

BEATRIZ SANTOS CONCEIÇÃO

**MODELAGEM DA DINÂMICA DE NITRATO E POTÁSSIO NO SOLO EM
BANANEIRAS FERTIRRIGADAS: MODELOS PARAMÉTRICOS E
MODELO HYDRUS**

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

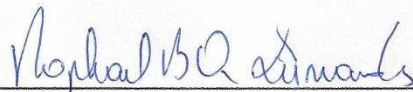
VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

BEATRIZ SANTOS CONCEIÇÃO

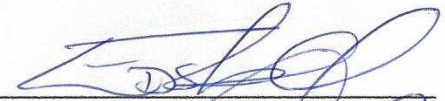
**MODELAGEM DA DINÂMICA DE NITRATO E POTÁSSIO NO SOLO EM
BANANEIRAS FERTIRRIGADAS: MODELOS PARAMÉTRICOS E MODELO
HYDRUS**

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

APROVADA: 28 de novembro de 2016.



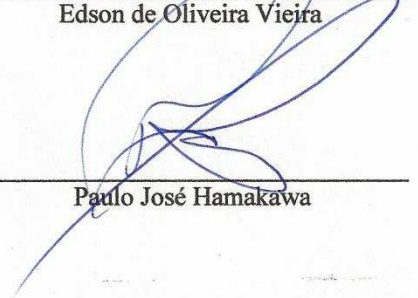
Raphael Bragança Alves Fernandes



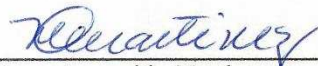
Edson de Oliveira Vieira



Jonathas Batista Gonçalves Silva



Paulo José Hamakawa



Mauro Aparecido Martinez
(Orientador)

*“O SENHOR é meu pastor e nada me
faltará. Deitar-me faz em verdes pastos, guia-
me mansamente a águas tranquilas.”*

Salmos 23:1-2

Dedico este trabalho

A Deus.

A minha mãe.

A meu noivo.

A minha irmã.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me amar tanto.

A Iraildes Santos, minha mãe, pelo grande apoio, pela dedicação e pelo amor.

A meu noivo, pelo amor incondicional, pela ajuda e otimismo.

A minha irmã, por sempre estar ao meu lado, principalmente nos momentos mais difíceis.

Ao professor Mauro Aparecido Martinez, pela orientação, pelo incentivo, pela amizade, pela compreensão e pela confiança.

Ao saudoso professor Antônio Alves, pela orientação e confiança.

A Dr. Eugenio, co-responsável por esta importante conquista, pela amizade, preciosas orientações, compreensão e por guiar-me para os caminhos acadêmicos, científicos.

Ao professor Genelício Crusoé Rocha, pela co-orientação, pelo profissionalismo e pela amizade.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do Curso.

A Coordenação de Apoio à Pesquisa e Extensão (CAPES), pelo apoio financeiro.

A João José da Silva, pela ajuda.

A equipe de pesquisa em Irrigação da EMBRAPA: Eugênio, Junior, Richardson, Rafael, Jorge, Tibério, Tarcísio, Julival, Marcos, Edvaldo, Tell, Mario, Jaqueline(s), Laina, Jamilly e Elves.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, participaram da realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

BEATRIZ SANTOS CONCEIÇÃO, filha de José Maia Conceição e Iraildes Santos Conceição, nasceu em Cruz das Almas – BA, em 25 de março de 1984.

Em agosto de 2006, iniciou o curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Cruz das Almas – BA, concluindo-o em agosto de 2011.

Ainda em agosto de 2011, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas da Universidade Federal de Lavras, em Lavras – MG, na área de Recursos Hídricos, submetendo-se à defesa da dissertação em março de 2013. Em seguida, deu continuidade aos estudos e pesquisas no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa – MG.

Em julho de 2016, tomou posse como professora efetiva no cargo de professor EBBT do Instituto Federal Catarinense – Campus Araquari. Submeteu-se a defesa de tese em novembro de 2016, no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos na Universidade Federal de Viçosa, MG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Função de resposta ao estresse na absorção de água pelas raízes (Frs) em função da tensão da água do solo.....	17
Figura 2 – Esquema de distribuição das sondas de TDR e extratores de solução do solo.....	21
Figura 3 – Relações entre o teor de água volumétrico (θ) e constante dielétrica (K_a) para as duas classes texturais de solo utilizados no experimento	25
Figura 4 – Extração da solução do solo por meio da sucção e coleta da solução do solo.....	28
Figura 5 – Volume de controle e os componentes do balanço de massa.....	30
Figura 6 – Vista do equipamento usado na determinação do teor de água nos solos.....	32
Figura 7 – Vista dos coletores e das linhas de irrigação durante a realização do teste de uniformidade de distribuição de água sobre a superfície do solo.....	32
Figura 8 – Vista do pluviômetro usado na coleta da precipitação.....	33
Figura 9 – Coleta do volume drenado.....	33
Figura 10 – Evolução dos valores de $K(\theta)$ estimados com a variação do teor de água para o solo Areia franca, antes do plantio da bananeira.....	40
Figura 11 – Evolução dos valores de $K(\theta)$ estimados com a variação do teor de água para o solo Argilo-arenoso antes do plantio da bananeira.....	40
Figura 12 – Valores de nitrato e potássio medidos na solução do solo e estimados pelo modelo de Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear, referente às concentrações 3, 6 e 9 g/L no solo areia franca (a e c) e argilo-arenoso (b e d).....	56
Figura 13 – Coeficiente de cultura em função dos dias após o plantio associado aos resultados obtidos por COELHO et al. (2003).....	58
Figura 14 – Equação de ajuste para o coeficiente de cultura (K_c) em função dos dias após o plantio associado aos resultados obtidos por COELHO et al. (2003) aos 30, 60, 90, 120 e 150 dias após o plantio.....	60
Figura 15 – Isolinhas de distribuição dos teores médios de água em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (a, d, g) e das concentrações em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de nitrato (b, e, h) e de potássio (c, f, i) no solo areia franca, para as fases de crescimento vegetativo (a,b,c), floração (d,e,f) e frutificação (g,h,i) no interior do lisímetro após a fertirrigação.....	64
Figura 16 – Isolinhas de distribuição dos teores médios de água em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (a, d, g), nitrato em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (b, e, h) e potássio em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (c, f, i) no solo argilo-arenoso	

para as fases de crescimento vegetativo, floração e frutificação, respectivamente, no interior do lisímetro após a fertirrigação..... 65

Figura 17 – Valores médios de nitrato e potássio medidos na solução do solo e simulado pelo software Hydrus-2D, referente às concentrações 3, 6 e 9 g/L no solo areia franca (a e c) e argilo-arenoso (b e d)..... 71

Figura 18 – Valores médios de nitrato e potássio, referente às concentrações 3, 6 e 9 g/L, medidos na solução do solo com os valores simulado pelo software Hydrus-2D e pelos valores determinados por meio da TDR através do modelo Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear no solo areia franca (a e c) e argilo-arenoso (b e d)..... 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química dos solos estudados no início do experimento.....	22
Tabela 2 – Características físicas do solo do lisímetro.....	23
Tabela 3 – Caracterização biométrica da bananeira nas diferentes fases.....	23
Tabela 4 – Teor de água no solo (\square), em cm^3 , cm^{-3} , a diferentes tensões para os dois solos usados nos lisímetros.....	37
Tabela 5 – Parâmetros do modelo de van Genuchten para os dois solos (argilo-arenoso e areia franca) usados nos lisímetros.....	38
Tabela 6 – Dados de entrada utilizados no modelo computacional Hydrus 2D para simulação do fluxo de água e o transporte de soluto no solo.....	45
Tabela 7 – Parâmetros utilizados pelo modelo para simulação do potencial de água extraído pela raiz.....	46
Tabela 8 – Modelos para estimativa de CEw para solos da textura argilo-arenoso e areia franca.....	50
Tabela 9 – Modelos para estimativa da concentração do nitrato (mg L^{-1}) para solo areia franca e argilo-arenoso.....	52
Tabela 10 – Modelos para estimativa da concentração do Potássio (mg L^{-1}) para solo areia franca e argilo-arenoso.....	53
Tabela 11 – Indicativos estatísticos para comparação dos valores médios de nitrato e potássio medidos na solução do solo e estimados pelo modelo de Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear.....	54
Tabela 12 – Componentes do balanço hídrico da cultura da bananeira nos estádios fenológicos vegetativo, floração e frutificação, no período de 25 de março a 11 de novembro de 2015.....	57
Tabela 13 – Quantidade de nitrato extraído pela planta de bananeira (g/dia) nas diferentes fases fenológicas para os dois solos avaliados.....	61
Tabela 14 – Quantidade de potássio extraído pela planta de bananeira (g/dia) nas diferentes fases fenológicas para os dois solos avaliados.....	62
Tabela 15 – Parâmetros de transporte do nitrato e potássio: fator de retardamento (R), coeficiente dispersivo difusivo (D), número de Peclet (P) e coeficiente de adsorção (KD) para os dois solos estudados.....	68
Tabela 16 – Indicativos estatísticos para comparação dos valores médios de nitrato e potássio medidos na solução do solo e simulado pelo software Hydrus-2D.....	70

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Necessidade hídrica da bananeira.....	3
2.2 Absorção de nitrato e potássio pela cultura da bananeira	4
2.3 Monitoramento da dinâmica de íons no solo.....	5
2.3.1 Uso da TDR no manejo da água e nutrientes no solo.....	6
2.4 Balanço hídrico.....	7
2.5 Balanço de íons no solo.....	8
2.6 Estimativa dos parâmetros de transporte de soluto	12
2.7 Modelagem de água e transporte de soluto	14
2.7.1 Modelo Hydrus.	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 Descrição do experimento	20
3.1.1 Delineamento experimental	20
3.1.2 Implantação e condução do experimento	22
3.1.3 Calibração da sonda de TDR	24
3.2 Ajuste de modelos que relaciona a condutividade elétrica aparente (CEa) e o teor de água no solo (θ) à concentração do nutriente (C_i) na solução do solo.....	26
3.3 Balanço de massa no solo.....	30
3.3.1 Balanço Hídrico do solo	30
3.3.2 Quantificação do íon nitrato e potássio extraído pela cultura da bananeira e distribuição de água e nutriente nas diferentes camadas do perfil do solo.....	35
3.4 Informações computacionais para as simulações pelo modelo computacional Hydrus 2D.....	36
3.4.1 Obtenção dos parâmetros necessários para simulação da dinâmica da água..	37

3.4.2 Dados para as simulações do transporte de soluto.....	40
3.4.3 Simulações com o modelo computacional Hydrus 2D.....	43
3.4.3.1 Calibração.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Estimativa de nitrato na solução do solo em lisímetro de drenagem com auxílio da TDR.....	50
4.2 Componentes do balanço hídrico	57
4.3 Extração do nitrato e potássio pela cultura da bananeira.....	60
4.4 Deslocamento miscível das soluções.....	67
4.5 Simulações das concentrações de nitrato e potássio no solo usando o modelo HYDRUS-2D.....	69
5. CONCLUSÕES	74
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

RESUMO

CONCEIÇÃO, Beatriz Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2016. **Modelagem da dinâmica de nitrato e potássio no solo em bananeiras fertirrigadas: modelos paramétricos e modelo Hydrus.** Orientador: Mauro Aparecido Martinez. Coorientador: Eugenio Ferreira Coelho e Genelício Crusóe Rocha.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a dinâmica do nitrato e potássio na solução do solo, cultivado com bananeira, em condições de fertirrigação, utilizando modelos paramétricos e o modelo computacional Hydrus. As parcelas experimentais foram seis lisímetros de drenagem. Os tratamentos utilizados foram obtidos pela combinação de dois tipos de solos de textura distintas (argilo-arenoso e areia franca) e três concentrações (3,0 g/L, 6 g/L e 9 g/L) para aplicação do nitrato de potássio na água de irrigação em bananeira 'Prata Gorutuba'. A fertirrigação foi realizada semanalmente e a extração da solução do solo foi realizada aplicando-se uma sucção de 70 kPa. Para determinação da condutividade elétrica da solução do solo (CEw), as leituras do CEa e θ foram monitoradas a cada 10 minutos com a TDR, iniciando-se no momento da aplicação da sucção e terminando quando da coleta da solução. Os modelos matemáticos desenvolvidos por Vogeler et al. (1996) e Muñoz-Carpena et al. (2005) foram utilizados para determinar a concentração específica de um determinado íon (C_i) e quantificar os nutrientes em cada posição. O balanço de massa foi realizado por meio da quantificação das entradas e saídas de água e nutriente no lisímetro. O software HYDRUS foi utilizado para simular a dinâmica da água e transporte de nutrientes. Os valores estimados usando o HYDRUS foram validados comparando-os aos valores medidos no campo. Verificou-se que quaisquer uma das três concentrações (3; 6 e 9 g L⁻¹) podem ser utilizadas na fertirrigação com nitrato de potássio sem prejuízos para cultura, conforme os valores de nitrato observados na solução do solo que ficaram dentro dos limites aceitáveis (abaixo de 400 mgL⁻¹). O modelo de Vogeler et al. (1996), adaptado para a relação CEw- C_i do tipo linear, apresenta-se como uma boa opção de ferramenta para estimativa dos valores de nitrato e potássio no perfil do solo. O programa Hydrus apresenta uma caracterização aceitável na simulação do nitrato e potássio e suas oscilações nas diferentes profundidades no perfil do solo, mostrando-se como importante meio para prevenção contra perdas de nutrientes e contaminação das águas subterrâneas.

