


JOSÉ PAULO VIEIRA DA COSTA

FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO E DE POTÁSSIO EM LATOSSOLOS

UFV	BIBLIOTECA BBT	OBRA RG000786159
CLASSIFICAÇÃO T 631.422 / C837f / 1998		
TÍTULO Fluxo difusivo de fosforo e de potassio em		
		
140473		BBT

FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO E DE POTÁSSIO EM LATOSSOLOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Doctor Scientiae"

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Doctor Scientiae"

BIBLIOTECA CENTRAL
- U F V -

140.473
13-10-98

T
631.422
C 837f
1998
ex. 2

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
SETEMBRO - 1998

DOAÇÃO

JOSÉ PAULO VIEIRA DA COSTA

FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO E DE POTÁSSIO EM LATOSSOLOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "*Doctor Scientiae*"

A Deus.

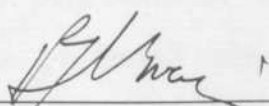
Aos meus pais Antônio e Ivanise.

À minha esposa Fátima.

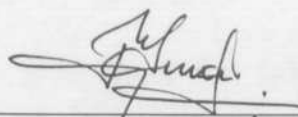
APROVADA: 22 de abril de 1998.

Às minhas filhas Damianne, Danilo e Isabella.

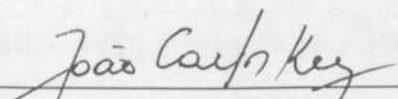
A toda a minha família.




Prof. Roberto Ferreira de Novais
(Conselheiro)




Prof. Jaime W. Vargas de Mello
(Conselheiro)



Prof. João Carlos Ker



Prof. Reinaldo B. Cantarutti



Prof. Nairam Félix de Barros
(Orientador)

AGRADECIMENTO

A Deus.

Aos meus pais Antônio e Ivanise.

À minha esposa Fátima.

Aos meus filhos Damianne, Danilo e Isabella.

A toda a minha família.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

Ao professor Nairam Félix de Barros, pela orientação, pelos ensinamentos transmitidos, pela dedicação, pelo profissionalismo e pela amizade.

Aos professores Roberto Ferreira de Novais, Jaime Wilson Vargas de Mello, João Carlos Ker e Reinaldo Bertolla Cantarutti, pelos ensinamentos, pelas críticas e pelas valiosas sugestões.

Aos professores José Mário Braga, Julio César Lima Neves, Hugo Alberto Ruiz e Victor Hugo Alvarez V., pelos ensinamentos, pela atenção e pela receptividade.

Ao professor da Universidade Federal de Alagoas Gilson Moura Filho, pelo incentivo, pelo apoio, pelas sugestões nas análises estatísticas e pela amizade.

Aos professores da Universidade Federal de Alagoas José Carlos Lira, Edma Carvalho de Miranda, Maria de Fátima Silva Muniz e Abel Washington de Albuquerque, pelo apoio, pelo incentivo, pela resolução dos problemas na árdua tarefa de procuradores e, sobretudo, pela amizade.

A José Luiz Teixeira e José Roberto de Freitas, pelo auxílio nas análises estatísticas e nos momentos de formulação e pela amizade.

AGRADECIMENTO

Aos funcionários do Departamento de Solos, em especial a Geraldo, Cardoso, José Roberto, Pedro Lélis, Carlos, Renato, Cláudio, Dorinha e Simone, pela amizade e pelo convívio.

Aos colegas de curso, especialmente aos amigos Ademar, Gilson, Cristino e Lu, pela amizade, pelo convívio e pelo apoio nos momentos difíceis.

Aos meus pais Antônio e Ivanise, pelo amor, pelo carinho, pelo apoio, pelo incentivo e pela dedicação em todos os momentos da minha vida.

A minha esposa Fatima e aos meus filhos Damianne, Danilo e Isabella, pelo amor, pela dedicação, pela ajuda, pela compreensão, pelo carinho que nos une, pela confiança, pela companhia e pela alegria em todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Departamento de Solos, pela oportunidade de realizar o curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

Ao professor Nairam Félix de Barros, pela orientação, pelos ensinamentos transmitidos, pela dedicação, pelo profissionalismo e pela amizade.

Aos professores Roberto Ferreira de Novais, Jaime Wilson Vargas de Mello, João Carlos Ker e Reinaldo Bertolla Cantarutti, pelos ensinamentos, pelas críticas e pelas valiosas sugestões.

A Deus, por tudo.

Aos professores José Mário Braga, Júlio César Lima Neves, Hugo Alberto Ruiz e Victor Hugo Alvarez V., pelos ensinamentos, pela atenção e pela receptividade.

Ao professor da Universidade Federal de Alagoas Gilson Moura Filho, pelo incentivo, pelo apoio, pelas sugestões nas análises estatísticas e pela amizade.

Aos professores da Universidade Federal de Alagoas José Carlos Lira, Edma Carvalho de Miranda, Maria de Fátima Silva Muniz e Abel Washington de Albuquerque, pelo apoio, pelo incentivo, pela resolução dos problemas na árdua tarefa de procuradores e, sobretudo, pela amizade.

A José Luiz Teixeira e José Roberto de Freitas, pelo auxílio nas análises estatísticas e nos trabalhos de formatação e pela amizade.

Aos funcionários do Departamento de Solos, em especial a Geraldo, Cardoso, José Roberto, Pedro Lélis, Carlos, Renato, Cláudio, Dorinha e Simone, pela amizade e pelo convívio.

Aos colegas de curso, especialmente aos amigos Ademar, Gilson, Cristino e Lu, pela amizade, pelo convívio e pelo apoio nos momentos difíceis.

Aos meus pais Antônio e Ivanise, pelo amor, pelo carinho, pelo apoio, pelo incentivo e pela dedicação em todos os momentos da minha vida.

À minha esposa Fátima e aos meus filhos Damianne, Danilo e Isabella, pelo amor, pela dedicação, pela ajuda, pela compreensão, pelo carinho que nos une, pela confiança, pela companhia e pela alegria em todos os momentos.

Aos meus irmãos, tios, sobrinhos, sogros, cunhados e a toda a minha família, pela estima, pelo apoio e pelo incentivo.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus, por tudo.

BIOGRAFIA

JOSÉ PAULO VIEIRA DA COSTA, filho de Antônio Ferreira da Costa e de Maria Ivanise Vieira da Costa, nasceu em Belo Jardim, Pernambuco, em 23 de janeiro de 1952.viii

Em 1977, graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, onde desempenhou as funções de Professor Colaborador e Engenheiro-Agrônomo até 1983.1

Em 1983, concluiu o mestrado em Ciência do Solo, com área de concentração em Fertilidade do Solo, na Universidade Federal Rural de Pernambuco.1

Em 1983, ingressou na Universidade Federal de Alagoas, onde ocupa o cargo de Professor Adjunto no Departamento de Solos, Engenharia e Economia Rural.4

Em março de 1994, iniciou o curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em nível de doutorado, com área de concentração em Fertilidade do Solo, submentendo-se à defesa de tese em abril de 1998.11

2.3. Avaliação do fluxo difusivo 14

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
3.1. Efeito das doses de fósforo no fluxo difusivo	17
3.2. Influência do conteúdo volumétrico de água no fluxo difusivo	22
3.3. pH dos solos após o ensaio	28
4. RESUMO E CONCLUSÕES	30

CAPÍTULO 2

FLUXO DIFUSIVO DE POTÁSSIO EM SOLOS INFLUENCIADO POR NÍVEIS DE UMIDADE E POR COMPACTAÇÃO	32
---	----

1. INTRODUÇÃO	32
---------------------	----

2. MATERIAL E MÉTODOS	35
-----------------------------	----

2.1. Caracterização dos solos	35
-------------------------------------	----

2.2. Montagem do experimento	38
------------------------------------	----

2.3. Avaliação do fluxo difusivo	41
--	----

EXTRATO	viii
---------------	------

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
---------------------------------	----

ABSTRACT	x
----------------	---

4. RESUMO E CONCLUSÕES	49
------------------------------	----

INTRODUÇÃO	1
------------------	---

RESUMO E CONCLUSÕES	51
---------------------------	----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
----------------------------------	---

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	53
----------------------------------	----

CAPÍTULO 1	59
------------------	----

FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO EM SOLOS INFLUENCIADO POR DOSES DO ELEMENTO E POR NÍVEIS DE UMIDADE	4
--	---

1. INTRODUÇÃO	4
---------------------	---

2. MATERIAL E MÉTODOS	8
-----------------------------	---

2.1. Caracterização dos solos	8
-------------------------------------	---

2.2. Montagem do experimento	11
------------------------------------	----

2.3. Avaliação do fluxo difusivo	14
--	----

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
3.1. Efeito das doses de fósforo no fluxo difusivo	17
3.2. Influência do conteúdo volumétrico de água no fluxo difusivo	22
3.3. pH dos solos após o ensaio	28
4. RESUMO E CONCLUSÕES	30

CAPÍTULO 2

FLUXO DIFUSIVO DE POTÁSSIO EM SOLOS INFLUENCIADO POR NÍVEIS DE UMIDADE E POR COMPACTAÇÃO	32
1. INTRODUÇÃO	32
2. MATERIAL E MÉTODOS	35
2.1. Caracterização dos solos	35
2.2. Montagem do experimento	38
2.3. Avaliação do fluxo difusivo	41
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4. RESUMO E CONCLUSÕES	49
RESUMO E CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
APÊNDICE	59

EXTRATO

COSTA, José Paulo Vieira da, D.S., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 1998. **Fluxo difusivo de fósforo e de potássio em latossolos.** Orientador: Nairam Félix de Barros. Conselheiros: Roberto Ferreira de Novais e Jaime W. Vargas de Mello.

Avaliaram-se os efeitos do conteúdo volumétrico de água e de doses de fósforo no fluxo difusivo deste elemento e do conteúdo volumétrico de água e da compactação no fluxo difusivo do potássio em Latossolos. No primeiro ensaio, foram testados oito níveis de umidade, correspondentes a 10, 20, 40, 60, 70, 80, 90 e 100% da porosidade total das amostras de cinco Latossolos, e cinco doses de fósforo, equivalentes a 0, 25, 50, 75 e 100% da capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos. No segundo ensaio estudou-se o efeito dos mesmos níveis de umidade e da densidade, a densidade natural e um acréscimo de 30%, de três Latossolos, sobre o fluxo difusivo de potássio. A estimativa do fluxo difusivo foi realizada pela utilização de resina de troca iônica, em forma de lâminas dispostas, horizontalmente, entre duas camadas de solo para o ensaio com fósforo e na superfície do solo, em virtude da compactação efetuada, para o ensaio com

potássio, em câmaras de difusão. Após 15 dias, as lâminas de resina foram retiradas e lavadas com água destilada, e o fósforo e o potássio, extraídos e dosados. Os solos mais arenosos apresentaram maior fluxo difusivo de fósforo do que os mais argilosos. O fluxo difusivo foi influenciado pelos níveis de umidade e pelas doses de fósforo; contudo, não se observou relação direta, linear, entre o conteúdo volumétrico de água e o coeficiente de difusão de fósforo, como previsto pela equação de difusão. O fluxo difusivo de potássio aumentou com o acréscimo dos níveis de umidade e diminuiu com a compactação, em todos os solos. A relação direta, linear, entre o conteúdo volumétrico de água e o coeficiente de difusão de potássio foi observada nos três Latossolos quando se promoveu a compactação. No entanto, quando os solos não foram compactados, a proporcionalidade foi verificada apenas no solo mais arenoso.

COSTA, José Paulo Vieira da, D.S., Universidade Federal de Viçosa, September 1998. Diffusive flux of phosphorus and potassium in Oxisols. Adviser: Nairam Félix de Barros. Committee Members: Roberto Ferreira de Novais and Jaime W. Vargas de Mello.

The effects of water content and phosphorus (P) rates on phosphorus diffusive flux (PDF) as well as the effects of water content and soil compaction on the potassium diffusive flux (KDF) were evaluated in five and in three Oxisol samples, respectively. In the first study, eight levels of soil moistures (10, 20, 40, 60, 70, 80, 90, and 100%), defined as a percent of the soil total porosity, were combined with five rates of P (0, 25, 50, 75, and 100%), defined as a percent of the maximum capacity of soil phosphorus adsorption, and applied to five Oxisol samples, varying in their physical-chemical characteristics, and PDF determined by using resin strips. In the second study, the same levels of soil moisture were combined with two soil densities (the natural bulk density and a compaction corresponding to 30% above the natural bulk density) in three Oxisol samples, varying in their physical-chemical characteristics, and KDF was measured using resin strips. To

ABSTRACT

COSTA, José Paulo Vieira da, D.S., Universidade Federal de Viçosa, September 1998. **Diffusive flux of phosphorus and potassium in Oxisols.** Adviser: Nairam Félix de Barros. Committee Members: Roberto Ferreira de Novais and Jaime W. Vargas de Mello.

The effects of water content and phosphorus (P) rates on phosphorus diffusive flux (PDF) as well as the effects of water content and soil compaction on the potassium diffusive flux (KDF) were evaluated in five and in three Oxisol samples, respectively. In the first study, eight levels of soil moistures (10, 20, 40, 60, 70, 80, 90, and 100%), defined as a percent of the soil total porosity, were combined with five rates of P (0, 25, 50, 75, and 100%), defined as a percent of the maximum capacity of soil phosphorus adsorption, and applied to five Oxisol samples, varying in their physical-chemical characteristics, and PDF determined by using resin strips. In the second study, the same levels of soil moisture were combined with two soil densities (the natural bulk density and a compaction corresponding to 30% above the natural bulk density) in three Oxisol samples, varying in their physical-chemical characteristics, and KDF was measured using resin strips. To

determine PDF, the resin strips were placed in the interior of the soil samples (360 cm³ of volume), and on the top of the soil samples to determine KDF. For both cases chambers made of PVC rings were used – 10 cm in diameter and 5 cm high, which were placed in plastic bags, to avoid evaporation, and maintained under controlled temperature (25 ± 3°C) for 15 days. After this period of time, resin strips were removed, washed with distilled water, and P and K extracted by a NH₄Cl 0.8 mol L⁻¹ + HCl 0.2 mol L⁻¹ solution. PDF was higher in the sandier soils than in the clayer ones, and positively influenced by the levels of soil moisture and P rates. However, the linear relation between PDF and soil moisture levels, as predicted by the diffusion equation, was observed. KDF increased with soil moisture levels and decreased with compaction. When the soil was compacted, a linear relation between moisture levels and KDF was observed. However, for non-compacted soils, this relation was observed only for the sandier soil but not for the clayer ones. It was concluded that the linear relation between PDF, KDF and soil moisture content, as predicted by the diffusion equation, is not universal and depends on the range of soil moisture under consideration.

O transporte de íons por difusão no solo é regulado por vários fatores, destacando-se o conteúdo de água, a interação do nutriente com os colóides e a distância a percorrer até as raízes. As partículas do solo determinam a tortuosidade, ou seja, o caminho pelo qual os íons são transportados e a adsorção dos mesmos. De acordo com BARBER (1980), além de a trajetória da difusão ser tortuosa, a maior parte do fósforo que pode ser difundido está adsorvida à superfície das partículas do solo com as quais está em equilíbrio, restringindo, assim, a quantidade do elemento que difunde. O aumento da densidade aparente, dentro de certos limites, diminui a tortuosidade, devido à maior continuidade da fase líquida e à redução do caminho difusivo. Entretanto, com o aumento da compactação, as partículas de solo ficam muito próximas, favorecendo maior adsorção.

1. INTRODUÇÃO

A interceptação de raízes, além dos dois mecanismos de transporte citados, também é responsável pelo suprimento de nutrientes às plantas. Os principais mecanismos de transporte dos íons na solução do solo até as raízes são a difusão e o fluxo de massa. O fluxo de massa ocorre como consequência do gradiente de potencial matricial provocado pela absorção e transpiração de água pelas plantas. A concentração do íon na solução do solo e a taxa de transpiração determinam a quantidade do nutriente transportada por este mecanismo (NYE e TINKER, 1969). Elementos retidos com menor energia na fase sólida do solo e, percorrida e pelo maior gradiente de concentração do íon. A quantidade de fósforo interceptada pela superfície radicular é muito reduzida, mas o crescimento radicular facilita em muito a difusão. Segundo RUIZ (1993), os resultados conflitantes na presença e ausência de sistemas radiculares indicariam a importância do crescimento das raízes, favorecido pela umidade do solo, para a aquisição de elementos transportados essencialmente por difusão.

No caso de outros íons fortemente adsorvidos ao solo, como é o caso do fósforo, a quantidade absorvida pela planta é superior à fornecida por fluxo de massa. Assim, quantidades adicionais do elemento alcançam a raiz por difusão (BARBER, 1974; CLARKSON, 1985). A difusão é devida ao movimento térmico de íons ou moléculas num meio líquido e ao gradiente de concentração, que provoca maior movimento de íons em direção aos pontos de menor concentração.

O transporte de íons por difusão no solo é regulado por vários fatores, destacando-se o conteúdo de água, a interação do nutriente com os colóides e a distância a percorrer até as raízes. As partículas do solo determinam a tortuosidade, ou seja, o caminho pelo qual os íons são transportados e a adsorção dos mesmos. De acordo com BARBER (1980), além de a trajetória da difusão ser tortuosa, a maior parte do fósforo que pode ser difundido está adsorvida à superfície das partículas do solo com as quais está em equilíbrio, restringindo, assim, a quantidade do elemento que difunde. O aumento da densidade aparente, dentro de certos limites, diminui a tortuosidade, devido à maior continuidade da fase líquida e à redução do caminho difusivo. Entretanto, com o aumento da compactação, as partículas de solo ficam muito próximas, favorecendo maior adsorção.

A intercepção de raízes, além dos dois mecanismos de transporte citados, também é responsável pelo suprimento de nutrientes às plantas. À medida que a raiz cresce, encontra em sua trajetória nutrientes que são absorvidos. A contribuição desse mecanismo, que tem sido questionada, é pequena na quantidade total de nutrientes absorvida pela planta. Alguns autores defendem que a intercepção radicular seria, em última análise, um dos mecanismos descritos anteriormente, alterados pela menor distância percorrida e pelo maior gradiente de concentração do íon. A quantidade de fósforo interceptada pela superfície radicular é muito reduzida, mas o crescimento radicular facilita em muito a difusão. Segundo RUIZ (1993), os resultados conflitantes na presença e ausência de sistemas radiculares indicariam a importância do crescimento das raízes, favorecido pela umidade do solo, para a aquisição de elementos transportados essencialmente por difusão.

A importância relativa de cada mecanismo no suprimento dos nutrientes depende da capacidade do solo em cedê-los e da demanda pela planta.

O potássio é um elemento absorvido em grandes quantidades pelas plantas. Isso diminui consideravelmente a concentração desse nutriente na solução próxima às raízes. Em consequência, a difusão assume papel importante no transporte do potássio até as raízes das plantas. Para BARBER (1974), a difusão é o principal mecanismo de transporte do potássio da solução do solo às raízes, sendo responsável por 86% do seu suprimento, enquanto o fluxo de massa e a interceptação radicular representam 11% e 3%, respectivamente.

A disponibilidade de nutrientes para as plantas é afetada, entre outros fatores, pela compactação do solo, uma vez que os mecanismos de transporte desses nutrientes são influenciados pela estrutura do solo. Assim, a compactação vem sendo motivo de preocupação por parte de pesquisadores, visto que a mesma pode afetar significativamente, e de maneira negativa, o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

Este trabalho teve como objetivos: a) avaliar o efeito de diferentes níveis de umidade e doses de fósforo no seu fluxo difusivo e b) estudar a influência de níveis de umidade e da compactação no fluxo difusivo do potássio.

Os solos ácidos de regiões tropicais apresentam, na sua maioria, elevada capacidade de adsorção de fósforo e baixos teores deste nutriente, o que torna a nutrição fosfatada fator limitante à obtenção de rendimentos agrícolas economicamente satisfatórios. A disponibilidade do fósforo aplicado via fertilizantes é, em geral, limitada em razão da abundância de óxidos de ferro e de alumínio nesses solos. Várias reações estão envolvidas nessa limitação de disponibilidade, como a precipitação (formação de nova fase ou composto definido), a adsorção (reação na interface sólido/solução) e a difusão nas imperfeições dos cristais (BARROW, 1985; PARFITT, 1989).

