**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Efeito da temperatura no transporte dos íons potássio e nitrato no
solo**

Adriano Dicesar Martins de Araujo Gonçalves

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Física do
Ambiente Agrícola

**Piracicaba
2007**

Adriano Dicesar Martins de Araujo Gonçalves
Engenheiro Agrícola

Efeito da temperatura no transporte dos íons potássio e nitrato no solo

Orientador:
Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Física do
Ambiente Agrícola

**Piracicaba
2007**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Gonçalves, Adriano Dicesar Martins de Araujo
Efeito da temperatura no transporte dos íons potássio e nitrato no solo / Adriano
Dicesar Martins de Araujo Gonçalves. - - Piracicaba, 2007.
82 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Efluentes 2. Nitrato 3. Potássio 4. Química do solo 5. Soluto 6. Temperatura
7. Transporte de íons I. Título

CDD 631.41

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Dedico este trabalho

Ao meu pai, Cesar Antonio Gonçalves, exemplo de uma pessoa íntegra e honesta que sempre acreditou em mim, que sempre incentivou meus estudos apesar das dificuldades, sempre querendo o melhor; meu amor e gratidão por tudo que faz por mim.

À minha mãe Heloisa Maria Martins de Araujo Gonçalves, uma pessoa sensata, que parou a sua vida para salvar a minha, em um grande momento de dificuldade meu; não tenho palavras para expressar tanta gratidão e amor que sinto por ela,

Aos meus irmãos Guillermo Dicesar Martins de Araujo Gonçalves; Anna Karina Dicesar Martins de Araujo Gonçalves; Fernando Dicesar Martins de Araujo Gonçalves e Anna Gabriela Dicesar Martins de Araujo Gonçalves, que sempre me ajudaram, mesmo nas dificuldades e apesar da distância sempre os tenho no coração,

Aos meus avós, Herculano Gonçalves e Genoveva Jaronski Gonçalves e à minha tia Carmela Jaronski, que mesmo longe, nunca deixaram de ajudar apesar de tudo.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e coragem para superar todas as dificuldades e momentos difíceis durante a realização desse trabalho.

Ao Prof. Jarbas Honorio de Miranda, pelo apoio, pela orientação no decorrer do curso e na realização da dissertação.

Aos Professores Paulo Leonel Libardi e Sergio Oliveira Moraes, pelos conhecimentos passados, ao Prof. Dr. Marcos Yassuo Kamogawa, pela grande ajuda na parte química de meu trabalho, ao Professor. Arquimedes Lavorenti, por ceder os laboratórios para realização de meu trabalho.

Aos meus colegas e amigos, os quais tive o prazer de conhecer e conviver e que tornaram o mestrado mais agradável, Luciana de Pinho Cunha, Dolorice Moreti, Marcela P. de C. Engler, Celso Luis de Oliveira Filho, Fábio Vale Scarpate, Frederico Marcio Corrêa Vieira, Julia Ribeiro Ferreira Gouvêa, Pablo Javier Ghiberto, Alexsandro dos Santos Brito, Andréa Inês Irigoyen, Derblai Casaroli, Greice Ximena Santos Oliveira, Jones Simon, Maristela Neves da Conceição, Monica Martins da Silva, Jaedson Cláudio Anunciato Mota, Laércio Alves de Carvalho, Flávia Carvalho Silva Fernandes, Genelicio Crusoe Rocha, Claudia Milene Nascente das Neves, Jennifer Roberta Manesco, José Felipe Gonzaga Sabadin, Luís Ricardo Bérnago, Paulo Rossi, Guilherme Marengo Ferreira, Tiago Grieco, Danielle Yokoyama Gonçalves, Renata Maria Lanza, Paulo Mateus Alves, Jorge Luis Abrão Furlan e a todos que de alguma forma estiveram comigo nessa caminhada;

Ao meu amigo Anderson Luiz de Souza, pela ajuda na parte estatística de meu trabalho,

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, Gilmar Batista Grigolom, Antonio Agostinho Gozzo, Hélio Toledo Gomes, Luis Custodio de Camargo e Osvaldo Rettore Neto, pela pelo auxílio na obtenção de dados e materiais de solos utilizados nesse trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas Ana Maria da Silva Maia Michelin, Angela Márcia Derigi Silva, Edivaldo Modesto de Abreu, Expedita Maria de Azevedo, Francisco Bernardo Dias, Felipe Gabriel Andrino, Gertrudes Cláudia Barbieri Fornazier, Janaina Truffi, Jorge Alexandre Wiendl, Lenita Maria C. Pacheco E. Oliveira,

Luiz Fernando Novello, Rita de Cássia Leite de Castro, Robinson Luís Tuon, Solange de Assis Paes Sabadin

À Mariana Milam, pelo carinho dado,

Aos meus familiares pelo apoio dado mesmo de longe sempre acreditaram em mim,

À ESALQ/USP e ao Departamento de Ciências Exatas, pela oportunidade de desenvolver este trabalho;

Àquelas pessoas que de alguma forma direta ou indireta me ajudaram na conclusão do meu trabalho

“Jamais seremos completamente felizes se não dermos nossa contribuição pessoal para a sociedade, fazendo diferença no nosso mundo”.

(autor desconhecido)

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
1 INTRODUÇÃO	13
2 DESENVOLVIMENTO	15
2.1 Considerações iniciais.....	15
2.1.1 Transporte do íon potássio no solo	15
2.1.2 Transporte do íon nitrato no solo.....	16
2.1.3 Dinâmica de solutos e parâmetros de transporte	17
2.1.4 Estimativa de parâmetros de convecção-dispersão a partir das curvas de distribuição de efluentes obtidas em laboratório	20
2.1.5 Fatores que influenciam no transporte de solutos.....	27
2.1.6 Dependência da temperatura em coeficientes de difusão.....	32
2.2 Material e métodos.....	33
2.2.1 Local do experimento	33
2.2.2 Montagem do experimento em laboratório	34
2.2.4 Soluções químicas utilizadas	38
2.2.5 Análise química dos efluentes.....	39
2.3 Resultados e Discussão	41
2.3.1 Curvas de distribuição dos efluentes nitrato e potássio	41
2.3.1.1 Nitrato e Potássio – Temperatura Ambiente (25°C a 28°C).....	42
2.3.1.2 Nitrato e Potássio – Temperatura 40°C.....	44
2.3.1.3 Nitrato e Potássio – Temperatura 50°C.....	44
2.3.2 Parâmetros de transporte dos íons nitrato e potássio sob as temperaturas, ambiente, 40°C e 50°C.....	48
2.3.3 Relação entre os parâmetros de transporte dos íons nitrato e potássio em função da temperatura	49
3 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS.....	59

RESUMO

Efeito da temperatura no transporte dos íons potássio e nitrato no solo

No estudo da dinâmica de solutos num meio poroso é de suma importância o conhecimento das propriedades do meio e dos líquidos percolantes, bem como de fatores externos. Um fator externo relevante é a temperatura e, nesse sentido, objetivou-se com o presente trabalho a determinação de parâmetros de transporte dos íons potássio e nitrato para diferentes valores de temperatura em experimentos de deslocamento miscível. Os parâmetros avaliados foram o fator de retardamento (R), o coeficiente de difusão/dispersão (D) e a dispersividade (λ) e as temperaturas utilizadas foram a ambiente (25°C a 28°C), 40°C e 50°C. Os sais utilizados foram nitrato de potássio e cloreto de potássio, preparados em uma solução composta de 50ppm de nitrato e 2000ppm de potássio e o meio poroso um Latossolo Vermelho Amarelo, textura média. Os resultados obtidos permitiram concluir que a temperatura apresentou influência na velocidade da solução no meio poroso e no coeficiente de dispersão.

Palavras-chave: Curvas de distribuição de efluentes; Deslocamento miscível; Modelagem computacional

ABSTRACT

Effect of temperature on the transport of the potassium and nitrate ions in a soil

In the study of solute dynamics in porous media, it is of extreme importance the knowledge of the medium and transporting liquid properties as well as of external factors as temperature. In this sense, the objective of this work was the determination of parameters for potassium and nitrate ions under different temperatures in miscible displacement experiments, in a sandy loam Oxisol. The evaluated parameters were retardation factor (R) diffusion/dispersion coefficient (D) and dispersivity (λ), whereas the used temperatures were the prevailing temperature (25°C to 28°C), 40°C and 50°C. The used salts were potassium nitrate and potassium chloride, prepared in a composed solution of 50 ppm of nitrate and 2000 ppm of potassium. From the results, it could be concluded that the temperature showed high influence on soil solution velocity and dispersion coefficient

Keywords: Breakthrough curves; Miscible displacement; Computational modeling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Representação esquemática da difusão de prótons na água.....	30
Figura 2	–	Montagem experimental para a coleta de solução que atravessa a coluna de solo, para a elaboração das curvas da distribuição de concentração do efluente.....	34
Figura 3	–	Equipamento varivolt utilizado para o ajuste da voltagem para se alcançar a referida temperatura da água destilada (A) e resistência elétrica montada para manter a temperatura da água destilada constante (B)....	35
Figura 4	–	Coluna de PVC utilizada para a coleta dos efluentes com uma lâmina constante de água (1 cm), na parte superior da coluna (A), saturação da coluna e detalhe do dreno (B), processo de lixiviação por um período de 24 horas após completar a saturação (C) e início do teste da curva de distribuição de efluentes (D).....	36
Figura 5	–	Detalhes do calorímetro (A e B) e monitoramento da temperatura da solução pelo termômetro (C).....	37
Figura 6	–	Detalhes dos frascos coletores (A) e soluções dos efluentes já coletadas (B).....	37
Figura 7	–	Vasilhames dos solutos utilizados.....	39
Figura 8	–	Testes rápidos (Horiba) para nitrato e potássio (A) Efluentes coletados e prontos para serem submetidos às análises químicas (B), fotômetro de chama (C) e FIA – Flow Injection Analysis (D).....	40
Figura 9	–	Tela inicial do programa computacional “DISP” (BORGES JÚNIOR e FERREIRA, 2002), utilizado para ajuste das curvas de distribuição de efluentes de nitrato.....	41
Figura 10	–	Ilustração gráfica da interação soluto-solo.....	42
Figura 11	–	Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com solução em temperatura ambiente, com 3 repetições, para os íons nitrato (A, B e C) e potássio (D, E e F).....	43
Figura 12	–	Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com solução em temperatura de 40°C, com 3 repetições, para os íons nitrato (A, B e C) e potássio (D, E e F).....	45

- Figura 13 – Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com solução em temperatura de 50°C, com 3 repetições, para os íons nitrato (A, B e C) e potássio (D, E e F).....47
- Figura 14 – Representação gráfica dos valores médios do parâmetro fator de retardamento (R), para nitrato e potássio, submetido aos diferentes valores de temperatura (ambiente, 40°C e 50°C).....51
- Figura 15 – Representação gráfica dos valores médios do parâmetro velocidade da água no poro (v , cm min^{-1}), para nitrato e potássio, submetido aos diferentes valores de temperatura (ambiente, 40°C e 50°C).....51
- Figura 16 – Representação gráfica dos valores médios do parâmetro dispersividade (λ), para nitrato e potássio, submetido aos diferentes valores de temperatura (ambiente, 40°C e 50°C).....54
- Figura 17 – Representação gráfica dos valores médios do parâmetro número de Peclet (P), para nitrato e potássio, submetido aos diferentes valores de temperatura (ambiente, 40°C e 50°C).....55
- Figura 18 – Representação gráfica dos valores médios do parâmetro coeficiente de dispersão (D , $\text{cm}^2 \text{ min}^{-1}$), para nitrato e potássio, submetido aos diferentes valores de temperatura (ambiente, 40°C e 50°C).....56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de difusão iônica em água, em soluções muito diluída em 25°C (Lide, 1994, calculado com a equação 23 a partir da condutividade elétrica).....	31
Tabela 2 – Coeficientes de difusão de soluções eletrolítica em diferentes concentrações à 25°C	32
Tabela 3 – Características físico-hídricas do solo.....	34
Tabela 4. – Parâmetros da curva de retenção, segundo o modelo de van Genuchten (1980) do solo submetido à simulação.....	34
Tabela 5 – Parâmetros de transporte do nitrato: velocidade da água nos poros (v), coeficiente de dispersão (D), fator de retardamento (R), para as três repetições do solo submetido à simulação.....	49
Tabela 6 – Parâmetros de transporte do potássio: velocidade da água nos poros (v), coeficiente de dispersão (D), fator de retardamento (R), para as três repetições do solo submetido à simulação.....	50
Tabela 7 – Análise estatística dos valores obtidos do íon nitrato para o fator de retardamento nos diferentes valores de temperatura.....	52
Tabela 8 – Análise estatística dos valores obtidos do íon potássio para o fator de retardamento nos diferentes valores de temperatura.....	52
Tabela 9 – Análise estatística dos valores obtidos do íon nitrato para velocidade da água no poro em função do fluxo, nos diferentes valores de temperatura..	53
Tabela 10 – Análise estatística dos valores obtidos do íon nitrato para velocidade da água no poro em função do fluxo, nos diferentes valores de temperatura.....	53
Tabela 11 – Análise estatística dos valores obtidos do íon nitrato para o coeficiente de dispersão, nos diferentes valores de temperatura.....	56
Tabela 12 – Análise estatística dos valores obtidos do íon nitrato para o coeficiente de dispersão, nos diferentes valores de temperatura.....	57

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento dos mecanismos de transporte simultâneo da água e de solutos no solo é essencial para pesquisas que envolvam pontos de vista ambiental e econômico, uma vez que relaciona tanto a eficiência do uso da água como a aplicação de produtos químicos na produção agrícola. Essas quantidades de substâncias químicas, utilizadas na agricultura moderna, muitas vezes são distribuídas sobre a superfície do solo, na forma de fertilizantes, adubos orgânicos, inseticidas e herbicidas, e até mesmo resíduos agroindustriais. Esses insumos, quando aplicados acima da capacidade-suporte do solo, podem liberar, íons e compostos tóxicos, os quais poderão poluir o solo e águas subterrâneas. Os íons disponibilizados à solução do solo podem ser adsorvidos pelo meio, absorvidos pelas plantas ou lixiviados para as camadas sub-superficiais do solo, causando danos ambientais, mediante a aplicação descontrolada dessas substâncias químicas.

O nitrato, por ser um ânion, apresenta uma grande mobilidade e potencial de lixiviação em solos com alto teor de argila (cargas negativas), o que pode acarretar sérios problemas de contaminação de águas subterrâneas.

