

ÍCARO TOURINO ALVES

**SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE POTÁSSIO E FÓSFORO NO SOLO
POR MEIO DE SOLUÇÕES ANALÍTICAS E NUMÉRICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A474s
2015
Alves, Ícaro Tourino, 1983-
Simulação do transporte de potássio e fósforo no solo
por meio de soluções analíticas e numéricas / Ícaro Tourino
Alves. - Viçosa, MG, 2015.
xii, 61f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador : Mauro Aparecido Martinez.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Referências bibliográficas: f.47-50.

1. Ciência do solo. 2. Simulação por computador.
3. Solos - Mobilidade iônica. 4. Fósforo. 5. Potássio.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.4

ÍCARO TOURINO ALVES

**SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE POTÁSSIO E FÓSFORO NO SOLO
POR MEIO DE SOLUÇÕES ANALÍTICAS E NUMÉRICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Magister Scientiae.

APROVADA: 28 de dezembro de 2015.

Marcelo Ribeiro Viola

Fernando França da Cunha

Mauro Aparecido Martinez
(Orientador)

A Deus,

AGRADEÇO

Aos meus pais,
meus avós,
meus irmãos,
minha esposa
e meus filhos,

DEDICO

À comunidade Técnico-Científica.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Dilson (in memoriam) e Márcia pelos ensinamentos, pelo exemplo de vida, carinho, fundamentais para esta conquista.

À minha esposa Juliana e meus filhos Giovana e Douglas pelo amor, amizade e apoio incondicional.

Aos meus irmãos Igor e Otávia e todos os familiares que sempre torceram muito por mim .

Ao meu orientador Prof. Mauro Aparecido Martinez pela valiosa orientação, boa vontade, dedicação e compreensão nos momentos difíceis sempre me ajudando.

Ao meu co-orientador Prof. Genelício Crusoé Rocha sempre muito solícito e contribuindo muito na realização do trabalho.

À coordenadora do Programa de Pós Graduação do DEA-UFV Profa. Leda Faroni pelo grande auxílio em momentos importantes.

Aos professores Gilberto Sedyama, Fernando Baêta, Silvio e Paulo Hamakawa do DEA, Fernando Reis da Estatística, Raphael e Igor Assis do Solos pelos ensinamentos.

Aos membros da banca examinadora, os professores Fernando França da Cunha (UFV) e Marcelo Ribeiro Viola (UFLA) por aceitarem o convite e contribuído imensamente para a melhoria do trabalho.

Aos funcionários do DEA em especial ao Chicão, Policarpo e principalmente ao Délio que sempre me auxiliou com muita boa vontade desde o primeiro contato.

Aos meus colegas do IFMG, em especial o professor e amigo José Roberto de Paula pelo incentivo e desprendimento nos momentos cruciais, e tantos outros que também me ajudaram nesta conquista.

Aos meus professores da UFLA que contribuíram muito para minha formação especialmente o Prof. Cláudio Milton Montenegro Campos.

A todos os colegas do CRRH aqui representados por Felipe, Nayara, Nívea, David, Micael, Tarcila, Daniel, Rafael os quais tive a oportunidade de conviver.

Aos amigos que fiz em Viçosa, Fábio (hoje colega no IFMG), Eduardo, Marcelo, Patrícia, Zé, Marli e especialmente a D. Aparecida que me recebeu tão bem.

Ao meu companheiro de república e também colega no IFMG Dênis por dividir este momento tão marcante em nossas carreiras.

Aos meus queridos alunos, com os quais eu aprendo muito a cada dia e me inspiram a continuar trabalhando sempre buscando melhorar.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento de equipamentos utilizados na pesquisa.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola e a Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realizar o mestrado em uma instituição de destaque.

Ao IFMG pela concessão de afastamento das minhas atividades nos períodos mais difíceis para que eu pudesse me dedicar integralmente.

BIOGRAFIA

ÍCARO TOURINO ALVES, filho de Dilson Neander Botelho Alves e Márcia Patto Tourino Alves, nasceu na cidade de Lavras, MG, em 11 de fevereiro de 1983.

Em agosto de 2000, ingressou no curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras, concluindo em julho de 2007.

Em agosto de 2009, iniciou como professor substituto no Instituto Federal de Minas Gerais Campus São João Evangelista, e em maio de 2011 efetivou-se no cargo de professor EBBT neste instituto.

Em agosto de 2013, ingressou no programa de Pós-graduação em nível de mestrado, em Engenharia Agrícola, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de dissertação em dezembro de 2015.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Dinâmica de solutos no solo e parâmetros de transporte	3
2.1.1 Transporte convectivo ou fluxo de massa	3
2.1.2 Transporte difusivo.....	4
2.1.3 Transporte dispersivo.....	4
2.1.4 Isotermas de adsorção.....	5
2.1.5 Fluxo de solutos no solo	7
2.2 Modelos Computacionais.....	8
2.2.1 Modelo DISP.....	8
2.2.2 Modelo HYDRUS -1D.....	9
2.3 Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR).....	10
2.4 Potássio: Importância agrônômica e dinâmica no solo	11
2.5 Fósforo: Importância agrônômica e dinâmica no solo	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Caracterização dos solos utilizados na pesquisa.....	13
3.2 Preparo das colunas de solo.....	15
3.3 Obtenção das curvas de eluição	17
3.4 Determinação dos parâmetros de transporte por meio de soluções analíticas	19
3.5 Ensaio de lixiviação monitorando as concentrações de solutos em diferentes profundidades utilizando sondas acopladas a TDR	21
3.6 Comparação entre valores simulados e observados	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Parâmetros de transporte	28
4.2 Concentrações de soluto ao longo do tempo e da profundidade	31
4.3 Simulações nos programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D	34
5. CONCLUSÕES	45
6. RECOMENDAÇÕES	46
REFERÊNCIAS	47
APÊNDICES	51

RESUMO

ALVES, Ícaro Tourino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2015. **Simulação do transporte de potássio e fósforo no solo por meio de soluções analíticas e numéricas.** Orientador: Mauro Aparecido Martinez. Coorientador: Genelício Crusóé Rocha.

O movimento de solutos no solo depende de fatores relacionados às propriedades do meio poroso e suas interações, as propriedades do líquido percolante e as condições ambientais que influenciam nos parâmetros de transporte dos solutos. Os parâmetros usualmente obtidos para a compreensão dos processos envolvidos no deslocamento de um íon no solo são: a velocidade da água nos poros, o fator de retardamento, o coeficiente de dispersão e a dispersividade. O método mais comum de calculá-los é por meio do ajuste dos modelos teóricos aos dados experimentais obtidos em laboratório; para o ajuste são empregados programas computacionais como o DISP e o HYDRUS 1-D que além de ajustar os parâmetros, são capazes de executar simulações para a variação espacial e temporal da concentração e do balanço de massa de solutos no perfil do solo. Diante do exposto, objetivou-se neste trabalho obter os parâmetros de transporte de potássio e fósforo, simular o deslocamento destes íons no solo utilizando programas computacionais (DISP e HYDRUS 1-D) e comparar a dados experimentais obtidos em colunas de dois diferentes solos com auxílio da TDR. A pesquisa foi conduzida em cinco etapas: A primeira etapa foi a coleta de dados relativos aos solos estudados em laboratório, um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e um Neossolo Quartzarênico órtico (NQo). Na segunda etapa confeccionou-se as colunas de solo e realizou-se um experimento para obter as curvas de eluição de potássio e fósforo variando o fluxo da solução que passa através dessas colunas de solo. Constatou-se que não houve variação significativa da condutividade hidráulica, com a variação da carga hidráulica e conquentemente do fluxo em ambos os solos. No LVd os fluxos variaram entre 27,56 a 36,19 cm h^{-1} quando aplicado potássio (K), e 27,41 a 34,72 cm h^{-1} quando aplicado fósforo (P). No NQo os fluxos variaram entre 37,04 a 45,31 cm h^{-1} quando aplicado potássio (K), e 38,36 a 45,05 cm h^{-1} quando aplicado fósforo (P). Na terceira etapa determinou-se os parâmetros de transporte por meio de soluções analíticas utilizando-se o programa computacional DISP. No LVd observou-se um maior retardamento na solução de potássio em relação a solução de fósforo, o que pode ser explicado pela

concentração de fósforo na solução deslocadora ser muito superior a de potássio, saturando rapidamente a capacidade adsorção deste solo. Frente a isso, observou-se valores muito elevados do coeficiente dispersivo-difusivo, da dispersividade e do coeficiente de partição na solução de potássio, porém não houve diferença significativa com a variação das cargas hidráulicas em nenhuma das soluções deslocadoras. No NQo, comparando as soluções de potássio e fósforo, observou-se diferença significativa apenas quando utilizou-se carga hidráulica de 11 cm nas colunas, no fator de retardamento e no coeficiente de partição. Já em relação ao coeficiente dispersivo-difusivo e a dispersividade, observou-se diferença significativa quando utilizou-se as cargas hidráulicas de 8 cm e 11 cm nas colunas. Comparando-se cargas hidráulicas diferentes na mesma solução deslocadora, observou-se que não houve diferença significativa com a variação das cargas hidráulicas em nenhuma das soluções deslocadoras para o coeficiente dispersivo-difusivo e a dispersividade, enquanto que, para o fator de retardamento e o coeficiente de partição, observou-se diferença significativa somente quando aplicou-se a carga hidráulica de 14 cm, tanto na solução de potássio quanto na de fósforo, o que indica um menor retardamento. Na quarta etapa realizou-se um segundo experimento, onde foram feitos testes de lixiviação em colunas com os mesmos solos (LVd e NQo) para se obter as concentrações de K e P em diferentes profundidades ao longo do tempo. Foram aplicadas as soluções deslocadoras durante 1 hora. Comparando a movimentação do íon potássio em relação ao fósforo no Latossolo Vermelho distrófico, após 15 min aplicando as soluções deslocadoras, verifica-se a 5 cm de profundidade, uma concentração relativa maior de potássio na solução do solo, cerca de 0,6 enquanto para o fósforo chegou em torno de 0,53. Decorridos 30 min, à 15 cm de profundidade verifica-se uma concentração relativa de 0,25 para o potássio e 0,15 para o fósforo. Após 45 min, à 25 cm de profundidade a concentração relativa de potássio chegou a 0,1 e no fósforo a 0,03. Observa-se apenas no início dos testes uma facilidade maior do íon potássio movimentar-se no solo, principalmente na frente de avanço da solução deslocadora. Após cerca de 40 minutos aplicando as soluções deslocadoras, observa-se que a camada mais superficial já está mais próxima da saturação do íon fósforo, devido a uma concentração maior de P na solução deslocadora, e partir daí nesta camada, a concentração de fósforo na solução do solo passa a ser maior em relação ao potássio. Analisando a movimentação do íon potássio em relação ao fósforo no Neossolo Quartzarênico órtico, verifica-se uma movimentação um pouco menor, já nos primeiros minutos, prevalecendo até o final do

teste, podendo ser explicado pela capacidade de adsorção do NQo ser menor do que a do LVd, saturando-o a fração sólida mais rápido. Comparando-se os deslocamentos do potássio e do fósforo nos dois solos observa-se uma movimentação muito maior no NQo, resultado já esperado em função da textura do solo. Na quinta e última etapa utilizou-se os parâmetros de transporte obtidos no DISP para simular o deslocamento dos solutos no próprio programa, e no programa computacional HYDRUS 1-D e comparar com os resultados como obtidos experimentalmente, além da comparação das simulações entre os dois programas. Utilizando os parâmetros de transporte determinados por soluções analíticas (DISP), pode-se concluir que as simulações do transporte de solutos por meio dos programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D apresentaram ótima correlação em relação aos valores encontrados experimentalmente, assim como quando comparado entre os dois programas. Os programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D se mostraram como boas opções de ferramentas de simulações da movimentação de íons no solo, podendo-se inclusive ser estudados em conjunto para futuras pesquisas.

ABSTRACT

ALVES, Ícaro Tourino, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2015. **Simulation of transport of potassium and phosphorus in the soil by means of analytical and numerical solutions.** Advisor: Mauro Aparecido Martinez. Co-advisor: Genelício Crusoé Rocha.

The solutes movement in soil depends on factors related to the properties of the porous medium and their interactions, the properties of the percolating liquid and environmental conditions that influence the solute transport parameter. The parameters usually obtained for the understanding of the processes involved in the displacement of an ion in the soil are: the speed of the water in the pores, the retardation factor, the coefficient of dispersion-diffusion. The most common method of calculating them is through the adjustment of theoretical models to experimental data obtained in the laboratory; for adjustment are used software DISP and HYDRUS 1-D which in addition to adjusting the parameters, are able to run simulations for the spatial and temporal variation of concentration and solute mass balance in the soil profile. In this light, the aim of this work was to obtain potassium and phosphorus transport parameters, simulate the movement of these ions in the soil using software (DISP and HYDRUS 1-D) and compare with experimental data obtained in two different soil columns aid of TDR. The research was conducted in five stages: The first stage was the collection of data on soils studied in the laboratory, an Oxisol (clay soil) and a Dystric Quartzarenic Neosol (sandy soil). The second step is fashioned soil columns, and made an experiment to obtain the potassium and phosphorus elution curves varying the flow of solution passing through these soil columns. It was found that there was no significant variation in the hydraulic conductivity with variation of the hydraulic load and consequently the flow in both soils. In clay soil flows the varied between 27.56 the 36.19 cm h⁻¹ when applied potassium (K), and 27.41 the 34.72 cm h⁻¹ when applied phosphorus (P). In sandy soil flows ranged between 37.04 h the 45.31 cm⁻¹ when applied potassium (K), and 38.36 the 45.05 cm h⁻¹ when applied phosphorus (P). In the third stage it was determined transport parameters by means of analytical solutions using the software DISP. In clay soil observed a greater delay (retardation factor) in the solution of potassium relative to phosphorus solution, which can be explained by the phosphorus concentration in the solution is much greater than the displacer potassium, rapidly saturating the adsorption

capacity of the soil. Because of that, there were very high values of the dispersive-diffusion coefficient (D), in the dispersivity (λ) and in the partition coefficient (K_d) in potassium solution, but there was no significant difference in the variation of hydraulic loads in any of the displacer solutions. In sandy soil comparing the potassium and phosphorus solutions, there was a significant difference only when we used hydraulic load of 11 cm in the columns, the retardation factor and the partition coefficient. In relation to the dispersive-diffusion coefficient and dispersivity, there was significant difference when we used the hydraulic loads of 8 cm and 11 cm in columns. Comparing different hydraulic loads in the same displacer solution, it was observed that there was no significant difference in the variation of the hydraulic loads in any of the displacer solutions to the dispersive-diffusion coefficient and dispersivity, while for the retardation factor and partition coefficient, there was a significant difference only when applied to hydraulic load of 14 cm in both potassium solution as in the match, which indicates a smaller delay (retardation factor). In the fourth step was performed a second experiment where leaching tests were made in columns with the same soil (clay soil and sandy soil) to give concentrations of K and P at different depths over time. The displacer solutions were applied for 1 hour. Comparing the movement of potassium ions in relation to the phosphorous in clay soil, after 15 min by applying the displacer solutions, it appears to 5 cm deep, a greater relative concentration of potassium in the soil solution, about 0.6 while for the match came around 0.53. After 30 min at 15 cm depth there is a relative concentration of 0.25 to 0.15 for potassium and phosphorous. After 45 min at 25 cm depth relative to the potassium concentration reached 0.1 to 0.03, and phosphorus. It is observed only at the beginning of testing greater ease of potassium ion to move on the ground, especially in front of the feed displacer solution. After about 40 minutes applying the displacer solutions, it is observed that the most superficial layer is now closer to the phosphorus ion saturation due to a greater concentration of P in the displacer solution, and thereafter this layer, the concentration of phosphorus in soil solution becomes higher compared to potassium. Analyzing the changes in the potassium ion relative to the phosphorus in sandy soil, there is a slightly smaller drive, since the first minutes until the end of test, may be explained by adsorption capacity of the sandy soil be less than the clay soil, saturating it faster solid fraction. Comparing the potassium and phosphorus shifts in both soils observes a much larger movement in sandy soil, result to be expected depending on the soil texture. In the fifth and last step was used transport parameters obtained in DISP to simulate the movement of solutes in

the software itself, and the software HYDRUS 1-D and compare the results with those obtained experimentally, and the comparison of the simulations between two programs. Using the transport parameters determined by analytical solutions (DISP), it can be concluded that the simulations of solute transport through the DISP and HYDRUS 1-D showed good correlation concerning the values found experimentally, and compared between the two programs. The software DISP and HYDRUS 1-D proved as good options tools simulations of the movement of ions in the soil, being able to even be studied together for future research.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura moderna utiliza quantidades substanciais de fertilizantes, pesticidas e outros produtos químicos que são benéficos apenas à região do sistema radicular das culturas. A translocação desses produtos químicos para o subsolo torna-os não somente indisponíveis para as plantas, mas impõe uma ameaça à qualidade da água subterrânea e das camadas sub-superficiais (BORGES JÚNIOR e ANDRADE, 2008).

No Brasil, ainda são escassas as pesquisas que avaliam o impacto da atividade agrícola sobre a qualidade das águas subterrâneas, considerando a presença de fertilizantes e agrotóxicos em áreas de agricultura e, em especial, nas áreas de recarga, onde os aquíferos tendem a ser mais vulneráveis. A preocupação com o destino destes produtos químicos aplicados ao solo tem motivado vários pesquisadores a desenvolverem modelos teóricos, objetivando descrever os processos físicos envolvidos no transporte desses produtos no perfil do solo (PINHO, 2009).

O movimento de solutos no solo depende de fatores relacionados às propriedades do meio poroso e suas interações, as propriedades do líquido percolante e as condições ambientais que influenciam nos parâmetros de transporte dos solutos. Dentre os fatores que influenciam o processo de migração e a retenção de substâncias químicas podem ser destacados: o tipo de solo, mineralogia, capacidade de troca catiônica, espécies de cátions absorvidos, velocidade de percolação e teor de matéria orgânica; concentração do contaminante, presença de outras substâncias na solução percolante, as condições hidrogeológicas, temperatura e pH do meio (COSTA, 2002).

Em geral, o potássio é considerado o segundo nutriente mais exigido pelas espécies cultivadas no Brasil (MALAVOLTA, 2006). Para Kolahchi e Jalali (2006), uma das justificativas para se estudar a dinâmica do potássio no solo está na sua implicação em relação a eficiência do uso do fertilizante. Além disso, as concentrações do elemento podem aumentar substancialmente no lençol freático pelo processo de lixiviação em áreas usadas para fins agrícolas.

A interação do fósforo com os constituintes do solo, como Al, Fe e Ca, sua ocorrência em formas orgânicas e sua lenta taxa de difusão na solução tornam-no menos prontamente disponível na rizosfera. Mesmo quando são aplicados fertilizantes, a maior parte do fósforo adicionado é adsorvido em colóides do solo, tornando-se com o tempo, indisponível, dada a formação de compostos de baixa solubilidade, sem propiciar uma esperada contribuição para a produção vegetal (FERNANDES, 2006). A adubação

fosfatada apresenta efeito residual de longa duração, pois a movimentação do nutriente no perfil do solo é pequena, até mesmo em solos mais arenosos (COELHO et al., 2004).

Para melhor compreensão de como se comportam os solutos no solo, no que tange à sua dinâmica, é necessário que alguns parâmetros de transporte sejam devidamente estabelecidos. Há alguns trabalhos que discorrem sobre os procedimentos experimentais de como obtê-los e a interpretação que deve ser dada para tais parâmetros. Os parâmetros usualmente obtidos para a compreensão dos processos envolvidos no deslocamento de um íon no solo são: a velocidade da água nos poros, o fator de retardamento, o coeficiente de dispersão e a dispersividade (PINHO, 2009).

De acordo com Rossi et al. (2007), o método mais comum de calculá-los é por meio do ajuste dos modelos teóricos aos dados experimentais obtidos em laboratório; para o ajuste são empregados programas computacionais como o DISP (BORGES JR. e FERREIRA, 2006) que além de ajustar os parâmetros, é capaz de executar simulações para a variação espacial e temporal da concentração e do balanço de massa de solutos no perfil do solo.

Frente a estes aspectos e aos avanços computacionais, vários autores têm proposto a utilização de modelos matemáticos aliados às técnicas numéricas para estimar o comportamento de potenciais poluentes em solos. Este é o caso do modelo HYDRUS 1-D (SYMUNEK et al., 2005), que por ser capaz de simular a movimentação de água, calor e de solutos em solos, pode servir de ferramenta para auxiliar no estabelecimento de tais critérios, e assim antever eventuais impactos advindos dos resíduos.

Diante do exposto, objetivou-se neste trabalho obter os parâmetros de transporte de potássio e fósforo, simular o deslocamento destes íons no solo utilizando programas computacionais (DISP e HYDRUS 1-D) e comparar com dados experimentais obtidos em colunas de dois diferentes solos com auxílio da TDR.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dinâmica de solutos no solo

A água em estado líquido encontrada na natureza, mesmo aquela de elevado grau de pureza, sem passar por procedimentos de destilação ou deionização, é a rigor uma solução, pois existem diversos compostos como os sais dissolvidos ou solutos(RUIZ et al., 2010).

O transporte de solutos é vinculado ao fluxo de água no solo. A água que escoar no solo carrega os solutos constituindo-se o transporte convectivo ou fluxo de massa. Há outros dois mecanismos de transporte: por difusão e por dispersão(BORGES JÚNIOR e ANDRADE, 2008).

No transporte, os solutos podem interagir com a matriz do solo (adsorção e desorção), podem precipitar, se os limites de solubilidade forem excedidos, e podem interagir com eles próprios(BORGES JÚNIOR e ANDRADE, 2008).

A importância do estudo do transporte de solutos no solo reside no fato de que, a partir do conhecimento das propriedades e das interações de determinada substância química com o meio e de sua movimentação e persistência no solo, é possível estabelecer práticas de manejo de solo-água-planta, objetivando disponibilizar os nutrientes na profundidade de máxima densidade do sistema radicular (MARTINEZ et al., 2010).

2.1.1 Transporte convectivo ou fluxo de massa

O fluxo convectivo refere-se ao deslocamento passivo do soluto juntamente com a água formando a solução, que ao se movimentar no solo, leva consigo o soluto nela dissolvido em uma determinada concentração, portanto movendo-se na mesma velocidade (RUIZ et al., 2010).

$$J_c = qC_L \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

$$J_c = \text{fluxo convectivo } (\text{M L}^{-2}\text{T}^{-1});$$

$$q = \text{fluxo da solução } (\text{L}^3\text{L}^{-2}\text{T}^{-1});$$

$$C_L = \text{concentração do soluto dissolvido } (\text{M L}^{-3}).$$

2.1.2 Transporte difusivo

O transporte de solutos por difusão molecular é um processo espontâneo, que resulta de movimento térmico e aleatório de íons e moléculas na fase líquida do solo, decorrente da diferença de concentração entre dois pontos na solução do solo. Macroscopicamente, o fluxo por difusão é proporcional ao gradiente de concentração, e pode ser expresso de forma similar a primeira lei de Fick (RUIZ et al., 2010).

$$J_d = -D_0 \xi \frac{dC_L}{dz} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que:

$$J_d = \text{fluxo difusivo (M L}^{-2} \text{T}^{-1}\text{);}$$

$$D_0 = \text{coeficiente de difusão molecular do soluto em água (L}^2 \text{T}^{-1}\text{);}$$

$$\frac{dC_L}{dz} = \text{gradiente de concentração na direção da coordenada z (M L}^{-4}\text{);}$$

$$\xi = \text{fator de tortuosidade.}$$

2.1.3 Transporte dispersivo

Ao contrário da difusão molecular, que ocorre tanto em condições estáticas quanto dinâmicas da solução, a dispersão mecânica ocorre apenas em condições dinâmicas, isto é, quando há movimento da solução. Quando a velocidade da solução for suficientemente alta, o efeito relativo do mecanismo da dispersão mecânica poderá exceder, em muito, o da difusão, o que geralmente ocorre durante uma chuva ou irrigação e também logo após, quando a água (solução) estiver sendo redistribuída no solo, e até mesmo em simulações feitas em colunas de solo quando mantêm-se uma carga hidráulica constante, sendo portanto o transporte dispersivo predominante em relação ao difusivo. Devido a semelhança entre os dois processos a equação que descreve o fluxo dispersivo é dada por:

$$J_h = -D_h \theta \frac{dC_L}{dz} \quad (\text{Eq. 3})$$

em que:

$$J_h = \text{fluxo dispersivo (M L}^{-2} \text{T}^{-1}\text{);}$$

$$D_h = \text{coeficiente de dispersão mecânica (L}^2 \text{T}^{-1}\text{);}$$

$$\theta = \text{teor de água no solo (L}^3 \text{L}^{-3}\text{).}$$

O coeficiente de dispersão mecânica depende apenas da velocidade média de escoamento de um meio poroso.

$$D_h = \lambda v^n \quad (\text{Eq. 4})$$

em que:

λ = dispersividade (L);

v = velocidade média do escoamento da solução do solo (LT^{-1});

n = parâmetro empírico com valor próximo de 1.