As características do solo, o transporte do nutriente no solo, a morfologia e fisiologia do sistema radicular e a microbiota da rizosfera são fatores que influenciam a absorção de fósforo pela planta. O estudo desses fatores é de fundamental importância para melhor entendimento dos mecanismos envolvidos na interação solo-planta que determinam a absorção do nutriente pela planta e para adoção de práticas racionais de adubação.

Para os nutrientes transportados fundamentalmente por difusão, estudos no sentido de se obter maior conhecimento deste mecanismo, dos fatores que o afetam e da obtenção de subsídios que aprimorem as metodologias de medição são sempre justificáveis.

O principal mecanismo de transporte do fósforo no solo é a difusão, que é influenciada por vários fatores, como o conteúdo volumétrico de água no solo, a interação fósforo-cólides do solo, a distância a percorrer até as raízes, o teor do elemento e a temperatura do solo. Em geral, são registrados

CAPÍTULO 1

valores muito baixos de transporte de fósforo, em razão de sua forte interação com os colóides do solo, em especial em solos tropicais muito

FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO EM SOLOS INFLUENCIADO POR DOSES DO ELEMENTO E POR NÍVEIS DE UMIDADE

Pela primeira lei de Fick, a relação entre o fluxo difusivo de um soluto em uma solução pura e o gradiente de concentração e o coeficiente de difusão é expressa por:

1. INTRODUÇÃO

Os solos ácidos de regiões tropicais apresentam, na sua maioria, elevada capacidade de adsorção de fósforo e baixos teores deste nutriente, o que torna a nutrição fosfatada fator limitante à obtenção de rendimentos agrícolas economicamente satisfatórios. A disponibilidade do fósforo aplicado via fertilizantes é, em geral, limitada em razão da abundância de óxidos de ferro e de alumínio nesses solos. Várias reações estão envolvidas nessa limitação de disponibilidade, como a precipitação (formação de nova fase ou composto definido), a adsorção (reação na interface sólido/solução) e a difusão nas imperfeições dos cristais (BARROW, 1985; PARFITT, 1989).

As características do solo, o transporte do nutriente no solo, a morfologia e fisiologia do sistema radicular e a microbiota da rizosfera são fatores que influenciam a absorção de fósforo pela planta. O estudo desses fatores é de fundamental importância para melhor entendimento dos mecanismos envolvidos na interação solo-planta que determinam a absorção do nutriente pela planta e para adoção de prática racional de adubação.

Para os nutrientes transportados fundamentalmente por difusão, estudos no sentido de se obter maior conhecimento deste mecanismo, dos fatores que o afetam e da obtenção de subsídios que aprimorem as metodologias de medição são sempre justificáveis.

O principal mecanismo de transporte do fósforo no solo é a difusão, que é influenciada por vários fatores, como o conteúdo volumétrico de água no solo, a interação fósforo-colóide do solo, a distância a percorrer até as raízes, o teor do elemento e a temperatura do solo. Em geral, são registrados valores muito baixos de transporte de fósforo, em razão de sua forte interação com os colóides do solo, em especial em solos tropicais muito intemperizados. Assim, a baixa mobilidade do nutriente tem se constituído num problema para a nutrição fosfatada das culturas.

Pela primeira lei de Fick, a relação entre o fluxo difusivo de um soluto em uma solução pura, o gradiente de concentração e o coeficiente de difusão é expressa por:

$$F = -D \delta C / \delta x \quad (\text{eq.1})$$

em que

F: fluxo difusivo do soluto ($\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$);

D: coeficiente de difusão do soluto ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$); e

$\delta C / \delta x$: gradiente de concentração ($\text{mol cm}^{-3} \text{cm}^{-1}$).

Em consequência da tortuosidade do trajeto a ser percorrido pelos elementos e das interações existentes entre eles e as partículas do solo, o coeficiente de difusão efetivo dos nutrientes no solo será menor que o expressado na equação.

Adaptando a lei de Fick para solos, a difusão do fósforo pode ser quantificada pela seguinte expressão matemática (NYE e TINKER, 1977):

$$D = D_1 \theta f_1 (\delta C_1 / \delta C) \quad (\text{eq.2})$$

em que D é o coeficiente de difusão de fósforo no solo, em $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$; D_1 é o coeficiente de difusão de fósforo em água ($0,89 \times 10^{-5} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$, a 25°C); θ é o

conteúdo volumétrico de água no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; f_1 é o fator de impedância, adimensional; C_1 é a concentração de fósforo na solução do solo ou fator intensidade (I), em mol cm^{-3} ; e C é a concentração de fósforo adsorvido-lábil ou fator quantidade (Q), em mol cm^{-3} .

A diferencial $\delta C_1/\delta C$ é o inverso do fator capacidade do solo ($\delta Q/\delta I$). O fator de impedância, f_1 , depende, fundamentalmente, da tortuosidade do caminho seguido pelo soluto através dos poros. Outros efeitos podem ser nele incluídos, como redução do gradiente de concentração ao longo desta distância e aumento da viscosidade da água próximo à superfície das partículas sólidas do solo, afetando a mobilidade dos solutos. Tais efeitos reduzem a difusão de íons.

São empregadas diferentes metodologias para a determinação do coeficiente de difusão de nutrientes no solo. Segundo WILD (1981), os coeficientes de autodifusão e de difusão em massa são definidos de acordo com a metodologia usada para sua avaliação. O coeficiente de autodifusão é determinado pelo acréscimo de pequenas quantidades de um isótopo radioativo a um sistema que contém uma concentração uniforme do isótopo não-marcado. O isótopo radioativo equilibra-se com o isótopo não-marcado, e a velocidade com que ocorre é usada para estimar o coeficiente de autodifusão. Para a medição do coeficiente de difusão em massa, faz-se o acompanhamento do movimento do soluto em resposta a um gradiente de concentração. Em geral, os valores determinados por ambos os métodos apresentam pouca discordância.

O fluxo difusivo de fósforo no solo tem sido estimado diretamente pela utilização de resina de troca iônica (AMER et al., 1955) e pelo uso de papel-filtro impregnado com óxidos de ferro e de alumínio (Van der ZEE et al., 1987; MENON et al., 1989). A restrição ao uso da resina granulada deve-se à dificuldade de operacionalização, principalmente pela dificuldade de separação das partículas do solo, o que tem sido contornado com o uso da resina trocadora de íons em forma de membrana.

De acordo com a eq.2, há uma relação direta entre o coeficiente de difusão de fósforo no solo e o conteúdo volumétrico de água. Quando a umidade aumenta, o filme de água próximo das partículas sólidas do solo fica mais espesso, diminuindo a interação íon-colóide. O fator de impedância também aumenta como consequência da diminuição da tortuosidade e da viscosidade da água, que apresentará valores mais próximos daqueles da água pura, em razão da maior distância entre seus íons e os colóides do solo. Essa relação direta entre o conteúdo de água do solo e a difusão de fósforo tem sido registrada por vários autores (HESLEP e BLACK, 1954; HIRA e SINGH, 1977; HARREL e SAEED, 1980; REMER e SCHILLING, 1981; RUIZ, 1986). Para BARBER (1974), o incremento do conteúdo de água do solo exerce efeito indireto sobre o transporte, devido ao aumento do fator de impedância como consequência da redução da tortuosidade do trajeto a ser percorrido pelo fósforo. Por outro lado, RUIZ (1986b) associa esse efeito à redução da viscosidade da solução do solo, que apresentaria valores mais próximos aos da água pura. Contudo, em alguns solos tropicais tem-se observado que a quantidade de fósforo absorvida pelas plantas reduz drasticamente ainda em condições de umidade relativamente elevada (NOVAIS e BARROS, 1997), o que permite questionar a proporcionalidade direta entre o conteúdo de água do solo e a difusão de fósforo, indicada pela eq.2.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes níveis de umidade e de doses de fósforo sobre o fluxo difusivo deste elemento em amostras de solos.

Quadro 1 - Características químicas e físicas das amostras dos solos

Características	LE ₁	LV ₁	LR	LV ₂	LE ₂
pH em H ₂ O (1:2,5)	5,4	5,1	4,7	4,2	4,7
pH em KCl (1:2,5)	4,2	3,8	4,1	4,3	4,0
Al ³⁺ (cmol. dm ⁻³) ¹⁰	0,75	0,91	0,54	0,43	1,23
Ca ²⁺ (cmol. dm ⁻³) ¹⁰	0,03	0,22	0,50	0,50	0,64
Mg ²⁺ (cmol. dm ⁻³) ¹⁰	0,04	0,37	0,20	0,03	0,21
H + Al (cmol. dm ⁻³) ¹⁰	3,29	3,98	7,30	5,17	14,14
P (mg dm ⁻³) ¹¹	0,7	1,3	1,9	0,7	1,3
N (mg dm ⁻³) ¹²				16	23
Carbono orgânico (dag kg ⁻¹) ¹³	0,33	1,49	1,70	1,94	3,13
Franciuménio (mg L ⁻¹) ¹⁴	40,0	16,1	61	5,3	3,2
CMAF (mg dm ⁻³ P) ¹⁵	100	344	1.112	1.170	1.172
EAF (mg dm ⁻³ P) ¹⁵	0,058	0,580	0,956	0,657	1,240
CTC efetiva (cmol. kg ⁻¹)	0,87	1,54	1,29	1,00	2,27
CTC total (cmol. kg ⁻¹)	4,01	4,01	7,95	6,09	15,75
Capacidade de campo (dag kg ⁻¹) ¹⁶	66,2	59,1	41,0	43,0	51,3
Areia grossa (dag kg ⁻¹) ¹⁷	13,4	19,3	26,0	16,3	36,7
Areia fina (dag kg ⁻¹) ¹⁷	32	45	6	20	9
Argila (dag kg ⁻¹) ¹⁷	51	15	68	12	5

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização dos solos

O ensaio foi desenvolvido em laboratório, utilizando-se amostras da camada de 0-20 cm de profundidade de cinco solos: Latossolo Vermelho-Escuro textura média (LE₁), Latossolo Vermelho-Amarelo textura média (LV₁), Latossolo Roxo textura argilosa (LR), Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (LV₂) e Latossolo Vermelho-Escuro textura muito argilosa (LE₂). As amostras foram secadas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de malha de 2 mm de abertura e homogeneizadas, retirando-se, em seguida, subamostras para caracterização física, química e mineralógica (Quadro 1 e Figura 1).

Quadro 1 - Características químicas e físicas das amostras dos solos

Característica	LE ₁	LV ₁	LR	LV ₂	LE ₂
pH em H ₂ O (1:2,5)	5,4	5,1	4,7	5,2	4,7
pH em KCl (1:2,5)	4,2	3,8	4,1	4,1	4,0
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	0,75	0,91	0,54	0,43	1,22
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	0,05	0,22	0,50	0,50	0,94
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	0,04	0,37	0,20	0,03	0,21
H + Al (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	3,89	3,98	7,20	5,52	14,54
P (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	0,7	1,3	1,9	0,7	1,3
K (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	10	15	20	16	23
Carbono orgânico (dag kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	0,53	1,49	1,70	1,94	2,13
P-remanescente (mg L ⁻¹) ⁽⁵⁾	40,0	16,1	6,1	5,2	5,2
CMAP (mg dm ⁻³ P) ⁽⁶⁾	399	744	1.112	1.170	1.172
EAP (mg dm ⁻³ P) ⁻¹ ⁽⁷⁾	0,868	0,580	0,956	0,657	1,240
CTC efetiva (cmol _c kg ⁻¹)	0,87	1,54	1,29	1,00	2,37
CTC total (cmol _c kg ⁻¹)	4,01	4,61	7,95	6,09	15,75
m (%) ⁽⁸⁾	86,2	59,1	41,9	43,0	51,5
Capacidade de campo (dag kg ⁻¹) ⁽⁹⁾	15,4	19,3	26,0	36,0	36,7
Areia grossa (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁰⁾	32	45	6	20	9
Areia fina (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁰⁾	51	15	25	12	5
Silte (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁰⁾	4	7	23	12	10
Argila (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁰⁾	13	33	49	56	76
Densidade aparente (g cm ⁻³) ⁽¹¹⁾	1,38	1,30	1,22	1,17	1,00
Densidade de partículas (g cm ⁻³) ⁽¹²⁾	2,63	2,63	3,03	2,73	2,63
Porosidade (%)	48	51	60	57	62

⁽¹⁾ KCl 1 mol L⁻¹ (VETTORI, 1969).

⁽²⁾ Extrator CaOAc 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0 (DEFELIPO e RIBEIRO, 1981).

⁽³⁾ Extrator Mehlich-1.

⁽⁴⁾ Método Walkley e Black (JACKSON, 1958).

⁽⁵⁾ Fósforo em equilíbrio após agitação por 1 hora com solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ com 60 mg L⁻¹ de P.

⁽⁶⁾ Capacidade máxima de adsorção de fósforo (NOVAIS e KAMPRATH, 1979).

⁽⁷⁾ "Energia de adsorção" de fósforo (NOVAIS e KAMPRATH, 1979).

⁽⁸⁾ Saturação com alumínio.

⁽⁹⁾ Método da coluna (FERNANDES, 1967).

⁽¹⁰⁾ (EMBRAPA, 1979).

⁽¹¹⁾ Método da proveta (EMBRAPA, 1979).

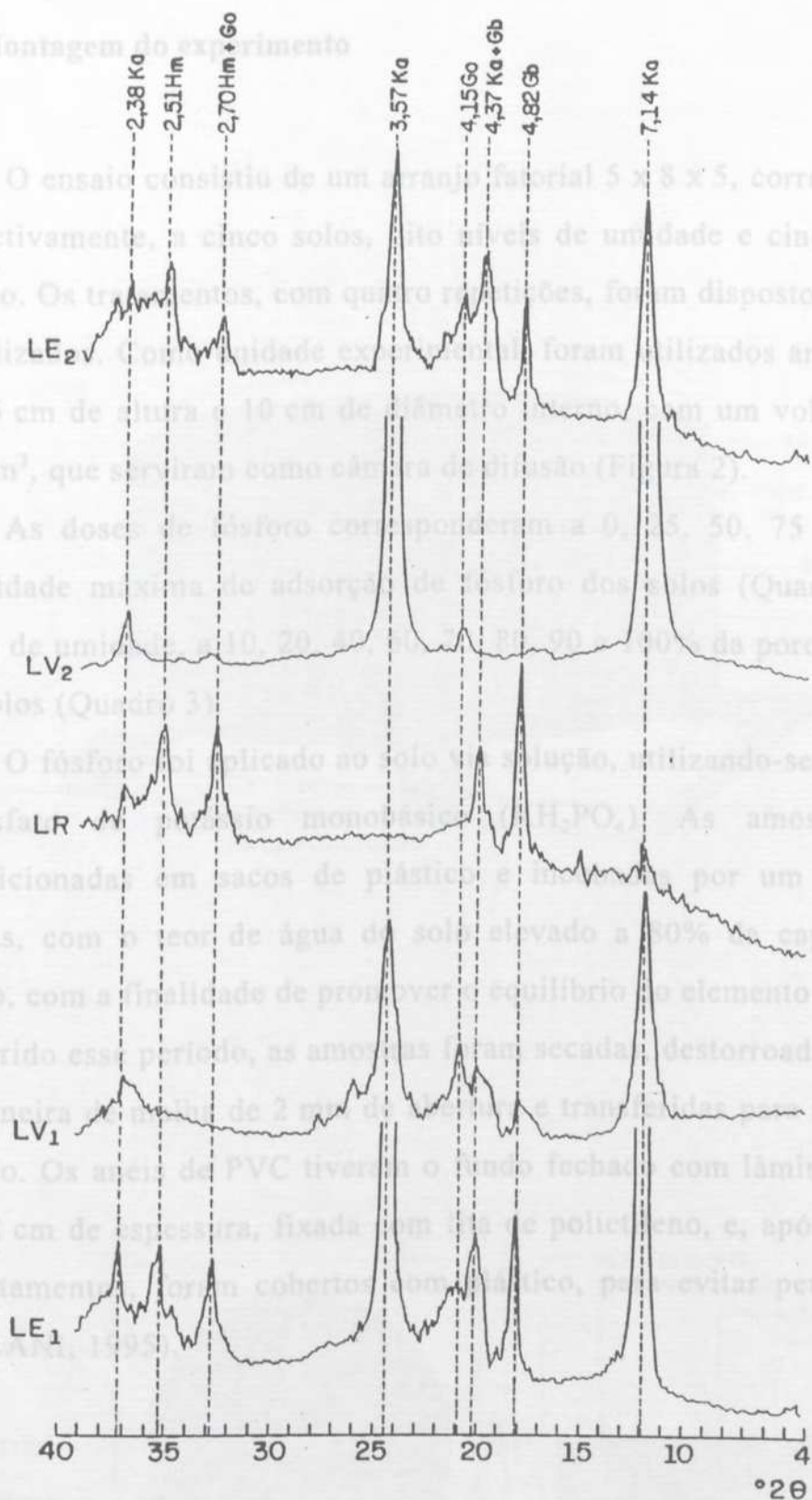
⁽¹²⁾ Método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1979).

2.2. Montagem do experimento

O ensaio consistiu de um arranjo fatorial $5 \times 8 \times 5$, correspondendo, respectivamente, a cinco solos, oito níveis de unidade e cinco doses de fósforo. Os tratamentos, com quatro repetições, foram dispostos em blocos casualizados. Como unidade experimental foram utilizados anéis de PVC com 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro, apresentando um volume útil de 360 cm³, que serviram como câmara de difusão (Figura 2).

As doses de fósforo corresponderam a 0, 25, 50, 75 e 100% da capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos (Quadro 2), e os níveis de umidade foram de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100% da porosidade total dos solos (Quadro 3).

O fósforo foi aplicado ao solo via solução, utilizando-se como fonte o fosfato mono básico (H_2PO_4). As amostras foram acondicionadas em sacos de plástico e incubadas por um período de 15 dias, com o teor de água do solo elevado a 100% da capacidade de campo, com a finalidade de promover o equilíbrio do elemento com o solo. Decorrido esse período, as amostras foram secadas, destorroadas, passadas em peneira com abertura de 2 mm de diâmetro e transferidas para a câmara de difusão. Os anéis de PVC tiveram o fundo fechado com lâmina de isopor de 1,2 cm de espessura, fixada com fita de polietileno, e, após receberem os tratamentos, foram cobertos com plástico, para evitar perda de água (VILLALBA, 1995).



Radiação Cu - $K\alpha$. Ka - caulinita; Hm - hematita; Go - goethita; Gb - gibbsita.

Figura 1 - Difratoogramas de raios-X da fração argila em lâminas orientadas de amostras dos solos estudados.

2.2. Montagem do experimento

O ensaio consistiu de um arranjo fatorial 5 x 8 x 5, correspondendo, respectivamente, a cinco solos, oito níveis de umidade e cinco doses de fósforo. Os tratamentos, com quatro repetições, foram dispostos em blocos casualizados. Como unidade experimental, foram utilizados anéis de PVC com 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro interno, com um volume útil de 360 cm³, que serviram como câmara de difusão (Figura 2).

As doses de fósforo corresponderam a 0, 25, 50, 75 e 100% da capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos (Quadro 2), e os níveis de umidade, a 10, 20, 40, 60, 70, 80, 90 e 100% da porosidade total dos solos (Quadro 3).

O fósforo foi aplicado ao solo via solução, utilizando-se como fonte o fosfato de potássio monobásico (KH₂PO₄). As amostras foram acondicionadas em sacos de plástico e incubadas por um período de 15 dias, com o teor de água do solo elevado a 80% da capacidade de campo, com a finalidade de promover o equilíbrio do elemento com o solo. Decorrido esse período, as amostras foram secadas, destorroadas, passadas em peneira de malha de 2 mm de abertura e transferidas para a câmara de difusão. Os anéis de PVC tiveram o fundo fechado com lâmina de isopor de 1,2 cm de espessura, fixada com fita de polietileno, e, após receberem os tratamentos, foram cobertos com plástico, para evitar perda de água (VILLANI, 1995).