ABSTRACT

CONCEIÇÃO, Beatriz Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, november 2016. **Modeling of soil nitrate and potassium dynamics in fertirrigated banana: Parametric models and Hydrus model.** Advisor: Mauro Aparecido Martinez. Co-advisors: Eugenio Ferreira Coelho and Genelício Crusoé Rocha.

The objective of the present work was to evaluate the nitrate and potassium dynamics in the soil solution, cultivated with banana, under fertirrigation conditions, using parametric models and the Hydrus computational model. The experimental plots were six lysimeters of drainage. The treatments used were obtained by the combination of two types of different textured soils (sandy clay and france sand) and three concentrations (3,0 g / L, 6 g / L and 9 g / L) for the application of potassium nitrate Irrigation water in banana 'Prata Gorutuba'. Fertigation was performed weekly. The extraction of the soil solution was carried out by applying a suction of 70 kPa. To determine the electrical conductivity of the soil solution (CEw), the CEa and θ readings were monitored every 10 minutes with the TDR, starting at the time of suction application and ending at the time of collection of the solution. The mathematical models developed by Vogeler et al. (1996) and Muñoz-Carpena et al. (2005), were used to determine the specific concentration of a given ion (C_i) and to quantify the nutrients at each position. The mass balance was performed by quantifying the inputs and outputs of water and nutrient in the lysimeter. HYDRUS software was used to simulate water dynamics and nutrient transport. Values estimated using HYDRUS were validated by comparing them to the values measured in the field. It was found that any of the three concentrations (3, 6 and 9 g L⁻¹) can be used in fertirrigation with potassium nitrate without crop damage, according to the nitrate values observed in the soil solution which were within acceptable limits (Below 400 mgL⁻¹). The model of Vogeler et al. (1996) adapted for the linear-CEw- C_i ratio presents as a good tool choice for estimation of the NO₃⁻ and K + values in the soil profile. The Hydrus program presents an acceptable characterization in the simulation of NO₃⁻ and K + and its oscillations in the different depths in the soil profile, showing itself as an important means for prevention against nutrient losses and contamination of groundwater.

1. INTRODUÇÃO

O uso da fertirrigação tem aumentado progressivamente, com destaque para a região Nordeste, especialmente em método de irrigação localizada. Contudo, ainda são raras as informações quanto ao seu correto manejo, fato que aumenta consideravelmente a preocupação com possíveis impactos (agronômicos, ambientais, etc.) decorrentes do uso intensivo dessa técnica sobre o solo e a água.

O processo da dinâmica do nitrato e potássio nos solos tem sido estudado devido à alta mobilidade desses íons no solo, acarretando em perdas de nutrientes e contaminação das águas subterrâneas. Por esta razão, nota-se a importância de se estabelecer um método capaz de monitorar de forma contínua a distribuição de água e íons em campos agrícolas para facilitar o manejo da fertirrigação nos solos cultivados.

Em áreas fertirrigadas, o monitoramento da variação espacial e temporal do teor de água (θ), da condutividade elétrica do solo (CEs), da condutividade elétrica da solução do solo (CEss) e da concentração iônica (C_i) possibilita estimar a perda de água por percolação profunda, a evapotranspiração da cultura, além de determinar as regiões de extração de nutrientes pelas plantas e as possíveis perdas de nutrientes por lixiviação (SANTANA et al., 2007).

Considerando-se os avanços computacionais dos últimos anos, uma alternativa viável é o uso dos modelos analíticos e numéricos que prevê processos de transferência da água e solutos entre a superfície do solo e o lençol freático. Dentre os modelos computacionais disponíveis na literatura, o modelo Hydrus vem se destacando pela precisão dos resultados obtidos (NIMMER et al. (2009), SILVA et al. (2015), KANZARI et al. (2012), PINHO e MIRANDA (2014), RAMOS et al. (2013)) e por sua interface gráfica que possibilita uma boa interação com os diferentes tipos de usuários. No entanto, a abordagem para calibração e validação do modelo pode variar muito, dependendo da complexidade do experimento.

Para o monitoramento da distribuição de água e solutos iônicos no solo, a reflectometria no domínio do tempo (TDR) tem sido usada com sucesso em várias pesquisas (VOGELER et al. 1996; PERSSON e UVO, 2003; SANTOS et al. 2012), devido à relação existente entre a condutividade elétrica aparente do solo e a condutividade elétrica da solução do solo (CE_w) e entre CE_w e a concentração iônica (C_i).

Ao se estimar esses íons utilizando-se a TDR, pode-se determinar a sua distribuição em tempo real e em curtos intervalos de tempo (minutos). Assim, torna-se possível a realização de um balanço das concentrações de nitrato e potássio no solo. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar a dinâmica do nitrato e potássio na solução do solo, cultivado com bananeira, em condições de fertirrigação, utilizando modelos paramétricos e o modelo computacional Hydrus, a fim de alcançar os seguintes objetivos específicos:

1. Estimar a concentração de nitrato e potássio na solução de dois tipos de solo (argilo-arenoso e areia franca) submetidos à aplicação de diferentes concentrações do nitrato e de potássio na água de irrigação, a partir de dados de teor de água e de condutividade elétrica aparente do solo, determinados com auxílio da TDR;

2. Avaliar a quantidade de nitrato e potássio extraído pela cultura da bananeira e sua distribuição no perfil do solo, em lisímetro de drenagem;

3. Calibrar e validar o modelo Hydrus para estimar o transporte de nitrato e potássio na solução do solo sob condições de campo; e

4. Comparar os dados experimentais dos valores médios de nitrato e potássio, medidos na solução do solo (em lisímetro de drenagem) cultivado com bananeira, com os dados estimados por meio da TDR, através dos modelos matemáticos desenvolvidos por Vogeler et al. (1996) e Muñoz-Carpena et al. (2005), além do auxílio do programa computacional HYDRUS 2D.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Necessidade hídrica da bananeira

Das diversas fruteiras tropicais irrigadas, a bananeira é uma das mais sensíveis ao estresse hídrico, em razão de seu elevado índice de área foliar (resultando em alta transpiração) e seu sistema radicular muito superficial. Estes fatores tornam a bananeira uma espécie de considerável resposta fisiológica à escassez de água (VOSSELEN et al., 2005). Conforme Medeiros et al. (2015), em função de sua morfologia e da hidratação de seus tecidos, a bananeira apresenta um elevado consumo de água. As maiores produções estão associadas a uma precipitação anual acumulada de aproximadamente 1.900 mm, bem distribuídas no decorrer do ano (ALVES, 1997). Segundo o tipo de solo e as condições climáticas, o consumo de água pela bananeira pode variar de 3 a 8 mm dia⁻¹ (FREITAS et al., 2007).

Apesar disso, grande parte das regiões onde são cultivadas as bananeiras sofre com precipitações insuficientes para atenderem às necessidades hídricas da planta, tornando-se necessário o uso de irrigação suplementar, como ocorre no semiárido nordestino (MEDEIROS et al., 2013). Quando a bananeira é submetida à alta demanda evapotranspirométrica, típica dos meses mais quentes, a sua transpiração excede a capacidade de absorção de água pelas raízes e a planta murcha temporariamente, mesmo com solo úmido (DONATO et al., 2015). Assim, ocorre um prejuízo à produção, haja vista a excessiva exigência da bananeira em relação à água. Nestes casos, sua produtividade tende a aumentar com a transpiração, que depende da disponibilidade de água no solo.

Figueiredo et al. (2006), em estudos com a bananeira Prata Anã, observaram que a lâmina de 120% da ETo foi a que promoveu maior produtividade para as plantas mãe e filha no primeiro e segundo ciclos, apresentando produtividade de 10.267 kg ha⁻¹ na planta mãe e na planta-filha 12.833 kg ha⁻¹. Também relatam que o tratamento de 120% da ETo apresentou maiores valores de eficiência de uso da radiação e eficiência energética, o que pode explicar o grande acréscimo da produtividade.

2.2 Absorção do nitrato e potássio pela cultura da bananeira

A bananeira apresenta crescimento lento até o quarto mês, com pequena absorção de nutrientes e demanda por água. No entanto, do quarto mês até o florescimento, o crescimento é rápido e necessita de maiores quantidades de água e nutrientes para seu bom desenvolvimento e produção de frutos (COELHO et al., 2014).

Os nutrientes exigidos pela planta são, principalmente, nitrogênio e potássio, não só por produzir grande massa vegetativa, mas também por apresentar elevadas quantidades de elementos absorvidos pela bananeira e exportados pelos frutos (SILVA et al., 1999).

A quantidade de nutrientes absorvida pela bananeira Prata-Anã, por hectare, em um ciclo de produção, é de aproximadamente 136,4 kg de nitrogênio, 10,1 kg de fósforo, 418,5 kg de potássio, 61,6 kg de magnésio, 5,8 kg de enxofre, 309,5 g de boro, 26,9 g de cobre e 148,1 g de zinco (FARIA, 1997).

O nitrogênio (N) é importante para o crescimento vegetativo da planta, sobretudo nos três primeiros meses, quando o meristema está em desenvolvimento e favorece a emissão e o progresso dos perfilhos, além de aumentar a matéria seca (BORGES & OLIVEIRA 2000). Borges et al. (2002) recomendam 200 kg ha⁻¹ de nitrogênio na fase de formação e de 160 a 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ na fase de produção da bananeira, de acordo com a produtividade esperada.

Se usado em excesso, o nitrogênio gera no fruto da bananeira uma qualidade pobre em termos de sólidos solúveis totais, cor, conteúdo mineral e curta vida útil pós-colheita. Diante destas condições, a banana pode se tornar mais suscetível aos efeitos das doenças e pragas (GANESHAMURTHY et al., 2011), além de também retardar a frutificação, produzir cachos com pencas muito espaçadas e elevar a suscetibilidade aos danos decorrentes do manuseio e transporte (BARBOSA, 2012). A deficiência deste nutriente causa a redução nos teores de clorofila e interferem significativamente nos processos de fotossíntese, absorção iônica, respiração, multiplicação e diferenciação celular (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Quando associado ao potássio (K), o nitrogênio influencia não somente o número de frutos e de pencas por cacho, como também o desenvolvimento radicular (GOMES, 1988). O potássio está envolvido no metabolismo do nitrogênio, transporte de açúcar, extração, transporte e uso da água e resistência ao estresse (KRAUSS,

2005), além de participar da translocação dos fotossintatos e do balanço hídrico. Dessa maneira, ele se consagra como fundamental na produção de frutos, pelo aumento dos teores de sólidos solúveis, melhorando a qualidade dos mesmos (BORGES & OLIVEIRA 2000).

A absorção de potássio pela bananeira se dá em função da quantidade de matéria seca produzida pela planta (HOFFMANN et al., 2010) e torna-se mais eficiente em áreas irrigadas, especialmente sob fertirrigação (TEIXEIRA et al., 2011). Este nutriente corresponde, aproximadamente, a 62% do total de macronutrientes e 41% do total de nutrientes da planta. Além disso, mais de 35% do potássio total absorvido é exportado pelos frutos (BORGES & OLIVEIRA, 2000). Segundo Silva et al. (2003a), nos vários países produtores de banana, as doses de potássio recomendadas variam de 100 a 1200 kg de K_2O $ha^{-1}ano^{-1}$ e a de nitrogênio de 100 a 600 kg de N $ha^{-1}ano^{-1}$.

2.3 Monitoramento da dinâmica de íons no solo

A fertirrigação é uma técnica que permite alterações rápidas na quantidade de adubos aplicados. Em função disso, o monitoramento passa a ser ferramenta de extrema importância por possibilitar, ainda durante o ciclo da cultura, ajustes necessários na quantidade de fertilizantes aplicados e evitar flutuações das quantidades de sais na solução do solo (LANDIS, 1989). Dentro deste contexto, o monitoramento e a modelagem temporal tornam-se indispensáveis para subsidiar ações de manejo e conservação do solo (SILVA et al., 2015).

Vários são os métodos usados no monitoramento da concentração de sais do solo. O monitoramento dos íons a partir de análise do solo tem como inconvenientes a necessidade de amostras destrutivas e a demora na obtenção dos resultados. As determinações feitas a partir do extrato de saturação não representam a composição iônica do solo em tempo real e a extração da solução do solo por meio de cápsulas porosas é destaque em vários trabalhos (SILVA JÚNIOR et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011; MARQUES et al., 2012).

A análise da solução do solo, obtida por extratores de cápsula porosa, pode ser considerada uma ferramenta auxiliar para monitorar e avaliar a disponibilidade de nutrientes em sistemas que usam a fertirrigação (SOUZA et al., 2012). Conforme Souza et al. (2013), o uso de extratores de cápsula porosa tem sido realizado

principalmente por representar as condições reais de umidade do solo, estimar os elementos disponíveis às plantas e possibilitar a coleta da solução diretamente no campo, de forma não destrutiva. Dessa forma, permite a repetição no mesmo local e favorece o monitoramento das condições iônicas do solo por longos períodos.