Em razão dos processos de difusão e dispersão serem macroscopicamente semelhantes, os coeficientes de difusão e dispersão são frequentemente considerados aditivos, originando o coeficiente dispersivo-difusivo, também chamado de coeficiente de difusão aparente ou coeficiente de dispersão hidrodinâmica.

$$D = D_0 \xi + \lambda v^n \quad (\text{Eq. 5})$$

em que:

D = Coeficiente de dispersão hidrodinâmica (L^2T^{-1});

A análise do mecanismo de transporte predominante no processo de deslocamento de solutos pode ser feita por meio do número de Peclet, um adimensional que relaciona o fluxo convectivo com a dispersão do soluto no meio.

$$P_e = \frac{vL}{D} \quad (\text{Eq. 6})$$

em que:

P_e = número de Peclet (adimensional);

L = comprimento da coluna de solo (L).

2.1.4 Isotermas de adsorção

Segundo Drever (1997), para um bom entendimento da mobilidade dos solutos nos solos é preciso ser capaz de modelar quantitativamente o processo de adsorção. A equação (ou representação gráfica) que relaciona a quantidade de solutos adsorvidos na superfície dos sólidos e a quantidade dissolvida na solução, a uma dada temperatura, é referida como isoterma de adsorção (JURY et al., 1991).

As isotermas podem ter as formas mais variadas dependendo das características do adsorbato (solute) e da superfície adsorvente (fração sólida do solo) e algumas vezes

são influenciadas por outros constituintes da solução. As isotermas mais comumente utilizadas são as de Langmuir, de Freundlich e Linear (JURY et al., 1991), ilustradas na Figura 1.

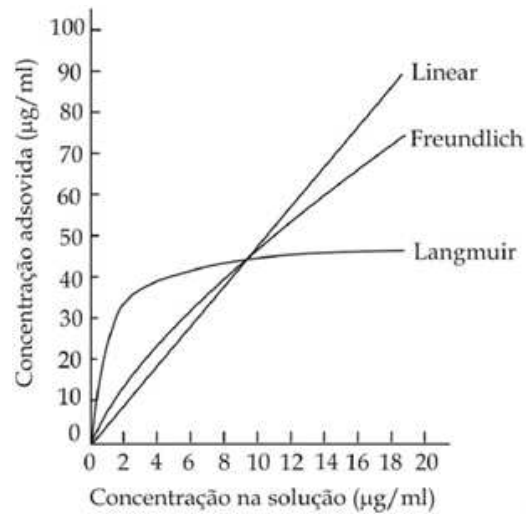


Figura 1 - Isotermas de adsorção (Jury et al., 1991).

A isoterma de Langmuir é um tipo de isoterma na qual a concentração de soluto adsorvida aumenta linearmente com a concentração de soluto dissolvido, quando em baixas concentrações de soluto dissolvido, e aproxima-se de um valor constante em altas concentrações de soluto dissolvido. Esta isoterma é mais apropriada para solos que possuem finita capacidade de adsorção (JURY et al., 1991). Matematicamente, a isoterma de Langmuir é descrita pela equação:

$$C_s = \frac{KS_{\max} C_L}{1 + KC_L} \quad (\text{Eq. 7})$$

em que:

C_s = concentração de soluto adsorvida ($M^3 M^{-3}$);

C_L = concentração de soluto dissolvido ($M L^{-3}$);

K = parâmetro empírico (adimensional);

S_{\max} = adsorção máxima de soluto no solo ($M M^{-3}$).

Muitos solutos não adsorvem ao solo de acordo com a isoterma de Langmuir, mas, ao invés, reagem como se o solo possuísse diferentes tipos de sítios com capacidade ilimitada de adsorção (JURY et al., 1991). Para estes solutos, a forma da isoterma pode frequentemente, ser descrita pela isoterma de Freundlich:

$$C_s = K_d C_L^N \quad (\text{Eq. 8})$$

em que:

K_d = coeficiente de partição ($L^3 M^{-1}$);

N = parâmetro empírico (adimensional);

Na isoterma de Freundlich, o parâmetro N é normalmente menor do que 1. No caso especial em que $N = 1$, a isoterma de Freundlich torna-se uma equação linear e é denominada de isoterma linear:

$$C_s = K_d C_L \quad (\text{Eq. 9})$$

2.1.5 Fluxo de solutos no solo

O fluxo total de solutos no solo (J_s), desconsiderando a fase gasosa, é determinado pela soma dos componentes difusivo, dispersivo e convectivo, ou seja,

$$J_s = J_c + J_d + J_h \quad (\text{Eq. 10})$$

Combinando as equações 1, 2, 3, 4, 5 e 10 resulta na equação diferencial de primeira ordem do movimento do soluto no meio poroso:

$$J_s = -D\theta \frac{dC}{dx} + qC \quad (\text{Eq. 11})$$

A equação anteriormente apresentada descreve o transporte de solutos apenas em condições de escoamento permanente. A equação diferencial capaz de descrever o escoamento em condições transientes é obtida por meio da lei de conservação das massas, conforme o princípio de continuidade ou balanço de massa.

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} \quad (\text{Eq. 12})$$

em que:

t = tempo (T);

z = coordenada relativa a posição na coluna de solo (L);

R = fator de retardamento.

O fator de retardamento pode ser caracterizado fisicamente como sendo o número de volume de poros de solução percolada, necessários para que a concentração relativa (C/C_0) do íon estudado no efluente atinja 0,5. Quanto maior o fator de retardamento, maior a interação do soluto devido aos processos de adsorção específica, adsorção ao complexo de troca ou mesmo por processos de lixiviação, (RIBEIRO, 2011).

2.2 Modelos Computacionais

Agências governamentais e instituições de pesquisa de diferentes países tem conduzido estudos de impacto ambiental e investigações de campo, com o objetivo de determinar os níveis de concentração de resíduos químicos em vários ecossistemas, além de avaliar práticas de manejo que possibilitem minimizar os problemas associados ao uso de substâncias químicas na agricultura; entretanto, por causa do alto custo, tempo e esforço humano envolvidos nesses estudos, torna-se necessária uma alternativa economicamente viável. Dessa forma, considerando-se os avanços computacionais dos últimos anos, os modelos matemáticos surgem também como uma possibilidade viável na avaliação do destino e do comportamento de determinadas substâncias químicas em ambientes geo-hidrológicos (PINHO, 2009).

Vários países têm desenvolvido vários modelos visando estudar a contaminação do solo e da água subterrânea. Alguns merecem destaque: PRZM (CARSEL et al., 1984), SOLUTE (BELJIN, 1985), GLEAMS (LEONARD et al., 1987), LEACHM (WAGENET e HUTSON, 1989), PESTAFATE (CLEMENTE, 1993), CXTFIT (PARKER e VAN GENUCHTEN, 1984) e WAVE (VANCLOOSTER et al., 1994).

Contudo, apenas alguns modelos mais específicos têm a capacidade de simular o transporte individual dos íons existentes na solução do solo. No Brasil os mais populares têm sido os modelos DISP (BORGES JR. e FERREIRA, 2005) o qual têm sido muito utilizado para determinar os parâmetros de transporte em meio saturado, e HYDRUS-1D (SIMUNEK et al., 2005) sendo este modelo, uma poderosa ferramenta na previsão das concentrações dos íons no solo, dos efeitos da qualidade de água de irrigação nos aquíferos e na quantificação do volume de água necessário para recuperar solos sódicos e salinos.

2.2.1 Modelo DISP

O modelo DISP é um programa computacional capaz de determinar os parâmetros de transporte tais como o coeficiente dispersivo-difusivo (D), o fator de retardamento (R) e o número de Peclet (P). O programa determina esses parâmetros de forma analítica ajustando os dados experimentais as soluções matemáticas da equação diferencial de transporte de solutos no solo com base na menor soma dos mínimos quadrados dos resíduos. Os parâmetros de entrada necessários são os dados referentes a curva de eluição obtida experimentalmente: concentração relativa em função do número de volume de poros. É necessário também especificar o teor de água, sendo igual a

porosidade considerando que o programa só trabalha com as equações para o solo saturado, especificar a densidade do solo, o fluxo, o comprimento da coluna, a concentração inicial do soluto na fase líquida do solo e a concentração do soluto na solução aplicada. O programa também é capaz de simular o deslocamento do soluto no solo ao longo do tempo fornecendo os parâmetros de transporte R e D.

A concentração de soluto no fluxo pode ser calculada por meio das soluções das equações 13 e 14.

$$C_x(x,t) = C_i + (C_0 - C_i)A_1(x,t) \quad (\text{Eq. 13})$$

$$A_1(x,t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx - vt}{2(DRt)^{\frac{1}{2}}} \right] + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx + vt}{2(DRt)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (\text{Eq. 14})$$

em que:

C_x = concentração de soluto no fluxo da solução do solo (g dm^{-3});

C_i = concentração inicial de soluto na solução do solo (g dm^{-3});

C_0 = concentração de soluto na solução deslocadora (g dm^{-3});

x = comprimento da coluna de solo (cm);

t = tempo (h);

erfc = é a função erro complementar;

v = velocidade média do escoamento da solução no solo (cm h^{-1}).

2.2.2 Modelo HYDRUS -1D

O modelo HYDRUS-1D é um programa computacional que visa simular o movimento unidimensional de água, soluto e calor tanto em zonas saturadas quanto não saturadas do solo. O programa resolve numericamente, pelo método dos elementos finitos, a equação de Richards para o escoamento de água em meio saturado, equações de calor do tipo advecção-dispersão e transporte de soluto (SIMUNEK et al., 2005).

O fluxo de água no solo pode ser transiente ou constante com o tempo e existem equações que descrevem esses tipos de movimentos, contudo soluções analíticas são desenvolvidas mais comumente para regime de fluxo constante. Para regime transiente geralmente usa-se métodos numéricos devido a dificuldade de resolução dessas equações, e graças a isso, o modelo numérico HYDRUS 1-D é utilizado para descrever processos dessa natureza (SIMUNEK et al., 2005).

As equações de advecção-dispersão referentes ao transporte de solutos são escritas de uma forma geral, incluindo as provisões para as reações de não equilíbrio

não-lineares entre as fases sólida e líquida, e reação de equilíbrio linear entre as fases líquida e gasosa. Além disso, as equações de transporte podem incluir provisões para cinética, inserindo/retirando solutos da fase sólida, permitindo simulações de transporte de vírus, colóides, ou bactérias(SIMUNEK et al., 2005).

O transporte de soluto no solo é talvez, o assunto mais complexo na física do solo. Ele envolve o movimento de água e o movimento químico, reações químicas, e transformações microbianas. O objetivo é prever a concentração de um determinado composto químico (tais como nitrato, vários pesticidas, ou metais pesados) em solução onde a concentração é usualmente uma unidade de massa de soluto por volume de solução(SIMUNEK et al., 2005).

Assume-se que os solutos podem existir em 3 fases: líquida, sólida e gasosa e que os processos de produção e “transformação” podem ser diferentes em cada fase. Assume-se também que os solutos são transportados por convecção e dispersão na fase líquida, bem como difusão na fase gasosa. O modelo HYDRUS 1-D atualmente considera seis solutos, os quais podem ser acoplados, quer numa cadeia unidirecional ou podem mover independentemente uma da outra(SIMUNEK et al., 2005).

O programa utiliza elementos finitos no espaço e diferenças finitas no tempo para resolver numericamente a equação convectiva-dispersiva para transporte de solutos, e pode ser descrita de forma simplificada sob condições de fluxo constante conforme a equação 12.

2.3 Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)

De maneira geral, a avaliação da dinâmica de água e solutos em colunas de solo é feita mediante extração de amostras de solo, com posteriores quantificações das respectivas umidades gravimétricas e das concentrações dos íons de interesse, mediante uso de técnicas de extração de solução do solo. Porém, por ser destrutiva, essa técnica não admite amostragem de um mesmo ponto de monitoramento, inviabilizando a avaliação da dinâmica da água e solutos ao longo da coluna de maneira contínua, ou seja, ao longo do tempo (SILVA et al., 2005). Nesse sentido, o uso da técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) em estudos da dinâmica da água e de solutos no solo demonstra um grande potencial, uma vez que, segundo Coelho e Arruda (2001), essa técnica, além de ser bastante precisa, destaca-se justamente por ser um método não-destrutivo, que não utiliza radiação ionizante e pode ser acoplado a multiplexadores, possibilitando a construção de um sistema de aquisição automática de dados em

curtos intervalos de tempo (da ordem de alguns segundos). De um modo geral, a técnica da TDR baseia-se no sensível efeito da umidade do solo sobre a velocidade de pulsos de microondas em cabos condutores (guia) envoltos pelo solo. O equipamento TDR é formado basicamente por um testador de cabos e um sensor com hastes metálicas ligadas entre si por um cabo coaxial, que medem o tempo gasto para um pulso eletromagnético se deslocar do início ao fim da guia de comprimento conhecido (SOUZA et al., 2001).

A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) tem se mostrado como uma ferramenta eficiente para realizar a medida simultânea do teor de água (θ) e da condutividade elétrica do solo (CEs) em tempo real, de forma contínua, precisa e como mínimo de perturbações na estrutura do solo. A condutividade elétrica do solo (CEs) varia com a condutividade elétrica da fração sólida do solo (CE_{fs}) com o teor de sais e com o teor de água (θ) que, por sua vez interfere na condutividade elétrica da solução do solo (CEss). É necessário, no entanto, viabilizar o uso desta técnica para possibilitar estudos de monitoramento de íons no solo, o que pode ser obtido relacionando-se a concentração de íons (C_i) com CEss e esta com CEs e θ . Wraith e Das (1998) ressaltam que devido à relação entre a CEs e CEss e entre CEss e C_i , a TDR pode auxiliar no monitoramento da distribuição de íons no solo, sob condições de campo.

Com a utilização da TDR pode-se, ao mesmo tempo, determinar, num dado local do solo, o teor de água e a condutividade elétrica (CEs), o que abre caminho para a realização de inferências sobre a condutividade elétrica da solução do solo (CEss) e a concentração de um dado nutriente aplicado (C_i). Isto é possível porque, há uma relação entre condutividade elétrica da solução do solo com teor de água e condutividade elétrica do solo e, há também, relação entre condutividade elétrica da solução do solo e concentração do nutriente. Dessa forma, pode-se calibrar modelos que relacionam CEss com CEs e θ e, modelos que relacionam CEs e C_i , estes modelos podem ser conjugados, resultando num modelo único que relaciona C_i com CEs e θ (SANTOS, 2008).

2.4 Potássio: Importância agronômica e dinâmica no solo

Para Gonçalves et al. (2008) a importância que se dá ao potássio é função da expressividade econômica, visto que o nutriente está presente na fertirrigação da maioria das culturas.

Por seu caráter catiônico, o potássio é tanto mais facilmente adsorvido a matriz

do solo quanto maior for a capacidade de troca de cátions desse solo (MELO et al., 2006).

Quanto a sua mobilidade no solo, via de regra, o potássio se desloca por processo de difusão. No entanto, segundo Malavolta (2005), pode haver fluxo de massa se forem aplicadas doses elevadas do elemento no solo (neste caso, alguma fração imobilizada do elemento é devida a adsorção à matriz do solo).

2.5 Fósforo: Importância agronômica e dinâmica no solo

De acordo com Ribeiro et al. (1999), o fosfato monoamônico (MAP) e o fosfatodiamônico (DAP) são os fertilizantes sólidos mais usados para aplicação via água de irrigação com o objetivo de fornecimento de P às plantas. Devido à baixa solubilidade dos compostos de fósforo no solo e à tendência de ocorrência de equilíbrio em favor da fase sólida, a quantidade de fósforo na solução do solo se torna reduzida (HOLFORD, 1997). Para prevenir a deficiência deste nutriente, torna-se necessária a aplicação de grande quantidade de fósforo no solo (ROSSI et al., 1999). Yamada (2004) relata que os teores de fósforo na solução dos solos das regiões de Cerrados são geralmente muito baixos. Essa característica, associada à alta capacidade que esses solos têm em reter o P na fase sólida, é a principal limitação, quando não é feita, para o desenvolvimento de certas atividades agrícolas rentáveis.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida em cinco etapas: A primeira etapa foi a coleta de dados relativos aos solos estudados em laboratório. Na segunda etapa confeccionou-se as colunas de solo e realizou-se um experimento para obter as curvas de eluição de potássio e fósforo variando o fluxo da solução que passa através dessas colunas de solo. Na terceira etapa determinou-se os parâmetros de transporte por meio de soluções analíticas utilizando-se o programa computacional DISP. Na quarta etapa realizou-se um segundo experimento, onde foram feitos testes de lixiviação em colunas de solo para se obter as concentrações de soluto em diferentes profundidades ao longo do tempo. Na quinta e última etapa utilizou-se os parâmetros de transporte obtidos no DISP para simular o deslocamento dos solutos no próprio programa, no programa computacional Hydrus1-D e comparar com os resultados obtidos experimentalmente.

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia Agrícola. As análises físico-químicas dos solos utilizados e as concentrações de soluto nos recipientes coletados foram determinadas no Departamento de Solos, ambos pertencentes à Universidade Federal de Viçosa.

3.1 Caracterização dos solos utilizados na pesquisa

Os solos utilizados foram: um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) de textura muito argilosa proveniente da cidade de Sete Lagoas - MG e um Neossolo Quartzarênico órtico (NQo) de textura franco-arenosa proveniente da cidade de Três Marias - MG, tendo-se, portanto, dois solos com características distintas. Os solos estudados foram coletados na camada de 0 a 20 cm de profundidade.

Tabela 1 - Parâmetros físicos e químicos analisados no Laboratório de Solos - UFV

Parâmetros	LVd	NQo
Areia grossa (kg kg ⁻¹)	0,078	0,180
Areia fina (kg kg ⁻¹)	0,039	0,606
Silte (kg kg ⁻¹)	0,135	0,077
Argila (kg kg ⁻¹)	0,748	0,138
Massa específica do solo (g cm ⁻³)	1,17	1,39
Massa específica das partículas (g cm ⁻³)	2,56	2,82
Porosidade (%)	54,30	50,71
Condutividade hidráulica (cm h ⁻¹)	24,43	26,81
pH em água (1: 2,5)	4,51	4,31
pH em KCl (1: 2,5)	4,37	4,26
Fósforo trocável (mg dm ⁻³)	4,0	0,6
Potássio trocável (mg dm ⁻³)	31	10
Sódio trocável (mg dm ⁻³)	0,0	0,0
Cálcio trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,26	1,48
Magnésio trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,13	0,03
Alumínio trocável (cmol _c dm ⁻³)	1,20	0,50
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	8,6	3,0
Soma de bases trocáveis (cmol _c dm ⁻³)	1,69	0,32
Capacidade de troca catiônica efetiva (cmol _c dm ⁻³)	2,89	0,82
Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (cmol _c dm ⁻³)	10,29	3,32
Índice de saturação por bases (%)	16,4	9,6
Índice de saturação por alumínio (%)	41,5	61,0
Índice de saturação por sódio (%)	0,00	0,00
Matéria orgânica = Carbono orgânico x 1,724 - Walkley-Black	5,89	0,77
Fósforo remanescente (mg L ⁻¹)	12,2	33,5

A condutividade hidráulica do solo saturado foi determinada nas próprias colunas que foram montadas para o ensaio de lixiviação, utilizando-se o método do permeâmetro de carga constante (EMBRAPA, 1997) e descrita na equação 15.

$$K_0 = \frac{V_p}{A \cdot t_0 \left(\frac{L + h_p}{L} \right)} \text{ onde:} \quad (\text{Eq. 15})$$

em que:

K_0 = Condutividade hidráulica (cm h^{-1});

V_p = Volume de solução percolada na extremidade inferior da coluna (cm^3);

A = Área da seção transversal da coluna (cm^2);

t_0 = Tempo para coleta do volume percolado (h);

L = Altura da camada de solo no interior da coluna (cm);

h_p = Altura da coluna de solução sobre a camada de solo ou carga hidráulica (cm).

Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado foram calculados utilizando-se a média de três repetições para cada tipo de solo. Durante os testes trabalhou-se com uma carga hidráulica de 4 cm.

3.2 Preparo das colunas de solo

As colunas de lixiviação foram preparadas em tubos de PVC branco (esgoto), com diâmetro interno de 4,7 cm. Os comprimentos foram calculados em função da camada de 20 cm de solo no interior das colunas, da carga hidráulica da solução mantida sobre a camada de solo, e que determinam os fluxos das soluções que passam através dessas colunas, e mais uma folga de 3 cm. Para calcular os valores das cargas hidráulicas necessitou-se, portanto, estabelecer os gradientes hidráulicos, conforme a Tabela 2, e aplicar na equação 16. Os valores dos três gradientes foram estabelecidos baseado em pesquisas, podendo citar Ribeiro (2011), que trabalhando com os mesmos solos adotou valores de 1,12, 1,25, 1,36 e 1,47 para o Latossolo Vermelho Distrófico, e 1,39, 1,51, 1,64, e 1,79 para o Neossolo Quartzarênico Órtico.

Tabela 2 - Gradientes hidráulicos utilizados para obter as curvas de eluição

Tipo de solo	Gradientes hidráulicos		
Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)	1,10	1,25	1,40
Neossolo Quartzarênico Órtico (NQo)	1,40	1,55	1,70

$$i = -\left(\frac{h_p}{L} + 1\right) \quad \text{onde:} \quad (\text{Eq. 16})$$

em que:

i = Gradiente hidráulico;

h_p = Altura da coluna de solução sobre a camada de solo (carga hidráulica);

L = Altura da camada de solo no interior da coluna.

Os comprimentos das colunas foram determinados somando-se: os 20 cm referentes a camada de solo, os 3 cm da folga ou sobra de cada coluna, e as cargas hidráulicas aplicadas em cada coluna, conforme a Tabela 3, e ilustrado na Figura 2.

