

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

**Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em
diferentes tipos de solo**

João Alberto Lelis Neto

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Irrigação
e Drenagem

**Piracicaba
2008**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

João Alberto Lelis Neto
Engenheiro Agrônomo

Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo

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

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2008**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Lelis Neto, João Alberto

Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo / João Alberto Lelis Neto. - - Piracicaba, 2008.
89 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Composição química 2. Efluentes 3. Irrigação 4. Nitratos 5. Potássio 6. Vinhaça I. Título

CDD 631.7
L541m

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

Dedico

Aos meus pais,

José Junqueira Lelis e Maria Alice Conte Maluf, pois sempre me deram força para continuar meus estudos, apesar das dificuldades, e me ensinaram além de tudo ser uma pessoa honesta.

Aos meus irmãos,

Haysar Alfredo Conte Maluf Lelis e José Renato Maluf Lelis, que nos momentos difíceis sempre me ajudaram, e me deram apoio e conselhos em todas minhas decisões. Além de vários momentos de diversão juntos (videogame). Amo muito vocês!!!

A minha noiva

Patrícia Maria Pinto que além de ser minha companheira em todos os dias, sempre acreditou em mim. Todos os obstáculos encontrados, juntos conseguimos ultrapassá-los. Obrigado pelo apoio, compreensão, amor, amizade e carinho... EU TE AMO!!!!

Aos seus pais e irmãs que me aceitaram na família com muito amor e carinho. Em especial ao meu sogro pelas pescarias realizadas. Obrigado!!!

Aos meus avós,

João Alberto Lelis e Haysar Maluf (em memória) e Jovina Junqueira Lelis e Arayde Conte, que mesmo distante, nunca deixaram de me apoiar.

Ao meu tio,

Ricardo Junqueira Lelis, pelos conselhos dados, e por sempre acreditar no meu potencial. Jamais esquecerei disso! Obrigado meu tio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, nosso pai;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia Rural e do Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade e suporte concedidos;

À FAPESP pela concessão da bolsa e pelo auxílio financeiro dado ao projeto;

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

Ao Prof. Iran José Oliveira da Silva por ceder a estufa para realização do experimento e por acreditar em meu potencial para a realização do mestrado;

Aos Professores Marcus Vinícius Folegatti, Rubens Duarte Coelho e Tarlei Ariel Botrel pela oportunidade de trabalharmos juntos e a todos os professores do Departamento de Engenharia Rural pelos conhecimentos fornecidos;

Ao Prof. Marcos Yassuo Kamogawa, pela grande ajuda na parte química da pesquisa;

A Prof. Sônia Maria de Stefano Piedade, pelo auxílio na parte estatística da pesquisa;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, Gilmar Batista Grigolom (5s), Antonio Agostinho Gozzo (pescador), Hélio Toledo Gomes (companheiro de vinhaça), Luís Custódio de Camargo (hacker), Osvaldo Rettore Neto (Zé bonitinho), Sandra Regina T. Silveira Mello, Beatriz Regina Duarte Novaes, Davilmar Aparecida D. Collevatti e Lino Stênico, pela recepção, auxílio na realização do trabalho e pela amizade;

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas Ana Maria da Silva Maia Michelin, Angela Márcia Derigi Silva, Francisco Bernardo Dias, Lenita Maria C. Pacheco E. Oliveira e Luiz Fernando Novello;

Aos colegas e amigos os quais tive o prazer de conhecer e conviver e que tornaram o mestrado mais agradável;

Ao meu estagiário Leandro (kimba) pela ajuda na realização do meu experimento; e

Àquelas pessoas que de alguma forma direta ou indireta me ajudaram na conclusão dessa pesquisa.

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importa quais sejam os obstáculos e as dificuldades. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”.

(Dalai-Lama)

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 DESENVOLVIMENTO	15
2.1 Considerações iniciais.....	15
2.1.1 Composição química da vinhaça.....	15
2.1.2 Legislação sobre aplicação de vinhaça e técnicas de monitoramento da dinâmica de solutos no solo.....	17
2.1.3 Monitoramento da dinâmica de solutos por extratores de solução.....	18
2.1.4 Dinâmica dos componentes químicos da vinhaça.....	19
2.1.5 Transporte do íon potássio no solo.....	20
2.1.6 Transporte do íon nitrato no solo.....	22
2.1.7 Transporte do íon cálcio no solo.....	24
2.1.8 Dinâmica de solutos e parâmetros de transporte	25
2.1.9 Estimativa dos parâmetros de transporte a partir das curvas de distribuição de efluentes obtidas em laboratório.....	27
2.2 Material e métodos	29
2.2.1 Localização e caracterização experimental	29
2.2.2 Instalação do experimento.....	31
2.2.3 Tratamentos e delineamento experimental.....	34
2.2.4 Plantio.....	35
2.2.5 Instalação dos tensiômetros e extratores de solução	36
2.2.6 Sistema e manejo da irrigação	37
2.2.7 Aquisição e aplicação da vinhaça.....	38
2.2.8 Monitoramento da dinâmica dos solutos	39
2.2.9 Elaboração das curvas de distribuição de efluentes.....	40
2.2.10 Análise química dos efluentes	43
2.2.11 Análise estatística dos dados	45

2.3 Resultados e Discussão	45
2.3.1 Distribuição do íon nitrato no solo.....	45
2.3.2 Distribuição do íon potássio no solo	50
2.3.3 Distribuição do íon cálcio no solo	54
2.3.4 Distribuição do pH e da C.E no solo.....	58
2.3.5 Curvas de distribuição dos efluentes nitrato e potássio.....	64
3 CONCLUSÕES	67
ANEXOS.....	73

RESUMO

Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo

Desde a época da colonização, a cana-de-açúcar apresenta-se como um dos principais produtos da agricultura brasileira e, além disso, trata-se de um tipo importante de biomassa energética, servindo como base para todo o agronegócio sucroalcooleiro, responsável por empregos diretos e indiretos em todo o Brasil. Do seu processo de industrialização são obtidos produtos, tais como: o açúcar, o álcool (anidro e hidratado), o bagaço e a vinhaça. Nesse sentido, diante do aspecto da aplicação da vinhaça em práticas agrícolas, pode-se dizer que sempre ocorre a sua associação com processos de impactos ambientais. Assim sendo, conduziu-se a presente pesquisa buscando-se monitorar a dinâmica, em diferentes tipos de solo, de componentes químicos presentes na vinhaça, bem como, elaborar curvas de distribuição de efluentes presentes na vinhaça. A pesquisa foi conduzida em área experimental do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP, em casa de vegetação, onde foram distribuídas 50 bombonas, em blocos casualizados. A vinhaça foi coletada na Usina Costa Pinto do grupo COSAN no município de Piracicaba/SP e as dosagens de aplicação foram: $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. As espécies analisadas foram: nitrato e potássio, assim como, o pH, condutividade elétrica e cálcio. As curvas de distribuição de efluentes foram confeccionadas para obtenção dos parâmetros de transporte do nitrato (utilizando-se o FIA – Flow Injection Analysis, para as análises químicas) e potássio (Fotômetro de chama, para as análises químicas). Diante dos resultados obtidos, observou-se que as concentrações do íon nitrato apresentaram variação no solo, encontrando-se valores entre 3,6 a 119 mg L^{-1} , no solo arenoso, e entre 1 e 70 mg L^{-1} , no solo argiloso. Em relação ao potássio foram encontrados valores pontuais de 4,4 a $171,2 \text{ mg L}^{-1}$, no solo arenoso (principalmente na profundidade de 60 cm), e entre 0 e 30 mg L^{-1} , no solo argiloso. As concentrações de cálcio apresentaram variação no solo, sendo encontrados valores pontuais de 1,98 a $64,45 \text{ mg L}^{-1}$, no solo arenoso, e entre 2,6 e $86,5 \text{ mg L}^{-1}$, no solo argiloso. Os valores tanto do pH quando da C.E apresentaram variações no solo, tendo um intervalo para o pH de 6,4 a 7,75 para o solo arenoso e de 4,8 a 7,32 para o solo argiloso e a condutividade elétrica ficou em torno de 0,3 a $2,3 \text{ dS m}^{-1}$ para o solo arenoso e de 0,23 a $0,75 \text{ dS m}^{-1}$ para o solo argiloso. Em relação à curva de distribuição de efluentes da vinhaça, no solo argiloso, observou-se que tanto o potássio quanto o nitrato houve um maior deslocamento das curvas de eluição para a direita quando comparados com o solo arenoso indicando que os íons potássio e nitrato foram retidos com maior intensidade no argiloso em relação ao arenoso. Portanto, concluiu-se que: a percolação dos íons está diretamente relacionada com o tipo de solo e com a concentração de vinhaça e que a movimentação dos íons deve ser estudada em longos períodos para mostrar melhor a sua movimentação no perfil do solo.

Palavras-chave: Transporte de íons; Potássio; Nitrato; Curvas de distribuição de efluentes

ABSTRACT

Monitoring the fate and transport of vinasse chemical components applied to different soil types

While sugarcane has been one of the main crops in Brazilian agriculture since the time of colonization, it is now also a major source of biomass energy, serving sugarcane agribusiness and being responsible for many direct and indirect jobs in Brazil. Industrial processing of sugarcane leads to such products as sugar, alcohol (both hydrated and anhydrous), pulp and vinasse. One concern about the application of vinasse to agricultural operations relates to possible environmental impacts of vinasse. Hence, the present research had as objective to monitor of the dynamics, in different soil types, of chemical components present in vinasse, and to measure breakthrough curves (BTC's) of vinasse from repacked columns. The research was carried out at the experimental facility of the Department of Exact Sciences, ESALQ, USP, a protected environment containing 50 boxes arranged in a random manner. The vinasse was collected at the Usina Costa Pinto – COSAN site in the municipal district of Piracicaba, SP, and applied at rates of 100, 150, 200, 250 and 300 m³ ha⁻¹. The analyzed elements were nitrate and potassium, but measurements were also made of pH, electric conductivity and calcium. The BTC's were used to provide estimates of the transport parameters of nitrate (using flow-injection analysis for the chemical analyses) and potassium (using a photometer for the chemical analyses). The measurements showed that soil nitrate concentrations varied between 3,6 to 119 mg L⁻¹ in the sandy soil, and between 1 and 70 mg L⁻¹ in the clay soil. Observed potassium concentrations were between 4,4 to 171,2 mg L⁻¹ in the sandy soil (mainly at a depth of 60 cm), and between 0 and 30 mg L⁻¹ in the clay soil. Calcium concentrations were found to similarly vary from 1,98 to 64,45 mg L⁻¹ in the sandy soil, and between 2,6 and 86,5 mg L⁻¹ in the clay soil. The values of pH furthermore varied between 6,4 to 7,75 for the sandy soil and between 4,8 to 7,32 for the clay soil, while the electric conductivity was between 0,3 to 2,3 dS m⁻¹ for the sandy soil and between 0,23 to 0,75 dS m⁻¹ for the clay soil. The vinasse BTC's of the clay soil showed that both potassium and nitrate were displaced considerably to the right (to higher pore volumes) as compared with the sandy soil. This indicates that the potassium and nitrate ions were kept (adsorbed) much stronger by the clay relative to the sandy soil. Ion transport rates hence were found to be a function of soil type. Results suggest that the transport of ions from the vinasse is best studied over relatively long periods of time, also in field soil profiles, to better show the long-term dynamics in the subsurface.

Keywords: Ions transport; Potassium; Nitrate; Breakthrough curves

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Valores médios mensais registrados no período da condução do experimento (novembro de 2007 a setembro de 2008) referente à: temperatura do ar e radiação global (a), precipitação (b), umidade do ar (c), velocidade do vento (d).....	30
Figura 2 - Etapas da instalação do projeto: alocação das bombonas (a), furos localizados no fundo das bombonas (b), preenchimento da brita para drenagens (c), solo peneirado (d), bombonas preenchidas com os diferentes tipos de solo (e) e (f)....	33
Figura 3 - Distribuição em blocos casualizados dos tratamentos no ambiente protegido nos quais foram conduzidas na fase de cana planta submetida às quantidades de aplicação de vinhaça (T1=100 m ³ ha ⁻¹ , T2=150 m ³ ha ⁻¹ , T3=200 m ³ ha ⁻¹ , T4=250 m ³ ha ⁻¹ , T5=300 m ³ ha ⁻¹) para os diferentes tipos de solo.....	34
Figura 4 - Preparo das mudas e etapas do plantio da cana, variedade RB 867515.....	35
Figura 5 - Tensiômetros (a), tensiômetro instalado (b), extratores de solução (c) e vista total da estufa com os tensiômetros e extratores instalados (d).....	36
Figura 6 - Sistema de irrigação (a) e painel de controle (b).....	37
Figura 7 - Preparação da coluna de PVC e início do teste da curva de distribuição de efluentes	41
Figura 8 - Detalhes da coleta para elaboração da curva de distribuição de efluentes...	42
Figura 9 - Aparelhos utilizados para análises químicas, fotômetro de chama (a) e FIA – Flow Injection Analysis (b).....	43
Figura 10 - Tela inicial do programa computacional “DISP” (a) e tela com os resultados processados pelo programa DISP (b)(BORGES JÚNIOR e FERREIRA, 2002).....	44
Figura 11 - Distribuição espacial do íon nitrato, solo arenoso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m, Piracicaba, SP, 2008.....	46
Figura 12 - Distribuição espacial do íon nitrato, solo argiloso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008.....	49
Figura 13 - Distribuição espacial do íon potássio, solo arenoso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008.....	51
Figura 14 - Distribuição espacial do íon potássio, solo argiloso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008.....	52

Figura 15 - Distribuição espacial do íon cálcio, solo arenoso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008.....	55
Figura 16 - Distribuição espacial do íon cálcio, solo argiloso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008.....	57
Figura 17 - Distribuição espacial do pH, solo arenoso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008.....	59
Figura 18 - Distribuição espacial do pH, solo argiloso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008.....	60
Figura 19 - Distribuição espacial da CE, solo arenoso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008.....	61
Figura 20 - Distribuição espacial da CE, solo argiloso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008.....	62
Figura 21 - Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com vinhaça, solo argiloso, para os íons potássio e nitrato.....	65
Figura 22 - Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com vinhaça, solo arenoso, para os íons potássio e nitrato.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos (PRADA et al., 1998)	16
Tabela 2 - Granulometria dos solos utilizados no experimento	32
Tabela 3 - Análise química dos solos utilizados no experimento.....	32
Tabela 4 - Esquema da análise de variância.....	34
Tabela 5 - Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r) e parâmetros (α , m e n) do modelo de Van Genuchten (1980) para os solos utilizados no experimento, Piracicaba, SP, 2007	38
Tabela 6 - Análise química da vinhaça	39
Tabela 7 - Valores médios do Nitrato em função da profundidade, tratamento e tipo de solo - Piracicaba, SP, 2008 ¹	48
Tabela 8 - Valores médios de Potássio em função da profundidade, tratamento e tipo de solo - Piracicaba, SP, 2008 ¹	53
Tabela 9 - Valores médios de Cálcio em função da profundidade, tratamento e tipo de solo - Piracicaba, SP, 2008 ¹	56
Tabela 10 - Valores médios do pH em função da profundidade, tratamento e tipo de solo - Piracicaba, SP, 2008 ¹	63
Tabela 11 - Valores médios da C.E em função da profundidade, tratamento e tipo de solo - Piracicaba, SP, 2008 ¹	63
Tabela 12 - Parâmetros de transporte do potássio: fator de retardamento (R), coeficiente de dispersão (D), número de Peclet (P), velocidade da água nos poros (v), coeficiente de dispersividade calculado em função do número de Peclet (λ), para diferentes solos submetidos à simulação	66
Tabela 13 - Parâmetros de transporte do nitrato: fator de retardamento (R), coeficiente de dispersão (D), número de Peclet (P), velocidade da água nos poros (v), coeficiente de dispersividade calculado em função do número de Peclet (λ), para diferentes solos submetidos à simulação	66

1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar tem grande importância no cenário sócio-econômico brasileiro. Ela é responsável por uma expressiva parte do produto interno bruto, possibilitando o uso de uma fonte de energia renovável, gerando divisas com a exportação de açúcar e álcool, além de ser uma atividade de criação intensa de empregos.

A cana-de-açúcar está diretamente ligada à história brasileira. Desde o século XVI, quando nossas terras foram descobertas por espanhóis e portugueses, o açúcar já começava a ser produzido e a cultura desenvolveu-se no nordeste por meio de engenhos, que já exportavam para países da Europa, embora em pequena escala. Os principais países produtores atualmente são: Brasil, Índia e China (FNP, 2008). No Brasil, a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (2008) estima que a área plantada de cana-de-açúcar em 2007/2008 chegará a sete milhões de hectares, com uma produtividade média de aproximadamente 79 Mg ha^{-1} . A produção total de cana-de-açúcar (2007/2008) chegará à aproximadamente 493,38 milhões de toneladas. Com isso, na mesma safra, a produção de açúcar atingirá 30,76 milhões de toneladas e a produção de etanol total chegará a 22,48 bilhões de litros.

A vinhaça, que é um subproduto merecedor de destaque da produção de cana-de-açúcar (originária do processo de fabricação do etanol a partir da destilação do caldo fermentado da cana-de-açúcar), é um líquido de coloração marrom escura, de natureza ácida e que, ao sair da bica de destilação, atinge temperaturas em torno de $107 \text{ }^\circ\text{C}$. Apresenta elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e é produzida, em média, à razão de aproximadamente 13 litros de vinhaça por litro de álcool destilado.

Segundo Almeida (1952), durante décadas, mesmo quando ainda não era gerada nos grandes volumes atuais, a vinhaça já provocava nos órgãos de controle do ambiente e, particularmente na comunidade científica, alguma preocupação quanto a seus impactos sobre a qualidade dos recursos naturais (por muito tempo a vinhaça foi simplesmente jogada nos rios, poluindo-os, com o poder de dizimar os seres da microfauna e microflora, que formam os plânctons dos rios). Dessa forma, a vinhaça foi

proibida por lei para ser lançada nos rios, lagoas e baixios no Decreto-Lei nº 303, de 28 de fevereiro de 1967.

Com o advento do Próalcool, houve uma grande expansão da indústria alcooleira do país e, como consequência, um aumento significativo da produção de álcool, o que fez com que o problema da poluição por vinhaça voltasse a ser fonte de grande preocupação. O aumento extraordinário do volume de vinhaça, causando desastres ecológicos quando derramado involuntariamente nos rios, trouxe a necessidade de pesquisas para descobrir meios racionais que buscassem o aproveitamento desse resíduo. As usinas normalmente, dentre as inúmeras alternativas apresentadas, utilizam a vinhaça na fertirrigação dos canaviais e este uso traz vários benefícios, e também alguns danos. Assim sendo, a sua utilização nas plantações de cana-de-açúcar vem mudando ao longo dos anos o conceito de que se trata de um agente exclusivamente poluente. Nesse caso, a utilização da vinhaça pela fertirrigação passaria a ser uma tecnologia que utiliza de forma racional os recursos naturais e que impediria a aplicação desse resíduo nos rios, possibilitando a fertilização de solos agricultáveis.

Porém, sabe-se que a vinhaça, aplicada sem critérios ao solo, pode causar desequilíbrio de nutrientes, além de induzir a uma saturação do solo, ocasionando problemas de lixiviação de seus constituintes para águas subterrâneas. Pode-se dizer que a dosagem "ideal" da aplicação de vinhaça varia de acordo com o tipo de solo e variedades de cana-de-açúcar. Portanto, o conhecimento da composição da vinhaça e dos mecanismos de deslocamento dos seus componentes no solo é de fundamental importância, principalmente para orientação quanto às dosagens a serem aplicadas no campo.

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de alguns componentes químicos da vinhaça, íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+), aplicados em dois tipos distintos de solo e monitorados por meio de extratores de solução, além de avaliar outros elementos químicos, o que de certa forma auxiliará no entendimento do deslocamento de solutos, aplicados via vinhaça, em períodos de condução do plantio da cana-de-açúcar (cana planta), bem como, na obtenção dos parâmetros de transporte dos íons nitrato e potássio, presentes na vinhaça, nos respectivos solos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Considerações iniciais

2.1.1 Composição química da vinhaça

A vinhaça é caracterizada como efluente de destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante; o poder poluente, cerca de cem vezes maior que o do esgoto doméstico, decorre da sua riqueza em matéria orgânica, baixo pH, elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), além de elevada temperatura na saída dos destiladores; é considerada altamente nociva à fauna, flora, microfauna e microflora das águas doces, além de afugentar a fauna marinha que vem às costas brasileiras para procriação (FREIRE e CORTEZ, 2000).

A composição química da vinhaça é bastante variável e depende, principalmente, de fatores como a natureza e a composição da matéria prima, do sistema usado no preparo do mosto, do método de fermentação adotado e do sistema de condução da fermentação alcoólica, do tipo de levedura utilizada, do tipo de aparelho destilatório empregado, da maneira de destilação e do tipo de flegma separado (GLÓRIA, 1984).

Os constituintes da vinhaça são: a matéria orgânica, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, por cátions como o K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , sendo que sua riqueza nutricional está ligada à origem do mosto. Quando se parte de mosto de melaço, apresenta maiores concentrações em matéria orgânica, potássio, cálcio e magnésio, ao passo que esses elementos decaem consideravelmente quando se trata de mosto de caldo de cana, como é o caso de destilarias autônomas (ROSSETTO, 1987).

Dentre os componentes químicos da vinhaça, destacam-se, a matéria orgânica e o íon potássio, podendo-se observar suas quantidades em diferente mosto (Tabela 1). Praticamente 60% da vinhaça produzida provêm de mosto de caldo e 40% de mosto misto.

