preparo do solo ($P < 0,1$) (Quadro 2). A distribuição espacial de P no solo, representada na Figura 2, mostrou uma maior concentração de fósforo nas primeiras camadas do solo a despeito do sistema de preparo utilizado. Os resultados de P no solo foram agrupados na Figura 2 objetivando resumir a interação Sucessão de cultura versus Sistema de preparo do solo, que não apresentou diferença estatística. A aplicação de "starter" e/ou fertilizante a lanço (Quadro 1) com a presença ou ausência de incorporação física, explica o acentuado efeito da profundidade ($P < 0,001$) na distribuição de P no perfil, semelhante ao que foi apresentado por Bauder, Randall e Schuler (1985).

O preparo do solo convencional caracterizado por uma completa movimentação do solo, apresentou resultados médios de concentração de P, inferiores dentre os três sistemas testados (Tabela 1), além de não apresentar estratificação de fósforo, resultando em uma distribuição mais uniforme do elemento na camada arada (Griffith, Mannering e Moldenhauer, 1977). Por outro lado, foram encontrados na camada superior de 15 cm valores relativamente uniformes (Figura 2), sem entretanto, uma abrupta mudança para valores bem inferiores. Tem sido observada uma tendência de diminuição do teor de P disponível com o passar dos anos (Tabela 1), possivelmente decorrente de uma maior retirada do elemento pela planta em comparação com uma menor reposição através da fertilização. Aparentemente tal fato não afetou a produção em todos os sistemas testados (Tabela 1A), em contraposição, vem ocorrendo um

aumento de produção ($P < 0,05$) com o passar dos anos, talvez porque os níveis de P no solo apresentados, ainda sejam suficientemente altos.

QUADRO 2. Resumo da análise de variância dos parâmetros químicos fósforo (P), potássio (K), pH e matéria orgânica (M.O.) em 1994.

Fonte de Variação	G.L.	P	K	pH	M.O.
Reps	2	ns	*	ns	*
Sucessão (C)	+	ns	ns	ns	ns
Erro (a)	2	-	-	-	-
Sist. Prep.(S)	2	+	***	ns	ns
C x S	2	ns	ns	ns	ns
Erro (b)	8	-	-	-	-
Posição (P)	10	ns	***	***	+
C x P	10	+	***	ns	ns
S x P	20	*	***	***	ns
C x S x P	20	ns	***	+	*
Erro (c)	120	-	-	-	-
Profundidade (Pr)	***	***	***	***	***
C x Pr	4	+	+	ns	ns
S x Pr	8	***	***	ns	***
C x S x Pr	8	ns	*	ns	ns
Pool de erros(d,e,f)	48	-	-	-	-
P x Pr	40	***	***	***	***
C x P x Pr	40	ns	***	ns	ns
S x P x Pr	80	***	***	*	**
C x S x P x Pr	80	**	***	ns	*
Erro (g)	480	-	-	-	-

+, *, **, *** Significância a 10, 5, 1 e 0,1% respectivamente.

CV (P) = 16,44%, CV(K) = 9,19%, CV(pH) = 5,42%, CV(MO) = 6,93%.

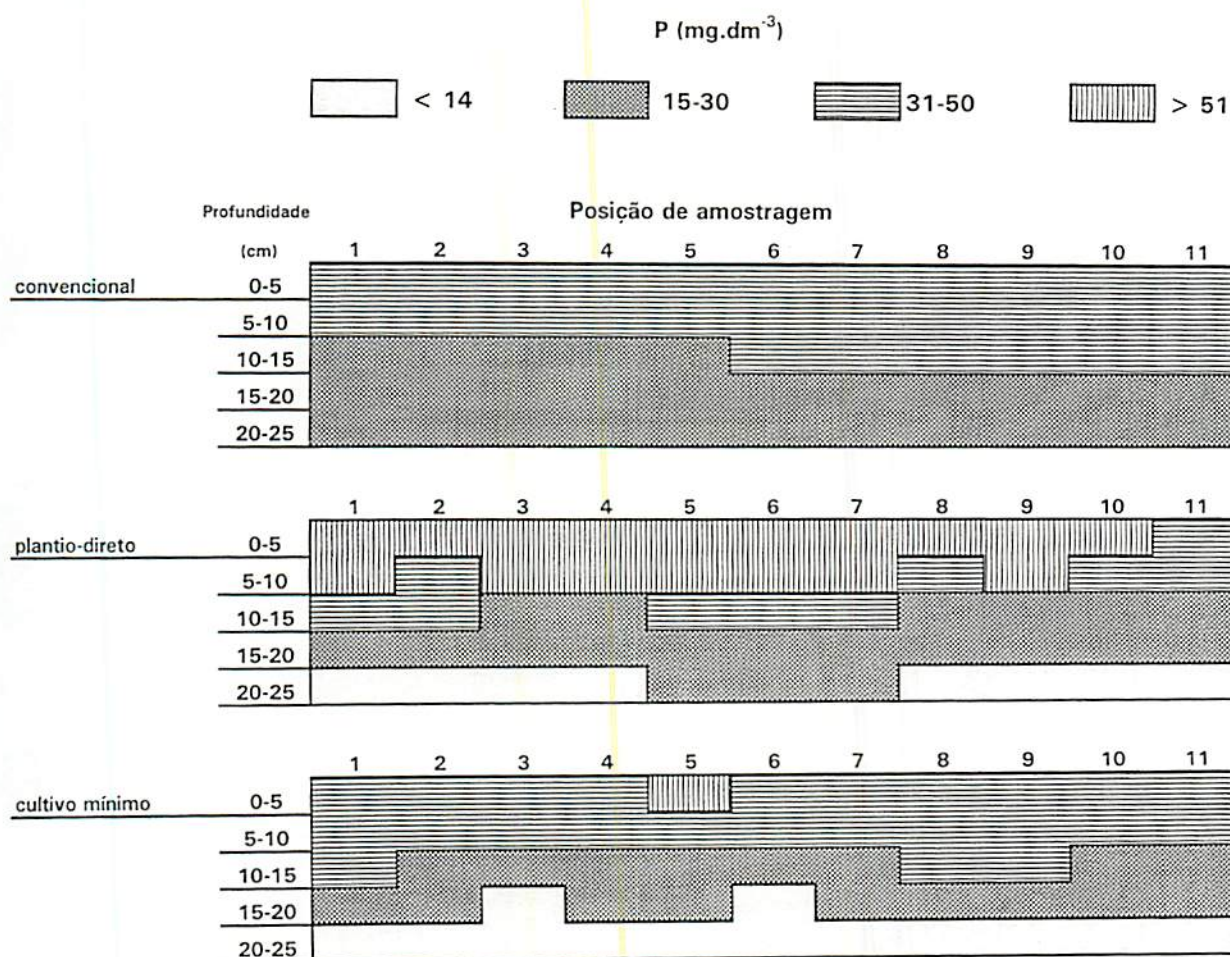


FIGURA 2. Concentração média de fósforo (P) em diferentes profundidades e posições, em solo cultivado com milho e em diferentes sistemas de preparo de solo (convencional, plantio-direto e cultivo mínimo), em 1994.

A estratificação de fósforo foi melhor caracterizada no plantio direto como resultado de uma aplicação superficial de P sem incorporação. Karlen, Berry e Colvin (1991), Robbins e Voss (1991) e Follet e Peterson (1988) associaram tais fatos com práticas conservacionistas de preparo do solo, ou mesmo ausência de preparo. De acordo com Logan, Lal e Dick (1991), em plantio direto ou cultivo mínimo, fósforo e potássio primariamente se movem no perfil do solo com o movimento da água e muito mais lentamente por difusão. No sistema de

TABELA 1. Valores médios de pH, fósforo (P), potássio (K) e matéria orgânica (MO) em diferentes profundidades (cm) e sistemas de preparo de solo, em 1981, 1986 e 1994.

Profundidade (cm)	pH								
	Convencional			Cultivo mínimo			Plantio direto		
	1981	1986	1994	1981	1986	1994	1981	1986	1994
0-5	5,6	5,8	5,4	6,1	5,9	5,5	6,0	5,6	5,8
5-10	5,6	5,7	5,4	5,7	5,5	5,1	5,6	4,9	5
10-15	5,6	5,5	5,4	5,3	5	5,2	5,1	5	4,8
15-20	5,6	5,6	5,8	5,5	5,2	5,2	5,4	5,9	5,1
20-25	5,7	5,8	6	5,7	5,9	5,7	5,8	5,9	5,4
Média	5,6	5,7	5,6	5,7	5,5	5,3	5,6	5,4	5,2

Profundidade (cm)	P								
	Convencional			Cultivo mínimo			Plantio direto		
	1981	1986	1994	1981	1986	1994	1981	1986	1994
	mg.dm^{-3}								
0-5	37	48	41	110	90	68	102	84	46
5-10	41	50	37	70	46	63	69	57	40
10-15	48	50	34	29	28	41	38	38	25
15-20	36	47	27	22	15	27	24	21	14
20-25	24	36	17	20	8	18	18	9	8
Média	37	46	31	50	37	43	50	42	27

Profundidade (cm)	K								
	Convencional			Cultivo mínimo			Plantio direto		
	1981	1986	1994	1981	1986	1994	1981	1986	1994
	mg.dm^{-3}								
0-5	133	200	187	338	343	265	273	321	198
5-10	152	197	157	222	155	165	195	203	152
10-15	170	206	156	111	110	134	119	144	132
15-20	149	198	154	104	117	133	107	141	135
20-25	129	183	151	101	126	142	101	156	137
Média	147	197	161	175	170	168	159	193	151

Profundidade (cm)	MO								
	Convencional			Cultivo mínimo			Plantio direto		
	1981	1986	1994	1981	1986	1994	1981	1986	1994
	g.kg^{-1}								
0-5	41	-	47	47	-	49	49	-	55
5-10	41	-	48	44	-	47	46	-	47
10-15	41	-	48	42	-	44	43	-	45
15-20	39	-	44	38	-	39	40	-	41
20-25	34	-	37	33	-	33	35	-	37
Média	39	-	44	41	-	42	42	-	45

plantio direto foram observados maiores teores de P na camada de 0 a 15 cm, e um decréscimo em profundidade. De fato, esta é a tendência geral com o passar dos anos, de acordo com o apresentado na Tabela 1.

A despeito da falta de movimentação do solo em plantio direto, parte do fósforo disponível nas camadas superiores presumivelmente resultou do P depositado e que foi retirado pelas raízes em profundidade no perfil do solo. De acordo com Eckert e Johnson (1985), isto pode ter contribuído para a estratificação de P. O máximo de fósforo disponível ocorreu na profundidade de fertilização (Grant e Bailey, 1994), devido à continuada adubação fosfatada a lanço, sendo explicado por Dick e Daniel (1987) pela aumentada saturação dos sítios de fixação. Consequentemente, uma maior percentagem de fósforo total no solo está disponível para reposição do que foi removido pela absorção das plantas. Weil et al. (1988) ressaltam que uma menor movimentação do solo leva a uma menor fixação do fósforo e consequentemente a uma maior recuperação.

O cultivo mínimo mostrou uma tendência de mais baixas concentrações de P em profundidade (Figura 2), refletindo uma relativa imobilidade do elemento em direção às camadas inferiores. O cultivo mínimo apresentou características de um sistema intermediário de preparo do solo em relação à distribuição de P no perfil do solo, pois não é caracterizado pela grande movimentação mecânica do fósforo como no sistema convencional e nem apresenta ausência de preparo do solo como no plantio direto (Simard e Lapierre, 1994). O cultivo mínimo pela ausência da incorporação profunda de fertilizantes fosfatados, conduz a uma redução da fixação de fósforo comparado com o sistema convencional. Embora o cultivo mínimo não seja considerado um sistema conservacionista por alguns autores, a movimentação do solo, não se estende a mais que 10 cm (Tabela 1). Contudo, na comparação dos dois sistemas de cultivo,

observou-se uma diferença numérica que demonstrou ser o sistema de cultivo mínimo, mais relacionado com plantio direto que com o sistema convencional. Mesmo com pouca movimentação do solo, parte da alta concentração de P na superfície pode ser atribuída a uma maior mineralização do fósforo orgânico.

2.4.2 Potássio

Os resultados mostraram uma diferença significativa a nível de 1% entre os sistemas de preparo de solo estudados, e um simples grau de liberdade mostrou uma tendência de diferença ($P < 0,10$) entre as sucessões de cultura testadas (Quadro 2). Em geral a concentração de K na superfície do solo se mostrou alta ou muito alta para todos os sistemas de preparo do solo, contudo ocorreu um decréscimo em profundidade no cultivo mínimo e plantio direto, presumivelmente como consequência da frequente adubação a lanço. Nos sistemas conservacionistas a deposição dos resíduos das culturas exerceu um papel muito importante no aumento da concentração de K no perfil do solo.

A estratificação do potássio no perfil do solo mostrado na Figura 3, concordam com os resultados de Grant e Bailey (1994). Foi observada uma uniforme concentração de K no sistema convencional, quando comparado com plantio direto, como reportado por Bauder, Randall e Schuler (1985). Contudo, os autores citados não encontraram diferenças determinadas pelos sistemas de cultivo, em contraste à conclusões de Grant e Lafond (1994) e Simard e Lapierre (1994). A mais alta concentração de resíduos culturais ocorreu em plantio direto como resultado de ausência de movimentação das partículas do solo, em discordância com os resultados de Hargrove et al. (1982) e Blevins e Thomas (1984).

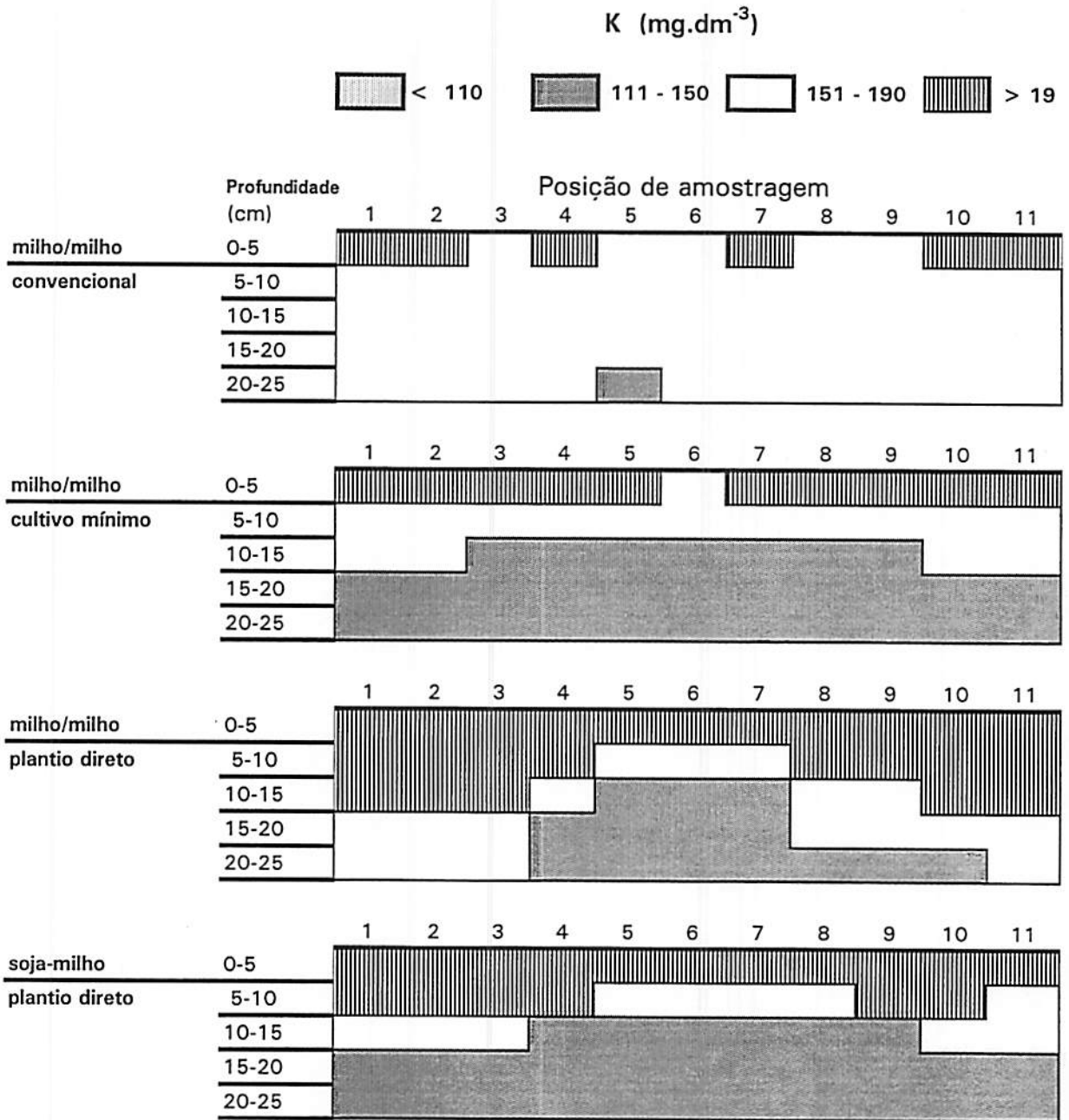


FIGURA 3. Concentração de potássio (K) em diferentes posições e profundidades (cm), em solo cultivado com milho contínuo ou em sucessão com soja e em diferentes sistemas de preparo do solo (convencional, plantio direto e cultivo mínimo), em 1994.

A maior quantidade de resíduos concentrados na superfície do solo apresentada pelo plantio direto, provocando uma maior acumulação de água, é responsável pelo maior

transporte de potássio do solo para a superfície radicular, que possivelmente contribuiu para maximizar o fluxo de potássio e conseqüentemente uma maior acumulação próximo à superfície. Como mostrado na Tabela 1, no sistema de cultivo mínimo, os níveis de K nas análises de solo, através dos anos, tem apresentado a mesma tendência previamente mencionada, contudo com uma diminuição na concentração de 1981 a 1994.