Tabela 3 - Cargas hidráulicas aplicadas e comprimento das colunas de solo preparadas

Tipos de solos	Cargas hidráulicas (cm)	Comprimentos das colunas (cm)
LVd	2	25
	5	28
	8	31
NQo	8	31
	11	34
	14	37

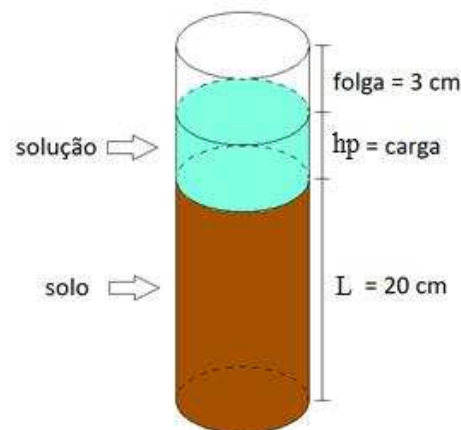


Figura 2 - Esquema representando uma coluna de solo

Os solos utilizados para preencher as colunas foram secos ao ar e passados em peneiras de 2 mm de abertura de malha. Na extremidade inferior das colunas foram fixadas telas de malha fina (≤ 2 mm) e acima da tela colocou-se lã de vidro para evitar a perda de partículas de solo. Na extremidade superior também utilizou-se lã de vidro para evitar a desestruturação excessiva do solo. A massa de solo calculada e

utilizada em cada coluna está apresentada na tabela 4. Essas quantias foram colocadas nas colunas em camadas de, aproximadamente 2,0 cm e misturando sempre a camada anterior com a subsequente (JONG vanLIER, 2010).

Durante o preenchimento das colunas adicionava-se um décimo da massa total por vez, realizando-se o acomodamento do solo na coluna até atingir a altura e massa específica desejada.

Tabela 4 - Massa de solo utilizada para o preenchimento das colunas em cada solo

Tipos de solos	Volume de solo (cm ³) (V _s = área da seção da coluna × altura da camada de solo)	Massa de solo seco em cada coluna (g)
LVd	$V_s = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot h = 347$ (Eq. 17)	405,99
NQo		482,33

3.3 Obtenção das curvas de eluição

Antes de iniciar-se a lixiviação do potássio e fósforo nas colunas de solo, as mesmas foram previamente saturadas. Para isto, foram colocadas em recipientes contendo água destilada até dois terços da altura da camada de solo, permanecendo por um período mínimo de 72 horas objetivando-se a saturação do solo de forma ascendente.

Após o período de saturação, as colunas foram fixadas em um suporte, sendo que na extremidade superior de cada coluna foi mantida a carga hidráulica constante conforme a Tabela 3, utilizando-se frascos de Mariotte para manter o fluxo constante.

Os fluxos de solução foram determinados no momento do ensaio conforme a equação 18.

$$q = \frac{V_p}{A \cdot t_0} \quad (\text{Eq. 18})$$

em que:

q = Fluxo de solução que passa através da coluna de solo (cm h⁻¹);

V_p = Volume de solução percolada na extremidade inferior da coluna (cm³);

A = Área da seção transversal da coluna (cm²);

t_0 = Tempo para coleta do volume percolado (h);

Durante o ensaio, inicialmente aplicou-se água e em seguida, interrompeu-se a aplicação da mesma e imediatamente aplicou-se as soluções deslocadoras. Os fluidos deslocadores foram constituídos de uma solução de fosfato monoamônico (MAP) com concentração de 1000 mg L⁻¹ do íon P, e uma solução de cloreto de potássio (KCl) com concentração de 150 mg L⁻¹ do íon K⁺. Santos (2008) trabalhando com soluções deslocadoras de fósforo aplicou 1055,1 mg L⁻¹ no Latossolo Vermelho Distrófico, e 277,8 mg L⁻¹ no Neossolo Quartzarênico Órtico, enquanto que Ribeiro (2011) trabalhando com soluções deslocadoras de potássio aplicou 130 mg L⁻¹ nos mesmos solos.

Para obter estas concentrações pré-estabelecidas no preparo das soluções deslocadoras, utilizou-se o MAP (purificado) com 61% de P₂O₅, e o cloreto de potássio 60% de K₂O, obtendo-se 3,76 g L⁻¹ de MAP e 0,30 g L⁻¹ de KCl.

No experimento utilizou-se sete e um volumes de poros de solução contendo fósforo no Latossolo Vermelho Distrófico e sete volumes de poros no Neossolo Quartzarênico Órtico; sete volumes de poros de solução contendo potássio no Latossolo Vermelho Distrófico e cinco volumes de poros no Neossolo Quartzarênico Órtico, conforme a Tabela 5. Ribeiro (2011), aplicou sete volumes de poros no Latossolo Vermelho Distrófico e cinco volumes de poros no Neossolo Quartzarênico Órtico, em solução contendo potássio. Santos (2008), aplicou vinte e três volumes de poros no Latossolo Vermelho Distrófico e sete volumes de poros no Neossolo Quartzarênico Órtico, em solução contendo fósforo.

Tabela 5 - Volumes de soluções deslocadoras aplicados

Tipo de solo	Volume de poros (cm ³)	Número de volume de poros		Volume de solução aplicada (cm ³)	
		P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O
LVd	188,42	21	7	3956,84	1318,95
NQo	175,96	7	5	1231,75	879,82

As soluções lixiviadas foram coletadas em intervalos de 0,35 e 0,25 número de volume de poros (nvp) para os solos NQo e LVd, respectivamente.

Os tempos de aplicação ou duração dos pulsos foram calculados em função do volume de solução aplicada e dos fluxos.

As curvas de eluição foram plotadas com os dados obtidos, considerando-se concentração relativa (C/C_0), em que C é a concentração do efluente coletado e C_0 a concentração da solução deslocadora, versus volume de efluente coletado (em unidade de volume de poros), conforme o método apresentado por Ramos (1998).

3.4 Determinação dos parâmetros de transporte por meio de soluções analíticas

Para determinar os parâmetros de transporte por meio das soluções analíticas, utilizou-se o programa computacional DISP (BORGES JÚNIOR e FERREIRA, 2006), fornecendo os dados de entrada ilustrados na Figura 3. Os dados de entrada estão apresentados no Apêndice A.

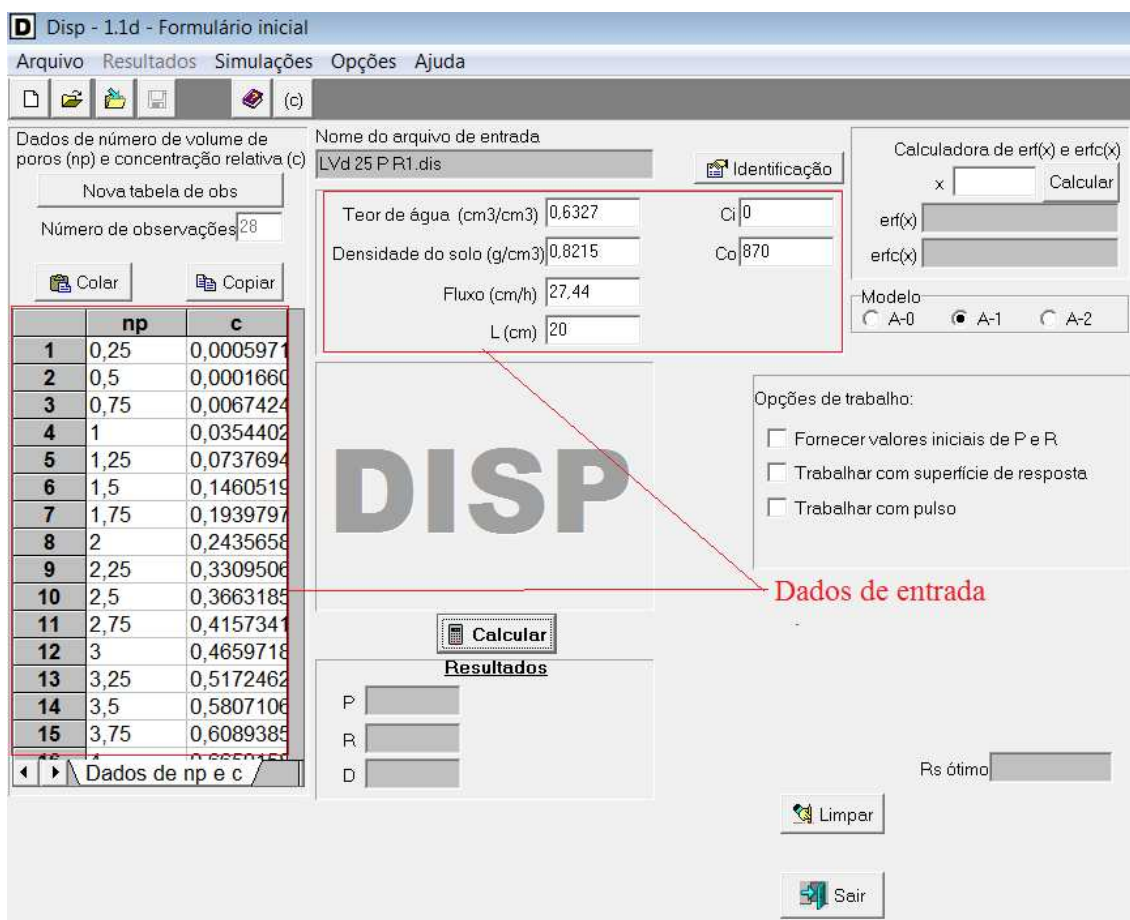


Figura 3 - Dados de entrada para calcular os parâmetros de transporte no programa computacional DISP.

No DISP é possível utilizar três modelos distintos descritos no programa como A-0, A-1 e A-2, podendo-se observar no lado superior direito na Figura 3. Dentre eles, o modelo A-1 é o que considera que os valores de concentração, obtidos

experimentalmente e fornecidos ao programa para determinar os parâmetros de transporte, foram determinados no percolado.

Após a inserção dos dados de entrada, o programa calcula analiticamente os parâmetros de transporte R, D e P, e ajusta a curva de eluição, conforme um exemplo ilustrado na Figura 4.

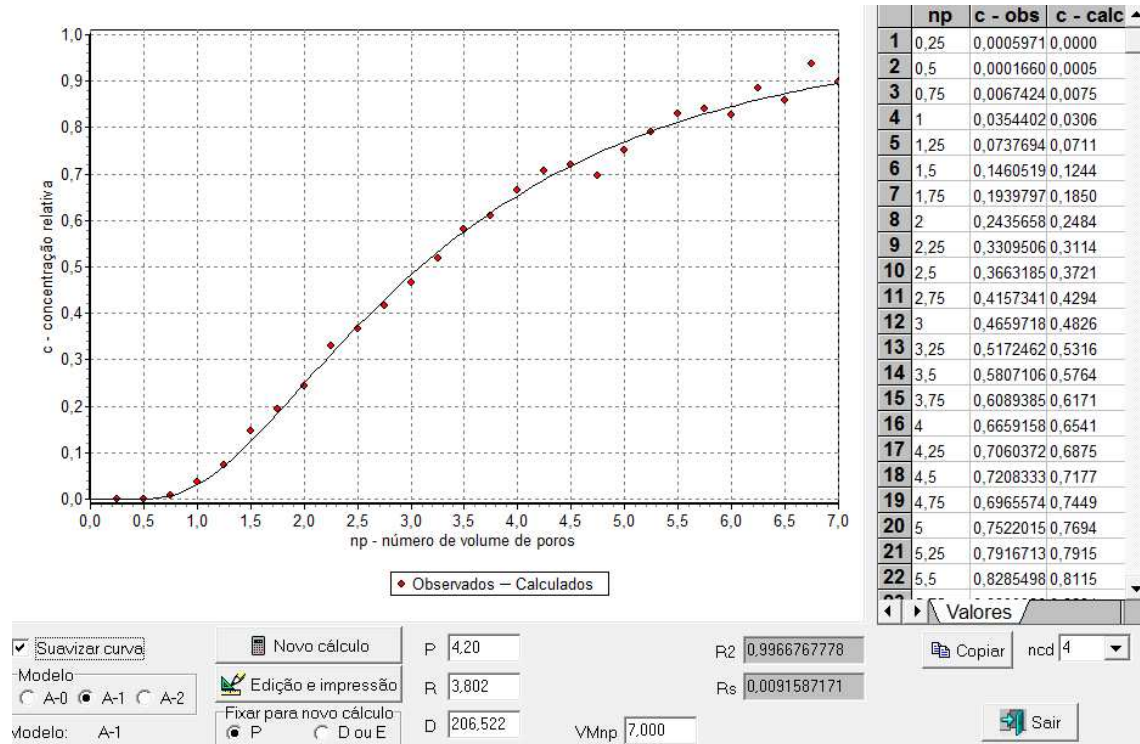


Figura 4 - Exemplo de curva de eluição e o resultado dos parâmetros de transporte obtidos pelo DISP.

Para calcular o coeficiente de partição (K_d) utilizou-se a equação 19.

$$R = 1 + \rho \frac{K_d}{\theta} \quad (\text{Eq. 19})$$

em que:

R = fator de retardamento;

ρ = massa específica do solo (g cm^{-3});

K_d = coeficiente de partição ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$);

θ = porosidade (ads).

Para calcular a dispersividade (λ) utilizou-se a equação 20.

$$D = D_0 + \lambda v \quad (\text{Eq. 20})$$

em que:

D = coeficiente dispersivo-difusivo ($L^2 T^{-1}$);

D_0 = coeficiente de difusão molecular do soluto em água ($L^2 T^{-1}$);

λ = dispersividade (L);

v = velocidade média do escoamento da solução do solo (LT^{-1}).

3.5 Ensaio de lixiviação monitorando as concentrações de solutos em diferentes profundidades utilizando sondas acopladas a TDR

Para este ensaio foram utilizados os mesmos solos usados na determinação dos parâmetros de transporte: Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico órtico (NQo). Semelhante ao experimento anterior, as colunas foram montadas utilizando-se tubo de PVC branco (tubo para esgoto) sendo estes de 15 cm de diâmetro e 60 cm de comprimento. Trabalhou-se com o diâmetro das colunas maior em relação ao primeiro experimento, devido a necessidade de penetração das hastes das sondas no sentido da seção transversal das colunas de solo. A camada de solo preenchida em cada coluna foi de 50 cm. Aplicou-se soluções contendo cloreto de potássio (KCl) na concentração de 150 mg L^{-1} do íon K^+ , e fosfato monoamônico (MAP) na concentração de 1000 mg L^{-1} do íon P, para cada tipo de solo, perfazendo quatro colunas de solo as quais foram nomeadas de LVd K, LVd P, NQo K e NQo P.

As dosagens aplicadas nas quatro colunas de solo foram relacionadas como se estivesse procedendo as adubações em áreas de plantio, calculando-se a quantidade de adubo por hectare, conforme apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Massas de íons e adubos aplicados no solo

		Massa de íon aplicada (kg/ha)		Massa de adubo aplicada (kg/ha)	
		K	P	KCl	MAP
Tipo de solo	LVd	8,59	54,69	17,18	205,63
	NQo	10,76	73,14	21,52	275,01

Neste experimento objetivou-se monitorar a variação da concentração dos íons K^+ e P em cinco profundidades, 5cm, 15 cm, 25 cm, 35 cm e 45 cm as quais foram instaladas sondas acopladas a TDR para este propósito. Antes de realizar os ensaios, fez-se necessário dois tipos de calibração para transformar as leituras de condutividade elétrica da TDR em valores de concentração de nutrientes.

A primeira calibração foi em relação as soluções aplicadas e a influência das sondas nas leituras. As calibrações para as soluções contendo KCl e MAP, cujas concentrações de K⁺ e P variaram a cada 7,5 mg L⁻¹ de 0 a 180 mg L⁻¹ e a cada 50 mg L⁻¹ de 0 a 1200 mg L⁻¹, respectivamente, foram feitas separadamente. A cada concentração diferente eram realizadas leituras de condutividade elétrica na solução (CE_s) com cinco sondas diferentes, as quais seriam usadas nas colunas de solo posteriormente, objetivando-se identificar variações nos valores de CE_s para cada sonda, e relacionar a média das leituras de CE_s das cinco sondas com a concentração na solução (C). As leituras obtidas em diferentes concentrações dos íons K⁺ e P nas soluções estão apresentadas no Apêndice B.

Verificou-se variabilidade nas leituras de CE_s das sondas para uma mesma concentração, confirmando que há influência da sonda, devendo realizar correções nas leituras. Para expressar este comportamento foram determinados os fatores de influência F1, F2, F3, F4 e F5 para as sondas 1 (5cm), 2 (15cm), 3 (25 cm), 4 (35cm) e 5 (45cm) respectivamente, calculados pela relação entre a média das leituras na própria sonda e a média global, e apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Fatores de influência das sondas da TDR

	F1	F2	F3	F4	F5
Solução (K⁺)	0,8826	1,0295	0,9804	1,0291	1,0785
Solução (P)	0,8823	1,0294	0,9804	1,0294	1,0784

Utilizando-se as médias obtidas das leituras nas cinco sondas de condutividade elétrica na solução (CE_s) e as concentrações nas soluções de potássio C(K⁺) e fósforo C(P), ajustou-se as equações da concentração em função da condutividade elétrica para as duas soluções por regressão polinomial.

$$C(K^+) = -4637 CE_s^3 + 2870 CE_s^2 + 102,19 CE_s - 4,1061 \quad (\text{Eq. 21})$$

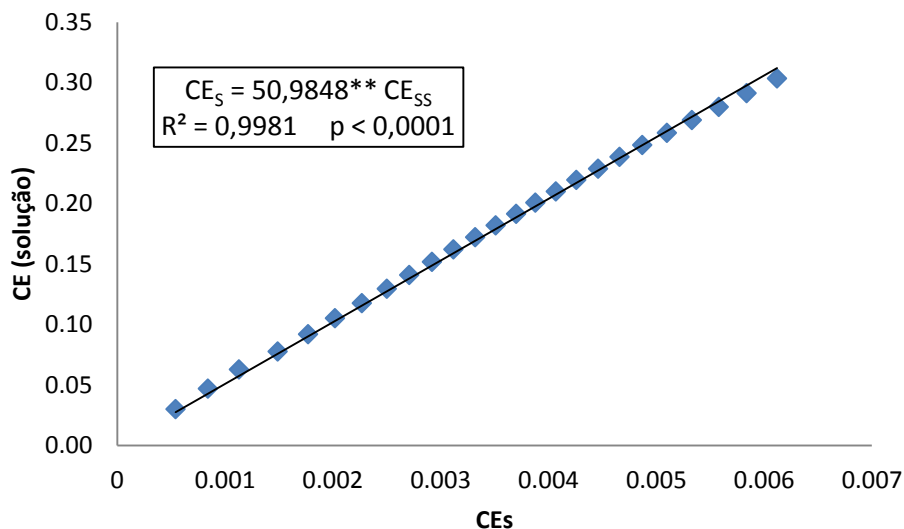
$$CE_s = 4E-08 C(K^+)^3 - 1,2E-05 C(K^+)^2 + 2,5869E-03 C(K^+) + 3,0195E-02 \quad (\text{Eq. 22})$$

$$C(P) = 77684 CE_s^4 - 64713 CE_s^3 + 19348 CE_s^2 - 541,46 CE_s + 11,4038 \quad (\text{Eq. 23})$$

$$CE_s = -1E-11 C(P)^3 - 2,5E-07 C(P)^2 + 6,905 E-04 C(P) + 3,0221E-02 \quad (\text{Eq. 24})$$

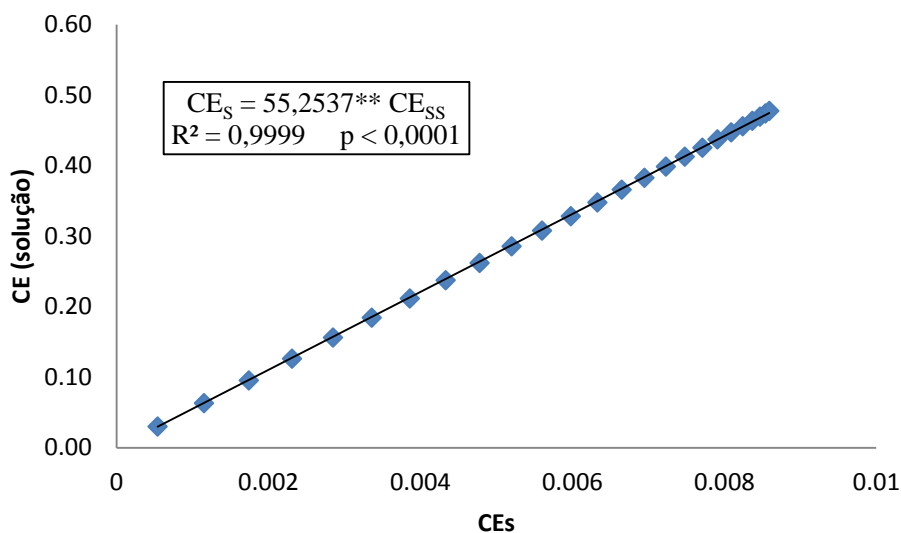
Na segunda calibração foram aplicadas as soluções de cloreto de potássio (KCl) e fosfato monoamônico (MAP) em cada tipo de solo diretamente nas respectivas colunas montadas, variando-se as concentrações dos íons K⁺ e P similarmente a

primeira calibração, monitorando-se, simultaneamente, as leituras de condutividade elétrica na solução do solo (CE_{ss}) utilizando as sondas instaladas nas colunas acopladas a TDR. Após duas horas de aplicação destas soluções nas colunas de solo observou-se que as leituras da CE_{ss} na sonda 1, colocada à 5 cm de profundidade já haviam estabilizado, concluindo-se então que a concentração dos íons a esta profundidade seria próxima da concentração da solução aplicada. Para relacionar a condutividade elétrica na solução do solo à profundidade de 5 cm pela sonda 1 com a concentração do íon no solo na mesma profundidade, fez-se uma correção no valor da concentração considerando a simulação feita no programa computacional DISP. Foi estabelecida relações entre condutividade elétrica na solução do solo (CE_{ss}) e condutividade elétrica na solução (CE_s), considerando que as leituras foram feitas nas mesmas concentrações de íons, sendo uma para cada coluna de solo, conforme as Figuras 5, 6, 7 e 8.



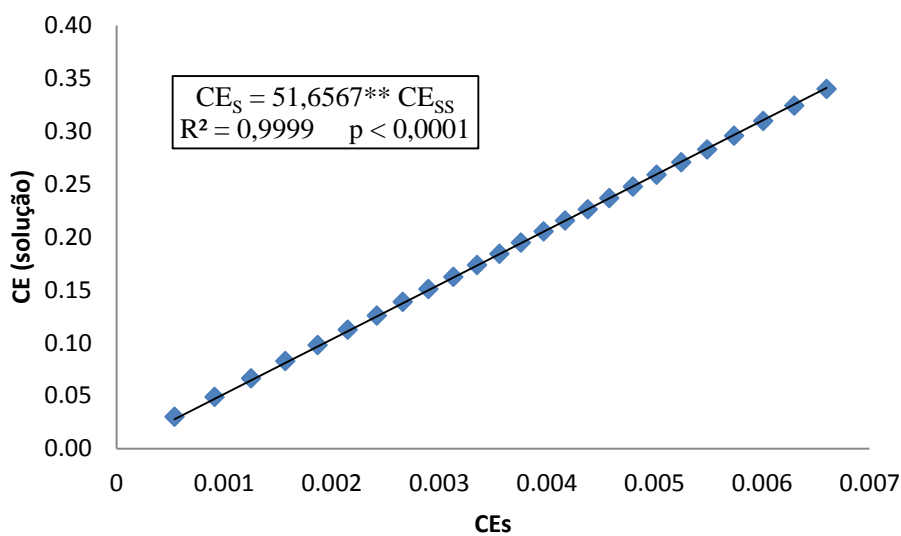
** significativo a 1% de probabilidade.