Tabela 1 - Composição química média da vinhaça obtida a partir da fermentação de diferentes mostos (PRADA et al., 1998)

Elementos	Vinhaça de mosto		
	melaço	caldo	Misto
pH	4,2-5,0	3,7-4,6	4,4-4,6
Temperatura	80-100	80-100	80-100
DBO (mg L ⁻¹ O ₂)	25.000	6.000 - 16.500	19.800
DQO (mg L ⁻¹ O ₂)	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg L ⁻¹)	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg L ⁻¹)	21.500	3.700	12.700
N (MG L ⁻¹ N)	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710
P ₂ O ₅ (mg L ⁻¹)	100 - 290	10 - 210	9 - 200
K ₂ O (mg L ⁻¹)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
CaO (mg L ⁻¹)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
MgO (mg L ⁻¹)	420 - 1.520	200 - 490	580.700
SO ₄ (mg L ⁻¹)	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
C (MG L ⁻¹)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria orgânica (mg L ⁻¹)	63.400	19.500	3.800
Subst. redutoras (mg L ⁻¹)	9.500	7.900	8.300

Após analisarem a composição química de diferentes tipos de vinhaça produzida em diferentes regiões do Brasil, Silva e Orlando Filho (1981) mostraram que a vinhaça é muito rica em matéria orgânica e nutrientes minerais, tais como potássio e cálcio. Estes mesmos autores constataram que a composição química da vinhaça é muito heterogênea, em função do tipo de matéria-prima e outros aspectos, concluindo que: a vinhaça proveniente de mosto de melaço é mais rica em matéria orgânica e de elementos minerais que a de mosto misto e a de caldo; o potássio é o elemento predominante, seguindo-se do cálcio, enxofre (sulfato), nitrogênio, fósforo e magnésio. Em relação aos micronutrientes, o ferro é o que aparece em maior concentração, seguido do manganês, cobre e zinco, em pequenas concentrações; os teores mais elevados dos elementos contidos na vinhaça, apresentados nos trabalhos mais antigos deve-se à prioridade de, à época, produzir-se mais açúcar que álcool e, conseqüentemente, maior proporção de vinhaça de mosto de melaço; teores de potássio, em virtude da maior proporção de vinhaça de mosto misto e de caldo, utilizada atualmente, diminuíram até 60% aproximadamente na vinhaça de mosto e até quatro vezes na de caldo de cana.

2.1.2 Legislação sobre aplicação de vinhaça e técnicas de monitoramento da dinâmica de solutos no solo

No estado de São Paulo existe uma normativa técnica que tem como objetivo dispor sobre os critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar.

Segundo a norma técnica CETESB (P4.231), versão Janeiro de 2005 até a data de 2 (dois) de abril de cada ano, o empreendimento deverá encaminhar à CETESB o Plano de Aplicação de Vinhaça.

O Plano de Aplicação de Vinhaça no solo constituir-se-á de memorial descritivo sobre a prática de aplicação pretendida, acompanhado de “planta” na escala de 1:20.000, ou superior, contendo as taxas indicativas de dosagem a serem aplicadas, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, diferenciadas em cores, com intervalos de aplicação a cada 150m^3 . Este plano ou planilha complementar deverá também, no mínimo, indicar: a localização dos tanques de armazenamento, dos canais mestres ou primários (de uso permanente de distribuição); a localização dos cursos d’água; poços utilizados para abastecimento; dados de geologia e hidrogeologia local; resultados analíticos dos solos; as áreas de interesse ambiental e formas e dosagens da aplicação de vinhaça.

Para efetuar a quantidade máxima de vinhaça a ser aplicada aos solos agrícolas, elaborou-se uma equação, contendo características do solo e concentrações de potássio (eq. 1):

$$VV = \frac{[(0,05CTC - ks)3744 + 1850]}{kvi} \quad (1)$$

em que:

VV = volume de vinhaça a ser aplicado, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$

0,05 = 5% da CTC;

CTC = capacidade de troca catiônica, expressa em cmolc dm^{-3} a pH 7,0;

ks = concentração de potássio no solo, expresso em cmolc dm^{-3} , à profundidade de 0,80 m;

3744 = constante para converter os resultados da análise de fertilidade, quando expressos em cmolc dm^{-3} ou $\text{meq } 100 \text{ cm}^{-3}$, para kg de potássio em um volume de um hectare por 0,80 m de profundidade;

185 = quantidade de “kg” de K_2O extraído pela cultura por ha, por corte; e

kvi = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de $\text{K}_2\text{O m}^{-3}$, apresentada em boletim de resultado analítico.

2.1.3 Monitoramento da dinâmica de solutos por extratores de solução

O uso dessa metodologia é bastante popular entre pesquisadores por apresentar resultados satisfatórios a um custo relativamente baixo. Portanto o acondicionamento de extratores tem que ser criterioso para melhorar a precisão dos resultados. Silva (2002), concluiu que, com o auxílio dos extratores de solução providos de cápsulas de cerâmica, é possível determinar a concentração de nitrato e potássio com excelente precisão na solução do solo e a determinação da concentração de cálcio e magnésio, com uma menor precisão.

Outro aspecto a ser observado é que a utilização do método da medição da condutividade elétrica da solução obtida com extrator de cápsula porosa é bastante eficiente, devido a sua facilidade, versatilidade e praticidade, quando comparada com o da solução diluída 1:2, desde que sejam conhecidas a umidade da pasta e a umidade no momento da extração (SILVA et al., 1999).

Segundo Silva (2002), o monitoramento da condutividade elétrica da solução do solo extraído por cápsulas porosas permite evitar possíveis processos de salinização e ou deficiência nutricional. De acordo com Dias (2004) é possível, com auxílio de extratores de solução por cápsulas porosas, monitorar a concentração total de íons na solução do solo e manter a salinidade em nível desejado, controlando a condutividade elétrica da solução extraída.

2.1.4 Dinâmica dos componentes químicos da vinhaça

Cunha et al. (1981) relatam que a dinâmica do nitrogênio no solo tratado com resíduos orgânicos, tal como a vinhaça, é complexa, devido às transformações bioquímicas. O nitrogênio está presente na vinhaça, predominantemente na forma orgânica, e a mineralização é a primeira transformação biológica que ocorre no solo.

Uma vez que a relação C/N na vinhaça é baixa, uma significativa mineralização das formas imobilizadas de nitrogênio no solo pode ocorrer; contudo, Madejón et al. (2001) trabalhando com associação de vinhaça e outros materiais orgânicos no condicionamento do solo, observaram pequena elevação em sua salinidade, elevação no conteúdo de matéria orgânica e no nitrogênio total.

Lyra et al. (2003), concordam com Madejón et al. (2001) ao sugerirem que se pode esperar uma elevação na concentração de sais no solo e potencial risco de salinização com a aplicação de vinhaça ao longo dos anos, considerando-se a taxa de absorção de potássio pela planta, sua concentração na vinhaça e a baixa condutividade elétrica (CE) observada no lençol freático, indicativo de reduzida lixiviação.

Ridesa (1994) observou que a eficiência da remoção da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) pelo solo, pode ser afetada por sua capacidade de infiltração e pela presença de cobertura vegetal e, deste modo, quanto mais cobertura vegetal maior será a capacidade biológica de remoção. A eficiência da remoção da DBO tem sido constatada como elevada, mesmo em solos com alta capacidade de infiltração. Com relação ao nitrato, um dos maiores problemas citados na literatura acerca de contaminação de lençol freático, Madejón et al. (2001) observaram que, com a retirada da vegetação após cada colheita, os teores de nitrato se elevavam nos solos e concluíram que sua lixiviação abaixo da zona radicular pode ser desprezível quando esses compostos são aplicados em áreas vegetadas com emprego de práticas agrícolas adequadas, como a utilização de áreas afastadas de nascentes ou de regiões com lençol freático superficial.

Cunha et al. (1981) estudando a utilização de vinhaça como fertilizante e condicionador de solos, observaram que a acumulação de potássio no perfil não foi grande, ficando este elemento retido na camada de 0,50 m de profundidade, sendo que sua lixiviação foi pequena, acompanhando a drenagem interna no perfil.

Canellas et al. (2003) trabalhando em Cambissolo, não verificaram aumento de potássio nem cálcio em profundidade, tampouco da CTC ou nitrogênio; entretanto, observaram aumento nos teores de cobre e ferro na camada de 0,20-0,40 m de profundidade. Esses autores constataram, ainda, aumento na fração de ácidos fúlvicos de até 13% na camada de 0,40 m o que poderia indicar tanto a evolução química dos compostos orgânicos como o transporte desta fração, para camadas de solo mais profundas.

Verificou-se unanimidade em relação à dosagem aplicada que apresentaria menores chances de contaminação de águas subterrâneas devendo ser relacionada ao tipo e condições do solo local, isto é, de acordo com o conteúdo de matéria orgânica, classe textural, existência de vinhaça residual, uma vez que esses exercem influência sobre a CTC e capacidade de armazenamento e infiltração de água no solo, além da profundidade do lençol freático, proximidade de nascentes e intensidade de atividade vegetal na área (SILVA, 2006).

Em experimento de campo, Lyra (2002) trabalhou em uma área de 12 ha fertirrigada com vinhaça, onde foram instalados 30 poços de monitoramento a uma profundidade de 3 m. Para o potássio ficou evidenciado que os solos estudados foram eficientes na remoção, visto que seus teores no lençol freático foram significativamente menores que os da vinhaça “in natura”. Brito (2003) observou que as concentrações de potássio no solo que recebeu vinhaça obtiveram um acréscimo considerável nas diversas camadas, com a profundidade e com a dose aplicada.

Embora a bibliografia acerca dos efeitos da vinhaça no solo e nas águas subterrâneas seja ainda bastante limitada, com poucos trabalhos com vinhaça de cana-de-açúcar, é possível verificar que os resultados são bastante variáveis em razão da grande diversidade de solos e composição das vinhaças.

2.1.5 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, 1994).

Segundo Scaloppi e 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 floculados, 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.

2.1.6 Transporte do íon nitrato no solo

A maioria das plantas necessita de N em quantidades relativamente grandes quando comparado a outros nutrientes (HOCHMUTH, 1994). O nitrogênio em forma de nitrato não reage com os locais de troca do solo e não é retido pelo solo. O nitrato, por ser um ânion, não é retido em solos cuja predominância de cargas seja negativa apresentando, por isso, grande potencial de lixiviação, o que pode causar sérios problemas de poluição às águas subterrâneas, se movendo com outros sais solúveis para frente de molhamento.

Boswell et al. (1985) reporta que o nitrato é relativamente inerte, então, suscetível ao movimento através da difusão e do transporte de massa na água do solo. Isso é devido às combinações de nitrato serem prontamente solúveis em água e normalmente não são absorvidas pelas partículas de argila. O nitrato, altamente solúvel e não absorvido, será provavelmente perdido por deflúvio e/ou percolação. Perdas de N em forma de gases envolvem a desnitrificação e volatilização da amônia. A desnitrificação é o processo pelo qual são convertidos nitratos em gases de N por atividades microbianas no solo. Mas a percolação de N, é o modo dominante no qual o N é perdido no sistema solo-planta, principalmente se o solo conter quantidades significativas de nitrato.

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; REHCIGL, 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.

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).

Altas concentrações de nitrato na água são problemáticas para potabilidade, pois no corpo humano, o nitrato tem o poder de reduzir a capacidade de transporte de oxigênio do corpo. Hubbard, Leonard e Jonhson (1991) afirmam que, mesmo quando esses valores estão acima de 10 mg L^{-1} , já provocam problemas de saúde em crianças;

desta forma, é importante que se disponha de informações a respeito dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem durante a lixiviação, trocas iônicas e adsorção desses íons favorecendo a compreensão de como ocorre sua movimentação no solo.

2.1.7 Transporte do íon cálcio no solo

Para as plantas, a falta de cálcio, o aumento da acidez e o excesso de alumínio resultam em baixo crescimento do sistema radicular, com conseqüente exploração de pequenos volumes de solo, levando a baixa captação de nutrientes e água, tornando as culturas sujeitas a deficiências minerais e susceptíveis a déficits hídricos.

Ritchey et al. (1980), baixos níveis de Ca^{2+} trocável nos subsolos ácidos reduzem o crescimento radicular, que pode ser problema principalmente em períodos de déficit hídrico.

A utilização do sulfato de cálcio apresenta o inconveniente de intensificar a movimentação descendente de outros elementos, notadamente K^+ e Mg^{2+} (QUAGGIO et al., 1982; PAVAN et al., 1984), portanto a aplicação de vinhaça pode vim a solucionar esse problema.

Cambuim (1983), em experimento em colunas com amostras de Neossolo Quartzarênico e com duas doses de vinhaça, afirmou que a lixiviação de cálcio, magnésio e potássio, ocorreram quase na mesma proporção das doses aplicadas havendo, ainda, redução nos teores de micronutrientes no lixiviado quando o tempo de incubação da vinhaça no solo foi maior, ou seja, quanto maior o intervalo entre a aplicação de vinhaça e a ocorrência de chuvas, maior também será a adsorção de micronutrientes nos sítios de troca do solo.

Canellas et al. (2003) trabalhando em Cambissolo, não verificaram aumento de cálcio em profundidade.

Diante de poucos trabalhos com percolação de cálcio no solo e das divergências dos resultados encontrados, da importância do cálcio para o sistema radicular quanto para a mobilidade de outros íons, torna-se de suma importância seu estudo no perfil do solo.

2.1.8 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; 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 Van 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 (R_s), 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 R_s , utiliza o método de Marquardt (SEBER; 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.

2.1.9 Estimativa dos parâmetros de transporte a partir das curvas de distribuição de efluentes obtidas em laboratório

Na passagem através do solo de uma solução com diferentes concentrações químicas, pode-se observar com facilidade 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. Pela equação da conservação de massa, obtém-se a equação de transporte de solutos (Eq. 2):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C + \rho S) = \frac{\partial}{\partial X} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial X} - qC \right) \quad (2)$$

em que:

t - tempo, T;

θ - umidade volumétrica, L³ L⁻³;

C - concentração do soluto, M L⁻³;

ρ - densidade do solo, M L⁻³;

S - concentração adsorvida (massa de soluto por massa de solo), M M⁻¹;

X - distância, L;

D - coeficiente de dispersão hidrodinâmico longitudinal, L² T⁻¹ (BEAR, 1972); e

q - fluxo de água, L T⁻¹.

Para linearizar a adsorção e o fluxo dinâmico de água em um perfil de solo homogêneo, assume-se que θ e q são constantes no tempo e no espaço e, a partir da Eq. 2, obtém-se a Eq. 3 (VAN GENUCHTEN, 1986).

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - v \frac{\partial C}{\partial X} \quad (3)$$

em que:

v - velocidade da água no poro (q/ θ), L T⁻¹.

Sendo:

$$R = 1 + \frac{\rho k}{\theta} \quad (4)$$

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. 2 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. Butters e Bandaranayake (1993), providenciaram uma excelente discussão a respeito dessa aproximação no contexto de instruções de laboratório de solos. Os parâmetros de transporte D, R e v são baseados na otimização dos dados, mediante a minimização da soma dos quadrados dos desvios, obtidos pela equação 5. Com a utilização de vinhaça não foi encontrado nenhum dos parâmetros de transporte, sendo pioneiro este trabalho.

$$\frac{c(x,t) - c_i}{c_0 - c_i} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx - vt}{\sqrt{4DRt}}\right) + \frac{1}{2} e^{\frac{vx}{D}} \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx + vt}{\sqrt{4DRt}}\right) \quad (5)$$

2.2 Material e métodos

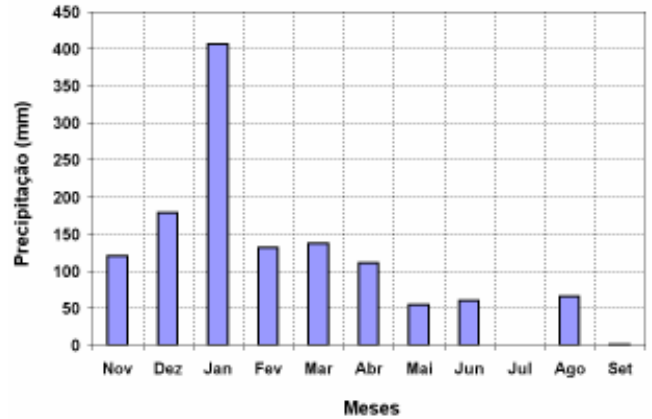
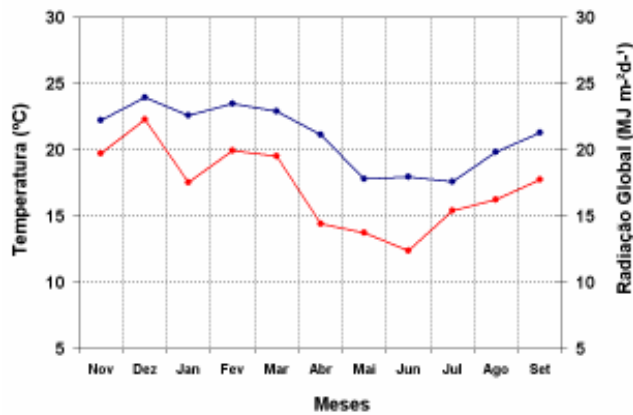
2.2.1 Localização e caracterização experimental

A pesquisa foi conduzida na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ, Universidade de São Paulo – USP, em uma casa de vegetação de 75 m² (15 m x 5 m), localizada no município de Piracicaba.

Os dados climáticos referentes ao período do experimento, de novembro de 2007 a setembro de 2008, foram obtidos na estação meteorológica do Departamento de

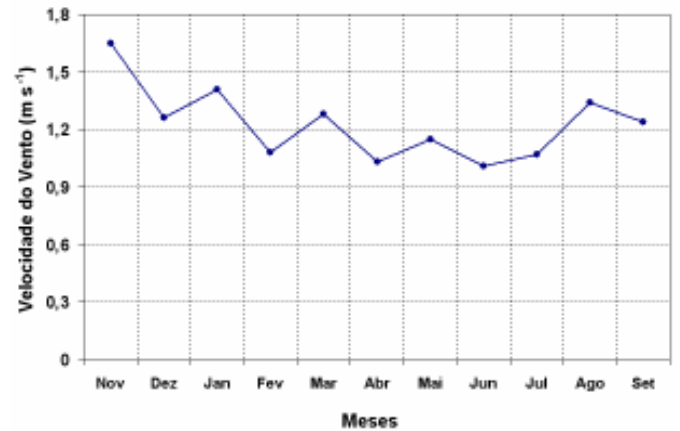
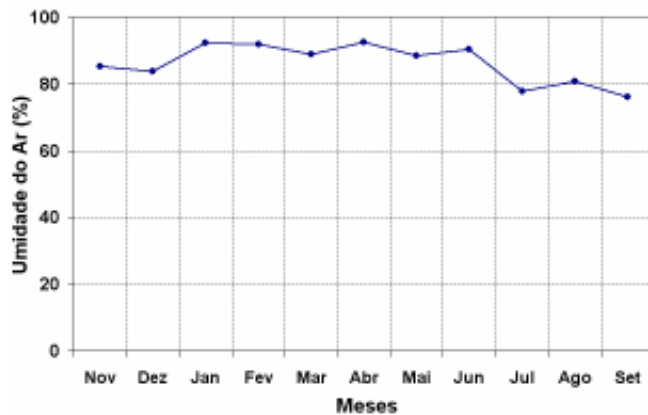
Ciências Exatas da ESALQ/USP, localizada a cerca de 500 metros de distância da área experimental.

As Figuras 1A, 1B, 1C e 1D mostram os valores médios respectivamente de temperatura do ar (T), radiação global (RG), precipitação (P), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (V).



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 1 - Valores médios mensais registrados no período da condução do experimento (novembro de 2007 a setembro de 2008) referente à: temperatura do ar e radiação global (a), precipitação (b), umidade do ar (c), velocidade do vento (d)

2.2.2 Instalação do experimento

O experimento foi conduzido em uma estufa com dimensões de 15 m de comprimento e 5 m de largura, em estrutura metálica galvanizada, altura na parte central de 4 m e pé direito de 3 m e coberto com um filme de polietileno transparente com espessura de 0,10 mm. As laterais foram mantidas abertas para melhorar a sua aeração, diminuindo o contraste da temperatura externa com a parte interna.

A estrutura era provida de energia elétrica e de água potável, oriunda do próprio sistema de abastecimento de água do campus da ESALQ/USP.

Na estufa foram distribuídas bombonas conforme o modelo estatístico adotado, blocos casualizados. Em seguida, procedeu-se a uma drenagem nas bombonas nas quais, foram feitos 5 furos com auxílio de uma broca de 8 mm de diâmetro (número 12) e adicionando uma camada de 0,07 m de pedra brita no fundo de cada uma delas, para garantir uma drenagem adequada. Para verificar/monitorar a eficiência da drenagem, as bombonas foram alocadas em cima de 2 blocos de concreto cujas dimensões eram de 0,14 m de largura, 0,19 m de altura e 0,39 m de comprimento.

No preenchimento das “bombonas”, os dois tipos de solo classificados como: Latossolo Vermelho, Fase arenosa (Solo 1) e Nitossolo (Solo 2), classificados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, EMBRAPA (1999) foram peneirados, através de uma peneira cuja malha era de 0,005 x 0,005 m para uma melhor acomodação nas bombonas e retirar o excesso de torrões.

Nesse ponto, foram coletadas amostras para o procedimento da análise granulométrica, as quais foram determinadas no Laboratório Agrotécnico de Piracicaba (PIRASOLO), para os dois tipos de solo (Tabela 2). Diante das análises granulométricas do solo, pôde-se se ter uma inferência de como será a movimentação e adsorção dos nutrientes no solo, ao longo do tempo, pois a textura argilosa ao possuir um maior teor de argila e silte, espera-se que a movimentação dos nutrientes, com carga positiva, na solução do solo fosse menor que o do solo arenoso.