2.3.1 Uso da TDR no manejo da água e nutrientes no solo

No monitoramento da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) e do teor de água do solo, a reflectometria no domínio do tempo (TDR) tem sido aplicada com sucesso em várias pesquisas (VOGELER et al., 1996; PERSSON & UVO, 2003; SANTOS et al., 2012).

Devido à relação existente entre a condutividade elétrica aparente do solo e a condutividade elétrica da solução do solo (CE_w), bem como entre CE_w e a concentração iônica (C_i), é possível usar a TDR para monitorar a distribuição de água e solutos iônicos no solo. Porém, a TDR não determina, de forma direta, a CE_w e a concentração de íons (PERSSON & UVO 2003). Estudos revelaram que é possível relacionar, satisfatoriamente, a CE_w com a C_i (MUÑOZ-CARPENA et al., 2001), obtendo-se bons ajustes para modelos lineares. No entanto, é necessária a calibração de modelos.

Alguns modelos podem ser aplicáveis a nutrientes essenciais, como o nitrato e o potássio. Ao se estimar esses íons utilizando-se a TDR, pode-se determinar a sua distribuição em tempo real e em curtos intervalos de tempo (minutos), tornando possível a realização dos balanços de nitrato e potássio no solo.

Para aplicação da TDR no monitoramento da distribuição de íons no solo, torna-se necessária a calibração de alguns modelos que, ao serem conjugados entre si, possibilitam a estimativa da concentração iônica. Rhoades et al. (1989), Heimovaara et al. (1995), Vogeler et al. (1996) e outros estudiosos propuseram modelos que relacionam a condutividade elétrica da solução do solo com os valores de teor de água e condutividade elétrica do solo. Estes modelos podem ser calibrados para cada tipo de solo e nutriente aplicado para estimar a condutividade elétrica da solução do solo CE_w em função de CE_a e θ .

Diversos trabalhos realizados em laboratórios e em ensaio com colunas de solo citam a viabilidade da técnica da TDR para obtenção do teor de nitrato e potássio na solução solo (SANTANA et al., 2007; SANTOS et al., 2010;

PONCIANO, 2012). Não obstante, as medições de campo são indispensáveis, uma vez que os modelos matemáticos necessitam de calibrações e validações locais (RIVERA et al., 2008).

2.4 Balanço hídrico

O movimento cíclico da água no solo envolve sua penetração pela infiltração, continua com a armazenagem temporária na zona do sistema radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da extração de água pelas raízes (HILLEL, 1970). Esses processos que envolvem fluxos de água são interdependentes e, na maioria das vezes, ocorrem simultaneamente (REICHARDT, 1985).

A água é um dos principais fatores que limitam o desenvolvimento da cultura, com especial importância em determinadas fases fenológicas, nas quais sua deficiência pode comprometer de maneira mais ou menos significativa a produtividade. A limitação de água é um fenômeno universal e representa grande obstáculo na produção de banana (VANHOVE et al., 2012; RAVI et al., 2013; MUTHUSAMY et al., 2014; KISSEL et al., 2015). Além da precipitação, outra variável agrometeorológica de grande importância para o desenvolvimento da cultura é a evapotranspiração (STEDUTO et al., 2012).

Para Marengo et al. (2011), os extremos de chuva sugerem tendência de aumento na duração da deficiência hídrica do Nordeste brasileiro em praticamente todo o ano, isto é, tendência à “aridização” da região até o final do século XXI. Dada esta adversidade, é fundamental determinar a quantidade de água armazenada no solo e a que está disponível à cultura para, através desta informação, calcular a possibilidade de estresse hídrico na planta (RICHETTI et al., 2014).

O método do balanço hídrico permite o acompanhamento das relações hídricas durante as distintas fases de crescimento e desenvolvimento da cultura, tornando-o, desta forma, uma ferramenta importante para o manejo racional dos recursos e se caracterizando como uma fundamental maneira de auxiliar no manejo da cultura (OLIVEIRA et al., 2010). Para realização do balanço hídrico, calculam-se, até a profundidade explorada pelas raízes, todas as entradas de água no solo (precipitação, irrigação, ascensão capilar), assim como todas as saídas devem ser detalhadas – evapotranspiração, drenagem profunda, escoamento superficial e

subsuperficial (CRUZ, 2003). Se a quantidade de água a entrar no período de tempo considerado for superior ao volume que sai durante o mesmo intervalo considerado, o saldo será positivo; caso contrário, será negativo. O resultado do balanço corresponde à variação da armazenagem de água no volume, ocorrida no intervalo de tempo considerado (MOTA, 2010).

O conhecimento em relação ao modo como as plantas utilizam a água no solo e como este consumo é afetado pela variabilidade espacial e temporal da armazenagem de água pode subsidiar o estabelecimento de estratégias eficazes de manejo das culturas, visando o melhor uso possível das reservas de água no solo (MORAES et al., 2015). Estas estratégias podem envolver apenas práticas de manejo culturais ou do solo (FIDALSKI et al., 2010), mas também a suplementação hídrica por meio da irrigação (PALARETTI, MANTOVANI, SEDIYAMA, 2011; SAMPAIO et al., 2010).

O balanço de água na zona radicular das culturas tem sido empregado principalmente em experimentos com uso de lisímetros, que provê precisão na determinação dos componentes, além da contabilização dos termos de drenagem do perfil (SILVA et al., 2003b).

Conforme Santos et al. (2009), a prerrogativa do uso de lisímetros de drenagem, em confronto ao uso do balanço hídrico no campo, está relacionada a uma avaliação mais precisa do termo de fluxo de drenagem vertical, que pode ser medido diretamente ao se isolar os fluxos subterrâneos laterais interferentes (dada a presença das paredes) e ao baixo custo de implantação do equipamento.

No cálculo do balanço hídrico, devem ser consideradas algumas características específicas do lisímetro, como as condições de contorno laterais e os limites superior e inferior, que permitem isolar a zona radicular das culturas a partir do seu ambiente, controlando os processos de entrada/saída e medindo com maior precisão os diferentes termos na equação do balanço de água no solo (ALLEN et al., 1998).

2.5 Balanço de íons no solo

Os íons podem reagir entre si e interagir com a matriz, envolvendo uma série de processos. Tais interações são fortemente influenciadas pela acidez, temperatura, potencial de oxidação-redução, composição e concentração da solução

do solo (HILLEL, 2004). A concentração dos elementos na solução do solo é controlada por vários parâmetros físico-químicos, tais como: pH, complexação iônica e capacidade de troca catiônica.

A concentração dos íons é variável conforme o tipo de solo – com exceção de solos salinos, nos quais este valor é normalmente pequeno. Além disso, pode variar de um local para outro num mesmo tipo de solo, devido à variabilidade existente no solo e a curtas distâncias, em decorrência dos gradientes de concentração estimulados pela absorção de nutrientes por parte dos vegetais. A concentração iônica da solução em solos de regiões tropicais é bem mais baixa devido ao mais avançado grau de intemperismo destes solos do que os de regiões temperadas. Tanto as formas como as quantidades desses elementos na solução representam o resultado do somatório de efeitos simultâneos da formação de complexos solúveis e de reações de oxidação, redução, adsorção, precipitação e dissolução (PAVAN, 1983).

A absorção de nutrientes pelas plantas, lixiviação, volatilização, desnitrificação e erosão atuam diminuindo a concentração do elemento na solução do solo. Já o aumento da concentração na solução do solo é obtido através da decomposição da matéria orgânica, da intemperização dos minerais primários e secundários e, principalmente, da adição de fertilizantes, orgânicos ou minerais.

Segundo Prado (2008), apesar do processo de absorção de nutrientes ser específico e seletivo, existe uma competição entre eles, podendo ser favorável (sinérgica) quando um íon auxilia a absorção de outro, ou desfavorável (antagônica) quando a absorção de um íon é prejudicada pela presença de outro. Marschner (2012) afirma que, na realidade, os transportadores iônicos raramente são específicos e os íons podem competir diretamente pelo transporte. Esta competição é influenciada pelas propriedades do próprio transporte e pela diferença na concentração dos íons na solução. Espécies, cultivares, como também o estágio de desenvolvimento da planta, influenciam os efeitos antagônicos e sinérgicos.

Quando se utiliza a fertirrigação, é importante acompanhar a distribuição e as transformações dos nutrientes no perfil do solo, pois isto permite estabelecer ou ajustar a aplicação dos fertilizantes, além de prevenir danos ambientais – como a salinização dos solos e a contaminação das águas (BARROS et al., 2010). O movimento e as transformações do nitrogênio no perfil do solo dependerão dos atributos químicos, da massa aplicada, da concentração do fertilizante nitrogenado na

água de irrigação e da fonte de nitrogênio (COELHO et al., 2014). 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 água na frente de umedecimento. Assim, o nitrato tanto pode movimentar-se para baixo, sob condições de excessiva precipitação ou irrigação, quanto para cima, por capilaridade, durante estações secas (MUCHOVEJ e RECHCIGL, 1994).

Oliveira et al. (2000) concluíram que a adsorção de NO_3^- é sempre maior nos horizontes subsuperficiais do solo, independentemente da sua carga elétrica líquida. Já Cahn et al. (1992) verificaram que a adsorção de NO_3^- variou de pequenas quantidades na camada de 0-15cm a até 25-50% na camada 90-120 cm, ou seja, a adsorção de NO_3^- aumentou com a profundidade.

Segundo Donagemma et al. (2008), deve-se ter cuidado com as dosagens de nitrogênio na solução injetora em fertirrigações para evitar perdas do gás por lixiviação e reduzir os riscos de contaminação da água subterrânea por nitrato. HE et al. (2011) afirmam que a lixiviação está fortemente relacionada com a textura do solo, umidade e a disponibilidade de NO_3^- na solução do solo. Solos de textura arenosa e de baixo conteúdo de MO tendem a permitir maiores perdas de NO_3^- por lixiviação, enquanto as menores perdas devem ocorrer em solos argilosos (MUCHOVEJ e RECHCIGL, 1994).

O NO_3^- pode ser lixiviado, mesmo em solo argiloso, se houver alta concentração na solução do solo e ocorrer uma chuva moderada ou de grande intensidade. Caso aconteça, a chuva desce ligeiramente por fissuras do solo, de maneira a impedir a difusão do íon para seu interior. Segundo Costa et al. (1999), em solos arenosos, as perdas de nitrato por lixiviação são mínimas quando o nitrogênio é aplicado em taxas menores que $200 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ e aumenta rapidamente em taxas maiores. Nesses solos, os limites de potabilidade (10 mgL^{-1}) da água subterrânea foram suplantados para taxas de aplicação entre 350 e $400 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em áreas cultivadas com pastos.

A eficiência da utilização do nitrogênio adicionado ao solo se refere ao grau de recuperação desse elemento pelas plantas, considerando as perdas que geralmente ocorrem por lixiviação em anos chuvosos e por volatilização em anos secos (SILVA, 2015). Além das perdas, as quantidades de nitrogênio no solo são insuficientes

(GOMES, 1988), tornando necessária a aplicação de adubos nitrogenados sintéticos ou de fontes alternativas, como os adubos verdes. Rosa et al. (2005) acrescentam que, para evitar perdas, o melhor momento de aplicar o adubo nitrogenado é antes de uma precipitação pluvial de média intensidade, pois a dissolução e o transporte de nitrogênio para as raízes serão rápidos.

A água disponível no solo é essencial para que as plantas respondam à aplicação de nitrogênio. Ao mesmo tempo, elas devem estar adequadamente nutridas com N para utilizarem eficientemente a água do solo. Além disso, a água afeta desde os mecanismos de transporte do nitrogênio no sistema solo-plantas, até o desenvolvimento vegetativo, o que determina as respostas à adubação nitrogenada (OLSON 1984). Segundo Havlin et al. (2005), a dinâmica do nitrogênio e do potássio no sistema solo-plantas é fortemente condicionada pela água disponível.

Thomas e Bertsch (1985) afirmaram que a umidade é um fator crítico para o movimento do K no solo e sua absorção pelas plantas. Os locais de maiores concentrações de K^+ coincidiram com os locais de maiores valores de umidade, evidenciando seu caminhar por fluxo de massa (ZANINI, 1991). Significa afirmar que a distribuição de potássio e água no solo correlacionaram-se, indicando a elevada possibilidade de controle da localização do referido íon no solo com o uso da fertirrigação e da irrigação (MALAVOLTA, 1980). Rivera et al. (2008) observaram que a distribuição do elemento é significativamente afetada pelas propriedades físico-hídricas do meio e pela taxa de aplicação de água no solo.

Miranda et al. (2010) afirmam que os mecanismos controladores do transporte de potássio no solo são baseados na rápida troca com outros cátions. Nicochelli et al. (2012) estudaram a adsorção do potássio e observaram que o íon K^+ teve elevada afinidade com a amostra de solo com maior percentual de argila e CTC. Esses autores concluíram que, na maioria das concentrações de KCl adicionadas, o material caulínico adsorveu quantidade superior de K do que a amostra de solo laterítico. Tal fato pode ser explicado pela alta capacidade de troca catiônica e pela predominância de cargas superficiais negativas do material caulínico, quando comparado aos minerais oxídicos (SANTOS et al., 2006). Os solos com alta capacidade de troca têm grande habilidade em reter o potássio aplicado; entretanto, a lavagem deste elemento é frequentemente um problema em solos arenosos (LIBARDI, 2005).