Figura 5 - Relação entre a condutividade elétrica na solução do solo (CE_{ss}) e a condutividade elétrica na solução (CE_s) para o potássio no Latossolo Vermelho distrófico (LVd).



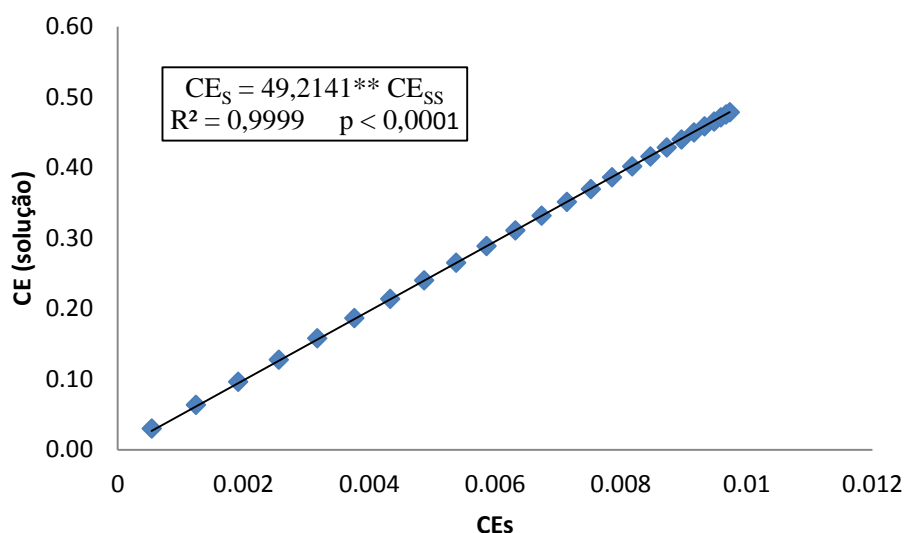
** significativo a 1% de probabilidade.

Figura 6 - Relação entre a condutividade elétrica na solução do solo (CE_{ss}) e a condutividade elétrica na solução (CE_s) para o fósforo no Latossolo Vermelho distrófico (LVd).



** significativo a 1% de probabilidade.

Figura 7 - Relação entre a condutividade elétrica na solução do solo (CE_{ss}) e a condutividade elétrica na solução (CE_s) para o potássio no Neossolo Quartzarênico órtico (NQo).



** significativo a 1% de probabilidade.

Figura 8 - Relação entre a condutividade elétrica na solução do solo (CE_{ss}) e a condutividade elétrica na solução (CE_s) para o fósforo no Neossolo Quartzarênico órtico (NQo).

Na relação entre CE_{ss} e CE_s fez-se regressão linear simples, ajustando-se os dados à origem, obtendo-se os coeficientes (β) em cada coluna de solo. Para estas relações, os dados utilizados de CE_s foram as médias das cinco sondas, tornando-se necessário obter os coeficientes específicos para cada sonda, calculados pelo coeficiente médio obtido na regressão dividido pelo fator de influência da sonda conforme a Tabela 7. Os coeficientes que relacionam a CE_{ss} e CE_s estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes entre a condutividade elétrica na solução do solo (CE_{ss}) e a condutividade elétrica na solução (CE_s)

Coluna de solo	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
	(5cm)	(15cm)	(25cm)	(35cm)	(45cm)
Potássio no Latossolo Vermelho distrófico	57,76	49,52	52,00	49,54	47,27
Fósforo no Latossolo Vermelho distrófico	62,62	53,67	56,35	53,67	51,23
Potássio no Neossolo Quartzarênico órtico	58,52	50,17	52,68	50,19	47,89
Fósforo no Neossolo Quartzarênico órtico	55,77	47,80	50,19	47,80	45,63

Após as calibrações foram realizados os ensaios de lixiviação nas colunas de solo, aplicando-se as soluções deslocadoras durante 1 hora, sendo que antes de aplicar as soluções deslocadoras as colunas já estavam saturadas com água destilada. Foram feitas as leituras nas sondas nas cinco profundidades a cada minuto com auxílio de um

datalogger para estimar a movimentação dos solutos nas colunas de solo. Os deslocamentos dos solutos nas colunas de solo foram também simulados nos programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D.

3.6 Comparação entre valores simulados e observados

A análise de desempenho dos programas computacionais foi feita comparando os valores simulados no DISP e HYDRUS 1-D com os valores medidos experimentalmente e também entre eles. A metodologia adotada para comparação dos resultados se fundamenta no erro-padrão da estimativa (EPE), calculada pela equação 25. O melhor método de estimativa foi aquele que apresentou o menor EPE.

$$EPE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (\text{Eq. 25})$$

em que:

EPE = erro-padrão da estimativa (decimal);

Y_i = valores de concentração relativa simulados nos programas computacionais (decimal);

X_i = valores de concentração relativa obtidos experimentalmente (decimal);

n = número de observações.

A aproximação dos valores simulados no DISP e HYDRUS 1-D, em relação aos valores medidos experimentalmente, foi obtida por um índice designado concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985), onde seus valores variam desde zero, onde não existe concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice de concordância (d) foi calculado aplicando-se a equação 26.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left[(|Y_i - \bar{X}|) + (|X_i - \bar{X}|) \right]^2} \quad (\text{Eq. 26})$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste de Willmott;

\bar{X} = média dos valores de concentração relativa obtidos experimentalmente (decimal).

Para validação do modelo, obteve-se também o coeficiente de correlação de Pearson (r) pela equação 27 e o coeficiente de confiança ou desempenho (c) pela equação 28.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (\text{Eq. 27})$$

em que:

r = coeficiente de correlação de Pearson;

\bar{Y} = média dos valores de concentração relativa simulados nos programas computacionais (decimal).

$$c = r \cdot d \quad (\text{Eq. 28})$$

em que:

c = coeficiente de confiança ou desempenho.

Segundo Cohen (1988), o coeficiente de correlação (r) pode ser classificado como: “muito baixo” ($r < 0,1$); “baixo” ($0,1 < r < 0,3$); “moderado” ($0,3 < r < 0,5$); “alto” ($0,5 < r < 0,7$); “muito alto” ($0,7 < r < 0,9$); e “quase perfeito” ($r > 0,9$).

O coeficiente c, proposto por Camargo e Sentelhas (1997), é interpretado de acordo com os referidos autores como: “ótimo” ($c > 0,85$); “muito bom” ($0,76 < c < 0,85$); “bom” ($0,66 < c < 0,75$); “mediano” ($0,61 < c < 0,65$), “sofrível” ($0,51 < c < 0,60$), “mau” ($0,41 < c < 0,50$) e “péssimo” ($c < 0,40$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Parâmetros de transporte

Durante os ensaios de lixiviação objetivando-se obter as curvas de eluição para determinar os parâmetros de transporte, trabalhou-se com diferentes cargas hidráulicas, medindo-se as vazões de solução que passaram através das colunas de solo. Com os resultados calculou-se as médias dos fluxos, velocidades e condutividade hidráulicas para o Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e o Neossolo Quartzarênico órtico (NQo), conforme apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Fluxo, velocidade da solução e condutividade hidráulica para o Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e o Neossolo Quartzarênico órtico (NQo)

Tipo de solo	Carga hidráulica (cm)	Fluxo (cm/h)	Velocidade (cm/h)	Condutividade hidráulica (cm/h)
Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)	2	27,49	50,62	24,99 a
	5	32,08	59,08	25,66 a
	8	35,45	65,29	25,32 a
Neossolo Quartzarênico Órtico (NQo)	8	37,70	74,34	26,93 a
	11	40,11	79,10	25,88 a
	14	45,18	89,09	26,58 a

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. A comparação é válida somente para o mesmo tipo de solo.

Na Tabela 9 observa-se que não houve variação significativa da condutividade hidráulica com a variação da carga hidráulica para ambos os solos. Ribeiro (2011), em sua pesquisa variando o fluxo em colunas de diferentes comprimentos utilizando-se os mesmos solos, também não obteve diferença significativa na condutividade hidráulica, confirmando o resultado de outras pesquisas. Com relação aos valores obtidos, observa-se valores de condutividade hidráulica semelhantes e superiores a 25 cm h^{-1} nos dois solos estudados. Santos (2008), trabalhando com os mesmos solos obteve condutividade hidráulica em torno de 28 cm h^{-1} para o Latossolo Vermelho Distrófico e 53 cm h^{-1} para o Neossolo Quartzarênico órtico indicando uma condutividade hidráulica maior no segundo, enquanto Ribeiro (2011) obteve 37 cm h^{-1} para o Latossolo Vermelho Distrófico e 13 cm h^{-1} para o Neossolo Quartzarênico órtico, indicando o contrário. Para explicar as diferenças encontradas mesmo trabalhando-se com solos de mesma classificação é necessário entender que existe uma elevada variabilidade espacial da condutividade

hidráulica, que é função tanto das características do meio, como porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000), quanto das características do fluido, como peso específico e viscosidade cinemática (FETTER, 2001), que por sua vez são influenciados pela temperatura no momento do ensaio.

Enquanto as curvas de eluição caracterizam o deslocamento miscível das soluções, os parâmetros de transporte, obtidos por meio de ajustes, quantificam esta movimentação (PINHO, 2009). O resultado das médias dos parâmetros de transporte obtidos no DISP para o Latossolo Vermelho Distrófico e para o Neossolo Quartzarênico Órtico estão apresentados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 - Médias dos parâmetros de transporte obtidos no DISP para o Latossolo Vermelho Distrófico

Solo	Íon	Carga hidráulica (cm)	Fluxo (cm h ⁻¹)	Parâmetros de transporte			
				R (admens.)	D (cm ² h ⁻¹)	λ (cm)	Kd (cm ³ g ⁻¹)
LVd	Potássio	2	27,56	10,02 aA	1185,76 aA	27,26 aA	6,95 aA
		5	33,45	9,64 aA	1164,21 aA	22,13 aA	6,66 aA
		8	36,19	8,29 aA	1060,70 aA	18,32 aA	5,62 aA
LVd	Fósforo	2	27,41	3,77 bA	159,53 bA	3,67 bA	2,13 bA
		5	30,71	3,85 bA	145,56 bA	2,99 bA	2,20 bA
		8	34,72	3,84 bA	137,10 bA	2,52 bA	2,15 bA

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letra minúscula faz a comparação entre os íons para a mesma carga hidráulica e letra maiúscula faz a comparação entre as cargas hidráulicas para o mesmo íon.

LVd = Latossolo Vermelho Distrófico, R = Fator de retardamento, D = Coeficiente dispersivo-difusivo, λ = Dispersividade e Kd = Coeficiente de partição.

Tabela 11 - Médias dos parâmetros de transporte obtidos no DISP para o Neossolo Quartzarênico Órtico

Solo	Íon	Carga hidráulica (cm)	Fluxo (cm h ⁻¹)	Parâmetros de transporte			
				R (admens.)	D (cm ² h ⁻¹)	λ (cm)	Kd (cm ³ g ⁻¹)
NQo	Potássio	8	37,04	2,00 aA	264,63 aA	3,63 aA	0,40 aA
		11	39,48	2,10 aA	249,12 aA	3,20 aA	0,43 aA
		14	45,31	1,54 aB	184,05 aA	2,06 aA	0,21 aB
NQo	Fósforo	8	38,36	1,82 aA	116,65 bA	1,54 bA	0,32 aA
		11	40,75	1,77 bA	94,78 bA	1,15 bA	0,30 bA
		14	45,05	1,41 aB	129,95 aA	1,50 aA	0,16 aB

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Letra minúscula faz a comparação entre os íons para a mesma carga hidráulica e letra maiúscula faz a comparação entre as cargas hidráulicas para o mesmo íon.

NQo = Neossolo Quartzarênico Órtico, R = Fator de retardamento, D = Coeficiente dispersivo-difusivo, λ = Dispersividade e Kd = Coeficiente de partição.

No Latossolo Vermelho distrófico (LVd) quando aplicado potássio (K) os fluxos variaram de 27,56 a 36,19 cm h⁻¹, quando aplicado fósforo (P) os fluxos foram de 27,41 a 34,72 cm h⁻¹. No Neossolo Quartzarênico órtico (NQo) quando aplicado potássio (K) os fluxos variaram de 37,04 a 45,31 cm h⁻¹, quando aplicado fósforo (P) os fluxos variaram de 38,36 a 45,05 cm h⁻¹.

No Latossolo Vermelho distrófico (LVd) observou-se um maior retardamento na solução de potássio em relação a solução de fósforo, o que pode ser explicado pela concentração de fósforo na solução deslocadora ser muito superior a de potássio, saturando rapidamente a capacidade adsorção deste solo. Frente a isso, observou-se valores muito elevados do coeficiente dispersivo-difusivo, da dispersividade e do coeficiente de partição na solução de potássio, porém não houve diferença significativa com a variação das cargas hidráulicas em nenhuma das soluções deslocadoras.

No Neossolo Quartzarênico órtico (NQo), comparando as soluções de potássio e fósforo, observou-se diferença significativa apenas quando utilizou-se carga hidráulica de 11 cm nas colunas, no fator de retardamento e no coeficiente de partição. Já em relação ao coeficiente dispersivo-difusivo e a dispersividade, observou-se diferença significativa quando utilizou-se as cargas hidráulicas de 8 cm e 11 cm nas colunas. Comparando-se cargas hidráulicas diferentes na mesma solução deslocadora, observou-se que não houve diferença significativa com a variação das cargas hidráulicas em nenhuma das soluções deslocadoras para o coeficiente dispersivo-difusivo e a dispersividade, enquanto que, para o fator de retardamento e o coeficiente de partição, observou-se diferença significativa somente quando aplicou-se a carga hidráulica de 14 cm, tanto na solução de potássio quanto na de fósforo, o que indica um menor retardamento.

Santos (2008), pesquisando um Latossolo Vermelho distrófico e um Neossolo Quartzarênico órtico, obteve valores médios do fator de retardamento para o fósforo de 4,56 e 2,52 respectivamente. Silva (2009) apresentou valores médios do fator de retardamento para o potássio de 6,43 e 1,72 para um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico e um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, respectivamente.

Ribeiro (2011) em sua pesquisa, concluiu que com o aumento da velocidade da solução deslocadora, houve uma diminuição do fator de retardamento, o que pode ser observado no presente trabalho.

Santos (2008) obteve valores do coeficiente dispersivo-difusivo em solução de fósforo de 257,11 e 528,93 no Latossolo Vermelho distrófico e no Neossolo

Quartzarênico órtico, respectivamente. A dispersividade no Latossolo Vermelho distrófico foi maior em relação ao Neossolo Quartzarênico órtico.

Em relação ao coeficiente de partição, quanto menor o valor, menor a capacidade que o solo apresenta de adsorver íons na fase sólida. Os valores menores no Neossolo Quartzarênico órtico encontrados, confirmam portanto a sua menor capacidade de adsorção em relação ao Latossolo Vermelho distrófico, o que foi observado na presente pesquisa e também em Santos (2008). Isso explica o fato da solução de potássio mesmo em baixa concentração ter sido capaz de saturar rapidamente a fração sólida do Neossolo Quartzarênico órtico na presente pesquisa, o que fez com que os valores dos parâmetros de transporte não destoassem tanto quanto no Latossolo Vermelho distrófico, em que a concentração de potássio na solução deslocadora foi insuficiente comparada a de fósforo.

4.2 Concentrações de soluto ao longo do tempo e da profundidade

Nas Figuras 9, 10, 11 e 12 estão apresentados os valores de concentração dos solutos ao longo do tempo, determinados experimentalmente com auxílio das sondas TDR instaladas nas profundidades de 5, 15, 25, 35 e 45 cm.

Comparando a movimentação do íon potássio em relação ao fósforo no Latossolo Vermelho distrófico, conforme as Figuras 9 e 10, após 15 min aplicando as soluções deslocadoras, verifica-se a 5 cm de profundidade, uma concentração relativa maior de potássio na solução do solo, cerca de 0,6 enquanto para o fósforo chegou em torno de 0,53. Decorridos 30 min, à 15 cm de profundidade verifica-se uma concentração relativa de 0,25 para o potássio e 0,15 para o fósforo. Após 45 min, à 25 cm de profundidade a concentração relativa de potássio chegou a 0,1 e no fósforo a 0,03. Observa-se apenas no início dos testes uma facilidade maior do íon potássio movimentar-se no solo, principalmente na frente de avanço da solução deslocadora.

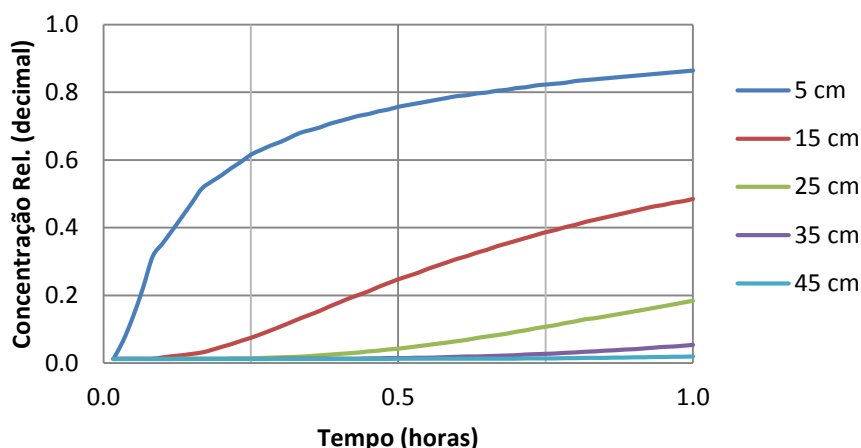


Figura 9 - Concentração relativa de potássio em função do tempo e das profundidades estudadas em Latossolo Vermelho distrófico.

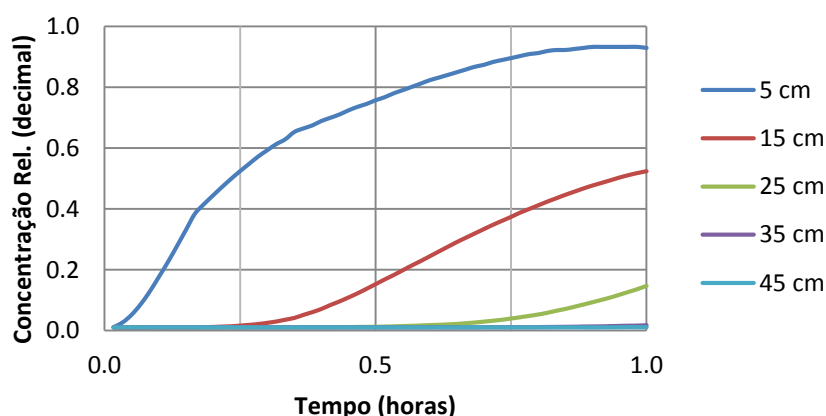


Figura 10 - Concentração relativa de fósforo em função do tempo e das profundidades estudadas em Latossolo Vermelho distrófico.

Em função da concentração muito maior de fósforo na solução deslocadora, cerca de 1000 mg L^{-1} , enquanto que no potássio foi de 150 mg L^{-1} , a camada mais superficial tende-se a saturar primeiro no solo em que foi aplicado a solução de fósforo.

Após cerca de 40 minutos aplicando as soluções deslocadoras, observa-se que a camada mais superficial já está mais próxima da saturação do íon fósforo, e partir daí nesta camada a concentração de fósforo na solução do solo passa a ser maior em relação ao potássio.

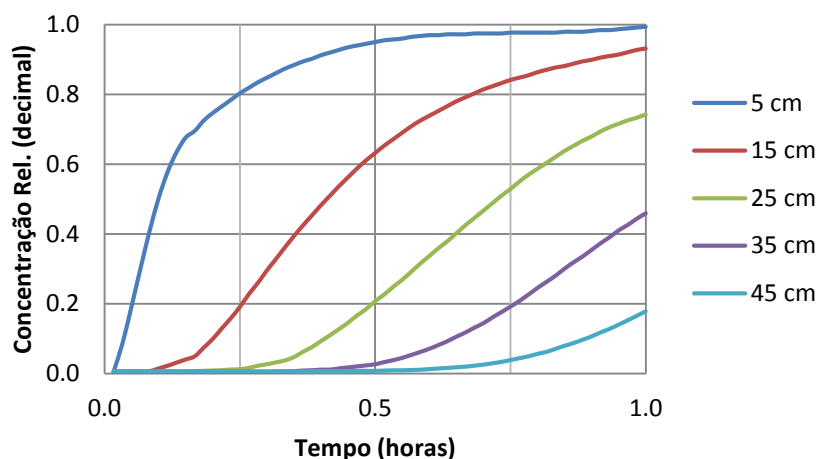


Figura 11 - Concentração relativa de potássio em função do tempo e das profundidades estudadas em Neossolo Quartzarênico órtico.

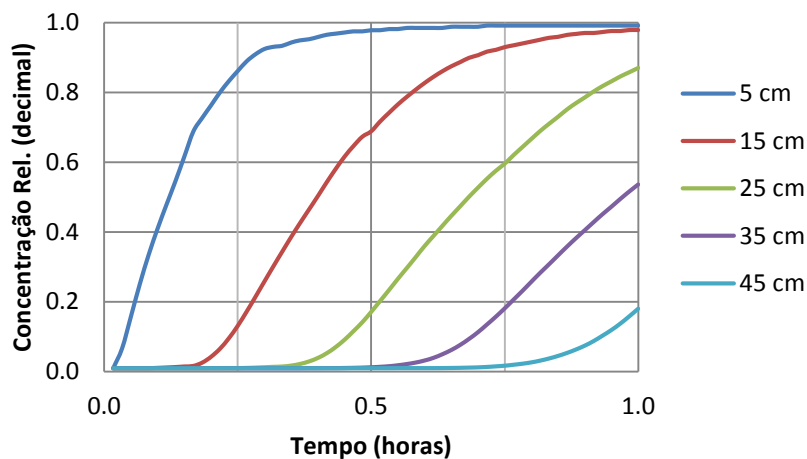


Figura 12 - Concentração relativa de fósforo em função do tempo e das profundidades estudadas em Neossolo Quartzarênico órtico.

Analisando a movimentação do íon potássio em relação ao fósforo no Neossolo Quartzarênico órtico, conforme as Figuras 11 e 12, verifica-se no início do teste que a movimentação de potássio é maior do que a do fósforo. Porém, com o avanço das soluções deslocadoras, logo a movimentação do fósforo supera a do potássio, devido a concentração de fósforo ser maior nas soluções deslocadoras aplicadas, prevalecendo até o final do teste, indicando que Neossolo Quartzarênico órtico (NQo) não saturou-se rapidamente pela alta concentração de fósforo na solução deslocadora como ocorreu no Latossolo Vermelho distrófico (LVd).

Comparando-se os deslocamentos do potássio e do fósforo nos dois solos observa-se uma movimentação muito maior no NQo, resultado já esperado em função da textura do solo.

4.3 Simulações nos programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D

Os resultados estão apresentados nas Figuras 13, 14, 15 e 16, mostrando o avanço dos solutos no perfil do solo em diferentes tempos, nas simulações e no ensaio experimental.