Os dados representados na Figura 3 foram agrupados objetivando resumir a interação Sucessão de Culturas (C) x Sistemas de preparo do solo (S) que não apresentaram diferenças estatísticas nos níveis de significâncias testados. Contudo, nas camadas superficiais do solo foi encontrada uma diferença numérica no tratamento plantio direto dentro de sucessão de culturas. Menores valores de K disponível para sucessão soja-milho podem ser explicados pela mais alta exportação de K por soja através dos grãos e uma marcante remoção do elemento da solução do solo pelas raízes, quando comparado com milho cultivado continuamente.

2.4.3 pH

Os resultados de pH do solo mostraram um acentuado efeito da adubação nitrogenada contínua através dos anos, exercendo um papel de grande importância no processo de acidificação do solo (Tabela 1). Foi observada acidez subsuperficial em função de constante e pesada adubação nitrogenada, tendo como fonte o sulfato de amônia, principalmente nos sistemas conservacionistas (Robbins e Voss, 1991).

De acordo com Franco e Munns (1982), quando amônia é a principal fonte de N, a planta absorve mais cátions que ânions e conseqüentemente exportará prótons e acidificará o solo. Isto foi bastante perceptível em plantio direto na sucessão milho/soja e em milho cultivado

continuamente. Neste sistema, uma área de acidez pronunciada ocorreu próximo a linha de fertilização nitrogenada, explicada pela ocorrência do plantio sempre na mesma linha e mesma posição, ano após ano. A zona de acidificação ocorreu até os 20 cm superficiais, sendo bastante similar para plantio direto e cultivo mínimo numa posição bem específica, correspondendo à linha de adubação nitrogenada. (Figura 4).

Mesmo ocorrendo diferença altamente significativa na avaliação do fator profundidade ($P < 0,001$) (Quadro 2), na decomposição dos seus vários níveis, só foi encontrada significância em apenas parte do tratamento, (Quadro 3A), em contraste com os resultados de Bauder, Randall e Schuler (1985) e Hargrove et al. (1982). No entanto, em plantio direto e cultivo mínimo, próximo a linha de fertilização e abaixo de 15 cm de profundidade, o pH do solo mostrou valores na faixa de 4,7 a 5,2. De fato, esta alteração está mais relacionada com o efeito posição de amostragem ($P < 0,01$), do que com o efeito profundidade amostrada (Mahler e Harder, 1984).

Em plantio direto a área mais acidificada se mostrou mais definida, em função da falta de movimentação do solo, embora o efeito tenha sido mais marcante no intervalo de 5 a 15 cm, tanto para a sucessão soja-milho, quanto para milho contínuo. Presumivelmente, a acumulação de matéria orgânica (Figura 4), característica do sistema de plantio direto, contribuiu para aliviar problemas associados com baixo pH (Hargrove e Thomas, 1981). Tais resultados concordam com Eckert (1985), que afirmou ter matéria orgânica papel de complexadora de alumínio solúvel, que se torna mais disponível com o abaixamento do pH. Neste sentido, a acidificação observada no sistema de plantio direto, se mostrou um problema de pouca relevância. Aplicação de N, a despeito dos sistemas de preparo do solo, não aumentou acentuadamente o pH na camada de 15 a 25 cm.

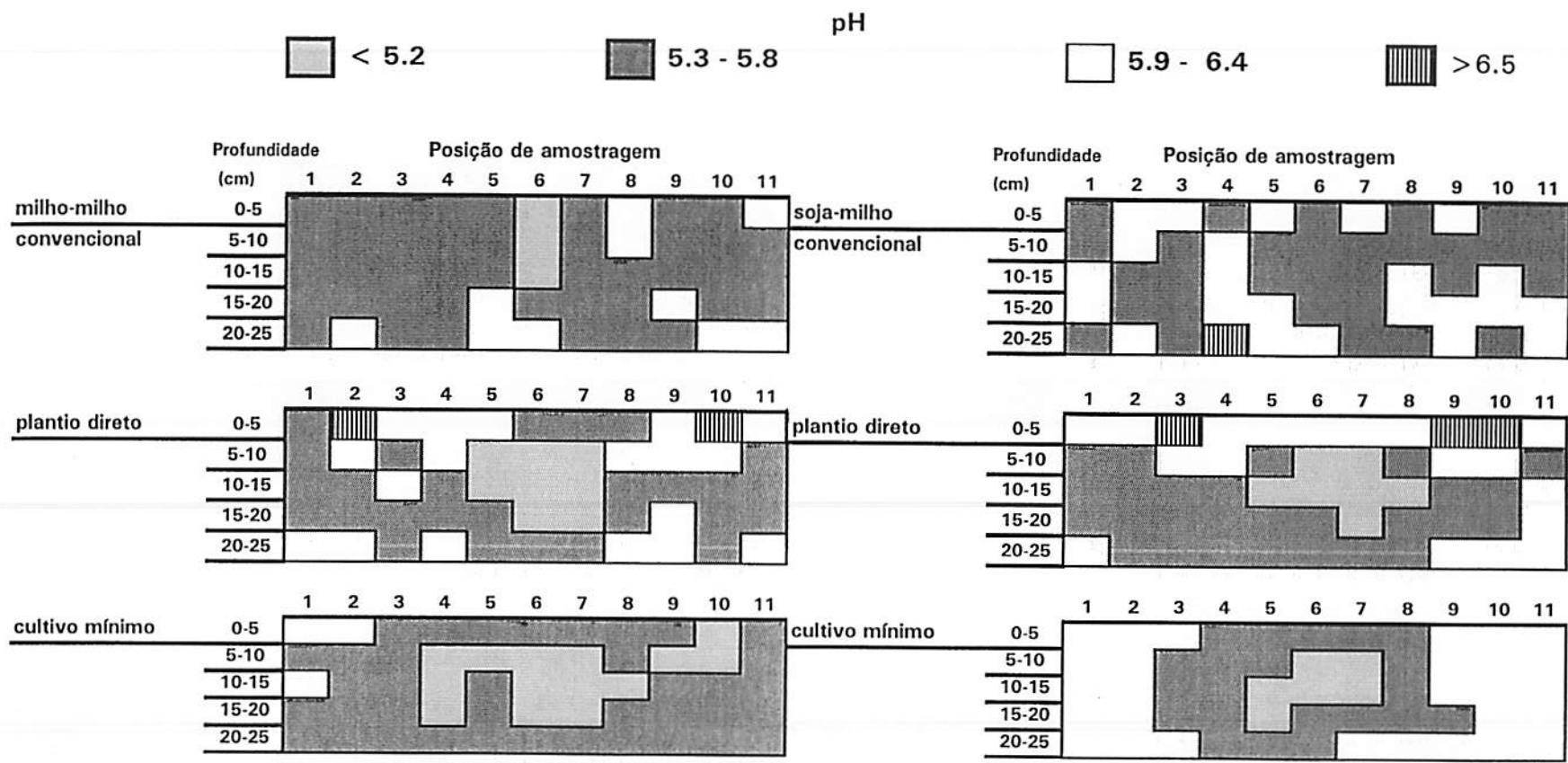


FIGURA 4. Valores de pH em diferentes posições e profundidades (cm) em solo cultivado com milho contínuo ou em sucessão com soja e em diferentes sistemas de preparo do solo (convencional, plantio direto e cultivo mínimo).

Em preparo convencional o tratamento sucessão de culturas produziu apenas um leve efeito na mudança de pH do solo. A fertilização nitrogenada que é feita no local correspondente à metade da distância transversa entre duas fileiras, em milho contínuo comparado com a sucessão soja-milho, contribuiu para acidificar o solo na camada de 0 a 15 cm de profundidade, em contraste com os resultados Blevins Thomas e Cornelius (1977). Karlen, Berry e Colvin (1991) também encontraram baixo pH em área cultivada com milho contínuo, possivelmente decorrente da fertilização nitrogenada mais pesada. A ocorrência de uma menor acidez no tratamento preparo de solo convencional conjugado com cultivo contínuo de milho, comparado com plantio direto e cultivo mínimo, pode ser explicada pelas condições relativamente homogêneas e redistribuição do nitrogênio aplicado como fertilizante.

Em consequência da menor quantidade de nitrogênio aplicada nas parcelas com preparo de solo convencional, a sucessão soja-milho apresentou um pH mais uniforme em toda a profundidade do solo estudada, e a variação relacionada com as posições mais ao centro, entre fileiras, praticamente desapareceu. O pH geral médio para cultivo convencional se apresentou maior do que nos sistemas conservacionistas. Os resultados encontrados, a despeito dos efeitos desejáveis para milho contínuo em sistemas de longa duração, concordam com Campbell e Zentner (1984) a respeito da indesejável necessidade de maior calagem, justificada pela crescente acidificação do solo, para se alcançar uma melhor produção.

2.4.4 Matéria Orgânica

Os resultados de matéria orgânica não mostraram diferenças significativas entre os sistemas de cultivo, concordando com Hargrove et al. (1982). Uma diferença numérica foi

encontrada entre os valores médios no sistema de plantio direto e preparo convencional na faixa de 0 a 5 cm de profundidade (Weil et al., 1988); os teores para plantio direto mostraram uma tendência de crescimento com o tempo. Abaixo da profundidade de 10 cm a variação não foi consistente, em contraste com estudos de Blevins et al. (1977). Falta de movimentação do solo em sistemas conservacionistas levaram a uma maior concentração de matéria orgânica na superfície. Na verdade, os menores valores ocorrentes em sistemas convencionais, se devem a uma promoção mais rápida de oxidação da matéria orgânica e subsequente mineralização.

Mesmo que o efeito sucessão de culturas não tenha mostrado significância estatística nos resultados de matéria orgânica, no preparo convencional (Quadro 2), um teor numericamente mais alto em milho contínuo foi encontrada na camada de 0 a 20 cm (Figura 5), quando comparada com o cultivo mínimo e plantio direto. Isto pode ser explicado pela mais rápida decomposição do resíduo de soja, quando comparado com o resíduo de milho. Na comparação dos diversos sistemas de cultivo dentro do fator milho contínuo, foi também encontrada um maior teor de matéria orgânica na faixa de 15 a 25 cm de profundidade, provavelmente devido à incorporação dos resíduos culturais na superfície pela aração e gradagem.

2.4.5 Efeito de sucessão de culturas e sistemas de preparo de solo na produção de milho

Concordando com resultados de Griffith et al. (1988), a sucessão de culturas em que soja é seguida de milho, independente do tipo de preparo do solo avaliado, apresentou a mais alta média de produção ($P < 0,10$), quando comparada com milho contínuo (Tabela 1A). O nitrogênio fixado pelas leguminosas de cultivo prévio e que é depositado no solo, contribui para a decomposição do resíduo de milho com alta relação C:N ou é absorvido pela cultura. Tal fato

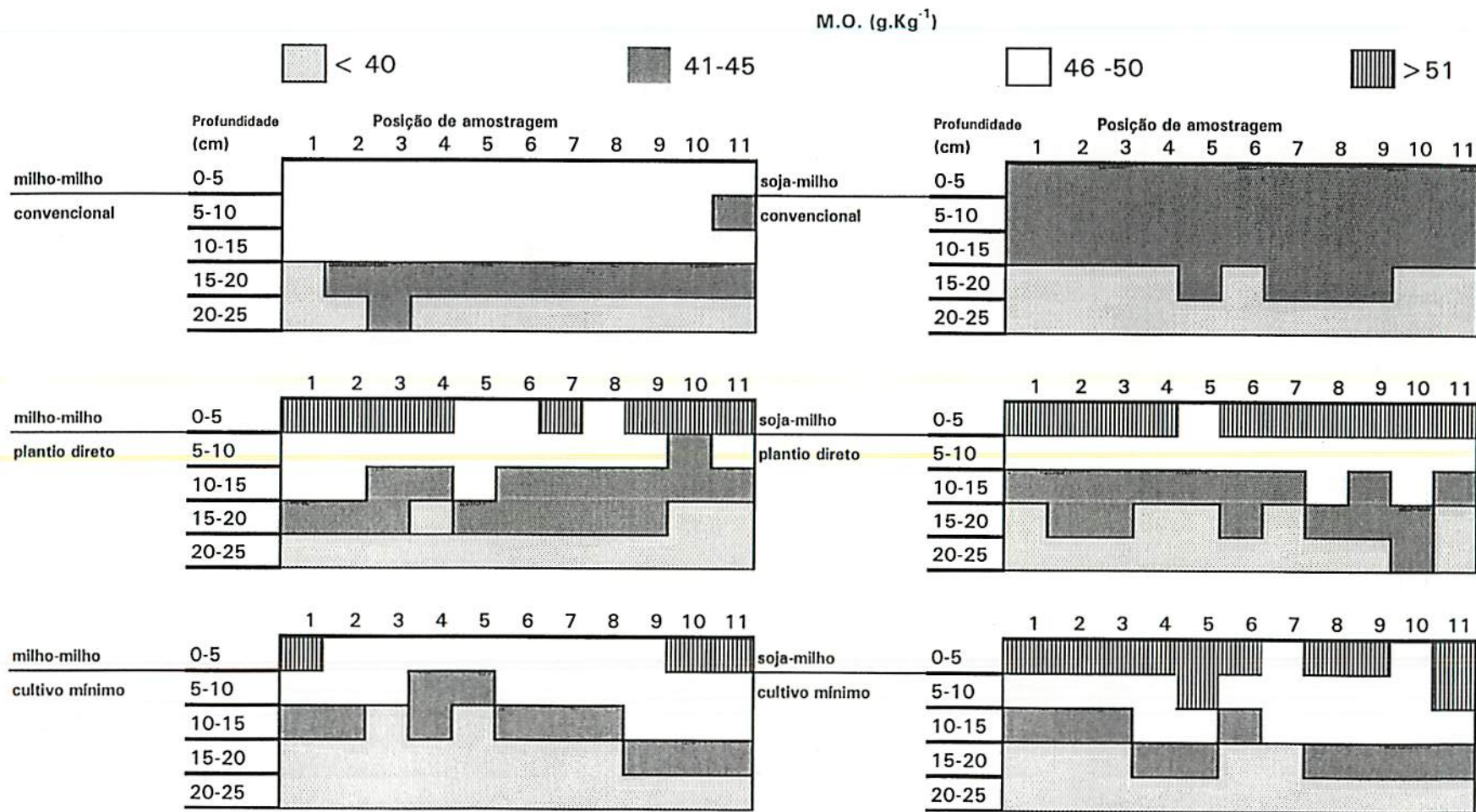


FIGURA 5. Teor de matéria orgânica (g.kg⁻¹) em diferentes posições e profundidades, em solo cultivado com milho contínuo ou em sucessão com soja e em diferentes sistemas de preparo do solo (convencional, plantio direto e cultivo mínimo), em 1994.

constitui um fator econômico de extrema importância em razão da redução da adubação nitrogenada na cultura do milho e conseqüentemente grande contribuição para diminuição dos custos de produção. Outra explicação que justifica a vantagem da sucessão de culturas, é a melhoria nas condições físicas do solo em solos de drenagem difícil, como é o caso do solo estudado.

Nos últimos 15 anos, o sistema de plantio direto, apresentou produção inferior, quando comparado com o cultivo mínimo e sistema convencional, acompanhado de um aumento no teor de matéria orgânica (Tabela 1). Pouca diferença foi encontrada entre os sistemas convencional e cultivo mínimo, embora o primeiro tenha apresentado as maiores médias de produção. O grande volume de resíduos (palha de milho) deixados na superfície (como ocorre em plantio direto), ou somente parcialmente incorporado (como ocorre em cultivo mínimo), aumenta a entrada (absorção) de água e reduz a evaporação, desta forma aumentando ainda mais a umidade do solo que no caso é considerado de drenagem difícil. Em anos de pluviosidade acima da capacidade de drenagem destes solos, tal fato pode contribuir para atraso na germinação, crescimento mais retardado, ocasionado principalmente por uma mais baixa temperatura do solo, podendo afetar diretamente a produção. Na verdade, relatos a respeito de produção de milho em comparações de sistemas convencionais com sistemas conservacionistas têm variado bastante.

Os dados relativos ao plantio direto e ao cultivo mínimo resultaram em mais estratificação nas propriedades químicas do solo (Figuras 2, 3, 4 e 5), do que o convencional, mas isto, isoladamente, não parece ter reduzido a produção. Tais resultados concordam com Robbins e Voss (1991) que concluíram que, a estratificação de nutrientes não afeta adversamente a absorção pelas plantas considerando que ocorre uma resposta positiva do plantio direto quando apresenta-

se uma condição de umidade favorável do solo e conseqüentemente as raízes se mostram aptas a extrair nutrientes de fertilizantes aplicados a lanço.

O plantio direto versus convencional em termos de produção, ambos considerando a sucessão soja/milho (Tabela 1A), mostrou as menores médias gerais do tratamento, e uma maior variação ano após ano do que outras comparações de sistemas de preparo do solo em milho contínuo, concordando com Griffith et al. (1988).

A Figura 6 apresenta uma acentuada queda de produção relativa aos anos de 1983, 1991 e 1995, com maior ênfase para o milho contínuo em plantio direto. O decréscimo de produção é explicado pela mais baixa pluviosidade, nos meses de junho, julho e agosto, menos da metade do que é normalmente registrado neste período do ano, numa fase crítica para o desenvolvimento da cultura. Tal fato pode ter contribuído para uma acentuação dos efeitos alelopáticos produzidos pelos resíduos de milho, como explicado por Yackle e Cruse (1984). Mannering e Griffith (1981) relatam que uma grande concentração de resíduos culturais (alta relação C:N) próxima à superfície mantém a temperatura do solo mais baixa, conseqüentemente reduzindo a decomposição de nutrientes liberados pelos resíduos. A tendência de acidificação do solo com o passar dos anos (Tabela 1), apresentada pelo cultivo do milho contínuo, atribuída à adubação nitrogenada pesada na forma amoniacal (NH_4^+), como fonte de nitrogênio, pode também ter contribuído para tal decréscimo. De fato a acidificação promove as mais altas taxas de remoção de cátions como também alta taxa de lixiviação de nitrato (Franco e Munns, 1982).