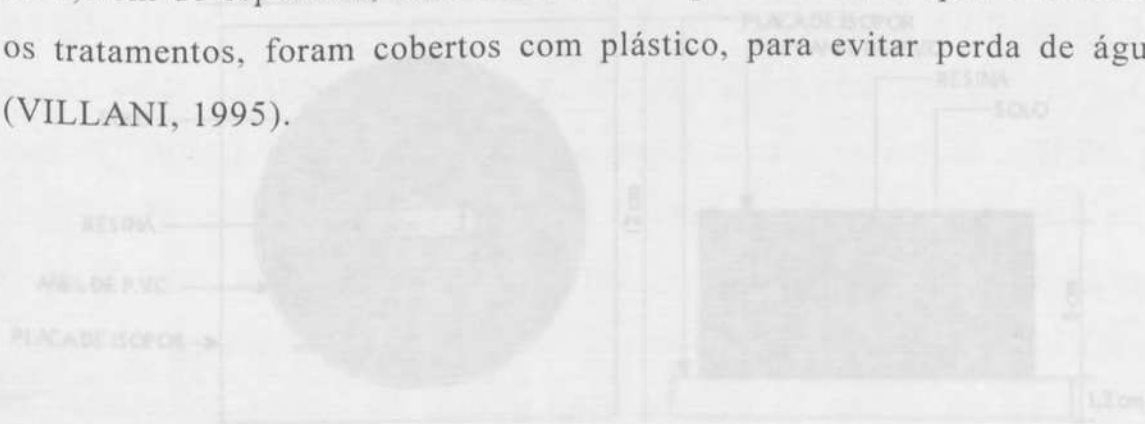


Figura 2 - Esquema da câmara de difusão (anel de PVC) com a resina trocadora de cátions.

Quadro 2 - Dados da distribuição de íons de cálcio

Nível da Difusão ¹	LE ₁	LV ₁	LE ₂	LV ₂	LE ₃
0	0	0	0	0	0
25	94	188	278	392	293
50	189	372	556	585	586
75	293	558	874	878	879
100	392	792	1112	1179	1172

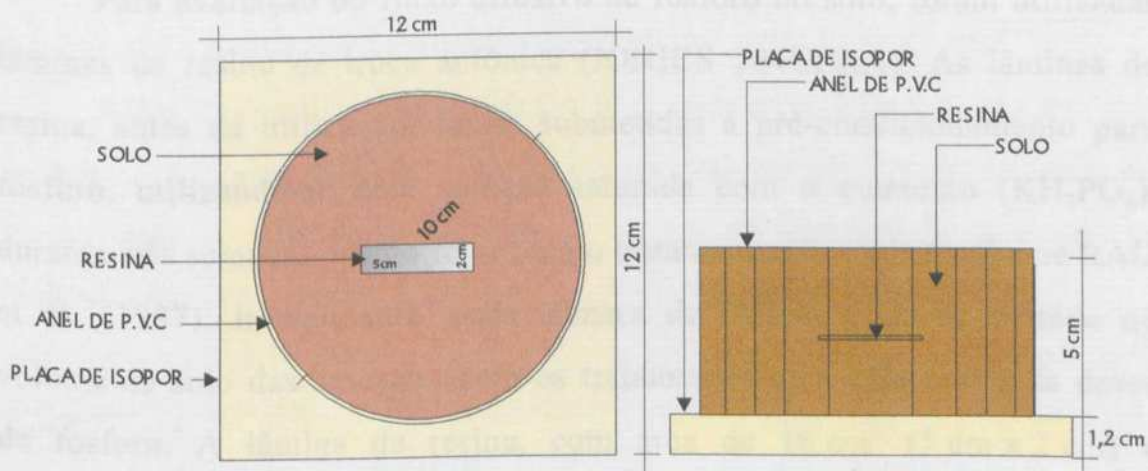
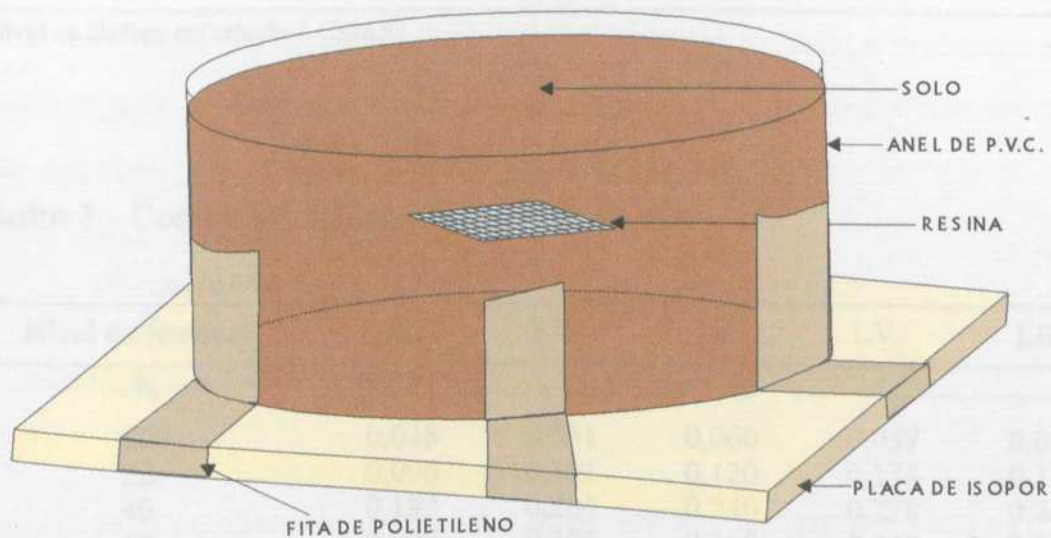


Figura 2 - Esquema da câmara de difusão (anel de PVC) com a resina trocadora de cátions.

Quadro 2 - Doses de fósforo aplicadas nos solos

Nível de fósforo ^{1/}	LE ₁	LV ₁	LR	LV ₂	LE ₂
%	mg dm ⁻³ de P				
0	0	0	0	0	0
25	99	186	278	292	293
50	199	372	556	585	586
75	299	558	834	878	879
100	399	744	1112	1170	1172

^{1/} Nível de fósforo em relação à CMAP.

Quadro 3 - Conteúdos de água aplicados nos solos

Nível de fósforo ^{1/}	LE ₁	LV ₁	LR	LV ₂	LE ₂
%	cm ⁻³ cm ⁻³				
10	0,048	0,051	0,060	0,057	0,062
20	0,096	0,101	0,120	0,114	0,124
40	0,192	0,204	0,240	0,228	0,248
60	0,288	0,306	0,360	0,342	0,372
70	0,336	0,357	0,420	0,399	0,434
80	0,384	0,408	0,480	0,456	0,496
90	0,432	0,459	0,540	0,513	0,558
100	0,480	0,510	0,600	0,570	0,620

^{1/} Referente à porosidade total do solo.

Para avaliação do fluxo difusivo de fósforo no solo, foram utilizadas lâminas de resina de troca aniônica (IONICS 204UZRA). As lâminas de resina, antes da utilização, foram submetidas a pré-condicionamento para fósforo, utilizando-se uma solução saturada com o elemento (KH₂PO₄), durante três semanas, sendo feito todo o tratamento para uso conforme RAIJ et al. (1987). Inicialmente, cada câmara de difusão recebeu metade do volume de solo das amostras com os tratamentos correspondentes às doses de fósforo. A lâmina de resina, com área de 10 cm² (5 cm x 2 cm) e espessura de 0,57 mm, foi disposta horizontalmente e o volume restante do solo foi colocado na câmara. Os tratamentos referentes aos níveis de

umidade foram, então, aplicados. Para os tratamentos correspondentes aos níveis de umidade mais baixos, aplicou-se a água e promoveu-se uma homogeneização do solo em saco plástico antes de levá-lo à câmara de difusão; para os níveis mais elevados, a água foi aplicada diretamente na câmara de difusão. Nestes tratamentos, houve necessidade da vedação do anel com isopor, com cola, para evitar vazamento de água.

O trabalho foi conduzido em condições de laboratório, com temperatura controlada a $25 \pm 3^\circ\text{C}$ por 15 dias. Após esse período, as lâminas foram retiradas e lavadas com jato de água, para remoção do solo aderido, e o excesso de água foi retirado com papel-filtro.

2.3. Avaliação do fluxo difusivo

O fósforo adsorvido à resina de troca aniônica forneceu uma estimativa do fósforo disponível para as plantas. O fósforo adsorvido pela lâmina de resina foi extraído pela agitação da membrana com 50 mL de uma solução de NH_4Cl $0,8 \text{ mol L}^{-1}$ + HCl $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ durante uma hora, em agitador horizontal a 270 rotações por minuto, utilizando metodologia descrita por RAIJ et al. (1987). A concentração de fósforo foi determinada segundo BRAGA e DEFELIPO (1974). A estimativa da difusão (fluxo difusivo) foi realizada pela quantificação do fósforo adsorvido às lâminas, que correspondeu ao fósforo que atingiu a resina por centímetro quadrado no período de 15 dias.

Além das análises de variância para cada solo, foram feitas análises de regressão, ajustando-se equações para valores de fluxo difusivo de fósforo como variável dependente de níveis de umidade e de doses de fósforo. Quando se adicionou fósforo ao solo, o fluxo difusivo aumentou com o acréscimo de $\delta c/\delta x$, e o coeficiente de difusão apresentou maior valor, como consequência do aumento de $\delta U/\delta Q$. Essa diferencial, que é uma medida do inverso do fator capacidade de P do solo ($\delta Q/\delta I$), representa o gradiente de concentração de P na eq.2, que é necessário para a ocorrência do fluxo difusivo.

Quadro 4 - Fluxo difusivo (FD) em mg m⁻² h⁻¹ em solos influenciados por níveis de umidade e por níveis de fósforo.

Solo	Nível de umidade	Nível de fósforo		
		0	75	100
LV	10	0,1475	0,1354	0,1907
	20	0,2144	0,2145	0,6072
	30	0,2161	0,6192	0,9262
	40	0,6128	0,2210	1,2048
	50	0,2761	0,3133	1,5121
LV ₂	10	0,2125	1,0650	1,3755
	20	1,2020	1,2520	2,2415
	30	1,2020	1,5635	2,0891
	40	0,0161	0,0244	0,0762
	50	0,0851	0,1531	0,3022
LV ₃	10	0,3123	0,2000	1,6782
	20	0,0855	1,2987	1,2093
	30	1,3123	1,2933	4,2911
	40	1,4418	1,9210	4,6549
	50	2,8174	4,5033	5,1828
LV ₄	10	1,7048	1,2627	3,9494
	20	0,0115	0,0210	0,6110
	30	0,0024	0,0104	0,0222

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fósforo adsorvido à resina de troca aniônica forneceu uma estimativa do fluxo difusivo (FD) deste elemento no solo, de modo que o esquema experimental mostrou-se apropriado aos objetivos propostos no trabalho. De modo geral, o FD aumentou com as doses de fósforo e com os conteúdos de água utilizados nos cinco solos estudados (Quadro 4). O tratamento com a maior dose de fósforo e o maior conteúdo de água foi o que promoveu o maior valor de FD em todos os solos. Quanto mais fósforo disponível no solo, maior será o gradiente de concentração deste elemento e, conseqüentemente, o FD. Como a água é o meio através do qual a difusão ocorre, esta aumentará com o teor de água no solo. Quando se fixa $\delta C/\delta x$ na eq.1, o FD passa a ser função do coeficiente de difusão do nutriente no solo, que, por sua vez, está relacionado ao coeficiente de difusão do elemento na água, ao conteúdo volumétrico de água, ao fator de impedância e ao inverso do fator capacidade ($\delta I/\delta Q$). Quando se adicionou fósforo ao solo, o FD aumentou com o acréscimo de $\delta c/\delta x$, e o coeficiente de difusão apresentou maior valor, como conseqüência do aumento de $\delta I/\delta Q$. Essa diferencial, que é uma medida do inverso do fator capacidade de P do solo ($\delta Q/\delta I$), representa o gradiente de concentração de P na eq.2, que é necessário para a ocorrência do fluxo difusivo.

Quadro 4 - Fluxo difusivo de fósforo nos solos influenciado por níveis de umidade e por níveis de fósforo

Solo	Nível de umidade ^{1/}	Nível de fósforo ^{2/}				
		0	25	50	75	100
	%	μmol cm ⁻² /15 dias				
LE ₁	10	0,0000	0,0143	0,1077	0,1556	0,1907
	20	0,0029	0,1674	0,4169	0,5169	0,6077
	40	0,0072	0,2427	0,5161	0,6492	0,9242
	60	0,0087	0,2960	0,6129	0,7230	1,2940
	70	0,0087	0,4423	0,8161	0,8133	1,5121
	80	0,0115	0,5077	0,9129	1,0690	1,8758
	90	0,0132	0,5952	0,9020	1,2520	2,0415
	100	0,0131	0,6399	1,1468	1,5835	2,0891
LV ₁	10	0,0015	0,0147	0,0161	0,0548	0,0762
	20	0,0029	0,1190	0,0891	0,1831	0,5089
	40	0,0058	0,3778	0,3133	0,9008	1,9782
	60	0,0072	0,6355	0,6956	2,5887	3,2093
	70	0,0072	0,6544	1,3327	3,1935	4,2911
	80	0,0129	0,8218	2,4948	3,9210	4,6649
	90	0,0161	0,9198	2,8379	4,5633	5,1988
	100	0,0145	1,1983	3,7048	5,2827	5,9484
LR	10	0,0015	0,0057	0,0113	0,0210	0,0210
	20	0,0058	0,0207	0,0626	0,0306	0,0722
	40	0,0101	0,0915	0,0996	0,0617	0,1343
	60	0,0115	0,1105	0,1145	0,1125	0,1988
	70	0,0118	0,1681	0,2133	0,1427	0,4282
	80	0,0133	0,2101	0,3000	0,3649	0,5633
	90	0,0308	0,2899	0,3798	0,4992	0,7573
	100	0,0274	0,3355	0,4153	0,6044	0,7565
LV ₂	10	0,0015	0,0161	0,0307	0,0641	0,1129
	20	0,0044	0,0637	0,0863	0,2177	0,2815
	40	0,0085	0,1451	0,3726	0,7060	0,8984
	60	0,0085	0,2742	0,4230	0,8371	0,9988
	70	0,0113	0,3581	0,5206	0,9794	1,1984
	80	0,0131	0,3492	0,8786	1,1823	1,4077
	90	0,0226	0,5093	0,9746	1,2472	1,5806
	100	0,0177	0,6403	1,1435	1,6863	1,7238
LE ₂	10	0,0044	0,0044	0,0085	0,0145	0,0210
	20	0,0058	0,0226	0,0774	0,1355	0,1685
	40	0,0058	0,0673	0,1185	0,2718	0,2629
	60	0,0099	0,0974	0,1698	0,3222	0,3129
	70	0,0099	0,1327	0,1976	0,4726	0,4867
	80	0,0145	0,1556	0,2431	0,5339	0,5613
	90	0,0226	0,2262	0,2992	0,5845	0,6327
	100	0,0226	0,2702	0,3302	0,5942	0,7419

1/ Referente à porosidade total do solo.

2/ Referente à CMAP do solo.

A alteração do conteúdo volumétrico de água influenciou o fator de impedância, pela diminuição da tortuosidade, e, conseqüentemente, alterou o valor do coeficiente de difusão e do FD em todos os solos, reduzindo-o significativamente nos níveis de umidade mais baixos. No entanto, observou-se que, nos solos com alto fator capacidade de fósforo, o FD sofreu restrições mesmo com doses de P e conteúdos de água elevados. Segundo NOVAIS e SMYTH (1998), nos solos com elevado fator capacidade de P, a relação $\delta I/\delta Q$ pode permanecer constante para as doses de P normalmente aplicadas, já que a relação entre I e Q é linear para essas doses de P usadas como fertilizante nesses solos. Não havendo alterações em $\delta I/\delta Q$, o coeficiente de difusão também não será alterado.

3.1. Efeito das doses de fósforo no fluxo difusivo

Houve aumento do FD de fósforo em todos os solos com o incremento da dose deste elemento nos níveis de umidade utilizados (Quadros 4 e 5). Quando se aumentou a dose de fósforo aplicada ao solo, ocorreu aumento do coeficiente de difusão do elemento, devido à saturação progressiva da superfície de adsorção, o que resultou no aumento da concentração de fósforo na solução do solo, semelhantemente às observações de MAHTAB et al. (1971). Como na equação de difusão o componente $\delta C_1/\delta C$ está diretamente relacionado com o coeficiente de difusão, maiores valores dessa diferencial induzem maior gradiente de fósforo, que ocorre com maior intensidade em solos arenosos que apresentam menor adsorção (maior $\delta C_1/\delta C$). De acordo com GUNARY e SUTTON (1967), o aumento do grau de saturação da superfície adsorvente, ocasionado pelo incremento da dose de fósforo aplicada, implica redução da energia de ligação de fósforo com a superfície e, conseqüentemente, maior quantidade de fósforo ligada com menor energia. Com baixa saturação da superfície adsorvente, o fósforo é firmemente retido; assim, menor quantidade de fósforo estará na forma lábil.

Quadro 5 - Equações de regressão relacionando o fluxo difusivo de fósforo ($\mu\text{mol cm}^{-2}/15$ dias) com as doses de fósforo nos diversos níveis de umidade, dentro dos solos utilizados

Solo	Nível de umidade (%) ^{1/}	Equação	R ²
LE ₁	10	Y = 0,09366	
	20	Y = 0,002887 X ^{**0,906861}	0,998
	40	Y = 0,006987 X ^{**0,801158}	0,998
	60	Y = 0,008396 X ^{**0,805276}	0,995
	70	Y = 0,008805 X ^{**0,838813}	0,995
	80	Y = 0,011358 X ^{**0,826732}	0,997
	90	Y = 0,013159 X ^{**0,817374}	0,998
	100	Y = 0,013063 X ^{**0,844926}	0,999
LV ₁	10	Y = 0,001275 X ^{**0,538395}	0,899
	20	Y = 0,002776 X ^{**0,692369}	0,944
	40	Y = 0,005441 X ^{**0,804177}	0,959
	60	Y = 0,006701 X ^{**0,888372}	0,976
	70	Y = 0,006602 X ^{**0,940485}	0,990
	80	Y = 0,012018 X ^{**0,887920}	0,991
	90	Y = 0,014963 X ^{**0,872522}	0,989
	100	Y = 0,013835 X ^{**0,918152}	0,994
LR	10	Y = 0,001301 X ^{**0,362623}	0,897
	20	Y = 0,005454 X ^{**0,317105}	0,832
	40	Y = 0,010593 X ^{**0,337005}	0,913
	60	Y = 0,011635 X ^{**0,375077}	0,973
	70	Y = 0,011796 X ^{**0,452918}	0,934
	80	Y = 0,012970 X ^{**0,508359}	0,993
	90	Y = 0,029654 X ^{**0,425521}	0,984
	100	Y = 0,026816 X ^{**0,457134}	0,994
LV ₂	10	Y = 0,001262 X ^{**0,552342}	0,925
	20	Y = 0,003953 X ^{**0,549679}	0,952
	40	Y = -0,0419695 + 0,000799523**X	0,983
	60	Y = 0,008099 X ^{**0,655898}	0,989
	70	Y = 0,010801 X ^{**0,642467}	0,991
	80	Y = 0,012372 X ^{**0,654856}	0,988
	90	Y = 0,021775 X ^{**0,591711}	0,995
	100	Y = 0,017440 X ^{**0,655279}	0,998
LE ₂	10	Y = 0,003703 X ^{**0,164508}	0,470
	20	Y = 0,004873 X ^{**0,437952}	0,839
	40	Y = 0,005289 X ^{**0,524808}	0,956
	60	Y = 0,009213 X ^{**0,479747}	0,967
	70	Y = 0,009126 X ^{**0,531206}	0,962
	80	Y = 0,013335 X ^{**0,497103}	0,959
	90	Y = 0,021305 X ^{**0,454265}	0,973
	100	Y = 0,021532 X ^{**0,469676}	0,980

^{1/} Referente à porosidade total do solo.