Tabela 2 - Granulometria dos solos utilizados no experimento

Solo	Argila	Silte	Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina
	<0,002mm	0,053-0,002mm		2,00-0,210mm	0,210-0,053mm
	-----g/kg-----				
Arenoso	203	27	770	380	390
Argiloso	381	209	410	170	240

Para se ter uma referência da quantidade de nutrientes nos solos, procedeu-se a uma análise química completa de ambos os solos, pois a avaliação dos elementos: pH, matéria orgânica, hidrogênio e alumínio, foram importantes no sentido de explicar/influenciar na dinâmica dos íons em estudo, além de verificar se a implantação da cultura da cana-de-açúcar suportaria os nutrientes já existentes no solo, uma vez que não se poderia fazer qualquer tipo de adubação adicional, pois essa atividade influenciaria nas condições de contorno estabelecidas para a condução da referida pesquisa (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise química dos solos utilizados no experimento

Solo	-----Elementos-----												
	pH	M.O	P resina	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S.	CTC	V%	Al%	S- SO ₄
	Ca	(g/dm ³)	(mg/dm ³)						B.				
	Cl ₂			-----mmolc/dm ³ -----									
Arenoso	5.8	8	8	4.9	18	8	13	0	31	44	70	0	116
Argiloso	6.0	10	7	1.6	36	8	16	0	46	62	74	0	120

Solo	-----Micronutrientes (mg/dm ³)-----				
	Cu	Fe	Zn	Mn	B
Arenoso	0,4	18	2,4	2,0	0,12
Argiloso	0,8	6	0,5	2,6	0,15

Após o preenchimento de todas as bombonas foram feitas irrigações em todas as bombonas, para auxiliar na reestruturação/acomodação do material. Aproximadamente 2 meses após o preenchimento das bombonas foram coletadas amostras para se fazer a densidade dos solos e a curva de retenção de água no solo, com o objetivo de verificar se o solo acondicionado estaria com densidade próxima à situação real e para

o manejo da irrigação, respectivamente. A densidade média dos solos encontradas foram: solo argiloso $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ e solo arenoso $1,50 \text{ g cm}^{-3}$.

As Figuras 2A, 2B, 2C, 2D, 2E e 2F apresentam respectivamente as etapas da instalação do experimento, desde a locação das bombonas até as bombonas preenchidas com os diferentes tipos de solo.

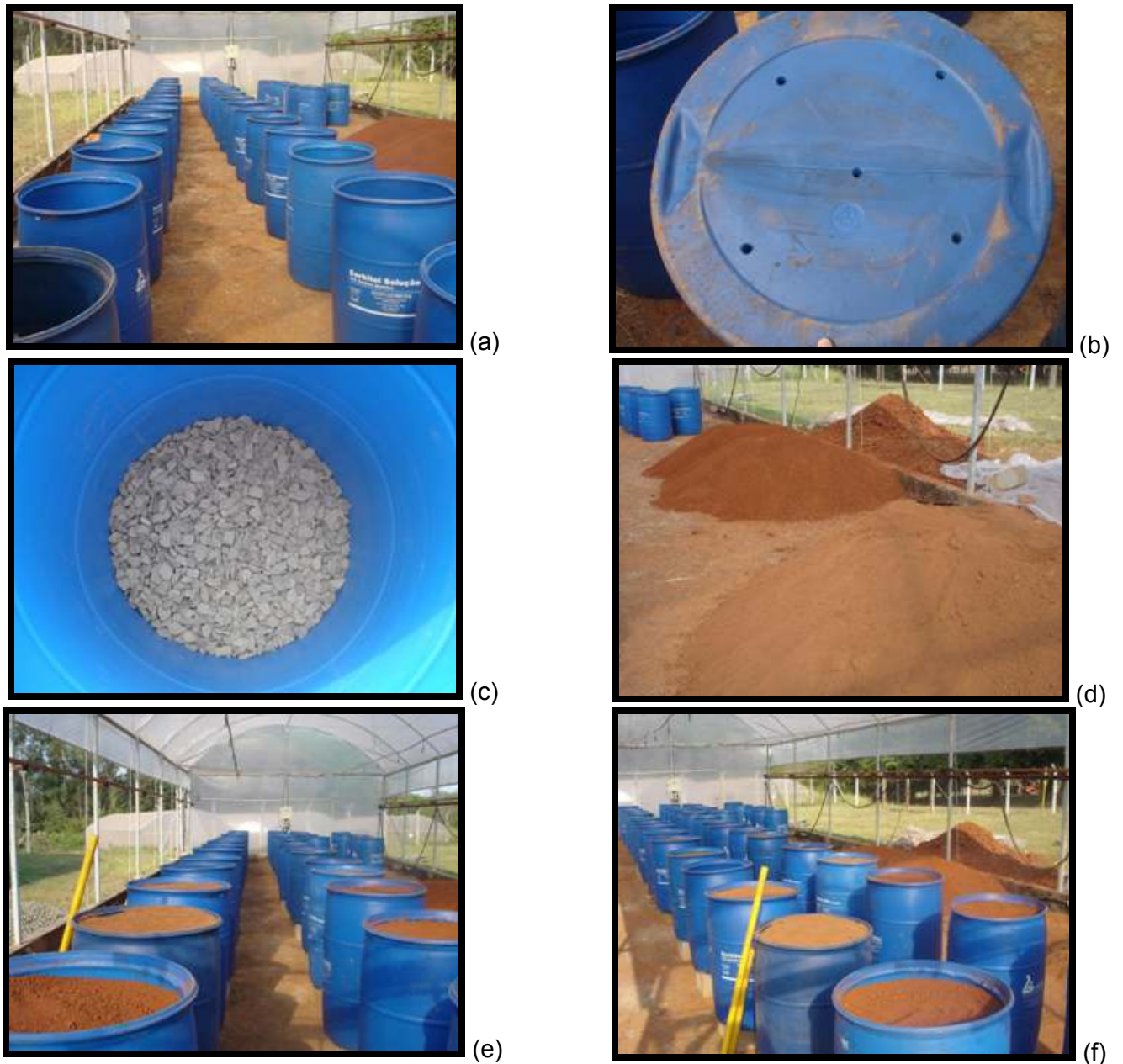


Figura 2 - Etapas da instalação do projeto: alocação das bombonas (a), furos localizados no fundo das bombonas (b), preenchimento da brita para drenagens (c), solo peneirado (d), bombonas preenchidas com os diferentes tipos de solo (e) e (f)

2.2.3 Tratamentos e delineamento experimental

A variável de estudo desta pesquisa foi a dosagem de aplicação de vinhaça ($100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (T1), $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (T2), $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (T3), $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (T4) e $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (T5)). O experimento foi conduzido no delineamento em blocos ao acaso, com 5 blocos, com arranjo dos tratamentos em fatorial 2×5 (5 tratamentos). Cada bloco experimental era composto por 10 bombonas, totalizando, portanto, 50 bombonas.

A Tabela 4 apresenta o esquema da análise de variância associado ao delineamento experimental empregado no experimento. A Figura 3 mostra o croqui do experimento com a disposição dos tratamentos.

Tabela 4 - Esquema da análise de variância

Causa da Variação (CV)	Grau de Liberdade (GL)
Blocos	4
Solos	1
Vinhaça	4
Solos x Vinhaça	4
Resíduo	36
Total	49

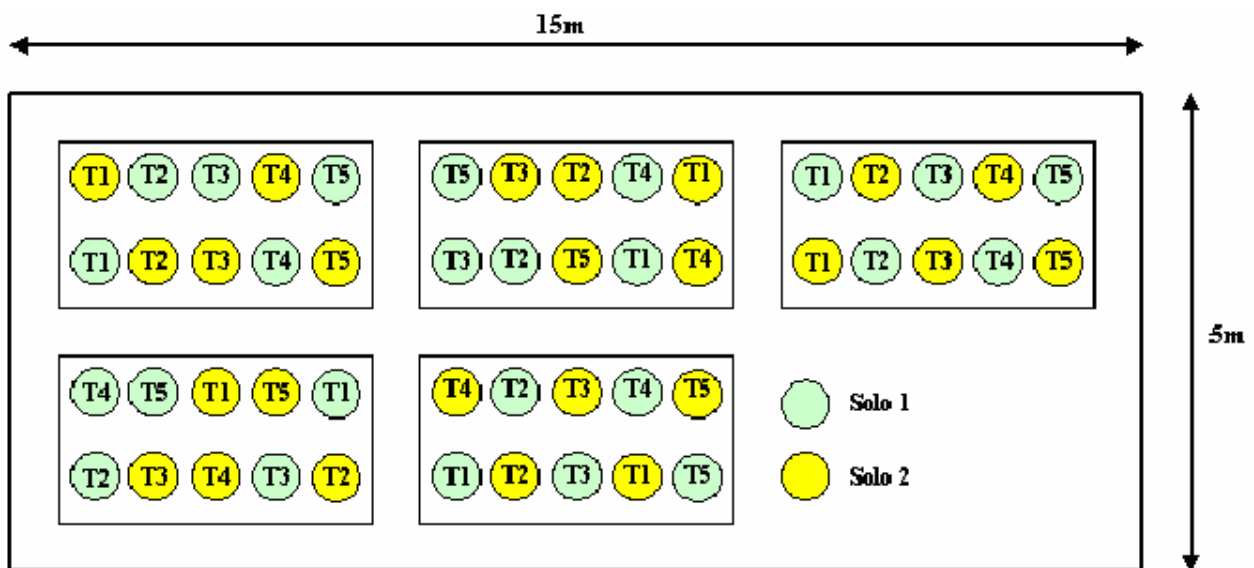


Figura 3 - Distribuição em blocos casualizados dos tratamentos no ambiente protegido nos quais foram conduzidas na fase de cana planta submetida às quantidades de aplicação de vinhaça ($T1=100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $T2=150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $T3=200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $T4=250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $T5=300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) para os diferentes tipos de solo

2.2.4 Plantio

O plantio foi realizado em bombonas com dimensões: 0,9 m de altura por 0,6 m de diâmetro. No dia 15 de novembro de 2007, dois meses após o preenchimento das bombonas, de forma a garantir a reestruturação do solo. As mudas de cana foram obtidas da Usina Furlan, localizada na região de Piracicaba/SP e a variedade escolhida foi a RB 867515 por ser atualmente a variedade mais plantada no Estado de São Paulo.

As mudas de cana foram retiradas de uma área que estava recebendo o segundo corte, pois este fato foi levado em conta, pois quanto maior o número corte da cana, menor é a capacidade de germinação.

Os rebolos (toletes) foram todos retirados da parte apical da cana, pois é a região que se encontra o maior índice de germinação. Os rebolos continha aproximadamente 0,30 m de comprimento, com 4 a 5 gemas e foram plantados a uma profundidade de 0,07 m. As Figuras 4A, 4B, 4C e 4D mostram as etapas de implantação desde a aquisição das plantas, preparo dos rebolos até o seu plantio.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4 - Preparo das mudas e etapas do plantio da cana, variedade RB 867515

2.2.5 Instalação dos tensiômetros e extratores de solução

Em janeiro de 2008, foram selecionadas aleatoriamente algumas bombonas para monitorar-se a umidade do solo, via tensiômetro digital de punção, e para o monitoramento dos íons da solução do solo foram instalados em todas as bombonas extratores de solução do solo de cápsula porosa. São equipamentos que consistem de uma cápsula de cerâmica porosa inserida na base de um tubo de PVC rígido de ½” e outro transparente de 12 mm, com sua extremidade superior hermeticamente fechada por uma borracha de vedação de silicone. Os tensiômetros e extratores foram posicionados no solo, com o uso de um trado do mesmo diâmetro para garantir o máximo contato da cápsula com o solo. As profundidades de instalação dos tensiômetros e os extratores de solução foram respectivamente: 0,2; 0,4 e 0,6 m, tomando-se como base o centro da cápsula. A instalação dos tensiômetros e extratores de solução ficou com um espaçamento entre eles de 0,1 m, realizado após 2 meses do plantio, para garantir de que não haveria necessidade de um replantio e um futuro revolvimento do solo (Figura 5).

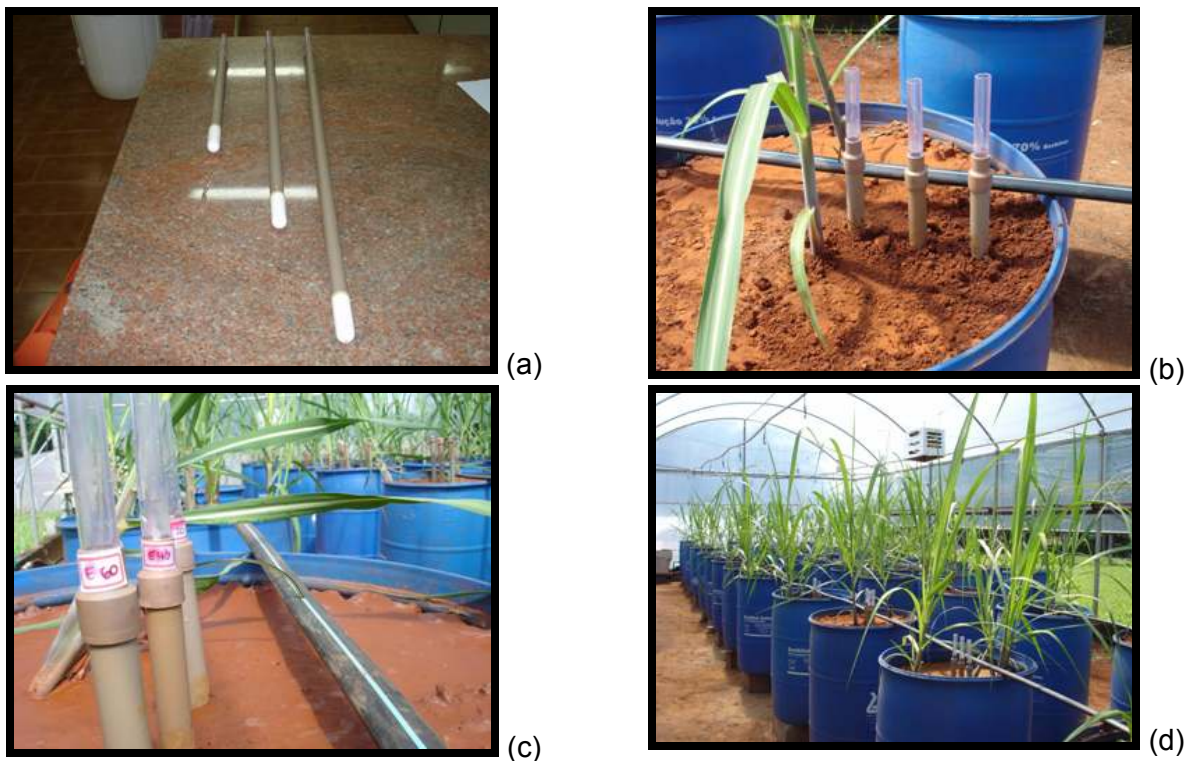


Figura 5 - Tensiômetros (a), tensiômetro instalado (b), extratores de solução (c) e vista total da estufa com os tensiômetros e extratores instalados (d)

2.2.6 Sistema e manejo da irrigação

O sistema de irrigação utilizado no experimento foi a irrigação localizada, via microtubo spaghetti, composto de 4 linhas de derivação de polietileno de 16 mm de diâmetro nominal. Os microtubos foram escolhidos conforme o tipo de solo: solo argiloso vazão de 4 L h^{-1} e para o solo arenoso vazão de 5 L h^{-1} operados à pressão de serviço de 100 kPa. A vazão do microtubo varia em função do seu diâmetro interno, pressão de serviço e do seu comprimento. Para garantir uma boa uniformidade da irrigação instalou-se em cada bombona dois microtubos, no solo argiloso foi utilizado um microtubo de 0,6 mm de diâmetro interno e com um comprimento de 0,2 m e o solo arenoso um microtubo de 0,8 mm de diâmetro interno e 0,25 m de comprimento. A sucção e a distribuição de água às plantas foram feitas por uma bomba hidráulica centrífuga, de 0,5 cv de potência, instalada no interior da estufa. Após a bomba, instalou-se um filtro de disco para conter as substâncias indesejáveis ao sistema. Para monitorar a pressão de operação do sistema foi instalado no final da linha um ponto para medir a pressão, também foi instalado um “timer” para parcelar a irrigação, com o objetivo de melhorar a distribuição da água no solo (Figura 6).



Figura 6 - Sistema de irrigação (a) e painel de controle (b)

O manejo da irrigação foi feito com base em dados da umidade do solo, obtidos pela utilização dos tensiômetros e da curvas de retenção de água no solo, confeccionadas em laboratório, antes do início do ciclo da cultura.

Para obtenção da curva de retenção da água no solo, foram utilizadas as mesas de tensão de 0, 10, 20 e 40 cm de coluna d'água, e a câmara de Richards para as tensões de 100, 330, 500, 1.000, 5.000, 10.000 e 15.000 cm de coluna d'água. Os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (Tabela 5), que descrevem as curvas de retenção de água no solo, foram obtidos a partir do software RETC, desenvolvido pelo US Salinity Laboratory – USDA (VAN GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991).

Tabela 5 - Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r) e parâmetros (α , m e n) do modelo de Van Genuchten (1980) para os solos utilizados no experimento, Piracicaba, SP, 2007

Solo	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	m	n
Argiloso	0,5602	0,2135	0,0612	0,3649	1,5746
Arenoso	0,4233	0,0749	0,0348	0,4548	1,8342

A irrigação foi realizada somente nos dias de aplicação da vinhaça no solo, para garantir que o solo encontra-se na capacidade de campo, e o volume de água aplicado foi partir da média das leituras tensiométricas a 0,4 m de profundidade, observadas em ambos tipos de solo. Este manejo foi adotado devido o delineamento estatístico que não permitiu uma aplicação da água para cada tratamento isoladamente.

2.2.7 Aquisição e aplicação da vinhaça

A vinhaça foi coletada na Usina Costa Pinto do grupo COSAN no município de Piracicaba/SP. No início do experimento visando que a safra de cana seria finalizada e que conseqüentemente acabaria a produção de vinhaça, decidiu-se por coletar um volume maior e armazenar em uma “bombona” de 200 litros (hermeticamente fechada).

Com o início da nova safra, a vinhaça foi coletada na mesma unidade e da mesma maneira que no início do experimento, sendo monitorada quinzenalmente seus aspectos químicos.

Fez-se uma análise química completa da vinhaça no início do experimento para uma avaliação prévia de seus componentes químicos, feito pelo Laboratório Agrotécnico de Piracicaba (PIRASOLO) (Tabela 6).

Tabela 6 - Análise química da vinhaça

-----Elementos-----											
N	P	K	Ca	Mg	S	C	Na	Cu	Fe	Zn	Mn
-----g/L-----						-----mg/L-----					
0,35	0,06	1,91	0,97	0,20	0,47	5,20	122,0	0,40	17,00	0,70	6,00

A dosagem de vinhaça aplicada foi calculada com base na área superficial de cada bombona: $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, sendo cada volume parcelado em 15 aplicações. Toda vez em que se aplicava a vinhaça, uma amostra era retirada e submetida à uma análise química para verificar o acompanhamento das concentrações dos nutrientes em estudo.

A primeira aplicação da vinhaça foi realizada no dia 18 de fevereiro de 2008, 1 mês da instalação dos extratores de solução do solo para garantir uma reestruturação do solo e um melhor contato cápsula/solo. Um dia antes da aplicação da vinhaça procedeu-se uma irrigação, com o objetivo de elevar a umidade do solo para a capacidade de campo, pois nesta condição que oferece a melhor movimentação dos nutrientes na solução do solo.

A aplicação da vinhaça foi realizada manualmente e quinzenalmente.

2.2.8 Monitoramento da dinâmica dos solutos

Os elementos analisados foram: nitrato e potássio, mas também foram avaliados, o pH, condutividade elétrica e cálcio. O pH ajuda a explicar a movimentação dos íons no solo, a condutividade elétrica afirmaria a quantidade de elementos no solo e o cálcio por ser o segundo elemento mais abundante na vinhaça e também pelo fato que ele ajuda a aumentar o pH do solo.

A solução do solo foi obtida quinzenalmente, ao longo do ciclo da cana planta, utilizando-se extratores com cápsulas porosas de cerâmica em sua extremidade inferior e borrachas especiais com vedação de silicone na extremidade superior. Para extrair a solução do solo, criou-se vácuo na câmara interno do extrator, de aproximadamente 80 kPa, depois de 24 horas após a aplicação dos tratamentos, por meio de uma bomba de vácuo. Nesse momento, verificou-se a umidade do solo por meio de tensiômetros (a qual foi útil para manter a umidade ótima para a cana-de-açúcar, mediante aplicações de lâmina de irrigação). As soluções do solo foram retiradas das câmaras dos

extratores, 24 horas após a aplicação do vácuo, tempo necessário para que atingisse um equilíbrio do solo com a cápsula do extrator de solução, a solução foi removida com a utilização de uma seringa e depositada em recipiente plástico, sendo devidamente identificada. A umidade foi determinada nas profundidades desejadas com a finalidade de se manter a mesma umidade do solo nos diferentes tratamentos.

Os íons nitrato, potássio e o cálcio das amostras de solução do solo foram determinados, em laboratório por medidores de íons específicos, que são pequenas cartelas eletrônicas digitais (Horiba). O pH e a CE das amostras foram determinadas por um medidor de pH e um condutivímetro de mesa (Digimed), respectivamente.

2.2.9 Elaboração das curvas de distribuição de efluentes

As curvas de eluição foram confeccionadas para a determinação dos parâmetros de transporte mediante as determinações, por meio de equipamentos/métodos, das concentrações dos seguintes elementos químicos: nitrato (FIA – Flow Injection Analysis) e potássio (Fotômetro de chama). Realizou-se previamente a análise química dos componentes químicos da vinhaça coletada, sendo obtidas as concentrações relativas para cada componente químico analisado. Montou-se junto ao Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Rural, colunas de PVC, preenchidas com diferentes tipos de solo, com as dimensões de 20 cm de altura e 5 cm de diâmetro, através da qual passou-se vinhaça.

A coluna de PVC utilizada para a coleta dos efluentes apresentava um volume de 392,7 cm³. 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 1 cm, na parte superior da coluna, montou-se um esquema experimental em laboratório, pelo qual foi instalado um dreno que retirava todo o excesso.

Para o início do teste foi necessário primeiramente saturar a coluna com água destilada, processo esse realizado de forma lenta, no qual a coluna foi colocada inclinada dentro de um recipiente e por gotejamento adicionou-se água até a uma altura aproximada de 2/3 da coluna. 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 através da coluna de solo (também por volta de 24

h), para que fosse possível a lavagem dos nutrientes eventualmente presente na solução do solo fosse retirada.