No caso do potássio, a importância do seu estudo baseia-se em termos de expressão econômica, visto que está presente na fertirrigação das mais diversas culturas, e o conhecimento do seu deslocamento no solo torna-se importante, principalmente para avaliar se esse componente químico encontra-se disponível às plantas, dentro da zona radicular.

Assim sendo, as interações entre o meio poroso e as propriedades do fluido percolante são determinadas pelos parâmetros de transporte dos solutos, estando sob a influência de alguns fatores que influenciam o processo de migração e retenção de substâncias químicas, destacando-se: tipo de solo, mineralogia, capacidade de troca catiônica, espécies de cátions adsorvidos, velocidade de percolação, teor de matéria orgânica; concentração do contaminante, presença de outras substâncias na solução percolante, condições hidrogeológicas e a temperatura e pH do meio (COSTA, 2002).

Em termos da variação da temperatura da solução, há uma influência no transporte desses solutos no solo, devido principalmente à alteração da viscosidade da solução, o que conseqüentemente irá alterar a velocidade dos processos de

transferência e pelo favorecimento de ocorrência de transformações químicas, em relação à temperatura ambiente.

Diante do exposto, buscou-se estudar o efeito da temperatura da solução nos parâmetros de transporte dos íons potássio e nitrato, mediante a aplicação de uma solução composta, com concentrações de potássio e nitrato, obtendo-se curvas de distribuição de efluentes, para um Latossolo Vermelho Amarelo, textura média, classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de solos (EMBRAPA, 1999). Mediante o ajuste numérico das equações em relação aos valores observados experimentalmente, foram obtidos os respectivos parâmetros de transporte de solutos, para aplicações futuras em modelos computacionais.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Considerações iniciais

2.1.1 Transporte do íon potássio no solo

O potássio, segundo Malavolta (1980) é um macronutriente absorvido da solução do solo pelas raízes, predominando o contato pelo processo de difusão. No Brasil, a aplicação de potássio às culturas é feita quase totalmente no plantio e/ou cobertura em aplicação direta ao solo. Algumas vezes a aplicação é complementada com adubações foliares (ZANINI, 1991).

Távora (1982) indica que o potássio está presente na maioria das rochas em combinação com outros elementos, principalmente com o alumínio e a sílica, sob a forma de silicatos de alumínio e potássio, em minerais tais como o ortoclásio, a muscovita e a biotita. Cerca de 95% da produção mundial de potássio é consumida sob a forma de fertilizantes.

É absorvido pelas raízes na forma de K^+ e desempenha várias funções na planta e, dentre estas, pode-se citar a melhor eficiência de uso da água, em consequência do controle da abertura e fechamento dos estômatos, maior translocação de carboidratos produzidos nas folhas para outros órgãos da planta, maior eficiência enzimática e melhoria da qualidade comercial da planta (MALAVOLTA, 1997).

Verifica-se também que o potássio aumenta a resistência natural da parte aérea das hortaliças em relação às doenças fúngicas, às pragas, ao acamamento, além de contra balancear o efeito contrário causado pelo excesso de nitrogênio.

O potássio também é requerido para a síntese protéica em plantas. Quando deficientes essas apresentam menor síntese de proteínas e acúmulo de compostos nitrogenados solúveis, como aminoácidos, amidas e nitrato (FAQUIN, 1996).

Segundo Scaloppi & Brito (1986), o potássio solúvel ou trocável geralmente representa uma pequena proporção, mas, ocasionalmente, pode estar incluído entre os principais constituintes da salinidade do solo. Cloreto, sulfato e, menos freqüentemente, nitrato, e pequenas quantidades de bicarbonatos, representam os ânions principais. Além dos sais solúveis, os solos salinos podem conter sais de menor solubilidade,

como sulfato de cálcio (gesso) e carbonatos de cálcio e magnésio (calcário). Pelo fato dos colóides estarem flocculados, a permeabilidade é igual ou superior a dos solos similares, não salinos.

Sparks e Huang (1985) indicam que o potássio do solo pode ser lixiviado, adsorvido pelo solo ou absorvido pela planta. Os fatores que influenciam no movimento do potássio no solo são a condutividade hidráulica, o pH do solo, o método e a taxa de aplicação deste elemento, a umidade do solo e a absorção pela planta. A habilidade do solo em reter o potássio aplicado é muito dependente da capacidade de troca de cátions do solo, assim, as quantidades de argila e matéria orgânica no solo, influenciam, fortemente, no grau de lixiviação. Os solos com alta capacidade de troca têm grande habilidade em reter o potássio aplicado; entretanto, a lavagem deste elemento é freqüentemente um problema em solos arenosos.

Os mecanismos que controlam o transporte do potássio no solo são baseados na rápida troca com outros cátions no solo. Quando a quantidade de potássio no solo é relativamente pequena com relação à capacidade de troca de cátions, a adsorção é controlada principalmente pelas variações da concentração de potássio na solução do solo. Quando a concentração de potássio na solução do solo aumenta, a capacidade tampão do potássio decresce e a velocidade de transporte do potássio se incrementa.

2.1.2 Transporte do íon nitrato no solo

Segundo Edwards et al. (1972) alguns íons, quando disponibilizados na solução do solo, são rapidamente deslocados no perfil, como é o caso do nitrogênio que, na forma de íons nitrato, é altamente solúvel em água e apresenta grande mobilidade no solo.

A aplicação de quantidades excessivas de fertilizantes nitrogenados tem sido freqüentemente sugerida como a principal fonte de contaminação de águas subterrâneas (SPALDING et al. 1982).

Segundo Newbould (1989) o consumo de fertilizantes nitrogenados tem aumentado em escala global. As fontes de nitrogênio rapidamente disponíveis são sais inorgânicos de amônio, nitrato e uréia.

Para prevenir e minimizar a poluição de águas subterrâneas com nitrato é necessário um controle das taxas de nitrogênio aplicadas anualmente ao solo, além da compreensão dos fatores intervenientes na mobilidade do ânion no solo. As formas nítricas, quando aplicadas diretamente na formulação de fertilizantes ou produzidas por nitrificação do amônio, são rapidamente solúveis na solução do solo. Esta alta solubilidade e a fraca interação com a matriz do solo possibilitam que o ânion acompanhe a frente de umedecimento da água no solo; assim, o nitrato tanto pode movimentar-se para baixo, sob condições de excessiva precipitação ou irrigação, quanto para cima, por capilaridade, durante estações extremamente secas. Entretanto, em solos positivamente carregados, os quais têm capacidade de troca aniônica não desprezível, o nitrato pode ser adsorvido. A textura do solo e o conteúdo de matéria orgânica têm maior influência nas perdas por lixiviação. Solos de textura mais grosseira e de baixo conteúdo de matéria orgânica tendem a permitir maiores perdas de nitrato por lixiviação, enquanto as menores perdas devem ocorrer em solos argilosos (MUCHOVEJ & RECHCIGL, 1994). Em geral, para os mesmos autores, perdas de nitrato por lixiviação em solos arenosos são mínimas quando o nitrogênio é aplicado em taxas menores que $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e aumenta rapidamente em taxas maiores. Nesses solos, os limites de potabilidade (10 mg L^{-1}) da água subterrânea foram suplantados para taxas de aplicação entre 350 e $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em áreas cultivadas com pastos.

Exner et. al. (1991) verificaram movimento profundo de nitrato, em diferentes taxas de aplicação, sob condição de irrigação, cujos resultados indicaram que 95% do nitrato aplicado foram lixiviados para baixo da zona radicular da cultura, sendo que as concentrações médias de nitrato no pulso variaram de 34 a 70 mg L^{-1} de nitrato.

Na Europa e nos Estados Unidos, áreas com concentrações de nitrato, na solução do solo, acima de 50 mg L^{-1} podem ser consideradas potencialmente poluídas (VANCLOOSTER; VIAENE; CHRISTIAENS, 1994).

2.1.3 Dinâmica de solutos e parâmetros de transporte

Pelo fato de se lidar com o movimento simultâneo da água e soluto no solo, considera-se que o transporte de solutos é consequência da convecção, ou seja, do

fluxo de massa (movimento laminar ou viscoso da solução do solo) e da difusão (movimentação térmica dos solutos dentro da solução). O entendimento desses dois componentes do processo de transporte, que ocorrem simultaneamente, é fundamental para o estabelecimento de práticas de manejo para o controle do movimento de íons no solo (BRESLER, 1981). Os estudos da dinâmica dos solutos não proporcionam somente um meio de determinação do fluxo no solo, mas devem dar uma explicação física do fenômeno que ocorre na percolação, na troca e adsorção de íons, para o movimento de fertilizantes minerais e outros sais (NIELSEN, 1961).

Assim, o transporte de solutos resume-se em dois processos básicos, a convecção e a difusão-dispersão hidrodinâmica. A convecção é o processo pelo qual a água subterrânea carrega consigo os solutos dissolvidos, cuja quantidade transportada depende de sua concentração, do volume de água fluindo e da velocidade da mesma.

O mecanismo de difusão-dispersão hidrodinâmica engloba o mecanismo de dispersão mecânica e o transporte por difusão. À medida que o soluto se movimenta no meio poroso, o processo de dispersão age diluindo o soluto, isto é, reduzindo sua concentração.

Quando um fluido é deslocado por um outro numa coluna de solo, a interface entre o fluido deslocador e o deslocado perde a nitidez ou a definição, à medida que o tempo transcorre, em razão da mistura entre eles. Essa mistura é decorrente da difusão de solutos de um fluido para dentro do outro e da dispersão devida à diferença de velocidade das partículas líquidas dentro de um mesmo poro e de poros de diferentes tamanhos, em razão da geometria irregular da matriz do solo (BORGES JÚNIOR e FERREIRA, 2002).

A difusão é o processo pelo qual as espécies moleculares e iônicas dissolvidas na água se movem devido a um gradiente de concentração, indo das áreas de maior para as de menor concentração, mesmo na ausência de fluxo de água subterrânea. O transporte difusivo através de um meio não saturado é mais complexo do que através de meios saturados. Os parâmetros de transporte podem variar no espaço e no tempo. Portanto, a determinação destes parâmetros no laboratório deve ser feita nas condições mais próximas possíveis das condições in situ.

Para tornar isso possível, os processos pelos quais as substâncias se movem através do solo podem ser expressos por modelos matemáticos. Estes se baseiam na integração da equação advectiva-dispersiva utilizando condições de contorno específicas para o sistema de interesse. Entretanto, sua aplicabilidade muitas vezes é limitada devido à falta de parâmetros experimentais confiáveis. Segundo Wraith (1998), muitos dos processos fundamentais nas ciências físicas e naturais exibem relações não lineares entre as suas variáveis, com o que a estimativa dos valores desses parâmetros torna-se o aspecto crítico na aplicação prática dessas relações.

Segundo Borges Júnior e Ferreira (2002), a preocupação com o comportamento de determinados produtos químicos no subsolo tem motivado os pesquisadores a desenvolver modelos teóricos, objetivando descrever os processos físicos envolvidos no transporte de solutos no perfil do solo. Por outro lado, segundo este mesmo autor, o advento destes modelos despertou um outro problema, ainda não totalmente solucionado, que diz respeito à quantificação adequada de parâmetros.

Portanto, de acordo com o entendimento das teorias que descrevem os processos físicos e químicos que ocorrem no solo, aliado às técnicas de resoluções numéricas de equações e aos recursos computacionais disponíveis, é possível, por meio de modelos de simulação, prever os riscos de contaminação e impactos que um determinado componente químico pode causar ao solo, à água e às plantas.

Sabe-se, então, que para uma descrição do transporte de solutos nos solos há a necessidade de utilização de modelos desenvolvidos para condições transientes durante o transporte, mas normalmente, os parâmetros desses modelos são estimados pelo ajuste dos resultados experimentais, sob uma condição específica de fluxo (ÁLVAREZ-BENEDI, 1999).

Para a obtenção desses parâmetros, o método mais comum, é o ajuste dos modelos teóricos a dados experimentais de laboratório, empregando-se programas computacionais.

Segundo Genuchten e Wierenga (1986), vários modelos teóricos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos para descrever o transporte de solutos no solo. O sucesso desses modelos, porém, depende em grande parte da capacidade em se quantificar os parâmetros de transporte, os quais são variáveis de entrada. Os

parâmetros mais importantes são o fluxo do fluido, o coeficiente de dispersão (D) e o fator de retardamento (R) (representa o efeito de adsorção entre o soluto e o solo). Dentre estes programas pode-se destacar o modelo CXTFIT (TORIDE, 1999), de ampla utilização, aplicado para a estimativa dos parâmetros a partir de concentrações observadas (problema inverso) ou para prever a concentração de solutos (problema direto) usando equações de convecção-dispersão como modelo de transporte, utilizando um método de otimização (minimização da soma dos desvios) não linear para a obtenção dos parâmetros.

Também se pode destacar um outro modelo que vem sendo utilizado, chamado “DISP” (BORGES JUNIOR & FERREIRA, 2002), o qual utiliza o método dos mínimos quadrados para a obtenção dos parâmetros de transporte: número da coluna ou número de Peclet (P) e fator de retardamento (R).

O “DISP” usa um método que consiste em adotar os estimadores que minimizam a soma dos quadrados dos desvios (Rs), entre os valores estimados e observados da concentração relativa $C_e = C/C_0$, em que C é concentração coletada do efluente e C_0 é a concentração inicial em relação ao número do volume de poros (VP). Na minimização de Rs, utiliza o método de Marquardt (SEBER e WILD, 1983; CUNHA, 1993), que requer a obtenção de derivadas parciais em relação aos parâmetros número de Peclet (P) e fator de retardamento (R), para número de volumes de poros determinados experimentalmente sendo as derivadas calculadas, utilizando-se métodos numéricos. As distorções provocadas por erros inerentes a esses métodos são corrigidas, utilizando-se de uma rotina de otimização dos valores obtidos dos estimadores dos parâmetros.

2.1.4 Estimativa de parâmetros de convecção-dispersão a partir das curvas de distribuição de efluentes obtidas em laboratório

O fluxo de massa refere-se ao movimento passivo de íons dissolvidos com a solução do solo. Na ausência de difusão, água e o íon dissolvido movem-se na mesma taxa. O fluxo de massa de um determinado soluto pode ser determinado pela eq.1.

$$J_m = qC \quad (1)$$

em que:

J_m - fluxo de massa do soluto no solo, $M L^{-2} T^{-1}$;

q - fluxo de água, $L T^{-1}$; e

C - concentração do soluto na solução do solo, $M L^{-3}$.