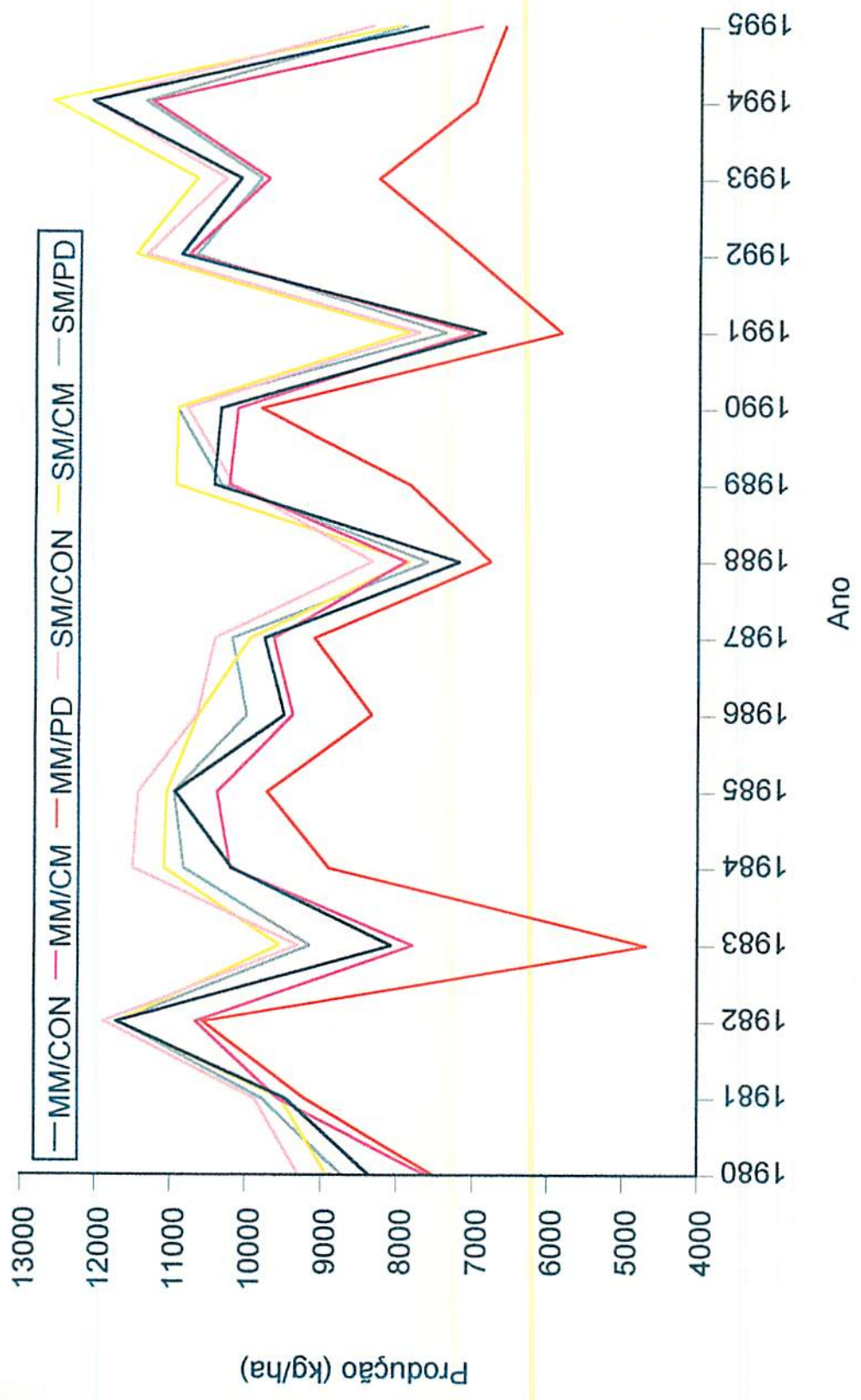


FIGURA 6. Produção de milho cultivado sob diferentes sistemas de preparo de solo (convencional, cultivo mínimo e plantio direto) e sucessão de culturas (milho-milho e soja-milho) de 1980 a 1995, no solo argilo siltoso Chalmers.

2.5 CONCLUSÕES

A pequena ou ausente movimentação do solo nos sistemas conservacionistas, foi o fator determinante para a estratificação de fósforo e potássio no perfil do solo.

A sucessão de culturas, com ênfase na alternância de soja com milho, contribuiu para minimizar o crescente processo de acidificação localizada do solo.

O percentual de matéria orgânica aumentou à medida que diminuiu a movimentação do solo, se mostrando na seguinte sequência decrescente: plantio direto>cultivo mínimo>preparo convencional.

A diminuição do pH na profundidade de fertilização, em áreas cultivadas com milho continuamente, poderá a longo prazo afetar negativamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

A estratificação de nutrientes no perfil do solo, frequente em sistemas conservacionistas, em anos de baixa pluviosidade, se apresenta como um fator que pode afetar negativamente a produção, com maior ênfase nas áreas onde predominam resíduos culturais de difícil decomposição (alta relação C:N), como palha de milho.

3 CAPÍTULO II

SIMULAÇÃO DE ABSORÇÃO DE FÓSFORO E POTÁSSIO NA CULTURA DO MILHO (*Zea mays* L.) ATRAVÉS DE MODELO MATEMÁTICO: EFEITO DE SUCESSÃO DE CULTURAS E SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO

RESUMO

O conhecimento do mecanismo de absorção de nutrientes é fator de extrema importância na melhoria das práticas de adubação na cultura do milho. O objetivo deste estudo foi determinar os efeitos de diferentes sistemas de preparo de solo (sistema convencional, plantio direto e cultivo mínimo) e sucessão de culturas (soja-milho ou milho cultivado continuamente) na taxa de absorção de fósforo e potássio, usando como ferramenta principal o modelo matemático de Barber e Cushman. O delineamento experimental consistiu de 08 (oito) tratamentos arranjados em parcelas subdivididas (split-plot), com três repetições. A sucessão de culturas foi considerada a parcela principal e os três sistemas de preparo do solo corresponderam às subparcelas. Foram estudadas amostras da fase sólida e solução do solo, bem como parâmetros radiculares, provenientes de cinco profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-25 cm), em linha e entre linhas de plantio de milho. Os parâmetros radiculares diferiram em função dos sistemas de preparo do solo. Em plantio direto, a taxa de crescimento radicular contribuiu para a obtenção de valores

mais altos de absorção calculada. Os valores de absorção calculada de K variaram com dados de concentração, parâmetros radiculares e conteúdo de umidade volumétrica. A distância média de difusão foi maior para potássio quando comparado com fósforo. A absorção calculada diminuiu com a profundidade do solo em todos os tratamentos. A taxa de crescimento radicular e a distância média entre raízes adjacentes foram os parâmetros que mais apresentaram sensibilidade em relação à absorção calculada de P e K.

SUMMARY

SIMULATION OF P AND K UPTAKE BY CORN (*Zea mays* L.) USING A MATHEMATICAL MODEL: EFFECT OF CROP ROTATIONS AND TILLAGE SYSTEMS

The knowledge of the mechanism of nutrient uptake is very important in order to stabilize fertilization practices in corn crop. The purpose of this study was to determine the effect of different tillage systems (moldboard plow, chisel plow and no-till) and crop rotations (soybean-corn rotation and continuous corn) in the rate of phosphorus and potassium uptake, by Barber and Cushman mathematical model. This continuous long term study consisted of 8 treatments arranged in a randomized split-plot design and replicated three times. The two crop rotations were used as the main plot and the three primary tillage operations were used as a subplot. We took soil samples from five depths down the profile (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 and 20-25 cm), in the row and interrow positions. All root parameters were affected by tillage systems. In no-till, root growth contributed to higher values of predicted uptake. There were differences in

K predicted uptake based in changes in soil solution and solid phase concentration, root parameters and volumetric moisture. It was found a higher K mean difusion distance when compared to P. Occurred a decrease in predicted uptake in soil depth for all treatments. Root growth and mean distance between roots were the parameteres which presented the most variable results in the sensibility analysis concerning to P and K predicted uptake.

3.1 INTRODUÇÃO

O aumento na eficiência de produção pode ser estimado por um melhor conhecimento do requerimento ótimo de nutrientes para as plantas como também da informação a respeito do que realmente é suprido pelo solo. A disponibilidade de água e nutrientes são dois dos mais importantes fatores que contribuem para o aumento de produção. O conhecimento do mecanismo de suprimento de nutrientes a partir do solo e absorção pela planta são importantes ferramentas usadas para formulação de práticas de adubação que maximizam a produção.

Cada um dos nutrientes tem um comportamento diferente em relação à absorção pelas raízes. Os nutrientes na solução do solo podem ser transportados até a superfície das raízes - superfície externa da plasmalema de células da epiderme ou de células corticais - por dois mecanismos : fluxo de massa e difusão. Na verdade, o transporte por fluxo de massa e por difusão podem ocorrer simultaneamente. A recuperação de fertilizantes fosfatados e potássicos é normalmente mais baixa do que a dos nitrogenados, em razão de uma menor recuperação dos mesmos pelas plantas.

As raízes das plantas ocupam em torno de 1% do volume de solo, e consequentemente nutrientes tais como fósforo e potássio, tem que se mover no sentido de

alcançar a raiz por difusão, processo pelo qual o elemento se move de um lugar de alta concentração para um local de mais baixa concentração, antes que eles estejam posicionalmente disponíveis para absorção pelo sistema radicular (Kovar e Barber, 1987). Por outro lado, porque eles difundem lentamente no solo, uma parte de P e K pode ser adsorvida pelas partículas do solo e outra parte dos íons P e K pode alcançar as raízes das plantas durante o ciclo da cultura, (Schenk e Barber, 1979), mesmo que entre P e K ainda existam algumas diferenças no que diz respeito à difusão.

O potássio não apresenta a mesma importância no crescimento radicular que o fósforo. Se uma porção do sistema radicular das plantas está em contato com fósforo, adicionado como fertilizante, o crescimento radicular é estimulado naquela porção. Neste sentido, resposta à adubação ocorrerá com o aumento da recuperação pelas plantas. Esta recuperação depende não somente da reação do fósforo adicionado ao solo, mas também da habilidade da raiz de absorver o fósforo que se encontra disponível.

De acordo com Kovar (1985), a absorção de nutrientes pelas plantas depende da morfologia do sistema radicular, taxa de crescimento radicular, características de absorção e habilidade do solo de suprir as raízes com os nutrientes necessários às plantas. Conseqüentemente, a taxa de crescimento radicular em solo fertilizado diretamente afeta a área superficial radicular e a quantidade de P absorvido.

Um modelo matemático foi desenvolvido inicialmente por Claassen e Barber (1976) para o cálculo de absorção de nutrientes pelas raízes, integrando o suprimento dos íons P e K pelo solo em direção à raiz, pelo movimento de fluxo de massa e/ou difusão, morfologia e taxa de crescimento do sistema radicular e relação de absorção de nutrientes pelas plantas com a concentração na solução do solo próximo à superfície (Cushman, 1979; Cushman, 1979a). Tanto

o Modelo de Cushman quanto o Modelo de Claassen e Barber usam as mesmas equações básicas. A inclusão no Modelo de Cushman do fator "competição radicular", representado pelo parâmetro " r_1 " ou meia distância entre raízes adjacentes, veio resolver um problema de superestimação de absorção de K, frequente quando do uso do Modelo de Claassen e Barber (Schenk e Barber, 1980). O modelo de absorção de nutrientes de Barber e Cushman (1981) foi testado em várias espécies de plantas, cultivadas em diferentes tipos de solos, e em condições controladas (casa-de-vegetação) e no campo, com muito boa correlação entre a absorção calculada e observada.

Diferenças na habilidade das plantas em absorver nutrientes e a habilidade do solo de fornecer nutrientes são fatores fundamentais para a melhor compreensão do funcionamento do modelo de absorção de nutrientes. Enfim, o modelo pode consistentemente prever a absorção de nutrientes para uma determinada espécie cultivada em determinado solo.

O objetivo deste estudo foi, usando o modelo matemático de Barber e Cushman, calcular a absorção de P e K, considerando os efeitos de sucessão de cultura e sistemas de preparo do solo na cultura do milho (*Zea mays* L.) cultivado em condições de campo.

3.2 REVISÃO DE LITERATURA

3.2.1 Absorção de nutrientes pelo sistema radicular

O sistema radicular é suprido de nutrientes pelo solo circundante através de processos chamados interceptação radicular, fluxo de massa e difusão. O fluxo de massa ocorre quando as raízes das plantas absorvem água causando um fluxo em direção à raiz. A água ou solução do solo contém P e/ou K, que se movem para o sistema radicular por fluxo de massa para

repor o que foi absorvido pela planta. A quantidade de íons que alcança o sistema radicular depende da taxa de fluxo de água para a raiz que por sua vez depende da taxa transpiratória da planta, como também do conteúdo médio de íons na água (Barber, 1978).

O transporte de nutrientes por fluxo de massa pode ser dado por:

$$F = VC_1$$

onde:

F = Transporte de nutrientes por fluxo de massa - solução ($\text{mol.cm}^{-2} \text{ solo.s}^{-1}$)

V = Fluxo de solução ($\text{cm}^3 \cdot \text{solução cm}^{-2} \cdot \text{solo} \cdot \text{s}^{-1}$)

C_1 = Concentração do nutriente na fase líquida ou solução ($\text{mol.cm}^{-3} \cdot \text{solução}$)

A difusão é um processo lento no qual os nutrientes se movem de um lugar de alta concentração para outro de baixa concentração, numa fase aquosa estacionária (Malavolta, 1980), antes que eles estejam posicionalmente disponíveis para absorção pelo sistema radicular. A difusão pode também ser definida como o transporte de nutrientes ao acaso num sistema aquoso, devido ao movimento térmico dos mesmos. O transporte de P por difusão do solo para a planta depende, de acordo com a primeira Lei de Fick, do gradiente de concentração entre o solo e a superfície radicular, como também do coeficiente de difusão (Bhadoria et al., 1991).

Segundo a Lei de Fick, a difusão de qualquer íon num sistema aquoso é dada por:

$$D = D_1 \cdot \frac{dc}{dx}$$

onde:

D = Taxa de difusão do íon ($\text{mol.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

D_1 = Coeficiente de difusão do íon na água pura ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

À medida que a concentração na superfície radicular diminui, o processo difusivo movimentará o P e K no sentido de resuprir o que foi absorvido pela planta (Barber, 1995). De acordo com a cinética de Michaelis-Menten a taxa de absorção aumenta à medida que a concentração externa aumenta até que o máximo é alcançado (Barber e Kovar, 1985). Neste ponto, mesmo que se aumente a concentração da solução do solo, a absorção não aumentará. As raízes das plantas somente podem absorver nutrientes que estão na superfície radicular e conseqüentemente a absorção ocorre e a concentração próxima à raiz decresce (Kovar e Barber, 1987). A absorção de nutrientes pode ser precisamente calculada assumindo-se que as plantas absorvem nutrientes da solução do solo e que a taxa de absorção é dependente da concentração de nutrientes na solução.

A absorção de fósforo pelas plantas é uma proporção da concentração inicial na solução do solo (C_{ij}). Aumentando C_{ij} , a quantidade de íons P difundindo-se para a raiz aumenta, como resultado do aumento no gradiente de concentração para difusão e aumento no coeficiente de difusão (Anghinoni, 1979). É esperado um aumento da absorção com o aumento do coeficiente de difusão, em função da maior difusividade do P na solução do solo e do gradiente de concentração ao longo do qual a difusão ocorre (Barber, 1978).

3.2.2 O Modelo Matemático de Absorção de Nutrientes

A habilidade das raízes em absorver fósforo é descrita pelos parâmetros cinéticos (I_{max} , K_m e C_{min}) da equação de Michaelis-Menten, determinados em experimentos em solução nutritiva. Contudo, estes parâmetros não descrevem absorção de íons em grandes concentrações, por considerarem só fatores relacionados às plantas (Anghinoni, 1979). Conseqüentemente, um

programa de computador foi elaborado visando incorporar vários parâmetros necessários ao cálculo de uma só vez, de absorção de N, P ou K. Um modelo mecanístico difere de um modelo de regressão, onde coeficientes são obtidos estatisticamente para processos desconhecidos. Em um modelo mecanístico ou matemático, equações descrevem influxo de nutrientes que são combinadas com equações que descrevem o crescimento da planta no sentido de calcular a absorção dos nutrientes pelas raízes das plantas (Barber, 1995). De fato, o modelo calcula a absorção de nutrientes usando cálculo de integrais que considera o potencial de suprimento de nutrientes do solo para as plantas, através de fluxo de massa e difusão, com tamanho, forma e taxa de crescimento radicular, como também parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes pelas raízes (Chen e Barber, 1990).

3.2.2.1 Condições do modelo

De acordo com Barber (1995), no sentido de executar o modelo, deve-se considerar as seguintes suposições:

- a) O meio é homogêneo e isotrópico.
- b) As condições de umidade são mantidas constantes, próximo à capacidade de campo.
- c) A absorção de nutrientes ocorre somente ao nível da superfície radicular. Não ocorre zona de depleção provocada por atividade microbiana ou de outro tipo.
- d) A taxa de absorção é descrita pela cinética de Michaelis-Menten.
- e) O transporte de nutrientes ocorre via convecção e difusão e somente na direção radial.

- f) A taxa de fluxo em muito alta concentração, I_{\max} , e a constante de Michaelis-Menten, K_m são dependentes do fluxo de água para a raiz v_o , e do coeficiente de difusão, D_e , que por sua vez é dependente do fluxo, v_o .
- g) As raízes são supostamente cilindros lisos de raio constante r_o sem pelos radiculares.
- h) A difusão efetiva, D_e e o poder tampão, b são independentes da concentração.
- i) A concentração do nutriente na fase sólida, C_s e a concentração na fase líquida C_l são linearmente relacionados.
- j) As variáveis do sistema radicular não mudam com a idade.
- k) O componente convectivo de fluxo não é afetado pela concentração de nutrientes.