Quando a quantidade de potássio no solo é relativamente pequena em 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 solo decresce e a velocidade de transporte do potássio se incrementa (MIRANDA et al., 2010).

A compreensão destas interações poderia ajudar a melhorar as produções, já que isto é especialmente importante para aqueles solos que requerem não só potássio, mas também nitrogênio, fósforo, magnésio, cálcio e zinco para se obter produções econômicas máximas das culturas (PEIXOTO, 2013).

2.6 Estimativa dos parâmetros de transporte de soluto

Para melhor compreensão de como se comportam os solutos no solo, no que tange à sua dinâmica, é necessário que alguns parâmetros de transporte sejam devidamente estabelecidos. Os parâmetros usualmente obtidos para a compreensão dos processos envolvidos no deslocamento de um íon no solo são: a velocidade da água nos poros (V_p), o fator de retardamento (R) e o coeficiente de dispersão-difusão (D).

O fator de retardamento (R) pode ser definido como a resistência oferecida pelo solo à movimentação de um soluto. Ele está relacionado à defasagem existente entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução percolante. Por ser um parâmetro que indiretamente expressa a capacidade do solo em reter íons, dependerá das interações entre a fase líquida e sólida que ocorram durante a percolação da solução do solo (VALOCCHI, 1984).

Matos et al. (1998) afirmam que o retardamento depende da capacidade do meio poroso em reter ou adsorver determinado soluto existente em uma solução deslocadora. O valor de R pode ser menor que 1, indicando exclusão iônica e/ou ocorrência de regiões onde o líquido estiver relativamente imobilizado, tal como quando estiver dentro de agregados e, portanto, não contribuindo com o fluxo de massa (RUIZ et al., 2010). Por outro lado, quando o valor é maior que 1,0, isto é, a curva de efluente apresenta-se deslocada para a direita, significa que, ao escoar através do perfil do solo, parte do soluto é adsorvida, resultando num fator de

retardamento acima da unidade. Portanto, quanto maior é o fator de retardamento, maior será a interação soluto-solo (FERREIRA et al., 2006).

O mecanismo de difusão-dispersão hidrodinâmica engloba os mecanismos de dispersão mecânica e de difusão. A difusão iônica origina-se em resposta à existência de gradientes de concentração. A dispersão mecânica é um movimento proporcionado por variações na velocidade de deslocamento da solução, através de poros individuais e entre poros de diferentes tamanhos, formas e direções (NIELSEN et al., 1986). À medida que o soluto se movimenta no meio poroso, os processos de difusão e dispersão agem criando uma frente de avanço difusa do soluto.

Valores mais elevados dos coeficientes de difusão-dispersão estão relacionados às menores inclinações das curvas de efluente e, conseqüentemente, ao alargamento da faixa de mistura entre as soluções deslocadora e deslocada no perfil do solo, tornando os acréscimos na concentração relativa, baixos, para acréscimos no número de volume de poros (NIELSEN e BIGGAR, 1962).

O número de Peclet (Pe) utilizado no estudo do transporte de soluto através de um meio poroso permite identificar qual mecanismo (convecção-dispersão ou difusão) predomina no processo de transferência de solutos, manifestando a relação entre a velocidade de transporte por convecção e por difusão molecular.

Gonçalves et al. (2008), avaliando a determinação dos parâmetros de transporte por meio do uso de nitrato de potássio e cloreto de potássio em Latossolo Vermelho-Amarelo, observaram, em termos médios, valores de fator de retardamento de nitrato e potássio de 1,2 e 1,8, respectivamente. Com esses resultados, concluíram que o potássio exibiu uma maior adsorção em relação ao nitrato. Pinho (2014), buscando conhecer os valores do fator de retardamento referentes aos solos Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Nitossolo Vermelho (NV), avaliou as curvas de distribuição de efluentes por meio do uso da solução com potássio (2000 mg L^{-1}) e encontrou valores iguais a 1,640 e 2,476, respectivamente. Segundo o autor, o maior valor encontrado para o potássio no solo NV indica forte interação entre o cátion e as cargas negativas do solo. Valores similares, variando de $1,055 \pm 0,009$ a $2,747 \pm 0,001$, também foram encontrados por Alcântara & Camargo et al. (2010), trabalhando com nitrato de potássio.

Coelho et al. (2000), trabalhando com nitrato de amônio em Latossolo Vermelho distrófico e cinco classes de agregados (2,0-1,0; 1,0-0,5; 0,5-0,25; 0,25-0,105; e $<0,105 \text{ mm}$), encontraram valores de fator de retardamento iguais a 2,6, 2,3,

3,0, 2,8 e 3,0 respectivamente. Com isso, relatam que os maiores valores dos fatores de retardamento ocorreram nos agregados de menor tamanho, indicando maior retenção do amônio. Por fim, os referidos pesquisadores observaram também a superposição das curvas obtidas por meio dos modelos teóricos, o que indicou que o transporte do amônio no solo se deu, predominantemente, por dispersão.

2.7 Modelagem do movimento de água e do transporte de soluto

Os altos custos envolvidos nas pesquisas de campo e os avanços computacionais têm contribuído para ampliar a utilização dos modelos matemáticos, possibilitando simulação do movimento de água e soluto no solo. O uso de modelos tem como principal vantagem a economia de tempo e de capital investido, uma vez que experimentos de campo e laboratórios são, geralmente, laboriosos, caros e morosos (MARTINEZ et al., 2010). Apesar disso, vale salientar que as medições de campo são indispensáveis, uma vez que os modelos matemáticos necessitam de calibrações e validações locais (RIVERA et al., 2008).

Antonopoulos (2001) afirma que os modelos oferecem uma compreensão da relação entre a quantidade e o tempo de aplicação de água e nutrientes, a absorção radicular de águas e nutrientes pelas culturas, o rendimento e o risco de poluição do solo e das águas subterrâneas. Essas ferramentas têm aplicações na estimativa do armazenamento de água no solo, do fluxo vertical e lateral de água e solutos (MINELLA et al., 2010). Contudo, faz-se necessário a escolha de um modelo apropriado que represente o que realmente acontece no sistema solo-planta-atmosfera.

As técnicas de resolução de equações e os recursos computacionais disponíveis permitem prever os riscos de contaminação e os impactos que os componentes químicos podem causar ao sistema solo-água-planta (GARCIA et al., 2012).

É indispensável a utilização de modelagem multidimensional para desenvolver práticas de fertirrigação, otimizadas para almejar uma eficiência nutricional ideal para as plantas. Desta maneira, nas últimas décadas surgiram vários modelos analíticos e numéricos para predizer os processos de transferência da água e de solutos entre a superfície do solo e o lençol freático (PINHO e MIRANDA, 2014).

2.7.1 Modelo Hydrus

Desenvolvido por pesquisadores dos U. S. Salinity Laboratory e da Universidade da Califórnia em Riverside, o programa Hydrus foi utilizado para resolver uma ampla variedade de problemas, como, por exemplo, a simulação do balanço hídrico, estimação de recarga, desempenho do solo em atividades de engenharia, lixiviação de nitratos e pesticidas e o transporte de hidrocarbonetos no solo (SCANLON, 2004).

O pacote HYDRUS resolve numericamente a equação de Richards e as equações do tipo advecção/dispersão para transporte de calor e solutos. O movimento de água no solo é calculado através da solução numérica da equação de Richards, pelo método das diferenças finitas (CELIA et al., 1990). O Hydrus estima os parâmetros de modo iterativo, buscando aproximar os dados estimados aos dados medidos. Por fim, o Hydrus apresenta o resultado dos parâmetros otimizados, estatísticas de qualidade da estimativa e a simulação do fluxo com os parâmetros otimizados.

Em sua modelagem, compreende estudos para a estimativa dos parâmetros físicos do solo, conforme discutido no trabalho de CALDWELL et al. (2012), que também utilizaram a modelagem inversa com o HYDRUS para determinar as propriedades hidráulicas de solos.

O fluxo de água bidimensional no solo em meio poroso variavelmente saturado é descrito pela fórmula modificada da equação de Richards, dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(K_r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial K}{\partial z} - WU(h, r, z) \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

θ = teor volumétrico de água [L^3L^{-3}],

h = potencial mátrico da água no solo [L],

t = é o tempo [T],

r = a coordenada radial [L],

z = a coordenada vertical considerada positiva para cima [L],

K = é a função da condutividade hidráulica do solo não saturado [LT^{-1}] e,

WU= (h, r ,z) função que define a absorção de água pela raiz [T⁻¹].

Esta equação é resolvida no modelo HYDRUS-2D, utilizando o método de elementos finitos de Galerkin, sendo a discretização espacial feita através de uma malha triangular. Dependendo do tamanho do problema, as equações da matriz resultante da discretização são resolvidas pelo método da eliminação de Gauss para matrizes em faixas ou pelo método do gradiente conjugado para matrizes simétricas (PAZ, 2011).

Assume-se que os solutos podem existir em três fases: gasosa, dissolvido na água do solo e adsorvido na matriz do solo (matéria orgânica e superfícies minerais), sabendo-se que os processos de produção e “transformação” podem ser diferentes em cada fase. Os solutos podem ser transportados por convecção e dispersão na fase líquida, bem como por difusão na fase gasosa (SANTOS, 2014).

O transporte de soluto pode ser descrito usando a equação de advecção-dispersão, dada por:

$$\frac{\partial(R\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial(q_j c)}{\partial x_j}, (i, j = 1, 2) \quad (\text{Eq. 2})$$

em que:

c= é a concentração de soluto na fase líquida [M L⁻³];

q_i= são as componentes do fluxo da água [LT⁻¹];

D_{ij}=são as componentes do tensor do coeficiente de dispersão [L² T⁻¹];

R =é o fator de retardamento.

O fator de retardamento é expresso a partir da isortema de sorção linear por:

$$R = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\theta} \quad (\text{Eq. 3})$$

em que:

ρ_d = Densidade do solo (M L⁻³);

K_d= Coeficiente de partição.

Para resolução da extração de água pela raiz, o modelo aplica o método proposto por FEDDES (1978), esquematizado na Figura 1, que fora modificado por van Genuchten (1987) para incluir estresse osmótico.

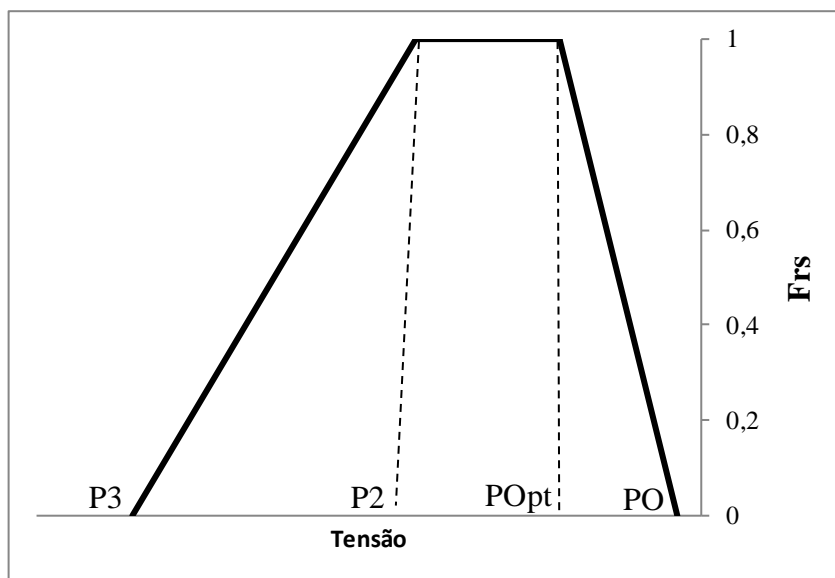


Figura 1- Função de resposta ao estresse na absorção de água pelas raízes (Frs) em função da tensão da água do solo. Fonte: Feddes, 1978.

em que,

P0= representa o potencial de pressão; abaixo deste, as raízes começam a extrair a água do solo (L);

P0opt= equivalente ao valor do potencial de pressão, abaixo do qual as raízes passam a extrair a água à taxa máxima possível (L);

P2= valor limitante do potencial de pressão, abaixo do qual as raízes não podem extrair água à taxa máxima possível (L);

P3= representa o valor do potencial de pressão no ponto de murchamento (L).

De acordo com a Figura 1, a máxima extração de água pela raiz acontece entre os potenciais P0opt e P2, em que Frs=1. Para um potencial de pressão menor que P3 (ponto de murcha), a absorção de água é zero e a extração de água pela raiz também é interrompida próximo à saturação (ou seja, para umidades maiores de um "ponto de anaerobiose" definido como PO). A absorção de água é considerada ideal entre as cargas P0opt e P2, enquanto para cargas entre P2 e P3 (ou PO e P0opt), diminui (ou aumenta) linearmente. Os valores de PO podem variar em função da taxa de transpiração máxima (Tmáx) e mínima (Tmín).