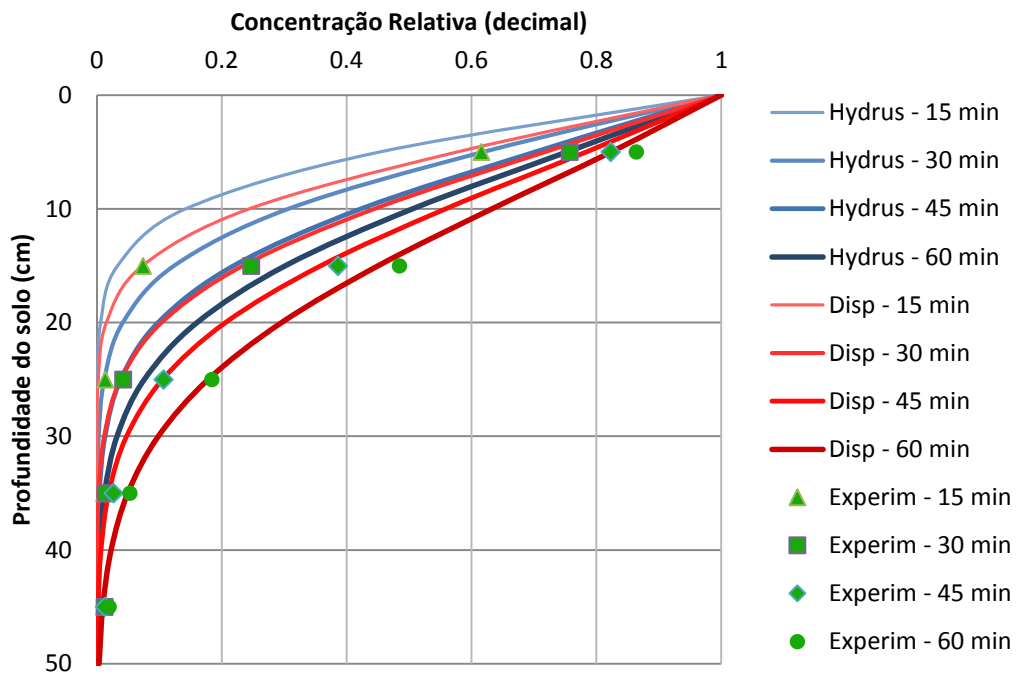


Figura 13 - Concentração relativa de potássio em função da profundidade, em tempos diferentes, medidos experimentalmente e modelados pelos programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D, para o Latossolo Vermelho distrófico.

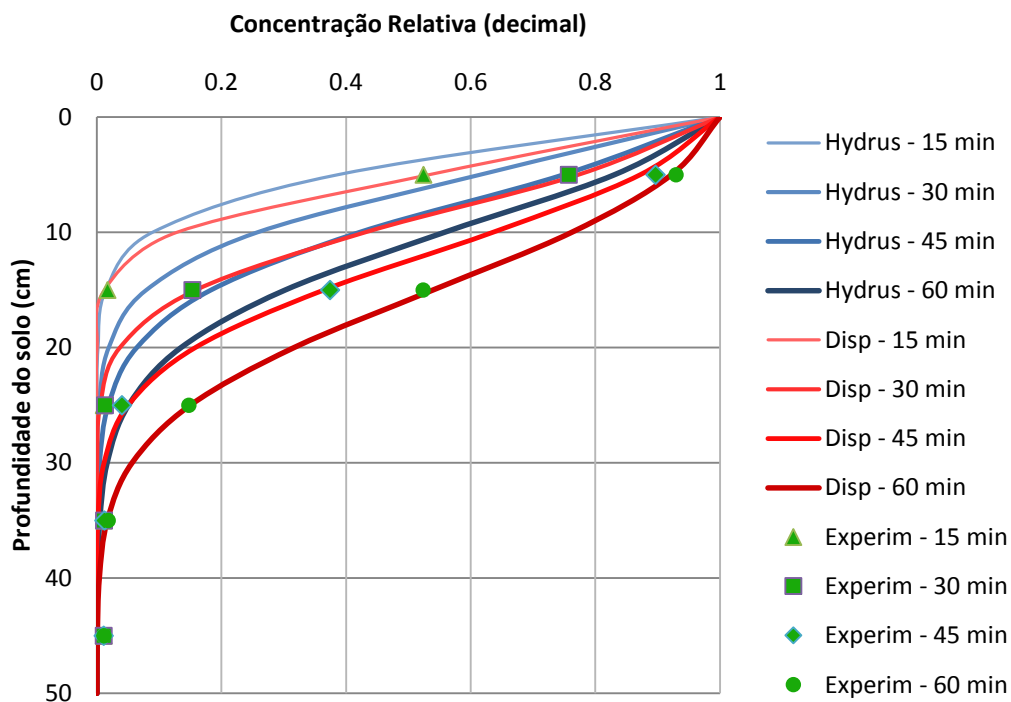


Figura 14 - Concentração relativa de fósforo em função da profundidade, em tempos diferentes, medidos experimentalmente e modelados pelos programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D, para Latossolo Vermelho distrófico.

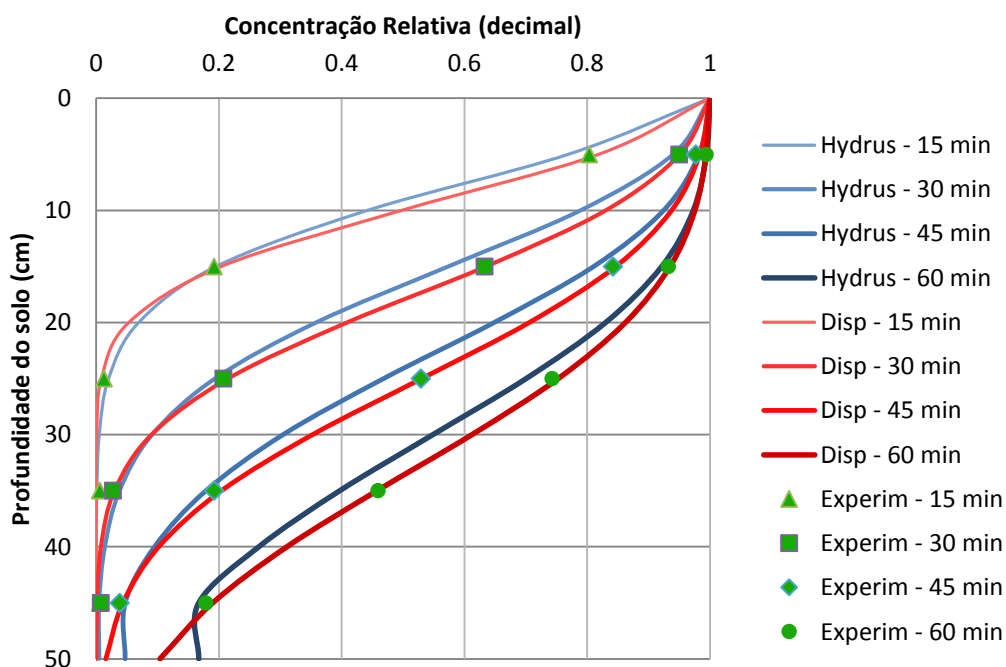


Figura 15 - Concentração relativa de potássio em função da profundidade, em tempos diferentes, medidos experimentalmente e modelados pelos programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D, para Neossolo Quartzarênico órtico.

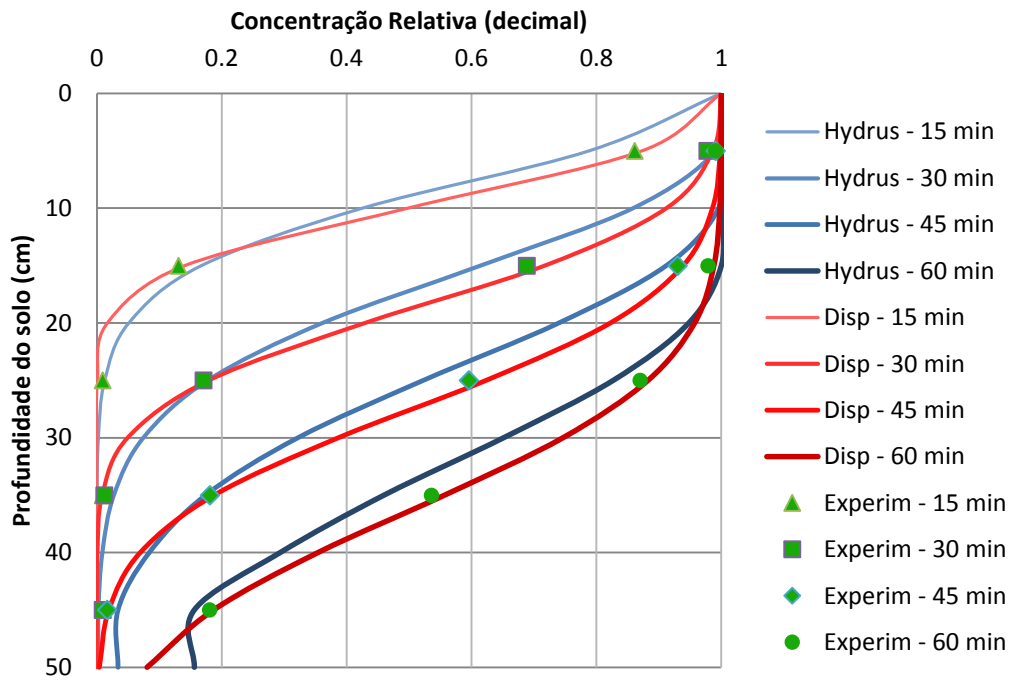


Figura 16 - Concentração relativa de fósforo em função da profundidade, em tempos diferentes, medidos experimentalmente e modelados pelos programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D, para Neossolo Quartzarênico órtico.

As Figuras 17 até 20 apresentam as comparações das concentrações obtidas nas simulações feitas no programa computacional DISP com os valores medidos experimentalmente.

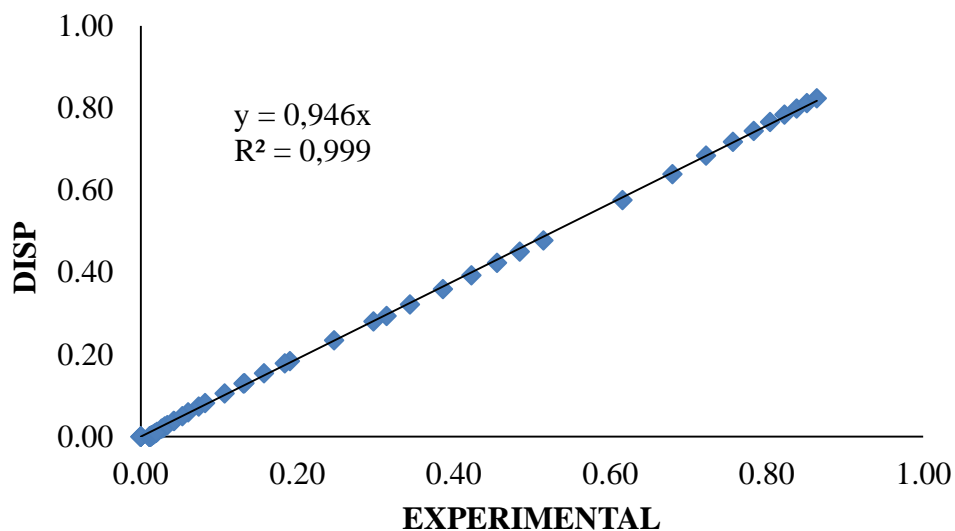


Figura 17 - Correlação entre os valores de concentração relativa de potássio simulados pelo DISP e medidos experimentalmente, para o Latossolo Vermelho distrófico.

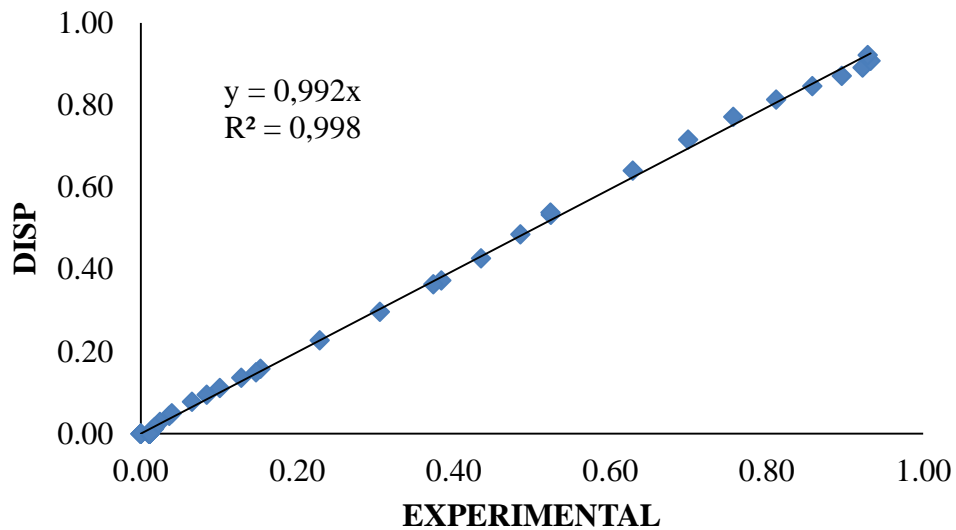


Figura 18 - Correlação entre os valores de concentração relativa de fósforo simulados pelo DISP e medidos experimentalmente, para o Latossolo Vermelho distrófico.

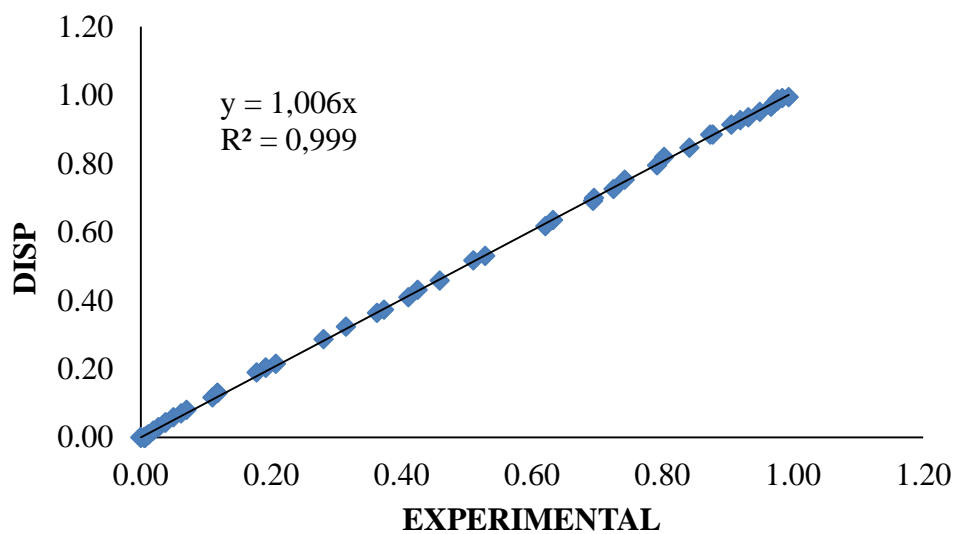


Figura 19 - Correlação entre os valores de concentração relativa de potássio simulados pelo DISP e medidos experimentalmente, para o Neossolo Quartzarênico órtico.

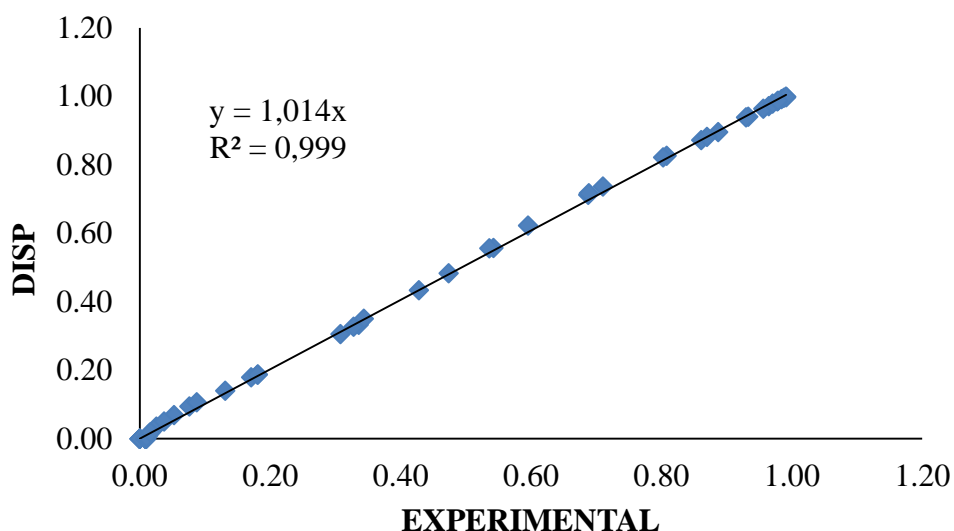


Figura 20 - Correlação entre os valores de concentração relativa de fósforo simulados pelo DISP e medidos experimentalmente, para o Neossolo Quartzarênico órtico.

Nas Figuras 17 à 20 observou-se que as concentrações obtidas por meio do programa computacional DISP equivalem as concentrações medidas experimentalmente e uma ótima correlação em todos os casos, conforme apresentado nas análises estatísticas da Tabela 12, evidenciando o programa DISP não só como uma ferramenta para ajustar os parâmetros de transporte como também para simular a movimentação de solutos no solo, podendo recomendá-lo em pesquisas desta natureza.

Tabela 12 - Estimativa do erro padrão (EEP), concordância de Willmott (d), correlação de Pearson (r), coeficiente de confiança (c) e desempenho de Camargo e Sentelhas, obtidos das correlações entre os valores simulados no programa computacional DISP e os valores obtidos experimentalmente

Solo	Soluto	EPE	d	r	c	Desempenho
LVd	K	0,0199	0,9987	0,9998	0,9985	Ótimo
	P	0,0111	0,9996	0,9994	0,9991	Ótimo
NQo	K	0,0067	0,9999	0,9999	0,9998	Ótimo
	P	0,0117	0,9998	0,9998	0,9996	Ótimo

LVd = Latossolo Vermelho Distrófico, NQo = Neossolo Quartzarênico Órtico, K = Potássio e P = Fósforo.

As Figuras 21 até 24 apresentam as comparações das concentrações obtidas nas simulações feitas no programa computacional HYDRUS 1-D com os valores medidos experimentalmente.

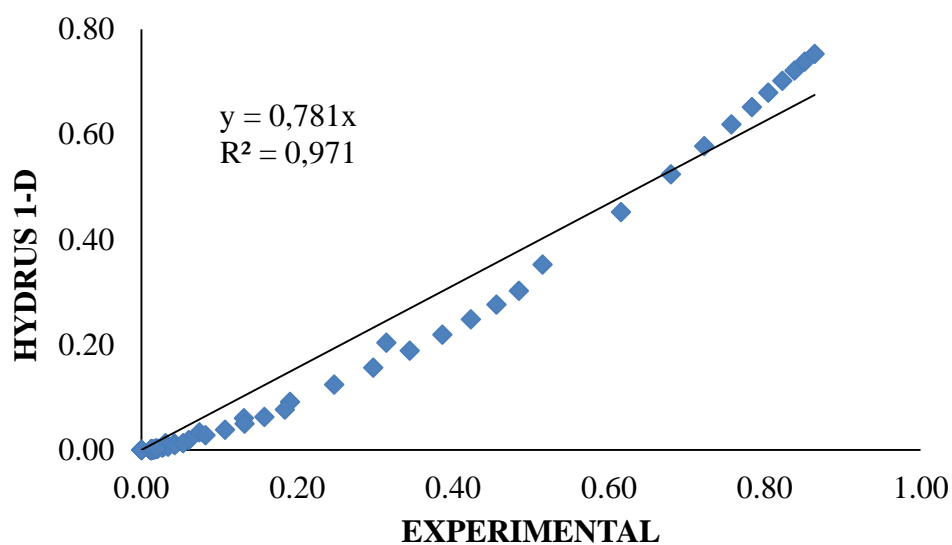


Figura 21 - Correlação entre os valores de concentração relativa de potássio simulados pelo HYDRUS 1-D e medidos experimentalmente, para o Latossolo Vermelho distrófico.

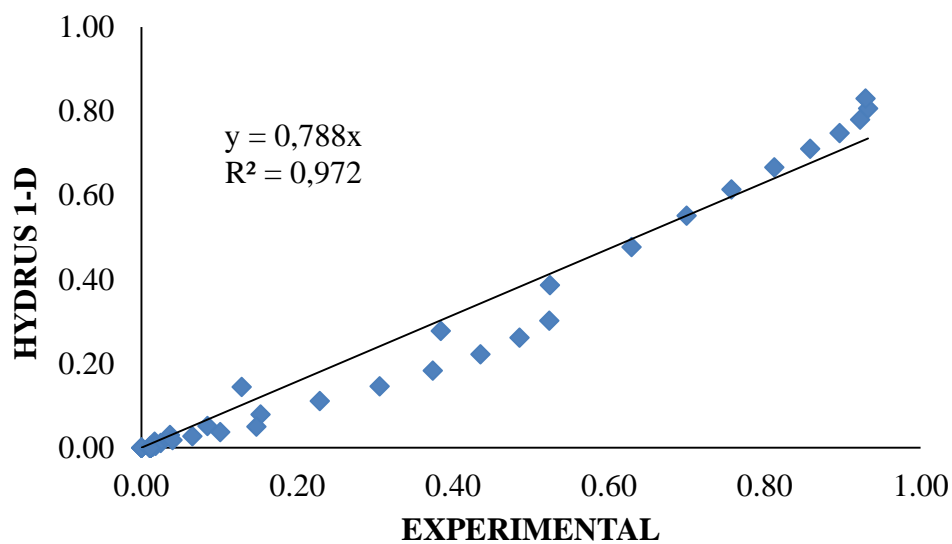


Figura 22 - Correlação entre os valores de concentração relativa de fósforo simulados pelo HYDRUS 1-D e medidos experimentalmente, para o Latossolo Vermelho distrófico.

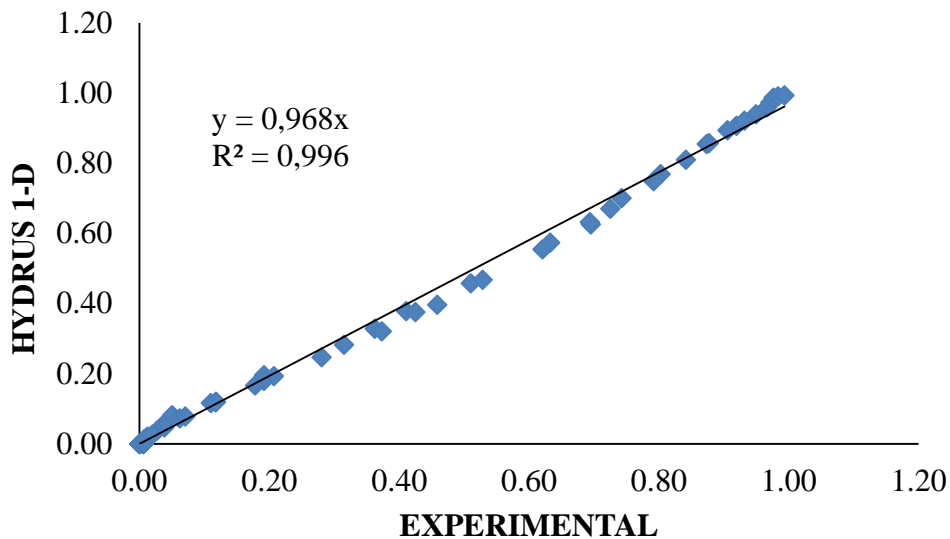


Figura 23 - Correlação entre os valores de concentração relativa de potássio simulados pelo HYDRUS 1-D e medidos experimentalmente, para o Neossolo Quartzarênico órtico.