3.2.3 Cinética de absorção radicular

Baseado na equação seguinte, o modelo combina o efeito dos nutrientes supridos pelo solo ao sistema radicular, com a cinética de Michaelis-Menten para determinar a relação entre o fluxo e o tempo (Oates e Barber, 1987). A taxa de absorção de nutrientes varia com a concentração dos nutrientes na solução na interface solução - raiz (Barber e Cushman, 1981). A relação entre influxo e concentração é usualmente descrita pela cinética de Michaelis-Menten, como mostrado abaixo:

$$I_n = I_{\max} (C_{lo} - C_{min}) / (K_m + C_{lo} - C_{min})$$

I_n : Influxo de entrada

I_{\max} : Influxo máximo em valores de C_l máxima ($\mu\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

K_m : Concentração de nutrientes na solução quando o influxo é $1/2 I_{\max}$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$)

C_{lo} : Concentração de nutrientes na solução na superfície radicular ($\mu\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$)

C_{min} : Concentração de nutrientes na solução quando o influxo é zero ($\mu\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$)

v_o : Influxo de água na superfície radicular ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

O decréscimo do nível de nutrientes na planta resulta em um aumento no I_{\max} , em razão da tentativa da planta em compensar o reduzido suprimento de P e K pelo solo.

3.2.4 Características morfológicas da raiz

Os parâmetros radiculares (comprimento, raio, densidade e taxa de crescimento radicular) descrevem a configuração do sistema radicular influenciando marcadamente a absorção total das plantas. De acordo com Anghinoni (1979), a absorção de P pelas raízes é governada pelo volume do sistema radicular que entra em contato com o fertilizante fosfatado e pela taxa de absorção por unidade de superfície radicular.

O comprimento da raiz ou área superficial, mais do que o peso radicular, é o parâmetro mais adequado, quando é considerado o fluxo de nutrientes na raiz. Alguns dos resultados apresentados por Barber (1978), sugerem um comportamento diferente no que diz respeito ao fluxo de nutrientes em raízes de milho e soja em diferentes intervalos de crescimento, que podem afetar o local correto de adubação no solo destas duas culturas. O conhecimento da variação da densidade radicular tanto vertical como horizontal, pode levar ao desenvolvimento do mais efetivo local de adubação no solo, influenciando a absorção tanto de água quanto nutrientes (Mengel e Barber, 1974).

A taxa de Crescimento radicular k (cm.s^{-1}), pode ser calculada através da seguinte fórmula :

$$k = \ln (L_2 - L_1) / (t_2 - t_1),$$

onde L_1 e L_2 são comprimento radicular no tempo t_1 e t_2

O Raio radicular médio r_o (cm), pode ser calculado a partir da fórmula abaixo:

$$r_o = (F_{wr}/L_r \cdot \pi)^{1/2}$$

onde, F_{wr} é o peso fresco de raiz e L_r é o comprimento radicular e o valor de $\pi = 3,1416$ (Schenk e Barber, 1980)

A meia distância entre raízes adjacentes r_1 (cm), pode ser calculada com a seguinte fórmula:

$$r_1 = (\text{volume do solo}/L_r \cdot \pi)^{1/2}$$

3.2.5 O fornecimento de nutrientes pelo solo

Quando o adubo potássico é adicionado ao solo para aumentar o fornecimento do nutriente às plantas, uma fração do que é adicionado aumentará a concentração na solução do solo (K_1), uma outra parte será adsorvido aos sítios de troca ou concentração na fase sólida do solo (K_s), e uma outra fração pode ser fixada em formas não trocáveis que não equilibrará rapidamente com K_1 . A distribuição de K adicionado ao solo, entre K_1 e K_s afeta ao poder tampão (b) e ao coeficiente de difusão efetiva (D_e) (Kovar e Barber, 1990).

Considerando que a difusão de um íon no solo só ocorre na fase líquida, a mesma aumenta à medida que aumenta a concentração do íon no solo (Bhadoria et al., 1991), e a recíproca é chamada de poder tampão (b). A taxa de difusão, a concentração na solução do solo e o poder tampão são usados no modelo para calcular o volume de nutrientes fornecidos à raiz.

A informação a respeito de C_s (P adsorvido) e C_{li} (P na solução do solo) é necessária não somente para determinar a taxa de P que é uniformemente misturado ao solo quando uma adequada quantidade é fornecida às raízes, mas também para determinar o efeito

relativo da colocação de P no solo para absorção pelas raízes (Kovar e Barber, 1987). A distribuição entre C_s e C_l afetará ambos D_e e b .

3.2.5.1 Determinação do coeficiente de difusão efetiva (D_e)

Existem fatores do solo que influenciam o coeficiente de difusão de P no solo, os quais não são normalmente medidos. A taxa de difusão aumenta com o conteúdo de umidade do solo (θ), pois a difusão só ocorre através da água no solo. A difusão também é afetada pelo poder tampão (b) e à medida que o poder tampão aumenta, a taxa de difusão diminui.

O coeficiente de difusão efetiva pode ser estimado pela seguinte equação de Nye e Tinker (1977):

$$D_e = \frac{D_l \theta f}{b}, \text{ onde}$$

D_e : Coeficiente de difusão efetiva do nutriente através do solo ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

D_l : Coeficiente de difusão na água a 25°C. Valores de D_l para H_2PO_4^- é $0,89 \times 10^{-5}$ e para K é $1,98 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (Parsons, 1959; Edwards e Huffman, 1959; Schenk e Barber, 1980)

b : Poder tampão do nutriente lábil na fase sólida (C_s), em relação ao nutriente na fase líquida (C_l)

θ : Conteúdo de umidade volumétrica no solo em capacidade de campo. No solo denominado Chalmers (argilo siltoso) é considerado em torno de 27,5%.

f : tortuosidade ou fator de impedância

Valores de f que explicam a tortuosidade de P no processo difusivo, podem ser calculados de acordo com a equação seguinte, para amostras que contém pelo menos 75% de areia (Barraclough e Tinker, 1981):

$$f = 1,58 \theta - 0,17$$

3.2.5.2 Determinação do poder tampão do solo

O poder tampão é a capacidade do nutriente adsorvido na fase sólida do solo, manter constante a concentração na fase líquida, que é removido pelas raízes das plantas, sendo calculado com a seguinte fórmula:

$$b = dC_s/dC_l, \text{ onde}$$

C_s : P trocável ou lábil, ($\mu\text{mol. cm}^{-3}$).

C_l : Concentração de nutrientes na solução. Medida da concentração de P e K deslocados pela água, na solução do solo. ($\mu\text{mol. cm}^{-3}$).

Os solos variam na sua habilidade em manter o nível de nutrientes na solução do solo. Os maiores valores de poder tampão são aqueles em que mais íons na fase sólida equilibram com aqueles na solução. Mais baixos valores iniciais de P no solo, mais altos valores de poder tampão (Kovar e Barber, 1987).

3.2.6 Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de absorção

A análise de sensibilidade é geralmente executada no sentido de determinar o tamanho da contribuição de cada parâmetro para a absorção total. A análise de sensibilidade ou efeitos na absorção de P nas mudanças de cada parâmetro, é estimulada como uma ferramenta útil para previsão de absorção de P ou K por cada parâmetro (Silberbush e Barber, 1983). É conduzida sistematicamente através da multiplicação de cada um dos parâmetros por 0,5 a 2,0 vezes o valor inicial, enquanto os outros parâmetros permanecem constantes, ou seja com os valores iniciais (Barber, 1995). Em geral, os parâmetros radiculares e os relacionados ao suprimento de nutrientes, são os que mais contribuem na absorção, e os parâmetros cinéticos (I_{max} , K_m , e C_{min}) promovem as menores mudanças (Ermani et al., 1994).

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho consistiu do estudo de absorção de fósforo (P) e potássio (K), usando o Modelo Matemático de Barber e Cushman, na cultura do milho (*Zea mays* L.), cultivado em solo argilo siltoso denominado Chalmers. Os ensaios foram conduzidos na Estação Experimental da Universidade de Purdue, situada na região central dos Estados Unidos no Estado de Indiana (40°28'N Latitude). O delineamento experimental usado foi parcelas subdivididas, sendo a sucessão de culturas (soja- milho) e milho-milho, a parcela principal e os sistemas de preparo de solo (convencional, plantio direto e cultivo mínimo), as subparcelas. As práticas culturais e operações de preparo do solo foram executadas conforme descrição feita no Capítulo I.

Foi coletado solo em área com menos de 2% de declividade, com teor médio de matéria orgânica de 40 g.kg^{-1} na camada superficial de 30 cm (Griffith et al., 1988). A amostragem inicial do solo foi executada após a colheita do ano anterior ao cultivo considerado e amostras foram retiradas na linha de plantio e entre linhas de milho, divididas nas seguintes profundidades: 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 cm. Amostras simples foram retiradas em cada parcela que uniformemente misturadas formaram uma amostra composta. As amostras de solo foram então secas, destorroadas e as concentrações de fósforo (P) e potássio (K) na fase sólida foram medidas através do método extrator Mehlich-3 (Mehlich, 1984).

A coleta da solução do solo foi obtida através do método proposto por Adams (1974) e Adams et al. (1980). O deslocamento da solução através do uso de colunas de solo, consistiu inicialmente da pesagem de 250g de solo seco, acondicionados em uma coluna de acrílico com 7,5 cm de diâmetro e altura de 25 cm, em uma densidade aproximada $1,0$ a $1,2 \text{ mg.m}^{-3}$. Em seguida, a extremidade superior da coluna foi coberta com papel de filtro, e água deionizada foi adicionada a uma taxa 4 a 8 ml.h^{-1} com o auxílio de uma bomba peristáltica, até que o solo atingiu umidade próxima à capacidade de campo ($\phi_w = -33 \text{ kPa}$). Durante 24 horas ocorreu um período chamado de equilíbrio e em seguida 40 ml de água pura foi gotejada a uma taxa de 4 ml.h^{-1} , para deslocamento da solução (Kovar e Barber, 1987). A solução deslocada, foi coletada em um coletor também de acrílico, filtrada e analisada. O fósforo foi determinado colorimetricamente usando a metodologia proposta por Murphy e Riley (1962) e potássio foi analisado através de espectrometria de absorção atômica. Os valores representaram os dados de concentração inicial (Cl_i) de P e K na solução do solo (Kovar, 1985).

A retirada de amostras de raízes ocorreu com o auxílio de um amostrador mecânico (Giddings probe) ligado à tomada de força de um trator (Silberbush e Barber, 1984).

Tubos cilíndricos de plásticos de 5,0 cm de diâmetro e 1 m de comprimento, colocados dentro de tubos de metal, foram injetados verticalmente no solo usando a força hidráulica do trator. Amostras foram retiradas na linha de plantio e entre linhas aos 92 dias após a semeadura (Estágio R1), para medidas de características morfológicas do sistema radicular (Schenk e Barber, 1980). As amostras foram divididas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-50, 50-75 e 75-90 cm, embora para aplicação no modelo tenha sido considerada a profundidade somente até 25 cm. As raízes foram separadas do solo através de uso de água sob pressão e coletadas em jogos de peneiras de diferentes malhas. O comprimento radicular foi medido usando o Método de Interseção de Raízes de Newman (Newman, 1966; Tennant, 1975) e foi utilizado no modelo o valor médio entre as duas posições de amostragem (na linha e entre linhas de plantio). Os dados relativos aos parâmetros radiculares consideraram duas épocas de amostragem. A primeira correspondente ao período de 30 dias após a semeadura (Estágio V4) (t_1), e a segunda época correspondente ao período equivalente a 92 dias após a semeadura (Estágio R1) (t_2). Com base em dados prévios de medida de parâmetros radiculares no campo (Mackay et al, 1987), o crescimento radicular (k) com o tempo, foi considerado exponencial, correspondendo ao período de 30 a 92 dias após a semeadura, perfazendo um total de 62 dias.

No sentido de conhecer os efeitos da umidade do solo, na absorção de P e K pelo milho, foram testados dois diferentes valores para conteúdo de umidade volumétrica ($\theta = 0,27$ e $\theta = 0,13 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

Os parâmetros medidos e usados no modelo matemático de Barber e Cushman, foram:

- a) Coeficiente de difusão efetiva (D_e);
- b) Poder tampão (b);

- c) Concentração inicial na solução do solo (C_{li})
- d) Raio radicular (r_o);
- e) Meia distância entre raízes adjacentes (r_1);
- f) Comprimento inicial da raiz (L_o) e
- g) Taxa de crescimento radicular (k)

Os parâmetros relacionados abaixo, também usados no modelo de absorção, foram compilados de Chen e Barber (1990), que trabalharam com o mesmo solo e tratamentos, em condições de casa-de-vegetação.

- h) Influxo médio de água para a raiz (v_o);
- i) Influxo máximo em valores de C_l máxima (I_{max});
- j) Concentração de nutrientes na solução quando o fluxo é zero (C_{min});
- k) Concentração de nutrientes na solução quando o fluxo é $\frac{1}{2} I_{max}$ (K_m);

Os 11 parâmetros, acima relacionados e utilizados no modelo, foram medidos, compilados ou calculados de acordo com a metodologia anteriormente descrita e/ou através de informações apresentadas na revisão de literatura.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 Avaliação dos parâmetros radiculares

Os sistemas de preparo do solo provocaram mudanças acentuadas nos resultados dos parâmetros radiculares, a despeito do tipo de sucessão de cultura. O raio radicular médio (r_o) se mostrou maior em plantio direto, quando comparado com sistema convencional e cultivo mínimo, explicado pela maior densidade radicular na camada superficial de 10 cm (Tabela 2). A densidade média de raízes é apresentada em termos de metro de raiz por metro cúbico de solo. Em geral o raio radicular médio na fileira de plantio, foi pronunciadamente maior na superfície, concordando com os dados de Schenk e Barber (1980). Entre linhas de plantio, todos os tratamentos apresentaram a tendência oposta, ou seja um menor raio radicular na superfície e valores mais altos em profundidade (Tabela 2A).

Densidade e peso de raiz se apresentaram maiores nas linhas do que nas entrelinhas de plantio, maiores na superfície do que em profundidade, como encontrado por Kaspar, Brown e Kassmeyer (1991) (Tabela 3). Ainda em concordância com os autores citados, os resultados de densidade radicular na linha e na superfície do solo se mostraram pelo menos três vezes superiores àqueles encontrados nas entrelinhas. O peso fresco das raízes nas linhas se apresentou em média dez vezes superior àquele encontrado nas entrelinhas. Em todos os sistemas de preparo do solo e sucessão de culturas, o valor máximo de densidade radicular foi encontrado na camada de 15 cm, seguidos de uma pronunciada queda em direção à profundidade de até 25 cm. Tais resultados diferem muito do que foi apresentado por Hilfiker e Lowery (1988), que

encontraram as maiores densidades de raiz, a partir de 20 cm de profundidade, sendo explicado pelas diferentes características em termos de drenagem natural entre os solos estudados.

TABELA 2. Características morfológicas da raiz usadas para cálculo de absorção de fósforo (P) e potássio (K) em três sistemas de preparo do solo sucessão de culturas e em diferentes profundidades.

	Sucessão de cultura	Profundidade (cm)	Parâmetros radiculares			
			L_o (cm)	r_l (mm)	r_o $\text{cm} \times 10^{-2}$	k $\text{cm.s}^{-1} \times 10^{-7}$
convencional	milho-milho	0-5	42,8	0,86	3,32	7,15
		5-10	57,5	0,74	3,53	8,10
		10-15	46,2	0,83	2,79	7,70
		15-20	30,7	1,01	1,91	6,40
		20-25	25,9	1,10	1,89	6,29
	soja-milho	0-5	54,5	0,76	4,49	7,74
		5-10	45,6	0,84	3,57	7,42
		10-15	36,9	0,93	2,27	7,04
		15-20	38,9	0,91	1,62	6,75
		20-25	20,0	1,26	1,95	5,31
plantio-direto	milho-milho	0-5	56,8	0,75	5,38	7,87
		5-10	53,9	0,77	3,94	7,92
		10-15	43,9	0,85	3,08	7,56
		15-20	41,0	0,88	2,39	7,36
		20-25	32,8	0,99	2,31	7,01
	soja-milho	0-5	39,9	0,89	4,75	6,59
		5-10	53,4	0,77	3,37	7,90
		10-15	51,7	0,79	2,50	8,00
		15-20	46,4	0,83	2,39	7,71
		20-25	30,5	1,02	2,12	6,80
cultivo mínimo	milho-milho	0-2	58,3	0,74	1,75	7,95
		2-4	52,8	0,78	3,05	7,86
		4-6	39,8	0,89	2,20	7,27
		6-8	35,3	0,95	1,78	6,89
		8-10	35,5	0,95	1,67	7,23
	soja-milho	0-2	47,3	0,82	3,65	7,26
		2-4	55,3	0,76	3,10	8,00
		4-6	34,6	0,96	2,70	6,82
		6-8	35,6	0,95	2,34	6,92
		8-10	29,0	1,05	1,60	6,64

TABELA 3. Densidade média e peso fresco de raiz na linha e entrelinhas em três sistemas de preparo de solo e sucessão de culturas, em diferentes profundidades 92 dias após o plantio.