As Figuras 7A, 7B, 7C, e 7D representam respectivamente a saturação do solo, lavagem da coluna com água destilada, detalhe da vazão e início do teste com vinhaça.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7 - Preparação da coluna de PVC e início do teste da curva de distribuição de efluentes

Atingindo-se a densidade de fluxo constante, efetuava-se a troca da água destilada pela vinhaça. A coleta manual dos frascos de acrílicos, dos volumes de solução que atravessavam a coluna de solo, representavam, individualmente, 10 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 (Figura 8).



Figura 8 - Detalhes da coleta para elaboração da curva de distribuição de efluentes

Dessa forma, cada frasco representou aproximadamente 0,05 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. 6).

$$VP = \alpha V \quad (6)$$

em que:

VP - volume de poros; L^3 ;

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

V - volume de solo na coluna, L^3 .

O volume coletado foi controlado por uma balança eletrônica com precisão de 0,1 g. Ao atingir, aproximadamente, 10 g de solução de vinhaça, corrigido pela respectiva densidade, trocava-se o frasco.

2.2.10 Análise química dos efluentes

O comportamento da curva foi monitorado por um equipamento de teste rápido (Horiba), mostrando o final do teste, quando se atingia o valor da concentração inicial, de 17000 mg L^{-1} para Potássio (K^+) e de 610 mg L^{-1} para o Nitrato (NO_3^-), pela vinhaça, no efluente. As amostras foram submetidas às análises de laboratório. 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 9).



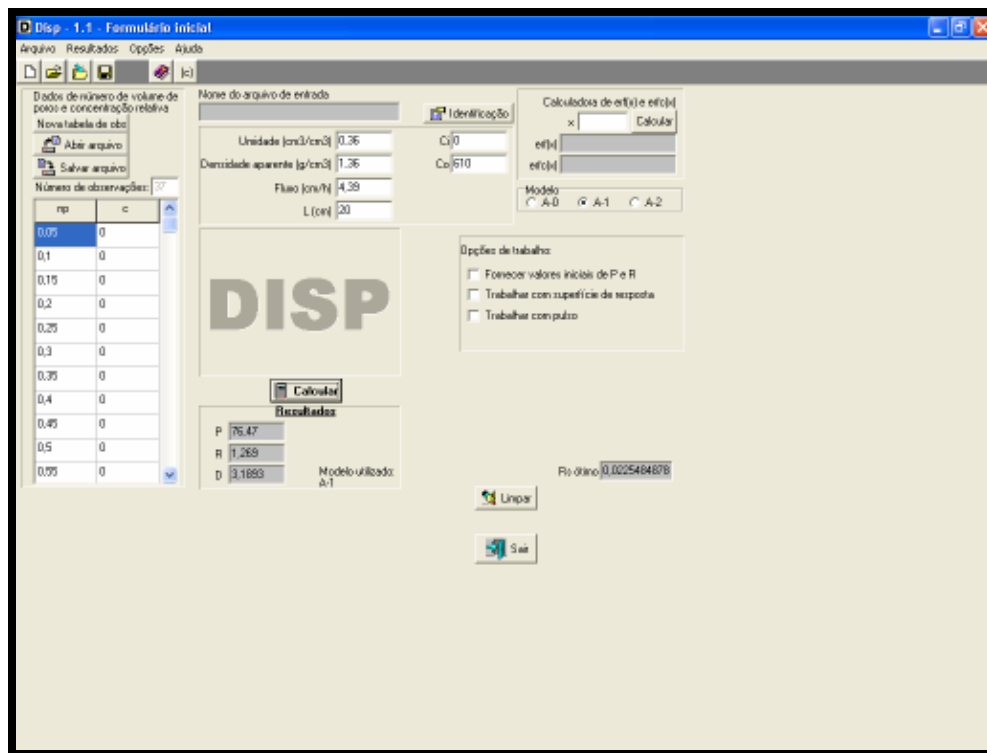
(a)



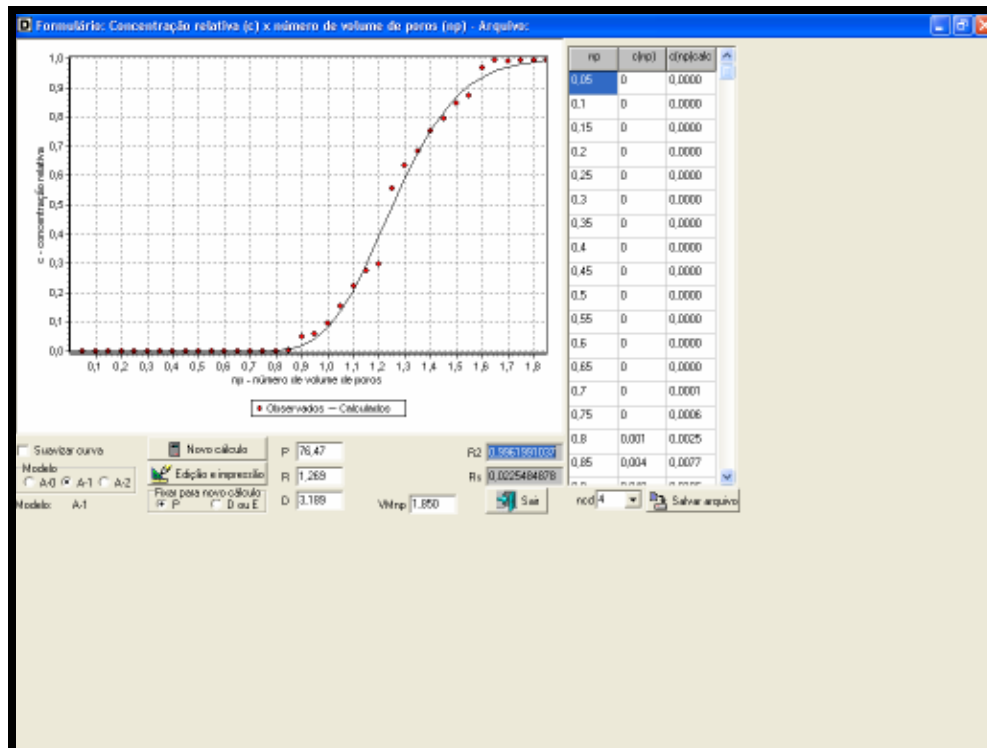
(b)

Figura 9 - Aparelhos utilizados para análises químicas, fotômetro de chama (a) e FIA – Flow Injection Analysis (b)

Utilizou-se o programa computacional “DISP”, para fazer o ajuste das curvas de distribuição de efluentes (BORGES JÚNIOR e FERREIRA, 2002), desenvolvido em linguagem de programação Delphi 3, utilizando-se o método dos mínimos quadrados para obtenção 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 (c_e) 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 (c_e) em função do número de volume de poros (VP); representação gráfica entre a concentração relativa e o volume de poros (observado e estimado); estimados os parâmetros P, R e D; soma de quadrado de resíduos (R_s) e o coeficiente de determinação (R^2) (Figura 10).



(a)



(b)

Figura 10 - Tela inicial do programa computacional “DISP” (a) e tela com os resultados processados pelo programa DISP (b)(BORGES JÚNIOR e FERREIRA, 2002)

2.2.11 Análise estatística dos dados

Para a análise estatística do projeto utilizou-se o programa “SISVAR” versão 5.0 de 2007 (FERREIRA, 2000) onde foram interpretados os dados de cada experimento (tipo de solo, tratamento e profundidade), individualmente, a partir das análises de variância, utilizando-se o teste F e respeitando-se o delineamento experimental adotado. Por se tratar, neste experimento, da investigação do comportamento dos elementos químicos da vinhaça no solo, realizou-se a comparação entre as médias, utilizando o teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Distribuição do íon nitrato no solo

As concentrações do íon nitrato (NO_3^-), em mg L^{-1} , foram observadas nas soluções extraídas pelos extratores de solução do solo, instalados em diferentes profundidades, nos diferentes solos, para cada tratamento e em cada período de observação (90, 105, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255, 270, 285 e 300 dias após plantio (DAP)), denominados de “leituras” e numeradas no gráfico de 1 a 15 respectivamente e foram plotados pelo programa “Surfer” versão 7, de maneira a se observar a sua distribuição no solo (Figuras 11 e 12).

As concentrações do íon nitrato apresentaram variações no solo, encontrando-se valores pontuais entre 3,6 a 119 mg L^{-1} , em condições de solo arenoso, e entre 1 e 70 mg L^{-1} , em condições de solo argiloso, estando as concentrações mais altas em torno de 10 a 15% do nitrato adicionado pela vinhaça. As concentrações de nitrato encontradas no solo arenoso foram maiores do que aquelas encontradas para o solo argiloso, uma vez que o nitrato ser um ânion e não ficar retido em solos com predominância de cargas negativas. Para o solo arenoso, o comportamento do íon nitrato foi semelhante em todos os tratamentos ($P \geq 0,05$), ficando a partir da quinta leitura a concentração em torno de 34 a 51 mg L^{-1} para as 3 profundidades avaliadas (Figura 11).

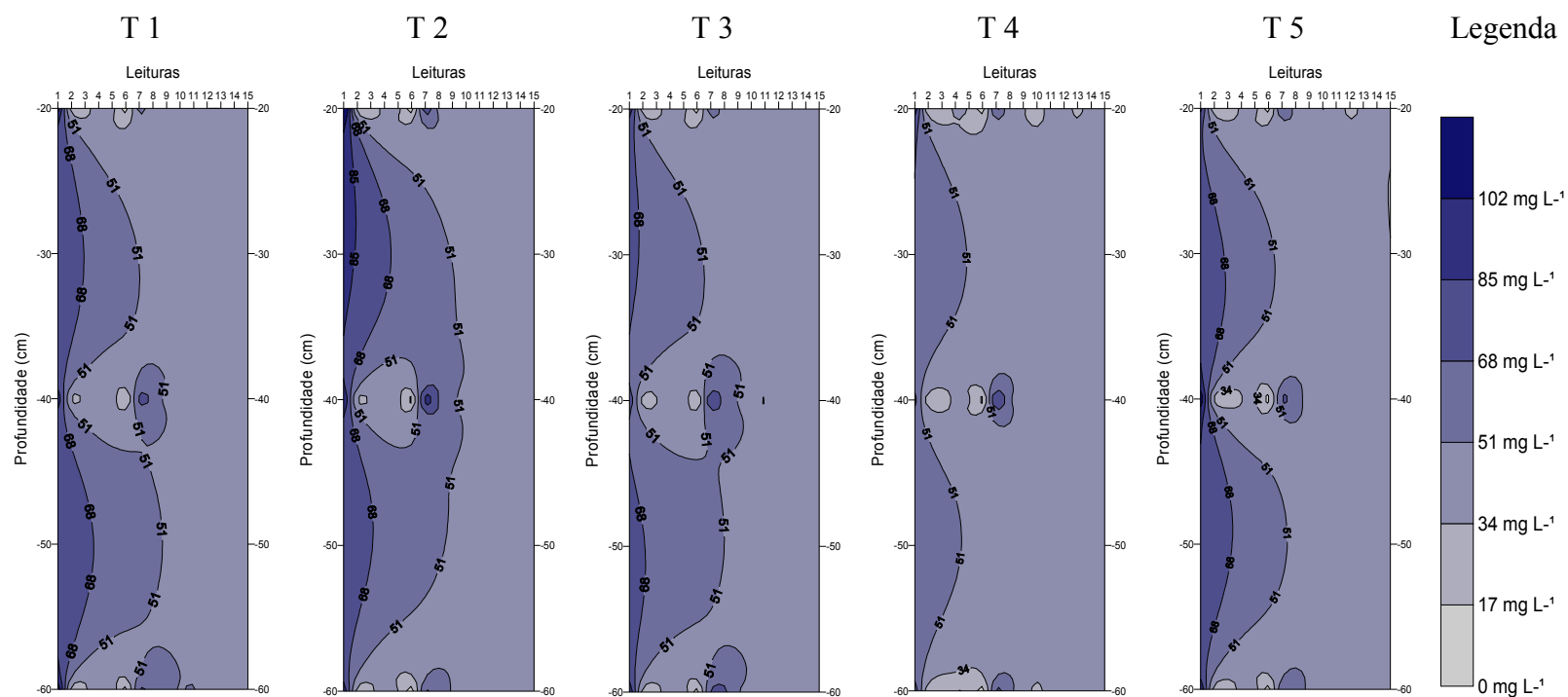


Figura 11 - Distribuição espacial do íon nitrato, solo arenoso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m, Piracicaba, SP, 2008

Também, pela Figura 11, observou-se em condições de solo arenoso uma alta concentração de nitrato, já nas primeiras leituras em todos os tratamentos e em todas as profundidades. Isso pode ser explicado pelo fato da concentração já existente no solo, adição da vinhaça e a irrigação ocasionarem uma lavagem do nitrato encontrando-se maiores concentrações nas camadas mais profundas, sendo também que nesta fase o sistema radicular da planta ainda não está bem desenvolvido e encontrava-se em fase de início do inverno onde a planta minimiza o seu desenvolvimento, favorecendo a lixiviação do nutriente. A partir da sexta leitura pôde-se observar um decréscimo na concentração em todos os tratamentos, devido ao alto consumo exigido pela planta para seu desenvolvimento, encontrando-se com 165 dias após o plantio obedecendo ao crescimento radicular que provavelmente estava em torno de 40 centímetros.

Em condições de solo argiloso (Figura 12), pôde-se observar que mesmo nas primeiras leituras e em todas as profundidades não foram encontrados valores altos de concentração de nitrato. Segundo Suhet et al. (1985), trabalhando em um latossolo vermelho escuro virgem de cerrado, em duas épocas de amostragem, observaram que, na época mais úmida, foi possível encontrar considerável ocorrência de nitrato próximo à superfície do solo. Segundo os autores, existe uma tendência para o acúmulo de nitrato em períodos úmidos e para sua redução em períodos secos. Então, deduz-se que o nitrato no solo argiloso pode ter ficado na camada de 0 – 20 cm.

Diante dos resultados obtidos da distribuição do íon nitrato no solo, apresentado pelas Figuras 11 e 12, torna-se difícil qualquer comentário quanto ao melhor desempenho entre os tratamentos ou entre os diferentes tipos de solo. Isso ocorreu, provavelmente, devido à grande dificuldade na avaliação da disponibilidade desse elemento pela sua dinâmica no solo e conforme Rajj (1991), às rápidas mudanças que este íon está sujeito no solo. Segundo este autor, as formas minerais de N no solo são muito instáveis, podendo haver tanto a mineralização da matéria orgânica, durante o ciclo da cultura, alterando as quantidades de N-mineral existentes no início, ou mesmo a redução de N-mineral, por desnitrificação ou por imobilização causadas pela microflora. Outro aspecto que não se pode desconsiderar, devido à dinâmica deste íon, é a grande dificuldade nas leituras das amostras, que no processo de extração da

solução tem que esperar o tempo necessário para a extração ficando com um intervalo de aplicação e leitura de quatro dias.

Pela análise estatística apresentada pela Tabela 7, pôde-se observar que apesar dos perfis de distribuição apresentarem uma certa diferença entre os tratamentos, quando comparados para o mesmo solo, não houve diferença significativa entre os tratamentos nas diferentes profundidades. Quando analisou-se a interação tratamento x profundidade x solo, foram encontradas diferenças significativas para os tratamentos 1 na profundidade de 60 cm, no tratamento 2 em todas as profundidades e no tratamento 3 nas profundidades de 40 e 60cm, o que causou uma certa surpresa que entre os tratamento 1 ($100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e os tratamentos 4 e 5 (250 e $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) não ocorreu diferença significativa nas diferentes profundidades.

Tabela 7 - Valores médios do Nitrato em função da profundidade, tratamento e tipo de solo - Piracicaba, SP, 2008¹

Tratamento	Profundidade (cm)	Tipo de Solo	
		Arenoso	Argiloso
1	20	41,30 Aa	31,37 Aa
	40	47,56 Aa	33,50 Aa
	60	49,38 Aa	33,46 Ab
2	20	46,02 Aa	30,91 Ab
	40	49,92 Aa	32,76 Ab
	60	45,92 Aa	30,02 Ab
3	20	42,25 Aa	30,20 Aa
	40	46,98 Aa	30,79 Ab
	60	48,31 Aa	30,10 Ab
4	20	38,61 Aa	29,89 Aa
	40	41,48 Aa	30,88 Aa
	60	41,97 Aa	30,19 Aa
5	20	39,33 Aa	31,67 Aa
	40	44,21 Aa	30,87 Aa
	60	44,70 Aa	31,64 Aa

¹ Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05)

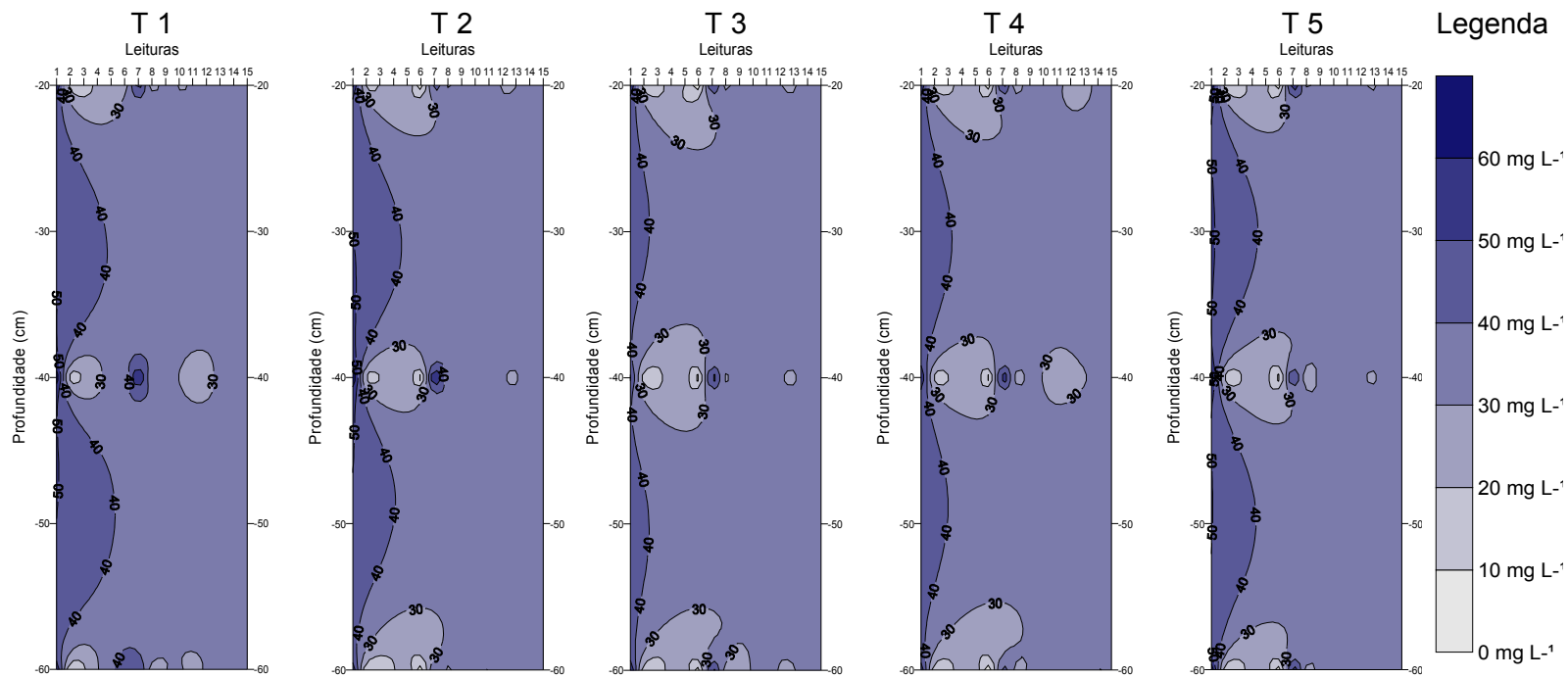


Figura 12 - Distribuição espacial do íon nitrato, solo argiloso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008

2.3.2 Distribuição do íon potássio no solo

Foram observados valores das concentrações do íon potássio (K^+), em $mg L^{-1}$, nas soluções extraídas pelos extratores de solução do solo, instalados em diferentes profundidades, nos diferentes solos, para cada tratamento e em cada período de observação (90, 105, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255, 270, 285 e 300 DAP) denominados leituras e numeradas no gráfico de 1 a 15 respectivamente e foram plotados pelo programa “Surfer” versão 7 (2001), de forma a facilitar a observação da sua distribuição nos diferentes tipos de solo, conforme as Figuras 13 e 14.

Pela Figura 13, pôde-se observar que as concentrações do íon potássio apresentaram variações no solo, encontrando-se valores pontuais entre 4,4 a 171,2 $mg L^{-1}$, para o solo arenoso ($P \geq 0,05$) e entre 0 a 30 $mg L^{-1}$, para o solo argiloso ($P \geq 0,05$). As concentrações de potássio encontradas para o solo arenoso apresentaram uma concentração maior do que aquela encontrada no solo argiloso ($P < 0,05$), nas 3 profundidades. Observou que no solo arenoso até a quinta leitura houve um carreamento do potássio para a profundidade de 60 cm o que já era esperado pelo fato que o solo arenoso possui uma baixa adsorção, pois apresenta uma baixa capacidade de troca catiônica. Após a quinta leitura a distribuição do potássio pelo perfil de solo foi homogênea caracterizando o crescimento do sistema radicular da planta e sua necessidade nutriente. Nas condições do solo arenoso, o comportamento do íon potássio foi semelhante em todos os tratamentos, profundidades e ao longo do tempo. Um fato a ser levantado é que encontrou-se no tratamento 3, na camada de 0 a 20 cm, concentrações de potássio até à décima terceira leitura por faixa de 25 a 50 $mg L^{-1}$ e nas profundidades 40 a 60 cm, apresentou um comportamento semelhante aos obtidos pelos tratamentos 1, 2, 4 e 5. O tratamento 5 nas profundidades de 20 e 40 cm entre as leituras de 6 a 12 leituras observou-se uma “mancha” com baixas concentrações variando de 0 a 25 $mg L^{-1}$, isto pode ter ocorrido pela alta necessidade de potássio pela planta, e na profundidade de 60 cm o comportamento foi semelhante aos demais tratamentos. Pela Figura 14, pôde-se notar que no solo argiloso, em todas as profundidades, tratamentos e ao longo do tempo, a concentração ficou em torno de 0 a 5 $mg L^{-1}$ em todas as leituras.