** : Significativo a 1% pelo teste F.

Comparando os cinco solos, verifica-se que o maior valor de fluxo difusivo (FD) ocorreu na maior dose de fósforo aplicada (744 mg dm^{-3} de P), correspondente a uma vez a CMAP, no LV_1 associado com o mais alto nível de umidade. Observa-se que os valores de FD foram muito baixos quando o fósforo não foi aplicado, principalmente nos níveis de umidade mais baixos. Acréscimos de FD muito maiores foram verificados entre os níveis 1 (0% da CMAP) e 2 (25% da CMAP) de fósforo do que entre os níveis 4 (75% da CMAP) e 5 (100% da CMAP), em todos os solos. Para as condições de umidade com 100% dos poros ocupados com água, o FD no LE_1 , com a dose mais elevada de fósforo (399 mg dm^{-3} de P), correspondeu a, praticamente, três vezes o valor observado no LE_2 , com uma dose de 1.172 mg dm^{-3} de P (Quadro 4). Para o LV_1 (744 mg dm^{-3} de P), o FD foi mais de oito vezes superior ao encontrado no LE_2 , o que reflete a diferença no fator capacidade de P destes solos, motivada pela textura e mineralogia dos mesmos. Nesse nível de umidade, também pode ser observado que, quando a dose de fósforo é duplicada (de 99 mg dm^{-3} para 199 mg dm^{-3} de P), no LE_1 , a difusão aumenta mais do que quando se dobra a dose no LE_2 (de 293 mg dm^{-3} para 586 mg dm^{-3} de P), para o mesmo nível de umidade, o que indica maior efetividade do aumento da dose de fósforo no FD no solo mais arenoso. VILLANI et al. (1993) encontraram comportamento semelhante, trabalhando com solos de diferentes texturas submetidos a doses de fósforo e níveis de umidade.

Os aumentos mais acentuados do FD nos solos mais arenosos, quando se aumentam as doses de P, comparados com os menores acréscimos nos solos mais argilosos, a despeito de estes receberem doses bem mais elevadas, mostram que pequenas alterações no fator intensidade são conseguidas com altas doses de P nos solos argilosos. Segundo NOVAIS e SMYTH (1998), em razão de o fator capacidade desses solos ser tão elevado, só se conseguem pequenas alterações no P na solução do solo com aplicação de doses muito elevadas de P, que já não são mais econômicas.

De modo geral, os solos mais arenosos apresentaram maior FD do que os solos de textura mais argilosa, o que era esperado, uma vez que a resistência dos solos arenosos a mudanças no fator intensidade de P é menor do que a dos solos argilosos. No entanto, neste trabalho, o LV₁, com 33 dag kg⁻¹ de argila e CMAP de 744 mg dm⁻³ P, apresentou maior fluxo difusivo que o LE₁, com 13 dag kg⁻¹ de argila e CMAP de 399 mg dm⁻³ P. Comportamento semelhante foi verificado entre o LV₂ e o LR, tendo o primeiro, com maior teor de argila, apresentado maior FD que o segundo. Isto pode estar relacionado com a menor "energia de adsorção" (Quadro 1) verificada para o LV₁ e o LV₂, a despeito de apresentarem maior CMAP que o LE₁ e o LR. Para HOLFORD e MATTINGLY (1976) e HOLFORD (1980), solos com maior "energia de adsorção" convertem facilmente fósforo lábil em não-lábil, diminuindo, portanto, sua disponibilidade. Ao combinarem-se essas duas características de sorção de P, tem-se a capacidade tampão máxima (proposta por HOLFORD e MATTINGLY, 1976), denominada por NOVAIS e SMYTH (1998) Fator Capacidade de P Máximo (FCP_{máx.}), dos solos estudados, chegando-se aos de valores 346 mL g⁻¹, 431 mL g⁻¹, 1.063 mL g⁻¹, 769 mL g⁻¹ e 1.453 mL g⁻¹ para LE₁, LV₁, LR, LV₂ e LE₂, respectivamente. O FCP_{máx.} é a curvatura obtida na isoterma de Langmuir, correspondente à diferencial $\delta x/\delta c$ quando c tende para zero. Observa-se que esse índice pode explicar melhor a diferença de FD entre os solos. Na comparação do LE₁ com o LV₁, verifica-se que os valores de FCP_{máx.} dos dois solos são mais próximos do que quando se comparam os valores de CMAP; também o FCP_{máx.} do LV₂ (769 mL g⁻¹) é menor do que o do LR (1.063 mL g⁻¹), o que pode explicar a ocorrência de maior FD no primeiro, a despeito do maior teor de argila e da mais elevada CMAP.

Nos estudos de adsorção e de difusão do fósforo nos solos, além do conhecimento dos teores de argila, é de fundamental importância que se proceda à identificação do mineral e que se tenha informação sobre o

tamanho médio do cristal. Pelos dados obtidos neste trabalho, verificou-se que o FD foi influenciado não apenas pela quantidade de argila, como também, e principalmente, pela qualidade desta.

Os maiores valores de FD, encontrados no LV₂ (Quadro 4) com maior teor de argila, em relação ao LR, parecem encontrar justificativa na ausência de gibbsita no primeiro solo. Na literatura, são encontrados vários trabalhos que mostram a maior influência da goethita e da gibbsita no aumento da adsorção de fósforo em relação a outros minerais. As controvérsias encontradas confirmam a dificuldade de estabelecer conclusões definitivas em relação aos processos de adsorção e dessorção e, conseqüentemente, de difusão do fósforo quando da ocorrência desses minerais no solo. BAHIA FILHO (1982), considerando a influência do componente mineralógico na disponibilidade de fósforo no solo, verificou que a goethita foi responsável por 97 e 86% das variações observadas na capacidade tampão máxima e na adsorção máxima, respectivamente. Já FERNÁNDEZ R. (1995) encontrou resultados, em extrações sucessivas de fósforo com resina de troca aniônica, que sugerem que seria a gibbsita e não a goethita o óxido responsável pela restrição à dessorção do fósforo.

As equações de regressão que relacionam o fluxo difusivo de fósforo com as doses deste elemento nos cinco solos encontram-se no Quadro 5. O modelo matemático de melhor ajuste aos dados experimentais correspondeu à equação potencial, indicando que, ao contrário do que se esperava pela equação do coeficiente de difusão de fósforo (eq.2), a relação entre $\delta I/\delta Q$ e o coeficiente de difusão nem sempre é linear, direta. O FD elevou-se de forma curvilínea em todos os solos. No menor nível de umidade, no LE₁, nenhum modelo se ajustou aos dados.

3.2. Influência do conteúdo volumétrico de água no fluxo difusivo

A difusão de um íon no solo está diretamente relacionada com o conteúdo volumétrico de água, conforme expressado na própria equação do coeficiente de difusão (eq.2), uma vez que essa umidade determina a fração da área ou o volume de solo em que ocorre o fluxo difusivo. Uma maneira indireta de a água afetar o coeficiente de difusão seria sua influência no fator de impedância (NYE, 1979; BARRACLOUGH e TINKER, 1981). A principal hipótese deste trabalho foi que a relação direta, linear, entre o conteúdo volumétrico de água do solo e o coeficiente de difusão do fósforo no solo nem sempre se verifica, sendo variável com o solo.

Quando o conteúdo de água foi elevado, o FD de fósforo aumentou em todas as doses de fósforo, em todos os solos, sendo a magnitude da resposta diferente entre os solos (Quadros 4 e 6). Mesmo quando não se adicionou fósforo ao solo, ainda se observou FD crescente com os níveis de umidade, com exceção do LE_1 na dose zero de fósforo, onde os valores de FD, no menor nível de umidade, não atingiram o mínimo necessário para permitir detecção pelos métodos analítico e instrumental utilizados. Na literatura, são encontradas referências propondo aumentar a dose de fósforo para compensar um menor teor de água ou vice-versa. RUIZ (1986) refere-se à possibilidade de diminuição das doses de fósforo com o acréscimo do conteúdo de umidade do solo, de modo a manter o FD. Já MAHTAB et al. (1971, 1972), considerando a relação entre o teor de fósforo e o conteúdo de água do solo, sugerem o aumento da quantidade de fósforo para compensar a diminuição do teor de água, visando à manutenção da difusão.

Quadro 6 - Equações de regressão relacionando o fluxo difusivo de fósforo com os conteúdos de água nos diversos níveis de fósforo, dentro dos solos utilizados

Solo	Nível de umidade (%) ^{1/}	Equação	R ²
	0	Y = 0,008162	
LE ₁	25	Y = -0,024386 + 1,37437**X	0,968
	50	Y = 0,100203 + 2,05223**X	0,946
	75	Y = 2,465188 **X ^{0,83642}	0,912
	100	Y = 0,0748781 + 4,40428**X	0,985
LV ₁	0	Y = 0,027697 **X ^{0,99978}	0,957
	25	Y = 4,412777 **X ^{1,76660}	0,960
	50	Y = 15,759412 **X ^{2,32678}	0,988
	75	Y = 24,459637 **X ^{2,06820}	0,995
	100	Y = 25,753129 **X ^{1,83539}	0,973
LR	0	Y = 0,042482 **X ^{1,11805}	0,904
	25	Y = 0,793595 **X ^{1,72657}	0,989
	50	Y = 0,789527 **X ^{1,42721}	0,944
	75	Y = 0,803304 **X ^{1,45578}	0,877
	100	Y = 1,541246 **X ^{1,53860}	0,964
LV ₂	0	Y = 0,033526 **X ^{1,04268}	0,946
	25	Y = - 0,0832410 + 1,1280**X	0,991
	50	Y = 2,673485 **X ^{1,55127}	0,983
	75	Y = 3,544247 **X ^{1,33349}	0,976
	100	Y = 3,622405 **X ^{1,17184}	0,979
LE ₂	0	Y = 0,023400 **X ^{0,68381}	0,790
	25	Y = 0,579676 **X ^{1,68215}	0,985
	50	Y = 0,701736 **X ^{1,39544}	0,915
	75	Y = -0,0166652 + 1,0509**X	0,973
	100	Y = -0,0384511 + 1,1996**X	0,967

^{1/} Referente à CMAP dos solos.

** : Significativo a 1% pelo teste F.

Observaram-se maiores valores de FD nos solos mais arenosos. Nestes solos, o transporte de fósforo é favorecido, em comparação com os solos mais argilosos, com maior FCP_{max} . A elevada adsorção de fósforo destes últimos provoca diminuição do FD, que pode chegar a praticamente paralisar em conteúdos de água ainda elevados. A quantidade de água aplicada nos solos mais arenosos foi menor do que aquela adicionada aos solos mais argilosos, em todos os tratamentos, pois a água foi aplicada como percentual do volume de poros e a porosidade calculada correspondeu a 48%, 51%, 60%, 57% e 62% para os LE_1 , LV_2 , LR, LV_2 e LE_2 , respectivamente (Quadro 1). De acordo com NYE (1979), os solos argilosos, com menor fator de impedância e maior interação íon-colóide, apresentarão menor coeficiente de difusão para um mesmo conteúdo volumétrico de água. Entretanto, se o potencial for o mesmo, a difusão será maior no solo argiloso, por ter maior conteúdo volumétrico de água para a mesma energia de retenção.

Houve tratamentos (40% e 60% dos poros ocupados com água) em que a água aplicada correspondeu à capacidade de campo ou ficou acima desta, podendo ter ocupado a porosidade total do solo. Nessas condições de saturação, verificou-se que o FD foi superior em todos os níveis de fósforo e em todos os solos (Quadro 4). Com o aumento da umidade acima da capacidade de campo, os acréscimos no FD entre os níveis de umidade foram menores do que os verificados com o aumento do conteúdo de água abaixo da capacidade de campo. Quando se comparam os níveis de umidade 1 (10% dos poros ocupados com água) e 2 (20% dos poros ocupados com água) nos vários solos, verifica-se que os aumentos de FD foram mais pronunciados do que entre os níveis 7 (90% dos poros ocupados com água) e 8 (100% dos poros ocupados com água). Por exemplo, o FD foi 3,2; 6,7; 3,4; 2,5 e 8,0 vezes superior no nível de umidade 2, em relação ao nível de umidade 1, nos LE_1 , LV_1 , LR, LV_2 e LE_2 , respectivamente, para a maior dose de fósforo testada. Nos níveis de umidade 7 e 8, os valores foram

muito próximos para os mesmos solos e dose de fósforo, verificando-se maiores aumentos quando se passa do nível 1 para o nível 2 de umidade do que quando se comparam os níveis 7 e 8 de umidade.

Comparando os níveis 1 e 8 de umidade nos vários solos, registraram-se acréscimos do FD em todas as doses de fósforo. Na maior dose de fósforo testada, os aumentos de FD deste elemento, quando se comparam os níveis 1 e 8 de umidade, foram de 10,95; 78,10; 36,00; 15,30 e 35,30 vezes nos LE₁, LV₁, LR, LV₂ e LE₂, respectivamente.

As equações de regressão que relacionam o fluxo difusivo de fósforo com os conteúdos de água nos cinco solos encontram-se no Quadro 6. As equações ajustadas foram predominantemente potenciais, indicando que, ao contrário do que se esperava pela equação do coeficiente de difusão de fósforo (eq.2), a relação direta, linear, entre o conteúdo volumétrico de água do solo e o coeficiente de difusão não é sempre verificada. O FD elevou-se de forma curvilínea em todos os solos com o acréscimo do conteúdo volumétrico de água, o que apóia a hipótese de não-proporcionalidade entre o conteúdo volumétrico de água e o coeficiente de difusão de fósforo no solo. Na dose zero de fósforo, no LE₁, nenhum modelo se ajustou aos dados.

Na literatura, os trabalhos que relacionam a umidade do solo com a difusão são mais freqüentes com teores de água variando numa faixa desde conteúdos de água muito baixos até a capacidade de campo, dando-se menos ênfase a condições de umidade que chegam à saturação. Pelos dados deste trabalho, verificou-se que, mesmo em condições de saturação, o FD de fósforo ainda aumentou. O aumento da disponibilidade de fósforo em solos inundados tem sido encontrado em vários trabalhos (MORAES, 1973; BASU, 1977; KHALID et al., 1977; MELLO, 1991). GUNARY e SUTTON (1967) referem-se às alterações dos fatores capacidade e intensidade e à difusão como responsáveis pelo suprimento de fósforo às raízes em solos inundados.

TURNER e GILLIAM (1976) atribuíram o maior suprimento de P para arroz ao aumento da difusão deste elemento em solos inundados. Os autores observaram acréscimos de até dez vezes no coeficiente de difusão de P quando os solos foram saturados em relação aos níveis de umidade mais baixos, sendo pouco pronunciados os aumentos de fluxo difusivo nos solos de textura mais fina e baixos teores de fósforo. Esses resultados são concordantes com os deste trabalho, no qual foram encontrados os maiores valores de FD nos conteúdos de água mais elevados e nos solos onde o fator capacidade foi menor.

O efeito interativo das doses de fósforo e dos conteúdos de água produziram alterações diferentes no FD de fósforo, nos cinco solos estudados (Quadro 7). A significância dessa interação mostra a importância da combinação adequada de doses de fósforo e teor de água no transporte deste nutriente no solo.

Quando foram fixados a dose de fósforo em 390 mg dm^{-3} de P e o conteúdo de água correspondente à capacidade de campo nos cinco solos, para evidenciar a importância da argila, do P remanescente (P_{rem}), da CMAP, da EAP e do $\text{FCP}_{\text{máx}}$ no FD de fósforo, foram verificadas correlações significativas entre estas características dos solos e o FD, sendo negativas para argila, CMAP, EAP e $\text{FCP}_{\text{máx}}$ e positiva para P_{rem} (Quadro 8). Como as doses de fósforo testadas foram diferentes em função das CMAP dos vários solos, optou-se por fixar a dose em 390 mg dm^{-3} de P, em virtude de ser comum a todos os solos; e o conteúdo de água foi fixado no teor correspondente à capacidade de campo.

Quadro 7 - Análise de variância dos dados de fluxo difusivo de fósforo nos cinco solos submetidos a níveis de umidade (NU) e níveis de fósforo (NP)

F.V.	G.L.	Q.M.
Bloco	3	0,598710**
Solo (S)	4	50,220160**
Umidade (U)	7	18,519080**
Fósforo (P)	4	40,723900**
S vs U	28	3,797190**
S vs P	16	7,909900**
P vs U	28	2,186290**
S vs U vs P	112	0,586070**
Resíduo	597	0,102429

** : Significativo a 1% pelo teste F.

Quadro 8 - Coeficientes de correlação linear simples entre algumas características do solo e o fluxo difusivo de fósforo dos cinco solos, na dose de $390 \text{ mg dm}^{-3} \text{ P}^{1/}$ e na capacidade de campo

	Característica do solo				
	Argila	P_{rem}	CMAP	EAP	FCP _{max.}
	r				
FD	-0,807*	0,847*	-0,861*	-0,748*	-0,744*

^{1/} Dose comum a todos os solos.

* : Significativo a 5% pelo teste F.

3.3. pH dos solos após o ensaio

O pH dos solos utilizados após o ensaio (Quadro 9) foi determinado nos tratamentos onde os conteúdos de água aplicados corresponderam aos teores mais próximos da capacidade de campo. Verificou-se que o pH aumentou com o acréscimo das doses de fósforo em todos os solos. Esses resultados podem ser atribuídos à fonte de fósforo, utilizada no trabalho (KH_2PO_4), que apresenta pH elevado. Isto, provavelmente, favoreceu o aparecimento de cargas negativas e as conseqüentes alterações no pH do solo. O caráter alcalino do KH_2PO_4 promoveu a elevação do pH, o que diminuiu a adsorção do fósforo e, conseqüentemente, favoreceu o FD. Os fertilizantes fosfatados apresentam reações distintas quando aplicados ao solo, em razão da sua composição. A característica ácida ou básica da solução saturada que se forma na região de aplicação do fertilizante vai depender do íon acompanhante do fosfato (SAMPLE et al., 1980; FASSBENDER, 1986).

Segundo BARROW (1985), a elevação do pH pode ser entendida, considerando-se que a superfície adsorvente dos óxidos se tornaria mais negativa (abaixamento do PCZ) com a adsorção de ânions fosfato. O aumento da carga negativa promoveria liberação de hidroxilas e bases a elas associadas a partir dessa superfície, que estariam mais livres na solução pela adsorção de cátions (inclusive o H^+).

É importante ressaltar que a elevação do pH ocorreu em todos os solos, porém no LV_1 o acréscimo foi muito inferior ao dos demais solos; e os maiores valores de FD foram encontrados neste solo. Quando se compara o LV_1 com o LR, verifica-se que, enquanto no primeiro solo a aplicação da dose mais elevada de fósforo promoveu acréscimo de 0,34 unidade de pH, no LR o pH aumentou 1,88 unidade. Assim, o aumento do pH, isoladamente, não explicaria o comportamento do processo difusivo de fósforo nos solos estudados.

Quadro 9 - Valor de pH em H₂O (1:2,5) dos solos utilizados no final do experimento, nos vários níveis de fósforo e conteúdos de água (θ) próximos à capacidade de campo

Solo	Conteúdo de água (cm ³ cm ⁻³)	pH original	pH				
			Nível de fósforo ^{1/}				
			0	25	50	75	100
LE ₁	0,192	5,40	5,40	5,76	6,37	6,45	6,70
LV ₁	0,204	5,10	5,10	5,47	5,15	5,29	5,44
LR	0,240	4,70	4,70	5,75	5,93	6,16	6,58
LV ₂	0,342	5,20	5,20	5,15	5,56	5,48	5,83
LE ₂	0,372	4,70	4,70	5,21	5,15	5,27	5,83

^{1/} % da CMAP.

Avallaram-se os efeitos do conteúdo volumétrico de água e de doses de fósforo no fluxo difusivo (FD) deste elemento no solo, em amostras da camada superficial de cinco Latossolos.

O experimento consistiu do arranjo fatorial 5 x 8 x 5, correspondendo, respectivamente, a cinco solos, oito níveis de umidade e cinco doses de fósforo, dispostos em blocos ao acaso, com quatro repetições. As doses de fósforo foram equivalentes a 0, 25, 50, 75 e 100% da capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos, e os níveis de umidade, a 10, 20, 40, 60, 70, 80, 90 e 100% da porosidade total das amostras dos solos. Como unidade experimental, foram utilizados anéis de PVC com 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro interno, com volume útil de 360 cm³, que serviram como câmara de difusão.

Para avaliação do FD de fósforo no solo, foram colocadas lâminas de resina de troca aniônica (IONICS 204UZRA), horizontalmente, entre duas camadas de solo, nas câmaras de difusão. O trabalho foi conduzido em condições de laboratório, com temperatura controlada a 25 ± 3°C por 15 dias. Após esse período, as lâminas foram retiradas e lavadas com jato de

4. RESUMO E CONCLUSÕES

Avaliaram-se os efeitos do conteúdo volumétrico de água e de doses de fósforo no fluxo difusivo (FD) deste elemento no solo, em amostras da camada superficial de cinco Latossolos.