Sucessão de cultura	Profundidade (cm)	Convencional				Plantio direto				Cultivo mínimo			
		Densidade (10 ³ m.m ⁻³)		Peso (10 ³ g.m ⁻³)		Densidade (10 ³ m.m ⁻³)		Peso (10 ³ g.m ⁻³)		Densidade (10 ³ m.m ⁻³)		Peso (10 ³ g.m ⁻³)	
		linha	entrelinha	linha	entrelinha	linha	entrelinha	linha	entrelinha	linha	entrelinha	linha	entrelinha
milho-milho	0-5	9,8	2,6	3,34	0,14	14,2	3,7	18,76	0,74	15,4	3,2	7,99	0,31
	5-10	12,1	6,9	5,47	0,51	14,9	2,7	9,28	0,22	12,2	4,9	4,97	0,39
	10-15	9,9	5,4	2,76	0,67	11,3	3,0	4,26	0,46	8,6	4,1	1,61	0,46
	15-20	5,0	4,1	0,73	0,32	9,1	4,1	1,96	0,66	6,6	4,3	0,71	0,46
	20-25	5,1	2,9	0,66	0,19	6,7	4,0	0,77	1,13	6,6	5,2	0,61	0,49
	25-50	14,1	9,3	2,27	1,18	15,2	15,4	2,17	2,37	15,7	12,3	2,07	1,88
	50-75	14,2	9,6	1,58	1,18	15,5	11,5	1,97	1,48	15,1	9,6	2,07	1,18
	75-90	9,5	8,9	0,89	0,69	8,5	8,5	1,18	1,28	8,6	3,7	0,79	0,30
soja-milho	0-5	15,1	1,9	8,45	0,08	9,6	1,6	9,08	0,15	12,3	2,0	6,55	0,10
	5-10	11,2	3,1	4,39	0,15	12,7	4,7	6,31	0,35	15,7	2,4	5,89	0,06
	10-15	9,2	2,4	1,45	0,07	9,7	7,7	2,74	0,83	7,4	3,2	1,57	0,13
	15-20	7,8	2,6	0,74	0,17	8,1	7,2	1,94	0,95	8,5	2,5	0,98	0,13
	20-25	3,6	2,1	0,50	0,13	6,7	3,1	1,24	0,25	7,2	2,0	0,71	0,09
	25-50	12,9	7,4	1,38	0,79	14,1	7,8	2,37	0,69	10,9	6,3	1,68	0,49
	50-75	14,0	8,0	1,58	0,89	11,6	7,4	4,05	0,89	10,5	5,7	0,99	0,39
	75-90	7,5	5,4	0,79	0,39	9,1	7,9	0,79	1,18	4,6	4,5	0,30	0,20

Sob milho contínuo e sistemas conservacionistas (plantio direto e cultivo mínimo) notou-se uma forte tendência de maiores densidades radiculares superficiais, explicada por uma mais alta concentração de fósforo favorável ao maior crescimento de raízes. No plantio direto, a combinação de maior concentração de nutrientes na solução do solo, C_{ji} (Tabelas 4 e 5) e proliferação radicular (Tabela 2) resultou em um aumento na absorção de P e K (Tabela 6), como encontrado por Anghinoni e Barber (1980). Na verdade, uma amostragem no estágio de desenvolvimento biológico do milho conhecido como R1(92 dias após a semeadura), propiciou a ocorrência de maiores valores de densidade radicular (Mengel e Barber, 1974; Schenk e Barber, 1980).

Em solo adubado, a taxa de crescimento radicular (κ) diretamente afeta a área radicular superficial e conseqüentemente a quantidade de P e K absorvido (Barber e Kovar, 1985). Como pode ser observado nas Tabelas 2 e 6, os valores médios de k para as sucessões estudadas dentro dos sistemas de preparo do solo, mostraram resultados numericamente mais altos para plantio direto e conseqüentemente maior absorção calculada. De acordo com Mengel e Barber (1974a), a quantidade de raiz e a sua maior proporção na camada mais fértil é determinante para uma maior absorção pela planta. A estratificação de P apresentada no Capítulo I, contribuiu para uma maior estimulação da taxa de crescimento radicular na superfície do solo em sistemas conservacionistas, quando comparados com o sistema convencional.

Como mostrado nas Tabelas 2 e 6, os parâmetros radiculares exerceram um papel de grande importância na absorção de P e K. A esperada maior densidade radicular nas linhas quando comparado com dados de entrelinhas de plantio, foi mais acentuada em razão de parte da adubação fosfatada ter sido realizada na linha de plantio, conseqüentemente promovendo maior crescimento radicular (Zhang e Barber, 1992). A adubação fosfatada de plantio na linha, leva a

TABELA 4. Características do solo usadas no cálculo de absorção de fósforo (P) em três sistemas de preparo do solo e sucessão de culturas, em diferentes profundidades e dois níveis de umidade volumétrica ($\theta_1 = 0,27$ e $\theta_2 = 0,13$).

	Sucessão de cultura	Profundidade (cm)	C_s mmol L ⁻¹	C_{ii} μmol L ⁻¹	b	θ_1	θ_2
						$\frac{(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})}{D_e \times 10^{-9}}$ (cm ² ·s ⁻¹)	$\frac{(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})}{D_e \times 10^{-10}}$ (cm ² ·s ⁻¹)
convencional	milho-milho	0-5	1,26	1,23	103	6,3	3,9
		5-10	1,19	1,23	97	6,7	4,23
		10-15	1,11	1,23	90	7,2	4,53
		15-20	0,87	1,23	71	9,1	5,75
		20-25	0,62	1,23	50	13	8,15
	soja-milho	0-5	1,05	0,97	109	6	3,77
		5-10	0,93	0,97	96	6,8	4,28
		10-15	0,86	0,97	89	7,2	4,58
		15-20	0,80	0,97	83	7,8	4,95
		20-25	0,59	0,97	61	11	6,77
plantio-direto	milho-milho	0-5	1,86	11,44	16	40	25,2
		5-10	1,79	3,92	46	14	8,98
		10-15	1,31	1,13	116	5,6	3,52
		15-20	0,86	0,91	94	6,9	4,34
		20-25	0,45	0,86	53	12	7,8
	soja-milho	0-5	2,09	7,58	28	24	14,9
		5-10	1,42	0,70	203	3,2	20,2
		10-15	0,89	0,97	93	7	4,43
		15-20	0,56	0,97	58	11	7,02
		20-25	0,42	0,75	56	12	7,35
cultivo mínimo	milho-milho	0-5	1,42	1,18	120	5,4	3,41
		5-10	1,33	1,51	88	7,3	4,63
		10-15	0,94	0,97	98	6,6	4,2
		15-20	0,54	0,86	63	10	6,52
		20-25	0,29	0,91	32	20	12,9
	soja-milho	0-5	1,52	1,45	104	6,2	3,92
		5-10	1,31	1,29	101	6,4	4,05
		10-15	0,85	0,91	94	6,9	4,38
		15-20	0,47	0,70	67	9,7	6,12
		20-25	0,39	0,75	51	13	7,96

TABELA 5. Características do solo usadas no cálculo de absorção de potássio (K) em três sistemas de preparo do solo e sucessão de culturas, em diferentes profundidades e dois níveis de umidade volumétrica ($\theta_1=0,27$ e $\theta_2=0,13$).

	Sucessão de cultura	Profundidade (cm)	C_s mmol L ⁻¹	C_{li} μmol L ⁻¹	b	θ_1	θ_2
						(cm ³ .cm ⁻³)	(cm ³ .cm ⁻³)
						$D_e \times 10^{-8}$ (cm ² .s ⁻¹)	$D_e \times 10^{-9}$ (cm ² .s ⁻¹)
convencional	milho-milho	0-5	5,09	2,05	24,8	5,8	3,67
		5-10	4,14	2,05	20,2	7,13	4,51
		10-15	4,12	2,05	20,1	7,15	4,53
		15-20	4,07	2,05	19,8	7,26	4,59
		20-25	3,92	2,05	19,1	7,54	4,77
	soja-milho	0-5	4,97	2,87	17,3	8,32	5,27
		5-10	3,98	2,87	13,9	10,4	6,57
		10-15	4,18	2,87	14,6	9,89	6,29
		15-20	3,96	2,87	13,8	10,4	6,61
		20-25	3,97	2,87	13,8	10,4	6,59
plantio-direto	milho-milho	0-5	8,39	7,00	12	12,8	7,6
		5-10	5,66	3,60	15,7	9,16	5,8
		10-15	4,32	2,16	20	7,21	4,56
		15-20	3,80	2,26	16,8	8,59	5,44
		20-25	3,80	1,54	24,6	5,86	3,71
	soja-milho	0-5	7,94	6,58	12,1	11,9	7,55
		5-10	4,49	1,79	25	5,75	3,64
		10-15	3,56	1,37	25,9	5,56	3,52
		15-20	3,46	1,29	26,9	5,36	3,39
		20-25	3,59	1,75	20,5	7,01	4,44
cultivo mínimo	milho-milho	0-5	5,85	3,59	16,3	8,83	5,59
		5-10	4,22	3,30	12,8	11,2	7,11
		10-15	3,67	2,77	13,2	10,9	6,92
		15-20	3,63	1,22	29	4,97	3,14
		20-25	3,56	1,15	31,7	4,54	2,87
	soja-milho	0-5	5,38	7,50	7,2	20,1	12,7
		5-10	4,22	2,41	17,6	9,1	5,19
		10-15	3,67	2,71	13,5	10,6	6,74
		15-20	3,63	0,79	45,7	3,15	1,99
		20-25	3,56	0,89	40,1	3,59	2,27

TABELA 6. Absorção calculada de fósforo (P) e potássio (K) em milho, sob três sistemas de preparo de solo e sucessão de culturas, em diferentes profundidades e conteúdos de umidade volumétrica ($\theta = 0,27$ e $\theta = 0,13$), em 92 dias após o plantio, em 1994.

	Sucessão de cultura	Profundidade (cm)	Absorção calculada ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)			
			$\theta = 0,27$		$\theta = 0,13$	
			P	K	P	K
convencional	miho-milho	0-25	9,8	51,9	3,0	34,0
	soja-milho	0-25	9,5	46,2	2,9	40,0
plantio-direto	miho-milho	0-25	10,5	37,8	7,3	33,0
	soja-milho	0-25	10,0	48,0	5,6	33,0
cultivo mínimo	miho-milho	0-25	8,2	36,7	3,0	29,0
	soja-milho	0-25	9,7	46,5	3,2	34,0

um suprimento maior do nutriente do solo para a raiz (Anghinoni e Barber, 1980; Kovar e Barber, 1987; Kovar e Barber, 1989), como também faz diminuir as chances de maior taxa de adsorção ou fixação. Como todos os tratamentos receberam a mesma adubação fosfatada, presumivelmente a maior absorção encontrada nos sistemas conservacionistas se deve à uma menor fixação de P e maior disponibilidade inicial.

3.4.2 Suprimento de nutrientes pelo solo

H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} são as formas de fósforo preferencialmente absorvidas pelo milho. De fato, a quantidade absorvida está mais diretamente associada com a concentração na solução na forma de H_2PO_4^- (Chen e Barber, 1990), sendo absorvido pela raízes dez vezes mais rapidamente que a forma HPO_4^{2-} .

Os resultados de absorção calculada de K variaram com dados de concentração, parâmetros radiculares e conteúdo de umidade volumétrica, concordando com Chen e Barber (1990). A inclusão no modelo de Barber e Cushman da competição radicular representada pela meia distância entre raízes adjacentes (r_1), deu uma contribuição muito importante no sentido de diminuir a frequente superestimação de absorção de K, quando do uso do modelo de Claassen e Barber. De acordo com Silberbush e Barber (1983), o fator "competição entre raízes" está mais relacionado com potássio do que com fósforo em consequência de um maior coeficiente de difusão que resulta em uma maior extensão do gradiente de depleção de potássio na zona radicular, como mostrado na Tabela 5. De fato, à medida que r_1 diminui em relação à D_e , ocorrerá competição entre raízes. Parece que só ocorreu uma pequena contribuição da competição radicular na absorção de fósforo (P) baseado no fato de que os valores de D_e apresentados na Tabela 4, foram menores do que os valores para potássio (K) (Tabela 5).

A Tabela 7, mostra que a distância média de difusão foi maior para potássio, quando comparado com fósforo, sugerindo uma maior difusão (Tabelas 2A e 3A) e conseqüentemente uma forte competição entre raízes. A distância média de difusão de um íon pode ser calculada pela seguinte fórmula $(2D_e t)^{1/2}$, onde D_e é o coeficiente de difusão efetiva e t é o tempo de avaliação considerado. Este parâmetro é de grande importância na explicação das diferenças em absorção entre os dois níveis de umidade estudados. Em ambos P e K, a distância média de difusão apresentou uma forte queda com a diminuição da umidade volumétrica de 0,27 para 0,13 (v/v), explicada por uma também diminuição no coeficiente de difusão, D_e .

O acentuado efeito negativo sobre a absorção provocado pela diminuição de q , é explicado pelo grande estresse na capacidade da raiz de absorver, e do solo de suprir de água e nutrientes às plantas (Anghinoni e Barber, 1980). Em concordância com Kovar e Barber (1987),

TABELA 7. Distância média de difusão de P e K sob três sistemas de preparo do solo e sucessão de culturas, em diferentes profundidades e conteúdo de umidade volumétrica ($\theta_1=0,27$ e $\theta_2=0,13$).

	Sucessão de cultura	Profundidade (cm)	$(2D_e t)^{1/2}$			
			P		K	
			θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
			cm			
convencional	milho-milho	0-5	0,26	0,07	0,79	0,20
		5-10	0,27	0,07	0,87	0,22
		10-15	0,28	0,07	0,88	0,22
		15-20	0,31	0,08	0,88	0,22
		20-25	0,37	0,09	0,90	0,23
	soja-milho	0-5	0,25	0,06	0,94	0,24
		5-10	0,27	0,07	1,06	0,27
		10-15	0,28	0,07	1,03	0,26
		15-20	0,29	0,07	1,06	0,27
		20-25	0,34	0,09	1,06	0,27
plantio-direto	milho-milho	0-5	0,65	0,16	1,13	0,29
		5-10	0,39	0,10	0,99	0,25
		10-15	0,24	0,06	0,88	0,22
		15-20	0,27	0,07	0,96	0,24
		20-25	0,36	0,09	0,79	0,20
	soja-milho	0-5	0,50	0,13	1,13	0,28
		5-10	0,18	0,05	0,79	0,20
		10-15	0,27	0,07	0,77	0,19
		15-20	0,34	0,09	0,76	0,19
		20-25	0,35	0,09	0,87	0,22
cultivo mínimo	milho-milho	0-5	0,24	0,06	0,97	0,24
		5-10	0,28	0,07	1,10	0,28
		10-15	0,27	0,07	1,08	0,27
		15-20	0,33	0,08	0,73	0,18
		20-25	0,47	0,12	0,70	0,18
	soja-milho	0-5	0,26	0,06	1,47	0,37
		5-10	0,26	0,07	0,99	0,24
		10-15	0,27	0,07	1,07	0,27
		15-20	0,32	0,08	0,58	0,15
		20-25	0,37	0,09	0,62	0,16

observou-se que a taxa de difusão decresce, com a diminuição da umidade do solo. Este efeito foi mais marcante no cálculo de absorção de fósforo do que potássio nas entrelinhas, provavelmente devido à mais baixa concentração para P do que para K tanto na fase sólida quanto em solução. O coeficiente de difusão efetivo (D_e) foi afetado pela redução na umidade do solo, e contribuiu em pelo menos 30% para a diminuição da distância média de difusão de P e K no solo. Devido ao poder tampão do solo (b) relativamente menor para K, mudanças na umidade do solo só provocaram um pequeno efeito na absorção calculada (Mackay e Barber, 1985), e à medida que a concentração de potássio no solo aumentou, ocorreu diminuição no poder tampão.

A Tabela 4A mostra que em geral a absorção calculada de P e K diminuiu com a profundidade em todos os tratamentos. Particularmente para P, não ocorreu nenhuma diferença na camada superficial de 10 cm, possivelmente devido a uma maior e mais uniforme densidade radicular, que foi determinante para uma absorção também uniforme de P. Ocorreu uma marcante diferença entre absorção de P e K, na superfície quando comparado com os resultados em profundidade, possivelmente devido ao mais alto status de fertilidade.

3.4.3 Análise de sensibilidade

Os resultados da análise de sensibilidade executada para os parâmetros envolvidos no modelo de absorção de P e K são apresentados nas Figuras 7 e 8. Tanto para fósforo quanto para potássio, a análise de sensibilidade mostrou a mesma tendência, em que parâmetros radiculares como taxa de crescimento radicular, k e raio radicular médio, r_o , mostraram uma maior sensibilidade em relação à mudanças no cálculo de absorção, seguidos pela distância média entre raízes adjacentes, r_1 . Como relatado na literatura, os parâmetros cinéticos não mostraram

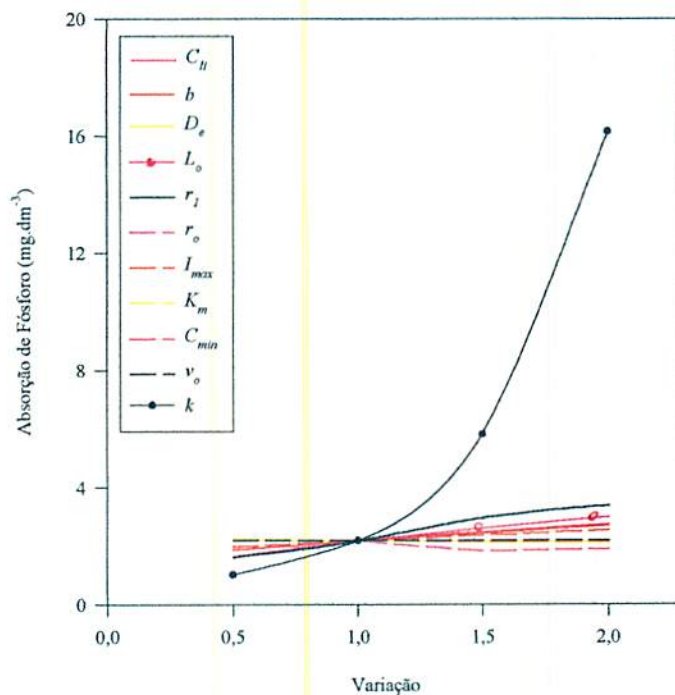


FIGURA 7. Análise de sensibilidade dos parâmetros de absorção calculada de P usando o Modelo de Barber & Cushman. Efeito sobre sucessão soja-milho, em preparo de solo convencional na camada de 0-5 cm.