A difusão é um processo espontâneo que resulta do movimento natural térmico de íons e moléculas dissolvidos. O transporte de difusão nos solos tende a diminuir os gradientes de concentrações, e em analogia com a lei de Fick, pode ser descrito por (eq.2):

$$J_d = -\theta D_m \frac{\partial C}{\partial X} \quad (2)$$

em que:

J_d - fluxo de difusão do soluto no solo, $M L^{-2} T^{-1}$;

θ - umidade volumétrica, $L^3 L^{-3}$;

D_m - coeficiente de difusão molecular do soluto na solução do solo, $L^2 T^{-1}$; e

X - Distância, L

Devido ao caminho tortuoso percorrido pelo fluxo da solução do solo, o valor de D_m nos solos é menor que o coeficiente de difusão em água pura (D_o), podendo ser determinado por (eq.3).

$$D_m = D_o \tau \quad (3)$$

em que:

τ = fator de tortuosidade, adimensional.

O processo de dispersão deve-se às variações de velocidade da água nos poros. Existem, portanto variações devido à resistência da matriz do solo bem como devido ao avanço da frente de molhamento.

Portanto, o movimento de dispersão resulta do fato de que a velocidade do fluido dentro de poros individuais e entre poros de diferentes formas, tamanhos e direções, desvia-se da velocidade média da água nos poros (eq. 4):

$$J_h = -\theta D_h \frac{\partial C}{\partial X} \quad (4)$$

em que:

J_h = fluxo de dispersão do soluto no solo, $M L^{-2} T^{-1}$; e

D_h = coeficiente de dispersão mecânica, $L^2 T^{-1}$ (Bear, 1972).

Esse coeficiente é geralmente assumido como sendo uma função da velocidade do fluido, cujo valor pode ser obtido pela relação entre o fluxo de água no solo e a umidade volumétrica eq. 5:

$$D_h = \lambda v^n \quad (5)$$

em que:

λ - dispersividade do meio poroso, L;

v - velocidade da água no poro (q/θ), $L T^{-1}$; e

n - constante empírica, aproximadamente igual a 1,0.

De acordo com Oliveira (1999), dada a similaridade entre dispersão e difusão, os coeficientes D_h e D_m são freqüentemente considerados aditivos e ao resultado dá-se o nome de coeficiente de dispersão hidrodinâmica (eq. 6):

$$D = D_m + D_h \quad (6)$$

em que:

D - coeficiente de dispersão hidrodinâmico longitudinal, $L^2 T^{-1}$ (Bear, 1972).

Outros nomes freqüentemente utilizados para D são coeficiente de difusão aparente e coeficiente de difusão-dispersão (Hillel, 1980), enquanto que o nome de coeficiente de dispersão hidrodinâmica algumas vezes tem sido reservado apenas para D_h . Portanto o fluxo de solutos no solo pode ser definido pela eq. 7.

$$J_s = J_{dh} + J_m \quad (7)$$

em que:

J_{dh} - fluxo de difusão-dispersão, $M L^{-2} T^{-1}$.

Combinando as eqs. 1 e 2 obtêm-se a expressão para o fluxo de solutos no solo, eq. 8:

$$J_s = -\theta D \frac{\partial C}{\partial X} + qC \quad (8)$$

em que:

J_s - fluxo de solutos no solo, $M L^{-2} T^{-1}$.

Substituindo a eq. 8 na equação da continuidade obtém-se a eq. 9. Deste modo a equação de transporte de solutos pode ser obtida (eq. 10):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C + \rho S) = -\frac{\partial J_s}{\partial X} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C + \rho S) = \frac{\partial}{\partial X} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial X} - qC \right) \quad (10)$$

em que:

S - concentração adsorvida (massa de soluto por unidade de massa de solo),

$M M^{-1}$;

ρ - densidade global do solo; e

t - tempo, T.

A equação 10 evidencia a passagem através do solo de uma solução com diferentes concentrações químicas; pode-se observar que há uma mudança gradual na composição de íons da água drenada (efluente). Mediante as medidas de mudança da concentração de um efluente em uma coluna de solo, podem ser obtidas informações a respeito das propriedades de transporte do meio poroso e do comportamento do movimento da solução através do solo.

O número de Peclet é um número adimensional, utilizado no estudo da difusão através de um meio poroso, que exprime a relação entre a velocidade de transporte por convecção e a velocidade de transporte por difusão molecular dado pela eq.11:

$$P = \frac{v\Delta L}{D_h} \quad (11)$$

em que:

P - número de Peclet da coluna

D_h - coeficiente de dispersão hidrodinâmica

L - altura da coluna de solo (L)

v - velocidade da água no poro ($L T^{-1}$)

Valores pequenos de número de Peclet, indicam que o transporte de difusão domina sobre o transporte de convecção. Para maiores valores do número de Peclet, o transporte de advecção domina o de difusão.

Para linearizar a adsorção e o fluxo dinâmico de água em um perfil de solo homogêneo, assume-se que as densidades de fluxo são constantes no tempo e no espaço e, a partir da eq. 10, obtém-se a eq. 12.

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - v \frac{\partial C}{\partial X} \quad (12)$$

em que:

v - velocidade da água no poro, $L T^{-1}$

em que:

$$R = 1 + \frac{\rho k}{\theta} \quad (13)$$

em que:

R - fator de retardamento, adimensional;

k - coeficiente empírico de distribuição (se não há interação entre o soluto e o solo, k assume o valor igual a zero), $M^{-1} L^3$.

Conforme visto anteriormente, a eq.10. é a mais utilizada para descrever o transporte de solutos no solo. Soluções analíticas dessa equação têm sido desenvolvidas para um número específico de condições de contorno e para vários problemas importantes da ciência do solo, os quais envolvem a estimativa de parâmetros de transporte baseados no ajuste dessas soluções ou em modelos alternativos para medir curvas de eluição a partir de experimentos de deslocamento miscível.

A distribuição da concentração dos solutos em uma coluna de solo com uma concentração inicial uniforme sob equilíbrio dinâmico, a qual será substituída em um tempo $t = 0$ por uma solução de concentração constante, está apta para ser submetida a uma solução analítica. As condições iniciais e de contorno são dadas pelas eqs. 14, 15, 16.

$$c(x, 0) = c_i \quad (14)$$

$$c(0, t) = c_0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x}(\infty, t) = 0 \quad (16)$$

A solução para a equação de convecção-dispersão sujeita a esses valores iniciais e de condições de contorno pode ser obtida pela eq. 17 (NIELSEN & BIGGAR, 1963; GENUCHTEN & WIERENGA, 1986):

$$\frac{c(x,t) - c_i}{c_0 - c_i} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx - vt}{\sqrt{4DRt}}\right) + \frac{1}{2} e^{\frac{vx}{D}} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx + vt}{\sqrt{4DRt}}\right) \quad (17)$$

em que: $\operatorname{erfc}(u)$ é a função erro complementar.

Valores tabulados de $\operatorname{erf}(u)$ podem ser encontrados em tabelas ou aproximados. Recentes versões de planilha incluem rotina para cálculo de $\operatorname{erf}(u)$ (eq 18).

$$\operatorname{erf} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf} \quad (18)$$

Para valores negativos do argumento (u) utiliza-se a identidade (eqs. 19 e 20):

$$U > 0 \rightarrow 1 - \operatorname{erf}(u) \quad (19)$$

$$U < 0 \rightarrow 1 + \operatorname{erf}(u) \quad (20)$$

Uma solução simples comumente utilizada em experimentos de deslocamento miscível é obtida retendo somente o primeiro termo do lado direito da equação anterior (para C_i desprezível) (eq. 21).

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx - vt}{\sqrt{4DRt}}\right) \quad (21)$$

A solução apresentada anteriormente pode ser obtida desprezando a difusão molecular e não se considerando um sistema infinito.

Os parâmetros de transporte D , R e v são baseados na otimização dos dados, mediante a minimização da soma dos quadrados dos desvios, medidos na equação anterior.

2.1.5 Fatores que influenciam no transporte de solutos

Vários fatores relacionados às propriedades do meio poroso e suas interações, propriedades do líquido percolante e as condições ambientes influenciam nos parâmetros de transporte dos solutos. Dentre esses fatores que influenciam o processo de migração e retenção de substâncias químicas podem ser destacadas: o tipo de solo, mineralogia, capacidade de troca catiônica, espécies de cátions adsorvidos, velocidade de percolação, teor de matéria orgânica; concentração do contaminante, presença de outras substâncias na solução percolante, as condições hidrogeológicas e a temperatura e pH do meio (COSTA, 2002).

A mineralogia das argilas é um fator importante influenciando o transporte de contaminantes, uma vez que as propriedades típicas das argilas são função basicamente dos argilominerais. As diversas espécies de argilominerais influenciam, diferentemente, o comportamento dos solos, no que diz respeito à capacidade de adsorção, atividade e condutividade hidráulica. As espécies de argilominerais que determinam os extremos das propriedades dos solos são a caulinita e a montmorilonita. Assim, solos com predominância de caulinita possuem menor capacidade de troca catiônica, menor atividade e maior condutividade hidráulica do que solos com montmorilonita (ELBACHÁ, 1989).

Como a troca iônica é, em geral, o principal mecanismo de adsorção, é natural que a capacidade de adsorção dos solos seja também influenciada pelo pH da solução do meio.

Normalmente, a adsorção de cátions inorgânicos aumenta com o aumento do pH. Em estudos realizados por Griffin & Shimp (1976), a quantidade de chumbo removida do chorume de um aterro, pelo solo, aumentou com o aumento do pH. A baixa capacidade de adsorção para valores de pH baixos foi atribuída ao aumento da competição pelos íons H^+ e Al^{+3} , resultantes da dissolução da argila (USEPA, 1999).

Ao contrário do que ocorre com os cátions, a adsorção de ânions é geralmente estimulada em ambientes ácidos. Para valores de pH maiores que 8, a capacidade de troca catiônica é consideravelmente maior, enquanto que, para valores abaixo de 4, a troca aniônica pode ser significativa (ELBACHÁ, 1989).

As reações de precipitação são fortemente influenciadas pelo pH. Reações de neutralização ocorrem com o íon hidrogênio (H^+), abundante em fluidos ácidos, de baixo pH, reagindo com carbonatos ou outros minerais básicos encontrados no solo. Com isso, a concentração do íon (H^+) tende a diminuir, enquanto as concentrações do carbonato (CO_3^{-2}) e da hidroxila (OH^-) tendem a aumentar e reagir com os cátions de metais solúveis, geralmente presentes em poluentes ácidos. O componente resultante, em geral, possui baixa solubilidade, tendendo a precipitar (SHEPARD & CHERRY, 1980; apud ELBACHÁ, 1989).

Segundo LaGrega; Buckingham e Evans (1994), a maioria dos metais precipita como hidróxidos em meios alcalinos.

Outro fator importante a ser considerado é a velocidade de percolação. Valores elevados de velocidade implicam na redução do retardamento, já que, o tempo disponível para que as interações entre o solo e o soluto ocorram é menor. Caso a velocidade de percolação seja suficientemente alta para que não ocorra transferência do soluto para os sólidos, o transporte pode, inclusive, ocorrer sem retardamento, resultando em um avanço da frente de contaminação mais rápido que o previsto. Por outro lado, o retardamento é máximo em situações de velocidade nula. A velocidade de percolação, inclusive, é determinante para caracterização dos mecanismos de transporte envolvidos (FREEZE & CHERRY, 1979; BORGES, 1996).

Variações de temperatura podem ter grande influência no transporte de solutos, promovendo alteração da permeabilidade, da velocidade dos processos de transferência e da solubilidade de substâncias, além de propiciar a ocorrência de reações que não se processam a temperatura ambiente (COSTA, 2002).

A alteração na permeabilidade se deve basicamente à variação da viscosidade da água, pois seu peso específico e a permeabilidade intrínseca do solo são usualmente menos afetados por variações de temperatura (COSTA, 2002). Como a solubilidade é função da temperatura, uma redução na temperatura causa diminuição

do grau de solubilidade, o que tende a aumentar a sorção e pode causar precipitação do soluto, aumentando o retardamento (COSTA, 2002; OLIVEIRA, 2002).

Dentre os parâmetros de transporte, o coeficiente de dispersão é muito influenciado pela temperatura, no qual a mobilidade de uma molécula deve-se à agitação térmica do meio em que ela se encontra (movimento Browniano das moléculas) agitando-se aleatoriamente tendendo a uniformizar a distribuição do soluto no solvente. Em relação ao coeficiente fator de retardamento observa-se uma tendência em aumentar à medida que diminui a concentração inicial da substância (CAMPOS & ELBACHÁ, 1991; BORGES, 1996).

Para a estimativa do coeficiente de difusão em líquidos, há de se ressaltar que para a difusão de uma substância química na fase líquida de uma solução diluída, tal valor do coeficiente pode ser estimado pela equação de Stokes-Einstein (eq. 22) se o raio do átomo do soluto é claramente maior que o raio do solvente (JOST, 1952).

$$D_0 = \frac{KT}{6\pi\mu r_0} \quad (22)$$

em que:

K- Constante de Boltzmann ($K = 1,380 \times 10^{-23}$) ($M L^2 T^{-2} K^{-1}$)

T- Temperatura absoluta (K)

μ - viscosidade dinâmica do líquido ($M L^{-1} T^{-1}$)

r_0 - raio do soluto (L)

Outras aproximações empíricas existem (CUSSLER, 1984; REID et al., 1987, GRATHWOHL, 1998). A maioria apresenta dependência direta de D_0 em relação à temperatura e é inversamente proporcional à viscosidade e ao tamanho do soluto, o qual é dado, ambos, pelo raio, volume molar ou peso molecular. A uma dada temperatura e viscosidade, partículas maiores se deslocam mais vagarosamente que partículas menores.

Em solução aquosa, muitas substâncias químicas relevantes, ocorrem na forma ionizada. A carga elétrica dessas substâncias tem duas consequências importantes em termos de difusão. Primeiro íons associados com moléculas de água formam um íon

hidratado. Portanto, os íons não se difundem como átomos ou moléculas isoladamente, mas bastante como espécies hidratadas. Como consequência, os coeficientes de difusão de íons em solução aquosa são caracterizadas pela eq. 22. Para cátions com cargas simples, observa-se que o coeficiente de difusão ordena-se da seguinte forma: $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Cs}^+$ (Tabela 1).

Um caso especial de difusão ocorre para os íons H^+ e OH^- , os quais são mais rápidos do que o esperado, baseando-se na eq. 22. É provável que a difusão do próton aconteça como uma reação em cadeia entre moléculas de água (Figura 1).