Conforme Kunz et al. (2014), a utilização de modelos de simulação do movimento da água no solo, a exemplo do Hydrus 2D/3D, pode ser útil para explicar o comportamento da água em meios porosos, desde que sejam devidamente calibrados e validados, a partir de experimentos de campo.

Nimmer et al. (2009) monitoraram durante 10 meses o nível de lençol freático devido à infiltração de água através de uma bacia de infiltração e observaram que o modelo apresenta elevada sensibilidade ao aumento da condutividade hidráulica. Com isso, relataram que houve bom ajuste entre os resultados simulados pelo modelo em relação aos resultados obtidos experimentalmente.

Elmi et al. (2012) investigaram a distribuição vertical de água em uma coluna de solo utilizando o Hydrus e observaram que os valores estimados de umidade do solo não corresponderam aos valores medidos. Segundo os autores, o resultado pode estar associado a heterogeneidades no perfil de solo, que não foram consideradas na discretização do modelo. Esse resultado difere do encontrado por Silva et al. (2015) que, buscando modelar a dinâmica de umidade do solo através do Modelo Hydrus, relataram que os resultados asseguram a possibilidade de utilizar o modelo para estimativa da umidade do solo em escala diária para o tipo de solo e condições de cobertura investigadas.

Kanzari et al. (2012) também caracterizaram o movimento da água através da utilização de sondas TDR instaladas em até 4m de profundidade, utilizando o Hydrus para modelar o movimento de água em uma região semiárida da Tunísia, e verificaram que os dados simulados apresentaram a mesma tendência que os dados medidos. Pinho e Miranda (2014), avaliando a aplicação do modelo HYDRUS, bem como sua performance em simulações do deslocamento do potássio e água (em Latossolo Vermelho-Amarelo e Nitossolo Vermelho, concluíram que o modelo HYDRUS foi eficiente nas simulações de deslocamento do potássio e da água nos dois materiais de solo estudados.

Clote et al. (2003) descreveram os resultados do estudo de uma simulação projetada para destacar os impactos das propriedades do solo no transporte de água e solutos na irrigação por gotejamento sub-superficial. Este estudo avaliou a influência das propriedades hidráulicas do solo, frequência de irrigação, tempo de aplicação de nutriente em amostras úmidas e distribuição de solutos. As simulações foram feitas com o Hydrus para analisar o fluxo da água e o transporte de solutos nos sistemas de irrigação por gotejamento. Segundo os autores, o Hydrus modelou de maneira

satisfatória os sistemas de irrigação por gotejamento, apresentando-se como uma importante ferramenta que pode contribuir com o processo de tomada de decisão no que se refere ao dimensionamento e ao manejo deste tipo de sistema.

Ramos et al. (2013) utilizaram o modelo HYDRUS para simular a dinâmica da água e das formas nitrogenadas num solo cultivado com sorgo sacarino, com diferentes teores em sais e níveis de fertirrigação e relataram que as simulações com o HYDRUS foram úteis para entender as melhores estratégias para aumentar a absorção de nutrientes pelas plantas e reduzir as perdas por lixiviação.

Wang et al. (2014) avaliaram o efeito da uniformidade do sistema de gotejamento e a lixiviação de nitrato sob o milho em uma região úmida através do modelo HYDRUS-2D. Os dados experimentais sobre distribuição espacial e temporal dos conteúdos de água e nitrato durante as fases de crescimento do milho foram coletados para calibração e validação do modelo. A validação indicou que a performance do modelo foi satisfatória com a raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 0,03 a 0,05 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para o conteúdo de água no solo e 2,6 a 8,9 mg kg^{-1} para o conteúdo de nitrato durante as fases de crescimento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do experimento

O experimento foi conduzido no Centro Nacional de Pesquisa em Mandioca e Fruticultura (CNPMPF), pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), situado no município de Cruz das Almas – BA, cujas coordenadas geográficas são: latitude 12°40'12" S, longitude 39°06'07" W e altitude de 220 m, localidade de clima tropical quente e úmido, segundo a classificação de Koppen.

A cultivar utilizada para o estudo foi a 'Prata Gorutuba' (Musa AAB 'Prata Anã' clone: Gorutuba). As parcelas experimentais foram seis lisímetros de drenagem confeccionados em fibra de vidro, sendo três deles preenchidos com solo de textura Argilo-arenoso e três com solo de textura franco-arenosa.

Os lisímetros tinham capacidade de 5m³, medindo 2 m de largura, 2,5 m de comprimento e 1 m de profundidade. Para induzir um sistema de drenagem livre, o último 0,2 m do perfil foi dividido em duas camadas de 0,1 m, sendo a inferior composta por um sistema de drenagem com tubos de PVC de 0,05 m perfurados e brita zero e a superior com areia lavada.

3.1.1 Delineamento experimental

Os tratamentos utilizados neste experimento foram obtidos pela combinação de dois solos de textura distintas (Argilo-arenoso e Areia franca) e três concentrações (3,0 g/L, 6 g/L e 9 g/L) para aplicação do nitrato de potássio na água de irrigação em bananeira 'Prata Gorutuba', totalizando seis tratamentos (solo Argilo-arenoso com 3 g/L (T1), solo Argilo-arenoso com 6 g/L (T2), solo Argilo-arenoso com 9 g/L (T3), solo Areia franca com 3 g/L (T4), solo Areia franca com 6 g/L (T5), e solo Areia franca com 9 g/L (T6), que foram distribuídos em delineamento experimental inteiramente casualizado com quatro repetições. As repetições foram compostas pelos quatro planos radiais, contendo sondas de TDR (instaladas a 20, 40, 60 e 80cm de distância e profundidade (r,z)) e extratores de soluções em cada lisímetro (Figura 2).

A opção em utilizar o nitrato de potássio deveu-se ao fato de que tanto o nitrato quanto o potássio apresentam grande mobilidade no solo, comportamento desejável em estudos de dinâmica de íons na solução do solo.

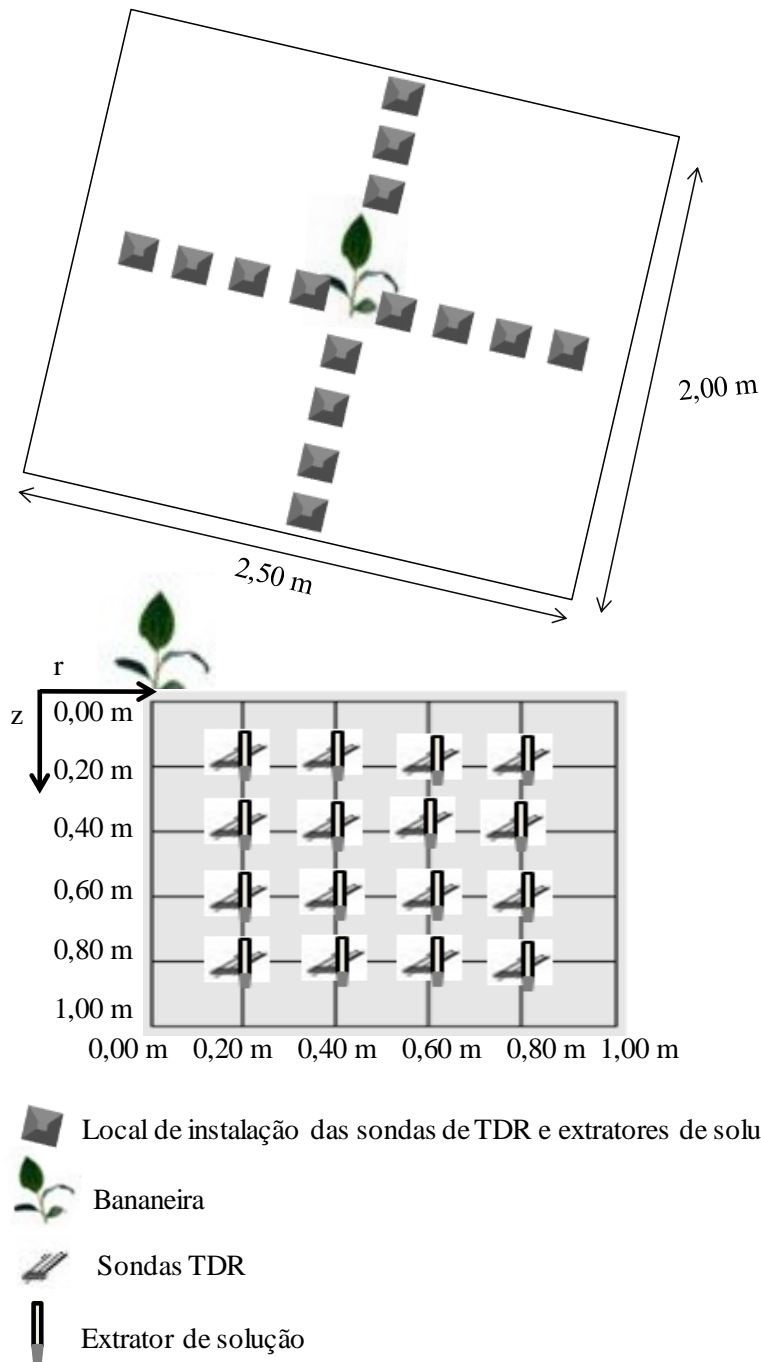


Figura 2- Esquema de distribuição das sondas de TDR e extratores de solução do solo.

3.1.2 Implantação e condução do experimento

Antes do plantio das bananeiras, os lisímetros foram preenchidos cuidadosamente com solo homogeneizado e submetidos a irrigações periódicas. Em seguida, foram submetidos ao processo natural de compactação, ficando expostos à intempérie. Foram feitas as amostragens dos solos e encaminhadas para análises químicas, antes do plantio da bananeira e no final do experimento (Tabela 1).

Tabela 1- Caracterização química dos solos estudados no início do experimento.

Características	Solo Argilo-arenoso		Solo Areia franca	
	Início do experimento	Final do experimento	Início do experimento	Final do experimento
pH	5,0	5,6	7,6	7,0
P(mg/d ³)	2	3	28	29
K(cmolc/dm ³)	0,06	0,12	0,06	0,11
Ca(cmolc/dm ³)	0,68	0,88	1,41	1,19
Mg(cmolc/dm ³)	0,46	0,57	0,30	0,12
Ca+Mg(cmolc/dm ³)	1,14	1,44	1,71	1,30
Al(cmolc/dm ³)	0,5	0,2	0,0	0,0
Na(cmolc/dm ³)	0,33	0,42	0,02	0,21
H+Al(cmolc/dm ³)	3,19	2,64	0,00	0,14
SB	1,53	1,98	1,84	1,57
CTC	4,72	4,62	1,84	1,71
V(%)	32,0	44,0	100	93
MO(g/kg)	12,0	8,0	9,0	5,0

P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: alumínio; Na: Sódio; H: hidrogênio, SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação por bases; M.O: matéria orgânica.

No solo areia franca, os valores de pH foram alto, possivelmente devido à calagem realizada no início do experimento e às aplicações de nitrato e potássio. Alves et al. (2010) citam que o uso das fontes amoniacais reduz o pH e uma forma de contornar esse problema é o uso de uma fonte amoniacal conjugada com uma fonte nítrica, a qual promove aumento do pH.

Na Tabela 2, são mostradas as características físicas dos dois tipos de solo utilizados nos lisímetros. Por meio da análise granulométrica, foram encontradas texturas contrastantes e representativas para cada tipo de solo. Essas diferenças se fazem necessárias para a percepção das distintas movimentações do soluto aplicado, causadas pela variação textural do solo e pela atividade de sua matriz.

Tabela 2- Características físicas do solo do lisímetro.

Características	Camadas de solo (m)							
	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8
	Solo Argilo-arenoso				Solo Areia franca			
Ps(%)	43,93	44,49	48,33	45,56	36,47	31,49	35,49	35,97
Ds(g cm ⁻³)	1,41	1,46	1,34	1,40	1,62	1,76	1,71	1,66
Areia(%)	51,40	47,60	51,40	47,00	84,65	84,80	84,90	83,90
Silte(%)	10,10	9,90	7,10	8,50	8,75	8,65	8,50	9,55
Argila(%)	38,50	42,50	41,50	44,50	6,60	6,55	6,60	6,55

Ps: porosidade; Ds: densidade do solo.

A fertirrigação foi realizada semanalmente, na qual o nitrogênio (N) e o potássio (K) foram aplicados na forma de nitrato de potássio, obedecendo à seguinte distribuição: 10% nos primeiros três meses do plantio; 75% do terceiro ao oitavo mês, na fase de florescimento; daí até a colheita, 15% foi aplicado, nas concentrações 3, 6 e 9g/L (BORGES E SOUZA, 2004).

As práticas usuais da condução de um bananal (desbaste, desfolha, escoramento, poda do coração, controle de doenças, pragas e invasoras) foram realizadas de acordo com as necessidades, conforme Borges e Souza (2004).

Com o intuito de verificar o desenvolvimento da cultura com os manejos adotados, foram realizadas avaliações biométricas da bananeira, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3- Caracterização biométrica da bananeira nas diferentes fases.