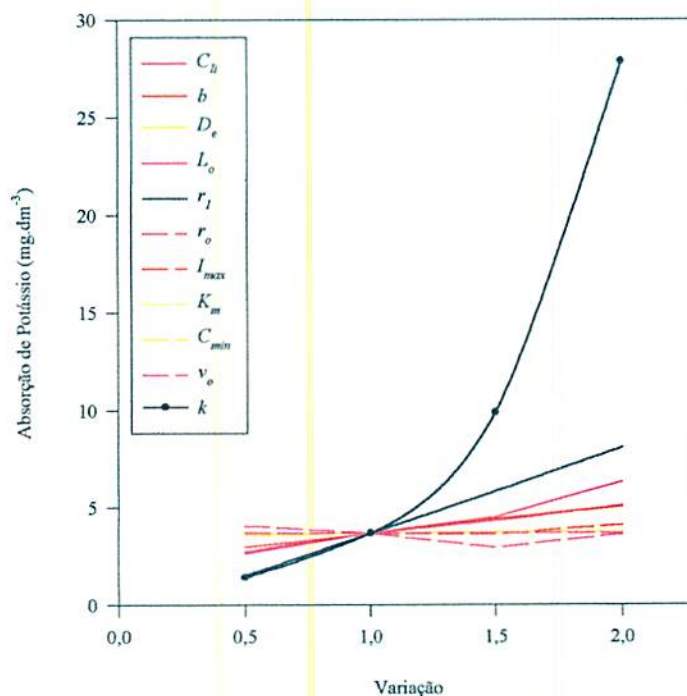


FIGURA 8. Análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no cálculo de absorção de K, usando o Modelo de Barber e Cushman. Efeito sobre a sucessão soja-milho, em preparo de solo convencional na camada de 0-5 cm.

sensibilidade da absorção em relação à mudanças nos seus valores. O fluxo de água v_o , não apresentou sensibilidade nos dados de absorção de P, possivelmente devido ao fato de que o processo predominante de transporte é difusão (Barber, 1995).

De acordo com Silberbush e Barber (1983), diminuindo-se r_1 ocorrerá uma redução no suprimento de potássio à planta em parte atribuída à competição entre raízes. Como observado nas Figuras 7 e 8, para maiores valores de r_1 , ocorreu um aumento considerável na absorção calculada de potássio, em razão de um também aumento na área que fornece potássio às raízes, em consequência de uma menor competição entre raízes.

3.5 CONCLUSÕES

Os sistemas de preparo do solo afetaram os parâmetros radiculares e consequentemente, o cálculo de absorção.

A estratificação de fósforo e potássio nos sistemas conservacionistas, resultou em maior taxa de difusão nas camadas superficiais do solo e consequentemente, maior absorção calculada.

Os valores mais elevados de distância entre raízes adjacentes (r_1), comprovaram uma maior absorção de potássio devido à redução da competição entre raízes.

A análise de sensibilidade reafirmou o importante papel dos parâmetros radiculares, quando comparados com os parâmetros cinéticos usados no modelo, na variação de absorção tanto de fósforo quanto de potássio.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na avaliação da interação de culturas em sucessão ou continuamente com os sistemas de preparo do solo, sejam convencionais ou conservacionistas, é imprescindível o estudo das características químicas e físicas do solo, tendo em vista que em função das práticas adotadas, mudanças no status de fertilidade inevitavelmente ocorrerão com o passar dos anos, afetando diretamente a absorção dos nutrientes pelas plantas.

A forma como é feita a adubação, no que diz respeito a colocação do fertilizante no solo, seja superficialmente a lanço ou incorporado, ou mesmo localizada em um volume reduzido de solo, deve ter uma relação direta com o tipo de sistema de cultivo adotado como também com a capacidade de retenção do fertilizante pelas cargas do solo.

A sucessão de culturas normalmente promove maiores aumentos de produção em sistemas convencionais, quando comparada com os sistemas conservacionistas, porém em condições adversas como excesso de umidade ou uma deficiente drenagem natural do solo, a tendência é de uma acentuada queda de produção em sistemas conservacionistas.

Em se tratando de áreas de cultivo sob sistemas conservacionistas a longo prazo, a promoção de uma movimentação das partículas do solo, periodicamente favorecerá a exploração de nutrientes pelo sistema radicular em profundidade, eliminando os efeitos negativos advindos da estratificação de nutrientes e matéria orgânica, que limitam a produção, em condições de estresse hídrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, F. Soil solution. In: CARSON, E. W. **The plant root and its environment**. Charlottesville: Univ. Press of Virginia. 1974. p. 441-482.
- ADAMS, F. C.; BURMESTER, N.; HUE, V.; LONG, F. L. A comparison of column displacement and centrifuge methods for obtaining soil solutions. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.44, n.4 p.733-735, July/Aug. 1980.
- ANGHINONI, I. **A method for predicting the most efficient phosphate placement for corn using a simulation model**. West Lafayette: Purdue University. 1979. 180p. (Tese - Doutorado em Ciência do Solo)
- ANGHINONI, I.; BARBER, S. A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.44, n.5, p.1041-1044, Sept./Oct. 1980.
- BARBER, S. A. Growth and nutrient uptake of soybean roots under field conditions. **Agronomy Journal**, Washington, v.70, n.3, p.457-461, May/June 1978.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York: John Wiley & Sons. 1995. 414 p.
- BARBER, S. A.; CUSHMAN, J. H. Nitrogen uptake model for agronomic crops In: ISKANDER, I. K. (ed.). **Modeling waste water renovation-land treatments**. New York: Wiley-Interscience. 1981. p. 382-409.
- BARBER S. A.; KOVAR, J. L. Principles of applying phosphorus fertilizer for greatest efficiency. **Journal of Fertilizer Issues**, West Lafayette, v.2, n.3, p.91-94, July/Sept. 1985.
- BARRACLOUGH, P. B.; TINKER, P. B. The determination of ionic diffusion coefficients in field soils. I. Diffusion coefficients in sieved soils in relation to water content and bulk density. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.32, n.2, p.225-236, June 1981.

- BAUDER, J. W.; RANDALL G. W.; SCHULER R. T. Effects of tillage with controlled wheel traffic on soil properties and root growth of corn. **Journal of Soil and Water Conservation**, Baltimore, v.40, n.4, p.382-385, July/Aug. 1985.
- BHADORIA, P. B. S.; KASELOWSKY, J.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Soil phosphate diffusion coefficients: their dependence on phosphorus concentration and buffer power. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.55, n.1, p.56-60, Jan./Feb. 1991.
- BLEVINS, R. L.; SMITH, M. S.; THOMAS, G. W.; FRYE, W. W. Influence of conservation tillage on soils properties. **Journal of Soil and Water Conservation**, Baltimore, v.38, n.3, p.301-305, May/June 1983.
- BLEVINS, R. L.; THOMAS, G. W. Changes in soil properties under no-tillage. In: PHILLIPS, R. E. (ed.). **No-tillage Agriculture**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1984. p. 190-230.
- BLEVINS, R. L.; THOMAS G. W.; CORNELIUS P. L. Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. **Agronomy Journal**, Washington, v.69, n.3, p.383-386, May/June 1977.
- BRUCE, R. R.; LANGDALE G. W.; DILLARD A. L. Tillage and crop rotation effect on characteristics of a sandy surface soil. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.54, n.6, p.1744-1747, Nov./Dec. 1990.
- CAMPBELL, C. A.; BIEDERBECK, V. O.; ZENTNER, R. P.; LAFOND, G. P. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin black chernozem. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.71, n.3, p.363-376, Aug. 1991.
- CAMPBELL, C. A.; ZENTNER, R. P. Effect of fertilizer on soil pH after 17 years of continuous cropping in southwestern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.64, n.4, p.705-710, Nov. 1984.
- CHEN, J. H.; BARBER S. A. Soil pH and potassium uptake by maize evaluated with an uptake model. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.54, n.4, p.1032-1036, July/Aug. 1990.
- CLAASSEN, N.; BARBER, S. A. Simulation model for nutrient uptake from soil by a growing plant root system. **Agronomy Journal**, Washington, v.68, n.6, p.961-964, Nov./Dec. 1976.
- CROOKSTON, R. K; KURLE J. E. Corn residue effect on the yield of corn and soybean grown in rotation. **Agronomy Journal**, Washington, v.81, n.2, p.229-232, Mar./Apr. 1989.

- CROOKSTON, R. K.; KURLE, J. E.; COPELAND P. J.; FORD, J. H; LUESCHEN W. E. Rotational Cropping sequence affects yield of corn and soybean. **Agronomy Journal**, Washington, v.83, n.1, p.108-113, Jan./Feb. 1991.
- CROOKSTON, R. K.; KURLE J. E.; LUESCHEN W. E. Relative ability of soybean, fallow and triacontanol to alleviate yield reductions associated with growing corn continuously. **Crop Science**, Madison. v.28, n.1, p.145-147, Jan./Feb. 1988.
- CRUSE, R. M.; YAKLE, G.A.; COLVIN, T. C.; TIMMONS, D. R.; MUSSLEMAN. A. L. Tillage effects on corn and soybean production in farmer-managed, university monitored field plots. **Journal of Soil and Water Conservation**, Baltimore, v.38, n.6, p.512-514, Nov./Dec. 1983.
- CRUZ, J. C. **Effect of crop rotation and tillage systems on some soil physical properties, root distribution and crop production**. West Lafayette:Purdue University, 1982. 220p. (Tese - Doutorado em Ciência do Solo).
- CUSHMAN, J. H. An analytical solution to solute transport near root surfaces for low initial concentration: I. equations development. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.43, n.6, p.1087-1090, Nov./Dec. 1979.
- CUSHMAN, J. H. An analytical solution to solute transport near root surfaces for low initial concentration: II. applications. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.43, n.6, p.1090-1095, Nov./Dec. 1979a.
- DICK, W. A.. Organic carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.47, n.1, p.102-107, Jan./Feb. 1983.
- DICK, W. A.; DANIEL, T. C. Soil chemical and biological properties as affected by conservation tillage: environmental implications. In: LOGAN T. J.; DAVIDSON, J.M.; BAKER J. L.; OVERCASH M.R. (eds.), **Effects of conservation tillage on groundwater quality: nitrates and pesticides**. Chelsea: Lewis Publishers, Inc., 1987. p. 125-147.
- ECKERT, D. J. Effects of reduced tillage on the distribution of soil pH and nutrients in soil profiles - review. **Journal of Fertilizer Issues**, West Lafayette, v.2, n.3, p.86-90, July/Sept. 1985.
- ECKERT, D. J.; JOHNSON J. W. Phosphorus fertilization in no-tillage corn production. **Agronomy Journal**, Washington, v.77, n.5, p.789-792, Sept./Oct. 1985.
- EDWARDS, O. W.; HUFFMAN, E. O. Diffusion of aqueous solutions of phosphoric acid at 25°C. **Journal of Physics and Chemistry**, Washington, v.63, p.1830-1833. 1959.

- ERBACH, D. C. Tillage for continuous corn and corn-soybean rotation. **Transactions of the ASAE**, Madison, v.25, n.4, p.906-918, July/Aug. 1982.
- ERNANI, P. R.; SANTOS, J. C. P.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S. Prediction of phosphorus uptake by a mechanistic model in a low phosphorus highly weathered soil as affected by micorhyzae inoculation. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v.17, n.6, p.1067-1078. 1994.
- FOLLET, R. F.; PETERSON, G. A. Surface soil nutrient distribution as affected by wheat-fallow tillage systems. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore v.52, n.1, p.141-147, Jan./Feb. 1988.
- FOX, R. H.; HOFFMAN, L. D. The effect of N fertilizer source on grain yield, N uptake, soil pH, and lime requirement in no-till corn. **Agronomy Journal**, Washington, v.73, p.891-895, Sept./Oct. 1981.
- FRANCO, A. A.; MUNNS, D. N.. Plant assimilation and nitrogen cycling. **Plant and Soil**, v.67, n.1, p.1-13, Jan. 1982.
- GRANT, C. A.; BAILEY, L. D. The effect of tillage and KCl addition on pH, conductance, NO_3^- -N, P, K an Cl distribution in the soil profile. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, n.3, p.307-314, Aug. 1994.
- GRANT, C. A.; LAFOND, G. P. The effects of tillage systems and crop rotation on soil chemical properties of a black chernozemic soil. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.74, n.3, p.301-306, Aug. 1994.
- GRIFFITH, D. R.; KLADIVKO E. J.; MANNERING, J. V.; WEST, T. D.; PARSONS, S. D. Long-term tillage and rotation effects on corn growth and yield on high and low organic matter, poorly drained soils. **Agronomy Journal**, Washington, v.80, n.4, p.599-605, July/Aug. 1988.
- GRIFFITH, D. R.; MANNERING, J. V.; MOLDENHAUER. Conservation tillage in the eastern corn-belt. **Journal of Soil and Water Conservation**, Baltimore, n.1, p.20-28, Jan./Feb. 1977.
- HARGROVE, W. L.; REID, J. T.; TOUCHTON, J. T.; GALLAHER, R. N. Influence of tillage practices on the fertility status of on acid soil double-cropped to wheat and soybean. **Agronomy Journal**, Washington, v.74, n.4, p.684-687, July/Aug. 1982.
- HARGROVE, W. L.; THOMAS, G. W. Effect of organic matter on exchangeable aluminum and plant growth in acid soils. In: BAKER, D. E. (ed). **Chemistry in the soil environment**. Madison: ASA, 1981. n.p. (Special Publication, 40).

- HAYNES, R. J.; KNIGHT, T. L. Comparison of soil chemical properties, enzyme activities, levels of biomass N and aggregate stability in the soil profile under conventional and no-tillage in Canterbury, New Zealand. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.14, p.197-208. 1989.
- HILFIKER, R. E.; LOWERY, B. Effect of conservation tillage systems on corn root growth. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.12, p.269-283. 1988.
- JACOBSEN, J. S.; WESTERMAN, R. L. Stratification of soil acidity derived from nitrogen fertilization in winter wheat tillage systems. **Communications of Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.13/14, n.22, p.1335-1346. 1991.
- KARLEN, D. L.; BERRY, E. C.; COLVIN, T. S. Twelve year tillage and crop rotation effects on yields and soil chemical properties in northeast Iowa. **Communications of Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19/20, n.22, p.1985-2003. 1991.
- KASPAR, T. C.; BROWN, H. J.; KASSMEYER, E. M. Corn root distribution as affected by tillage, wheel traffic, and fertilizer placement. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore v.55, n.5, p.1390-1394, Sept./Oct. 1991.
- KETCHESON, J. W. Effect of tillage on fertilizer requirements for corn on a silt loam soil. **Agronomy Journal**, Washington, v.72, n.3, p.540-542, May/June 1980.
- KOVAR, J. L. **Predicting the most effective phosphorus placement for corn and determining its relation to soil properties**. West Lafayette:Purdue University, 1985. 164 p. (Tese - Doutorado em Ciência do Solo).
- KOVAR, J. L.; BARBER, S. A. Placing phosphorus and Potassium for great recovery. **Journal of Fertilizers Issues**, West Lafayette, v.4, n.1, p.1-6, Jan./Mar. 1987.
- KOVAR, J. L.; BARBER, S. A. Potassium supply characteristics of thirty three soils as influenced by seven rates of potassium. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.54, n.5, p.1356-1361, Sept./Oct. 1990.
- KOVAR, J. L.; BARBER, S. A. Reasons for differences among soils in placement of phosphorus for maximum predicted uptake. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.53, n.6, p.1733-1736, Nov./Dec. 1989.
- LAL, R. No-tillage effects on soil properties under different crops in Western Nigeria. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.40, n.5, p.762-768, Sept./Oct. 1976.
- LARSON, W. E. Soil parameters for evaluating tillage needs and operations. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v.28, n.1, p.118-122, Jan./Feb. 1964.

- LOGAN, T. J.; LAL, R.; DICK, W. A. Tillage systems and soil properties in North America. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.20, p.241-270. 1991.
- MACKAY, A. D.; BARBER, S. A. Soil moisture effect on potassium uptake by corn. **Agronomy Journal**, Washington, v.77, n.4, p.524-527, July/Aug. 1985.
- MACKAY, A. D.; KLADIVKO, E. J.; BARBER, S. A.; GRIFFITH, D. R. Phosphorus and Potassium uptake by corn in conservation tillage systems. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.51, n.4, p.970-974, July/Aug. 1987.
- MAHLER, R. L.; HARDER, R. W. The influence of tillage methods, cropping sequence, and N rates on the acidification of a northern Idaho soil. **Soil Science**, Maryland, v.137, n.1, p.52-60, Jan. 1984.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.
- MALHI, S. S. McANDREW, D. W; CARTER, M. R. Effect of tillage and N-fertilization of a solonetzic soil on barley production and some soil properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.22, p.95-107. 1992.
- MANNERING, J. V.; GRIFFITH, D. R. Value of crop rotation under various tillage systems. West Lafayette: Purdue University 1981. p. irr. (Agronomy Guide - Cooperative Extension Service, (Tillage) AY-230).
- MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of mehlich 2 extractant. **Communications of Soil Science and Plant Analysis**, Ames, v.16, p.133-162. 1984.
- MENGEL, D. B.; BARBER, S. A. Development and distribution of the corn root system under field conditions. **Agronomy Journal**, Washington, v.66, n.3, p.341-344, May/June. 1974a.
- MENGEL, D. B.; BARBER, S. A. Rate of nutrient per unit of corn root under field conditions. **Agronomy Journal**, Washington, v.66, n.3, p.399-402, May/June. 1974.
- MORRISON, J. E.; CHICHESTER, F. W. Tillage system effects on soil and plant nutrient distribution on vertisols. **Journal of Production in Agriculture**, St. Paul, v.7, n.3, p.364-373. 1994.
- MOSCHLER, W. W.; MARTENS, D. R.; RICH, C. I.; SHEAR, G. M. Comparative lime effects on continuous no-tillage and conventionally tilled corn. **Agronomy Journal**, Washington, v.65, n.5, p.781-783, Sept./Oct. 1973.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v.27, p.31-36. 1962.