Figura 1 – Representação esquemática da difusão de prótons na água

Os coeficientes de difusão de íons em soluções diluídas podem ser convenientemente calculados pela condutividade elétrica equivalente (CE_{eq}), dado pela expressão de Nernst (eq. 23) (ROBINSON & STOKES, 1959).

O segundo aspecto importante da difusão de um íon é que a transferência líquida de espécies iônicas resultam na formação de um gradiente de potencial elétrico. Este gradiente de potencial causa o movimento de íons como um resultado de forças eletrostáticas, devido ao fato dos íons apresentarem diferentes raios iônicos e portanto, diferentes coeficientes de difusão. Quando um cátion e anion se difundem em uma mesma direção, os tipos com alto coeficiente de difusão iônica são reduzidos por forças eletrostáticas do movimento reduzido do íon acompanhante e vice-versa. O resultado líquido é que o cátion e o ânion se difundem na mesma taxa, e seus coeficientes de difusão, o qual às vezes é denominado de coeficiente de difusão eletrolítica, pode ser obtido pela equação 24 (CUSSLER, 1984).

Tabela 1 – Coeficientes de difusão iônica em água, em soluções muito diluída em 25°C (Lide, 1994, calculado com a equação 23 a partir da condutividade elétrica)

Cátion	$D_0(10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$	Anion	$D_0(10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$
H ⁺	9,311	OH ⁻	5,273
D ⁺	6,655	F ⁻	1,475
Li ⁺	1,029	Cl ⁻	2032
Na ⁺	1,334	Br ⁻	2,080
K ⁺	1,957	I ⁻	2,045
Rb ⁺	2,072	NO ₃ ⁻	1,902
Cs ⁺	2,056	ClO ₃ ⁻	1,720
Ag ⁺	1,648	ClO ₄ ⁻	1,792
NH ₄ ⁺	1,957	BrO ₃ ⁻	1,145
CH ₃ NH ₃ ⁺	1,563	IO ₃ ⁻	1,078
Mg ²⁺	0,706	HCO ₃ ⁻	1,185
Ca ²⁺	0,792	HSO ₄ ⁻	1,331
Sr ²⁺	0,791	H ₂ PO ₄ ⁻	0,879
Ba ²⁺	0,847	Formate ⁻	1,454
Mn ²⁺	0,712	Acelate ⁻	1,089
Fe ²⁺	0,719	Lactate ⁻	1,033
Co ²⁺	0,732	SO ₃ ²⁻	1,064
Cu ²⁺	0,714	SO ₄ ²⁻	1,065
Zn ²⁺	0,703	CO ₃ ²⁻	0,923
Pb ²⁺	0,945	HPO ₄ ²⁻	0,439
Al ³⁺	0,541	P ₂ O ₄ ⁴⁻	0,639
Fe ³⁺	0,604	PO ₄ ³⁻	0,612
La ³⁺	0,619	P ₃ O ₄ ³⁻	0,742

$$D_0 = \frac{RT}{F^2} \frac{CE_{eq}}{|z|} \quad (23)$$

em que:

R - constante molar dos gases ($R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

F - constante de Faraday ($F = 96485 \text{ C mol}^{-1}$)

z - valência do íon, (adimensional)

$$D_0 = \frac{D_1 D_2 (z_1^2 C_1 + z_2^2 C_2)}{D_1 z_1^2 C_1 + D_2 z_2^2 C_2} \quad (24)$$

desde que: $z_1 C_1 = z_2 C_2$

$$D_0 = \frac{\frac{|z_1| + |z_2|}{\frac{|z_1|}{D_2} + \frac{|z_2|}{D_1}}}{\frac{|z_1| + |z_2|}{|z_1||z_2|} \left(\frac{1}{|z_1|D_1} + \frac{1}{|z_2|D_2} \right)}^{-1} \quad (25)$$

em que:

D_1 e D_2 - coeficientes de difusão molecular de íons individuais, ($M^2 T^{-1}$)

C_1 e C_2 - concentrações iônicas, ($M L^{-3}$)

z_1 e z_2 - valências dos íons, adimensional

A Tabela 2 mostra os valores de coeficiente de difusão de soluções eletrolíticas a concentrações muito diluídas obtida pela eq. (24) ou (25), bem como, os coeficientes de difusão determinados experimentalmente a diferentes concentrações molares, indicando que a difusão é concentração dependente de uma alta concentração eletrolítica.

Tabela 2 – Coeficientes de difusão de soluções eletrolítica em diferentes concentrações à 25°C

Soluto	$D_0^+ (10^{-9} m^2 s^{-1})$		$D_{0+} (10^{-9} m^2 s^{-1})$		
	0 M	0,001 M	0,01 M	0,1 M	1 M
LiCl	1,366	1,345	1,312	1,269	1,302
LiBr	1,377	-	-	1,279	1,404
NaCl	1,611	1,585	1,545	1,483	1,484
NaBr	1,625	-	-	1,517	1,596
NaI	1,615	-	-	1,520	1,662
NaNO ₃	1,568	-	1,846	1,503	-
KCl	1,994	1,964	1,917	1,844	1,892
KBr	2,017	-	-	1,874	1,975
KI	2,000	-	-	1,865	2,065
CaCl	2,044	2,013	1,958	1,871	1,902
CaCl ₂	1,335	1,263	1,188	1,110	1,203

D_0^+ Coeficiente de difusão em soluções muito diluídas calculados com a equação 24, com os dados da Tabela 1.

D_{0+} Dados de Robison e Stokes (1959)

2.1.6 Dependência da temperatura em coeficientes de difusão

A relação Stokes-Einstein (eq. 22) e outras aproximações para calcular coeficientes de difusão em soluções aquosas estimam que coeficientes de difusão variam linearmente com a temperatura e inversamente com a viscosidade.

De acordo com Li e Gregory (1974), tal dependência da temperatura pode ser observada na faixa entre 0°C a 25°C para difusão da água e para íons difundindo mais lentamente que o íon fluoreto. Para íons difundindo mais rapidamente que o íon fluoreto, a temperatura parece afetar coeficientes de difusão somente por dependência de temperatura da viscosidade.

Dado o coeficiente de difusão a uma temperatura específica, tal coeficiente a qualquer outra temperatura pode ser calculado por equações como a eq. 22. No caso da relação Stokes- Einstein (eq 22), o coeficiente de difusão $D(T)$ a uma temperatura T é dado como (eq. 26)

$$D(T) = \frac{T\mu(T_0)}{T_0\mu(T)} D(T_0) \quad (26)$$

em que:

$D(T_0)$ - coeficiente de difusão a uma temperatura de referência T_0 , ($M^2 T^{-1}$)

$\mu(T)$ e $\mu(T_0)$ - viscosidades dinâmicas às temperaturas T e T_0 , ($M L^{-1} T^{-1}$)

2.2 Material e métodos

2.2.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido em condições de laboratório no Departamento de Ciências Exatas - ESALQ/USP. Para tal, foi montado um aparato, para que pudessem ser elaboradas as curvas de distribuição de efluentes (Figura 2).

O material de solo utilizado foi proveniente de um perfil coletado a 20 cm de profundidade, classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de solos (EMBRAPA, 1999), como sendo um Latossolo Vermelho Amarelo, textura média, (S1). As características físico-hídricas do solo, bem como os parâmetros da Curva de retenção de água no solo, são apresentadas pelas Tabelas 3 e 4.

Figura 2 – Montagem experimental para a coleta de solução que atravessa a coluna de solo, para a elaboração das curvas da distribuição de concentração do efluente

Tabela 3 – Características físico-hídricas do solo

Tipo de Solo	Granulometria			Densidade			Condutividade hidráulica do solo saturado (cm h^{-1})
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Global (g cm^{-3})	Partículas (g cm^{-3})	Porosidade (%)	
S1	70,60	11,52	17,78	1,46	2,57	43	7,25

Tabela 4. – Parâmetros da curva de retenção, segundo o modelo de van Genuchten (1980) do solo submetido à simulação

Tipo de Solo	Parâmetros da curva de retenção				
	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	m
S1	0,162	0,443	0,0449	3,6732	0,1119

2.2.2 Montagem do experimento em laboratório

Montou-se um experimento junto ao Laboratório de Química do Departamento de Ciências Exatas, no qual foram utilizadas colunas de PVC, preenchidas com material de

solo, com as dimensões de 20 cm de altura e 7,2 cm de diâmetro, através da qual passaram as soluções de nitrato e potássio.

Em termos de variação da temperatura da solução, para os tratamentos com os diferentes valores (ambiente (25°C a 28°C), 40°C , 50°C), tomou-se como procedimento a passagem da solução por um banho-maria com circulação e com regulação de temperatura, utilizando-se para tal um calorímetro. Além disso, a temperatura de entrada da solução na coluna de solo foi constantemente monitorada por um termômetro, nas diferentes temperaturas de aplicação do teste e para auxiliar nessa etapa elaborou-se uma resistência elétrica para o aquecimento da água destilada (Figuras 3A e 3B).

(A)

(B)

Figura 3 – Equipamento variômetro utilizado para o ajuste da voltagem para se alcançar a referida temperatura da água destilada (A) e resistência elétrica montada para manter a temperatura da água destilada constante (B)

2.2.3 Preparo das colunas

A coluna de PVC utilizada para a coleta dos efluentes apresentava um volume de $814,30\text{ cm}^3$, totalizando 9 colunas sendo divididas em 3 tratamentos: temperatura ambiente (25°C a 28°C); temperatura de 40°C e temperatura de 50°C , com 3 repetições cada tratamento. Na parte inferior da coluna colocou-se um círculo de manta sintética sobre uma tela fixada por um “cap” com rosca. Para manter uma lâmina constante de

1cm, na parte superior da coluna (Figura 4A), montou-se um esquema experimental em laboratório, pelo qual foi instalado um dreno que retirava todo o excesso.

Para o início do teste era necessário primeiramente saturar a coluna com água destilada, processo esse realizado de forma lenta, no qual a coluna foi colocada dentro de um recipiente e por gotejamento adicionou-se água até a uma altura aproximada de 2/3 da coluna (Figura 4B). Em seguida o conjunto ficou em repouso por um período de 24 horas para completar a saturação e, após esse prazo, o teste era então iniciado deixando-se passar água destilada na temperatura ambiente através da coluna de solo (também por volta de 24 h), para que toda a quantidade de soluto eventualmente presente na solução do solo fosse retirada (Figura 4C). Devido ao período de 24 horas, utilizou-se a resistência elétrica, para aquecimento da água destilada, apenas para finalizar esse processo de lixiviação, bem como, atingir um equilíbrio térmico constante da solução que atravessava a coluna. Além desse aspecto, a coluna era revestida por um material isolante (isopor) de forma a manter a temperatura da solução constante, no processo de atravessar a coluna de solo (Figura 4D).

(A)

(B)

(C)

(D)

Figura 4 – Coluna de PVC utilizada para a coleta dos efluentes com uma lâmina constante de água (1cm), na parte superior da coluna (A), saturação da coluna e detalhe do dreno (B), processo de lixiviação por um período de 24 horas após completar a saturação (C) e início do teste da curva de distribuição de efluentes (D)

Atingindo-se a densidade de fluxo constante e nas respectivas temperaturas constantes dos respectivos tratamentos (ambiente (25°C a 28°C), 40°C, 50°C), efetuava-se a troca da água aquecida pelas soluções também nos diferentes valores de temperatura, controladas por um calorímetro, e constantemente monitoradas por um termômetro (Figuras 5A, 5B e 5C). A coleta manual dos frascos coletores, dos volumes de solução que atravessavam a coluna de solo, representavam, individualmente, 15 mL de efluente coletado. Este volume foi definido em função do volume de poros (relacionado com a porosidade do solo, assumida em termos gerais em torno de 50 %) e da quantidade necessária para serem realizadas as análises dos componentes químicos anteriormente relacionados (Figuras 6A e 6B).

(A)

(B)

(C)

Figura 5 – Detalhes do calorímetro (A e B) e monitoramento da temperatura da solução pelo termômetro (C)

(A)

(B)

Figura 6 – Detalhes dos frascos coletores (A) e soluções dos efluentes já coletadas (B)

Dessa forma, cada frasco representou aproximadamente 0,045 volume de poros (em relação ao volume total da coluna preenchida com solo), proporcionando um bom refinamento para a elaboração das curvas de eluição (eq. 27).

$$VP = \alpha V \quad (27)$$

em que:

VP - volume de poros; L^3 ;

α - porosidade do solo em questão, $L^3 L^{-3}$; e

V - volume da coluna, L^3 .

O tempo gasto para passar um determinado número de volume de poros pode ser calculado pela eq. 28:

$$t = \frac{VP \cdot \alpha \cdot L}{q} 1440 \quad (28)$$

em que:

t - tempo acumulado; min;

L - comprimento da coluna preenchida com solo, cm; e

q - fluxo de água no solo, $cm \text{ dia}^{-1}$.

2.2.4 Soluções químicas utilizadas

Soluções químicas de potássio e nitrato foram utilizada , mediante o preparo de solução composta, contendo 0,326g de Nitrato de Potássio (KNO_3) juntamente com 15,003g de Cloreto de Potássio (KCl), diluindo-se em 4L de água destilada, resultando em uma concentração de 50 ppm de Nitrato (NO_3^-) e de 2000 ppm de Potássio (K^+). (Figura 7).

Figura 7 – Vasilhames dos solutos utilizados

2.2.5 Análise química dos efluentes

O comportamento da curva foi monitorado por um equipamento de teste rápido (Horiba) (Figura 8A), mostrando o final do teste, quando se atingia o valor da concentração inicial, de 2000 ppm para Potássio (K^+) e de 50 ppm para o Nitrato (NO_3), pela solução composta de Nitrato de Potássio (KNO_3) com Cloreto de Potássio (KCl), no efluente. As amostras foram submetidas às análises de laboratório (Figura 8B). As determinações químicas dos efluentes foram feitas mediante a utilização dos equipamentos: Fotômetro de chama e o FIA – Flow Injection Analysis, para o potássio e o nitrato, respectivamente (Figura 8C e 8D).

Utilizou-se o programa computacional “DISP”, para fazer o ajuste das curvas de distribuição de efluentes (BORGES JÚNIOR & FERREIRA, 2002), desenvolvido em linguagem de programação Delphi 3, utilizando-se o método dos mínimos quadrados para obtenção dos estimadores dos parâmetros P (número da coluna ou número de Peclet) e fator de retardamento (R), cujos parâmetros de entrada são: número de observações (valores observados de concentrações relativas (ce) em função do número de volume de poros (VP)); porosidade total (decimal); densidade de fluxo ($cm\ h^{-1}$) e comprimento da coluna de solo (cm); os dados de saída do programa são: valores estimados de concentrações relativas (ce) em função do número de volume de poros (VP); representação gráfica entre a concentração relativa e o volume de poros

(observado e estimado); estimadores dos parâmetros P, R e D; soma de quadrado de resíduos (R_s) e o coeficiente de determinação (R^2) (Figura 9).