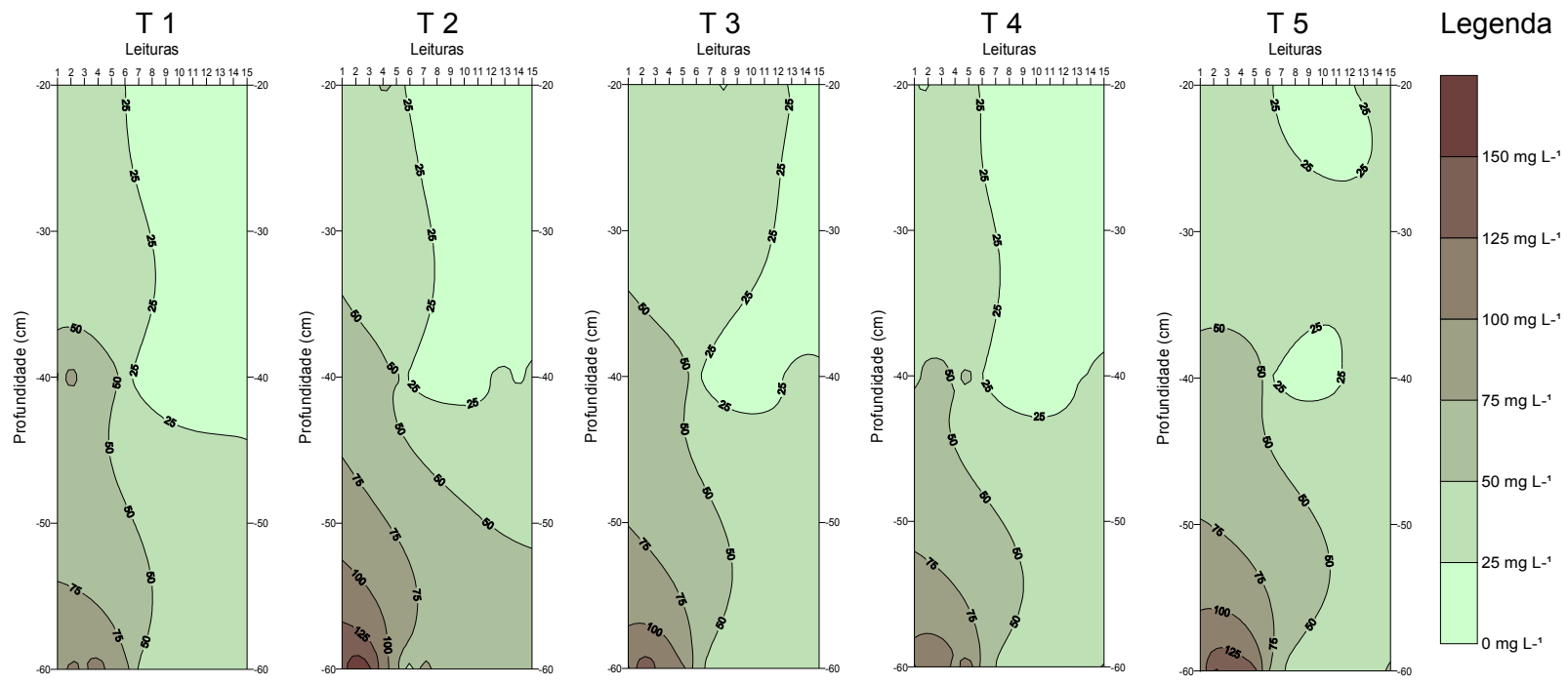


Figura 13 - Distribuição espacial do íon potássio, solo arenoso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008

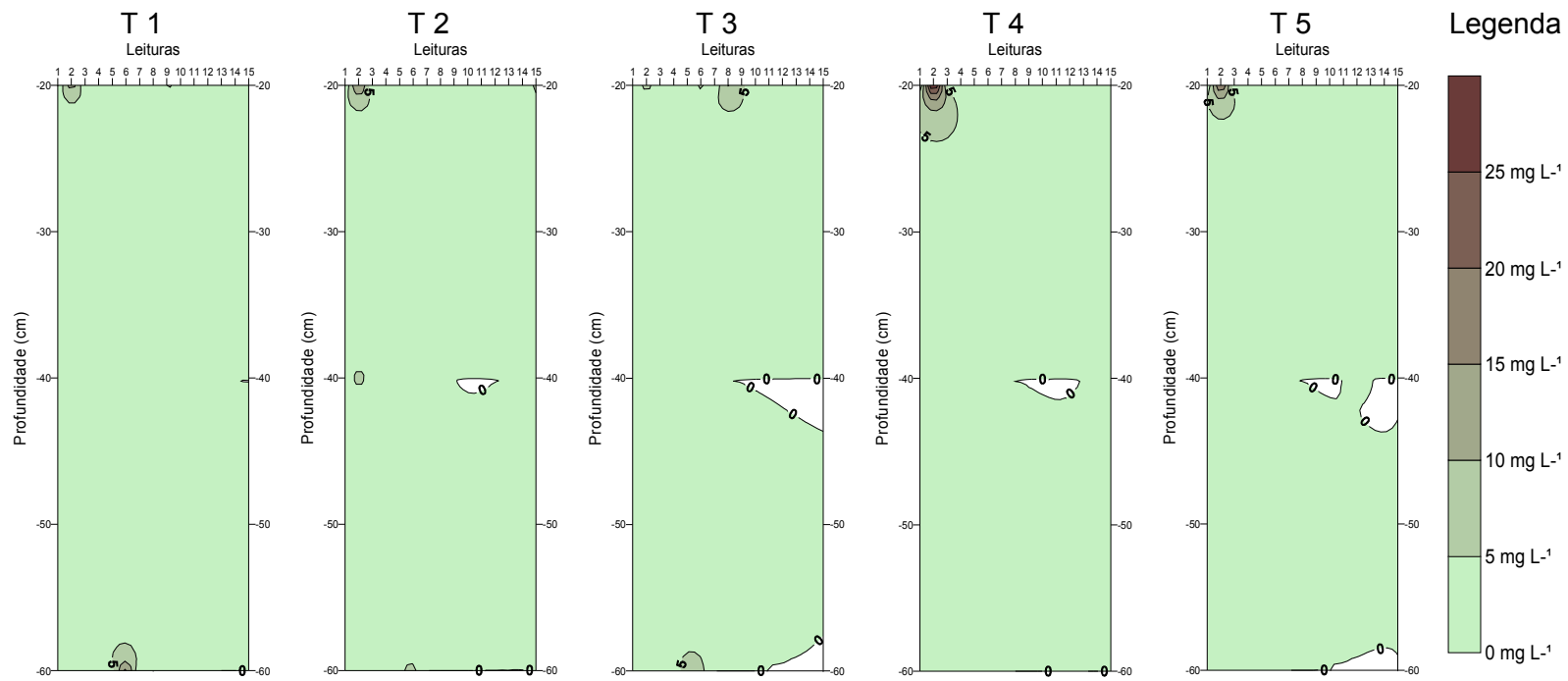


Figura 14 - Distribuição espacial do íon potássio, solo argiloso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008

Tal situação pode ser explicada pelo fato de que o potássio, por se tratar de um cátion, fica adsorvido em solos com alta capacidade de troca catiônica, diferenciando de Brito (2003) que obteve um acréscimo considerável nas diversas camadas, com a profundidade e com a dose aplicada. Canellas (2003) trabalhando em Cambissolo, não verificou aumento de potássio em profundidade.

Embora a bibliografia acerca dos efeitos da vinhaça no solo e nas águas subterrâneas seja ainda bastante limitada, com poucos trabalhos com vinhaça de cana-de-açúcar, é possível verificar que os resultados são bastante variáveis em razão da grande diversidade de solos, densidade do solo, variação das concentrações dos nutrientes ao longo do período da safra de cana e dos diferentes tipos de vinhaça. Pela Tabela 8 pode-se observar que apesar dos perfis de distribuição da concentração do íon potássio apresentarem ligeira diferença entre os tratamentos para o solo arenoso, não houve diferença significativa entre os tratamentos nas diferentes profundidades quando comparados isoladamente para ambos os solos. Ao analisar a interação tratamento, profundidade e solo encontraram-se diferenças significativas em todos os tratamentos e nas diferentes profundidades.

Tabela 8 – Valores médios de Potássio em função da profundidade, tratamento e tipo de solo - Piracicaba, SP, 2008¹

Tratamento	Profundidade (cm)	Tipo de Solo	
		Arenoso	Argiloso
1	20	21,07 Aa	2,41 Ab
	40	34,16 Aa	1,14 Ab
	60	58,89 Aa	1,51 Ab
2	20	20,94 Aa	2,84 Ab
	40	34,36 Aa	1,03 Ab
	60	85,94 Aa	1,03 Ab
3	20	32,08 Aa	2,81 Ab
	40	35,16 Aa	0,45 Ab
	60	66,25 Aa	1,34 Ab
4	20	21,75 Aa	3,60 Ab
	40	30,83 Aa	0,60 Ab
	60	67,81 Aa	1,06 Ab
5	20	26,90 Aa	3,03 Ab
	40	38,47 Aa	0,57 Ab
	60	75,49 Aa	0,78 Ab

¹ Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05).

2.3.3 Distribuição do íon cálcio no solo

As concentrações do íon cálcio (Ca^{2+}), expressas em mg L^{-1} , foram observadas mediante as soluções extraídas pelos extratores de solução do solo, instalados em diferentes profundidades, nos diferentes solos, para cada tratamento e em cada período de observação (90, 105, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255, 270, 285 e 300 DAP) denominados leituras e numeradas no gráfico de 1 a 15 respectivamente, foram plotados pelo programa “Surfer” versão 7 (2001), de maneira a se observar a sua distribuição no perfil de solo, conforme Figuras 15 e 16.

As concentrações de cálcio apresentaram variações no solo, sendo encontrados valores pontuais entre 1,98 a 64,45 mg L^{-1} , no solo arenoso, e entre 2,6 a 86,5 mg L^{-1} , para o solo argiloso. As concentrações de cálcio encontradas no solo arenoso apresentaram uma concentração menor do que aquelas encontradas no solo argiloso (Figura 15).

Esperava-se o cálcio em profundidade, em ambos os solos, devido ao fato de que a sua concentração, relacionada com o potássio, ser bastante baixa, o que facilitaria o seu deslocamento para a solução do solo. No solo arenoso o comportamento do cálcio foi semelhante ao do íon potássio, em todos os tratamentos, pois é um nutriente junto com o nitrogênio muito exigido pela planta, pois participa do desenvolvimento celular. O cálcio apresentou-se uma uniformidade semelhante ($P \geq 0,05$) em todos os tratamentos e nas primeiras leituras, tendo uma concentração maior na profundidade de 60 cm, posteriormente o tratamento 2 apresentou-se uma concentração superior sempre na profundidade de 60 cm, o tratamento 5 permaneceu uniforme com sua distribuição, enquanto isso os demais tratamentos (1, 3 e 4) apresentaram maiores concentrações nas primeiras camadas, mas nada significativo.

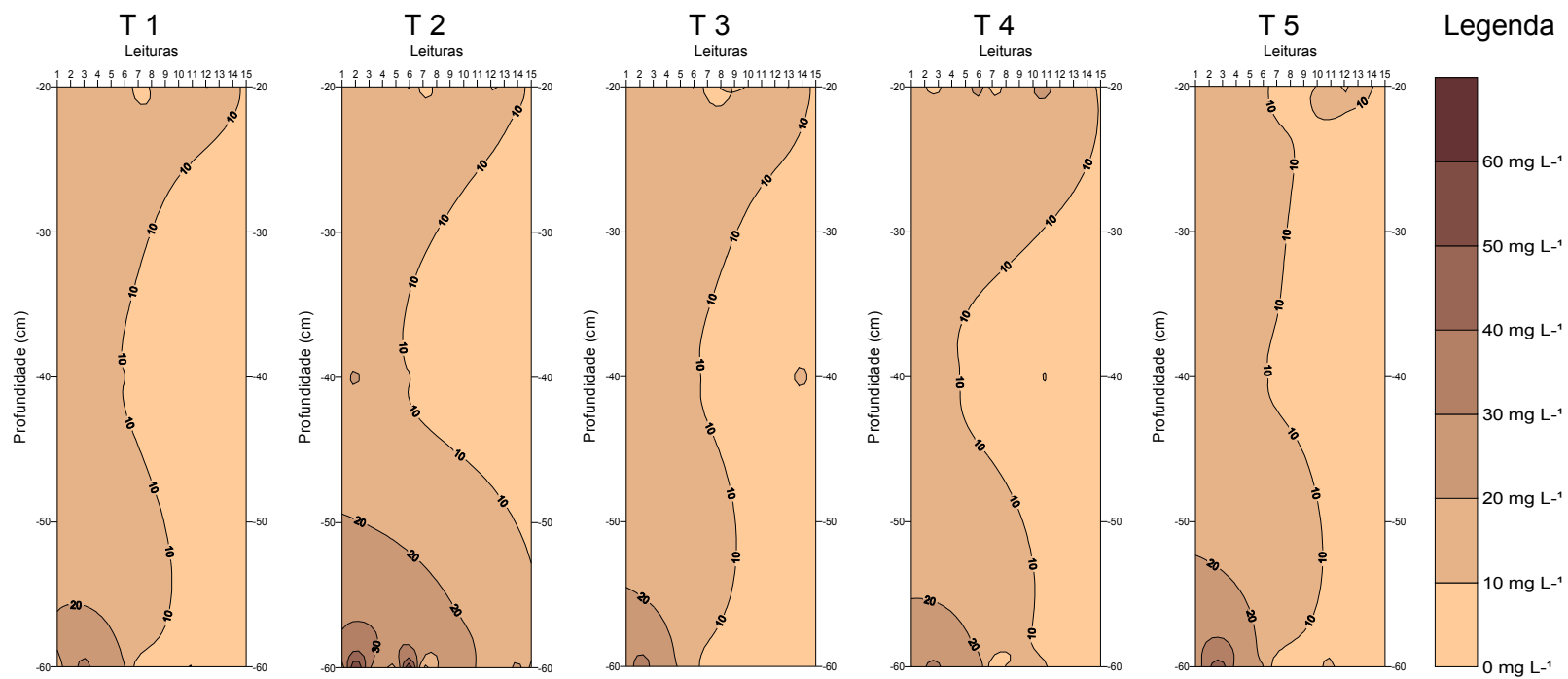


Figura 15 - Distribuição espacial do íon cálcio, solo arenoso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008

Pela Figura 16, pôde-se observar que em condições de solo argiloso, em todas as profundidades e tratamentos, a concentração ficou em torno de 2,6 a 86,5 mg L⁻¹, sendo sua movimentação bastante homogênea, devido a adsorção pelos sítios da argila. Sua variação não passou de 0 a 30 mg L⁻¹ no solo argiloso. Observou-se que quanto maior o volume de vinhaça aplicado maior foi sua concentração no perfil.

Pela Tabela 9, pode-se comprovar os perfis de distribuição, pois ambos não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos para o solo arenoso (P≥0,05) já para o solo argiloso apresentou diferença significativa (P<0,05) entre os tratamentos nas diferentes profundidades quando comparados isoladamente. Quando se verificou a interação tratamento x profundidade x solo, foram encontradas diferenças significativas, principalmente na profundidade de 60 cm nos tratamentos 2, 3 e 4 e no tratamento 5 em todas as profundidades.

Tabela 9 - Valores médios de Cálcio em função da profundidade, tratamento e tipo de solo - Piracicaba, SP, 2008¹

Tratamento	Profundidade (cm)	Tipo de Solo	
		Arenoso	Argiloso
1	20	11,83 Aa	17,13 Aa
	40	8,69 Aa	13,83 Aa
	60	14,10 Aa	16,99 Aa
2	20	13,19 Aa	21,17 Bb
	40	9,05 Aa	15,14 Ba
	60	25,31 Aa	35,99 Bb
3	20	12,11 Aa	18,00 Ba
	40	9,92 Aa	13,17 Ba
	60	13,56 Aa	37,25 Bb
4	20	14,87 Aa	20,13 ABa
	40	8,54 Aa	14,72 ABa
	60	15,27 Aa	27,59 ABb
5	20	10,72 Aa	22,25 Bb
	40	10,47 Aa	18,11 Bb
	60	16,27 Aa	29,02 Bb

¹ Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05)

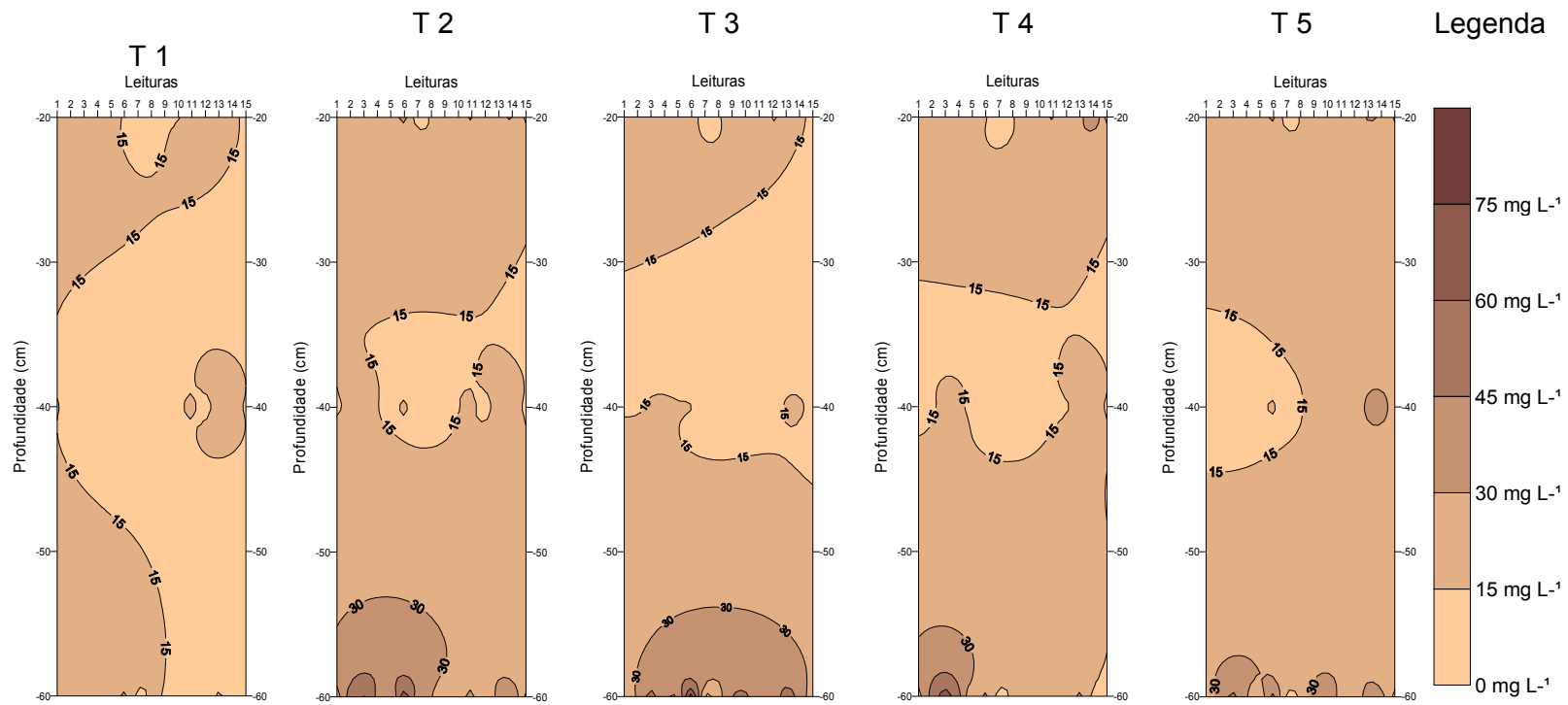


Figura 16 - Distribuição espacial do íon cálcio, solo argiloso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008

2.3.4 Distribuição do pH e da C.E no solo

Os valores do pH e da condutividade elétrica (C.E), foram observados mediante a coleta das soluções extraídas pelos extratores de solução do solo, instalados em diferentes profundidades, nos diferentes solos, para cada tratamento e em cada período de observação (90, 105, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255, 270, 285 e 300 DAP) denominadas leituras e numeradas no gráfico de 1 a 15 respectivamente, foram plotados pelo programa “Surfer” versão 7 (2001), de modo a se observar a distribuição destes no solo, conforme Figuras 17, 18, 19 e 20.

Os valores obtidos, tanto do pH quando da C.E, apresentaram variações no solo, tendo um intervalo para o pH de 6,4 a 7,75 para o solo arenoso e de 4,8 a 7,32 para o solo argiloso e a condutividade elétrica ficou em torno de 0,3 a 2,3 dS m⁻¹ para o solo arenoso e de 0,23 a 0,75 dS m⁻¹ para o solo argiloso.

Pelas Figuras 19 e 20, pôde-se observar que os valores da C.E, em relação ao solo arenoso, apresentaram um comportamento crescente conforme o aumento da profundidade em ambos os solos, sendo semelhante o seu perfil quando comparado ao potássio. Apresentando entre os tratamentos, nas diferentes profundidades diferentes variações ao longo do período ($P < 0,05$).

Segundo Dias (2004), a utilização do método de medição da condutividade elétrica da solução obtida com extrator de cápsula porosa é eficiente, devido às suas facilidades, versatilidade e praticidade, desde que sejam conhecidas a umidade da pasta saturada e a umidade no momento da extração. Silva et al. (1999) verificaram que a C.E, obtida por extratores e corrigida para a umidade de saturação, equivale relativamente bem à C.E do extrato de saturação, medida pelo método-padrão (RICHARDS, 1954).