- NEWMAN, E. I. A method of estimating the total length of root in a sample. **Journal of Applied Ecology**, London, v.3, p.139-145. 1966.
- NYE, P. H.; TINKER, P. B. **Solute movement in the soil-root system**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1977.
- OATES, K.; BARBER, S. A. Nutrient uptake: a microcomputer program to predict absorption from soil by roots. **Journal of Agronomic Education**, West Lafayette, v.16, p.65-68. 1987.
- PARSONS, R. **Handbook of electrochemical constants**. New York: Academic Press, 1959.
- PHILLIPS, J. D. **Effect of potassium fertilizer and starter combinations on corn in three tillage systems and nutrient distributions in a long term tillage study**. West Lafayette: Purdue University, 1990. 208 p. (Tese - Doutorado em Ciência do Solo).
- ROBBINS, S. G.; VOSS, R. D. Phosphorus and potassium stratification in conservation tillage systems. **Journal of Soil and Water Conservation**, Baltimore, v.46, n.4, p.300, July/Aug. 1991.
- SAS INSTITUTE INC. **SAS User's Guide: statistics**. 5. ed. Cary, 1985.
- SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. **Plant and Soil**, The Hague, v.54, n.1, p.65-76. 1980.
- SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. **Agronomy Journal**, Washington, v.71, n.6, p.921-924, Nov./Dec. 1979.
- SILBERBUSH, M.; BARBER, S. A. Phosphorus and Potassium uptake of field-grown soybean cultivars predicted by a simulation model. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.48, n.3, p.592-596, May/June 1984.
- SILBERBUSH, M.; BARBER, S. A. Prediction of phosphorus and potassium uptake by soybeans with a mechanistic model. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.47, n.2, p.262-265, Mar./Apr. 1983.
- SILBERBUSH, M.; BARBER, S. A. Sensitivity of simulated phosphorus uptake to parameters used by a mechanistic model. **Plant and Soil**, The Hague, v.74, n.1, 93-100, Jan. 1983.
- SIMARD, R. R.; LAPIERRE, C. Effects of tillage, lime and phosphorus on soil pH and Mehlich-3 extractable nutrients. **Communications of Soil Science and Plant Analysis**, Sainte-Foy, v.9-10, n.25, p.1801-1815. 1994.
- STORER, D. A. A simple high sample volume ashing procedure for determining soil organic matter. **Communications of Soil Science Plant Analysis**, Sainte-Foy, v.15, p.759-772. 1984.

- TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, South Perth v.63, p.995-1001. 1975.
- WEIL, R. R.; BENEDETTO, P. W.; SIKORA, L. J.; BANDEL, V. A. Influence of tillage practices on phosphorus distribution and forms in three ultisols. **Agronomy Journal**, Washington, v.80, n.3, p.503-509, May/June 1988.
- WELCH, L. F. The morrow plots-hundred years of research. **Annals of Agronomy**. v.27, p.881-890. 1976.
- YAKLE, G. A.; CRUSE, R. M. Effects of fresh and decomposing corn plant residue extracts on corn seedling development. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.48, n.5, p.1143-1146, Sep./Oct. 1984.
- ZHANG, J.; BARBER, S. A. Maize root distribution between phosphorus-fertilized and unfertilized soil. **Soil Science Society of American Journal**, Baltimore, v.56, n.2, p.819-822, Mar./Apr. 1992.

ANEXO

QUADRO 1A. Resumo da análise de variância da concentração de fósforo no solo sob diferentes sucessões de culturas (C), sistemas de preparo do solo (S), posições de amostragem (P) e profundidade (Pr) em solo argilo siltoso Chalmers, em 1994.

Fonte de Variação	GL	SQ	Pr>F
Repetições	2	34810,6954	**
Sucessão (C)	1	4002,1113	ns
Erro (a)	2	13343,2196	
Sistema prep (S)	2	12144,3681	ns
C x S	2	1865,7136	ns
Erro (b)	8	14197,8030	
Posição(P)	10	1777,9025	ns
P2	1	880,3422	**
P3	1	576,7443	**
f.a.	8	320,8159	ns
C x P	10	1561,8691	ns
CP2	1	909,6239	**
l.o.f.	9	652,2449	ns
S x P	20	3758,0262	*
P1S1S2	2	1028,6464	**
P2S1S2	2	1213,4578	*
f.a.	16	1515,9218	ns
C x S x P	20	1714,4474	ns
Erro (c)	120	11518,4818	
Prof. (Pr)	4	156860,2939	**
Pr1	1	155628,0000	**
f.a.	3	1232,5500	ns
C x Pr	4	2181,4252	ns
CPr2	1	1450,2200	*
f.a.	3	731,1995	
S x Pr	8	33719,8212	*
Pr1S1S2	2	29,1280	***
Pr2S1S2	2	3014,7561	**
f.a.	4	1577,0125	
C x S x Pr	8	334,5565	ns
Erro (d + e + f)	48	11413,8399	
P x Pr	40	2884,2338	**
P1Pr1	1	826,9778	**
P1Pr2	1	987,0244	**
P1Pr5	1	166,1538	*
P2Pr2	1	186,5211	**
P2Pr5	1	114,2185	*
f.a.	35	363,5076	ns
C x P x Pr	40	916,0247	ns

QUADRO 1A. Continuação...

Fonte de Variação	GL	SQ	Pr>F
CPrP4	1	123,5525	*
CPrP6	1	105,3144	*
f.a.	38	687,1578	ns
S x P x Pr	80	3792,7843	**
Pr1P1S1S2	2	207,1164	*
Pr1P2S1S2	2	561,4813	**
Pr1P3S1S2	2	309,7011	**
Pr1P5S1S2	2	245,2792	**
Pr1P6S1S2	2	217,2306	*
Pr2P2S1S2	2	519,4936	**
Pr2P3S1S2	2	206,7324	*
Pr2P5S1S2	2	185,8108	*
Pr2P6S1S2	2	298,5436	**
f.a.	62	1041,3953	
C x S x P x Pr	80	3160,3934	**
CPr1P1S1S2	2	429,1357	**
CPr1P2S1S2	2	569,1713	**
CPr1P3S1S2	2	186,6668	*
CPr1P4S1S2	2	255,1104	**
CPr2P1S1S2	2	196,4805	*
CPr2P2S1S2	2	213,2860	*
CPr2P4S1S2	2	212,0729	*
f.a.	66	1098,4686	ns
Erro (g)	480	12598,8363	

*, **, ***, ns. Significância a $P < 0,10$, $P < 0,05$, $P < 0,01$, $P < 0,001$, e não significativo, respectivamente. CV = 16,44% ; f.a. = falta de ajuste

QUADRO 2A. Resumo da análise de variância da concentração de potássio (K) no solo sob diferentes sucessões (rotação) de culturas (C) e sistemas de preparo do solo (S), posições de amostragem (P) e profundidades (Pr) em solo argilo siltoso Chalmers em 1994.

Fonte de Variação	GL	SQ	Pr>F
Repetições	2	1499,4610	**
Sucessão (C)	1	320,6258	ns
Erro (a)	2	74,8518	
Sistema prep. (S)	2	2573,3776	**
C X S	2	221,1275	ns
Erro (b)	8	367,6312	
Posição (P)	10	1303,8780	**
P2	1	1123,3972	**
P4	1	89,0871	**
P5	1	15,4536	**
f.a.	7	75,9401	ns
C X P	10	370,0321	**
CP2	1	303,0986	**
f.a.	9	66,9335	ns
S x P	20	609,0611	**
P1S1S2	2	52,7144	*
P2S1S2	2	322,0764	**
P4S1S2	2	169,4184	**
f.a.	14	64,8519	ns
C x S x P	20	413,4651	**
CP2S1S2	2	249,5205	**
CP3S1S2	2	62,0675	*
f.a.	16	101,8771	ns
Erro (c)	120	889,9677	
Profundidade (Pr)	4	13301,4134	**
Pr1	1	10122,0000	**
Pr2	1	2497,2867	**
Pr3	1	228,8200	*
f.a.	1	453,3067	ns
C x Pr	4	67,4627	ns
CPr1	1	51,2978	*
f.a.	3	16,1649	ns
S x Pr	8	5256,7758	**
Pr1S1S2	2	4228,0271	**
Pr2S1S2	2	997,8937	**
f.a.	4	30,8550	ns
C x S x Pr	8	144,1672	*

QUADRO 2A. Continuação...

Fonte de Variação	GL	SQ	Pr>F
CPr1S1S2	2	1,6991	ns
CPr2S1S2	2	106,7079	**
CPr3S1S2	2	32,1188	ns
f.a.	2	3,6405	ns
Erro (d+e+f)	48	374,7109	
P x Pr	40	463,9532	**
Pr1P1	1	20,4098	**
Pr1P2	1	302,2553	**
Pr1P5	1	11,2760	*
Pr2P4	1	31,3729	**
Pr2P9	1	11,6451	*
Pr3P4	1	28,6285	**
f.a.	34	58,3656	ns
C x P x Pr	40	43,2403	**
CPr1P2	1	92,8818	**
CPr2P1	1	3,5094	*
CPr2P2	1	12,8292	*
f.a.	37	34,0199	ns
S x P x Pr	80	339,3374	**
Pr1P2S1S2	2	125,2711	**
Pr1P4S1S2	2	74,1663	**
Pr2P2S1S2	2	20,7766	*
Pr3P1S1S2	2	16,4320	*
Pr3P2S1S2	2	18,2163	*
f.a.	70	84,4751	ns
C x S x P x Pr	80	28,1389	**
CPr1P2S1S2	2	57,2024	**
CPr1P3S1S2	2	93,9300	**
CPr1P6S1S2	2	18,5537	*
f.a.	74	158,4528	ns
Erro (g)	480	1232,3237	ns

*, **, e ns. Significância a $P < 0,05$, $P < 0,01$ e não significativo, respectivamente. $CV(K) = 9,19\%$;
f.a. = falta de ajuste

QUADRO 3A. Resumo da análise de variância dos valores de pH do solo sob diferentes sucessões de culturas (C), sistemas de preparo de solo (S), posições de amostragem (P) e profundidades (Pr) em solo argilo siltoso Chalmers, em 1994.

Fonte de Variação	GL	SQ	Pr>F
Repetições	2	60,4780	ns
Sucessão (C)	1	6,4162	ns
Erro (a)	2	12,0671	
Sistema prep. (S)	2	3,1278	ns
C x S	2	2,8066	ns
Erro (b)	8	4,2950	
Posição (P)	10	21,1451	**
P2	1	11,9870	**
P4	1	6,4798	**
f.a.	2	2,6783	ns
C x P	10	1,8229	ns
f.a.	10	1,8229	ns
S x P	20	13,7579	**
P2S1S2	2	5,0678	**
P4S1S2	2	3,2935	**
P5S1S2	2	1,8936	*
f.a.	14	3,5030	ns
C x S x P	20	7,1110	ns
f.a.	20	7,1110	ns
Erro (c)	120	27,4944	
Profundidade (Pr)	4	19,2386	**
Pr2	1	19,1335	**
f.a.	3	0,1051	ns
C x Pr	4	0,2663	ns
f.a.	4	0,2663	ns
S x Pr	8	16,2625	ns
Pr1S1S2	2	9,5813	**
Pr2S1S2	2	6,1385	**
f.a.	4	0,5427	ns
C x S x Pr	8	1,1675	ns
f.a.	8	1,1675	ns
Erro (d+e+f)	48	4,4888	
P x Pr	40	8,2808	**
Pr1P4	1	1,5447	**
Pr1P7	1	0,3921	*
Pr2P2	1	1,4276	**
Pr2P4	1	0,6461	**
Pr2P5	1	0,4767	*

QUADRO 3A. Continuação...

Fonte de Variação	GL	SQ	Pr>F
Pr2P6	1	0,5596	*
Pr3P10	1	0,3771	*
f.a.	33	2,8569	ns
C x P x Pr	40	3,2305	ns
CPr1P4	1	0,3994	*
f.a.	39	2,8311	ns
S x P x Pr	80	10,1638	*
Pr1P3S1S2	2	0,6120	*
Pr1P4S1S2	2	1,9552	**
Pr1P6S1S2	2	1,1232	**
f.a.	74	6,4734	ns
C x S x P x Pr	80	8,5668	ns
CPr1P6S1S2	2	2,7662	**
CPr2P7S1S2	2	0,8006	*
CPr3P10S1S2	2	0,7092	*
CPr4P3S1S2	2	0,0056	**
f.a.	72	4,2852	ns
Erro (g)	480	45,8098	ns

*, **, e ns, Significância a $P < 0,05$, $P < 0,01$ e não significativo, respectivamente

CV(pH) = 5,42%

QUADRO 4A. Resumo da análise de variância do teor de matéria orgânica no solo, sob diferentes sucessões de culturas (C), sistemas de preparo de solo (S), posições de amostragem (P) e profundidade (Pr) em solo argilo siltoso Chalmers, em 1994.

Fonte de Variação	GL	SQ	Pr>F
Repetições	2	125,3217	*
Sucessão (C)	1	0,8378	ns
Erro (a)	2	2,5149	
Sistema prep. (S)	2	5,7374	ns
C x S	2	9,2179	ns
Erro (b)	8	6,3482	
Posição (P)	10	5,2747	ns
P2	1	2,6845	**
f.a.	9	2,5902	ns
C x P	10	0,7252	ns
f.a.	10	0,7252	ns
S x P	20	6,2756	ns
P1S1S2	2	3,4460	**
f.a.	8	2,8296	ns
C x S x P	20	11,0143	*
CP2S1S2	2	3,3417	**
CP4S1S2	2	2,4508	*
f.a.	18	5,2218	ns
Erro (c)	120	7,7168	
Profundidade (Pr)	4	281,4618	**
Pr1	1	271,5802	**
Pr2	1	7,2026	**
Pr3	1	2,3284	*
f.a.	1	0,3505	ns
C x Pr	4	0,0661	ns
f.a.	4	0,0661	ns
S x Pr	8	37,3315	**
Pr1S1S2	2	20,9204	**
Pr2S1S2	2	14,2422	**
f.a.	4	2,1689	ns
C x S x Pr	8	1,7910	ns
f.a.	8	1,7910	ns
Erro (d+e+f)	48	22,1529	
P x Pr	40	11,6676	**
Pr1P1	1	3,0588	**
Pr1P2	1	2,6298	**
Pr1P4	1	0,8052	**
Pr1P6	1	0,8825	**
Pr1P9	1	0,3729	*

QUADRO 4A. Continuação...

Fonte de Variação	GL	SQ	Pr>F
Pr2P2	1	0,8146	**
Pr2P3	1	0,6917	**
f.a.	33	2,4121	ns
C x P x Pr	40	-	ns
CPr1P1	1	0,7116	**
f.a.	39	-	
S x P x Pr	80	11,0688	**
Pr1P2S1S2	2	2,3591	**
Pr1P5S1S2	2	0,8103	*
Pr1P7S1S2	2	0,6960	*
Pr2P2S1S2	2	2,2423	**
Pr2P4S1S2	2	0,6509	*
f.a.	70	4,3102	ns
C x S x P x Pr	80	9,7475	ns
f.a.	80	9,7475	
Erro (g)	480	44,0183	ns

*, **, e ns, Significância a $P < 0,05$, $P < 0,01$, e não significativo, respectivamente.

CV(m.o.) = 6,93%.

TABELA 1A. Produção de milho cultivado sob diferentes sistemas de preparo de solo (convencional, cultivo mínimo e plantio direto) e sucessão de culturas (soja-milho e milho contínuo) de 1980 a 1995 no solo argilo siltoso denominado Chalmers.

Cultura prévia	Preparo do solo	Ano																Média
		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	
		Produção (kg/ha)																
milho	convencional	8361	9464	11715	8075	10181	10942	9492	9766	7196	10433	10349	6866	10881	10097	12074	7655	9597
	cultivo mínimo	7616	9570	10662	7801	10209	10388	9386	9649	7907	10237	10130	7039	10786	9733	11284	6944	9334
	plantio direto	7526	9218	10573	4687	8904	9727	8350	9106	6782	7846	9817	5846	7056	8282	7011	6619	7959
	Média	7834	9417	10983	6854	9765	10353	9076	9507	7295	9505	10099	6584	9574	9371	10123	7073	8963
soja*	convencional	9296	9878	11894	9318	11514	11435	10657	10422	8350	10186	10802	7739	11346	10298	12090	8372	10225
	cultivo mínimo	8926	9537	11710	9559	11099	11060	10640	9957	7862	10948	10931	7885	11491	10685	12611	8019	10183
	plantio direto	8725	9778	11698	9150	10825	10954	9996	10192	7610	10338	10931	7381	10679	9822	11362	7935	9836
	Média	8982	9731	11767	9343	11146	11150	10431	10190	7941	10491	10888	7668	11172	10269	12021	8109	10081

* Diferença a $P < 0.07$ CV = 3.8%

Fonte: Purdue University, Agronomy Department, West Lafayette, IN - Tillage Research Annual Report

TABELA 2A. Dados de parâmetros usados no cálculo de absorção de fósforo (P) com o modelo matemático de Barber e Cushman.