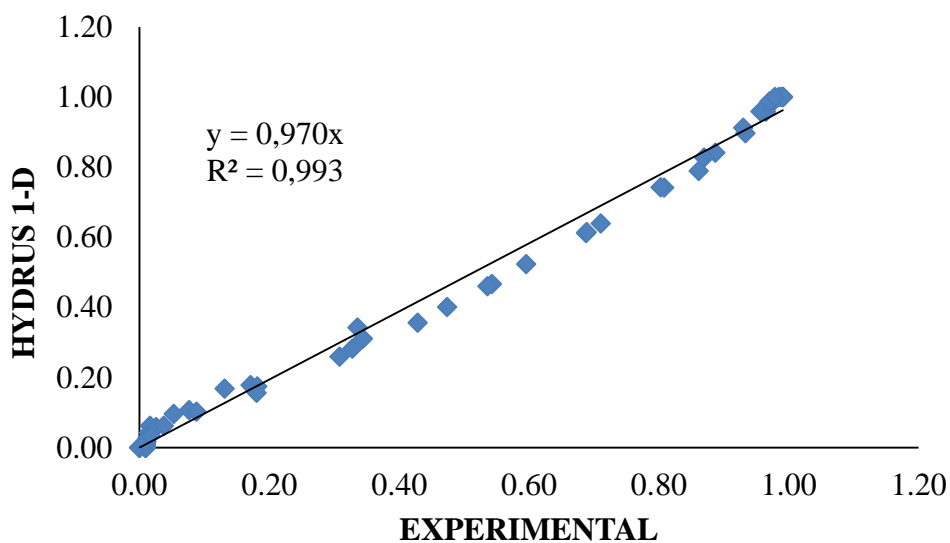


Figura 24 - Correlação entre os valores de concentração relativa de potássio simulados pelo HYDRUS 1-D e medidos experimentalmente, para o Neossolo Quartzarênico órtico.

Nas Figuras 21 à 24 observou-se que as concentrações obtidas por meio do programa computacional HYDRUS 1-D equivalem as concentrações medidas experimentalmente obtendo-se ótima correlação em todos os casos, sendo que para o

Neossolo Quartzarênico órtico a correlação foi superior a do Latossolo Vermelho Distrófico, conforme apresentado nas análises estatísticas da Tabela 13, podendo ser explicado pelo fato deste programa apresentar muito mais opções para os dados de entrada, devendo-se estes, serem bastante estudados de forma a modelar o mais próximo possível da realidade.

Tabela 13 - Estimativa do erro padrão (EEP), concordância de Willmott (d), correlação de Pearson (r), coeficiente de confiança (c) e desempenho de Camargo e Sentelhas, obtidos das correlações entre os valores simulados no programa computacional HYDRUS 1-D e os valores obtidos experimentalmente

Solo	Soluto	EPE	d	r	c	Desempenho
LVd	K	0,0849	0,9731	0,9900	0,9634	Ótimo
	P	0,0840	0,9757	0,9887	0,9647	Ótimo
NQo	K	0,0276	0,9986	0,9983	0,9970	Ótimo
	P	0,0356	0,9980	0,9968	0,9948	Ótimo

LVd = Latossolo Vermelho Distrófico, NQo = Neossolo Quartzarênico Órtico, K = Potássio e P = Fósforo.

As Figuras 25 à 28 apresentam as comparações das concentrações obtidas nas simulações feitas entre o programa computacional DISP e o programa computacional HYDRUS 1-D.

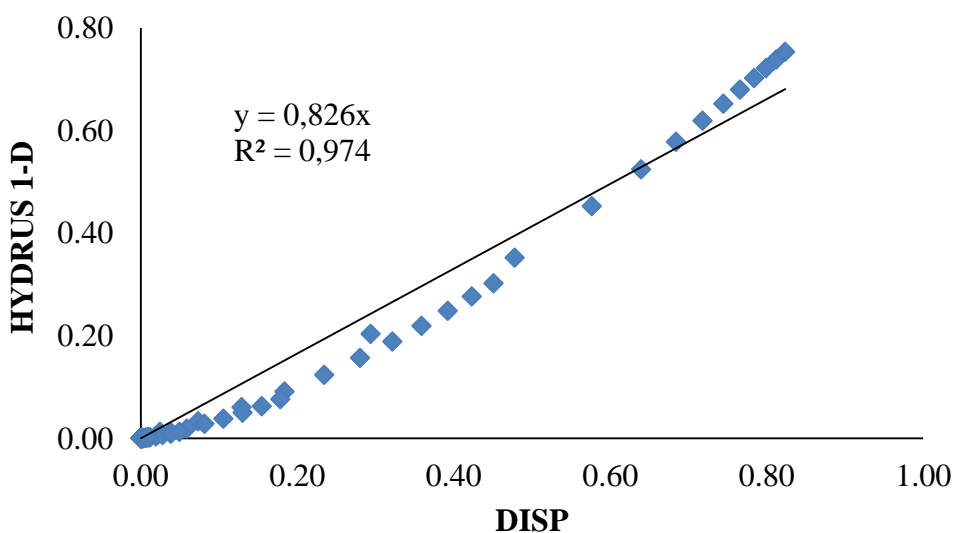


Figura 25 - Correlação entre os valores de concentração relativa de potássio simulados pelo DISP e pelo HYDRUS 1-D, para o Latossolo Vermelho distrófico.

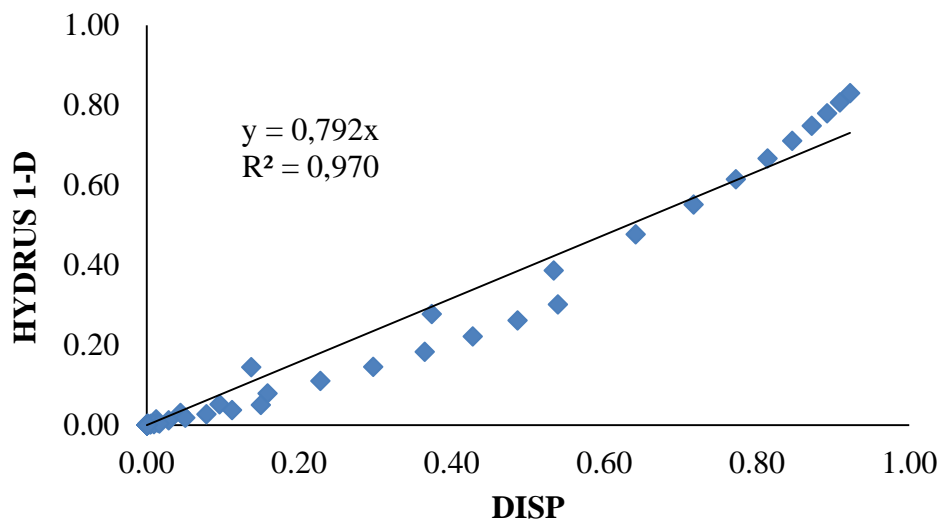


Figura 26 - Correlação entre os valores de concentração relativa de fósforo simulados pelo DISP e pelo HYDRUS 1-D, para o Latossolo Vermelho distrófico.

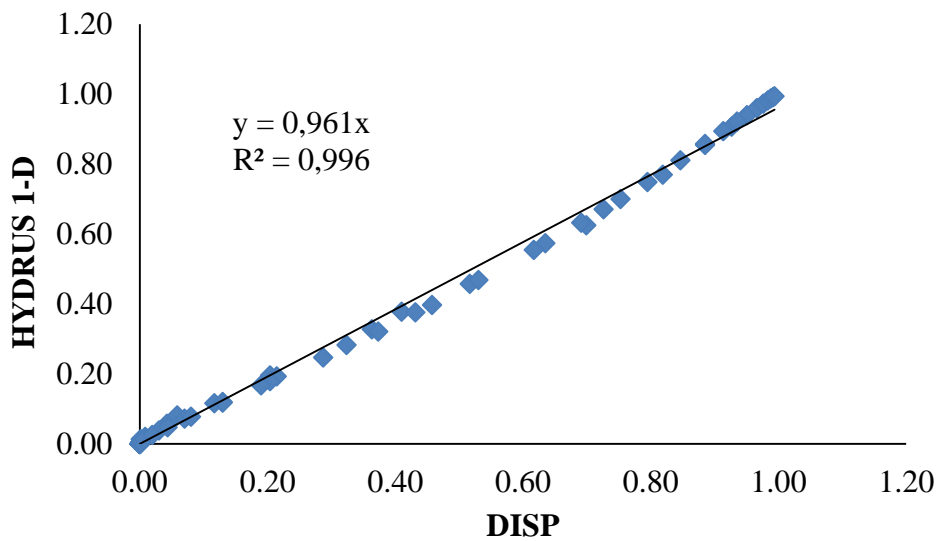


Figura 27 - Correlação entre os valores de concentração relativa de potássio simulados pelo DISP e pelo HYDRUS 1-D, para o Neossolo Quartzarênico órtico.

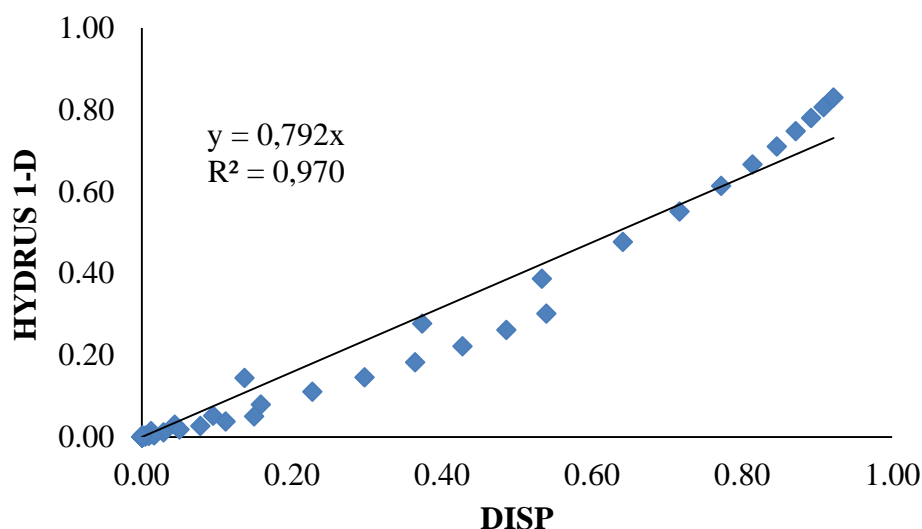


Figura 28 - Correlação entre os valores de concentração relativa de fósforo simulados pelo DISP e pelo HYDRUS 1-D, para o Neossolo Quartzarênico órtico.

Nas Figuras 25 à 28 observou-se que comparando as concentrações simuladas nos dois programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D, obteve-se uma ótima correlação, conforme apresentado nas análises estatísticas da Tabela 14, mais uma vez confirmando os dois programas computacionais como boas opções de ferramentas de simulações da movimentação de íons no solo, podendo-se inclusive ser estudados em conjunto para futuras pesquisas.

Tabela 14 - Estimativa do erro padrão (EEP), concordância de Willmott (d), correlação de Pearson (r), coeficiente de confiança (c) e desempenho de Camargo e Sentelhas, obtidos das correlações entre os valores simulados no programa computacional HYDRUS 1-D e os valores simulados no programa computacional DISP

Solo	Soluto	EPE	d	r	c	Desempenho
LVd	K	0.0679	0.9818	0.9899	0.9719	Ótimo
	P	0.0831	0.9762	0.9866	0.9632	Ótimo
NQo	K	0.0297	0.9984	0.9984	0.9968	Ótimo
	P	0.0423	0.9972	0.9961	0.9933	Ótimo

LVd = Latossolo Vermelho Distrófico, NQo = Neossolo Quartzarênico Órtico, K = Potássio e P = Fósforo.

Santos (2014), trabalhando com o íon potássio em Argissolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo concluiu que o programa computacional HYDRUS 1-D mostrou-se eficiente para simular o deslocamento deste íon em ambos os solos.

Pinho (2009), trabalhando com Latossolo Vermelho Amarelo e Nitossolo Vermelho, concluiu que o programa computacional HYDRUS 1-D utilizando o modelo de equilíbrio foi eficiente para simular a movimentação de potássio em ambos os solos, e não foi eficiente para simular a movimentação do nitrato, requerendo um processo experimental mais detalhado, a fim de descrever melhor os parâmetros de entrada no modelo.

5. CONCLUSÕES

Utilizando os parâmetros de transporte determinados por soluções analíticas, pode-se concluir que as simulações do transporte de solutos por meio do programa computacional DISP foi muito similar aos valores encontrados experimentalmente para ambos os solos evidenciando como uma boa ferramenta para descrever a movimentação de solutos no solo, assim como no programa computacional Hydrus 1-D, que também apresentou ótima correlação ao simular a movimentação dos íon potássio e fósforo utilizados nesta pesquisa, embora os índices estatísticos tenham sido um pouco inferiores as simulações com o DISP, devido a uma maior complexidade para estabelecer os parâmetros de entrada, devendo-se detalhar mais os processos experimentais, a fim de descrever melhor o modelo, como já relatado em outras pesquisas.

6. RECOMENDAÇÕES

No planejamento da concentração de íon na solução deslocadora, deve-se levar em conta a capacidade máxima de adsorção do solo, e, para facilitar as comparações dos parâmetros de transporte entre eles, deve-se utilizar concentrações equivalentes.

Os programas computacionais DISP e HYDRUS 1-D se mostraram como boas opções de ferramentas de simulações da movimentação de íons no solo, podendo-se inclusive ser estudados em conjunto para futuras pesquisas.

REFERÊNCIAS

- BELJIN, M.S. **Solute program package**.Indianapolis: International Ground Water Modeling Center, 1985. 163 p.
- BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANDRADE, C. de L. T. de. **Transporte de solutos no solo**. In: ALBUQUERQUE, P. E. P. de; DURÃES, F. O. M. (Ed.). Uso e manejo de irrigação. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. Cap. 3, p. 151-168.
- BORGES JÚNIOR, J. C. F.; FERREIRA, P. A. **Equações e programa computacional para o cálculo do transporte de solutos do solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n.3, p. 604-611, 2006.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARSEL, R.F.; SMITH, C.N.; MULKEY, L.A.; DEAN, J.D.; JOWISE, P. **User's manual for the pesticide root zone model (PRZM)**.Release 1 EPA-600/3-84-109. Athens: U.S. EPA, 1984. 216 p.
- CLEMENTE, RS.; PRASHER, SO.; BARRINGTON, S.F. Pestfate, a new pesticide fate and transport model: model development and verification. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 36, n. 2, p. 357-367, Mar./Apr. 1993.
- COELHO, E. F.; ARRUDA, F.B. **Aplicações da técnica de TDR: manejo da água no solo**.In: MATSURA, E. E. et al. Aplicaçõesda técnica de TDR na agricultura. Campinas: Feagri/Unicamp, 2001.
- COELHO, E. F.; MAGALHAES, A. F. J.; COELHO FILHO, M. A. Irrigação e fertirrigação em Citrus. Cruz das Almas, BA: (**Circular Técnica, 72**), EMBRAPA - CNPMF, 2004. 16p.
- COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. New Jersey: Lawrence Erlbaum, 1988. 569 p.
- COSTA, P. O. da S. Avaliação em laboratório do transporte de contaminantes no solo do aterro sanitário de Saúpe/BA. Rio de Janeiro: PUC, 2002. 171p. **Dissertação Mestrado**.
- DREVER, J. I. **The geochemistry of natural waters**. New Jersey: Prentice Hall, 1997. 436p.
- EMBRAPA, **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa - CNPS,1997.211p.
- FEITOSA, F. A. C., MANOEL FILHO, J. (Coords.) 2 ed.**Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 2000. 412 p.

- FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG. 432p, 2006.
- FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4 ed. New Jersey: Prentice-Hall Inc. 2001. 691 p.
- GONÇALVES, A.D.M.; MIRANDA, J.H.; ROSSI, P.; SABADIN, J.F.G.; KAMOGAWA, M.Y. **Temperature effect in potassium and nitrate ions in soil transport**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 438-447, jul./set. 2008.
- HOLFORD, I. C. R. Soil phosphorus: its measurement and its uptake by plants. **Australian Journal of Soil Research**, v.35, p.227-239, 1997.
- JONG van LIER, Q. (Editor) **Física do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG. 298p. 2010.
- JURY, W. A., GARDNER, W. R., GARDNER, W. H. **Soil Physics**. 5 ed. New York: John Wiley & Sons, 328p. 1991.
- KOLAHCHI, Z.; JALALI, M. Simulating leaching of potassium in a sandy soil using simple and complex models. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 85, n. 1-2, p. 85-94, 2006.
- LEONARD, RA.; KNISEL, W.G.; STILL, D.A. GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 30, n. 5, p. 1403-1418, Sept./Oct. 1987.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Sao Paulo. Ceres. 638 p. 2006.
- MALAVOLTA, E. Potássio - absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2005, cap. 8, p.179-238.
- MARTINEZ, M. A.; SILVA, J. B. G.; PEREIRA, D. R. **Modelagem do movimento de sais no solo** IN: GHEYI, H. R., DIAS, N. da S., LACERDA, C. F. **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados**. Fortaleza, CE. p. 95-112, 2010.
- MELO, R.F.; FERREIRA, P.A.; MATOS, A.T.; RUIZ, H.A.; OLIVEIRA, L.B. **Deslocamento miscível de cátions básicos provenientes da água residuária de mandioca em colunas de solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 10, n. 2, p.45-465, abr./jun. 2006.
- PARKER, J.C.; VAN GENUCHTEN, M.Th. **Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments**. Virginia: Virginia Agricultural Experiment Station, 1984. 96 p. (Bulletin 84-3).
- PINHO, R. E. da C. de. Teores de água e solutos no solo: desempenho e sensibilidade do modelo Hydrus-1D. **Dissertação** (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Piracicaba, SP. 81 p. 2009.

RAMOS, V. B.N. Valores de fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de zinco e cobre, obtidos usando-se soluções mono e multi-espécies. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 66p. 1998.

RIBEIRO, D. P. Efeito da velocidade de escoamento da solução e do comprimento da coluna de solo nos parâmetros de transporte de solutos em solos argilosos e arenosos. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 52p. 2011.

ROSSI, C.; ANJOS, A. R. M.; CAMARGO, M. S.; WEBER, O. L. S.; IMHOFF, S.; MALAVOLTA, E. Efeito residual de fertilizantes fosfatados para o arroz: avaliação do fósforo na planta e no solo por diferentes extratores. **Scientia Agricola**, v.56, n.1,p.1-1, 1999.

ROSSI, P.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. **Curvas de distribuição de efluentes do íon nitrato em amostras de solo deformadas e indeformadas**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 675-682, set. 2007.

RUIZ, H. A.; FERREIRA, P. A.; ROCHA, G. C.; BORGES JÚNIR, J. C. F. **Transporte de solutos no solo**. In: JONG van LIER, Q. (Ed.) **Física do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG, 2010. Cap. 6, p. 213-240.

SANTOS, M. R. Uso da reflectometria no domínio do tempo para avaliar a distribuição de nitrato e fósforo em colunas de solos fertirrigados. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 59p. 2008.

SANTOS, R. S. da S. Simulação da dinâmica do íon potássio pelo modelo Hydrus 1-D em condições de solo salino. **Tese** (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Piracicaba, SP. 132 p. 2014.

SILVA, J. B.G. Tecnologia inovadora para retirada de amostras de solo com estrutura indeformada. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 57p. 2009.

SILVA, T.S.M. et al. **Teor de potássio na solução do solo com uso da técnica da reflectometria no domínio do tempo**. Irriga, v 10. n.4, p.393-402, 2005.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M. **The Hydrus 1-D Software Package Manual**, v. 3.0. California, University Of California Riverside, 2005.

SOUZA, C.F. et al. **Experiência do laboratório de hidráulica, irrigação e drenagem na Faculdade de Engenharia Agrícola/ UNICAMP no uso da técnica de TDR**. In MATSURA, E.E. et al. Aplicações da técnica de TDR na agricultura. Campinas, Feagri/Unicamp, 2001. 147-176p.

VANCLOOSTER, M.; VIAENE, P.; CHRISTIAENS, K. **A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment**. Leuven: Institute for Land and Water Management Leuven; Katholieke Universiteit Leuven, 1994. 145 p.

WAGENET, R.J.; HUSTON, J.L. LEACHM: **Leaching estimation and chemistry model**; version 2. Ithaca: Cornell University, Center for Environmental Research, 1989. 148 p.

WILLMOT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WRAITH, J. M., DAS, B. S. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time-domain reflectometry. **Soil and Tillage Research**, v.47, p 145-150. 1998.

YAMADA, T., STIPP, S. R., ABDALLA. **Fósforo na agricultura brasileira**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, SP. 2004. POTAFOS. 726p.

APÊNDICES

Apêndice A: Dados referentes as curvas de eluição utilizadas na determinação dos parâmetros de transporte. Para identificação das Tabelas segue-se a referência: as três primeiras letras indicam o solo (LVd = Latossolo Vermelho distrófico e NQo = Neossolo Quartzarênico órtico), os números a seguir indicam o comprimento da coluna (cm) em função da carga hidráulica aplicada, a seguir a próxima letra indica o íon estudado na solução deslocadora (K = potássio e P = fósforo), e por fim letra e número indica qual é a repetição (de um total de três repetições). Nas tabelas, Co indica a concentração do íon na solução deslocadora, e C/Co a relação entre a concentração do íon no efluente lixiviado e na solução deslocadora, ou, concentração relativa.