O experimento consistiu do arranjo fatorial $5 \times 8 \times 5$, correspondendo, respectivamente, a cinco solos, oito níveis de umidade e cinco doses de fósforo, dispostos em blocos ao acaso, com quatro repetições. As doses de fósforo foram equivalentes a 0, 25, 50, 75 e 100% da capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos, e os níveis de umidade, a 10, 20, 40, 60, 70, 80, 90 e 100% da porosidade total das amostras dos solos. Como unidade experimental, foram utilizados anéis de PVC com 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro interno, com volume útil de 360 cm^3 , que serviram como câmara de difusão.

Para avaliação do FD de fósforo no solo, foram colocadas lâminas de resina de troca aniônica (IONICS 204UZRA), horizontalmente, entre duas camadas de solo, nas câmaras de difusão. O trabalho foi conduzido em condições de laboratório, com temperatura controlada a $25 \pm 3^\circ\text{C}$ por 15 dias. Após esse período, as lâminas foram retiradas e lavadas com jato de

água, para remoção do solo aderido. O fósforo adsorvido foi extraído pela agitação da lâmina com 50 mL da solução NH_4Cl $0,8 \text{ mol L}^{-1}$ + HCl $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, durante uma hora, e a sua concentração determinada.

Os níveis de umidade, assim como as doses de fósforo, dentro de cada solo, e a interação desses fatores influenciaram significativamente o FD. Os solos mais arenosos apresentaram maior FD do que os argilosos. Comparando os cinco solos, verificou-se que o maior valor de FD ocorreu na maior dose de fósforo aplicada (744 mg dm^{-3} de P), correspondente a uma vez a CMAP, no LV_1 (com 33 dag kg^{-1} de argila) com mais alto nível de umidade. O FD foi muito baixo, em todos os solos, nos níveis de umidade mais baixos, principalmente quando o solo foi utilizado sem adição de fósforo. O LR (com 49 dag kg^{-1} de argila) e o LE_2 (com 76 dag kg^{-1} de argila) apresentaram os menores valores de FD, mesmo quando foram aplicados a dose mais alta de fósforo e o conteúdo de água mais elevado.

Pelos resultados apresentados, pode-se concluir que o FD foi influenciado pela umidade, pelas doses de fósforo e pelas características físicas, químicas e mineralógicas dos solos e que a resposta aos níveis de fósforo e de umidade não foi linear, como esperado pela equação de difusão.

A fração trocável pode também ser expressa em relação à sua porcentagem na CTC, denominada saturação de potássio, que pode ser utilizada para explicar respostas à adubação potássica, em certos casos, embora ela apenas o valor absoluto de K-trocável (LOPES, 1954).

O potássio, em solos tropicais, apresenta comportamento mais simples do que aquele em solos temperados. Nos solos

CAPÍTULO 2

FLUXO DIFUSIVO DE POTÁSSIO EM SOLOS INFLUENCIADO POR NÍVEIS DE UMIDADE E POR COMPACTAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A ligação aos minerais, sob diferentes forças, permite a adoção de vários critérios para classificar o potássio do solo. TISDALE e NELSON (1975), segundo um critério de disponibilidade para as plantas, classificam o potássio do solo em: relativamente indisponível, lentamente disponível e prontamente disponível. RITCHEY (1982), conforme um critério mais químico, classifica-o em potássio estrutural, potássio temporariamente fixado entre as camadas de argilas 2:1, potássio trocável e potássio presente na solução do solo.

A forma trocável pode também ser expressa em relação à sua percentagem na CTC, denominada saturação de potássio, que pode ser utilizada para explicar respostas à adubação potássica, em certos casos, melhor que apenas o valor absoluto de K-trocável (LOPES, 1984).

O potássio, em solos tropicais, apresenta comportamento aparentemente mais simples do que aquele em solos temperados. Nos solos

com predominância de matéria orgânica, caulinita e óxidos de ferro e de alumínio como materiais responsáveis pela capacidade de troca de cátions, o potássio trocável representa também o disponível do elemento. Nos solos temperados, esse teor é dependente do potássio não-trocável e existem minerais que fixam o elemento entre suas camadas.

No que concerne ao mecanismo de suprimento às raízes, o potássio apresenta semelhança com o fósforo, pelo fato de ambos serem transportados por difusão até a zona de absorção. No entanto, os teores de potássio na solução do solo podem atingir concentrações elevadas, conferindo-lhe maior mobilidade em relação ao fósforo.

BARBER (1974) refere-se à difusão como o principal mecanismo de transporte do potássio da solução do solo para as raízes das plantas, responsável por 86% do seu suprimento, com o fluxo de massa e a interceptação radicular representando 11 e 3%, respectivamente. No Brasil, trabalhando com diferentes solos do Rio Grande do Sul, VARGAS (1982) verificou que o mecanismo de difusão contribuiu com 72 a 95% do suprimento de potássio para a cultura do milho.

O aumento do conteúdo volumétrico de água no solo reduz a tortuosidade do caminho de difusão. Esse aumento na espessura do filme de água no interior dos poros aumenta o fator de impedância e, conseqüentemente, o fluxo difusivo. A difusão e a absorção de potássio são favorecidas pela manutenção de alta concentração deste nutriente na solução do solo e pela ausência de impedimentos físico e químico.

Um dos problemas que vêm sendo motivo de preocupação dos pesquisadores é a compactação do solo. Os danos causados por esse fenômeno são bem conhecidos, uma vez que afetam significativamente e de maneira negativa o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

A compactação do solo afeta negativamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas, visto que os mecanismos de fluxo de massa e difusão, responsáveis pelo transporte de nutrientes até as raízes, são

processos dependentes da estrutura do solo. Além de alterar os mecanismos pelos quais os nutrientes são transportados no solo, a compactação também pode afetar a quantidade de nutrientes disponíveis.

Alterações na densidade do solo afetam a tortuosidade da trajetória seguida pelo elemento transportado. De acordo com WARNCKE e BARBER (1971), a difusão normalmente aumenta com o aumento da densidade do solo até um determinado valor, diminuindo rapidamente com novos acréscimos. Esses autores observaram que a tortuosidade foi reduzida com o aumento da densidade e a redução do comprimento do caminho da difusão do elemento. Contudo, com densidade superior a $1,3 \text{ g cm}^{-3}$, as partículas sólidas começaram a tornar esse caminho mais tortuoso.

O coeficiente de difusão varia com o conteúdo volumétrico de água, e, quanto mais seco estiver o solo, mais tortuoso será o caminho da difusão. Em água pura, o fator de impedância (f_1) é igual a 1; em solo saturado, aproximadamente 0,4; na capacidade de campo, em torno de 0,2; e próximo ao ponto de murcha, aproximadamente 0,01 (WILD, 1981). MEHTA et al. (1995) consideram a impedância como unitária no caso de solos arenosos com alto conteúdo de umidade e onde a influência das partículas de argila é muito pequena.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o fluxo difusivo de potássio em três solos de texturas distintas, quando submetidos a diferentes níveis de umidade e à compactação, utilizando resina de troca catiônica como dreno.

Quadro 1 - Características químicas e físicas das amostras dos solos utilizadas no experimento

Característica	LE ₁	LR	LE ₂
pH em H ₂ O (1:2,5)	5,4	4,7	4,7
pH em KCl (1:2,5)	4,2	4,1	4,0
Al ³⁺ (cmol, dm ⁻³) ⁽¹⁾	0,75	0,54	1,22
Ca ²⁺ (cmol, dm ⁻³) ⁽²⁾	0,05	0,50	0,94
Mg ²⁺ (cmol, dm ⁻³) ⁽²⁾	0,04	0,20	0,21
H ⁺ -Al (cmol, dm ⁻³) ⁽³⁾	2,20	14,54	
P (mg dm ⁻³) ⁽⁴⁾	0,7	1,9	1,3
K (mg dm ⁻³) ⁽⁴⁾	10	20	23
Carbono orgânico (dag kg ⁻¹) ⁽⁵⁾	0,53	1,70	2,13
CTC efetiva (cmol, kg ⁻¹)	0,87	1,39	2,37
CTC total (cmol, kg ⁻¹)	4,01	7,95	15,75
Capacidade de campo (dag kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	86,2	41,9	51,5
Apêz gravim (dag kg ⁻¹) ⁽⁷⁾	15,4	26,0	36,7
	32	6	9

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização dos solos

O ensaio foi desenvolvido em laboratório, utilizando-se amostras da camada de 0-20 cm de profundidade de três solos, pertencentes às classes: Latossolo Vermelho-Escuro textura média (LE₁), Latossolo Roxo (LR) e Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa (LE₂). As amostras foram secadas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de malha de 2 mm de abertura e homogeneizadas, sendo retiradas subamostras para caracterização física, química e mineralógica (Quadro 1 e Figura 1).

Quadro 1 - Características químicas e físicas das amostras dos solos utilizadas no experimento

Característica	LE ₁	LR	LE ₂
pH em H ₂ O (1:2,5)	5,4	4,7	4,7
pH em KCl (1:2,5)	4,2	4,1	4,0
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	0,75	0,54	1,22
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	0,05	0,50	0,94
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	0,04	0,20	0,21
H+Al (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	3,89	7,20	14,54
P (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	0,7	1,9	1,3
K (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	10	20	23
Carbono orgânico (dag kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	0,53	1,70	2,13
CTC efetiva (cmol _c kg ⁻¹)	0,87	1,29	2,37
CTC total (cmol _c kg ⁻¹)	4,01	7,95	15,75
m (%) ⁽⁵⁾	86,2	41,9	51,5
Capacidade de campo (dag kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	15,4	26,0	36,7
Areia grossa (dag kg ⁻¹) ⁽⁷⁾	32	6	9
Areia fina (dag kg ⁻¹) ⁽⁷⁾	51	25	5
Silte (dag kg ⁻¹) ⁽⁷⁾	4	23	10
Argila (dag kg ⁻¹) ⁽⁷⁾	13	49	76
Densidade aparente (g cm ⁻³) ⁽⁸⁾	1,38	1,22	1,00
Densidade de partículas (g cm ⁻³) ⁽⁹⁾	2,63	3,03	2,63
Porosidade (%)	48	60	62

(1) KCl 1 mol L⁻¹ (VETTORI, 1969).

(2) Extrator CaOAc 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0 (DEFELIPO e RIBEIRO, 1981).

(3) Extrator Mehlich-1.

(4) Método Walkley e Black (JACKSON, 1958).

(5) Saturação com alumínio.

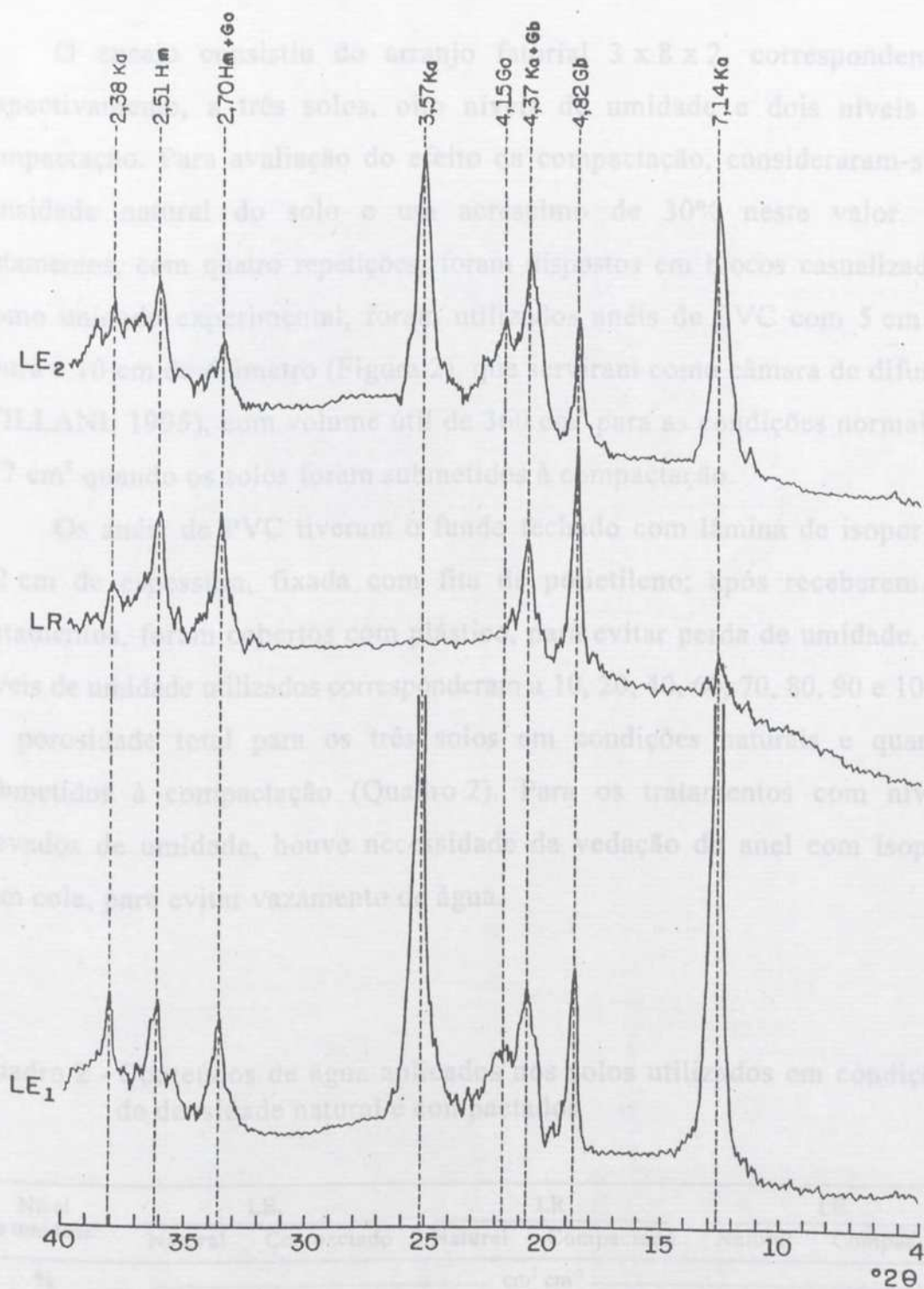
(6) Método da coluna (FERNANDES, 1967).

(7) EMBRAPA, 1979).

(8) Método da proveta (EMBRAPA, 1979).

(9) Método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1979).

2.2. Montagem do experimento



Radiação Cu - K α . Ka - caulinita; Hm - hematita; Go - goethita; Gb - gibbsita.

Figura 1 - Difratoogramas de raios-X da fração argila em lâminas orientadas de amostras dos solos estudados.

2.2. Montagem do experimento

O ensaio consistiu do arranjo fatorial 3 x 8 x 2, correspondendo, respectivamente, a três solos, oito níveis de umidade e dois níveis de compactação. Para avaliação do efeito da compactação, consideraram-se a densidade natural do solo e um acréscimo de 30% neste valor. Os tratamentos, com quatro repetições, foram dispostos em blocos casualizados. Como unidade experimental, foram utilizados anéis de PVC com 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro (Figura 2), que serviram como câmara de difusão (VILLANI, 1995), com volume útil de 360 cm³ para as condições normais e 277 cm³ quando os solos foram submetidos à compactação.

Os anéis de PVC tiveram o fundo fechado com lâmina de isopor de 1,2 cm de espessura, fixada com fita de polietileno; após receberem os tratamentos, foram cobertos com plástico, para evitar perda de umidade. Os níveis de umidade utilizados corresponderam a 10, 20, 40, 60, 70, 80, 90 e 100% da porosidade total para os três solos em condições naturais e quando submetidos à compactação (Quadro 2). Para os tratamentos com níveis elevados de umidade, houve necessidade da vedação do anel com isopor, com cola, para evitar vazamento de água.

Quadro 2 - Conteúdos de água aplicados nos solos utilizados em condições de densidade natural e compactados

Nível de umidade ^{1/} %	LE ₁		LR		LE ₂	
	Natural	Compactado	Natural	Compactado	Natural	Compactado
	cm ³ cm ⁻³					
10	0,048	0,032	0,060	0,047	0,062	0,051
20	0,096	0,064	0,120	0,095	0,124	0,101
40	0,192	0,128	0,240	0,190	0,248	0,202
60	0,288	0,192	0,360	0,284	0,372	0,303
70	0,336	0,224	0,420	0,332	0,434	0,354
80	0,384	0,256	0,480	0,379	0,496	0,404
90	0,432	0,288	0,540	0,426	0,558	0,455
100	0,480	0,320	0,600	0,474	0,620	0,506

^{1/} Referente à porosidade total dos solos.

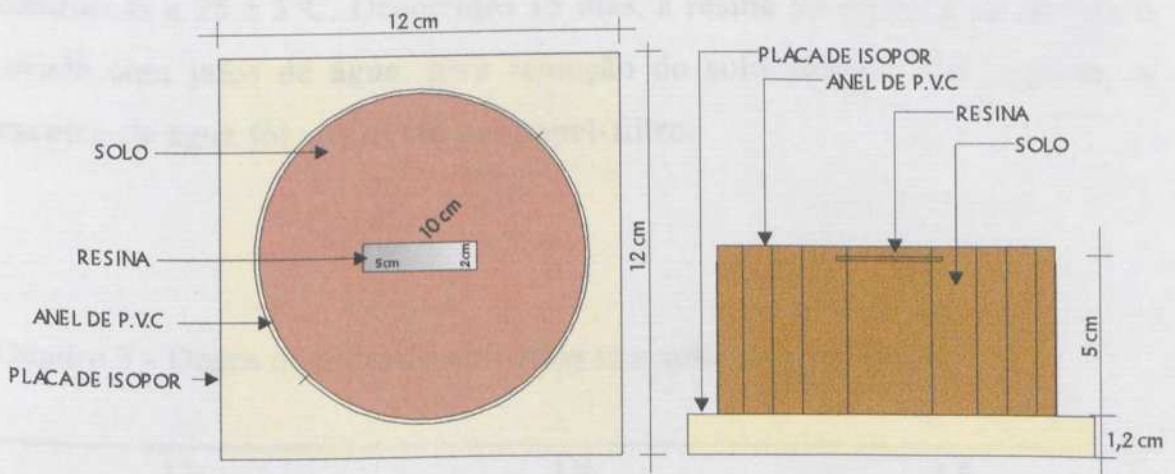
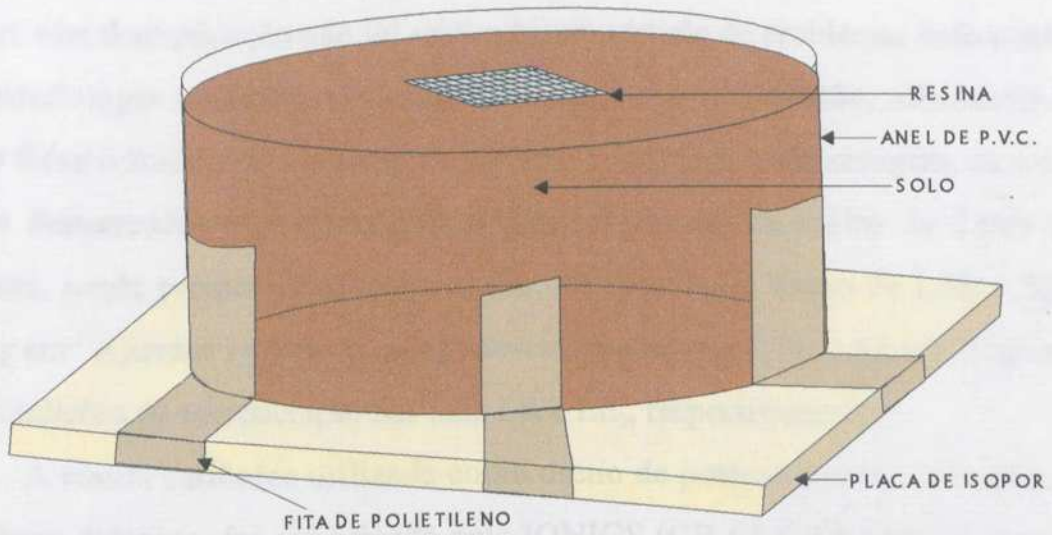


Figura 2 - Esquema da câmara de difusão (anel de PVC) com a resina trocadora de cátions.