Os valores de CE no solo argiloso foram de certa forma, menores do que em relação ao solo arenoso. Os tratamentos no solo argiloso apresentaram, de maneira geral, semelhantes variações ao longo do ciclo ($P \geq 0,05$).

Pela Tabela 10, pôde-se observar que os valores de pH apresentaram diferença estatística no solo arenoso entre os tratamentos e no solo argiloso não houve diferença significativa. Quando verificou-se a interação tratamento x profundidade x solo, foram encontradas diferenças significativas para os tratamentos 1 e 3.

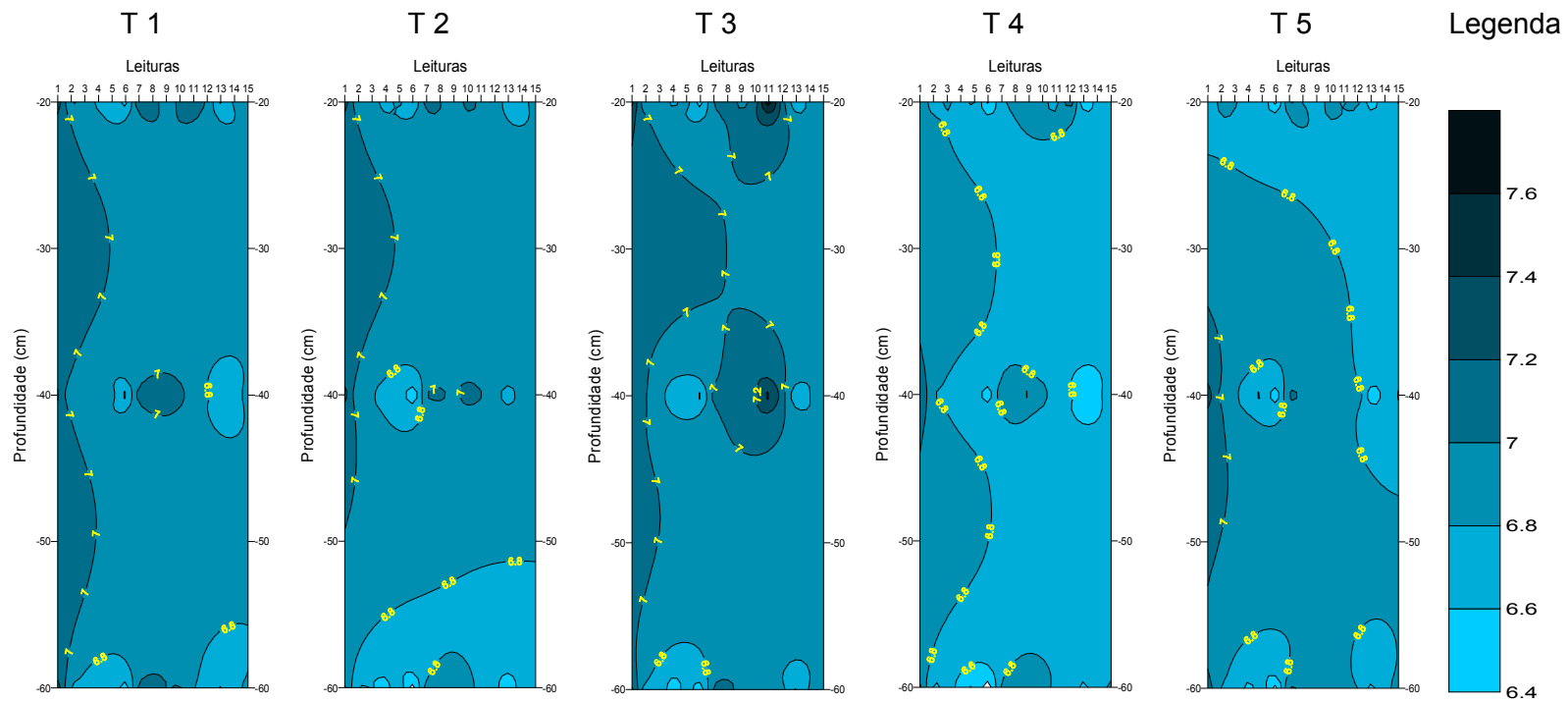


Figura 17 - Distribuição espacial do pH, solo arenoso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008

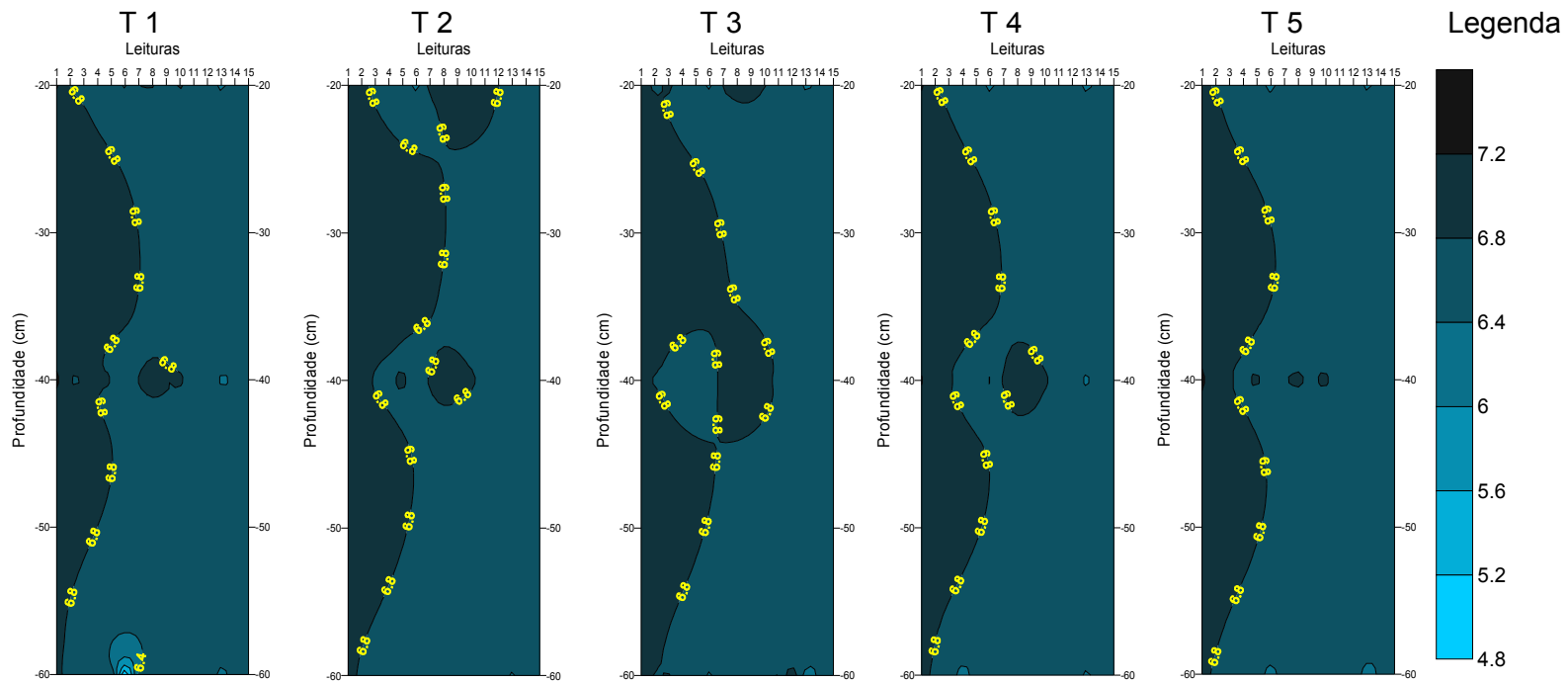


Figura 18 - Distribuição espacial do pH, solo argiloso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008

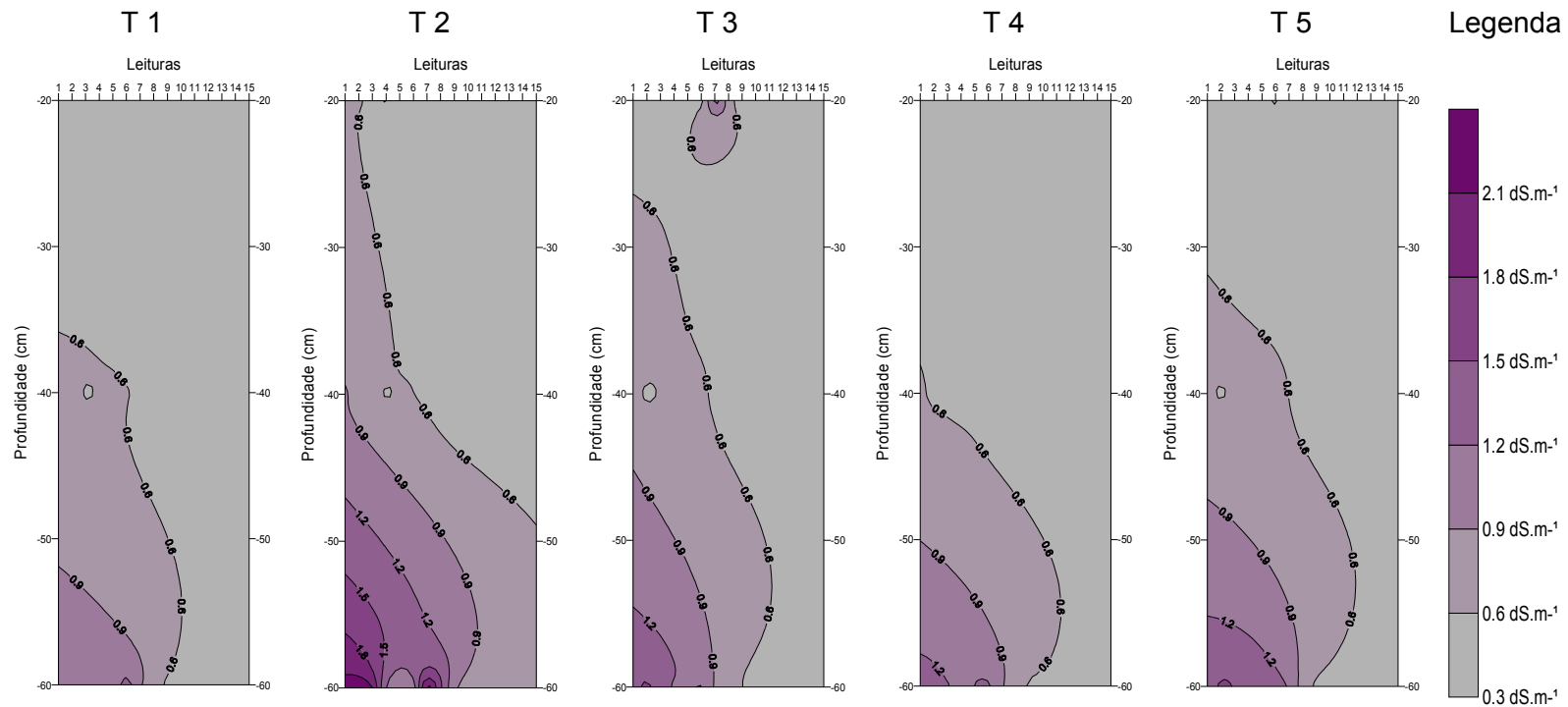


Figura 19 - Distribuição espacial da CE, solo arenoso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008

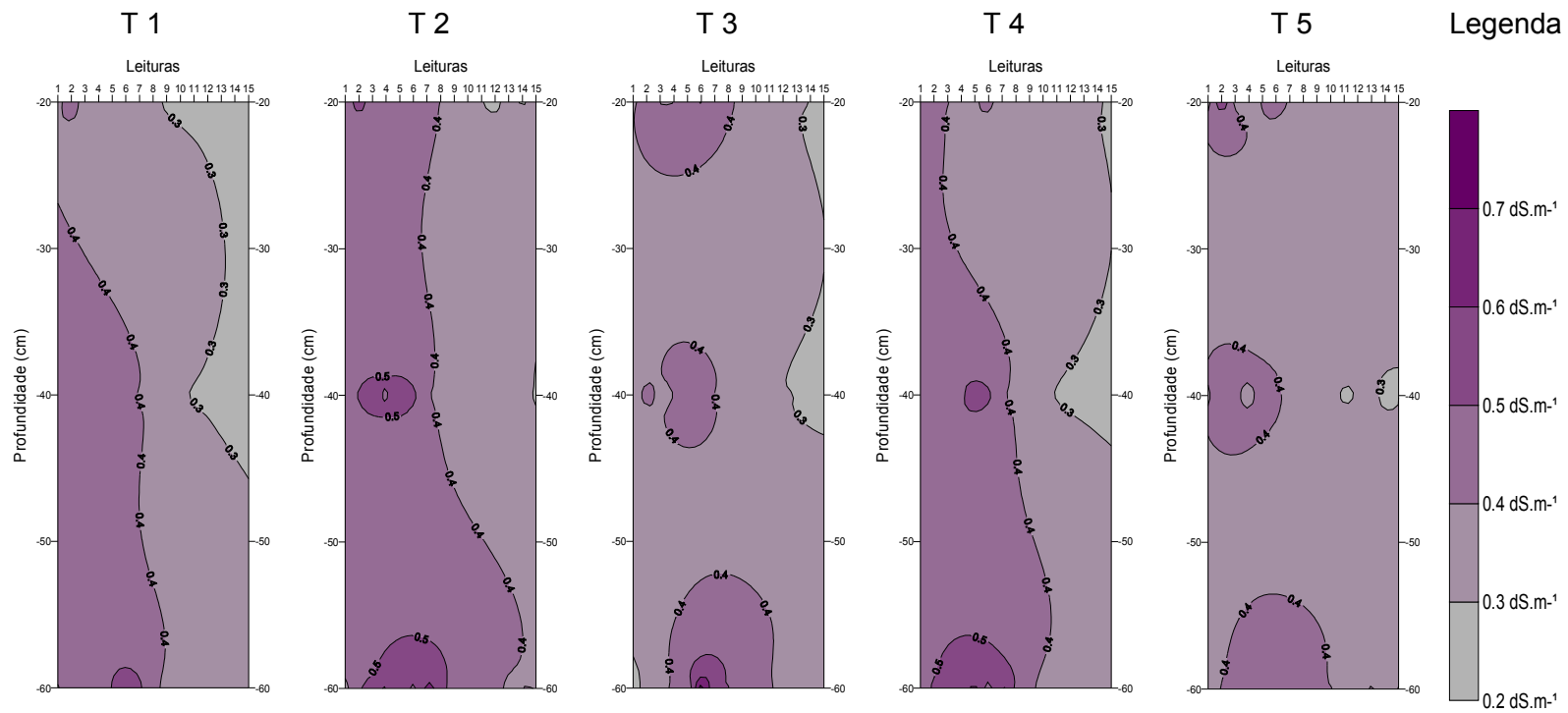


Figura 20 - Distribuição espacial da CE, solo argiloso, nos 5 tratamentos, às profundidades de 0,20, 0,40 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2008

Tabela 10 - Valores médios do pH em função da profundidade, tratamento e tipo de solo - Piracicaba, SP, 2008¹

Tratamento	Profundidade (cm)	Tipo de Solo	
		Arenoso	Argiloso
1	20	6,9 ABa	6,7 Ab
	40	6,8 ABa	6,7 Aa
	60	6,8 ABa	6,5 Ab
2	20	6,8 ABa	6,7 Aa
	40	6,8 ABa	6,7 Aa
	60	6,7 ABa	6,6 Aa
3	20	6,9 Ba	6,6 Ab
	40	6,9 Ba	6,7 Ab
	60	6,8 Ba	6,6 Ab
4	20	6,7 Aa	6,6 Aa
	40	6,7 Aa	6,7 Aa
	60	6,7 Aa	6,6 Aa
5	20	6,7 ABa	6,6 Aa
	40	6,8 ABa	6,7 Aa
	60	6,7 ABa	6,5 Ab

¹ Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05)

Tabela 11 - Valores médios da C.E em função da profundidade, tratamento e tipo de solo - Piracicaba, SP, 2008¹

Tratamento	Profundidade (cm)	Tipo de Solo	
		Arenoso	Argiloso
1	20	393,52 Aa	334,65 Aa
	40	495,87 Aa	377,70 Aa
	60	772,91 Aa	403,96 Ab
2	20	425,00 Ba	386,50 Aa
	40	543,21 Ba	398,21 Aa
	60	1275,57 Ba	472,79 Ab
3	20	519,79 ABa	372,16 Ab
	40	534,60 ABa	358,72 Ab
	60	880,41 ABa	415,45 Ab
4	20	438,70 Aa	354,70 Aa
	40	470,34 Aa	386,65 Aa
	60	862,07 Aa	452,57 Ab
5	20	446,78 ABa	371,68 Aa
	40	548,03 ABa	358,18 Ab
	60	936,42 ABa	407,39 Ab

¹ Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas diferem entre si, pelo teste de Tukey (P=0,05)

2.3.5 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 solos, ocorreram variações na velocidade de avanço da solução deslocadora. Essa variação pode ser atribuída aos diferentes tipos de solo, refletindo o seu efeito na porosidade total e macroporosidade. Dessa forma, ocorrendo diferenças nos valores obtidos dos parâmetros de transporte dos íons nitrato e potássio nos solos.

Segundo Nielsen e Biggar (1962), as curvas de distribuição de efluentes são importantes para se estudar o transporte de solutos no perfil do solo, durante uma percolação. O número de volume de poros correspondente à concentração relativa de 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 de 1 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, 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.

Na curva de eluição da vinhaça no solo argiloso, observou-se, que tanto o potássio quanto o nitrato, houve um maior deslocamento das curvas de eluição para a direita, quando comparados com o solo arenoso, indicando que os íons potássio e nitrato foram retidos no solo, com maior intensidade, no solo argiloso. No solo argiloso os íons apresentaram um maior efeito de adsorção, necessitando de uma quantidade de no mínimo 2 volumes de poros (VP) e no máximo 3 volumes de poros (VP), para que a concentração inicial fosse atingida, ao contrário do solo arenoso que os íons ficaram em torno de 1,8 VP, não ultrapassando 2 VP em todas as repetições.

A curva de distribuição de efluentes em ambos os solos para os íons potássio e nitrato apresentaram semelhança em sua inclinação (Figuras 21 e 22).

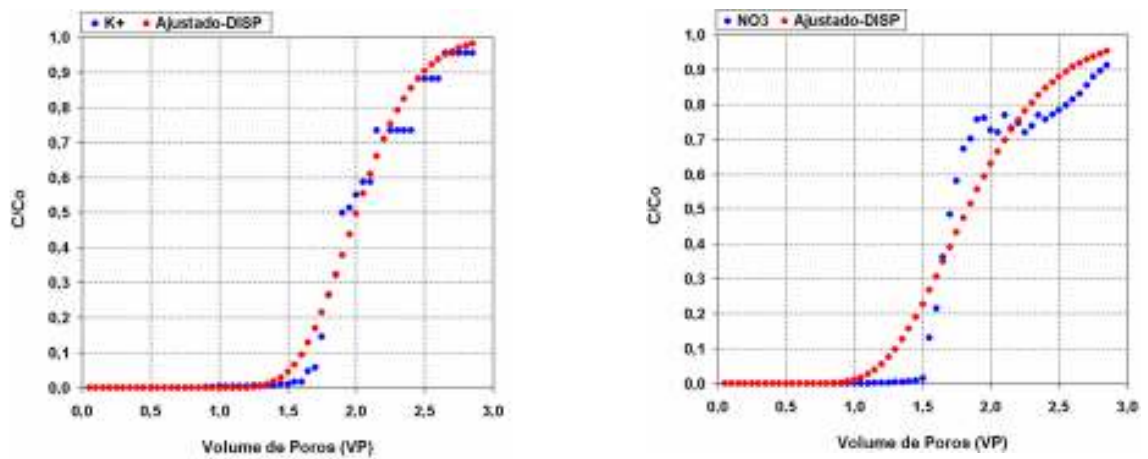


Figura 21 – Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com vinhaça, solo argiloso, para os íons potássio e nitrato

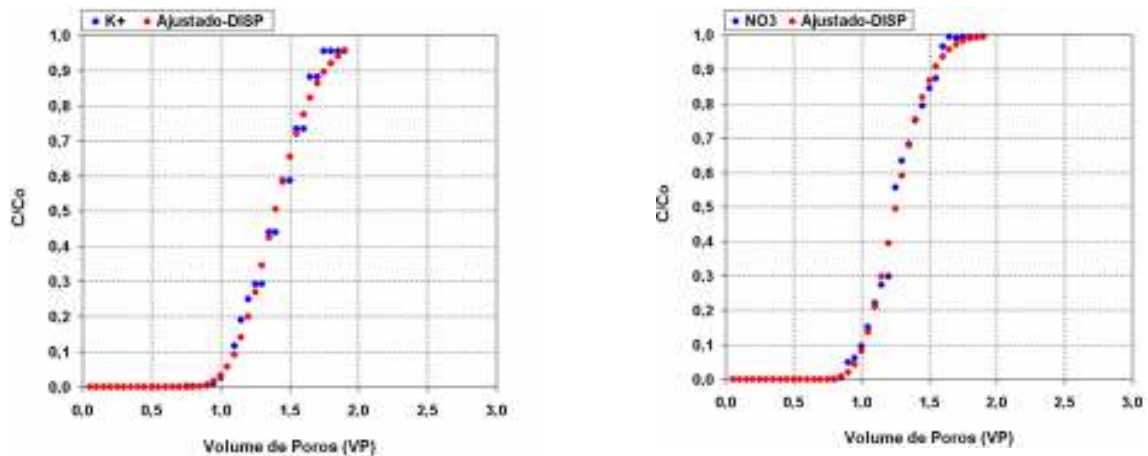


Figura 22 – Curvas de distribuição de efluentes elaboradas com vinhaça, solo arenoso, para os íons potássio e nitrato

Os parâmetros de transporte dos íons estudados foram obtidos mediante a aplicação do software DISP, cujos valores mais altos dos coeficientes de dispersão-difusão, ocorreram em relação ao solo argiloso.

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

Os valores de R encontrados para os íons nitrato e potássio foram bem próximos para os solos estudados, não observando uma diferença significativa.