LVd 25 K R1 (Co = 143 mg/L)				LVd 25 K R2 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co	Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
LVd 25 R1 - N01	8,31	0,25	0,058112	LVd 25 R2 - N01	8,31	0,25	0,058132
LVd 25 R1 - N02	8,31	0,50	0,058112	LVd 25 R2 - N02	8,31	0,50	0,058132
LVd 25 R1 - N03	9,54	0,75	0,066713	LVd 25 R2 - N03	11,31	0,75	0,079083
LVd 25 R1 - N04	12,47	1,00	0,087203	LVd 25 R2 - N04	14,30	1,00	0,100034
LVd 25 R1 - N05	20,49	1,25	0,143287	LVd 25 R2 - N05	23,29	1,25	0,162885
LVd 25 R1 - N06	25,11	1,50	0,175594	LVd 25 R2 - N06	29,28	1,50	0,204786
LVd 25 R1 - N07	33,96	1,75	0,237483	LVd 25 R2 - N07	38,27	1,75	0,267638
LVd 25 R1 - N08	38,41	2,00	0,268601	LVd 25 R2 - N08	44,26	2,00	0,309539
LVd 25 R1 - N09	41,56	2,25	0,290629	LVd 25 R2 - N09	47,26	2,25	0,330489
LVd 25 R1 - N10	45,92	2,50	0,321119	LVd 25 R2 - N10	50,26	2,50	0,35144
LVd 25 R1 - N11	49,76	2,75	0,347972	LVd 25 R2 - N11	56,25	2,75	0,393341
LVd 25 R1 - N12	52,15	3,00	0,364685	LVd 25 R2 - N12	59,24	3,00	0,414291
LVd 25 R1 - N13	57,33	3,25	0,400909	LVd 25 R2 - N13	65,24	3,25	0,456193
LVd 25 R1 - N14	60,08	3,50	0,42014	LVd 25 R2 - N14	68,23	3,50	0,477143
LVd 25 R1 - N15	61,95	3,75	0,433217	LVd 25 R2 - N15	68,23	3,75	0,477143
LVd 25 R1 - N16	66,42	4,00	0,464476	LVd 25 R2 - N16	71,23	4,00	0,498094
LVd 25 R1 - N17	69,23	4,25	0,484126	LVd 25 R2 - N17	74,22	4,25	0,519044
LVd 25 R1 - N18	72,88	4,50	0,50965	LVd 25 R2 - N18	77,22	4,50	0,539995
LVd 25 R1 - N19	75,63	4,75	0,528881	LVd 25 R2 - N19	83,21	4,75	0,581896
LVd 25 R1 - N20	76,21	5,00	0,532937	LVd 25 R2 - N20	80,22	5,00	0,560945
LVd 25 R1 - N21	78,56	5,25	0,549371	LVd 25 R2 - N21	86,21	5,25	0,602846
LVd 25 R1 - N22	79,23	5,50	0,554056	LVd 25 R2 - N22	83,21	5,50	0,581896
LVd 25 R1 - N23	81,15	5,75	0,567483	LVd 25 R2 - N23	86,21	5,75	0,602846
LVd 25 R1 - N24	84,72	6,00	0,592448	LVd 25 R2 - N24	89,20	6,00	0,623797
LVd 25 R1 - N25	84,72	6,25	0,592448	LVd 25 R2 - N25	89,20	6,25	0,623797
LVd 25 R1 - N26	88,11	6,50	0,616154	LVd 25 R2 - N26	92,20	6,50	0,644747
LVd 25 R1 - N27	91,37	6,75	0,638951	LVd 25 R2 - N27	95,19	6,75	0,665698
LVd 25 R1 - N28	94,62	7,00	0,661678	LVd 25 R2 - N28	95,19	7,00	0,665698

LVd 25 K R3 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
LVd 25 R3 - N01	8,31	0,25	0,058132
LVd 25 R3 - N02	8,31	0,50	0,058132
LVd 25 R3 - N03	8,31	0,75	0,058132
LVd 25 R3 - N04	11,31	1,00	0,079083
LVd 25 R3 - N05	17,30	1,25	0,120984
LVd 25 R3 - N06	20,30	1,50	0,141935
LVd 25 R3 - N07	26,29	1,75	0,183836
LVd 25 R3 - N08	29,28	2,00	0,204786
LVd 25 R3 - N09	32,28	2,25	0,225737
LVd 25 R3 - N10	38,27	2,50	0,267638
LVd 25 R3 - N11	41,27	2,75	0,288588
LVd 25 R3 - N12	44,26	3,00	0,309539
LVd 25 R3 - N13	47,26	3,25	0,330489
LVd 25 R3 - N14	50,26	3,50	0,35144
LVd 25 R3 - N15	53,25	3,75	0,37239
LVd 25 R3 - N16	59,24	4,00	0,414291
LVd 25 R3 - N17	59,24	4,25	0,414291
LVd 25 R3 - N18	65,24	4,50	0,456193
LVd 25 R3 - N19	65,24	4,75	0,456193
LVd 25 R3 - N20	68,23	5,00	0,477143
LVd 25 R3 - N21	71,23	5,25	0,498094
LVd 25 R3 - N22	74,22	5,50	0,519044
LVd 25 R3 - N23	74,22	5,75	0,519044
LVd 25 R3 - N24	77,22	6,00	0,539995
LVd 25 R3 - N25	80,22	6,25	0,560945
LVd 25 R3 - N26	83,21	6,50	0,581896
LVd 25 R3 - N27	86,21	6,75	0,602846
LVd 25 R3 - N28	89,20	7,00	0,623797

LVd 28 K R1 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
LVd 28 R1 - N01	5,32	0,25	0,037182
LVd 28 R1 - N02	5,32	0,50	0,037182
LVd 28 R1 - N03	11,31	0,75	0,079083
LVd 28 R1 - N04	14,30	1,00	0,100034
LVd 28 R1 - N05	20,30	1,25	0,141935
LVd 28 R1 - N06	23,29	1,50	0,162885
LVd 28 R1 - N07	29,28	1,75	0,204786
LVd 28 R1 - N08	29,28	2,00	0,204786
LVd 28 R1 - N09	35,28	2,25	0,246687
LVd 28 R1 - N10	35,28	2,50	0,246687
LVd 28 R1 - N11	41,27	2,75	0,288588
LVd 28 R1 - N12	44,26	3,00	0,309539
LVd 28 R1 - N13	50,26	3,25	0,35144
LVd 28 R1 - N14	53,25	3,50	0,37239
LVd 28 R1 - N15	56,25	3,75	0,393341

LVd 28 R1 - N16	59,24	4,00	0,414291
LVd 28 R1 - N17	62,24	4,25	0,435242
LVd 28 R1 - N18	68,23	4,50	0,477143
LVd 28 R1 - N19	71,23	4,75	0,498094
LVd 28 R1 - N20	74,22	5,00	0,519044
LVd 28 R1 - N21	77,22	5,25	0,539995
LVd 28 R1 - N22	77,22	5,50	0,539995
LVd 28 R1 - N23	83,21	5,75	0,581896
LVd 28 R1 - N24	86,21	6,00	0,602846
LVd 28 R1 - N25	89,20	6,25	0,623797
LVd 28 R1 - N26	92,20	6,50	0,644747
LVd 28 R1 - N27	92,20	6,75	0,644747
LVd 28 R1 - N28	95,19	7,00	0,665698

LVd 28 K R2 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
LVd 28 R2 - N01	5,32	0,25	0,037182
LVd 28 R2 - N02	5,32	0,50	0,037182
LVd 28 R2 - N03	5,32	0,75	0,037182
LVd 28 R2 - N04	11,31	1,00	0,079083
LVd 28 R2 - N05	14,30	1,25	0,100034
LVd 28 R2 - N06	23,29	1,50	0,162885
LVd 28 R2 - N07	29,28	1,75	0,204786
LVd 28 R2 - N08	35,28	2,00	0,246687
LVd 28 R2 - N09	38,27	2,25	0,267638
LVd 28 R2 - N10	44,26	2,50	0,309539
LVd 28 R2 - N11	50,26	2,75	0,35144
LVd 28 R2 - N12	53,25	3,00	0,37239
LVd 28 R2 - N13	59,24	3,25	0,414291
LVd 28 R2 - N14	59,24	3,50	0,414291
LVd 28 R2 - N15	65,24	3,75	0,456193
LVd 28 R2 - N16	65,24	4,00	0,456193
LVd 28 R2 - N17	71,23	4,25	0,498094
LVd 28 R2 - N18	71,23	4,50	0,498094
LVd 28 R2 - N19	74,22	4,75	0,519044
LVd 28 R2 - N20	74,22	5,00	0,519044
LVd 28 R2 - N21	75,98	5,25	0,531329
LVd 28 R2 - N22	77,22	5,50	0,539995
LVd 28 R2 - N23	77,22	5,75	0,539995
LVd 28 R2 - N24	80,22	6,00	0,560945
LVd 28 R2 - N25	83,21	6,25	0,581896
LVd 28 R2 - N26	83,21	6,50	0,581896
LVd 28 R2 - N27	86,21	6,75	0,602846
LVd 28 R2 - N28	89,20	7,00	0,623797

LVd 28 K R3 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
LVd 28 R3 - N01	5,32	0,25	0,037182
LVd 28 R3 - N02	5,32	0,50	0,037182
LVd 28 R3 - N03	5,32	0,75	0,037182

LVd 28 R3 - N04	5,32	1,00	0,037182	LVd 31 R1 - N21	86,21	5,25	0,602846
LVd 28 R3 - N05	8,31	1,25	0,058132	LVd 31 R1 - N22	89,20	5,50	0,623797
LVd 28 R3 - N06	8,31	1,50	0,058132	LVd 31 R1 - N23	89,20	5,75	0,623797
LVd 28 R3 - N07	14,30	1,75	0,100034	LVd 31 R1 - N24	92,20	6,00	0,644747
LVd 28 R3 - N08	14,30	2,00	0,100034	LVd 31 R1 - N25	92,20	6,25	0,644747
LVd 28 R3 - N09	20,30	2,25	0,141935	LVd 31 R1 - N26	95,19	6,50	0,665698
LVd 28 R3 - N10	23,29	2,50	0,162885	LVd 31 R1 - N27	95,19	6,75	0,665698
LVd 28 R3 - N11	35,28	2,75	0,246687	LVd 31 R1 - N28	98,19	7,00	0,686648
LVd 28 R3 - N12	38,27	3,00	0,267638				
LVd 28 R3 - N13	44,26	3,25	0,309539	LVd 31 K R2	(Co = 143 mg/L)		
LVd 28 R3 - N14	47,26	3,50	0,330489	Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
LVd 28 R3 - N15	50,26	3,75	0,35144	LVd 31 R2 - N01	8,31	0,25	0,058132
LVd 28 R3 - N16	56,25	4,00	0,393341	LVd 31 R2 - N02	8,31	0,50	0,058132
LVd 28 R3 - N17	62,24	4,25	0,435242	LVd 31 R2 - N03	8,31	0,75	0,058132
LVd 28 R3 - N18	65,24	4,50	0,456193	LVd 31 R2 - N04	14,30	1,00	0,100034
LVd 28 R3 - N19	71,23	4,75	0,498094	LVd 31 R2 - N05	17,30	1,25	0,120984
LVd 28 R3 - N20	74,22	5,00	0,519044	LVd 31 R2 - N06	26,29	1,50	0,183836
LVd 28 R3 - N21	80,22	5,25	0,560945	LVd 31 R2 - N07	32,28	1,75	0,225737
LVd 28 R3 - N22	83,21	5,50	0,581896	LVd 31 R2 - N08	41,27	2,00	0,288588
LVd 28 R3 - N23	83,21	5,75	0,581888	LVd 31 R2 - N09	44,26	2,25	0,309539
LVd 28 R3 - N24	83,21	6,00	0,581896	LVd 31 R2 - N10	47,26	2,50	0,330489
LVd 28 R3 - N25	83,21	6,25	0,581896	LVd 31 R2 - N11	53,25	2,75	0,37239
LVd 28 R3 - N26	86,21	6,50	0,602846	LVd 31 R2 - N12	59,24	3,00	0,414291
LVd 28 R3 - N27	92,20	6,75	0,644747	LVd 31 R2 - N13	62,24	3,25	0,435242
LVd 28 R3 - N28	92,20	7,00	0,644747	LVd 31 R2 - N14	68,23	3,50	0,477143
				LVd 31 R2 - N15	68,23	3,75	0,477143
LVd 31 K R1	(Co = 143 mg/L)			LVd 31 R2 - N16	71,23	4,00	0,498094
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co	LVd 31 R2 - N17	74,22	4,25	0,519044
LVd 31 R1 - N01	8,31	0,25	0,058132	LVd 31 R2 - N18	80,22	4,50	0,560945
LVd 31 R1 - N02	8,31	0,50	0,058132	LVd 31 R2 - N19	80,22	4,75	0,560945
LVd 31 R1 - N03	14,30	0,75	0,100034	LVd 31 R2 - N20	83,21	5,00	0,581896
LVd 31 R1 - N04	17,30	1,00	0,120984	LVd 31 R2 - N21	86,21	5,25	0,602846
LVd 31 R1 - N05	23,29	1,25	0,162885	LVd 31 R2 - N22	89,20	5,50	0,623797
LVd 31 R1 - N06	29,28	1,50	0,204786	LVd 31 R2 - N23	89,20	5,75	0,623797
LVd 31 R1 - N07	32,28	1,75	0,225737	LVd 31 R2 - N24	92,20	6,00	0,644747
LVd 31 R1 - N08	41,27	2,00	0,288588	LVd 31 R2 - N25	95,19	6,25	0,665698
LVd 31 R1 - N09	44,26	2,25	0,309539	LVd 31 R2 - N26	95,19	6,50	0,665698
LVd 31 R1 - N10	47,26	2,50	0,330489	LVd 31 R2 - N27	98,19	6,75	0,686648
LVd 31 R1 - N11	53,25	2,75	0,37239	LVd 31 R2 - N28	98,19	7,00	0,686648
LVd 31 R1 - N12	56,25	3,00	0,393341				
LVd 31 R1 - N13	59,24	3,25	0,414291	LVd 31 K R3	(Co = 143 mg/L)		
LVd 31 R1 - N14	62,24	3,50	0,435242	Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
LVd 31 R1 - N15	68,23	3,75	0,477143	LVd 31 R3 - N01	8,31	0,25	0,058132
LVd 31 R1 - N16	71,23	4,00	0,498094	LVd 31 R3 - N02	8,31	0,50	0,058132
LVd 31 R1 - N17	74,22	4,25	0,519044	LVd 31 R3 - N03	8,31	0,75	0,058132
LVd 31 R1 - N18	77,22	4,50	0,539995	LVd 31 R3 - N04	8,31	1,00	0,058132
LVd 31 R1 - N19	80,22	4,75	0,560945	LVd 31 R3 - N05	11,31	1,25	0,079083
LVd 31 R1 - N20	80,22	5,00	0,560945	LVd 31 R3 - N06	14,30	1,50	0,100034
				LVd 31 R3 - N07	14,30	1,75	0,100034
				LVd 31 R3 - N08	17,30	2,00	0,120984

LVd 31 R3 - N09	23,29	2,25	0,162885
LVd 31 R3 - N10	26,29	2,50	0,183836
LVd 31 R3 - N11	29,28	2,75	0,204786
LVd 31 R3 - N12	32,28	3,00	0,225737
LVd 31 R3 - N13	35,28	3,25	0,246687
LVd 31 R3 - N14	38,27	3,50	0,267638
LVd 31 R3 - N15	41,27	3,75	0,288588
LVd 31 R3 - N16	44,26	4,00	0,309539
LVd 31 R3 - N17	47,26	4,25	0,330489
LVd 31 R3 - N18	53,25	4,50	0,37239
LVd 31 R3 - N19	53,25	4,75	0,37239
LVd 31 R3 - N20	59,24	5,00	0,414291
LVd 31 R3 - N21	62,24	5,25	0,435242
LVd 31 R3 - N22	65,24	5,50	0,456193
LVd 31 R3 - N23	71,23	5,75	0,498094
LVd 31 R3 - N24	74,22	6,00	0,519044
LVd 31 R3 - N25	74,22	6,25	0,519044
LVd 31 R3 - N26	80,22	6,50	0,560945
LVd 31 R3 - N27	80,22	6,75	0,560945
LVd 31 R3 - N28	86,21	7,00	0,602846
NQo 31 K R1 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
NQo 31 R1 - N01	8,31	0,35	0,058132
NQo 31 R1 - N02	11,31	0,70	0,079083
NQo 31 R1 - N03	29,28	1,05	0,204786
NQo 31 R1 - N04	50,26	1,40	0,35144
NQo 31 R1 - N05	74,22	1,75	0,519044
NQo 31 R1 - N06	95,19	2,10	0,665698
NQo 31 R1 - N07	104,18	2,45	0,728549
NQo 31 R1 - N08	116,17	2,80	0,812351
NQo 31 R1 - N09	125,15	3,15	0,875203
NQo 31 R1 - N10	128,15	3,50	0,896154
NQo 31 K R2 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
NQo 31 R2 - N01	8,31	0,35	0,058132
NQo 31 R2 - N02	11,31	0,70	0,079083
NQo 31 R2 - N03	29,28	1,05	0,204786
NQo 31 R2 - N04	59,24	1,40	0,414291
NQo 31 R2 - N05	80,22	1,75	0,560945
NQo 31 R2 - N06	101,19	2,10	0,707599
NQo 31 R2 - N07	110,17	2,45	0,77045
NQo 31 R2 - N08	119,16	2,80	0,833302
NQo 31 R2 - N09	122,16	3,15	0,854253
NQo 31 R2 - N10	125,15	3,50	0,875203
NQo 31 K R3 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
NQo 31 R3 - N01	8,31	0,35	0,058132

NQo 31 R3 - N02	8,31	0,70	0,058132
NQo 31 R3 - N03	23,29	1,05	0,162885
NQo 31 R3 - N04	44,26	1,40	0,309539
NQo 31 R3 - N05	65,24	1,75	0,456193
NQo 31 R3 - N06	86,21	2,10	0,602846
NQo 31 R3 - N07	104,18	2,45	0,728549
NQo 31 R3 - N08	110,17	2,80	0,77045
NQo 31 R3 - N09	119,16	3,15	0,833302
NQo 31 R3 - N10	125,15	3,50	0,875203
NQo 34 K R1 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
NQo 34 R1 - N01	8,31	0,35	0,058132
NQo 34 R1 - N02	8,31	0,70	0,058132
NQo 34 R1 - N03	23,29	1,05	0,162885
NQo 34 R1 - N04	35,28	1,40	0,246687
NQo 34 R1 - N05	59,24	1,75	0,414291
NQo 34 R1 - N06	74,22	2,10	0,519044
NQo 34 R1 - N07	95,19	2,45	0,665698
NQo 34 R1 - N08	107,18	2,80	0,7495
NQo 34 R1 - N09	119,16	3,15	0,833302
NQo 34 R1 - N10	119,16	3,50	0,833302
NQo 34 K R2 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
NQo 34 R2 - N01	5,32	0,35	0,037182
NQo 34 R2 - N02	8,31	0,70	0,058132
NQo 34 R2 - N03	29,28	1,05	0,204786
NQo 34 R2 - N04	38,27	1,40	0,267638
NQo 34 R2 - N05	74,22	1,75	0,519044
NQo 34 R2 - N06	104,18	2,10	0,728549
NQo 34 R2 - N07	110,17	2,45	0,77045
NQo 34 R2 - N08	119,16	2,80	0,833302
NQo 34 R2 - N09	119,16	3,15	0,833302
NQo 34 R2 - N10	128,15	3,50	0,896154
NQo 34 K R3 (Co = 143 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
NQo 34 R3 - N01	5,32	0,35	0,037182
NQo 34 R3 - N02	8,31	0,70	0,058132
NQo 34 R3 - N03	26,29	1,05	0,183836
NQo 34 R3 - N04	44,26	1,40	0,309539
NQo 34 R3 - N05	65,24	1,75	0,456193
NQo 34 R3 - N06	89,20	2,10	0,623797
NQo 34 R3 - N07	104,18	2,45	0,728549
NQo 34 R3 - N08	113,17	2,80	0,791401
NQo 34 R3 - N09	119,16	3,15	0,833302
NQo 34 R3 - N10	131,15	3,50	0,917104

NQo 37 K R1 (Co = 152 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
NQo 37 R1 - N01	8,31	0,35	0,05469
NQo 37 R1 - N02	8,31	0,70	0,05469
NQo 37 R1 - N03	35,28	1,05	0,232081
NQo 37 R1 - N04	71,23	1,40	0,468601
NQo 37 R1 - N05	113,17	1,75	0,744542
NQo 37 R1 - N06	125,15	2,10	0,823382
NQo 37 R1 - N07	134,14	2,45	0,882512
NQo 37 R1 - N08	134,14	2,80	0,882512
NQo 37 R1 - N09	140,13	3,15	0,921932
NQo 37 R1 - N10	140,13	3,50	0,921932
NQo 37 K R2 (Co = 152 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
NQo 37 R2 - N01	5,32	0,35	0,03498
NQo 37 R2 - N02	8,31	0,70	0,05469
NQo 37 R2 - N03	32,28	1,05	0,212371
NQo 37 R2 - N04	71,23	1,40	0,468601
NQo 37 R2 - N05	104,18	1,75	0,685412
NQo 37 R2 - N06	122,16	2,10	0,803672
NQo 37 R2 - N07	134,14	2,45	0,882512
NQo 37 R2 - N08	140,13	2,80	0,921932
NQo 37 R2 - N09	143,13	3,15	0,941642
NQo 37 R2 - N10	143,13	3,50	0,941642
NQo 37 K R3 (Co = 163 mg/L)			
Amostra	K (mg/L)	np	C/Co
NQo 37 R3 - N01	5,32	0,35	0,03262
NQo 37 R3 - N02	8,31	0,70	0,051
NQo 37 R3 - N03	38,27	1,05	0,234799
NQo 37 R3 - N04	92,20	1,40	0,565637
NQo 37 R3 - N05	134,14	1,75	0,822956
NQo 37 R3 - N06	143,13	2,10	0,878096
NQo 37 R3 - N07	149,12	2,45	0,914855
NQo 37 R3 - N08	149,12	2,80	0,914855
NQo 37 R3 - N09	149,12	3,15	0,914855
NQo 37 R3 - N10	152,12	3,50	0,933235
LVd 25 P R1 (Co = 870 mg/L)			
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
LVd 25 R1 - N01	0,52	0,25	0,000597
LVd 25 R1 - N02	0,14	0,50	0,000166
LVd 25 R1 - N03	5,87	0,75	0,006742
LVd 25 R1 - N04	30,83	1,00	0,03544
LVd 25 R1 - N05	64,18	1,25	0,073769
LVd 25 R1 - N06	127,07	1,50	0,146052
LVd 25 R1 - N07	168,76	1,75	0,19398
LVd 25 R1 - N08	211,90	2,00	0,243566
LVd 25 R1 - N09	287,93	2,25	0,330951

LVd 25 R1 - N10	318,70	2,50	0,366319
LVd 25 R1 - N11	361,69	2,75	0,415734
LVd 25 R1 - N12	405,40	3,00	0,465972
LVd 25 R1 - N13	450,00	3,25	0,517246
LVd 25 R1 - N14	505,22	3,50	0,580711
LVd 25 R1 - N15	529,78	3,75	0,608939
LVd 25 R1 - N16	579,35	4,00	0,665916
LVd 25 R1 - N17	614,25	4,25	0,706037
LVd 25 R1 - N18	627,13	4,50	0,720833
LVd 25 R1 - N19	606,00	4,75	0,696557
LVd 25 R1 - N20	654,42	5,00	0,752202
LVd 25 R1 - N21	688,75	5,25	0,791671
LVd 25 R1 - N22	720,84	5,50	0,82855
LVd 25 R1 - N23	730,80	5,75	0,839998
LVd 25 R1 - N24	719,43	6,00	0,826935
LVd 25 R1 - N25	769,78	6,25	0,884799
LVd 25 R1 - N26	747,31	6,50	0,858971
LVd 25 R1 - N27	815,17	6,75	0,936976
LVd 25 R1 - N28	781,98	7,00	0,898826

LVd 25 P R2 (Co = 870 mg/L)			
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
LVd 25 R2 - N01	0,53	0,25	0,000608
LVd 25 R2 - N02	0,12	0,50	0,000133
LVd 25 R2 - N03	1,54	0,75	0,001772
LVd 25 R2 - N04	7,82	1,00	0,008986
LVd 25 R2 - N05	20,29	1,25	0,023317
LVd 25 R2 - N06	73,50	1,50	0,084486
LVd 25 R2 - N07	99,63	1,75	0,114517
LVd 25 R2 - N08	148,24	2,00	0,170388
LVd 25 R2 - N09	220,32	2,25	0,253246
LVd 25 R2 - N10	253,12	2,50	0,290946
LVd 25 R2 - N11	333,49	2,75	0,383326
LVd 25 R2 - N12	356,91	3,00	0,410236
LVd 25 R2 - N13	409,92	3,25	0,471172
LVd 25 R2 - N14	456,96	3,50	0,525237
LVd 25 R2 - N15	525,52	3,75	0,604049
LVd 25 R2 - N16	546,91	4,00	0,628634
LVd 25 R2 - N17	609,80	4,25	0,700922
LVd 25 R2 - N18	613,94	4,50	0,705677
LVd 25 R2 - N19	648,13	4,75	0,744982
LVd 25 R2 - N20	668,13	5,00	0,767968
LVd 25 R2 - N21	720,97	5,25	0,828697
LVd 25 R2 - N22	737,43	5,50	0,847624
LVd 25 R2 - N23	761,41	5,75	0,875178
LVd 25 R2 - N24	739,47	6,00	0,849964
LVd 25 R2 - N25	824,58	6,25	0,947792
LVd 25 R2 - N26	760,21	6,50	0,873801