		Profundidade	0=0,27					0=0,13		Peso fresco			$\theta_f=0,27$
		(cm)	$C_{lf}(\mu\text{m/cc})$	$C_{sf}(\mu\text{m/cc})$	b	$D_e(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	$D_e(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	$L_e(92 \text{ dias})$	$L_e(30 \text{ dias})$	médio	$r_1(\text{cm})$	$r_o(\text{cm})$	$(2D_e t)^{1/2}$
soja-milho	cultivo mínimo	0-5	0,01451	1,5158	104	6,2E-09	3,92E-10	71,77	22,79	0,19734	0,0821	0,0365	0,26
		5-10	0,01290	1,3061	101	6,39E-09	4,05E-10	91,63	18,99	0,16675	0,0759	0,0310	0,26
		10-15	0,00914	0,8546	94	6,92E-09	4,38E-10	53,92	15,20	0,07893	0,0960	0,0270	0,27
		15-20	0,00699	0,4676	67	9,67E-09	6,12E-10	55,98	15,20	0,06117	0,0946	0,0234	0,32
		20-25	0,00753	0,3870	51	1,26E-08	7,96E-10	46,55	11,39	0,02325	0,1048	0,0160	0,37
milho-milho		0-5	0,0118	1,4190	120	5,39E-09	3,41E-10	93,76	22,79	0,0559	0,0739	0,0175	0,24
		5-10	0,0151	1,3303	88	7,32E-09	4,63E-10	86,62	18,99	0,15415	0,0776	0,0305	0,28
		10-15	0,0097	0,9433	98	6,64E-09	4,2E-10	64,43	15,20	0,06035	0,0894	0,0220	0,27
		15-20	0,0086	0,5402	63	1,03E-08	6,52E-10	55,46	15,20	0,03497	0,0949	0,0178	0,33
		20-25	0,0091	0,2903	32	2,04E-08	1,29E-09	59,65	11,39	0,03128	0,0947	0,0167	0,47
soja-milho	plantio-direto	0-5	0,07579	2,0882	28	2,35E-08	1,49E-09	56,96	22,79	0,28214	0,0893	0,0475	0,50
		5-10	0,00699	1,4190	203	3,19E-09	2,02E-10	87,87	18,99	0,19036	0,0772	0,0337	0,18
		10-15	0,00968	0,8949	93	7E-09	4,43E-10	88,19	15,20	0,10122	0,0785	0,0250	0,27
		15-20	0,00968	0,5644	58	1,11E-08	7,02E-10	77,65	15,20	0,08317	0,0828	0,0239	0,34
		20-25	0,00753	0,4193	56	1,16E-08	7,35E-10	49,70	11,39	0,04323	0,1021	0,0212	0,35
milho-milho		0-5	0,11449	1,8624	16	3,98E-08	2,52E-09	90,88	22,79	0,51587	0,0748	0,0538	0,65
		5-10	0,03924	1,7899	46	1,42E-08	8,98E-10	88,85	18,99	0,26261	0,0768	0,0394	0,39
		10-15	0,01129	1,3142	116	5,56E-09	3,52E-10	72,68	15,20	0,13124	0,0851	0,0308	0,24
		15-20	0,00914	0,8627	94	6,86E-09	4,34E-10	66,78	15,20	0,07367	0,0881	0,0239	0,27
		20-25	0,00860	0,4515	53	1,23E-08	7,8E-10	54,21	11,39	0,05491	0,0985	0,0231	0,36
milho-milho	convencional	0-5	0,01225	1,2642	103	6,27E-09	3,97E-10	68,86	22,79	0,148	0,0862	0,0332	0,26
		5-10	0,01225	1,1874	97	6,68E-09	4,23E-10	95,92	18,99	0,225	0,0744	0,0353	0,27
		10-15	0,01225	1,1074	90	7,16E-09	4,53E-10	77,20	15,20	0,113	0,0830	0,0279	0,28
		15-20	0,01225	0,8720	71	9,09E-09	5,75E-10	46,16	15,20	0,035	0,1019	0,0191	0,31
		20-25	0,01225	0,6160	50	1,29E-08	8,15E-10	40,46	11,40	0,029	0,1108	0,0189	0,37
soja-milho		0-5	0,009675	1,0514	109	5,96E-09	3,77E-10	86,23	22,79	0,345	0,0764	0,0449	0,25
		5-10	0,009675	0,9256	96	6,77E-09	4,28E-10	72,28	18,99	0,183	0,0835	0,0357	0,27
		10-15	0,009675	0,8649	89	7,24E-09	4,58E-10	58,67	15,20	0,06	0,0928	0,0227	0,28
		15-20	0,009675	0,8004	83	7,83E-09	4,95E-10	52,51	15,20	0,032	0,0905	0,0162	0,29
		20-25	0,009675	0,5857	61	1,07E-08	6,77E-10	28,61	11,40	0,024	0,1262	0,0195	0,34

TABELA 2A. Continuação...

		Profundidade	$\theta_2=0,13$	Peso fresco					I_{\max}	K_m	C_{\min}	V_o	k	T_{\max}
		(cm)	$(2D_e t)^{1/2}$	L(92 dias)	$L_o(30 \text{ dias})$	médio	(μmolcc^{-1})	(μmolcc^{-1})	(μmolcc^{-1})	(cm.s^{-1})	(cm.s^{-1})			
Soja-milho	cultivo mínimo	0-5	0,06	71,77	22,79	0,197	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,26E-07	5,36E+06		
		5-10	0,07	91,63	18,99	0,167	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	8,00E-07	5,36E+06		
		10-15	0,07	53,92	15,20	0,079	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	6,82E-07	5,36E+06		
		15-20	0,08	55,98	15,20	0,061	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	6,92E-07	5,36E+06		
		20-25	0,09	46,55	11,39	0,023	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	6,64E-07	5,36E+06		
milho-milho		0-5	0,06	93,76	22,79	0,056	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,95E-07	5,36E+06		
		5-10	0,07	86,62	18,99	0,154	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,86E-07	5,36E+06		
		10-15	0,07	64,43	15,20	0,060	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,27E-07	5,36E+06		
		15-20	0,08	55,46	15,20	0,035	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	6,89E-07	5,36E+06		
		20-25	0,12	59,65	11,39	0,031	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,23E-07	5,36E+06		
Soja-milho	plantio-direto	0-5	0,13	56,96	22,79	0,282	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	6,59E-07	5,36E+06		
		5-10	0,05	87,87	18,99	0,190	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,90E-07	5,36E+06		
		10-15	0,07	88,19	15,20	0,101	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	8,00E-07	5,36E+06		
		15-20	0,09	77,65	15,20	0,083	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,71E-07	5,36E+06		
		20-25	0,09	49,70	11,39	0,043	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	6,80E-07	5,36E+06		
milho-milho		0-5	0,16	90,88	22,79	0,516	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,87E-07	5,36E+06		
		5-10	0,10	88,85	18,99	0,263	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,92E-07	5,36E+06		
		10-15	0,06	72,68	15,20	0,131	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,56E-07	5,36E+06		
		15-20	0,07	66,78	15,20	0,074	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,36E-07	5,36E+06		
		20-25	0,09	54,21	11,39	0,055	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,01E-07	5,36E+06		
milho-milho	convencional	0-5	0,07	68,86	22,79	0,148	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,15E-07	5,36E+06		
		5-10	0,07	95,92	18,99	0,225	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	8,10E-07	5,36E+06		
		10-15	0,07	77,20	15,20	0,113	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,70E-07	5,36E+06		
		15-20	0,08	46,16	15,20	0,035	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	6,40E-07	5,36E+06		
		20-25	0,09	40,46	11,40	0,029	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	6,29E-07	5,36E+06		
Soja-milho		0-5	0,06	86,23	22,79	0,345	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,74E-07	5,36E+06		
		5-10	0,07	72,28	18,99	0,183	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,42E-07	5,36E+06		
		10-15	0,07	58,67	15,20	0,060	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	7,04E-07	5,36E+06		
		15-20	0,07	52,51	15,20	0,032	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	6,75E-07	5,36E+06		
		20-25	0,09	28,61	11,40	0,024	5,38E-06	4,47E-03	6,00E-05	5,00E-07	5,31E-07	5,36E+06		

TABELA 3A. Dados de parâmetros usados no cálculo de absorção de potássio (K) com o modelo matemático de Barber e Cushman.

		Profundidade						Peso fresco			$\theta_f=0,27$		
		(cm)	$C_{f(\mu\text{m/cc})}$	$C_{s(\mu\text{m/cc})}$	b	$D_e(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	$D_e(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	L(92 dias)	$L_o(30 \text{ dias})$	médio	$r_1(\text{cm})$	$r_o(\text{cm})$	$(2D_e t)^{1/2}$
soja-milho	cultivo mínimo	0-5	0,750	5,384	7,2	2,01E-07	1,27E-08	71,77	22,79	0,19734	0,0821	0,0365	1,47
		5-10	0,241	4,224	17,6	9,10E-08	5,19E-09	91,63	18,99	0,16675	0,0759	0,0310	0,99
		10-15	0,271	3,667	13,5	1,06E-07	6,74E-09	53,92	15,20	0,07893	0,0960	0,0270	1,07
		15-20	0,079	3,628	45,7	3,15E-08	1,99E-09	55,98	15,20	0,06117	0,0946	0,0234	0,58
		20-25	0,089	3,564	40,1	3,59E-08	2,27E-09	46,55	11,39	0,02325	0,1048	0,0160	0,62
milho-milho		0-5	0,359	5,852	16,3	8,83E-08	5,59E-09	93,76	22,79	0,0559	0,0739	0,0175	0,97
		5-10	0,330	4,231	12,8	1,12E-07	7,11E-09	86,62	18,99	0,15415	0,0776	0,0305	1,10
		10-15	0,277	3,654	13,2	1,09E-07	6,92E-09	64,43	15,20	0,06035	0,0894	0,0220	1,08
		15-20	0,122	3,526	29,0	4,97E-08	3,14E-09	55,46	15,20	0,03497	0,0949	0,0178	0,73
		20-25	0,115	3,641	31,7	4,54E-08	2,87E-09	59,65	11,39	0,03128	0,0947	0,0167	0,70
soja-milho	plantio-direto	0-5	0,658	7,936	12,1	1,19E-07	7,55E-09	56,96	22,79	0,28214	0,0893	0,0475	1,13
		5-10	0,179	4,487	25,0	5,75E-08	3,64E-09	87,87	18,99	0,19036	0,0772	0,0337	0,79
		10-15	0,137	3,558	25,9	5,56E-08	3,52E-09	88,19	15,20	0,10122	0,0785	0,0250	0,77
		15-20	0,129	3,461	26,9	5,36E-08	3,39E-09	77,65	15,20	0,08317	0,0828	0,0239	0,76
		20-25	0,175	3,590	20,5	7,01E-08	4,44E-09	49,70	11,39	0,04323	0,1021	0,0212	0,87
milho-milho		0-5	0,700	8,391	12,0	1,2E-07	7,6E-09	90,88	22,79	0,51587	0,0748	0,0538	1,13
		5-10	0,360	5,660	15,7	9,16E-08	5,8E-09	88,85	18,99	0,26261	0,0768	0,0394	0,99
		10-15	0,216	4,320	20,0	7,21E-08	4,56E-09	72,68	15,20	0,13124	0,0851	0,0308	0,88
		15-20	0,226	3,795	16,8	8,59E-08	5,44E-09	66,78	15,20	0,07367	0,0881	0,0239	0,96
		20-25	0,154	3,795	24,6	5,86E-08	3,71E-09	54,21	11,39	0,05491	0,0985	0,0231	0,79
milho-milho	convencional	0-5	0,205	5,0860	24,8	5,8E-08	3,67E-09	68,86	22,79	0,148	0,0862	0,0332	0,79
		5-10	0,205	4,1419	20,2	7,13E-08	4,51E-09	95,92	18,99	0,225	0,0744	0,0353	0,87
		10-15	0,205	4,1265	20,1	7,15E-08	4,53E-09	77,20	15,20	0,113	0,0830	0,0279	0,88
		15-20	0,205	4,0665	19,8	7,26E-08	4,59E-09	46,16	15,20	0,035	0,1019	0,0191	0,88
		20-25	0,205	3,9177	19,1	7,54E-08	4,77E-09	40,46	11,40	0,029	0,1108	0,1108	0,90
soja-milho		0-5	0,287	4,9654	17,3	8,32E-08	5,27E-09	86,23	22,79	0,345	0,0764	0,0449	0,94
		5-10	0,287	3,9783	13,9	1,04E-07	6,57E-09	72,28	18,99	0,183	0,1427	0,0610	1,06
		10-15	0,287	4,1793	14,6	9,89E-08	6,26E-09	58,67	15,20	0,060	0,0928	0,0227	1,03
		15-20	0,287	3,9573	13,8	1,04E-07	6,61E-09	52,51	15,20	0,032	0,0905	0,0162	1,06
		20-25	0,287	3,9691	13,8	1,04E-07	6,59E-09	28,61	11,40	0,024	0,1262	0,0195	1,06

TABELA 3A. Continuação...

		Profundidade (cm)	$\theta_s=0,13$ $(2D_e t)^{1/2}$	I_{\max} (μmolcc^{-1})	K_m (μmolcc^{-1})	C_{\min} (μmolcc^{-1})	V_o (cm.s^{-1})	k (cm.s^{-1})	T_{\max}
Soja-milho	cultivo mínimo	0-5	0,37	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,26E-07	5,36E+06
		5-10	0,24	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	8,00E-07	5,36E+06
		10-15	0,27	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	6,82E-07	5,36E+06
		15-20	0,15	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	6,92E-07	5,36E+06
		20-25	0,16	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	6,64E-07	5,36E+06
milho-milho		0-5	0,24	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,95E-07	5,36E+06
		5-10	0,28	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,86E-07	5,36E+06
		10-15	0,27	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,27E-07	5,36E+06
		15-20	0,18	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	6,89E-07	5,36E+06
		20-25	0,18	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,23E-07	5,36E+06
Soja-milho	plantio-direto	0-5	0,28	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	6,59E-07	5,36E+06
		5-10	0,20	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,90E-07	5,36E+06
		10-15	0,19	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	8,00E-07	5,36E+06
		15-20	0,19	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,71E-07	5,36E+06
		20-25	0,22	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	6,80E-07	5,36E+06
milho-milho		0-5	0,29	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,87E-07	5,36E+06
		5-10	0,25	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,92E-07	5,36E+06
		10-15	0,22	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,56E-07	5,36E+06
		15-20	0,24	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,36E-07	5,36E+06
		20-25	0,20	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,01E-07	5,36E+06
milho-milho	convencional	0-5	0,20	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,15E-07	5,36E+06
		5-10	0,22	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	8,10E-07	5,36E+06
		10-15	0,22	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,70E-07	5,36E+06
		15-20	0,22	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	6,40E-07	5,36E+06
		20-25	0,23	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	6,29E-07	5,36E+06
Soja-milho		0-5	0,24	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,74E-07	5,36E+06
		5-10	0,27	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,42E-07	5,36E+06
		10-15	0,26	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	7,04E-07	5,36E+06
		15-20	0,27	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	6,75E-07	5,36E+06
		20-25	0,27	7,40E-06	1,49E-02	2,15E-03	5,00E-07	5,31E-07	5,36E+06

TABELA 4A. Absorção calculada de fósforo (P) e potássio (K) em três sistemas de preparo de solo (convencional, plantio direto e cultivo mínimo) e sucessão de culturas (soja-milho e milho contínuo), em cinco profundidades do solo e dois níveis de umidade volumétrica ($\theta_1 = 0,27$ e $\theta_2 = 0,13$).

		Profundidade (cm)	P		K	
			θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
			$\mu\text{mol/planta}$		$\mu\text{mol/planta}$	
soja-milho	cultivo mínimo	0-5	4495,66	2789,58	54853,94	50256,77
		5-10	6062,84	3708,27	24891,88	23265,86
		10-15	2012,12	926,30	16582,60	13643,13
		15-20	1322,85	685,13	5073,56	3215,40
		20-25	850,00	361,04	4820,36	2336,29
milho-milho		0-5	5773,89	2350,66	33314,19	27670,25
		5-10	5749,66	3527,00	21660,00	25546,16
		10-15	2748,57	1172,06	17723,80	14780,12
		15-20	1385,31	615,15	6503,72	4100,39
		20-25	1106,59	636,07	7337,46	4334,86
soja-milho	plantio-direto	0-5	3829,65	3696,46	20045,11	22619,86
		5-10	5499,39	2811,40	15376,91	14328,93
		10-15	4348,03	2356,23	13385,26	11436,87
		15-20	2627,42	1597,43	10953,71	8837,60
		20-25	1085,30	525,30	9397,21	6453,98
milho-milho		0-5	4511,69	6569,41	32780,15	26030,45
		5-10	7200,06	6824,05	23609,14	23244,71
		10-15	4496,87	2266,76	12919,85	11714,46
		15-20	2738,71	1277,70	12312,53	10849,34
		20-25	1376,80	725,69	7456,73	5242,42
milho-milho	convencional	0-2	3656,13	1971,86	13058,30	10050,44
		2-4	5930,26	4225,15	17618,61	17389,93
		4-6	4360,74	2338,84	14922,41	13868,87
		6-8	1541,52	822,91	8062,62	5756,44
		8-10	1081,61	326,27	7415,42	5043,99
soja-milho		0-2	3237,52	3496,08	12500,12	10136,52
		2-4	7808,06	3571,17	11384,72	10243,60
		4-6	3133,46	976,49	10745,72	9510,16
		6-8	1734,91	672,49	7554,55	7964,27
		8-10	498,06	195,42	4572,79	3186,28



Absolute calculated
 the (conventional) is so due to (calculo normal) estudio de rutina (a la
 mano-culpa contra (en caso) prohibida de solo e-los temas de
 unidades volumetricas (0.050 m³ = 0.11)

Luz		Luz		Luz	
1	2	3	4	5	6
0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
0.150	0.150	0.150	0.150	0.150	0.150
0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300
0.350	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
0.400	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450
0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550
0.600	0.600	0.600	0.600	0.600	0.600
0.650	0.650	0.650	0.650	0.650	0.650
0.700	0.700	0.700	0.700	0.700	0.700
0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750
0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
0.950	0.950	0.950	0.950	0.950	0.950
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000