(A)

(B)

(C)

(D)

Figura 8 – Testes rápidos (Horiba) para nitrato e potássio (A) Efluentes coletados e prontos para serem submetidos às análises químicas (B), fotômetro de chama (C) e FIA – Flow Injection Analysis (D)

Figura 9 – Tela inicial do programa computacional “DISP” (BORGES JÚNIOR e FERREIRA, 2002), utilizado para ajuste das curvas de distribuição de efluentes de nitrato

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Curvas de distribuição dos efluentes nitrato e potássio

Embora os procedimentos de montagens das colunas, para a confecção das curvas de distribuição de efluentes, tenham sido uniformizados para todos os tratamentos, ocorreu variação na velocidade de avanço da solução deslocadora, dentro dos tratamentos. Essa variação pode ser atribuída à não exata uniformidade na distribuição do solo na coluna, refletindo na porosidade total e macroporosidade. Havendo um pouco de diferença nos parâmetros de transporte dentro do mesmo tratamento.

Segundo Nielsen & Biggar (1962), as curvas de efluente são importantes ao se estudar o transporte de solutos no perfil do solo, durante uma percolação. O número de volume de poros correspondente à concentração relativa 0,5 é uma primeira indicação, no sentido da existência ou não, de interações soluto-solo. Quando o valor correspondente a 0,5 a concentração relativa é 1,0 volume de poros, significa que o soluto não está interagindo com a fração coloidal do solo; por outro lado, quando o valor é maior que 1,0, isto é, a curva de efluente se apresenta deslocada para a direita,

significa que, ao escoar através do perfil do solo, parte do soluto é adsorvida, resultando em um fator de retardamento maior que a unidade. Portanto, quanto maior for o fator de retardamento, maior será a interação soluto-solo (Figura 10).

Figura 10 – Ilustração gráfica da interação soluto-solo

Valores mais elevados dos coeficientes de dispersão-difusão estão associados a menores inclinações das curvas de efluente e, conseqüentemente, ao alargamento da faixa de mistura entre as soluções deslocadora e deslocada no perfil do solo, tornando os acréscimos na concentração relativa (C/C_0) baixos para acréscimos no número de volume de poros (Nielsen & Biggar, 1962; Alvarez et al., 1985).

2.3.1.1 Nitrato e Potássio – Temperatura Ambiente (25°C a 28°C)

Para a solução à temperatura ambiente, observou-se que, para o potássio, houve um maior deslocamento das curvas de eluição para a direita, indicando que os íons de potássio foram retidos no solo com maior intensidade em relação aos íons de nitrato. O íon potássio apresentou um maior efeito de adsorção, necessitando de uma quantidade de no mínimo 3 volumes de poros (VP) e no máximo 4 volumes de poros (VP), para que a concentração inicial fosse atingida, ao contrário do íon nitrato que ficou em torno de 2 VP, não ultrapassando 2,5 VP em todas as repetições.

A curva de distribuição de efluentes do íon potássio apresentou uma inclinação um pouco menor que a do íon nitrato (Figura 11).

Figura 11 – Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com solução em temperatura ambiente, com 3 repetições, para os íons nitrato (A, B e C) e potássio (D, E e F)

2.3.1.2 Nitrato e Potássio – Temperatura 40°C

Para a temperatura da solução a 40°C, observou-se que, para o potássio, houve um maior deslocamento das curvas de eluição para a direita, indicando que os íons de potássio foram retidos no solo com uma maior intensidade em relação aos íons de nitrato.

O íon potássio apresentou um maior efeito de adsorção, necessitando de uma quantidade de no mínimo 3 volumes de poros (VP) e no máximo 4 volumes de poros (VP), para que a concentração inicial fosse atingida, ao contrário do íon nitrato que ficou em torno de 2 VP em todas as repetições.

O íon potássio apresentou um maior efeito de adsorção, necessitando de uma quantidade de no mínimo 2,5 VP e no máximo em torno dos 3,5 VP, para que a concentração inicial fosse atingida, ao contrário do íon nitrato que ficou abaixo de 2 VP, apenas primeira repetição chegou a ultrapassar um pouco 2 VP. Observou-se que o íon potássio, sob temperaturas de 40°C, teve o início da coleta de seus efluentes, nos frascos coletores, abaixo de 1 VP e atingiu o final, ou seja, a solução de saída igual a solução de entrada (100%), por conta de 3 VP a 3,5 VP com um mínimo de 2 VP.

Em termos do íon nitrato, quando foram aplicados os valores de temperatura em 40°C o nitrato gastou em torno de 1,5 VP para atravessar a coluna e o início da coleta dos efluentes, foi menor em relação ao íon potássio (Figura 12).

2.3.1.3 Nitrato e Potássio – Temperatura 50°C

Para a temperatura da solução a 50°C, observou-se uma maior retenção de potássio em relação do nitrato para os três valores de temperatura, evidenciando um maior deslocamento do íon nitrato, apesar dos valores de volume de poros para o potássio serem maiores do que o do nitrato.

Para o potássio, houve um maior deslocamento das curvas de distribuição de efluentes para a direita, indicando que os íons de potássio foram retidos no solo, com uma maior intensidade, em relação aos íons de nitrato.

Figura 12 – Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com solução em temperatura de 40°C, com 3 repetições, para os íons nitrato (A, B e C) e potássio (D, E e F)

O íon potássio apresentou um maior efeito de adsorção, necessitando de uma quantidade de no mínimo 2,5 VP e no máximo em torno dos 3,5 VP, para que a concentração inicial fosse atingida; ao contrário do íon nitrato que ficou abaixo de 2 VP,

apenas primeira repetição chegou a ultrapassar um pouco 2 VP. Observou-se que o íon potássio, sob temperaturas de 50°C, apresentou o início de concentração sensivelmente diferente de zero, nos frascos coletores, abaixo de 1 VP e atingiu o final, ou seja, a solução de saída igual a solução de entrada (100%), por conta de 3 VP a 3,5 VP com um mínimo de 2 VP.

Em termos do íon nitrato, quando foram aplicados os valores de temperatura em 50°C o nitrato gastou de 1,5 VP a 3,0 VP para atravessar a coluna e o início de concentração sensivelmente diferente de zero, foi menor em relação ao íon potássio (Figura 13).

As curvas de eluição, de um modo geral mostraram a tendência de se deslocarem para a esquerda, à medida que a temperatura da solução aumentou. Mas curiosamente, verificou-se um maior deslocamento da curva de eluição para a direita na 3ª repetição no tratamento de 50°C.

Para o potássio, houve um maior deslocamento das curvas de distribuição de efluentes para a direita, indicando que os íons de potássio foram retidos no solo, com uma maior intensidade, em relação aos íons de nitrato.

As curvas de distribuição de efluentes que se deslocaram para a esquerda apresentaram menores valores de fator de retardamento. A 3ª repetição no tratamento de 50°C apresentou valor de 1,587 para o nitrato e 2,125 para o potássio. Rao et al. (1980) sugerem que, quanto maior o deslocamento da curva de efluente para a direita, maior também é a adsorção na superfície dos colóides, a qual está relacionada com a energia de adsorção do íon.

O efeito de adsorção pode ser facilmente observado pelas curvas de distribuição de efluentes, o qual mostrou-se mais evidente para o íon potássio em relação ao íon nitrato. Isso explica a obtenção de maiores valores do fator de retardamento para o potássio. e um maior deslocamento da curva de distribuição de efluente para a direita para o íon potássio em relação ao íon nitrato para as 3 temperaturas. Conforme Miranda, et. al. (2005), em temperatura ambiente, mas contrariando em relação ao efeito dispersivo apresentado pelo nitrato, sendo apenas maior quando a temperatura varia de 40°C a 50°C, pois nessa variação o coeficiente do potássio decresce um pouco.

Para uma mesma velocidade média de escoamento de uma solução, valores mais elevados do coeficiente dispersivo-difusivo correspondem a uma declividade menor da curva de efluente, em virtude da maior mistura na interface entre os fluidos deslocados e deslocador.

Figura 13 – Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com solução em temperatura de 50°C, com 3 repetições, para os íons nitrato (A, B e C) e potássio (D, E e F)

2.3.2 Parâmetros de transporte dos íons nitrato e potássio sob as temperaturas, ambiente, 40°C e 50°C

Para os dois íons estudados, os valores mais altos dos coeficientes de dispersão-difusão foram na 3ª repetição dos íons nitrato e potássio no tratamento de temperatura de 50°C e na 2ª e 3ª repetição no tratamento de temperatura de 40°C.

O fator de retardamento (R), por ser uma característica que retrata a capacidade do solo em reter os solutos à medida que o fluxo de massa avança, depende das interações entre as fases líquida e sólida que ocorrem durante a percolação.

Os menores valores de R foram encontrados para o íon nitrato na 2ª e 3ª repetição na temperatura de 40°C e na 2ª repetição no tratamento na temperatura de 50°C. Não se observou nenhum efeito relacionado ao aumento da temperatura, nessas condições do experimento.

Porém, observou-se em relação ao parâmetro de transporte – dispersão (D), para o íon nitrato, um aumento dos valores em função do aumento da temperatura, assim como a velocidade da água no poro, tanto em função do número de Peclet, quanto também em função da densidade de fluxo (Tabela 5).

Em relação aos parâmetros de transporte obtidos para o íon potássio, pode-se observar que os valores do parâmetro R foram maiores em todas as temperaturas em relação ao nitrato. Já o coeficiente de dispersão apresentou acréscimos apenas da temperatura ambiente para a temperatura de 40°C. Entre a temperatura de 40°C e 50°C houve uma redução dos seus valores. A velocidade da água no poro, tanto em função do número de Peclet quanto em relação à densidade de fluxo (q), apresentou um aumento à medida que se aumentava a temperatura.

A dispersividade praticamente teve o seu valor aumentado em 100%, quando da passagem da temperatura ambiente para a temperatura de 40°C (Tabela 6).

Tabela 5 – Parâmetros de transporte do nitrato: velocidade da água nos poros (v), coeficiente de dispersão (D), fato de retardamento (R), para as três repetições do solo submetido à simulação

Parâmetros de transporte do nitrato							
Temperatura Ambiente							
	R	D (cm ² min ⁻¹)	P	v (P) (cm min ⁻¹)	v (q) (cm min ⁻¹)	λ (P)	λ (q)
Repetição 1	1,292	9,58	30,62	14,66	15,44	0,6531	0,6205
Repetição 2	1,279	7,46	33,96	12,66	13,29	0,5889	0,5615
Repetição 3	1,247	19,622	19,91	19,53	19,53	1,0045	1,0047
Média	1,2726	12,2206	28,16	15,61	16,08	0,7488	0,7289

Parâmetros de transporte do nitrato							
Temperatura 40°C							
	R	D (cm ² min ⁻¹)	P	v (P) (cm min ⁻¹)	v (q) (cm min ⁻¹)	λ (P)	λ (q)
Repetição 1	1,219	21,045	17,93	18,86	18,87	1,1154	1,1155
Repetição 2	0,995	44,334	12,12	26,86	26,86	1,6501	1,6506
Repetição 3	1,103	33,827	10,13	17,13	17,14	1,9743	1,9737
Média	1,1056	33,0686	13,39	20,95	20,95	1,5799	1,5799

Parâmetros de transporte do nitrato							
Temperatura 50°C							
	R	D (cm ² min ⁻¹)	P	v (P) (cm min ⁻¹)	v (q) (cm min ⁻¹)	λ (P)	λ (q)
Repetição 1	1,465	33,017	10,19	16,82	16,82	1,9627	1,9635
Repetição 2	1,102	29,507	25,41	37,48	37,48	0,7870	0,7873
Repetição 3	1,587	66,277	14,25	47,22	47,22	1,4035	1,4037
Média	1,3846	42,9336	16,61	33,84	33,84	1,3844	1,3848

2.3.3 Relação entre os parâmetros de transporte dos íons nitrato e potássio em função da temperatura

A mobilidade de solutos no solo está inversamente relacionada à adsorção dos mesmos à fração sólida ou às condições do meio que favoreçam a precipitação dos íons (Matos et al., 1998).

O fator de retardamento (R) também é chamado de coeficiente de partição, pois representa a razão entre a concentração dos solutos nas fases sólida e líquida (MIRANDA, 2001).

Tabela 6 – Parâmetros de transporte do potássio: velocidade da água nos poros (v), coeficiente de dispersão (D), fator de retardamento (R), para as três repetições do solo submetido à simulação

Parâmetros de transporte do potássio							
Temperatura Ambiente							
	R	D (cm ² min ⁻¹)	P	v (P) (cm min ⁻¹)	v (q) (cm min ⁻¹)	λ (P)	λ (q)
Repetição 1	1,940	8,485	30,38	12,88	15,83	0,6583	0,5360
Repetição 2	1,930	13,226	22,85	15,11	13,56	0,8752	0,9756
Repetição 3	1,952	21,586	18,51	19,97	19,98	1,0804	1,0804
Média	1,9406	14,4323	23,91	15,98	16,45	0,8713	0,864

Parâmetros de transporte do potássio							
Temperatura 40°C							
	R	D (cm ² min ⁻¹)	P	v (P) (cm min ⁻¹)	v (q) (cm min ⁻¹)	λ (P)	λ (q)
Repetição 1	1,842	22,072	17,72	19,55	19,56	1,1286	1,1286
Repetição 2	1,424	42,069	12,91	27,15	27,15	1,5491	1,5496
Repetição 3	1,681	40,963	8,68	17,77	17,77	2,3041	2,3051
Média	1,649	35,0346	13,10	21,49	21,49	1,6606	1,6611

Parâmetros de transporte do potássio							
Temperatura 50°C							
	R	D (cm ² min ⁻¹)	P	v (P) (cm min ⁻¹)	v (q) (cm min ⁻¹)	λ (P)	λ (q)
Repetição 1	1,769	17,858	18,94	16,91	16,91	1,0559	1,0560
Repetição 2	1,641	29,794	26,15	38,95	38,96	0,7648	0,7647
Repetição 3	2,125	44,991	21,14	47,55	47,57	0,9460	0,9459
Média	1,845	30,881	22,07	34,47	34,48	0,9222	0,9222

Nessas condições da pesquisa, não se observou nenhum efeito relacionado ao aumento da temperatura, devido há algum erro de preenchimento da coluna contrariando o que foi encontrado por Elbachá (1989). Esse autor trabalhou com migração de poluentes em meios porosos, estudando o efeito da temperatura, do mineral argílico e da concentração do poluente na obtenção dos parâmetros do transporte de massa pelos testes de permeabilidade e equilíbrio em lote, usando uma solução residual da fabricação de zinco, variando pouco com o aumento da temperatura. Em todas as temperaturas o potássio apresentou maiores valores de fator de retardamento que o nitrato, indicando maior interação com a fração sólida do solo (Figura 14).