2.3. A dose de potássio foi definida de modo que o teor deste elemento nos solos fosse elevado para 40% da CTC (Quadro 3). Quando se aplicou esta dose muito alta, a intenção foi fornecer o elemento de forma que a concentração do mesmo no solo não fosse um fator limitante da difusão, já que um dos objetivos deste trabalho era determinar o fator de impedância; porém, esta determinação não foi realizada, em virtude de problemas enfrentados na metodologia utilizada. O potássio foi aplicado em solução, utilizando-se como fonte o fosfato monobásico de potássio (KH_2PO_4). Após secagem, os solos foram destorroados e novamente passados em peneira de malha de 2 mm de abertura, sendo promovida a compactação. As densidades foram de 1,38; 1,22 e 1,00 g cm^{-3} (Quadro 1) para os solos não-compactados e 1,79; 1,59 e 1,30 g cm^{-3} sob condições de compactação nos LE_1 , LR e LE_2 , respectivamente.

A resina catiônica utilizada como dreno de potássio, para avaliação de seu fluxo difusivo, foi a fabricada pela IONICS (CR 61-CZR-442). Antes da utilização, a folha de resina foi cortada em lâminas com área de 10 cm^2 (5,0 cm x 2,0 cm) e submetida a pré-condicionamento e tratamento para uso conforme RAIJ et al. (1987). Em virtude da compactação aplicada, a resina foi disposta horizontalmente na superfície do solo.

O ensaio foi conduzido em condições de laboratório, com temperatura controlada a $25 \pm 3^\circ\text{C}$. Decorridos 15 dias, a resina foi retirada da câmara e lavada com jatos de água, para remoção do solo aderido. Em seguida, o excesso de água foi absorvido por papel-filtro.

Quadro 3 - Doses de potássio aplicadas nos solos utilizados

LE_1	LR	LE_2
$\text{mg dm}^{-3} \text{ K}$		
625	1.240	2.457

2.3. Avaliação do fluxo difusivo

O potássio adsorvido foi extraído pela agitação da membrana com 50 mL de uma solução de NH_4Cl $0,8 \text{ mol L}^{-1}$ + HCl $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ durante uma hora, em agitador horizontal a 270 rotações por minuto, utilizando metodologia descrita por RAIJ et al. (1987). A dosagem foi por fotometria de chama. A estimativa da difusão (fluxo difusivo) foi realizada pela quantificação do potássio adsorvido às lâminas de resina durante 15 dias.

Foram efetuadas análises de variância dos dados dos três solos e análises de regressão.

A difusão do potássio nos solos não-compactados e sob condições de compactação aumentou quando o conteúdo de água também aumentou em todos os solos (Quadros 4 e 5). Estes resultados são concordantes com os de KUCHENBUCH et al. (1985), que observaram acréscimo de 10 vezes no coeficiente de difusão desse elemento quando o conteúdo volumétrico de água aumentou de 0,1 para 0,4 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Estes autores atribuíram o aumento, principalmente, ao acréscimo no fator de impedância com o mais alto conteúdo de água. Os valores de fluxo difusivo (FD) de potássio foram maiores quando não se promoveu a compactação em todos os solos.

Comparando-se os três solos não-compactados (Quadros 4 e 5), foi observado que o LR atingiu o maior valor de FD ($63,88 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) no nível mais alto de umidade. Já nos níveis mais baixos, a difusão foi maior no LE₂. Era esperado um maior FD no LE₂ por este ser mais arenoso, com menores CTC e poder tampão que os outros dois (Quadro 1). Os resultados sugerem que a menor dose de potássio aplicada neste solo pode ter contribuído para esse comportamento. A dose de potássio utilizada no LE₂ correspondeu ao dobro de aplicada no LR, e esta

foi duas vezes maior do que a dose usada no LE₁ (Quadro 3). Essas doses foram aplicadas em função da CTC. Não foi verificada a presença de minerais do tipo 2:1 na fração argila dos solos (Figura 1). Assim, não é esperada a fixação de potássio nestes solos.

A diferença no FD entre os solos pode ser atribuída às maiores doses de potássio utilizadas nos solos mais argilosos. Os resultados estão de acordo com os do trabalho de BALIGAR (1984b), que, estudando o coeficiente de difusão como variável da concentração de K, Ca e Mg,

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

encontrou maior coeficiente de difusão de potássio num solo com maiores teor de argila e CTC, em relação a outros dois. Altas concentrações de um determinado cátion na solução do solo reduzem a sua capacidade tampão (BALIGAR, 1985).

A difusão do potássio nos solos não-compactados e sob condições de compactação aumentou quando o conteúdo de água também aumentou em todos os solos (Quadros 4 e 5). Esses resultados são concordantes com os de KUCHENBUCH et al. (1986), que observaram acréscimo de 10 vezes no coeficiente de difusão desse elemento quando o conteúdo volumétrico de água aumentou de 0,1 para 0,4 cm³ cm⁻³. Estes autores atribuíram o aumento, principalmente, ao acréscimo no fator de impedância com o mais alto conteúdo de água. Os valores de fluxo difusivo (FD) de potássio foram maiores quando não se promoveu a compactação em todos os solos.

Comparando-se os três solos não-compactados (Quadros 4 e 5), foi observado que o LR atingiu o maior valor de FD (63,88 μmol cm⁻² K/15 dias) no nível mais alto de umidade. Já nos níveis mais baixos, a difusão foi maior no LE₂. Era esperado um maior FD no LE₁, por este ser mais arenoso, com menores CTC e poder tampão que os outros dois (Quadro 1). Os resultados sugerem que a menor dose de potássio aplicada neste solo pode ter contribuído para esse comportamento. A dose de potássio utilizada no LE₂ correspondeu ao dobro da aplicada no LR, e esta

foi duas vezes maior do que a dose usada no LE₁ (Quadro 3). Essas doses foram aplicadas em função da CTC. Não foi verificada a presença de minerais do tipo 2:1 na fração argila dos solos (Figura 1). Assim, não é esperada a fixação de potássio nestes solos.

A diferença no FD entre os solos pode ser atribuída às maiores doses de potássio utilizadas nos solos mais argilosos. Os resultados estão de acordo com os do trabalho de BALIGAR (1984b), que, estudando o coeficiente de difusão como variável da concentração de K, Ca e Mg, encontrou maior coeficiente de difusão de potássio num solo com maiores teor de argila e CTC, em relação a outros dois. Altas concentrações de um determinado cátion na solução do solo reduzem a sua capacidade tampão (BALIGAR, 1985).

Quadro 4 - Fluxo difusivo de potássio influenciado por níveis de umidade e por níveis de compactação nos solos estudados

Nível de umidade ^{1/}	LE ₁		LR		LE ₂	
	1 ^{2/}	2 ^{3/}	1 ^{2/}	2 ^{3/}	1 ^{2/}	2 ^{3/}
%	μmol cm ⁻² K/15 dias					
10	5,53	3,09	6,56	3,08	14,83	11,21
20	9,90	7,64	17,92	6,40	29,44	19,52
40	24,66	14,05	35,87	8,93	38,93	27,20
60	28,75	15,57	46,47	15,00	44,96	36,40
70	47,14	18,40	55,84	30,25	50,02	39,81
80	51,54	24,94	58,86	38,64	54,52	42,61
90	60,57	27,83	62,71	50,07	57,73	47,07
100	55,47	32,65	63,88	50,65	59,49	50,01

1/ Fração da porosidade total das amostras dos solos ocupada com água.

2/ Condições de densidade natural.

3/ Compactado.

Quadro 5 - Equações de regressão relacionando o fluxo difusivo de potássio (FD) com os conteúdos de água (X) nos níveis de compactação, em cada um dos solos utilizados

Solo	Nível de compactação	Equação	R ²
LE ₁	1 ^{1/}	FD = -1,641 + 131,516**X	0,951
	2 ^{2/}	FD = 0,265 + 94,443**X	0,962
LR	1 ^{1/}	FD = -4,42 + 198,86**X - 140,05**X ²	0,997
	2 ^{2/}	FD = -8,112 + 120,311**X	0,906
LE ₂	1 ^{1/}	FD = 10,50 + 129,26**X - 82,093**X ²	0,977
	2 ^{2/}	FD = 9,760 + 82,402**X	0,988

1/ Condições de densidade natural.

2/ Compactado.

Segundo NOVAIS e SMYTH (1998), a necessidade de medidas do fator capacidade como critério de interpretação do “disponível”, como utilizado para fósforo, não se aplica para potássio, não necessitando de uma medida de Fator Capacidade de K no solo (FCK). Isto, aliado à aplicação de maiores doses de K nos solos mais argilosos, pode explicar os maiores valores de FD destes solos em relação ao LE₁. Neste trabalho, as doses de potássio utilizadas foram muito altas, como já referido, mas mesmo assim houve acentuada diferença no FD em função dos níveis de umidade, da compactação e dos solos usados.

Vários trabalhos referem-se ao aumento do coeficiente de difusão de cátions no solo com o aumento de sua concentração (PLACE e BARBER, 1964; ROWELL et al., 1967; CLARKE e GRAHAM, 1968; BALIGAR e BARBER, 1978). Trabalhando com resina de troca catiônica, BALIGAR (1984a) constatou a grande influência da concentração de potássio no solo no processo difusivo deste elemento.

O FD aumentou com o acréscimo do conteúdo de água em todos os solos. A elevação do conteúdo de água no solo reduz a tortuosidade do

caminho da difusão, aumentando a espessura do filme de água no interior dos poros, o que aumenta o fator de impedância. A umidade pode também influenciar a distribuição de íons entre as fases sólida e líquida do solo. ROWELL et al. (1967), relacionando o fator de impedância (f) e a umidade do solo, verificaram que, em solo muito seco, f apresentou valores muito baixos (2×10^{-4} a um potencial matricial de -10 MPa, e 10^{-2} a -1,5 MPa). Quando os potenciais estiveram entre -0,1 e -1,0 MPa, o fator de impedância aumentou linearmente com o conteúdo de água. Segundo NYE e TINKER (1977), o fator de impedância aproxima-se de zero nos solos mais secos, atingindo valores entre 0,4 e 0,7 em condições de saturação.

Nos níveis mais baixos de umidade, o FD foi menor do que nos mais elevados, mas, mesmo assim, com valores expressivos quando se considera que, no menor nível de umidade, a água aplicada correspondeu a um conteúdo volumétrico muito baixo para os três solos. Isto pode encontrar explicação nas elevadas doses de potássio aplicadas.

As diferenças nos valores de FD, em razão da compactação, foram mais pronunciadas entre os níveis de umidade mais baixos em todos os solos. Quando se comparam o menor e o maior nível de umidade, registram-se acréscimos no FD de 10,03; 9,73 e 4,01 vezes nos LE_1 , LR e LE_2 , respectivamente. Esses aumentos indicam a importância da água no processo de difusão do elemento dentro de cada solo. Observa-se que, embora o LE_1 tenha apresentado menores valores de FD que os outros dois solos, o acréscimo entre o maior e o menor nível de umidade foi maior naquele solo, ou seja, o FD de potássio seria mais afetado em solos mais arenosos quando secos do que nos argilosos.

As equações de regressão que relacionam o FD de potássio com os conteúdos de água nos três solos (Quadro 5) foram linear para o LV_1 e quadráticas para o LR e o LE_2 , não se verificando a relação direta, linear, entre o conteúdo volumétrico de água do solo e o coeficiente de difusão (eq.2) para estes dois últimos solos.

Quando se promoveu a compactação dos solos (Quadros 4 e 5), o FD de potássio também aumentou em todos os solos com o acréscimo do conteúdo de água, como ocorreu com os solos não-compactados, sendo a magnitude deste FD menor em todos os tratamentos. Os valores de FD de potássio diminuíram em todos os níveis de umidade e nos três solos, quando se promoveu a compactação em relação aos solos não-compactados. As alterações no FD de um íon quando um solo é submetido à compactação, aumentando-se a densidade aparente, são atribuídas a mudanças no fator de impedância. Comparando-se as condições de não-compactado e compactado, verificam-se menores diferenças no FD do que quando se comparam o menor e o maior nível de umidade em todos os solos, mostrando que a umidade influenciou mais o FD do que a compactação. SO e NYE (1989), utilizando cloro para medir o fator de impedância, verificaram que a umidade exercia efeito muito mais pronunciado na difusão do elemento do que a densidade do solo. Os modelos ajustados foram lineares nos três solos sob compactação, indicando a proporcionalidade entre o conteúdo volumétrico de água do solo e o coeficiente de difusão.

Comparando-se os três solos sob condições de compactação, observa-se que o menor valor do FD ocorreu no LE₁ (32,65 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{K}/15$ dias) e o maior no LE₂ (50,65 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{K}/15$ dias), que foi praticamente o mesmo do LR (50,01 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{K}/15$ dias) para o nível mais alto de umidade. A diferença entre os solos, além da utilização de doses de potássio diferentes, pode estar na quantidade de água aplicada, já que o LE₁ recebeu menos água do que o LR e o LE₂. As relações entre os maiores e os menores valores de FD, que ocorreram com os mais elevados e os mais baixos conteúdos volumétricos de água, foram de 10,57; 16,44 e 4,46 para os LE₁, LR e LE₂, respectivamente. Esse acréscimo do FD, nos três solos, quando se aumentou o conteúdo de água no solo, mostra a importância da água no processo difusivo do potássio no solo, em condições de compactação.

O efeito da compactação no fator de impedância é contraditório, segundo dados encontrados na literatura. Graham-Bryce (1965), citado por NYE e TINKER (1977), mostra resultados em que o coeficiente de difusão de rubídio aumentou em torno de três vezes quando um solo arenoso foi compactado, tendo a sua densidade aparente aumentada de 1,36 para 1,95 g cm⁻³. Já WARNCKE e BARBER (1972) encontraram, para cloro, valores de f duas a três vezes menores quando se elevou a densidade aparente de 1,3 para 1,6 g cm⁻³. O coeficiente de difusão de estrôncio aumentou cerca de 50% e o de rubídio diminuiu em torno de 20%, com o aumento da densidade aparente do solo de 1,3 para 1,8 g cm⁻³ (PHILLIPS e BROWN, 1965).

Neste trabalho, os menores valores de FD foram encontrados nos níveis de umidade mais baixos e em condições de densidade aparente mais elevada, o que está de acordo com MULLINS e EDWARDS (1987), os quais verificaram coeficientes de difusão de cátions no solo diminuindo com o aumento da densidade, sendo os efeitos mais pronunciados em conteúdos de água mais baixos. A continuidade dos filmes de água pode ser mais afetada pelo acréscimo da densidade a baixos conteúdos de água, quando comparados com conteúdos mais altos. Os efeitos da densidade foram relativamente menores quando comparados com os efeitos do conteúdo de água e da dose do elemento.

É comum encontrar na literatura trabalhos mostrando que o acréscimo da densidade aparente aumenta o coeficiente de difusão, quando a mesma quantidade de água é aplicada nas duas condições: antes e após a compactação. De acordo com BARBER (1995), a densidade aparente exerce grande efeito sobre o fator de impedância em níveis altos de umidade, em virtude da diminuição do espaço poroso ocupado pelo ar, permitindo maior continuidade da água, como consequência do aumento da densidade aparente. Neste trabalho, os conteúdos de água nos solos compactados foram aplicados de acordo com a nova porosidade que os solos apresentaram após a compactação (Quadro 2).

Pelos dados deste trabalho, observou-se que, a despeito das elevadas doses de potássio utilizadas, ainda assim houve forte influência dos níveis de umidade e de compactação no FD de potássio nos solos estudados. A interação entre níveis de umidade e compactação também foi significativa (Quadros 4, 5 e 6).

Quadro 6 - Análise de variância simples dos dados de fluxo difusivo de potássio nos solos (S) submetidos a níveis de umidade (NU) e compactação (C)

Fonte de Variação	G.L.	Quadrado Médio
Bloco	3	176,5217**
NU	7	6613,9240**
C	1	10832,2200**
NU vs C	7	237,0424**
S	2	2455,9880**
NU vs S	14	102,6691**
C vs S	2	367,1715**
C vs NU vs S	14	120,1906**
Resíduo	141	31,45399
C.V. (%) = 16,80		

** : Significativo a 1% pelo teste F.

água, para remoção do solo adsorvido. O potássio adsorvido foi extraído pela agitação da membrana com 30 mL de uma solução de NH_4Cl 0,8 mol L^{-1} + HCl 0,2 mol L^{-1} , durante uma hora, e a dosagem foi feita por fotometria de chama. A estimativa da difusão (fluxo difusivo) foi realizada pela quantificação do potássio adsorvido às lâminas de resina.

Os níveis de umidade, assim como a compactação, dentro de cada solo, influenciaram significativamente o fluxo difusivo. Comparando os três solos não-compactados, observou-se que o LR atingiu o maior valor de FD

4. RESUMO E CONCLUSÕES

(61,88 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{K}/15$ dias). Já nos níveis mais baixos de umidade, a difusão foi maior no LE_2 . Quando os solos foram compactados, o menor valor de FD ocorreu no LE_1 (32,65 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{K}/15$ dias) e o maior no LE_2 (50,65 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{K}/15$ dias), que foi praticamente o mesmo do LR (50,01 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{K}/15$ dias) para o nível mais elevado de umidade.

Avaliaram-se os efeitos do conteúdo volumétrico de água e da compactação no fluxo difusivo (FD) de potássio em amostras da camada superficial de três Latossolos.

O experimento consistiu do arranjo fatorial $3 \times 8 \times 2$, correspondendo, respectivamente, a três solos, oito níveis de umidade e dois níveis de compactação (solo sem e com compactação), dispostos em blocos casualizados, com quatro repetições. Os níveis de umidade corresponderam a 10, 20, 40, 60, 70, 80, 90 e 100% da porosidade total das amostras dos solos. Como unidade experimental, foram utilizados anéis de PVC, que serviram como câmara de difusão, com 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro interno e com volume útil de 360 cm^3 para as condições naturais e 277 cm^3 quando os solos foram compactados.

Para avaliação do fluxo difusivo do potássio no solo, foram colocadas lâminas de resina de troca catiônica, horizontalmente, na superfície das amostras de solo, nas câmaras de difusão. O trabalho foi conduzido em condições de laboratório, com temperatura controlada a $25 \pm 3^\circ\text{C}$ por 15 dias. Após esse período, as lâminas foram retiradas e lavadas com jato de

água, para remoção do solo aderido. O potássio adsorvido foi extraído pela agitação da membrana com 50 mL de uma solução de NH_4Cl $0,8 \text{ mol L}^{-1}$ + HCl $0,2 \text{ mol L}^{-1}$, durante uma hora, e a dosagem foi feita por fotometria de chama. A estimativa da difusão (fluxo difusivo) foi realizada pela quantificação do potássio adsorvido às lâminas de resina.

Os níveis de umidade, assim como a compactação, dentro de cada solo, influenciaram significativamente o fluxo difusivo. Comparando os três solos não-compactados, observou-se que o LR atingiu o maior valor de FD ($63,88 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{ K}/15 \text{ dias}$) no nível mais alto de umidade. Já nos níveis mais baixos de umidade, a difusão foi maior no LE_2 . Quando os solos foram compactados, o menor valor de FD ocorreu no LE_1 ($32,65 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{ K}/15 \text{ dias}$) e o maior no LE_2 ($50,65 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{ K}/15 \text{ dias}$), que foi praticamente o mesmo do LR ($50,01 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{ K}/15 \text{ dias}$) para o nível mais elevado de umidade.

Pelos resultados apresentados, pode-se concluir que o fluxo difusivo foi influenciado pela umidade e pela compactação do solo, aumentando com o acréscimo do conteúdo de água e apresentando valores mais baixos quando os solos foram compactados. Ocorreu relação direta, linear, entre o conteúdo volumétrico de água e a difusão nos três solos, quando se promoveu a compactação. Contudo, quando os solos não foram compactados, a proporcionalidade foi verificada apenas no solo mais arenoso.

RESUMO E CONCLUSÕES

Os solos mais arenosos apresentaram maior fluxo difusivo de fósforo do que os mais argilosos. O fluxo difusivo foi influenciado pelos níveis de umidade e pelas doses de fósforo; contudo, não se observou relação direta,

Avaliaram-se os efeitos do conteúdo volumétrico de água e de doses de fósforo no fluxo difusivo deste elemento e do conteúdo volumétrico de água e da compactação no fluxo difusivo do potássio em Latossolos. O primeiro ensaio consistiu de um fatorial $8 \times 5 \times 5$, correspondendo a oito níveis de umidade (10, 20, 40, 60, 70, 80, 90 e 100% da porosidade total), a amostras de cinco Latossolos (dois LE, dois LV e um LR) e cinco doses de fósforo (0, 25, 50, 75 e 100% da capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos). Como unidade experimental, foram utilizados anéis de PVC com 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro interno, com volume útil de 360 cm^3 , que serviram de câmara de difusão. O fluxo difusivo de fósforo no solo foi avaliado colocando-se lâminas de resina aniônica horizontalmente, entre duas camadas de solo.