Fase da Planta	Altura (m)	Diâmetro do pseudo-caule (m)	Área Foliar (m ²)
Areia Franca			
Inicial	0,935	0,290	2,032
Crescimento Vegetativo	1,473	0,528	5,091
Floração	1,885	0,670	7,181
Argilo-arenoso			
Inicial	1,350	0,455	3,970
Crescimento Vegetativo	1,949	0,688	8,518
Floração	2,410	0,830	13,477

A área foliar total de cada planta foi estimada a partir da leitura do comprimento e da largura da terceira folha, conforme ALVES et al. (2001):

$$AF = 0,901 * (L * W)^{1,2135} \quad (\text{Eq. 4})$$

em que:

AF = é a área foliar total da planta (L^2),

L e W = correspondem ao comprimento (L) e à largura máxima (L) da terceira folha, a partir do ápice.

As fases de desenvolvimento da bananeira foram: inicial: 15/11/2014 a 01/04/2015 - 1 a 138 dias após o plantio (DAP); crescimento vegetativo: 02/04 a 20/07/2015 – 139 a 248 DAP; floração: 21/07/2015 à 07/09/2015 – 249 a 297 DAP; crescimento dos frutos: 07/09/2015 à 02/12/2015 - 298 a 383 DAP. A emissão da inflorescência da bananeira plantada no solo argilo-arenoso ocorreu no dia 21/07/2015 e na areia franca em 10/08/2015.

3.1.3 Calibração da sonda de TDR

Na calibração das sondas de TDR foram utilizadas amostras de solo indeformadas de todos os lisímetros, sendo utilizados três repetições para cada tipo de solo, totalizando seis amostras. A amostragem nos lisímetros foi realizada considerando as camadas do solo homogêneas, já que os lisímetros foram preenchidos cuidadosamente com solo homogeneizado, seco e peneirado com malhas de 5mm.

Essas amostras foram retiradas com tubo de PVC de 0,15m de comprimento por 0,110m de diâmetro nominal, com uma das extremidades em bisel. Finalizada a retirada, foram colocadas telas finas na parte inferior do tubo utilizado com a função de permitir a passagem de água para o exterior do tubo. Logo após esta etapa, foram inseridas as guias de onda no solo até cobrir completamente as hastes dos sensores. Em seguida, os tubos com solo foram imersos por 48 horas em um recipiente com água, de forma que a altura da lâmina alcançasse dois terços da altura do solo para saturação do mesmo.

As leituras do peso do conjunto tubo-sonda-solo-tela foi feita com balança analítica e a umidade do solo estimada pela TDR. As leituras iniciais foram feitas de cinco em cinco minutos, pois a perda de água por percolação neste período é muito

elevada. À medida que ocorreu a redução na percolação, as leituras passaram a ser feitas em maiores intervalos de tempo. O teor de água volumétrico foi determinado pela equação 5:

$$\theta = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_3} \right) \cdot ds \quad (\text{Eq. 5})$$

em que:

θ = teor de água volumétrica do solo ($L^3 L^{-3}$);

P_1 = massa do conjunto tubo – solo úmido – sonda – tela (M);

P_2 = massa do conjunto tubo – solo seco – sonda – tela (M);

P_3 = massa do tubo, sonda e tela (M); e

ds = densidade do solo ($M L^{-3}$).

Obteve-se, desta forma, a relação dos valores de constante dielétrica (K_a) e teor de água volumétrica (Figura 3).

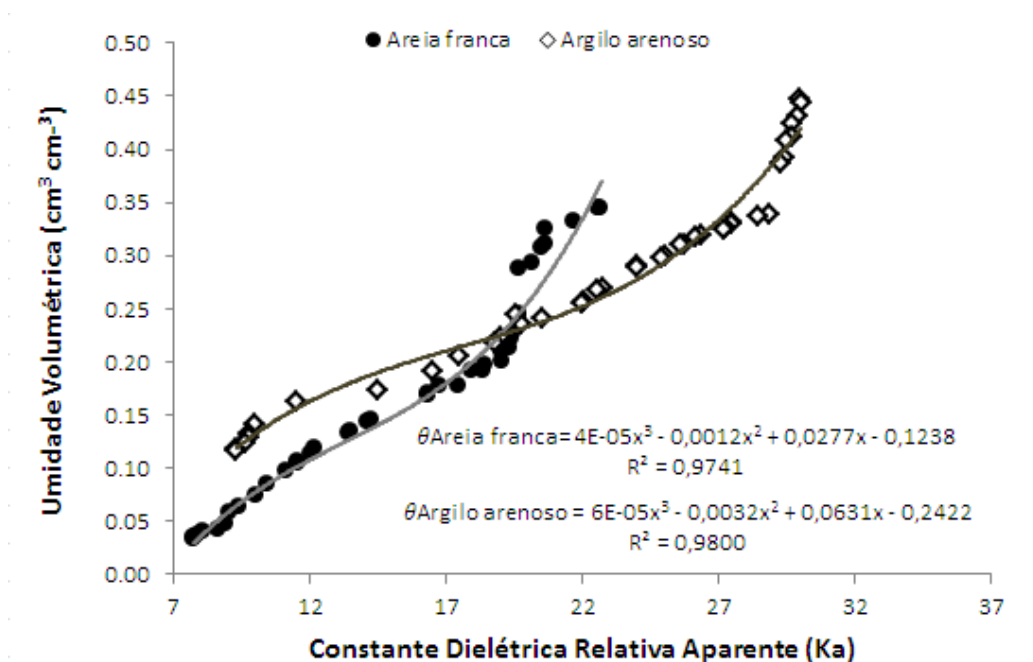


Figura 3- Relações entre o teor de água volumétrico (θ) e constante dielétrica (K_a) para as duas classes texturais de solo utilizados no experimento.

3.2 Ajuste de modelos que relaciona a condutividade elétrica aparente (CEa) e o teor de água no solo (θ) à concentração do nutriente (Ci) na solução do solo

Foram utilizados os modelos matemáticos desenvolvidos por Vogeler et al. (1996) e Muñoz-Carpena et al. (2005), que relacionam a condutividade elétrica da solução do solo (CEw), condutividade elétrica aparente (CEa) e θ , equações 6 e 7, respectivamente.

$$CE_w = \frac{CEa - (a\theta + b)}{c\theta - d} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$CE_w = \frac{CEa - c\theta^2}{a\theta^2 - b\theta} \quad (\text{Eq. 7})$$

em que:

a, b, c e d – parâmetros de ajuste da equação.

Os valores de condutividade CEa foram corrigidos para temperatura de 25 °C, multiplicando-os pelo fator de correção (f_T), que foi estimado com a Equação 8 (Richards, 1954):

$$f_T = 1 + \frac{(25-T)}{49,7} + \frac{(25-T)^2}{3728} \quad (\text{Eq. 8})$$

em que:

T = Temperatura do solo, °C.

Posteriormente ao ajuste dos parâmetros dos modelos que relaciona CEw, CEa e θ , foi possível relacionar a CEw com a concentração específica de um determinado íon (Ci) presente na solução do solo utilizando-se equações (SANTANA et al. 2007; MUÑOZ-CARPENA et al., 2005):

Relação CEw-Ci do tipo potencial:

(Eq. 9)

$$CE_w = \alpha Ci^\mu$$

Relação CEw-Ci do tipo linear:

$$CE_w = \alpha + \mu Ci \quad (\text{Eq. 10})$$

em que:

Ci – é a concentração do nitrato (M V⁻¹)

CE_w – é a condutividade elétrica da solução do solo (Ω L⁻¹) e

α e μ – são parâmetros de ajuste da equação.

As concentrações dos nutrientes foram determinadas por meio das equações 11 e 12, 13 e 14, listadas a seguir:

Modelo de Vogeler et al. (1996), adaptado para a relação CEw-Ci do tipo potencial:

$$Ci = \left\{ \frac{1}{\mu} \left[\frac{CEa - (a\theta - b)}{c\theta - d} \right] \right\}^{\frac{1}{\mu}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Modelo de Vogeler et al. (1996), adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear:

$$Ci = \left\{ \left[\frac{CEa - (a\theta - b)}{c\theta - d} \right] - \alpha \right\} \frac{1}{\mu} \quad (\text{Eq. 12})$$

Modelo de Muñoz-Carpena et al. (2005), adaptado para a relação CEw-Ci do tipo potencial:

$$Ci = \left\{ \frac{1}{\mu} \left(\frac{CEa - c\theta^2}{a\theta^2 - b\theta} \right) \right\}^{\frac{1}{\mu}} \quad (\text{Eq. 13})$$

Modelo de Muñoz-Carpena et al. (2005), adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear:

$$Ci = \left\{ \left(\frac{CEa - c\theta^2}{a\theta^2 - b\theta} \right) - \alpha \right\} \frac{1}{\mu} \quad (\text{Eq. 14})$$

A calibração das equações 11, 12, 13 e 14 foi realizada por meio de ensaio no lisímetro, nos quais foram estabelecidos diferentes valores de condutividade elétrica e de teores de água disponível no solo. Os valores de condutividade elétrica no solo foram obtidos a partir da aplicação de solução de nitrato de potássio em diferentes concentrações (3, 6 e 9 g L⁻¹) e o teor de água no solo variando de valores próximos à saturação até o teor de água mínimo no solo que possibilitasse a retirada de solução pelo extrator.

A extração da solução do solo foi realizada aplicando-se uma sucção de 70 kPa e, após quatro horas, foi realizada a coleta das amostras de solução do solo (Figura 4).



Figura 4- Extração da solução do solo por meio da sucção e coleta da solução do solo.

Simultaneamente à retirada de solução pelo extrator, para determinação da condutividade elétrica da solução do solo (CE_w), as leituras do CE_a e θ foram monitoradas a cada 10 minutos, com a TDR iniciando no momento da aplicação da sucção e terminando quando da coleta da solução.

A condutividade elétrica da solução do solo e do volume lixiviado dos lisímetros foi avaliada por meio de um condutímetro de bancada. A quantidade de nitrato presente nestas amostras foi monitorada por meio do uso do kit de determinação de nitrato (CardHoriba), assim como a leitura de potássio.

O ajuste das equações aos dados e a avaliação dos modelos foram realizados com base no coeficiente de determinação (R²), índice de concordância de Willmott (d) e raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE).

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQ_{tot}} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i + \bar{O}|)^2} \right] \quad (\text{Eq. 16})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (\text{Eq. 17})$$

em que,

SQR = soma de quadrado dos resíduos;

SQtot = soma de quadrado total;

n= número de dados;

O_i = valor observado;

\bar{O} = média do valor estimado;

E_i = valor estimado.

Além destes indicativos estatísticos, o coeficiente de correlação de Pearson (r) (FIGUEIREDO FILHO E SILVA JÚNIOR, 2009) e o índice “c” (conforme metodologia apresentada por PONCIANO (2012) também foram utilizados para indicar o desempenho do modelo empregado.

O índice “c” reúne os coeficiente de determinação (R^2) e o índice de concordância (d), sendo expresso da seguinte forma:

$$c = R^2 \times d \quad (\text{Eq. 18})$$

O critério de interpretação do desempenho do modelo de acordo com índice “c” (equação 18) é: >0,85 – Ótimo; 0,76 a 0,85 – Muito bom; 0,66 a 0,75 – Bom; 0,61 a 0,65 – Mediano; 0,51 a 0,60 – Sofrível; 0,41 a 0,50 – Mau e $\leq 0,41$ – Péssimo.

Após o ajuste dos parâmetros dos modelos e a identificação daquele que melhor explica a relação CEw, CEa e θ com a concentração específica de NO_3^- e K^+ presente na solução do solo, pode-se validar o modelo selecionado no lisímetro ao

longo do tempo durante as fertirrigações, por meio da coleta de extrações semanais da solução do solo, nas fases de crescimento vegetativo, floração e crescimento de frutos da bananeira.

Para a avaliação dos valores simulados e observados, utilizou-se o coeficiente de concordância (d) (equação 16), proposto por Willmott (1981), raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE) (equação 17), o grau de ajuste da variável dependente (Y) com a variável independente (X), mediante o estabelecimento de uma equação do tipo $Y = \beta X$ (“ β ” é o coeficiente angular) e o coeficiente de correlação de Pearson (r).

3.3 Balanço de massa no solo

O balanço de massa foi realizado por meio da quantificação das entradas e saídas de água e nutriente no lisímetro (figura 5).

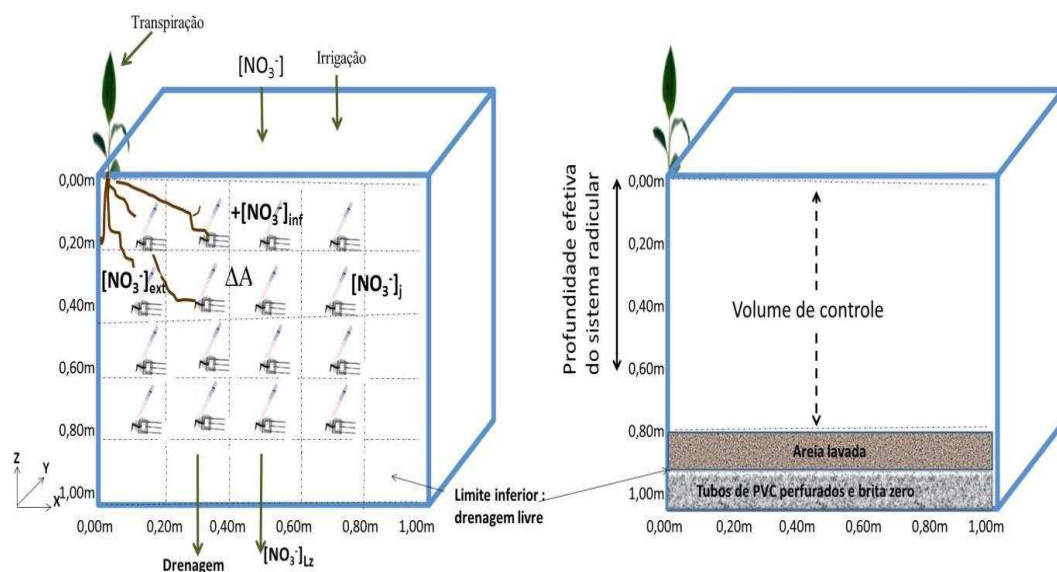


Figura 5 – Volume de controle e os componentes do balanço de massa.