Figura 14 – Representação gráfica dos valores médios do parâmetro fator de retardamento (R), para nitrato e potássio, submetido aos diferentes valores de temperatura (ambiente, 40°C e 50°C)

Notou-se que à medida que aumentava a temperatura, aumentava a velocidade da água nos poros, pois o aumento da temperatura diminui a viscosidade da água, sendo um pouco maior para o íon potássio nas 3 temperaturas (Figura 15).

Figura 15 – Representação gráfica dos valores médios do parâmetro velocidade da água no poro (v , cm min^{-1}), para nitrato e potássio, submetido aos diferentes valores de temperatura (ambiente, 40°C e 50°C)

Para os parâmetros, fator de retardamento (R) e velocidade da água no poro em função do fluxo $v(q)$ os maiores valores do coeficiente de variação foram, aqueles obtidos para os tratamentos com temperatura à 50°C.

Isso pode ser devido ao fato não manter o sistema bem isolado, conseqüentemente houve dificuldade em se manter o gradiente de temperatura constante. No fator de retardamento a temperatura não influenciou muito, pois os valores das médias são muito próximos e com um pequeno desvio padrão e baixos coeficientes de variação em relação aos outros parâmetros (Tabela 7).

Tabela 7 – Análise estatística dos valores obtidos do íon nitrato para o fator de retardamento nos diferentes valores de temperatura

NITRATO -- R			
	Media	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Temp ambiente	1,273 ^a	0,023	1,823
40°C	1,106 ^a	0,112	10,129
50°C	1,385 ^a	0,252	18,221

Para o íon potássio, o fator de retardamento não apresentou valores com a presença da temperatura, pois os valores das médias são muito próximos e com um pequeno desvio padrão e baixos coeficientes de variação em relação aos outros parâmetros (Tabela 8).

Tabela 8 – Análise estatística dos valores obtidos do íon potássio para o fator de retardamento nos diferentes valores de temperatura

POTÁSSIO -- R			
	Media	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Temp ambiente	1,9407 ^a	0,011	0,567
40°C	1,649 ^a	0,211	12,784
50°C	1,845 ^a	0,251	13,593

Verifica-se na tabela que a $v(q)$ tende a aumentar assim que aumenta a temperatura, diminuindo a viscosidade. Por outro lado os elevados valores de coeficiente de variação, sobretudo nos casos em que houve aquecimento da solução aplicada, sendo de 45,872 para o tratamento de 50°C, não permitiram que se encontrasse uma diferença estatisticamente significativa, entre os 3 tratamentos (Tabela 9).

Tabela 9 – Análise estatística dos valores obtidos do íon nitrato para velocidade da água no poro em função do fluxo, nos diferentes valores de temperatura

NITRATO -- $v(q)$			
	Media	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Temp ambiente	16,087 ^a	3,170	19,705
40°C	20,957 ^a	5,185	24,741
50°C	33,840 ^a	15,523	45,872

Pela Tabela 10 pode-se verificar que os valores $v(q)$ tendem a aumentar assim que aumenta a temperatura, pois ocorre a diminuição da viscosidade. Por outro lado os elevados valores de coeficiente de variação, sobretudo nos casos em que houve aquecimento da solução aplicada, sendo de 45,861 para o tratamento de 50°C, não permitiram que se encontrasse uma diferença estatisticamente significativa, entre os 3 tratamentos.

Tabela 10 – Análise estatística dos valores obtidos do íon nitrato para velocidade da água no poro em função do fluxo, nos diferentes valores de temperatura

POTÁSSIO -- $v(q)$			
	Media	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Temp ambiente	16,087 ^a	3,170	19,705
40°C	20,957 ^a	5,185	24,741
50°C	33,840 ^a	15,523	45,872

A dispersividade é um parâmetro obtido pela relação entre o coeficiente de dispersão e a velocidade da água no poro do respectivo solo. Portanto, quanto maior a dispersividade, maior a diferença entre a velocidade média da solução nos poros e a velocidade da solução dentro de poros individuais. Notou-se que quanto maior os valores de dispersividade, menores são os valores do número de Peclet para as 3 temperaturas (Figuras 16 e 17).

Figura 16 – Representação gráfica dos valores médios do parâmetro dispersividade (λ), para nitrato e potássio, submetido aos diferentes valores de temperatura (ambiente, 40°C e 50°C)

Figura 17 – Representação gráfica dos valores médios do parâmetro número de Peclet (P), para nitrato e potássio, submetido aos diferentes valores de temperatura (ambiente, 40°C e 50°C)

Oliveira et al. (2004) afirmaram que a menor interação adsorvato/adsorvente leva a uma maior uniformidade do deslocamento do soluto, com maior concentração no fluido deslocador. Os resultados obtidos estão de acordo com esta afirmativa para o íon nitrato, uma vez que o aumento da temperatura provocou uma maior interação dos íons com o solo, reduzindo a concentração dos mesmos no fluido deslocador e um aumento da dispersão, apenas para o íon nitrato; para o íon potássio na variação de temperatura de 40°C para 50°C o coeficiente de dispersão decresce. No entanto esses autores não encontraram uma relação nítida entre as concentrações e os coeficientes de dispersão – difusão do fosfato, potássio e amônio, em cinco solos por eles estudados.

O coeficiente de dispersão apresentou maiores valores para o íon potássio; apenas da temperatura ambiente para a temperatura de 40°C em relação ao coeficiente de dispersão do íon nitrato. Entre a temperatura de 40°C e 50°C houve uma redução dos seus valores ficando menor que o coeficiente de dispersão do íon nitrato (Figura 18).

Figura 18 – Representação gráfica dos valores médios do parâmetro coeficiente de dispersão (D , $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$), para nitrato e potássio, submetido aos diferentes valores de temperatura (ambiente, 40°C e 50°C)

Para o parâmetro de dispersão(D) os valores dos coeficientes de variação apresentaram maiores valores em temperatura ambiente, o que pode ser devido ao fato da variação de temperatura ambiente nos diferentes dias, o que provocou uma desuniformidade do meio.

Verifica-se pela Tabela 11 que os valores das médias do coeficiente de dispersão(D) para o nitrato tendem a aumentar assim que se aumenta a temperatura, aumentando-se a agitação das moléculas (movimento Browniano das moléculas). Por outro lado os elevados valores de coeficiente de variação, sobretudo no caso de temperatura ambiente da solução aplicada, não permitiram que se encontrasse uma diferença estatisticamente significativa, entre os três tratamentos.

Tabela 11 – Análise estatística dos valores obtidos do íon nitrato para o coeficiente de dispersão, nos diferentes valores de temperatura

Nitrato (D)			
	Media	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Temp ambiente	12,221 ^a	6,500	53,191
40°C	33,069 ^a	11,660	35,259
50°C	42,934 ^a	20,290	47,263

Os valores das médias do coeficiente de dispersão(D) para o potássio tendem a aumentar assim que se eleva o valor de temperatura para 40°C, aumentando se a agitação das moléculas (movimento Browniano das moléculas), mas curiosamente verifica-se que os valores das médias, quando aquecida de 40°C para 50°C há uma ligeira redução nos valores de $4,154 \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$. Mas os elevados valores de coeficiente de variação, sobretudo no caso de temperatura ambiente da solução aplicada, não permitiram que se encontrasse uma diferença estatisticamente significativa, entre os 3 tratamentos (Tabela 12).

Tabela 12 – Análise estatística dos valores obtidos do íon nitrato para o coeficiente de dispersão, nos diferentes valores de temperatura

POTÁSSIO (D)			
	Media	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
Temp ambiente	14,432 ^a	6,630	45,946
40°C	35,035 ^a	11,240	32,087
50°C	30,881 ^a	13,600	44,041

3 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) A temperatura apresentou grande influência na velocidade da solução através do meio poroso e também no coeficiente de dispersão;
- b) As variações de temperatura não apresentaram influência sobre os valores do parâmetro fator de retardamento;
- c) O íon potássio teve maior interação com a fração sólida do solo em relação ao íon nitrato;
- d) Os tratamentos não apresentaram diferença significativa, principalmente, devido ao fato de não se ter o ambiente controlado em termos de temperatura, necessitando de maiores preocupações em relação a esse aspecto.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, J.; HERGUEDAS, A.; ATIENZA, J.; BOLADO, S. Modelización numérica y estimación de parámetros para la descripción del transporte de solutos en columnas de suelo en laboratorio. Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, 1985. 69p.
- ÁLVAREZ-BENEDI. J., T. ISLA, A. Cartón y S. Bolado. Efecto de la velocidad de flujo en los parámetros de transporte de solutos. En: Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. (Eds.) ICIA: La Laguna. 1999. 157-161p.
- BEAR, J. Dynamics of fluids in porous media. New York:American Elsevier,1972. 764p.
- BORGES, A. F - **Avaliação dos mecanismos de transporte de Hexaclorociclohexano (HCH) no Solo da Cidade dos Meninos, Duque de Caxias, RJ.** 1996. 205p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro,Rio de Janeiro,1996
- BORGES JÚNIOR, J.C. F.; FERREIRA, P. A. Programa Computacional para cálculo de parâmetros do transporte de solutos em deslocamento de fluídos miscíveis. In:CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31. 2002, Salvador-BA, **Anais.**: Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola – SBEA, 2002. p 1-4.
- BRESLER, E. Convective and pore scale dispersive solute transport in unsaturated heterogeneous fields. **Water Resources Research**, Washington, v.37, n. 6. p.1683-1693, 1981.
- CAMPOS, T. M. P. de; ELBACHÁ, A. T. Avaliação do Fator de Retardamento por Adsorção no Transporte de Zinco em Solos Argilosos. In Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO'91, 2., Rio de Janeiro, RJ.Anais... v.1 p.271-282. 1991.
- COSTA, P. O da S. **Avaliação em laboratório, do transporte de contaminantes no solo do aterro sanitário de Sauípe/BA.** 2002. 171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002
- CUNHA, C. **Métodos numéricos para as engenharias e ciências aplicadas.** Campinas, SP: Editora da Unicamp, 1993. 265p.

CUSSLER, E. L. Diffusion. Mass transfer in fluid systems. Cambridge:Cambridge University Press. 1984. 600p.

EDWARDS, D.M; FISCHBACH, P.E; YOUNG, L. L. Movement of nitrate under irrigated agriculture. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph v.15, n.1, p. 73-75, 1972.

ELBACHÁ, A. T. - **Estudo da Influência de Alguns Parâmetros no Transporte de Massa em Solos Argilosos**. 1989. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

EXNER, M.E.; BURBACH, M.E.; WATTS, D.G.; SHEARMAN,R.C.; SPALDIND, R.F. Deep nitrate movement in the unsaturated zone of simulated urban lawn. **Journal Environmental Quality**, Madison, n. 20, p. 658-662, 1991.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: ESAL-FAEPE, 1994. 227p.

FREEZE, R. A; CHERRY, J. A., **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall,1979. 604 p.

GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.3, p.892-898, 1980.

GENUCHTEN, M. T. van.; WIERENGA, P.J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis, Part 1**. Physical and mineralogical methods Madison: Asa, 1986. chap 44.p1025-1054.

GRATHWOHL, P. Diffusion in natural pourous media: Contaminant transport, sorption/desorption and dissolution kinetics, Boston, MA.: Kluwer Academic Publisher. 1998.207p.

GRIFFIN, R. A; SHIMP, N. F. – Effect of pH on Exchange-Adsorption or Precipitation of Lead from Landfill Leachates by Clay Minerals. **Enviromental Science and Technology**, Easton, n. 10,1256-1261, 1976.

JOST, W. Diffusion in solids, liquids, gases. New York.: Academic Press, 1952. 558p.

LAGREGA, M. D., BUCKINGHAM, P. L.; EVANS, J. C. - **Hazardous Waste Management**. McGraw-Hill, Singapore. 1994. 1146 p.

LIDE, D. R. CRC Handbooks of chemistry and physics. 75th ed. Boca Raton: CRC Press, 1994. p.576-578.

LI, Y; GREGORY, S. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, New York, n.38, p.703-714, 1974.

MALAVOLTA, E. **Potássio, magnésio e enxofre nos solos e culturas brasileiras**. 2 ed Piracicaba: Instituto Internacional de Pesquisa da Potassa, 1980. 91p. (Boletim Técnico, 4)

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319p. Funções, cap.3, p.76-77.

MATOS, A.T.; COSTA, L.M. da; FONTES, M.P.F.; MARTINEZ, M.A. Correlação entre os fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo, e algumas propriedades físicas dos solos. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.6, n.4, p.235-246, 1998

MIRANDA, J.H. **Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado**, 2001. 79 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MIRANDA, J.H.,; DUARTE, S. N; LIBARDI, P. L; FOLEGATTI, M.V. Simulação do deslocamento de potássio em colunas verticais de solo não-saturado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.677-685, set./dez. 2005.

MUCHOVEJ, R.M.C; RECHCIGL, J.E. Impacts of nitrogen fertilization of pastures and turfgrasses on water quality. In: LAL, R.; STEWART, B.A. **Soil processes and water quality** (Ed). Boca Raton. Lewis Publication, 1994. p. 91-135.

NEWBOULD, P. The use of nitrogen fertilizer in agriculture. Where do we go practically and ecologically. **Plant Soil**, Dordrecht, n. 115, p. 297-311, 1989.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Miscible displacement in soils: I. Experimental Information. **Soil Science Society of America**, Madison, v.25, n.1, p.1-5, 1961.

NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Miscible displacement: III Theoretical considerations. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v.26, p.216-221, 1962.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Miscible displacement: V. Exchange processes. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, v.27, p.623-627, 1963.

OLIVEIRA, E. M. M.; RUIZ, H.A.; FERREIRA, P.A.; ALVAREZ V, V. H.; BORGES JÚNIOR, J.C. F. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão e difusão de fosfato, potássio e amônio em solos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n 2/3, p. 196-203, 2004.