O trabalho foi conduzido em laboratório com temperatura de $25 \pm 3^\circ\text{C}$ por 15 dias. Após este período, as lâminas de resina foram retiradas e lavadas com jato de água, e o fósforo adsorvido foi extraído pela agitação de lâmina com 50 mL da solução $\text{NH}_4\text{Cl } 0,8 \text{ mol L}^{-1} + \text{HCl } 0,2 \text{ mol L}^{-1}$, durante uma hora, e a sua concentração determinada. No segundo ensaio estudou-se

o efeito dos mesmos níveis de umidade e da densidade, a densidade natural e um acréscimo de 30%, de três Latossolos (dois LE e um LR), sobre o fluxo difusivo de potássio. O mesmo tipo de camada de difusão foi utilizado, sendo os volumes úteis de 360 cm³ para os solos compactados e de 277 cm³ para os compactados. A estimativa do fluxo difusivo foi feita utilizando resina de troca catiônica, em forma de lâminas dispostas, horizontalmente, na superfície do solo, em virtude da compactação efetuada. Após 15 dias, as lâminas de resina foram retiradas e lavadas com água destilada, e o potássio foi extraído da mesma forma que o fósforo e dosado.

Os solos mais arenosos apresentaram maior fluxo difusivo de fósforo do que os mais argilosos. O fluxo difusivo foi influenciado pelos níveis de umidade e pelas doses de fósforo; contudo, não se observou relação direta, linear, entre o conteúdo volumétrico de água e o coeficiente de difusão de fósforo, como previsto pela equação de difusão. O fluxo difusivo de potássio aumentou com o acréscimo dos níveis de umidade e diminuiu com a compactação, em todos os solos. A relação direta, linear, entre o conteúdo volumétrico de água e o coeficiente de difusão de potássio foi observada nos três Latossolos quando se promoveu a compactação. No entanto, quando os solos não foram compactados, a proporcionalidade foi verificada apenas no solo mais arenoso.

BALIGAR, V.C. Influence of crop growth on ionic equilibria, selectivity and diffusion of cations in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, v.16, n.2, p.163-174, 1985.

BALIGAR, V.C. Potassium additions on ionic equilibria, selectivity and diffusion of cations in soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, v.15, n.11, p.1351-1365, 1984b.

BALIGAR, V.C., BARBER, S.A. Use of K/Rb ratio to characterize potassium uptake by plant roots growing in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.42, n.4, p.575-579, 1978.

BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W. (Ed.) *The plant root and its environment*. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974, p.525-564.

BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. New York: John Wiley & Sons, 1995. 414p.

BARBER, S.A. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. In: KHASAWNEH, P.E., SAMPLE, E.C., KAMPATH, E.J. The role of phosphorus in agriculture. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1980. p.591-615.

BARRACLOUGH, P.B., FINKER, 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. *J. Soil Sci.*, v.32, n.2, p.225-236, 1951.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARLOW, N.J. Reaction of anions and cations with variable-charge soil. *Adv. Agron.*, v.38, n.183, p.183-230, 1985.

BASU, S.N. Effect of organic matter and initial pH value on phosphorus availability of submerged soil. *Fert. Technol.*, v.14, p.376-378, 1977.

AMER, F., BOUNDIN, D.R., BLACK, C.A., DUKE, F.R. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and ^{32}P -equilibration. *Plant Soil*, v.6, n.4, p.391-408, 1955.

BAHIA FILHO, A.F.C. Índices de disponibilidade de fósforo em latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas. Viçosa: UFV, 1982. 178p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1982.

BALIGAR, V.C. Effective diffusion coefficient of cations as influenced by physical and chemical properties of selected Indiana soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, v.15, n.11, p.1367-1376, 1984a.

BALIGAR, V.C. Influence of crop growth on ionic equilibria, selectivity and diffusion of cations in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, v.16, n.2, p.163-178, 1985.

BALIGAR, V.C. Potassium additions on ionic equilibria, selectivity and diffusion of cations in soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, v.15, n.11, p.1351-1365, 1984b.

BALIGAR, V.C., BARBER, S.A. Use of K/Rb ratio to characterize potassium uptake by plant roots growing in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.42, n.4, p.575-579, 1978.

BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W. (Ed.) **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p.525-564.

- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York: John Wiley & Sons, 1995. 414p.
- BARBER, S.A. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. In: KHASAWNEH, F.E., SAMPLE, E.C., KAMPRATH, E.J. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1980. p.591-615.
- 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. **J. Soil Sci.**, v.32, n.2, p.225-236, 1981.
- BARROW, N.J. Reaction of anions and cations with variable-charge soil. **Adv. Agron.**, v.38, n.183, p.183-230, 1985.
- BASU, S.N. Effect of organic matter and initial pH value on phosphorus availability of submerged soil. **Fert. Technol.**, v.14, p.376-378, 1977.
- BRAGA, J.M., DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica do fósforo em extratos de solos e plantas. **R. Ceres**, v.21, n.113, p.73-85, 1974.
- CLARKE, A.L., GRAHAM, E.R. Zinc diffusion and distribution coefficients in soil as affected by soil texture, zinc concentration and pH. **Soil Sci.**, v.105, n.6, p.409-418, 1968.
- CLARKSON, D.T. Factors affecting mineral nutrient acquisition by plants. **Ann. Rev. Plant Physiol.**, v.36, p.77-115, 1985.
- DEFELIPO, B.V., RIBEIRO, A.C. **Análise química do solo (metodologia)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1981. 17p. (Boletim de extensão, 29)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979. não paginado
- FASSBENDER, H.W. **Química de suelos: com ênfase en suelos de America Latina**. San José: IICA, 1986. 398p.
- FERNANDES, B. **Retenção e movimento de água no solo**. Viçosa: UFV, 1967. 49p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, 1967.

- FERNÁNDEZ ROJAS, I.E.J. **Reversibilidade de fósforo não-lábil em diferentes solos, em condições naturais e quando submetidos à redução microbiológica ou química.** Viçosa: UFV, 1995. 94p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- GUNARY, D., SUTTON, C.D. Soil factors affecting plant uptake of phosphate. **J. Soil Sci.**, v.18, n.2, p.167-173, 1967.
- HARREL, J.W., SAEED, M. The effect of moisture on phosphorus diffusion in coal mine spoils. **Soil Sci.**, v.129, n.5, p.261-265, 1980.
- HESLEP, J.M., BLACK, C.A. Diffusion of fertilizer phosphorus in soils. **Soil Sci.**, v.78, n.5, p.389-401, 1954.
- HIRA, G.S., SINGH, N.T. Observed and predicted rates of P diffusion in soils of varying bulk density and water content. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.41, n.3, p.537-540, 1977.
- HOLFORD, I.C.R. Effects of phosphate buffer capacity on critical levels and relationship between soil test and labile phosphate in wheat growing soils. **Aust. Soil J. Res.**, v.18, n.4, p.405-414, 1980.
- HOLFORD, I.C.R., MATTINGLY, G.E.G. A model for the behaviour of labile phosphate in soil. **Plant Soil**, v.44, n.1, p.219-229. 1976.
- JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis.** New Jersey: Prentice-Hall, 1958. 498p.
- KHALID, R.A., PATRICK JR., W.H., LAUNE, R.D. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.41, n.2, p.305-310, 1977.
- KUCHENBUCH, R., CLAASSEN, N., JUNGK, A. Potassium availability in relation to soil moisture. I. Effect of soil moisture on potassium uptake of onion plants. **Plant Soil**, v.95, n.2, p.221-231, 1986.
- LOPES, A.S. **Solos sob "cerrado": características, propriedades e manejo.** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1984. 162p.
- MAHTAB, S.K., GODFREY, C.L., SWOBODA, A.R., THOMAS, G.W. Phosphorus diffusion in soils: I. The effect of applied P, clay content and water content. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.35, n.3, p.393-397, 1971.
- MAHTAB, S.K., SWOBODA, A.R., GODFREY, C.L., THOMAS, G.W. Phosphorus diffusion in soils: II. The effect on phosphorus uptake by plants. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.36, n.1, p.55-57, 1972.

- MEHTA, B.K., SHIOZAWA, S., NAKANO, M. Measurement of molecular diffusion of salt in unsaturated soils. *Soil Sci.*, v.159, n.2, p.115-121, 1995.
- MELLO, J.W.V. **Dinâmica de fósforo, ferro e manganês e disponibilidade de fósforo para o arroz em solos inundados.** Viçosa: UFV, 1991. 212p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- MENON, R.G., HAMMOND, L.L., SISSING, H.A. Determination of plant-available phosphorus by the iron hydroxide impregnated filter paper (Pi) test. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.53, n.1, p.110-115, 1989.
- MORAES, J.F.V. Efeitos da inundação do solo. I. Influência sobre o pH, o potencial de óxido-redução e a disponibilidade de fósforo no solo. *Pesq. agropec. bras.*, v.8, n.6, p.93-101, 1973.
- MULLINS, G.L., EDWARDS, J.H. Effect of fertilizer amendments, bulk density and moisture on calcium and magnesium diffusion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.51, n.5, p.1219-1224, 1987.
- NOVAIS, R.F., BARROS, N.F. Sustainable agriculture and forestry production systems on acid soils: phosphorus as a case-study. In: MONIZ, A.C. (Ed.) **Plant-Soil interactions at low pH.** Campinas: Brazilian Soil Sci. Soc., 1997. p.39-51.
- NOVAIS, R.F., KAMPRATH, E.J. Parâmetros das isotermas de adsorção de fósforo como critério de recomendação de adubação fosfatada. *R. bras. Ci. Solo*, v.3, n.1, p.37-41, 1979.
- NOVAIS, R.F., SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta sob condições tropicais.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998. (no prelo)
- NYE, P.H. Diffusion of ions and uncharged solutes in soils and clays. *Adv. Agron.*, v.31, p.225-272, 1979.
- NYE, P.H., TINKER, P.B. **Solute movement in the soil-root system.** Berkeley: University of California Press, 1977. 342p.
- NYE, P.H., TINKER, P.B. The concept of a root demand coefficient. *J. Appl. Ecol.*, v.6, p.293-300, 1969.
- PARFITT, R.L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. *J. Soil Sci.*, v.40, n.3, p.359-369, 1989.
- PHILLIPS, R.E., BROWN, D.A. Ion diffusion. III. The effect of soil compaction on self-diffusion of ⁸⁶Rb and ⁸⁹Sr. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v.29, n.6, p.657-661, 1965.

- PLACE, G. A., BARBER, S. A. The effect of soil moisture and rubidium concentration on diffusion and uptake of rubidium-86. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.28, n.2, p.239-243, 1964.
- RAIJ, B. van, QUAGGIO, J.A., CANTARELLA, H., FERREIRA, M.E., LOPES, A.S., BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.
- REMER, W., SCHILLING, G. Effect of the soil water regime on the diffusion coefficient of phosphate ions. **Sov. Soil Sci.**, v.13, n.2, p.110-114, 1981.
- RITCHEY, K.D. **O potássio nos oxissolos e ultissolos dos Trópicos Úmidos**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1982. 69p. (Boletim Técnico, 7)
- ROWELL, D.L., MARTIN, M.W., NYE, P.H. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. III. The effect of moisture content and soil solution concentration on the self-diffusion of ions in soils. **J. Soil Sci.**, v.18, n.2, p.204-222, 1967.
- RUIZ, H.A. Dinâmica de nutrientes: transporte e absorção sob diferentes condições de umidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24, 1993, Goiânia. **Resumos...** Goiânia: SBCS, 1993. v.1. p.45-46.
- RUIZ, H.A. **Efeito do conteúdo de água sobre o transporte de fósforo em dois latossolos**. Viçosa: UFV, 1986. 86p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1986.
- RUIZ, H.A. O transporte do fósforo na solução do solo. **R. Cultura**, v.36, n.36, p.65-72, 1986b.
- SAMPLE, E.C., SOPER, R.J., RACZ, G.L. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F.E., SAMPLE, E.C., KAMPRATH, E.J. (Eds.) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1980. p.263-310.
- SO, H.B., NYE, P.H. The effect of bulk density, water content and soil type on the diffusion of chloride in soil. **J. Soil Sci.**, v.40, n.3, p.743-750, 1989.
- TISDALE, S.L., NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers**. New York: Macmillan Publishing, 1975. 694p.
- TURNER, F.T., GILLIAM, J.W. Increased P diffusion as an explanation of increased P availability in flooded rice soil. **Plant Soil**, v.45, n.2, p.365-377, 1976.

Van der ZEE, S.E.A.T.M., FOKKINK, L.G.J., Van RIEMSDIJK, W.H. A new technique for assessment of reversibly adsorbed phosphate. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.51, n.3, p.599-604, 1987.

VARGAS, R.M.B. **Mecanismos de suprimento de K, Ca, Mg e P às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 1982. 93p. Viçosa: UFV, 1982. 178p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1982.

VETTORI, L. **Métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Equipe de pedologia e fertilidade do solo. 1969. 24p.a (Boletim Técnico, 7).

VILLANI, E.M.A. **Fluxo difusivo de fósforo influenciado por fontes e por tempo de contato do fósforo com o solo**. Viçosa: UFV, 1995. 57p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.

VILLANI, E.M.A., NOVAIS, R.F., BARROS, N.F., FONTES, L.E.F., NEVES, J.C.L. Difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade. **R. bras. Ci. Solo**, v.17, n.3, p.343-347, 1993.

WARNCKE, D.D., BARBER, S.A. Diffusion of zinc in soil: I. The influence of soil moisture. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.36, n.1, p.39-42, 1972.

WARNCKE, D.D., BARBER, S.A. Diffusion of Zn in soils: II. The influence of soil bulk density and its interaction with soil moisture. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.36, n.1, p.42-46, 1971.

WILD, A. Mass flow and diffusion. In: GREENLAND, D.J., HAYES, M.H.B. **The chemistry of soil processes**. Chichester: John Wiley & Sons, 1981. p.37-80.

APÊNDICE A

Quadro JA - Análise de variância (conjunta) dos dados de fluxo difusivo de fósforo nos cinco solos submetidos a níveis de umidade (NU) e níveis de fósforo (NP)

APÊNDICE

F.V.	G.L.	Q.M.
Bloco	3	0,598710**
Solo (S)	4	50,230160**
Umidade (U)	2	18,519080**
Fósforo (P)	4	40,723900**
S vs U	28	3,795790**
S vs P	16	7,909500**
P vs U	28	2,186290**
S vs U vs P	112	0,256070**
S d/ U1 d/ P1	4	0,00014104
S d/ U1 d/ P2	4	0,00018504
S d/ U1 d/ P3	4	0,00000304
S d/ U1 d/ P4	4	0,00001404
S d/ U2 d/ P1	4	0,00001104
S d/ U2 d/ P2	4	0,00001404
S d/ U2 d/ P3	4	0,00001604
S d/ U2 d/ P4	4	0,538032**
S d/ U3 d/ P1	4	0,300000*
S d/ U3 d/ P2	4	0,287000*
S d/ U3 d/ P3	4	0,120000
S d/ U3 d/ P4	4	0,100000
S d/ U4 d/ P1	4	0,000000
S d/ U4 d/ P2	4	0,000000
S d/ U4 d/ P3	4	0,000000
S d/ U4 d/ P4	4	0,000000

Continua...

F.V.	G.L.	Q.M.
S d/ U1 d/ P1	4	7,542700**
S d/ U1 d/ P2	4	4,232888**
S d/ U1 d/ P3	4	3,313629**
S d/ U1 d/ P4	4	0,899990**
S d/ U1 d/ P5	4	0,267677*
S d/ U2 d/ P1	4	0,12306808
S d/ U2 d/ P2	4	0,09186804
S d/ U2 d/ P3	4	0,00691403
S d/ U2 d/ P4	4	14,959220**
S d/ U2 d/ P5	4	11,265471**
S d/ U3 d/ P1	4	8,332846**
S d/ U3 d/ P2	4	5,767607**
S d/ U3 d/ P3	4	3,830674**
S d/ U3 d/ P4	4	0,467957**
S d/ U3 d/ P5	4	0,13248608
S d/ U4 d/ P1	4	0,01276000
S d/ U4 d/ P2	4	18,287700**
S d/ U4 d/ P3	4	10,022310**
S d/ U4 d/ P4	4	5,875819**
S d/ U4 d/ P5	4	7,137144**

APÊNDICE A

Quadro 1A - Análise de variância (conjunta) dos dados de fluxo difusivo de fósforo nos cinco solos submetidos a níveis de umidade (NU) e níveis de fósforo (NP)

F.V.	G.L.	Q.M.
Bloco	3	0,598710**
Solo (S)	4	50,220160**
Umidade (U)	7	18,519080**
Fósforo (P)	4	40,723900**
S vs U	28	3,797190**
S vs P	16	7,909900**
P vs U	28	2,186290**
S vs U vs P	112	0,586070**
S d/ U1 d/ P1	4	0,000141ns
S d/ U1 d/ P2	4	0,000185ns
S d/ U1 d/ P3	4	0,000005ns
S d/ U1 d/ P4	4	0,000014ns
S d/ U1 d/ P5	4	0,000011ns
S d/ U2 d/ P1	4	0,000014ns
S d/ U2 d/ P2	4	0,000008ns
S d/ U2 d/ P3	4	0,000010ns
S d/ U2 d/ P4	4	0,538628**
S d/ U2 d/ P5	4	0,304108*
S d/ U3 d/ P1	4	0,287451*
S d/ U3 d/ P2	4	0,181573ns
S d/ U3 d/ P3	4	0,188692ns
S d/ U3 d/ P4	4	0,064682ns
S d/ U3 d/ P5	4	0,016226ns
S d/ U4 d/ P1	4	0,000122ns

Continua...

Quadro 1A, Cont.