Porém, observou-se em relação ao parâmetro de transporte – dispersão (D), para o íon potássio, em condição de solo argiloso, um aumento dos valores do nitrato,

assim como a velocidade da água no poro, tanto em função do número de Peclet, quanto também em função da densidade de fluxo (Tabela 12 e 13).

Tabela 12 - Parâmetros de transporte do potássio: fator de retardamento (R), coeficiente de dispersão (D), número de Peclet (P), velocidade da água nos poros (v), coeficiente de dispersividade calculado em função do número de Peclet (λ), para diferentes solos submetidos à simulação

Parâmetros de transporte do potássio					
Solo	R	D (cm ² min ⁻¹)	P	v(P) (cm min ⁻¹)	λ (P)
Argiloso	2,032	7,737	67,86	26,25	0,295
Arenoso	1,396	4,0912	61,31	12,54	0,326

Tabela 13 - Parâmetros de transporte do nitrato: fator de retardamento (R), coeficiente de dispersão (D), número de Peclet (P), velocidade da água nos poros (v), coeficiente de dispersividade calculado em função do número de Peclet (λ), para diferentes solos submetidos à simulação

Parâmetros de transporte do nitrato					
Solo	R	D (cm ² min ⁻¹)	P	v(P) (cm min ⁻¹)	λ (P)
Argiloso	1,896	19,0424	27,57	26,25	0,725
Arenoso	1,253	3,2597	76,46	12,462	0,262

3 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos pôde-se concluir que:

- a) A percolação do nitrato está diretamente relacionada com o tipo de solo, concentrações dos nutrientes da vinhaça ao longo do período da safra de cana e dos diferentes tipos de vinhaça, mas para ambos os tipos de solos estudados nenhum apresentou risco de contaminação do lençol freático, mesmo para a maior concentração que de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, por um período de aproximadamente 8 meses de aplicação;
- b) Os íons potássio, nitrato e o cálcio no solo argiloso apresentaram maior interação com a fração sólida do solo em relação ao solo arenoso;
- c) A movimentação dos íons deve ser estudada em longos períodos para mostrar melhor a sua movimentação no perfil do solo;
- d) Solos cultivados com cana adsorvem/necessitam de teores crescentes de nutrientes durante seu desenvolvimento, sendo a quantidade adicionada somente pela adição da vinhaça insuficiente para o seu balanço nutricional;
- e) Para a avaliação de alteração nos valores de pH pôde-se observar que há a necessidade de maior intervalo de tempo para a percepção de suas diferenças, para ambos os solos;
- f) Os parâmetros de transporte evidenciaram positivamente os efeitos de adsorção e de deslocamento dos íons nitrato e potássio presentes na vinhaça, principalmente em relação ao íon potássio.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J.R. **O problema da vinhaça em São Paulo**. Piracicaba: ESALQ, Instituto Zimotécnico, 1952. 24 p. (Boletim, 3).

ÁLVAREZ-BENEDI, J.; ISLA, T.; CARTÓN, A.; BOLADO, S. Efecto de la velocidad de flujo en los parámetros de transporte de solutos. In: MUÑOZ-CARPENA, R.; RITTER, A.; TASCÓN, C. (Ed.). **Estudios en la zona no saturada del suelo**. La Laguna: ICIA, 1999. p. 157-161.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: American Elsevier, 1972. 764 p.

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. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2002. p 1-4.

BOSWELL, F.C.; MEISINGER, J.J.; CASE, N.L. Production, marketing, and use of nitrogen fertilizers. In: ENGELSTAD, O.P. **Fertilizer technology and use**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1985. p. 229-292.

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.

BRITO, F.L.; ROLIM, M. M. **Comportamento do efluente e do solo fertirrigado com vinhaça**. 2003. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciência de Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2003.

BUTTERS, G.; BANDARANAYAKE, W. Demonstrations in solute transport using dyes: II. Modeling. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, Madison, v. 22, p. 126-130, 1993.

CAMBUIM, F. A. **A ação da vinhaça sobre a retenção de umidade, pH, acidez total, acumulação e lixiviação de nutrientes em solo arenoso**. 2001. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciência de Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2001.

CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; ROUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E.; SANTOS, G.A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação de palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma técnica:** P4.231. São Paulo, 2005. 17 p.

CUNHA, R.C.A.; COSTA, A.C.S.; MASET FILHO, B.; CASARINI, D.C. P. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects. **Water Science Technology**, Washington, v. 19, n. 8, p. 155-165, 1981.

CUNHA, C. **Métodos numéricos para as engenharias e ciências aplicadas**. Campinas: Editora da Unicamp, 1993. 265 p.

DIAS, N.S. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade em solo cultivado com melão rendilhado sob ambiente protegido**, 2004. 131 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Solos; Embrapa Informática Agropecuária ; Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

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

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

FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., São Carlos, 2000. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FREIRE, W.J.; CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203p.

FNP CONSULTORIA & COMERCIO. Cana-de-Açúcar. In: _____. **Agrianual 2008:** anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2008. p. 235-264.

GLÓRIA, N.A.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado. **Álcool e Açúcar**, São Paulo, v. 4, n. 15, p. 22-31, 1984.

HOCHMUTH, G.J. Fertilizer management with drip irrigation for vegetables. Using plasticulture technology for the intensive production of vegetable crops. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Lexington, v. 43, n. 7, p. 16-22, 1994.

HUBBARD, R.K.; LEONARD, R.A.; JOHNSON, A.W. Nitrate transport a sandy coastal plain soil underlain by plinthite. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 34, p. 802-808, 1991.

LYRA, M.R.C. **Toposseqüência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático**. 2003. 122 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2003.

MADEJÓN, E.; LOPEZ, R.; MURILLO, J. M.; CABRERA, F. Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Seville, v. 84, n.1, p.55-65, 2001.

MALAVOLTA, E. **Potássio, magnésio e enxofre nos solos e culturas brasileiras**. 2. ed. Piracicaba: Instituto Internacional de Pesquisa da Potassa, 1980. 91 p. (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. 319 p.

MUCHOVEJ, R.M.C; RECHCIGL, J.E. Impacts of nitrogen fertilization of pastures and turfgrasses on water quality. In: LAL, R.; STEWART, B.A. (Ed.). **Soil processes and water quality**. 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 and Soil**, Dordrecht, v. 115, p. 297-311, 1989.

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

_____. Miscible displacement: III Theoretical considerations. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, p. 216-221, 1962.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T.; PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 33-38, 1984.

PRADA, S.M.; GUEKEZIAN, M.; SUÁREZ-IHA, M.E.V. Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 249-252, 1998.

QUAGGIO, J.A.; DECHEN, A.R.; RAIJ, B. van. Efeitos da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e a lixiviação de bases no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, p. 189-194, 1982.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; Potafos, 1991. 343 p.

RICHARDS, L.A. (Ed.) **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 160 p. (USDA. Agriculture Handbook, 60).

RIDESA, R.I.P.O.D.S. **Aspectos ambientais da aplicação de vinhaça no solo**. São Carlos: UFSCar, 1994. 67 p.

RITCHEY, K.D.; SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, p. 40-44, 1980.

ROSSETTO, A.J. Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: PARANHOS, S.B. (Ed.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 2, p. 435-504.

SEBER, G.A.F; WILD, C.J. **Nonlinear regression**. New York: John Wiley, 1983. 768 p.

SILVA, E.F.F. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo**. 2002. 136 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2002.

SILVA, E.F.F.; DUARTE, S.N.; COELHO, R.D. Salinização dos solos cultivados sob ambiente protegidos no Estado de São Paulo. In: FOLEGATTI, M.V. (Ed.). **Fertirrigação: citrus, flores e hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 267-277.

SILVA, G.M.A.; ORLANDO FILHO, J. Caracterização da composição química dos diferentes tipos de vinhaça no Brasil. **Boletim Técnico PLANALSUCAR**, Piracicaba, v. 3, n. 8, p. 5-22, 1981.

SILVA, M.A.S.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

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.

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

TAVORA, J.E.M. de. Reservas minerais de potássio e suas explorações. INSTITUTO INTERNACIONAL DA POTASSA. **Potássio na agricultura brasileira**. Brasília, 1982. p. 37-50.

TORIDE, N.F.; LEIJ, J.; VAN GENUCHTEN, M.TH. **The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments, version 2.1**. Riverside: USDA, ARS, Salinity Laboratory, 1999. 119 p. (Research Report, 137).

UNIÃO DA INDUSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/>>. Acesso em: 20 out. 2008.

VAN GENUCHTEN, M.T. 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.

VAN GENUCHTEN, M.T.; WIERENGA, P.J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods: p.1025-1054. (American Society of Agronomy, 9)

VAN GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. The **RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**: version 1.0. Riverside: USDA, ARS, Salinity Laboratory, 1991. 93 p. (EPA Report 600/2-91/065).

VANCLOOSTER, M.; VIAENE, P.; CHRISTIAENS, K. **A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment**. Leuven: Katholieke Universiteit, 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 médios da temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e radiação global

Meses	T (°C)	UR (%)	V (m s ⁻¹)	P (mm)	RG (MJ m ⁻² d ⁻¹)
Novembro	22,25	85,32	1,65	120,50	19,76
Dezembro	23,94	83,86	1,26	179,10	22,27
Janeiro	22,59	92,33	1,41	406,70	17,54
Fevereiro	23,47	91,84	1,08	131,50	19,94
Março	22,90	89,01	1,28	137,70	19,53
Abril	21,16	92,61	1,03	111,10	14,41
Mai	17,82	88,46	1,15	54,70	13,74
Junho	17,96	90,50	1,01	60,60	12,39
Julho	17,58	77,81	1,07	0,30	15,41
Agosto	19,84	80,72	1,34	65,50	16,27
Setembro	21,31	76,18	1,24	1,07	17,77

Anexo B - Valores da umidade com base em volume, da curva de retenção de água no solo

Solo	Tensão (cm.c.a)									
	0	10	20	40	100	330	500	1000	5000	15000
Arenoso 1	0,44	0,38	0,36	0,31	0,18	0,12	0,11	0,09	0,08	0,08
Arenoso 2	0,47	0,41	0,39	0,34	0,22	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09
Arenoso 3	0,39	0,35	0,34	0,29	0,19	0,14	0,12	0,10	0,09	0,09
Argiloso 1	0,57	0,5	0,45	0,39	0,32	0,29	0,27	0,24	0,24	0,23
Argiloso 2	0,56	0,52	0,47	0,41	0,32	0,27	0,25	0,22	0,21	0,19
Argiloso 3	0,56	0,51	0,48	0,40	0,32	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21

Anexo C - Valores médios obtidos em “mg L⁻¹” de nitrato, solo arenoso, nas diferentes profundidades

Leitura	Profund	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
		Coцент	Concent	Concent	Concent	Concent
1	20	113,00	146,00	102,40	100,20	92,20
2	20	19,20	16,40	18,60	14,60	18,40
3	20	29,20	27,00	31,00	27,00	29,80
4	20	41,00	37,50	38,60	36,40	35,00
5	20	41,50	40,60	41,00	35,00	41,40
6	20	6,00	3,60	6,60	4,00	6,20
7	20	63,40	88,00	66,00	76,25	74,20
8	20	35,40	44,60	42,40	35,20	43,60
9	20	40,20	42,75	45,20	35,40	36,20
10	20	38,00	42,00	43,60	28,20	33,60
11	20	44,80	42,25	47,40	39,25	38,00
12	20	34,00	37,50	37,40	38,00	31,80
13	20	34,00	36,00	34,60	31,20	35,60
14	20	40,80	40,00	40,50	38,50	38,40
15	20	39,00	46,20	38,50	40,00	35,60
1	40	101,40	108,75	84,75	77,25	121,80
2	40	25,00	26,00	21,75	21,25	21,00
3	40	38,00	36,50	33,75	31,75	31,20
4	40	44,50	40,00	42,25	35,20	32,00
5	40	46,20	42,00	48,75	38,50	45,20
6	40	8,80	5,20	8,00	6,00	4,20
7	40	80,20	102,25	91,40	96,75	77,80
8	40	62,60	64,80	59,40	51,40	56,60
9	40	45,80	54,40	50,20	39,40	45,40
10	40	47,00	44,40	45,25	35,20	40,20
11	40	47,33	49,40	53,00	42,50	42,20
12	40	39,50	43,60	41,33	34,00	36,60
13	40	37,50	37,00	39,33	34,20	35,40
14	40	47,00	45,60	44,80	38,00	37,00
15	40	42,60	49,00	40,75	40,80	36,60
1	60	119,00	101,00	104,40	81,75	103,00
2	60	21,40	22,00	21,20	19,50	21,40
3	60	32,60	32,00	31,20	29,00	30,20
4	60	40,80	40,00	39,25	34,20	36,20
5	60	45,75	36,67	45,00	33,75	42,60
6	60	9,00	4,60	7,00	5,80	6,20
7	60	71,80	72,20	75,00	78,00	67,40
8	60	63,40	56,60	72,50	52,80	59,60
9	60	54,20	50,00	50,80	46,40	47,60
10	60	50,00	45,60	47,75	25,40	43,60
11	60	52,60	47,00	51,40	45,80	46,20
12	60	43,40	41,60	42,40	44,00	40,80
13	60	41,40	40,80	40,25	39,40	41,20
14	60	47,75	48,00	49,60	46,80	45,00
15	60	47,60	50,80	47,00	47,00	39,60

Anexo D - Valores médios obtidos em “mg L⁻¹” de potássio, solo arenoso, nas diferentes profundidades

Leitura	Profund	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
		Concent	Concent	Concent	Concent	Concent
1	20	26,80	35,50	30,60	26,60	26,40
2	20	45,40	47,60	40,00	21,20	40,80
3	20	48,20	37,40	50,25	45,00	45,00
4	20	42,25	54,50	36,80	38,40	45,60
5	20	45,25	47,20	49,40	48,25	48,20
6	20	25,40	11,60	29,40	16,00	34,40
7	20	5,60	7,33	38,40	9,00	8,60
8	20	4,80	15,20	19,00	10,20	8,60
9	20	4,40	6,00	40,80	11,40	10,80
10	20	9,00	10,60	25,20	14,40	13,00
11	20	7,60	5,25	27,00	11,50	17,60
12	20	12,60	7,50	52,20	15,60	24,20
13	20	13,75	9,75	13,40	17,80	26,60
14	20	13,60	10,50	15,00	21,75	25,80
15	20	11,40	8,20	13,75	19,20	28,00
1	40	44,60	61,50	60,75	45,50	50,20
2	40	94,33	62,25	52,00	55,25	56,00
3	40	52,67	74,00	64,75	57,75	72,00
4	40	62,50	47,67	69,25	43,60	66,20
5	40	61,60	59,50	64,50	58,25	80,20
6	40	38,40	18,00	31,40	23,00	26,60
7	40	13,80	15,00	13,40	14,75	20,80
8	40	13,60	17,60	13,40	12,60	14,80
9	40	11,60	19,40	16,00	18,40	20,40
10	40	16,50	18,80	20,00	17,80	21,80
11	40	15,00	16,60	17,00	14,50	20,40
12	40	21,00	26,00	24,33	23,25	31,20
13	40	21,50	28,50	26,33	24,60	31,60
14	40	21,00	22,00	28,40	25,25	30,50
15	40	24,40	28,60	26,00	28,00	34,40
1	60	83,80	137,50	96,60	98,50	99,80
2	60	106,40	171,25	144,00	127,50	158,00
3	60	95,80	153,75	124,60	114,75	134,00
4	60	111,00	112,40	107,75	91,60	132,00
5	60	89,50	84,33	106,25	115,00	134,00
6	60	87,50	33,60	63,80	65,40	75,20
7	60	45,20	89,40	41,25	50,20	55,20
8	60	32,40	64,80	28,00	36,60	34,40
9	60	35,20	58,40	37,80	42,20	40,00
10	60	39,00	56,40	34,50	43,40	40,40
11	60	25,75	51,20	29,00	36,80	37,20
12	60	35,75	70,80	47,40	50,60	49,00
13	60	34,00	68,20	40,00	46,00	44,80
14	60	27,33	65,40	43,60	48,00	46,20
15	60	34,75	71,80	49,20	50,60	52,20

Anexo E - Valores médios obtidos em “mg L⁻¹” de cálcio, solo arenoso, nas diferentes profundidades

Leitura	Profund	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
		Concent	Concent	Concent	Concent	Concent
1	20	13,90	17,44	16,20	15,88	14,60
2	20	11,60	11,89	11,62	9,79	10,53
3	20	11,51	17,90	11,21	9,09	12,46
4	20	12,13	13,78	12,02	13,18	12,40
5	20	12,64	13,15	10,02	12,86	14,47
6	20	16,76	21,11	21,01	28,08	14,50
7	20	4,89	4,92	4,88	4,16	2,94
8	20	11,18	12,23	10,28	12,71	9,93
9	20	11,44	13,09	9,91	19,33	9,92
10	20	11,44	13,09	9,91	19,33	9,92
11	20	16,00	18,57	15,95	24,50	12,49
12	20	9,55	9,25	17,69	11,48	9,04
13	20	12,99	10,72	9,36	17,72	12,23
14	20	16,38	14,73	15,20	20,05	11,00
15	20	5,06	6,09	6,47	4,99	4,49
1	40	17,93	12,50	11,57	12,02	12,44
2	40	10,45	25,11	14,33	12,39	17,96
3	40	15,62	8,44	16,50	10,90	19,55
4	40	13,68	15,27	13,38	11,95	15,32
5	40	12,18	11,34	10,23	8,58	13,37
6	40	10,63	11,22	15,17	9,04	14,58
7	40	3,27	2,13	4,93	2,30	1,98
8	40	7,89	7,03	6,77	7,62	8,85
9	40	7,28	6,67	8,42	8,27	7,82
10	40	7,28	6,67	8,42	8,27	7,82
11	40	4,60	4,00	8,17	11,02	9,30
12	40	2,40	3,80	4,68	4,05	5,21
13	40	6,45	8,67	8,06	8,58	9,37
14	40	6,72	8,78	12,76	9,80	9,71
15	40	3,97	4,19	5,53	3,43	3,90
1	60	17,24	24,43	22,00	19,83	21,54
2	60	24,03	64,45	37,58	30,53	40,52
3	60	35,38	31,07	27,05	31,68	43,34
4	60	22,68	22,03	21,03	21,78	26,64
5	60	28,33	16,10	19,73	23,70	23,23
6	60	20,35	63,93	15,25	27,55	20,83
7	60	4,97	4,61	2,28	2,80	3,12
8	60	9,04	18,94	9,25	10,26	9,21
9	60	8,78	29,03	7,48	10,55	8,60
10	60	8,78	29,03	7,48	10,55	8,60
11	60	10,47	18,78	7,14	10,52	12,01
12	60	3,43	12,34	5,58	6,23	4,95
13	60	6,54	12,91	7,15	8,24	7,70
14	60	8,77	24,85	10,26	9,91	9,77
15	60	2,76	7,29	4,15	4,96	4,12

Anexo F - Valores médios obtidos do pH, solo arenoso, nas diferentes profundidades

Leitura	Profund	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
		Concent	Concent	Concent	Concent	Concent
1	20	7,35	7,32	7,47	6,92	6,69
2	20	6,76	6,79	6,76	6,71	6,85
3	20	6,88	6,86	6,96	6,84	6,83
4	20	6,77	6,75	6,75	6,72	6,64
5	20	6,81	6,84	6,89	6,86	6,83
6	20	6,49	6,58	6,47	6,34	6,31
7	20	7,20	7,13	7,05	6,78	7,06
8	20	7,09	7,01	7,11	6,85	6,79
9	20	6,88	6,91	6,94	6,86	6,74
10	20	7,05	7,05	7,07	6,87	6,84
11	20	7,13	6,97	7,79	6,70	6,78
12	20	6,98	7,01	7,07	7,19	6,86
13	20	6,55	6,62	6,61	6,40	6,45
14	20	6,86	6,76	6,88	6,69	6,77
15	20	6,83	6,84	6,90	6,78	6,80
1	40	7,27	7,30	7,19	7,21	7,32
2	40	6,79	6,79	7,00	6,79	6,92
3	40	6,93	6,82	6,91	6,78	6,85
4	40	6,80	6,75	6,64	6,66	6,66
5	40	6,89	6,82	6,83	6,79	6,88
6	40	6,50	6,37	6,52	6,43	6,39
7	40	7,15	7,04	7,13	6,99	7,09
8	40	7,02	7,02	7,12	6,87	6,94
9	40	7,05	6,97	7,04	6,78	6,84
10	40	7,07	7,03	7,15	6,92	6,94
11	40	6,86	7,02	7,49	6,58	6,83
12	40	6,85	6,87	7,10	6,67	6,98
13	40	6,58	6,72	6,60	6,40	6,43
14	40	6,68	6,88	6,82	6,56	6,68
15	40	6,89	6,97	6,87	6,69	6,82
1	60	7,31	7,03	7,24	7,06	7,11
2	60	6,74	6,58	6,67	6,52	6,76
3	60	6,79	6,61	6,82	6,70	6,77
4	60	6,64	6,53	6,40	6,53	6,52
5	60	6,79	6,75	6,75	6,63	6,75
6	60	6,45	6,29	6,44	6,24	6,30
7	60	7,11	6,93	7,10	6,88	7,04
8	60	7,06	6,87	7,03	6,96	6,96
9	60	6,99	6,86	6,97	6,84	6,87
10	60	7,02	6,89	7,01	6,88	6,93
11	60	6,79	6,71	6,84	6,74	6,83
12	60	6,76	6,67	6,85	6,79	6,82
13	60	6,58	6,43	6,58	6,52	6,53
14	60	6,75	6,72	6,84	6,77	6,75
15	60	6,84	6,76	6,88	6,81	6,87

Anexo G - Valores médios obtidos em “dS m⁻¹” da C.E., solo arenoso, nas diferentes profundidades