OLIVEIRAS, H. **Avaliação do uso de borra oleosa processada em sistemas de impermeabilização de aterros**. 2002. 205p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002

RAO, P. S. C.; ROLSTON, D. E.; JESSUP, R. E.; DAVIDSON, J. M. Solute transport in aggregated porous media: theoretical and experimental evaluation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.1139-1146, 1980

REID, R. C; PRAUSNITZ, J. M; POLING, B. E. **The properties of liquids and gases**. 4thed. New York: Mc Graw- Hill, 1987. p.598-611.

ROBINSON, R. A; STOKES, R. H. Electrolyte solutions. 2nd ed. New York: Academic Press, 1959. p 306.

SCALOPPI, E. J.; BRITO, R. A. Qualidade da água e do solo para irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n. 139, p. 80-94, 1986.

SEBER, G. A. F; WILD, C. J; Nonlinear regression. New York: John Wiley, 1989. 768p.

SHEPARD, T. A. ; CHERRY, J. A. Contaminant Migration in Seepage from URANIUM MILL TAILINGS IMPOUNDMENTS, AN OVERVIEW 1980., 1980, San Jose. **In SYMPOSIUM ON TECHNOLOGY. 3**. San Jose, Proceedings....San Jose, 1980. p.1256-1261.

SPALDING, R.F.; EXNER, M.E.; LINDAU, C.W.; EATON, D.W. Investigation of sources of groundwater nitrate contamination in the Burbank Wallula area of Washington, **Journal Hydrology**, San Antonio, n. 58, p. 307-324, 1982.

SPARKS, D. L.; HUANG, P. M. **Physical chemistry of soil potassium**. In: MUNSON, R. Potassium in agriculture: Phosphate Potash; Phosphate Institute. Atlanta: American Society of Agronomy, 1985. p. 201-276.

TAVORA, J. E. M. De. Reservas minerais de potássio e suas explorações. Brasília. Potássio na agricultura Brasileira.; Instituto Internacional da Potassa, 1982. p.37-50.

TORIDE, N., F. J. LEIJ, M. TH. van GENUCHTEN. **The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments, Version 2.1**. Riverside: Salinity Laboratory, USDA, ARS ,1999. 119 p. (Research Report,137).

USEPA, Environmental Protection Agency – Understanding Variation in Partition Coefficient, K_d, Values – Volume 2: Review of Geochemistry and Available K_d Values for Cadmium, Cesium, Chromium, Lead, Plutonium, Radon, Strontium, Thorium (3H) and Uranium, EPA/402-R-99-004B., Washington: Office of Air and Radiation, 1999. 334pp.

VANCLOOSTER, M.; VIAENE, P.; CHRISTIAENS, K. **A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment**. Katholieke Universiteit Leuven: Institute for Land; Water Management Leuven, 1994. 154 p.

WRAITH, J.M.; OR, D. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, Madison, v.27, p.13-19, 1998.

ZANINI, J.R. Distribuição de água e do íon K⁺ no solo, aplicados por fertirrigação em gotejamento. II - Teores de K⁺ no bulbo molhado. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília n.46, p.24-38, 1991.

ANEXOS

Anexo A – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, 1ª repetição, temperatura ambiente e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	Repetição 1 C/Co - obs	Ajuste
0,090	0,001	0,000
0,180	0,001	0,000
0,270	0,001	0,000
0,360	0,001	0,000
0,450	0,001	0,000
0,540	0,001	0,000
0,630	0,003	0,000
0,720	0,002	0,000
0,810	0,005	0,000
0,900	0,013	0,002
0,990	0,011	0,005
1,080	0,016	0,014
1,170	0,034	0,030
1,260	0,068	0,057
1,350	0,119	0,096
1,440	0,153	0,147
1,530	0,220	0,209
1,620	0,288	0,280
1,710	0,339	0,356
1,800	0,441	0,433
1,890	0,508	0,510
1,980	0,559	0,582
2,070	0,627	0,649
2,160	0,695	0,709
2,250	0,746	0,761
2,340	0,814	0,806
2,430	0,847	0,845
2,520	0,898	0,876
2,610	0,915	0,903
2,700	0,932	0,924
2,790	0,950	0,941
2,880	0,970	0,954
2,970	0,980	0,965
3,060	0,990	0,973
3,150	1,000	0,980
Parâmetros - R1		
P	R	D
30,38	1,940	8,474

Anexo B – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, 2ª repetição, temperatura ambiente e seus respectivos parâmetros de transporte

VP	Repetição 2 C/Co – obs	Ajuste
0,090	0,001	0,000
0,180	0,001	0,000
0,270	0,001	0,000
0,360	0,001	0,000
0,450	0,001	0,000
0,540	0,001	0,000
0,630	0,001	0,000
0,720	0,003	0,000
0,810	0,005	0,002
0,900	0,007	0,006
0,990	0,010	0,015
1,080	0,014	0,031
1,170	0,020	0,057
1,260	0,070	0,093
1,350	0,140	0,140
1,440	0,120	0,195
1,530	0,300	0,258
1,620	0,350	0,325
1,710	0,410	0,394
1,800	0,480	0,463
1,890	0,550	0,529
1,980	0,600	0,592
2,070	0,640	0,650
2,160	0,690	0,702
2,250	0,730	0,749
2,340	0,759	0,789
2,430	0,810	0,825
2,520	0,879	0,855
2,610	0,897	0,881
2,700	0,900	0,903
2,790	0,966	0,921
2,880	0,931	0,936
2,970	0,948	0,948
3,060	0,966	0,958
3,150	0,948	0,967
3,240	0,966	0,973
3,330	0,960	0,979
3,420	0,983	0,983
3,510	0,966	0,987
3,600	0,948	0,990
3,690	0,966	0,992
3,780	1,000	0,994
Parâmetros - R2		
P	R	D
22,85	1,930	13,226

Anexo C – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, 3ª repetição, temperatura ambiente e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 3					
VP	C/Co - obs	Ajuste	VP	C/Co - obs	Ajuste
0,090	0,001	0,000	1,980	0,590	0,581
0,180	0,001	0,000	2,070	0,560	0,634
0,270	0,001	0,000	2,160	0,670	0,682
0,360	0,001	0,000	2,250	0,740	0,725
0,450	0,001	0,000	2,340	0,670	0,764
0,540	0,001	0,000	2,430	0,810	0,799
0,630	0,002	0,000	2,520	0,870	0,829
0,720	0,004	0,001	2,610	0,860	0,855
0,810	0,006	0,004	2,700	0,930	0,878
0,900	0,008	0,011	2,790	0,930	0,897
0,990	0,014	0,024	2,880	0,920	0,914
1,080	0,034	0,045	2,970	0,950	0,928
1,170	0,070	0,076	3,060	0,950	0,940
1,260	0,122	0,115	3,150	0,950	0,950
1,350	0,180	0,163	3,240	0,960	0,959
1,440	0,245	0,218	3,510	0,980	0,977
1,530	0,305	0,277	3,600	0,970	0,981
1,620	0,330	0,339	3,690	0,970	0,984
1,710	0,410	0,402	3,780	0,990	0,987
1,800	0,460	0,465	3,870	0,990	0,990
1,890	0,520	0,525	3,960	1,000	0,991
Parâmetros – R3					
P	R		D		
18,51	1,952		21,586		

Anexo D – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, 1ª repetição, temperatura ambiente e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 1		
VP	C/Co - obs	Ajuste
0,090	0,000	0,000
0,180	0,000	0,000
0,270	0,000	0,000
0,360	0,000	0,000
0,450	0,000	0,000
0,540	0,000	0,000
0,630	0,000	0,003
0,720	0,000	0,013
0,810	0,040	0,042
0,900	0,111	0,095
0,990	0,216	0,177
1,080	0,306	0,280
1,170	0,409	0,395
1,260	0,469	0,511
1,350	0,565	0,618
1,440	0,663	0,710
1,530	0,795	0,786
1,620	0,872	0,846
1,710	0,943	0,892
1,800	0,952	0,925
1,890	0,966	0,949
1,980	1,000	0,966
Parâmetros - R1		
P	R	D
30,62	1,292	9,580

Anexo E – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, 2ª repetição, temperatura ambiente e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 2		
VP	C/Co – obs	Ajuste
0,090	0,001	0,000
0,180	0,001	0,000
0,270	0,001	0,000
0,360	0,001	0,000
0,450	0,001	0,000
0,540	0,001	0,000
0,630	0,001	0,002
0,720	0,001	0,011
0,810	0,055	0,037
0,900	0,125	0,089
0,990	0,202	0,172
1,080	0,302	0,280
1,170	0,398	0,401
1,260	0,494	0,523
1,350	0,570	0,635
1,440	0,684	0,730
1,530	0,816	0,806
1,620	0,910	0,865
1,710	0,956	0,908
1,800	0,981	0,939
1,890	0,983	0,960
1,980	0,996	0,974
2,070	0,995	0,984
2,160	1,000	0,990
Parâmetros – R2		
P	R	D
33,96	1,279	7,46

Anexo F – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, 3ª repetição, temperatura ambiente e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 3		
VP	C/Co – obs	Ajuste
0,090	0,012	0,000
0,180	0,014	0,000
0,270	0,015	0,000
0,360	0,017	0,000
0,450	0,016	0,001
0,540	0,018	0,005
0,630	0,027	0,019
0,720	0,060	0,052
0,810	0,122	0,109
0,900	0,206	0,186
0,990	0,310	0,280
1,080	0,395	0,381
1,170	0,481	0,481
1,260	0,546	0,575
1,350	0,614	0,659
1,440	0,672	0,731
1,530	0,753	0,791
1,620	0,843	0,840
1,710	0,916	0,878
1,800	0,968	0,909
1,890	0,976	0,932
1,980	0,997	0,950
2,070	0,994	0,963
2,160	0,988	0,973
2,250	0,991	0,981
2,340	1,000	0,986
Parâmetros – R3		
P	R	D
19,91	1,247	19,622

Anexo G – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, 1ª repetição, temperatura de 40°C e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 1		
VP	C/Co - obs	Ajuste
0,090	0,002	0,000
0,180	0,001	0,000
0,270	0,001	0,000
0,360	0,001	0,000
0,450	0,001	0,000
0,540	0,002	0,000
0,630	0,003	0,001
0,720	0,005	0,003
0,810	0,007	0,009
0,900	0,012	0,021
0,990	0,038	0,041
1,080	0,085	0,071
1,170	0,128	0,112
1,260	0,195	0,161
1,350	0,250	0,218
1,440	0,290	0,281
1,530	0,340	0,346
1,620	0,400	0,412
1,710	0,455	0,476
1,800	0,515	0,538
1,890	0,600	0,596
1,980	0,640	0,649
2,070	0,680	0,697
2,160	0,710	0,741
2,250	0,750	0,779
2,340	0,810	0,813
2,430	0,840	0,842
2,520	0,880	0,867
2,610	0,910	0,889
2,700	0,930	0,907
2,790	0,940	0,923
2,880	0,960	0,936
2,970	0,990	0,947
3,060	0,990	0,956
3,150	1,000	0,964
Parâmetros - R1		
P	R	D
17,72	1,842	22,072

Anexo H – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, 2ª repetição, temperatura de 40°C ambiente e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 2					
VP	C/Co - obs	Ajuste	VP	C/Co - obs	Ajuste
0,045	0,001	0,000	1,305	0,500	0,486
0,090	0,001	0,000	1,350	0,530	0,521
0,135	0,001	0,000	1,395	0,560	0,555
0,180	0,001	0,000	1,440	0,590	0,587
0,225	0,001	0,000	1,485	0,640	0,618
0,270	0,001	0,000	1,530	0,670	0,647
0,315	0,001	0,000	1,575	0,690	0,674
0,360	0,001	0,000	1,620	0,690	0,700
0,405	0,001	0,001	1,665	0,710	0,724
0,450	0,001	0,002	1,710	0,750	0,747
0,495	0,002	0,004	1,755	0,770	0,768
0,540	0,002	0,008	1,800	0,790	0,788
0,585	0,003	0,014	1,845	0,790	0,806
0,630	0,004	0,024	1,890	0,810	0,823
0,675	0,006	0,037	1,935	0,810	0,838
0,720	0,010	0,054	1,980	0,820	0,852
0,765	0,030	0,074	2,025	0,840	0,866
0,810	0,070	0,099	2,070	0,860	0,878
0,855	0,110	0,126	2,115	0,870	0,889
0,900	0,150	0,157	2,160	0,880	0,899
0,945	0,200	0,190	2,205	0,900	0,908
0,990	0,240	0,225	2,250	0,920	0,917
1,035	0,270	0,262	2,295	0,920	0,924
1,080	0,320	0,299	2,340	0,930	0,932
1,125	0,340	0,337	2,385	0,950	0,938
1,170	0,380	0,375	2,430	0,960	0,944
1,215	0,420	0,413	2,475	1,000	0,949
1,260	0,460	0,450	1,305	0,500	0,486
			1,350	0,530	0,521
Parâmetros - R2					
P		R		D	
12,91		1,424		42,069	

Anexo I – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, 3ª repetição, temperatura de 40°C e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 3					
VP	C/Co - obs	Ajuste	VP	C/Co - obs	Ajuste
0,045	0,001	0,000	1,845	0,660	0,666
0,090	0,001	0,000	1,890	0,670	0,685
0,135	0,001	0,000	1,935	0,680	0,702
0,180	0,001	0,000	1,980	0,690	0,719
0,225	0,001	0,000	2,025	0,700	0,735
0,270	0,001	0,000	2,070	0,710	0,750
0,315	0,001	0,000	2,115	0,720	0,765
0,360	0,002	0,000	2,160	0,730	0,779
0,405	0,002	0,001	2,205	0,740	0,792
0,450	0,002	0,003	2,250	0,770	0,804
0,495	0,003	0,005	2,295	0,790	0,815
0,540	0,004	0,010	2,340	0,800	0,826
0,585	0,005	0,016	2,385	0,830	0,837
0,630	0,006	0,025	2,430	0,850	0,847
0,675	0,007	0,037	2,475	0,870	0,856
0,720	0,010	0,050	2,520	0,880	0,864
0,765	0,010	0,067	2,565	0,880	0,873
0,810	0,040	0,086	2,610	0,890	0,880
0,855	0,070	0,107	2,655	0,900	0,888
0,900	0,100	0,129	2,700	0,910	0,895
0,945	0,130	0,154	2,745	0,920	0,901
0,990	0,170	0,180	2,790	0,930	0,907
1,035	0,200	0,206	2,835	0,920	0,913
1,080	0,230	0,234	2,880	0,920	0,918
1,125	0,270	0,263	2,925	0,930	0,923
1,170	0,300	0,291	2,970	0,920	0,928
1,215	0,340	0,320	3,015	0,920	0,932
1,260	0,380	0,349	3,060	0,930	0,937
1,305	0,420	0,377	3,105	0,940	0,941
1,350	0,440	0,405	3,150	0,950	0,944
1,395	0,480	0,433	3,195	0,960	0,948
1,440	0,490	0,460	3,240	0,950	0,951
1,485	0,530	0,486	3,285	0,960	0,954
1,530	0,540	0,511	3,330	0,970	0,957
1,575	0,560	0,536	3,375	0,970	0,960
1,620	0,590	0,560	3,420	0,980	0,962
1,665	0,590	0,583	3,465	0,980	0,964
1,710	0,610	0,605	3,510	0,990	0,967
1,755	0,620	0,626	3,555	0,990	0,969
1,800	0,630	0,647	3,600	1,000	0,971
Parâmetros – R3					
P		R		D	
8,68		1,681		40,963	