LVd 25 R2 - N27	820,05	6,75	0,942589	LVd 28 R1 - N14	458,12	3,50	0,509025
LVd 25 R2 - N28	803,21	7,00	0,92323	LVd 28 R1 - N15	522,44	3,75	0,580487
LVd 25 P R3 (Co = 870 mg/L)				LVd 28 R1 - N16	557,02	4,00	0,618908
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co	LVd 28 R1 - N17	615,84	4,25	0,684263
LVd 25 R3 - N01	0,63	0,25	0,00072	LVd 28 R1 - N18	618,35	4,50	0,687054
LVd 25 R3 - N02	0,11	0,50	0,00013	LVd 28 R1 - N19	626,70	4,75	0,696336
LVd 25 R3 - N03	2,96	0,75	0,003408	LVd 28 R1 - N20	671,61	5,00	0,746238
LVd 25 R3 - N04	15,54	1,00	0,017857	LVd 28 R1 - N21	731,07	5,25	0,812304
LVd 25 R3 - N05	35,55	1,25	0,040863	LVd 28 R1 - N22	779,75	5,50	0,866391
LVd 25 R3 - N06	90,84	1,50	0,104411	LVd 28 R1 - N23	803,32	5,75	0,892581
LVd 25 R3 - N07	124,17	1,75	0,142726	LVd 28 R1 - N24	786,74	6,00	0,874156
LVd 25 R3 - N08	168,51	2,00	0,193689	LVd 28 R1 - N25	789,06	6,25	0,876733
LVd 25 R3 - N09	239,80	2,25	0,27563	LVd 28 R1 - N26	849,31	6,50	0,943678
LVd 25 R3 - N10	279,69	2,50	0,321483	LVd 28 R1 - N27	886,81	6,75	0,985346
LVd 25 R3 - N11	337,26	2,75	0,387656	LVd 28 R1 - N28	879,31	7,00	0,977011
LVd 25 R3 - N12	384,09	3,00	0,441477	LVd 28 P R2 (Co = 900 mg/L)			
LVd 25 R3 - N13	431,36	3,25	0,495816	Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
LVd 25 R3 - N14	475,49	3,50	0,546542	LVd 28 R2 - N01	0,62	0,25	0,000688
LVd 25 R3 - N15	525,96	3,75	0,604553	LVd 28 R2 - N02	0,80	0,50	0,000889
LVd 25 R3 - N16	562,86	4,00	0,646971	LVd 28 R2 - N03	1,37	0,75	0,001517
LVd 25 R3 - N17	613,73	4,25	0,705441	LVd 28 R2 - N04	7,01	1,00	0,007785
LVd 25 R3 - N18	620,54	4,50	0,713261	LVd 28 R2 - N05	19,22	1,25	0,021359
LVd 25 R3 - N19	624,30	4,75	0,717585	LVd 28 R2 - N06	71,06	1,50	0,078953
LVd 25 R3 - N20	664,29	5,00	0,763557	LVd 28 R2 - N07	98,40	1,75	0,109334
LVd 25 R3 - N21	712,68	5,25	0,819169	LVd 28 R2 - N08	145,04	2,00	0,16115
LVd 25 R3 - N22	747,08	5,50	0,858712	LVd 28 R2 - N09	215,10	2,25	0,239
LVd 25 R3 - N23	765,65	5,75	0,880054	LVd 28 R2 - N10	254,88	2,50	0,283201
LVd 25 R3 - N24	749,68	6,00	0,861704	LVd 28 R2 - N11	327,44	2,75	0,363827
LVd 25 R3 - N25	827,36	6,25	0,950994	LVd 28 R2 - N12	364,90	3,00	0,405446
LVd 25 R3 - N26	766,19	6,50	0,880676	LVd 28 R2 - N13	415,62	3,25	0,461796
LVd 25 R3 - N27	833,90	6,75	0,958511	LVd 28 R2 - N14	457,34	3,50	0,508161
LVd 25 R3 - N28	812,54	7,00	0,933949	LVd 28 R2 - N15	524,49	3,75	0,582772
LVd 28 P R1 (Co = 900 mg/L)				LVd 28 R2 - N16	550,28	4,00	0,611423
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co	LVd 28 R2 - N17	611,81	4,25	0,679793
LVd 28 R1 - N01	0,80	0,25	0,000888	LVd 28 R2 - N18	615,41	4,50	0,683787
LVd 28 R1 - N02	0,90	0,50	0,001	LVd 28 R2 - N19	640,99	4,75	0,712211
LVd 28 R1 - N03	1,01	0,75	0,001125	LVd 28 R2 - N20	669,29	5,00	0,743659
LVd 28 R1 - N04	5,38	1,00	0,005981	LVd 28 R2 - N21	724,34	5,25	0,804817
LVd 28 R1 - N05	17,10	1,25	0,018998	LVd 28 R2 - N22	751,54	5,50	0,835044
LVd 28 R1 - N06	66,17	1,50	0,073519	LVd 28 R2 - N23	755,23	5,75	0,83914
LVd 28 R1 - N07	95,94	1,75	0,106603	LVd 28 R2 - N24	769,82	6,00	0,855361
LVd 28 R1 - N08	138,63	2,00	0,154034	LVd 28 R2 - N25	775,38	6,25	0,861531
LVd 28 R1 - N09	204,65	2,25	0,227391	LVd 28 R2 - N26	818,58	6,50	0,909533
LVd 28 R1 - N10	258,40	2,50	0,287107	LVd 28 R2 - N27	845,32	6,75	0,939248
LVd 28 R1 - N11	315,35	2,75	0,350384	LVd 28 R2 - N28	878,02	7,00	0,975578
LVd 28 R1 - N12	380,89	3,00	0,423216	LVd 28 P R3 (Co = 900 mg/L)			
LVd 28 R1 - N13	427,01	3,25	0,474455	Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
				LVd 28 R3 - N01	0,63	0,25	0,000699

LVd 28 R3 - N02	1,00	0,50	0,001111	LVd 31 R1 - N19	613,22	4,75	0,68135
LVd 28 R3 - N03	1,88	0,75	0,002093	LVd 31 R1 - N20	676,38	5,00	0,751529
LVd 28 R3 - N04	9,78	1,00	0,010869	LVd 31 R1 - N21	743,94	5,25	0,826604
LVd 28 R3 - N05	24,58	1,25	0,027308	LVd 31 R1 - N22	818,86	5,50	0,90984
LVd 28 R3 - N06	77,45	1,50	0,086052	LVd 31 R1 - N23	843,83	5,75	0,937585
LVd 28 R3 - N07	106,89	1,75	0,118765	LVd 31 R1 - N24	830,61	6,00	0,922896
LVd 28 R3 - N08	152,59	2,00	0,169548	LVd 31 R1 - N25	848,12	6,25	0,942351
LVd 28 R3 - N09	222,90	2,25	0,247664	LVd 31 R1 - N26	815,92	6,50	0,906576
LVd 28 R3 - N10	263,30	2,50	0,292552	LVd 31 R1 - N27	879,08	6,75	0,976754
LVd 28 R3 - N11	330,21	2,75	0,366902	LVd 31 R1 - N28	892,30	7,00	0,991443
LVd 28 R3 - N12	371,96	3,00	0,413292	LVd 31 P R2 (Co = 870 mg/L)			
LVd 28 R3 - N13	421,34	3,25	0,468154	Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
LVd 28 R3 - N14	463,43	3,50	0,514918	LVd 31 R2 - N01	0,43	0,25	0,000495
LVd 28 R3 - N15	524,90	3,75	0,58322	LVd 31 R2 - N02	0,52	0,50	0,000598
LVd 28 R3 - N16	554,76	4,00	0,616395	LVd 31 R2 - N03	1,35	0,75	0,001552
LVd 28 R3 - N17	612,62	4,25	0,68069	LVd 31 R2 - N04	3,21	1,00	0,00369
LVd 28 R3 - N18	617,24	4,50	0,685823	LVd 31 R2 - N05	5,02	1,25	0,005772
LVd 28 R3 - N19	634,83	4,75	0,705368	LVd 31 R2 - N06	56,17	1,50	0,06456
LVd 28 R3 - N20	667,72	5,00	0,741915	LVd 31 R2 - N07	75,09	1,75	0,086307
LVd 28 R3 - N21	720,73	5,25	0,800811	LVd 31 R2 - N08	127,97	2,00	0,147087
LVd 28 R3 - N22	751,23	5,50	0,834698	LVd 31 R2 - N09	200,85	2,25	0,230862
LVd 28 R3 - N23	769,41	5,75	0,854905	LVd 31 R2 - N10	226,55	2,50	0,260408
LVd 28 R3 - N24	773,30	6,00	0,85922	LVd 31 R2 - N11	329,73	2,75	0,378995
LVd 28 R3 - N25	784,69	6,25	0,871878	LVd 31 R2 - N12	329,73	3,00	0,378995
LVd 28 R3 - N26	841,07	6,50	0,934518	LVd 31 R2 - N13	388,48	3,25	0,446528
LVd 28 R3 - N27	817,84	6,75	0,908711	LVd 31 R2 - N14	438,42	3,50	0,503932
LVd 28 R3 - N28	857,21	7,00	0,952456	LVd 31 R2 - N15	525,08	3,75	0,603545
LVd 31 P R1 (Co = 900 mg/L)				LVd 31 R2 - N16	530,96	4,00	0,610298
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co	LVd 31 R2 - N17	605,87	4,25	0,696403
LVd 31 R1 - N01	1,04	0,25	0,001152	LVd 31 R2 - N18	607,34	4,50	0,698092
LVd 31 R1 - N02	2,51	0,50	0,002789	LVd 31 R2 - N19	671,97	4,75	0,772379
LVd 31 R1 - N03	3,65	0,75	0,004056	LVd 31 R2 - N20	671,97	5,00	0,772379
LVd 31 R1 - N04	5,38	1,00	0,005978	LVd 31 R2 - N21	729,26	5,25	0,838224
LVd 31 R1 - N05	8,82	1,25	0,009802	LVd 31 R2 - N22	727,79	5,50	0,836536
LVd 31 R1 - N06	53,05	1,50	0,058949	LVd 31 R2 - N23	729,26	5,75	0,838224
LVd 31 R1 - N07	84,08	1,75	0,093417	LVd 31 R2 - N24	757,16	6,00	0,870303
LVd 31 R1 - N08	122,27	2,00	0,135851	LVd 31 R2 - N25	754,23	6,25	0,866926
LVd 31 R1 - N09	182,49	2,25	0,202766	LVd 31 R2 - N26	793,89	6,50	0,912512
LVd 31 R1 - N10	254,81	2,50	0,283126	LVd 31 R2 - N27	821,79	6,75	0,94459
LVd 31 R1 - N11	295,94	2,75	0,328824	LVd 31 R2 - N28	826,20	7,00	0,949655
LVd 31 R1 - N12	395,82	3,00	0,439804	LVd 31 P R3 (Co = 870 mg/L)			
LVd 31 R1 - N13	436,95	3,25	0,485502	Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
LVd 31 R1 - N14	453,11	3,50	0,503455	LVd 31 R3 - N01	0,41	0,25	0,000474
LVd 31 R1 - N15	519,21	3,75	0,576898	LVd 31 R3 - N02	0,18	0,50	0,000202
LVd 31 R1 - N16	561,81	4,00	0,624228	LVd 31 R3 - N03	8,77	0,75	0,010077
LVd 31 R1 - N17	620,56	4,25	0,689511	LVd 31 R3 - N04	46,13	1,00	0,053023
LVd 31 R1 - N18	620,56	4,50	0,689511	LVd 31 R3 - N05	92,81	1,25	0,106676
				LVd 31 R3 - N06	163,29	1,50	0,187693

LVd 31 R3 - N07	213,35	1,75	0,245233
LVd 31 R3 - N08	255,30	2,00	0,293443
LVd 31 R3 - N09	336,06	2,25	0,386271
LVd 31 R3 - N10	357,70	2,50	0,411154
LVd 31 R3 - N11	386,12	2,75	0,443812
LVd 31 R3 - N12	426,71	3,00	0,490467
LVd 31 R3 - N13	468,65	3,25	0,538676
LVd 31 R3 - N14	534,94	3,50	0,614879
LVd 31 R3 - N15	533,59	3,75	0,613324
LVd 31 R3 - N16	595,83	4,00	0,684861
LVd 31 R3 - N17	614,77	4,25	0,706633
LVd 31 R3 - N18	633,71	4,50	0,728405
LVd 31 R3 - N19	587,71	4,75	0,67553
LVd 31 R3 - N20	644,54	5,00	0,740847
LVd 31 R3 - N21	664,83	5,25	0,764174
LVd 31 R3 - N22	694,60	5,50	0,798387
LVd 31 R3 - N23	695,95	5,75	0,799943
LVd 31 R3 - N24	689,19	6,00	0,792167
LVd 31 R3 - N25	712,19	6,25	0,818604
LVd 31 R3 - N26	728,42	6,50	0,837266
LVd 31 R3 - N27	751,42	6,75	0,863704
LVd 31 R3 - N28	796,43	7,00	0,915441
NQo 31 P R1 (Co = 1100 mg/L)			
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
NQo 31 R1 - N01	51,21	0,35	0,046554
NQo 31 R1 - N02	5,30	0,70	0,00482
NQo 31 R1 - N03	51,40	1,05	0,046724
NQo 31 R1 - N04	339,28	1,40	0,308435
NQo 31 R1 - N05	573,04	1,75	0,520948
NQo 31 R1 - N06	752,50	2,10	0,684094
NQo 31 R1 - N07	792,86	2,45	0,720783
NQo 31 R1 - N08	1021,35	2,80	0,928504
NQo 31 R1 - N09	1064,11	3,15	0,967373
NQo 31 R1 - N10	1075,83	3,50	0,97803
NQo 31 P R2 (Co =1100mg/L)			
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
NQo 31 R2 - N01	12,75	0,35	0,011589
NQo 31 R2 - N02	8,04	0,70	0,00731
NQo 31 R2 - N03	161,81	1,05	0,1471
NQo 31 R2 - N04	392,25	1,40	0,356587
NQo 31 R2 - N05	619,49	1,75	0,563175
NQo 31 R2 - N06	743,47	2,10	0,675882
NQo 31 R2 - N07	967,09	2,45	0,879173
NQo 31 R2 - N08	1041,08	2,80	0,946433
NQo 31 R2 - N09	1049,65	3,15	0,954229
NQo 31 R2 - N10	1055,41	3,50	0,959463

NQo 31 P R3 (Co = 1100 mg/L)			
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
NQo 31 R3 - N01	13,43	0,35	0,012213
NQo 31 R3 - N02	3,89	0,70	0,003537
NQo 31 R3 - N03	54,05	1,05	0,049138
NQo 31 R3 - N04	351,24	1,40	0,319308
NQo 31 R3 - N05	582,63	1,75	0,529667
NQo 31 R3 - N06	873,96	2,10	0,794511
NQo 31 R3 - N07	975,04	2,45	0,886401
NQo 31 R3 - N08	967,09	2,80	0,879173
NQo 31 R3 - N09	993,85	3,15	0,903499
NQo 31 R3 - N10	1002,02	3,50	0,910927
NQo 34 P R1 (Co = 1100 mg/L)			
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
NQo 34 R1 - N01	15,80	0,35	0,014364
NQo 34 R1 - N02	11,38	0,70	0,01035
NQo 34 R1 - N03	136,39	1,05	0,123987
NQo 34 R1 - N04	411,25	1,40	0,373862
NQo 34 R1 - N05	730,22	1,75	0,663839
NQo 34 R1 - N06	980,38	2,10	0,891253
NQo 34 R1 - N07	1026,95	2,45	0,93359
NQo 34 R1 - N08	1026,95	2,80	0,93359
NQo 34 R1 - N09	1002,02	3,15	0,910927
NQo 34 R1 - N10	1024,15	3,50	0,931044
NQo 34 P R2 (Co = 1100 mg/L)			
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
NQo 34 R2 - N01	15,38	0,35	0,013982
NQo 34 R2 - N02	15,52	0,70	0,014109
NQo 34 R2 - N03	76,30	1,05	0,069364
NQo 34 R2 - N04	69,99	1,40	0,063632
NQo 34 R2 - N05	140,13	1,75	0,127395
NQo 34 R2 - N06	898,28	2,10	0,816615
NQo 34 R2 - N07	1002,02	2,45	0,910927
NQo 34 R2 - N08	1026,95	2,80	0,93359
NQo 34 R2 - N09	1043,93	3,15	0,949024
NQo 34 R2 - N10	1035,40	3,50	0,941274
NQo 34 P R3 (Co = 1100 mg/L)			
Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
NQo 34 R3 - N01	23,48	0,35	0,021347
NQo 34 R3 - N02	15,80	0,70	0,014364
NQo 34 R3 - N03	180,71	1,05	0,16428
NQo 34 R3 - N04	460,34	1,40	0,418493
NQo 34 R3 - N05	670,78	1,75	0,609804
NQo 34 R3 - N06	783,06	2,10	0,711876
NQo 34 R3 - N07	961,82	2,45	0,874386
NQo 34 R3 - N08	988,44	2,80	0,89858

NQo 34 R3 - N09	999,29	3,15	0,908444
NQo 34 R3 - N10	975,04	3,50	0,886401

NQo 37 P R1 (Co =1100mg/L)

Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
NQo 37 R1 - N01	13,30	0,35	0,012088
NQo 37 R1 - N02	1,49	0,70	0,001355
NQo 37 R1 - N03	112,83	1,05	0,102573
NQo 37 R1 - N04	101,40	1,40	0,092178
NQo 37 R1 - N05	903,21	1,75	0,821102
NQo 37 R1 - N06	959,20	2,10	0,872002
NQo 37 R1 - N07	946,19	2,45	0,860177
NQo 37 R1 - N08	980,38	2,80	0,891253
NQo 37 R1 - N09	1015,79	3,15	0,923447
NQo 37 R1 - N10	1004,76	3,50	0,913417

NQo 37 P R2 (Co =1100mg/L)

Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
NQo 37 R2 - N01	11,25	0,35	0,010226
NQo 37 R2 - N02	5,17	0,70	0,004703
NQo 37 R2 - N03	305,05	1,05	0,277317
NQo 37 R2 - N04	725,88	1,40	0,659895
NQo 37 R2 - N05	959,20	1,75	0,872002
NQo 37 R2 - N06	972,38	2,10	0,883985
NQo 37 R2 - N07	967,09	2,45	0,879173
NQo 37 R2 - N08	980,38	2,80	0,891253
NQo 37 R2 - N09	977,71	3,15	0,888824
NQo 37 R2 - N10	991,14	3,50	0,901036

NQo 37 P R3 (Co =1000mg/L)

Amostra	P (mg/L)	np	C/Co
NQo 37 R3 - N01	4,62	0,35	0,004617
NQo 37 R3 - N02	154,58	0,70	0,154581
NQo 37 R3 - N03	414,92	1,05	0,414919
NQo 37 R3 - N04	736,60	1,40	0,7366
NQo 37 R3 - N05	843,83	1,75	0,843826
NQo 37 R3 - N06	877,61	2,10	0,87761
NQo 37 R3 - N07	890,83	2,45	0,89083
NQo 37 R3 - N08	909,93	2,80	0,909925
NQo 37 R3 - N09	912,86	3,15	0,912863
NQo 37 R3 - N10	926,08	3,50	0,926083

Apêndice B: Leituras das sondas acopladas na TDR em solução, contendo diferentes concentrações K⁺ e P, referentes a primeira calibração da TDR.

Concentrações de potássio (mg/L) C(K ⁺)	Leitura TDR medidas BULK EC Condutividade elétrica na solução (CEs)					
	sonda 1	sonda 2	sonda 3	sonda 4	sonda 5	Média
0,0	0,02678	0,03112	0,02959	0,03080	0,03259	0,03018
7,5	0,04319	0,05039	0,04799	0,05039	0,05279	0,04895
15,0	0,05862	0,06840	0,06514	0,06840	0,07165	0,06644
22,5	0,07304	0,08522	0,08116	0,08522	0,08927	0,08278
30,0	0,08654	0,10096	0,09615	0,10096	0,10577	0,09808
37,5	0,09920	0,11573	0,11022	0,11573	0,12124	0,11242
45,0	0,11112	0,12963	0,12346	0,12963	0,13581	0,12593
52,5	0,12238	0,14277	0,13597	0,14277	0,14957	0,13869
60,0	0,13307	0,15525	0,14786	0,15525	0,16264	0,15081
67,5	0,14329	0,16717	0,15921	0,16717	0,17513	0,16239
75,0	0,15312	0,17865	0,17014	0,17865	0,18715	0,17354
82,5	0,16266	0,18977	0,18073	0,18977	0,19881	0,18435
90,0	0,17198	0,20065	0,19109	0,20065	0,21020	0,19491
97,5	0,18119	0,21139	0,20132	0,21139	0,22146	0,20535
105,0	0,19037	0,22210	0,21152	0,22210	0,23267	0,21575
112,5	0,19961	0,23287	0,22178	0,23287	0,24396	0,22622
120,0	0,20899	0,24382	0,23221	0,24382	0,25543	0,23685
127,5	0,21861	0,25505	0,24290	0,25505	0,26720	0,24776
135,0	0,22857	0,26666	0,25396	0,26666	0,27936	0,25904
142,5	0,23893	0,27876	0,26548	0,27876	0,29203	0,27079
150,0	0,24981	0,29144	0,27756	0,29144	0,30532	0,28311
157,5	0,26128	0,30482	0,29031	0,30482	0,31934	0,29611
165,0	0,27343	0,31901	0,30381	0,31901	0,33420	0,30989
172,5	0,28636	0,33412	0,31823	0,33419	0,35002	0,32458
180,0	0,30012	0,35021	0,33349	0,35017	0,36687	0,34017

Concentrações de fósforo (mg/L) C(P)	Leitura TDR medidas BULK EC Condutividade elétrica na solução (CEs)					
	sonda 1	sonda 2	sonda 3	sonda 4	sonda 5	Média
0	0,02667	0,03111	0,02963	0,03111	0,03259	0,03022
50	0,05657	0,06600	0,06286	0,06600	0,06914	0,06411
100	0,08536	0,09959	0,09484	0,09959	0,10433	0,09674
150	0,11302	0,13186	0,12558	0,13186	0,13813	0,12809
200	0,13955	0,16280	0,15505	0,16280	0,17056	0,15815
250	0,16493	0,19242	0,18326	0,19242	0,20159	0,18692
300	0,18917	0,22070	0,21019	0,22070	0,23121	0,21439
350	0,21226	0,24763	0,23584	0,24763	0,25943	0,24056
400	0,23418	0,27321	0,26020	0,27321	0,28622	0,26540
450	0,25493	0,29742	0,28326	0,29742	0,31159	0,28892
500	0,27451	0,32026	0,30501	0,32026	0,33551	0,31111
550	0,29291	0,34172	0,32545	0,34172	0,35800	0,33196
600	0,31011	0,36180	0,34457	0,36180	0,37902	0,35146
650	0,32612	0,38047	0,36235	0,38047	0,39859	0,36960
700	0,34092	0,39774	0,37880	0,39774	0,41668	0,38638
750	0,35451	0,41359	0,39390	0,41359	0,43329	0,40178
800	0,36688	0,42803	0,40764	0,42803	0,44841	0,41580
850	0,37803	0,44103	0,42003	0,44103	0,46203	0,42843
900	0,38775	0,45259	0,43108	0,45257	0,47415	0,43963
950	0,39661	0,46271	0,44068	0,46271	0,48474	0,44949
1000	0,40403	0,47136	0,44892	0,47137	0,49382	0,45790
1050	0,41020	0,47857	0,45578	0,47857	0,50136	0,46490
1100	0,41511	0,48429	0,46123	0,48429	0,50735	0,47045
1150	0,41875	0,48856	0,46527	0,48854	0,51182	0,47459
1200	0,42111	0,49129	0,46787	0,49129	0,51469	0,47725