3.3.1 Balanço Hídrico do solo

O balanço hídrico foi realizado relacionando-se as entradas, as saídas e o armazenamento de água no volume de controle dos lisímetros, conforme equação abaixo:

$$\Delta A = I + P - D - ET \quad (\text{Eq. 19})$$

em que:

ΔA = variação do armazenamento (L);

I = irrigação (L);

P = Precipitação (L);

D = drenagem (L);

ET = Evapotranspiração (L).

A entrada foi definida pela irrigação e/ou precipitação e as saídas foram computadas pela evapotranspiração e drenagem. A irrigação foi realizada com mini aspersores com vazão de 56 L h^{-1} , que foram dispostos em duas linhas de irrigação paralelas, a uma distância de 40 cm da planta, aproximadamente. Cada linha foi composta por 3 emissores, com espaçamento de 50cm, totalizando 6 mini aspersores por planta.

O manejo da irrigação foi realizado com base nos dados de teor de água medido por meio das sondas de TDR, sendo calculado o volume de água necessário para retornar os valores de teores de água à capacidade de campo. Utilizou-se água de abastecimento da Empresa Baiana de Águas e Saneamento – EMBASA ($0,3 \text{ dS m}^{-1}$). A irrigação foi realizada com turno de rega fixo, com intervalo de dois dias, portanto a lâmina de irrigação foi variável, adotando como referência os dados de disponibilidade de água no solo.

O teor de água no solo foi quantificado, a cada 20 minutos, por meio de TDR (Figura 6) conectada, via multiplexadores, às sondas instaladas no campo. Os valores eram armazenados em um datalogger conectado à TDR.



Figura 6- Vista do equipamento usado na determinação do teor de água nos solos.

Para determinação do teor de água volumétrico, a partir da constante dielétrica aparente (K_a), foi realizada a calibração da TDR para os solos avaliados.

Testes de uniformidade (Figura 7) foram realizados para caracterização da distribuição de água sobre a superfície do solo pelo sistema de irrigação durante o crescimento da cultura, os quais indicaram coeficiente médio de uniformidade de Christiansen (CHRISTIANSEN, 1942) de 89,44%.



Figura 7- Vista dos coletores e das linhas de irrigação durante a realização do teste de uniformidade de distribuição de água sobre a superfície do solo.

A precipitação foi medida por meio de um pluviômetro (Figura 8) instalado na área próxima ao lisímetro, sendo incluída no cálculo da irrigação.



Figura 8- Vista do pluviômetro usado na coleta da precipitação.

As lâminas drenadas nos lisímetros foram medidas nas saídas dos sistemas de drenagem (Figura 9).



Figura 9- Coleta do volume drenado.

Desta maneira, o armazenamento de água no solo foi calculado para os quatro planos radiais (0,20 m x 0,20 m), correspondentes às distâncias horizontal e vertical (0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m), utilizando a equação:

$$A(z) = \int_0^L \theta(z) dz \quad (\text{Eq. 20})$$

em que:

$\theta(z)$ = é a função representativa do perfil de umidade ($L^3 L^{-3}$);

z = coordenada vertical (L);

L = é a profundidade total (L);

$A(z)$ = armazenamento de água no solo (L).

Para resolução da integral numérica utilizou-se da regra de Simpson.

A evapotranspiração da cultura foi obtida por meio da equação 19, após a determinação dos demais parâmetros do balanço hídrico. O balanço de água do solo foi realizado com as lâminas de água infiltrada e extraída do sistema nos tempos imediatamente antes da irrigação do dia, após a irrigação e antes da próxima irrigação.

A partir dos valores da evapotranspiração da cultura (ET_c), pode-se determinar os valores de coeficiente de cultura (K_c) da bananeira, por meio da equação 21:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (21)$$

Em que,

K_c : coeficiente de cultura;

ET_c : evapotranspiração da cultura (L);

ET_0 : evapotranspiração referência (L).

Para determinação da evapotranspiração de referência (ET_0), utilizou-se a equação Penman-Monteith parametrizada pela FAO (ALLEN et al., 1998). Os dados diários de variáveis meteorológicas indispensáveis para estimativa da ET_0 , como temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, velocidade do vento, precipitação e radiação solar foram monitorados pela estação meteorológica situada na EMBRAPA, no município de Cruz das Almas – BA.

3.3.2 Quantificação do íon nitrato e potássio extraído pela cultura da bananeira e distribuição de água e nutriente nas diferentes camadas do perfil do solo

Este ensaio foi realizado com o intuito de verificar a extração do íon nitrato e potássio pela cultura da bananeira, nas diferentes fases de desenvolvimento e a distribuição de água e nutrientes nas camadas do perfil do solo, observado no lisímetro de drenagem. No que diz respeito à quantidade de nitrato e potássio (g), obteve-se a massa real por meio da concentração (g/m³), multiplicado pela umidade (m³/m³) e pelo volume do solo (m³).

A extração dos íons nitrato e potássio no lisímetro foram realizados considerando a diferença entre as quantidades dos nutrientes na solução do solo no tempo anterior à fertirrigação (j), após a fertirrigação (j+1), e no final do período avaliado (j+2). A média da concentração de nitrato no perfil foi obtida por meio da integral em z (profundidade) para cada distância e depois uma integral em R com os resultados das integrais em z.

O efluente coletado do fundo do lisímetro na estação de coleta foi analisado, a fim de determinar a quantidade total de nitrato ou potássio lixiviado num tempo antes e após a fertirrigação (Δt);

A quantidade de nitrato e potássio extraído pela planta foi obtida após a determinação dos demais componentes do balanço (Eq. 22) e esses valores foram submetidos à análise de variância e teste de médias.

$$C_{i_j} + C_{i_{atra}} - C_{i_{j+2}} - C_{i_{Lz}} = C_{i_{ext}} \quad (\text{Eq. 22})$$

Em que,

C_{i_j} = quantidade média de nitrato ou potássio no perfil, imediatamente antes da fertirrigação (M);

$C_{i_{atra}}$ = quantidade média de nitrato ou potássio aplicado ao solo (tempo j+1) (M);

$C_{i_{j+2}}$ = correspondente à quantidade média de nitrato ou potássio no perfil, no final do período considerado (M);

$C_{i_{Lz}}$ = quantidade média de nitrato ou potássio lixiviado (M);

$C_{i_{ext}}$ = representa a quantidade média de nitrato ou potássio extraído pela planta (M).

Para visualizar a distribuição de umidade e nutrientes no perfil do solo, utilizaram-se os dados médios da concentração de nitrato e potássio obtidos pela extração da solução do solo (mg L^{-1}) e umidade do solo monitorada pela TDR ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), após as fertirrigações. Assim, foram elaborados gráficos de isolinhas de distribuição de teores de água, nitrato e potássio por meio do software Surfer 7.0.

3.4 Informações computacionais para as simulações pelo modelo computacional Hydrus 2D

O modelo HYDRUS-2D (ŠIMUNEK et al., 2008) foi utilizado para simular a dinâmica da água e transporte de nutrientes. Para isso, o domínio de transporte foi escolhido como um plano vertical radial à bananeira (Figura 2 e 5), com uma área de 5m^2 e uma profundidade de 1m. Os perfis de solo dos lisímetros foram discretizados a cada 0,2 m, seguindo as amostragens de campo.

Foram inseridos os dados das condições iniciais: teor de água inicial e concentração inicial do nutriente. Para todas as simulações, nas laterais verticais do domínio de fluxo, foi assumido que não havia fluxo de água e nutrientes ocorrendo e, portanto, a condição de contorno de ausência de fluxo foi escolhida, a qual no HYDRUS é especificada para as fronteiras impermeáveis.

O limite inferior foi considerado como limite de drenagem livre, considerando que toda a água que entre no lisímetro deva se infiltrar e ser conduzida para a zona parcialmente saturada e posteriormente saturada, de modo a não causar o transbordamento na superfície. O contorno superior estava sujeito às condições atmosféricas, logo foi considerada a condição de fluxo variável de eventos diários de irrigação, chuva e de evapotranspiração.

As simulações ao longo do perfil dos lisímetros de drenagem foram realizadas para as diferentes fases da cultura, com um total de 372 dias, comparando as concentrações de nitrato e potássio simulado pelo modelo Hydrus durante as fertirrigações, por meio dos dados observados da extração da solução do solo, nas fases de crescimento vegetativo, floração e crescimento de frutos da bananeira.

Para simulação do transporte de soluto, a concentração do nutriente disponível em várias camadas de solo dentro do domínio do fluxo foi dada como condição inicial em g/cm^3 . Foram inseridos no programa os dados relativos a cada

ensaio e todos os parâmetros obtidos, experimentalmente, a partir das curvas de distribuição de efluentes.

Os dados de entrada solicitados nas simulações no Hydrus estão vinculados inicialmente aos processos essenciais de simulação, geometria (admitindo simular camadas diferentes de solo), tempo de simulação e impressão dos resultados.

3.4.1 Obtenção dos parâmetros necessários para simulação da dinâmica da água

A curva de retenção (Tabela 4) foi determinada no laboratório de Física do Solo da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, utilizando a câmara de pressão de Richards.

Tabela 4- Teor de água no solo (θ), em cm^3 , cm^{-3} , a diferentes tensões para os dois solos usados nos lisímetros

Camada de solo	Tensão (cm.c.a)					
	0	100	330	1000	3000	15000
Solo areia franca						
0,00-0,20	0,36	0,13	0,09	0,07	0,06	0,04
0,20-0,40	0,32	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06
0,40-0,60	0,35	0,13	0,11	0,09	0,08	0,06
0,60-0,80	0,36	0,13	0,10	0,08	0,07	0,06
Solo argilo-arenoso						
0,00-0,20	0,44	0,24	0,20	0,18	0,17	0,16
0,20-0,40	0,48	0,26	0,22	0,21	0,20	0,19
0,40-0,60	0,48	0,27	0,23	0,21	0,19	0,19
0,60-0,80	0,46	0,27	0,22	0,20	0,18	0,18

Os dados da Tabela 4 foram usados para determinar os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^m} \quad (\text{Eq. 22})$$

em que,

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

θ_r = Teor de água residual ($\text{L}^3 \text{L}^{-3}$);

θ_s = Teor de água de saturação ($\text{L}^3 \text{L}^{-3}$);

h = potencial matricial (L); e
 α , m e n = parâmetros empíricos da equação.

Os parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980) foram determinados assumindo a restrição de que $m = 1 - 1/n$. Na Tabela 5, são mostrados os parâmetros para os dois solos usados nos lisímetros.

Tabela 5-Parâmetros do modelo de van Genuchten para os dois solos (Argilo-arenoso e Areia franca) usados nos lisímetros.

Solo	Camada de solo	$\theta_r(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$	$\theta_s(\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3})$	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	N
Areia franca	0,00-0,20	0,043	0,365	0,235	2,297
	0,20-0,40	0,037	0,315	0,612	1,605
	0,40-0,60	0,042	0,354	0,339	2,100
	0,60-0,80	0,030	0,360	0,598	1,761
Argilo arenoso	0,00 0,20	0,174	0,439	0,133	1,982
	0,20-0,40	0,198	0,483	0,105	2,338
	0,40-0,60	0,179	0,483	0,201	1,811
	0,60-0,80	0,189	0,456	0,128	1,841

A condutividade hidráulica do solo foi determinada por meio de um ensaio de drenagem interna (HILLEL et al., 1972), fazendo-se medições periódicas dos volumes de água drenados, do teor de água volumétrica e do potencial matricial.

O ensaio de drenagem interna foi realizado antes do plantio da bananeira. Para isso, a TDR foi conectada a um datalogger e a multiplexadores, com um sistema de aquisição automática de dados, em quatro planos radiais (r , z) de 0,20 m x 0,20 m, sendo r e z as distâncias horizontais e verticais (0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 m), da origem situada na superfície do solo no centro do lisímetro, que possibilitou a determinação e armazenamento de valores de constante dielétrica. Foram instalados também tensiômetros nas profundidades 0,1; 0,3; 0,5 e 0,7 m para determinação do potencial matricial.

O solo foi saturado até se conseguir a formação e manutenção de uma carga hidráulica de 0,05m sobre a superfície. Posteriormente o solo foi coberto com plástico a fim de impedir qualquer fluxo de água na superfície (evaporação ou infiltração).