Anexo J – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, 1ª repetição, temperatura de 40°C e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 1		
VP	C/Co - obs	Ajuste
0,090	0,000	0,000
0,180	0,000	0,000
0,270	0,000	0,000
0,360	0,000	0,000
0,450	0,008	0,001
0,540	0,009	0,009
0,630	0,033	0,030
0,720	0,088	0,073
0,810	0,162	0,139
0,900	0,247	0,223
0,990	0,329	0,319
1,080	0,418	0,419
1,170	0,497	0,516
1,260	0,579	0,604
1,350	0,647	0,682
1,440	0,724	0,748
1,530	0,792	0,804
1,620	0,854	0,848
1,710	0,888	0,884
1,800	0,954	0,912
1,890	0,976	0,934
1,980	0,993	0,950
2,070	1,000	0,963
Parâmetros - R1		
P	R	D
17,93	1,219	21,045

Anexo K – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, 2ª repetição, temperatura de 40°C e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 2		
VP	C/Co - obs	Ajuste
0,045	0,000	0,000
0,090	0,000	0,000
0,135	0,000	0,000
0,180	0,000	0,000
0,225	0,000	0,000
0,270	0,000	0,001
0,315	0,000	0,002
0,360	0,000	0,007
0,405	0,045	0,016
0,450	0,071	0,032
0,495	0,083	0,056
0,540	0,119	0,087
0,585	0,135	0,124
0,630	0,159	0,168
0,675	0,204	0,217
0,720	0,252	0,268
0,765	0,311	0,321
0,810	0,369	0,374
0,855	0,412	0,427
0,900	0,497	0,478
0,945	0,523	0,527
0,990	0,567	0,573
1,035	0,617	0,6163
1,080	0,666	0,6564
1,125	0,703	0,6933
1,170	0,728	0,727
1,215	0,765	0,7576
1,260	0,780	0,7854
1,305	0,792	0,8103
1,350	0,805	0,8327
1,395	0,847	0,8527
1,440	0,865	0,8705
1,485	0,871	0,8863
1,530	0,884	0,9003
1,575	0,915	0,9127
1,620	0,940	0,9236
1,665	0,947	0,9333
1,710	0,982	0,9417
1,755	0,994	0,9492
1,800	1,000	0,9557
Parâmetros – R2		
P	R	D
12,12	0,995	44,334

Anexo L – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, 3ª repetição, temperatura de 40°C e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 3		
VP	C/Co - obs	Ajuste
0,045	0,000	0,000
0,090	0,000	0,000
0,135	0,000	0,000
0,180	0,000	0,000
0,225	0,000	0,000
0,270	0,000	0,001
0,315	0,000	0,002
0,360	0,000	0,006
0,405	0,000	0,014
0,450	0,011	0,027
0,495	0,030	0,046
0,540	0,066	0,071
0,585	0,102	0,102
0,630	0,146	0,137
0,675	0,190	0,176
0,720	0,239	0,219
0,765	0,284	0,263
0,810	0,324	0,309
0,855	0,376	0,354
0,900	0,424	0,399
0,945	0,466	0,443
0,990	0,501	0,486
1,035	0,530	0,527
1,080	0,560	0,566
1,125	0,580	0,602
1,170	0,600	0,637
1,215	0,620	0,669
1,260	0,639	0,699
1,305	0,667	0,726
1,350	0,708	0,752
1,395	0,735	0,775
1,440	0,765	0,797
1,485	0,797	0,816
1,530	0,827	0,834
1,575	0,869	0,850
1,620	0,908	0,865
1,665	0,924	0,879
1,710	0,948	0,891
1,755	0,967	0,902
1,800	0,985	0,912
1,845	1,000	0,921
Parâmetros – R3		
P	R	D
10,13	1,103	33,827

Anexo M – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, 1ª repetição, temperatura de 50°C e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 1		
VP	C/Co - obs	Ajuste
0,090	0,001	0,000
0,180	0,001	0,000
0,270	0,001	0,000
0,360	0,001	0,000
0,450	0,001	0,000
0,540	0,001	0,000
0,630	0,002	0,001
0,720	0,004	0,003
0,810	0,007	0,010
0,900	0,011	0,023
0,990	0,021	0,047
1,080	0,044	0,082
1,170	0,075	0,127
1,260	0,135	0,183
1,350	0,220	0,246
1,440	0,335	0,314
1,530	0,420	0,385
1,620	0,480	0,454
1,710	0,550	0,521
1,800	0,630	0,585
1,890	0,680	0,643
1,980	0,710	0,695
2,070	0,720	0,742
2,160	0,770	0,783
2,250	0,800	0,819
2,340	0,830	0,849
2,430	0,860	0,875
2,520	0,860	0,897
2,610	0,880	0,916
2,700	0,920	0,931
2,790	0,940	0,944
2,880	0,950	0,955
2,970	0,970	0,963
3,060	0,970	0,970
3,150	0,970	0,976
3,240	1,000	0,981
Parâmetros - R1		
P	R	D
18,94	1,769	17,858

Anexo N – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, 2ª repetição, temperatura de 50°C e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 2					
VP	C/Co - obs	Ajuste	VP	C/Co - obs	Ajuste
0,045	0,000	0,000	1,530	0,440	0,452
0,090	0,000	0,000	1,575	0,460	0,495
0,135	0,000	0,000	1,620	0,500	0,536
0,180	0,000	0,000	1,665	0,540	0,575
0,225	0,000	0,000	1,710	0,580	0,613
0,270	0,000	0,000	1,755	0,600	0,649
0,315	0,000	0,000	1,800	0,620	0,682
0,360	0,000	0,000	1,845	0,690	0,714
0,405	0,000	0,000	1,890	0,720	0,743
0,450	0,000	0,000	1,935	0,780	0,770
0,495	0,000	0,000	1,980	0,810	0,795
0,540	0,001	0,000	2,025	0,870	0,817
0,585	0,001	0,000	2,070	0,870	0,838
0,630	0,002	0,000	2,115	0,900	0,856
0,675	0,002	0,001	2,160	0,910	0,873
0,720	0,003	0,002	2,205	0,910	0,888
0,765	0,004	0,003	2,250	0,920	0,902
0,810	0,004	0,006	2,295	0,940	0,914
0,855	0,006	0,011	2,340	0,950	0,925
0,900	0,010	0,018	2,385	0,930	0,934
0,945	0,010	0,028	2,430	0,950	0,943
0,990	0,030	0,042	2,475	0,960	0,950
1,035	0,050	0,059	2,520	0,950	0,957
1,080	0,080	0,080	2,565	0,960	0,962
1,125	0,120	0,106	2,610	0,960	0,967
1,170	0,170	0,135	2,655	0,970	0,972
1,215	0,190	0,167	2,700	0,970	0,976
1,260	0,220	0,203	2,745	0,980	0,979
1,305	0,270	0,241	2,790	0,980	0,982
1,350	0,310	0,282	2,835	0,980	0,984
1,395	0,360	0,324	2,880	0,990	0,987
1,440	0,380	0,367	2,925	1,000	0,989
1,485	0,400	0,410			
Parâmetros – R2					
P		R		D	
26,15		1,641		29,794	

Anexo O – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, 3ª repetição, temperatura de 50°C e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 3					
VP	C/Co - obs	Ajuste	VP	C/Co - obs	Ajuste
0,045	0,001	0,000	1,845	0,411	0,377
0,090	0,001	0,000	1,890	0,453	0,407
0,135	0,001	0,000	1,935	0,474	0,438
0,180	0,001	0,000	1,980	0,484	0,468
0,225	0,001	0,000	2,025	0,526	0,497
0,270	0,001	0,000	2,070	0,540	0,526
0,315	0,001	0,000	2,115	0,547	0,554
0,360	0,001	0,000	2,160	0,579	0,581
0,405	0,001	0,000	2,205	0,600	0,607
0,450	0,001	0,000	2,250	0,611	0,633
0,495	0,001	0,000	2,295	0,620	0,657
0,540	0,001	0,000	2,340	0,632	0,680
0,585	0,001	0,000	2,385	0,663	0,702
0,630	0,001	0,000	2,430	0,674	0,723
0,675	0,001	0,000	2,475	0,695	0,743
0,720	0,001	0,000	2,520	0,720	0,762
0,765	0,002	0,000	2,565	0,747	0,780
0,810	0,002	0,001	2,610	0,768	0,796
0,855	0,003	0,002	2,655	0,779	0,812
0,900	0,003	0,003	2,700	0,800	0,826
0,945	0,004	0,005	2,745	0,832	0,840
0,990	0,005	0,008	2,790	0,850	0,853
1,035	0,005	0,012	2,835	0,870	0,865
1,350	0,032	0,088	2,880	0,890	0,876
1,395	0,063	0,107	2,925	0,900	0,886
1,440	0,084	0,128	2,970	0,910	0,896
1,485	0,137	0,151	3,015	0,920	0,904
1,530	0,179	0,175	3,060	0,940	0,912
1,575	0,221	0,201	3,105	0,960	0,920
1,620	0,263	0,228	3,150	0,970	0,927
1,665	0,295	0,257	3,195	0,980	0,933
1,710	0,316	0,286	3,240	0,980	0,939
1,755	0,358	0,316	3,285	0,990	0,944
1,800	0,389	0,346	3,330	1,000	0,949
Parâmetros – R3					
P		R		D	
21,14		2,125		44,991	

Anexo P – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, 1ª repetição, temperatura de 50°C e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 1		
VP	C/Co - obs	Ajuste
0,090	0,010	0,000
0,180	0,009	0,000
0,270	0,010	0,000
0,360	0,009	0,001
0,450	0,013	0,004
0,540	0,013	0,014
0,630	0,028	0,036
0,720	0,051	0,072
0,810	0,097	0,120
0,900	0,157	0,178
0,990	0,235	0,243
1,080	0,309	0,311
1,170	0,386	0,379
1,260	0,465	0,446
1,350	0,535	0,510
1,440	0,588	0,569
1,530	0,633	0,623
1,620	0,678	0,672
1,710	0,721	0,716
1,800	0,758	0,755
1,890	0,781	0,789
1,980	0,815	0,819
2,116	0,841	0,857
2,208	0,853	0,878
2,300	0,880	0,897
2,392	0,900	0,912
2,484	0,907	0,926
2,576	0,925	0,937
2,668	0,939	0,947
2,760	0,957	0,955
2,852	0,970	0,962
2,944	0,976	0,968
3,036	0,982	0,973
3,128	1,000	0,977
Parâmetros - R1		
P	R	D
10,19	1,465	33,017

Anexo Q – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, 2ª repetição, temperatura de 50°C e seus respectivos parâmetros de transporte

Repetição 2		
VP	C/Co - obs	Ajuste
0,045	0,000	0,000
0,090	0,000	0,000
0,135	0,000	0,000
0,180	0,000	0,000
0,225	0,000	0,000
0,270	0,000	0,000
0,315	0,000	0,000
0,360	0,000	0,000
0,405	0,000	0,000
0,450	0,000	0,001
0,495	0,000	0,002
0,540	0,000	0,007
0,585	0,000	0,015
0,630	0,017	0,029
0,675	0,045	0,050
0,720	0,089	0,080
0,765	0,141	0,118
0,810	0,201	0,165
0,855	0,258	0,218
0,900	0,316	0,277
0,945	0,370	0,339
0,990	0,416	0,402
1,035	0,458	0,465
1,080	0,491	0,526
1,125	0,528	0,584
1,170	0,556	0,638
1,215	0,599	0,688
1,260	0,660	0,733
1,305	0,744	0,773
1,350	0,823	0,808
1,395	0,902	0,839
1,440	0,969	0,865
1,485	0,985	0,888
1,530	1,000	0,907
Parâmetros – R2		
P	R	D
25,41	1,102	29,507

Anexo R – Valores obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, 3ª repetição, temperatura de 50°C e seus respectivos parâmetros de transporte.

Repetição 3					
VP	C/Co - obs	Ajuste	VP	C/Co - obs	Ajuste
0,045	0,000	0,000	1,260	0,367	0,328
0,090	0,000	0,000	1,305	0,410	0,363
0,135	0,000	0,000	1,350	0,440	0,399
0,180	0,000	0,000	1,395	0,467	0,433
0,225	0,000	0,000	1,440	0,486	0,468
0,270	0,000	0,000	1,485	0,511	0,501
0,315	0,000	0,000	1,530	0,527	0,533
0,360	0,000	0,000	1,575	0,546	0,564
0,405	0,000	0,000	1,620	0,567	0,594
0,450	0,000	0,000	1,665	0,582	0,623
0,495	0,000	0,001	1,710	0,602	0,650
0,540	0,000	0,002	1,755	0,621	0,676
0,585	0,000	0,004	1,800	0,641	0,700
0,630	0,000	0,008	1,845	0,668	0,723
0,675	0,000	0,014	1,890	0,690	0,744
0,720	0,000	0,022	1,935	0,714	0,765
0,765	0,000	0,033	1,980	0,753	0,783
0,810	0,012	0,047	2,025	0,777	0,801
0,855	0,029	0,064	2,070	0,802	0,817
0,900	0,052	0,084	2,115	0,833	0,832
0,945	0,086	0,107	2,160	0,860	0,847
0,990	0,121	0,133	2,205	0,892	0,860
1,035	0,166	0,162	2,250	0,915	0,872
1,080	0,208	0,192	2,295	0,952	0,883
1,125	0,251	0,225	2,340	0,965	0,893
1,170	0,293	0,258	2,385	0,999	0,902
1,215	0,334	0,293	2,430	1,000	0,911
Parâmetros – R3					
P		R		D	
14,25		1,587		66,277	