F.V.	G.L.	Q.M.
S d/ U4 d/ P2	4	7,542700**
S d/ U4 d/ P3	4	4,232888**
S d/ U4 d/ P4	4	3,313629**
S d/ U4 d/ P5	4	0,899999**
S d/ U5 d/ P1	4	0,267677*
S d/ U5 d/ P2	4	0,123968ns
S d/ U5 d/ P3	4	0,091868ns
S d/ U5 d/ P4	4	0,006914ns
S d/ U5 d/ P5	4	14,959280**
S d/ U6 d/ P1	4	11,265471**
S d/ U6 d/ P2	4	8,332846**
S d/ U6 d/ P3	4	5,787607**
S d/ U6 d/ P4	4	3,839674**
S d/ U6 d/ P5	4	0,467957**
S d/ U7 d/ P1	4	0,132486ns
S d/ U7 d/ P2	4	0,012760ns
S d/ U7 d/ P3	4	18,485770**
S d/ U7 d/ P4	4	13,814970**
S d/ U7 d/ P5	4	11,430180**
S d/ U8 d/ P1	4	10,022310**
S d/ U8 d/ P2	4	5,875819**
S d/ U8 d/ P3	4	2,137144**
S d/ U8 d/ P4	4	0,203961ns
S d/ U8 d/ P5	4	0,020232ns
Resíduo	597	0,102429
C.V. (%) = 50,44		

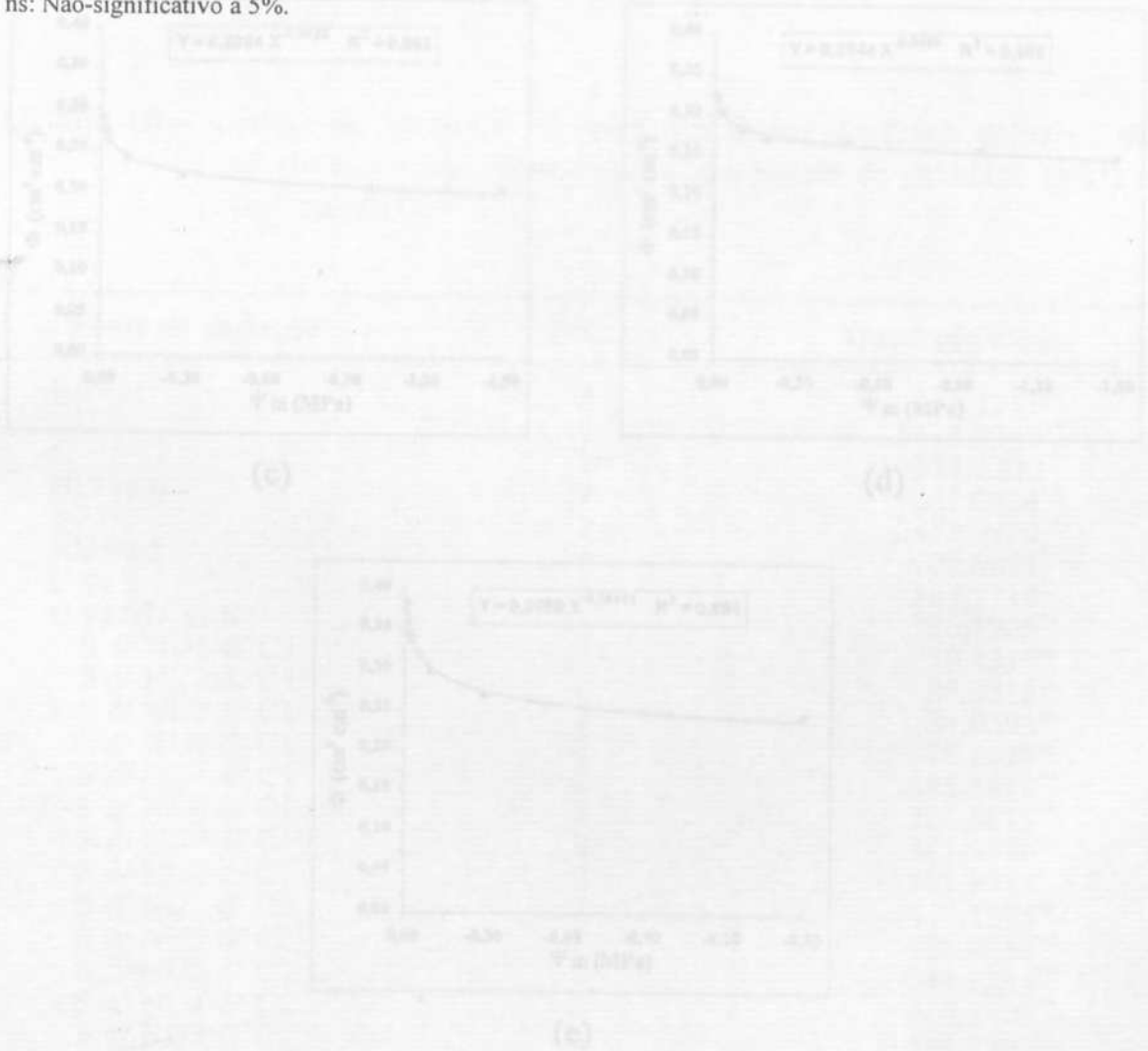
*, **: Significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.

ns: Não-significativo a 5%.

Quadro 2A - Análise de variância, por solo, dos dados de fluxo difusivo de fósforo nos cinco solos submetidos a níveis de umidade (NU) e níveis de fósforo (NP)

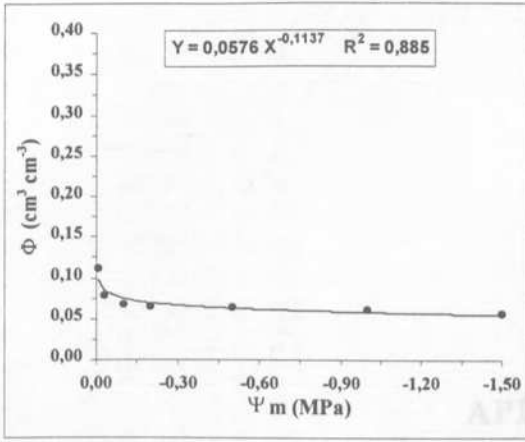
F.V.	G.L.	Quadrados médios				
		LE ₁	LV ₁	LR	LV ₂	LE ₂
Bloco	3	0,03623*	3,6716**	0,00104 ^{ns}	0,05525**	0,00090 ^{ns}
Fósforo (P)	4	7,82132**	57,7138**	0,52010**	5,44768**	0,86055**
Umidade (U)	7	2,25847**	28,1718**	0,51560**	2,40402**	0,35789**
P vs U	28	0,27838**	3,9203**	0,05126**	0,24127**	0,03933**
Resíduo	117	0,01105	0,4207	0,00160	0,00725	0,00089
C.V. (%)	(b)	16,36	41,27	20,75	15,49	13,87

*, **: Significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.
 ns: Não-significativo a 5%.

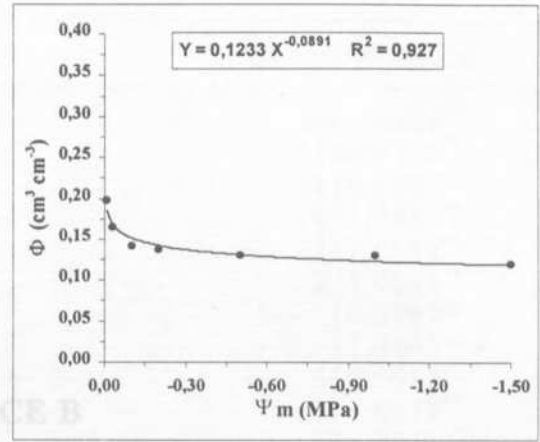


LE₁ (c), LV₂ (d) e LE₂ (e).

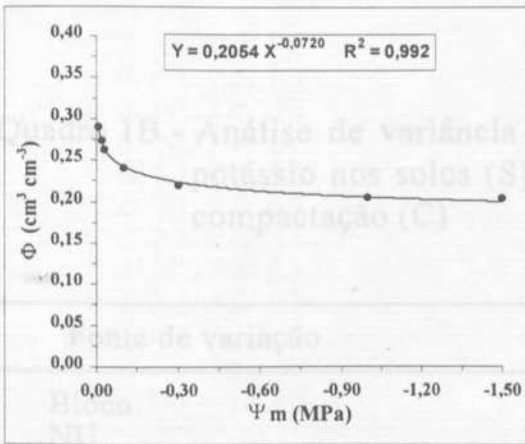
Figura 1A - Curvas de retenção de umidade dos solos.



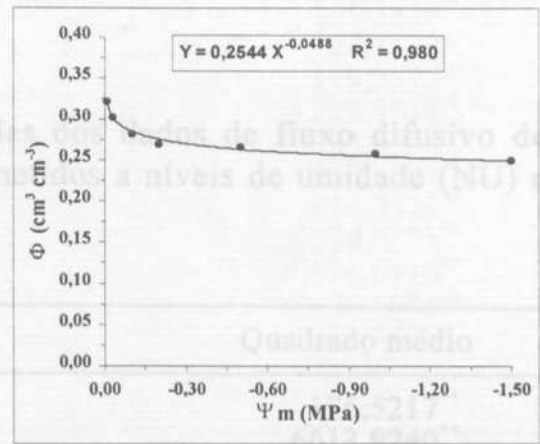
(a)



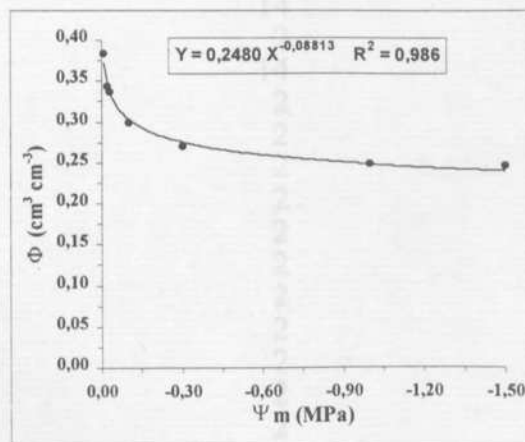
(b)



(c)



(d)



(e)

LE₁ (a), LV₁ (b), LR (c), LV₂ (d) e LE₂ (e).

Figura 1A - Curva de retenção de umidade dos solos.

APÊNDICE B

Quadro 1B - Análise de variância simples dos dados de fluxo difusivo de potássio nos solos (S) submetidos a níveis de umidade (NU) e compactação (C)

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio
Bloco	3	176,5217**
NU	7	6613,9240**
C	1	10832,2200**
NU vs C	7	237,0424**
S	2	2455,9880**
NU vs S	14	102,6691**
C vs S	2	367,1715**
C vs NU vs S	14	120,1906**
S d/ NU1 d/ C1	2	70,8317 ^{ns}
S d/ NU2 d/ C1	2	25,0318 ^{ns}
S d/ NU3 d/ C1	2	54,0595 ^{ns}
S d/ NU4 d/ C1	2	78,6538 ^{ns}
S d/ NU5 d/ C1	2	385,8418**
S d/ NU6 d/ C1	2	225,6875**
S d/ NU7 d/ C1	2	385,9470**
S d/ NU8 d/ C1	2	103,9933*
S d/ NU1 d/ C2	2	417,1992**
S d/ NU2 d/ C2	2	582,9036**
S d/ NU3 d/ C2	2	344,1234**
S d/ NU4 d/ C2	2	460,2409**
S d/ NU5 d/ C2	2	594,9202**
S d/ NU6 d/ C2	2	355,3417**
S d/ NU7 d/ C2	2	210,1882**
S d/ NU8 d/ C2	2	88,2136 ^{ns}

Continua...

Quadro 1B, Cont.

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio
C d/ NU1 d/ S1	1	1041,4060**
C d/ NU2 d/ S1	1	2143,8790**
C d/ NU3 d/ S1	1	1416,1090**
C d/ NU4 d/ S1	1	1651,7710**
C d/ NU5 d/ S1	1	347,6681**
C d/ NU6 d/ S1	1	225,0085**
C d/ NU7 d/ S1	1	10,2767 ^{ns}
C d/ NU8 d/ S1	1	11,9402 ^{ns}
C d/ NU1 d/ S2	1	350,1912**
C d/ NU2 d/ S2	1	319,6773**
C d/ NU3 d/ S2	1	816,9834**
C d/ NU4 d/ S2	1	1309,6280**
C d/ NU5 d/ S2	1	1980,9660**
C d/ NU6 d/ S2	1	1451,0630**
C d/ NU7 d/ S2	1	265,3829**
C d/ NU8 d/ S2	1	24,1870 ^{ns}
C d/ NU1 d/ S3	1	179,7577**
C d/ NU2 d/ S3	1	226,9010**
C d/ NU3 d/ S3	1	283,4478**
C d/ NU4 d/ S3	1	208,3500**
C d/ NU5 d/ S3	1	146,2559**
C d/ NU6 d/ S3	1	274,8775**
C d/ NU7 d/ S3	1	196,6916**
C d/ NU8 d/ S3	1	26,1085 ^{ns}
Resíduo	141	31,45399
C.V. (%) = 16,80		

*, **: Significativos a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.
 ns: Não-significativo a 5%.

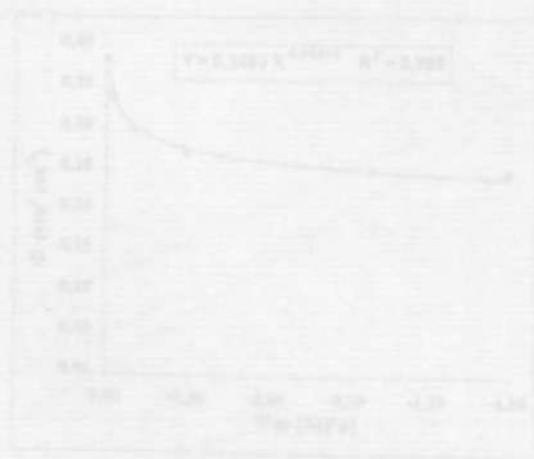
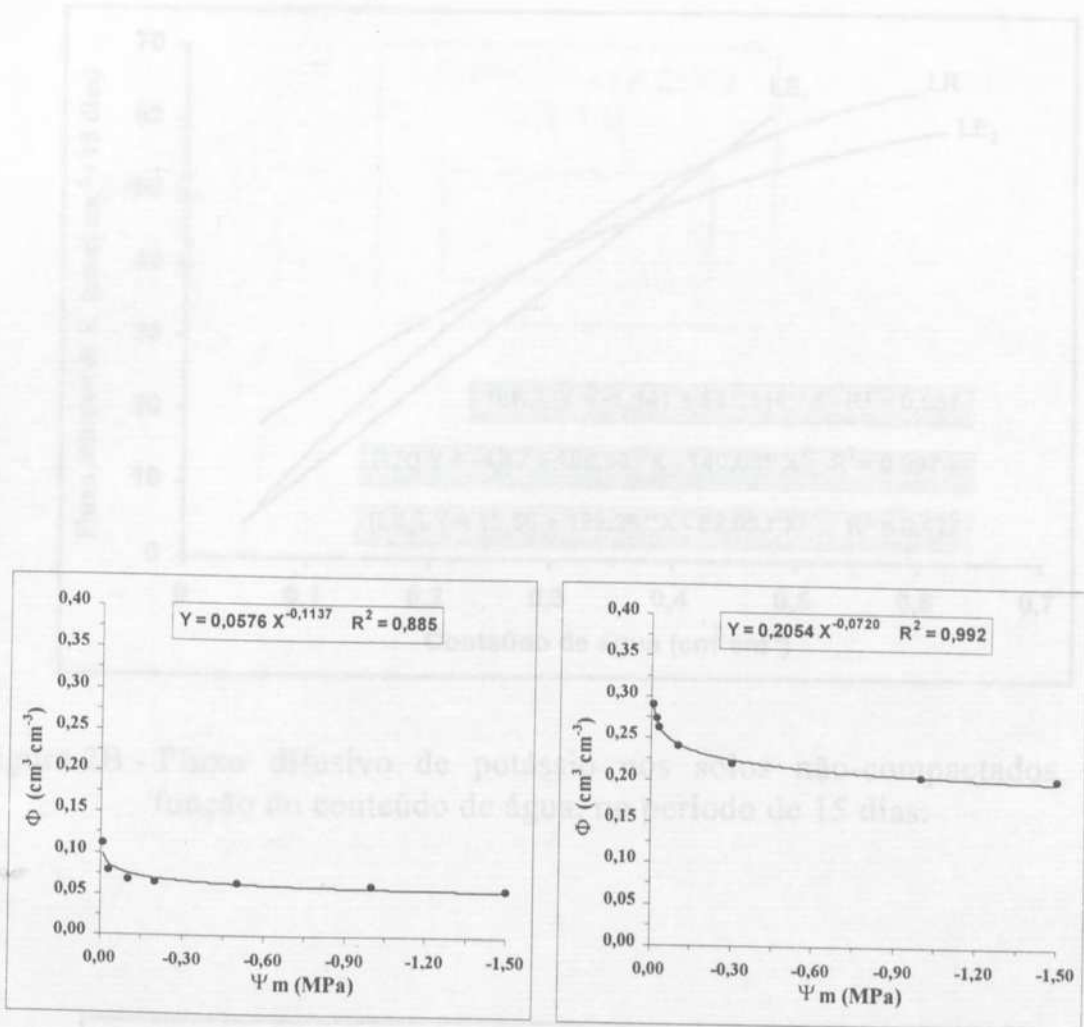
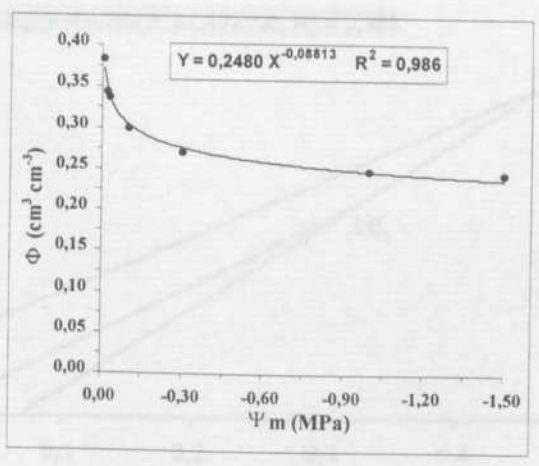


Figura 1B - Curvas de retenção de unidade dos solos.



(a)

(b)



(c)

LE1(a), LR(b) e LE2(c)

Figura 1B - Curvas de retenção de umidade dos solos.

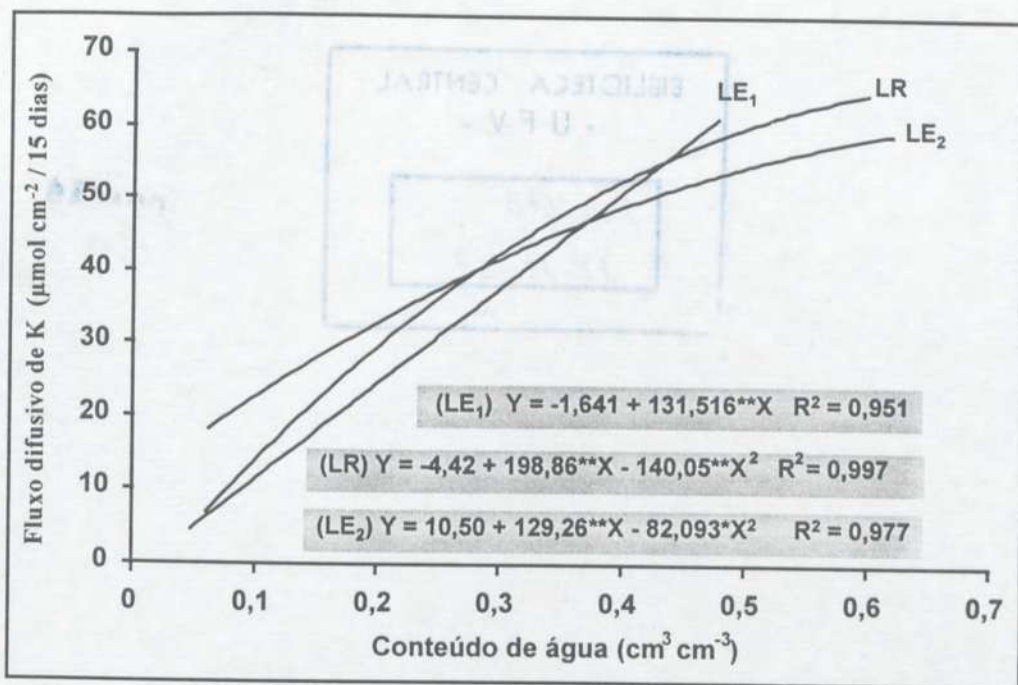


Figura 2B - Fluxo difusivo de potássio nos solos não-compactados, em função do conteúdo de água, no período de 15 dias.

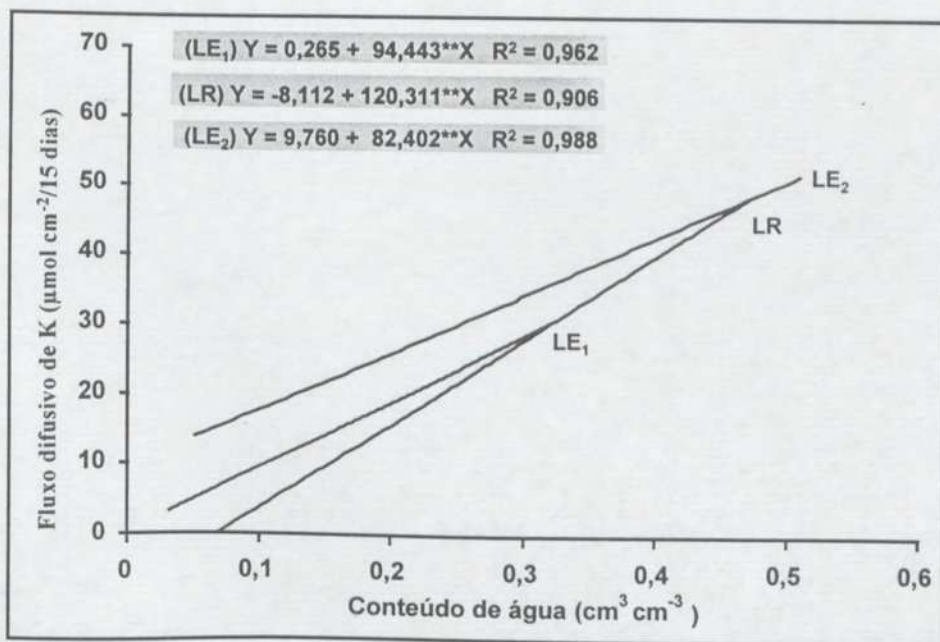


Figura 3B - Fluxo difusivo de potássio nos solos, em função do conteúdo de água sob condições de compactação, no período de 15 dias.