Leitura	Profund	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
		Concent	Concent	Concent	Concent	Concent
1	20	0,42	0,61	0,47	0,45	0,45
2	20	0,49	0,66	0,51	0,40	0,56
3	20	0,47	0,45	0,49	0,42	0,46
4	20	0,47	0,63	0,46	0,43	0,51
5	20	0,45	0,45	0,51	0,52	0,50
6	20	0,50	0,47	0,46	0,44	0,64
7	20	0,37	0,39	1,39	0,53	0,39
8	20	0,36	0,47	0,75	0,50	0,44
9	20	0,35	0,30	0,38	0,42	0,36
10	20	0,32	0,33	0,37	0,44	0,37
11	20	0,34	0,30	0,50	0,44	0,42
12	20	0,34	0,33	0,44	0,42	0,41
13	20	0,35	0,34	0,36	0,42	0,42
14	20	0,34	0,33	0,35	0,39	0,40
15	20	0,34	0,33	0,34	0,37	0,37
1	40	0,61	0,98	0,87	0,65	0,71
2	40	0,92	0,65	0,47	0,53	0,54
3	40	0,51	0,80	0,66	0,59	0,73
4	40	0,68	0,55	0,77	0,49	0,78
5	40	0,65	0,68	0,74	0,61	0,77
6	40	0,64	0,60	0,70	0,55	0,75
7	40	0,48	0,56	0,50	0,47	0,59
8	40	0,46	0,54	0,50	0,45	0,46
9	40	0,39	0,43	0,45	0,41	0,42
10	40	0,38	0,40	0,40	0,39	0,40
11	40	0,33	0,36	0,36	0,38	0,41
12	40	0,32	0,31	0,35	0,36	0,41
13	40	0,37	0,45	0,42	0,40	0,44
14	40	0,35	0,41	0,44	0,39	0,41
15	40	0,36	0,42	0,38	0,38	0,40
1	60	1,17	2,14	1,42	1,29	1,31
2	60	0,96	2,23	1,56	1,27	1,56
3	60	0,92	2,16	1,36	1,23	1,49
4	60	1,17	1,15	1,16	0,97	1,33
5	60	0,98	0,90	1,17	1,22	1,38
6	60	1,36	0,95	1,22	1,26	1,29
7	60	0,93	2,32	0,85	0,91	1,18
8	60	0,76	1,55	0,67	0,79	0,75
9	60	0,55	0,93	0,61	0,56	0,55
10	60	0,54	0,81	0,52	0,59	0,54
11	60	0,52	0,81	0,51	0,60	0,57
12	60	0,41	0,80	0,54	0,57	0,52
13	60	0,46	0,79	0,50	0,55	0,53
14	60	0,44	0,81	0,55	0,58	0,53
15	60	0,43	0,79	0,56	0,55	0,52

Anexo H - Valores médios obtidos em “mg L⁻¹” de nitrato, solo argiloso, nas diferentes profundidades

Leitura	Profund	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
		Concent	Concent	Concent	Concent	Concent
1	20	59,20	62,40	61,60	60,60	71,00
2	20	13,00	14,20	11,60	13,20	11,80
3	20	15,50	21,00	16,40	17,25	13,60
4	20	22,25	20,75	24,25	23,80	24,40
5	20	27,20	31,00	21,00	28,20	24,20
6	20	21,80	1,80	2,00	2,00	2,80
7	20	58,40	48,20	55,00	57,80	62,40
8	20	23,40	28,80	25,75	20,25	28,60
9	20	36,60	34,40	37,20	41,25	32,60
10	20	29,00	33,50	29,80	30,60	34,20
11	20	30,75	36,00	38,25	30,75	34,50
12	20	30,00	28,50	30,20	29,00	31,60
13	20	32,50	29,75	28,50	28,20	28,40
14	20	37,25	36,00	35,50	31,50	38,75
15	20	33,80	37,40	36,00	34,00	36,20
1	40	69,20	73,00	53,80	61,80	69,20
2	40	10,60	12,80	11,80	12,60	12,80
3	40	22,60	20,80	16,75	19,60	16,80
4	40	28,33	22,00	25,25	27,80	30,00
5	40	33,80	33,60	28,20	31,60	26,20
6	40	26,80	1,80	2,20	2,40	2,60
7	40	66,00	68,60	60,40	63,40	57,50
8	40	26,60	27,00	25,00	23,00	19,40
9	40	37,60	37,00	38,80	34,60	34,40
10	40	29,40	29,60	29,80	29,20	31,60
11	40	26,00	34,75	36,67	27,75	32,75
12	40	28,75	31,00	30,80	29,40	31,20
13	40	31,20	27,60	27,60	27,80	28,40
14	40	32,50	39,33	37,67	37,25	35,67
15	40	33,25	32,60	37,20	35,00	34,60
1	60	59,40	58,20	61,20	58,20	68,60
2	60	9,40	9,80	11,20	11,00	11,20
3	60	18,75	16,40	14,75	17,40	16,40
4	60	29,33	18,67	24,00	23,80	24,00
5	60	39,00	28,20	27,60	28,20	27,80
6	60	43,50	3,20	4,00	1,00	2,75
7	60	51,60	42,20	56,60	47,50	60,20
8	60	24,40	28,20	25,20	26,20	25,60
9	60	30,20	35,75	27,20	31,40	32,60
10	60	31,20	32,60	30,60	30,40	31,20
11	60	27,25	41,00	35,67	32,00	31,75
12	60	31,00	30,60	28,50	34,50	33,00
13	60	32,80	30,00	29,00	31,80	31,40
14	60	38,33	38,00	36,00	40,33	39,00
15	60	35,80	37,60	40,00	39,20	39,20

Anexo I - Valores médios obtidos em “mg L⁻¹” de potássio, solo argiloso, nas diferentes profundidades

Leitura	Profund	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
		Concent	Concent	Concent	Concent	Concent
1	20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
2	20	13,40	17,80	7,00	34,00	22,40
3	20	1,00	0,75	1,00	4,50	0,80
4	20	0,00	0,00	0,00	0,20	1,00
5	20	2,00	2,20	1,00	1,80	1,60
6	20	0,20	0,60	6,00	1,60	0,60
7	20	0,80	3,00	1,75	0,00	1,80
8	20	1,40	2,20	10,25	0,75	1,00
9	20	5,60	0,60	6,20	1,75	0,80
10	20	3,80	3,00	1,40	0,60	0,80
11	20	0,25	1,00	1,50	0,50	0,00
12	20	2,20	1,50	2,00	1,40	2,60
13	20	1,25	2,25	1,50	2,00	3,80
14	20	2,50	2,00	1,00	2,00	4,50
15	20	1,80	5,80	1,67	3,00	3,60
1	40	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00
2	40	1,40	7,40	1,40	2,20	3,80
3	40	2,80	1,60	0,25	1,80	1,00
4	40	0,00	1,75	1,00	0,40	0,25
5	40	5,40	1,60	2,40	1,80	2,20
6	40	0,40	0,00	1,80	2,20	1,20
7	40	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
8	40	0,20	0,20	0,00	0,00	0,00
9	40	5,20	0,00	0,00	0,00	0,00
10	40	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
11	40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	40	0,75	0,00	0,00	0,00	0,20
13	40	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
14	40	0,00	2,33	0,00	0,25	0,00
15	40	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00
1	60	0,20	0,20	0,80	0,60	0,60
2	60	1,40	1,00	0,80	5,20	1,00
3	60	0,50	2,00	1,50	1,80	5,00
4	60	0,00	1,67	0,67	2,80	1,50
5	60	3,50	4,00	9,60	4,00	3,40
6	60	16,75	6,60	6,75	0,00	0,25
7	60	0,40	0,00	0,00	0,50	0,00
8	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	60	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
13	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Anexo J - Valores médios obtidos em “mg L⁻¹” de cálcio, solo argiloso, nas diferentes profundidades

Leitura	Profund	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
		Concent	Concent	Concent	Concent	Concent
1	20	15,42	15,92	15,90	16,16	18,30
2	20	20,25	17,60	18,56	17,15	20,98
3	20	24,13	21,30	21,30	20,81	27,90
4	20	20,38	20,41	20,65	19,10	24,58
5	20	20,08	19,28	21,60	19,46	21,98
6	20	13,54	37,58	25,68	16,45	34,14
7	20	4,11	4,20	3,55	4,34	4,29
8	20	14,68	17,72	13,98	14,27	16,30
9	20	13,78	22,93	19,88	21,40	22,76
10	20	13,78	22,93	19,88	21,40	22,76
11	20	27,80	32,27	27,23	32,45	28,18
12	20	14,97	14,98	12,76	18,36	17,85
13	20	23,30	26,35	20,15	23,92	31,92
14	20	23,05	32,30	21,80	47,80	28,85
15	20	7,75	11,86	7,11	8,89	12,96
1	40	15,73	13,96	14,66	12,94	13,16
2	40	11,88	16,78	14,65	12,60	11,50
3	40	12,51	21,52	15,35	19,89	7,61
4	40	14,06	15,62	15,64	16,44	12,94
5	40	12,48	9,64	15,18	13,14	10,82
6	40	6,29	18,37	15,97	15,99	18,50
7	40	3,72	6,54	2,80	3,35	2,66
8	40	13,64	11,60	10,69	14,64	13,26
9	40	13,08	14,44	12,85	13,86	24,07
10	40	13,08	14,44	12,85	13,86	24,07
11	40	17,52	18,11	13,28	14,23	20,57
12	40	9,57	8,54	11,10	13,33	19,43
13	40	22,36	23,98	15,96	22,20	34,10
14	40	31,90	21,43	18,56	21,53	39,50
15	40	9,67	12,15	8,01	12,94	19,47
1	60	21,46	22,80	17,78	24,22	19,98
2	60	26,85	53,88	32,38	51,12	36,66
3	60	29,33	61,80	52,27	67,98	49,68
4	60	19,95	41,48	31,20	50,38	30,18
5	60	13,36	26,72	27,66	13,29	19,03
6	60	35,68	74,12	86,54	34,57	52,02
7	60	9,08	35,13	7,62	7,77	7,37
8	60	18,63	30,26	23,99	18,40	16,83
9	60	13,89	25,60	46,60	23,45	37,18
10	60	13,89	25,60	46,60	23,45	37,18
11	60	14,84	33,90	38,40	29,28	26,65
12	60	5,82	17,29	34,40	12,53	21,22
13	60	17,20	35,54	52,85	35,62	35,82
14	60	9,79	44,37	40,75	9,39	35,22
15	60	5,15	11,37	19,81	12,43	10,31

Anexo L - Valores médios obtidos de pH, solo argiloso, nas diferentes profundidades

Leitura	Profund	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
		Concent	Concent	Concent	Concent	Concent
1	20	7,25	7,24	7,20	7,27	7,09
2	20	6,74	6,84	6,64	6,75	6,67
3	20	6,75	6,76	6,93	6,74	6,78
4	20	6,71	6,58	6,44	6,56	6,56
5	20	6,72	6,80	6,69	6,75	6,72
6	20	6,32	6,20	6,30	6,23	6,21
7	20	6,81	6,97	6,88	6,75	6,79
8	20	6,81	6,91	6,84	6,77	6,77
9	20	6,74	6,82	6,84	6,79	6,73
10	20	6,82	7,04	6,81	6,71	6,81
11	20	6,71	6,97	6,63	6,70	6,65
12	20	6,68	6,85	6,76	6,65	6,72
13	20	6,30	6,41	6,31	6,30	6,30
14	20	6,60	6,67	6,53	6,57	6,60
15	20	6,67	6,76	6,57	6,58	6,73
1	40	7,31	7,21	7,21	7,26	7,33
2	40	6,75	6,81	6,69	6,80	6,80
3	40	6,82	6,81	6,82	6,86	6,87
4	40	6,81	6,64	6,47	6,65	6,64
5	40	6,84	6,96	6,81	6,87	6,92
6	40	6,38	6,37	6,43	6,28	6,35
7	40	6,87	6,92	7,08	6,91	6,81
8	40	6,87	6,89	7,01	7,03	6,82
9	40	6,79	6,80	6,90	6,82	6,76
10	40	6,83	6,85	6,93	6,84	6,85
11	40	6,71	6,71	6,70	6,67	6,64
12	40	6,74	6,75	6,82	6,73	6,75
13	40	6,32	6,33	6,40	6,28	6,34
14	40	6,48	6,79	6,67	6,67	6,56
15	40	6,54	6,58	6,64	6,72	6,68
1	60	7,01	7,22	7,13	7,15	7,19
2	60	6,50	6,55	6,74	6,56	6,56
3	60	6,64	6,50	6,85	6,66	6,61
4	60	6,70	6,51	6,37	6,20	6,50
5	60	6,83	6,71	6,74	6,61	6,61
6	60	4,69	6,39	6,31	6,41	6,22
7	60	6,67	6,78	6,69	6,65	6,64
8	60	6,73	6,64	6,71	6,69	6,68
9	60	6,75	6,63	6,66	6,64	6,61
10	60	6,78	6,60	6,59	6,72	6,73
11	60	6,66	6,50	6,36	6,59	6,59
12	60	6,63	6,72	7,11	6,83	6,61
13	60	6,29	6,33	6,22	6,28	6,25
14	60	6,55	6,62	6,46	6,65	6,48
15	60	6,54	6,61	6,55	6,62	6,54

Anexo M - Valores médios obtidos de em “dS m⁻¹” da C.E., solo argiloso, nas diferentes profundidades

Leitura	Profund	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
		Concent	Concent	Concent	Concent	Concent
1	20	0,38	0,43	0,39	0,41	0,36
2	20	0,44	0,56	0,44	0,42	0,59
3	20	0,36	0,43	0,40	0,40	0,36
4	20	0,36	0,40	0,40	0,36	0,36
5	20	0,39	0,46	0,43	0,39	0,41
6	20	0,39	0,48	0,51	0,42	0,41
7	20	0,34	0,44	0,42	0,36	0,40
8	20	0,33	0,40	0,45	0,36	0,36
9	20	0,28	0,33	0,33	0,34	0,33
10	20	0,29	0,35	0,32	0,35	0,33
11	20	0,29	0,30	0,33	0,30	0,36
12	20	0,29	0,29	0,30	0,31	0,33
13	20	0,29	0,32	0,30	0,31	0,36
14	20	0,30	0,29	0,30	0,31	0,31
15	20	0,27	0,32	0,27	0,29	0,31
1	40	0,44	0,42	0,35	0,40	0,38
2	40	0,51	0,51	0,43	0,48	0,46
3	40	0,48	0,53	0,38	0,49	0,43
4	40	0,44	0,49	0,40	0,49	0,36
5	40	0,48	0,54	0,45	0,53	0,46
6	40	0,44	0,53	0,51	0,52	0,45
7	40	0,39	0,41	0,39	0,41	0,32
8	40	0,38	0,38	0,36	0,37	0,36
9	40	0,39	0,32	0,33	0,36	0,33
10	40	0,31	0,31	0,32	0,31	0,32
11	40	0,30	0,31	0,30	0,30	0,29
12	40	0,28	0,30	0,30	0,29	0,31
13	40	0,30	0,31	0,30	0,29	0,32
14	40	0,26	0,33	0,28	0,29	0,28
15	40	0,27	0,29	0,28	0,28	0,30
1	60	0,39	0,37	0,23	0,42	0,34
2	60	0,47	0,50	0,36	0,52	0,41
3	60	0,43	0,52	0,34	0,53	0,43
4	60	0,43	0,49	0,43	0,54	0,44
5	60	0,51	0,62	0,40	0,63	0,47
6	60	0,56	0,46	0,76	0,45	0,42
7	60	0,51	0,64	0,50	0,63	0,47
8	60	0,45	0,56	0,50	0,48	0,48
9	60	0,35	0,42	0,45	0,41	0,41
10	60	0,34	0,43	0,42	0,39	0,41
11	60	0,36	0,46	0,42	0,34	0,35
12	60	0,30	0,44	0,35	0,37	0,33
13	60	0,33	0,37	0,39	0,37	0,41
14	60	0,31	0,40	0,29	0,35	0,36
15	60	0,32	0,40	0,38	0,35	0,40

Anexo N - Valores médios obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, solo argiloso

Volume de Poros	C/Co Observado	C/Co Ajustado	Volume de Poros	C/Co Observado	C/Co Ajustado
0,050	0,000	0,000	1,450	0,007	0,191
0,100	0,000	0,000	1,500	0,015	0,228
0,150	0,000	0,000	1,550	0,130	0,267
0,200	0,000	0,000	1,600	0,216	0,307
0,250	0,000	0,000	1,650	0,362	0,349
0,300	0,000	0,000	1,700	0,485	0,391
0,350	0,000	0,000	1,750	0,581	0,433
0,400	0,000	0,000	1,800	0,673	0,475
0,450	0,000	0,000	1,850	0,701	0,516
0,500	0,000	0,000	1,900	0,758	0,556
0,550	0,000	0,000	1,950	0,761	0,594
0,600	0,000	0,000	2,000	0,726	0,630
0,650	0,000	0,000	2,050	0,719	0,665
0,700	0,000	0,000	2,100	0,768	0,697
0,750	0,000	0,000	2,150	0,733	0,727
0,800	0,000	0,001	2,200	0,746	0,755
0,850	0,000	0,002	2,250	0,721	0,781
0,900	0,000	0,003	2,300	0,739	0,804
0,950	0,000	0,006	2,350	0,769	0,826
1,000	0,001	0,011	2,400	0,758	0,846
1,050	0,001	0,017	2,450	0,771	0,863
1,100	0,001	0,027	2,500	0,783	0,879
1,150	0,001	0,039	2,550	0,798	0,894
1,200	0,002	0,055	2,600	0,814	0,907
1,250	0,003	0,075	2,650	0,830	0,918
1,300	0,004	0,098	2,700	0,855	0,928
1,350	0,004	0,126	2,750	0,880	0,937
1,400	0,006	0,157	2,800	0,896	0,945

Anexo O - Valores médios obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, solo argiloso

Volume de Poros	C/Co Observado	C/Co Ajustado	Volume de Poros	C/Co Observado	C/Co Ajustado
0,050	0,000	0,000	1,450	0,011	0,029
0,100	0,000	0,000	1,500	0,011	0,045
0,150	0,000	0,000	1,550	0,017	0,066
0,200	0,000	0,000	1,600	0,017	0,094
0,250	0,000	0,000	1,650	0,046	0,128
0,300	0,000	0,000	1,700	0,058	0,169
0,350	0,000	0,000	1,750	0,146	0,215
0,400	0,000	0,000	1,800	0,264	0,266
0,450	0,000	0,000	1,850	0,323	0,322
0,500	0,000	0,000	1,900	0,499	0,379
0,550	0,000	0,000	1,950	0,513	0,438
0,600	0,000	0,000	2,000	0,550	0,497
0,650	0,000	0,000	2,050	0,587	0,554
0,700	0,000	0,000	2,100	0,587	0,609
0,750	0,000	0,000	2,150	0,734	0,661
0,800	0,000	0,000	2,200	0,734	0,709
0,850	0,000	0,000	2,250	0,734	0,752
0,900	0,002	0,000	2,300	0,734	0,791
0,950	0,002	0,000	2,350	0,734	0,825
1,000	0,003	0,000	2,400	0,734	0,855
1,050	0,004	0,000	2,450	0,881	0,881
1,100	0,005	0,000	2,500	0,881	0,903
1,150	0,004	0,001	2,55	0,88	0,922
1,200	0,005	0,001	2,6	0,881	0,937
1,250	0,006	0,003	2,65	0,955	0,950
1,300	0,007	0,005	2,7	0,955	0,960
1,350	0,006	0,010	2,75	0,955	0,969
1,400	0,007	0,018	2,8	0,955	0,975

Anexo P - Valores médios obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon potássio, solo arenoso

Volume de Poros	C/Co Observado	C/Co Ajustado	Volume de Poros	C/Co Observado	C/Co Ajustado
0,050	0,000	0,000	1,000	0,026	0,032
0,100	0,000	0,000	1,050	0,058	0,057
0,150	0,000	0,000	1,100	0,117	0,093
0,200	0,000	0,000	1,150	0,190	0,141
0,250	0,000	0,000	1,200	0,249	0,201
0,300	0,000	0,000	1,250	0,293	0,270
0,350	0,000	0,000	1,300	0,293	0,346
0,400	0,000	0,000	1,350	0,440	0,426
0,450	0,000	0,000	1,400	0,440	0,506
0,500	0,000	0,000	1,450	0,587	0,583
0,550	0,000	0,000	1,500	0,587	0,654
0,600	0,000	0,000	1,550	0,734	0,719
0,650	0,000	0,000	1,600	0,734	0,775
0,700	0,001	0,000	1,650	0,881	0,823
0,750	0,001	0,000	1,700	0,881	0,863
0,800	0,002	0,001	1,750	0,955	0,895
0,850	0,003	0,003	1,800	0,955	0,921
0,900	0,004	0,007	1,850	0,955	0,941
0,950	0,009	0,016	1,900	0,955	0,957

Anexo Q - Valores médios obtidos em laboratório e ajustados para a confecção da curva de distribuição de efluentes, para o íon nitrato, solo arenoso

Volume de Poros	C/Co Observado	C/Co Ajustado	Volume de Poros	C/Co Observado	C/Co Ajustado
0,050	0,000	0,000	1,000	0,096	0,081
0,100	0,000	0,000	1,050	0,152	0,136
0,150	0,000	0,000	1,100	0,222	0,210
0,200	0,000	0,000	1,150	0,273	0,298
0,250	0,000	0,000	1,200	0,298	0,395
0,300	0,000	0,000	1,250	0,556	0,495
0,350	0,000	0,000	1,300	0,634	0,591
0,400	0,000	0,000	1,350	0,684	0,679
0,450	0,000	0,000	1,400	0,751	0,755
0,500	0,000	0,000	1,450	0,794	0,818
0,550	0,000	0,000	1,500	0,845	0,868
0,600	0,000	0,000	1,550	0,874	0,907
0,650	0,000	0,000	1,600	0,966	0,936
0,700	0,000	0,000	1,650	0,993	0,957
0,750	0,000	0,001	1,700	0,991	0,971
0,800	0,001	0,002	1,750	0,995	0,981
0,850	0,004	0,008	1,800	0,995	0,988
0,900	0,049	0,020	1,850	0,995	0,992
0,950	0,060	0,043	1,900	0,995	0,995

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)