Na fase inicial, de evolução mais rápida, realizaram-se medidas frequentes de tensiometria e volume drenado, a intervalos de 20 minutos na primeira hora de ensaio, prosseguindo-se com intervalos de uma hora no segundo dia. No terceiro dia,

foram efetuadas três leituras diárias, seguindo-se com duas leituras diárias após o quarto dia, sendo uma pela manhã e outra à tarde.

Foram realizadas também medidas do teor de água em intervalos de 20 minutos durante o ensaio, com os quais, no processo de redistribuição de água, calculou-se a função $K(\theta)$, seguindo critérios propostos por HILLEL et al. (1972), com base na solução para equação:

$$K(\theta)_z = \frac{\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dZ}{\left(\frac{\partial H}{\partial Z}\right)_z} \quad (\text{Eq. 23})$$

em que:

θ = é a umidade volumétrica ($L^3 L^{-3}$),

t = é o tempo (T),

K = é a condutividade hidráulica ($L T^{-1}$);

H = é o potencial total de água (L) e z é a profundidade (L).

A evolução dos valores da condutividade hidráulica $K(\theta)$, estimados com a variação do teor de água para o solo Areia franca e argilo-arenoso antes do plantio da bananeira, pode ser observada nas Figuras 10 e 11 a seguir.

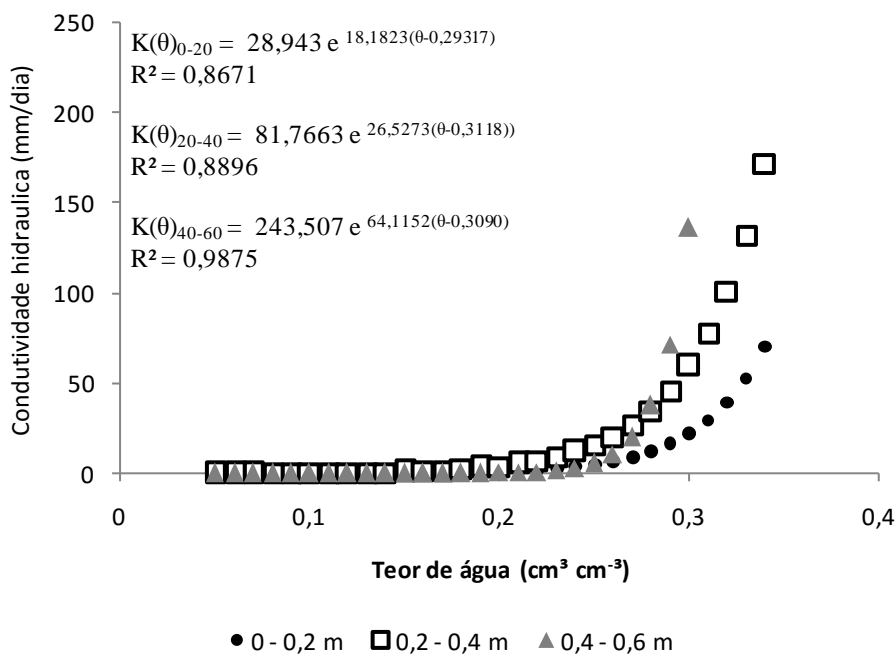


Figura 10- Evolução dos valores de $K(\theta)$ estimados com a variação do teor de água para o solo Areia franca, antes do plantio da bananeira.

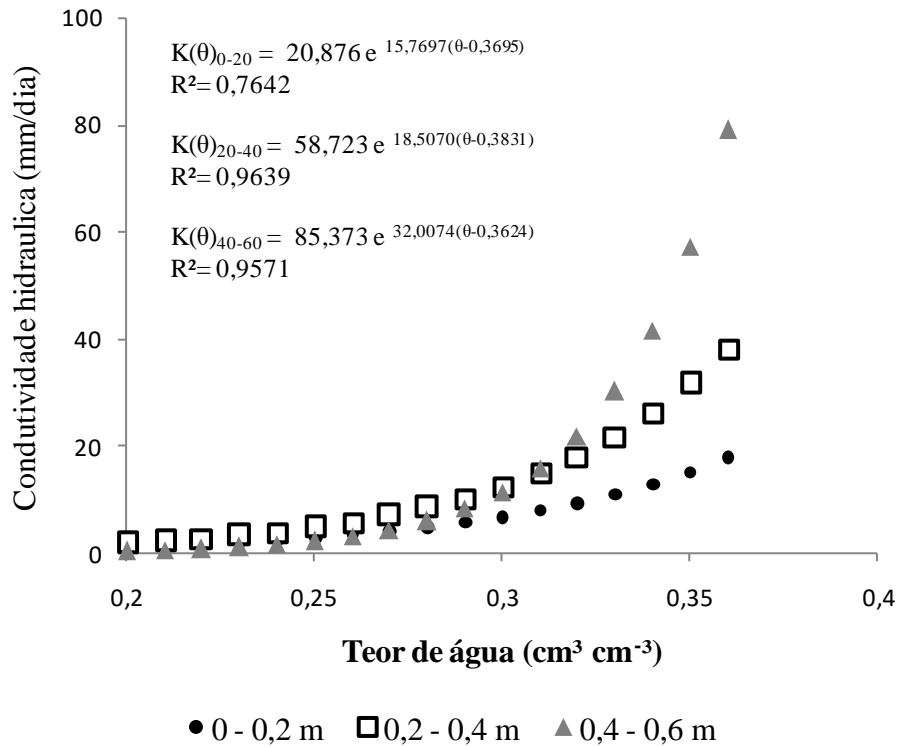


Figura 11- Evolução dos valores de $K(\theta)$ estimados com a variação do teor de água para o solo Argilo-arenoso antes do plantio da bananeira.

3.4.2 Dados para as simulações do transporte de soluto

Para que o modelo computacional Hydrus simulasse o deslocamento do íon no solo, foram realizadas as determinações dos parâmetros envolvidos no transporte do soluto (coeficiente de difusão-dispersão D , coeficiente de retardamento, R e velocidade da água no poro).

Os parâmetros de transporte e retenção do nitrato e do potássio no solo foram determinados pelo método do deslocamento miscível em amostras indeformadas retiradas dos lisímetros, utilizando-se cilindros com altura de 0,080m e diâmetro de 0,0715m, formando as colunas de lixiviação. Foram retiradas doze amostras para cada classe de solo. Os solos acondicionados nas colunas foram saturados, mantendo as colunas imersas durante 48 horas sem água até dois terços de

suas espessuras. Ao final da saturação, as colunas foram interligadas a frascos de Mariotte para manter a carga hidráulica sobre a coluna de solo constante. Foram utilizados dois frascos de Mariotte para cada ensaio: em um dos frascos, ficavam soluções aquosas de nitrato de potássio nas concentrações 3, 6 e 9g/L em relação aos íons nitrato e potássio; e no outro frasco, apenas água destilada.

Inicialmente, a coluna de solo foi interligada ao frasco de Mariotte com água destilada pela parte superior da coluna de solo até que o fluxo na coluna atingisse a condição de regime permanente. Posteriormente, interrompeu-se a aplicação da água e, após a infiltração completa da lâmina de água, as colunas foram interligadas aos frascos de Mariotte com a solução para aplicação das diferentes concentrações de nitrato de potássio. O efluente obtido (fração de 0,1 volume de poros) foi recolhido em frascos plásticos e em seguida encaminhados para a realização das análises das concentrações de potássio e nitrato. Para a obtenção dos parâmetros de transporte dos solutos foram elaboradas as curvas de efluentes para um tempo total de duração dos testes de uma hora e 20 minutos para o solo areia franca e 2 horas para o solo argilo-arenoso.

As velocidades de avanço das soluções aplicadas foram 0,21, 0,21 e 0,20m h⁻¹ para o solo argilo-arenoso e 0,34, 0,35 e 0,34m h⁻¹ para o solo arenoso, correspondentes as concentrações 3, 6 e 9g/L, respectivamente. Os parâmetros coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D) e fator de retardamento (R) foram obtidos a partir do modelo dispersivo-convectivo (OLIVEIRA et al,1999 e ALVES, 2008) por meio da equação 25, através da minimização da soma dos quadrados do resíduo utilizando o programa Solver do Microsoft Excel. O modelo dispersivo-convectivo é representado pela seguinte equação diferencial (OLIVEIRA et al.,1999 e ALVES, 2008):

$$\frac{\partial \theta RC}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda q \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_m \frac{\partial C}{\partial x} \right] - \frac{\partial qC}{\partial x} \quad (\text{Eq. 24})$$

em que,

R = fator de retardamento (adimensional);

C = concentração do soluto na fase líquida (M V⁻¹);

λ= dispersividade (L);

q = fluxo ($L T^{-1}$);

D_m = coeficiente de difusão molecular do soluto ($L T^{-1}$);

t = tempo (T);

x = posição da frente de encaminhamento (L).

Considerando as condições do ensaio realizado no laboratório do deslocamento miscível, para um meio poroso saturado homogêneo, fluxo permanente, unidirecional (θ e q não variam), a densidade aparente do meio adsorvente não varia com o tempo, a adsorção do soluto pelo adsorvente é descrita por uma isoterma linear. Segundo ALVES (2008), para essas condições e levando em consideração as simplificações e resoluções matemática, a solução da equação 24 resulta em:

$$\frac{C}{C_0} = 0,5 \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx - Vt}{\sqrt{4DRt}}\right) - 0,5 \left(1 + \frac{Vx}{D} + \frac{V^2 t}{DR}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx + Vt}{\sqrt{4DRt}}\right) + \left(\sqrt{\frac{V^2 t}{\pi RD}}\right) \exp\left(\frac{(Rx - Vt)^2}{4DRt}\right) \quad (\text{Eq. 25})$$

em que,

C/C_0 = concentração relativa (adimensional);

erfc = função erro complementar;

D = coeficiente de dispersão hidrodinâmica ($L T^{-1}$);

V = velocidade média da solução no poro ($L T^{-1}$).

O coeficiente de partição (K_d), que representa a interação entre as fases líquida e sólida do meio poroso na isoterma de adsorção linear (ALVES, 2008), pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$K_d = (R - 1) \frac{\left(\frac{P_s}{100}\right)}{\rho_d} \quad (\text{Eq. 26})$$

em que:

K_d = coeficiente de partição

ρ_d = densidade do solo ($M L^{-3}$);

P_s = porosidade ($L^3 L^{-3}$);

R = fator de retardamento, adimensional, obtido por meio da equação 3.

O número de Peclet (P) foi calculado pela equação 27:

$$Pe = \frac{V L}{D} \quad (\text{Eq. 27})$$

em que,

L = comprimento da coluna de solo (cm).

O coeficiente de dispersão (eq. 28) é usualmente calculado em função da velocidade do fluido:

$$D = \varepsilon D_o + \lambda v \quad (\text{Eq. 28})$$

em que,

ε = fator de tortuosidade do solo (adimensional);

λ = dispersividade do meio poroso (L);

v = velocidade média da solução no poro (L T⁻¹);

D_o = coeficiente de difusão do íon em água (L² T⁻¹).

3.4.3 Simulações com o modelo computacional Hydrus 2D

A tabela 6 apresenta os parâmetros de entrada requisitados no software Hydrus 2D, bem como as subdivisões indicam os parâmetros de fluxo de água, do solo, do soluto e dos parâmetros das condições de contorno. São apresentadas variáveis adotadas pelo padrão do software e demais valores informados ao longo do texto, porém foram sumarizados para facilitar o entendimento das simulações.

As metodologias de obtenção dos dados experimentais foram descritas nos itens 3.4.1 (obtenção dos parâmetros necessários para simulação da dinâmica da água) e 3.4.2 (dados para as simulações do transporte de soluto).

Na interface gráfica inicial do Hydrus 2D é possível escolher entre os diferentes tipos de simulações, as quais, neste trabalho, foram selecionadas as opções de fluxo de água, transporte de soluto e absorção de água pelas raízes.

Em seguida, foi informado ao software que o fluxo de água é do tipo eixo-simétrico, ou seja, possui simetria em relação ao seu eixo vertical e que a unidade

de medida de comprimento é o centímetro (cm). A forma geométrica da simulação selecionada foi do tipo “retangular”. O software permite, ainda, a inserção de informações sobre o perfil do solo e, no caso deste trabalho, foi selecionada a opção de homogeneidade quanto ao tipo de material.

Para a modelagem do fluxo de água bidimensional do solo em meio poroso variavelmente saturado, isotrópico, selecionou-se a opção do modelo hidráulico de Van Genuchten, sem o fenômeno da histerese. O fator “conectividade de poros” foi considerado similar para todas as camadas, conforme sugerido por Mualem (1976).

Tabela 6 – Dados de entrada utilizados no modelo computacional Hydrus 2D para simulação do fluxo de água e o transporte de soluto no solo.

Dados	Descrição	Forma de coleta	Fonte utilizada
FLUXO			
θ_r ($L^3 L^{-3}$)	Teor de água residual	EXPERIMENTAL	
θ_s ($L^3 L^{-3}$)	Teor de água do solo saturado	EXPERIMENTAL	-
α (L^{-1})	Inverso da sucção de entrada de ar	EXPERIMENTAL	-
n	Constante empírica do modelo de ajuste de van Genuchten	EXPERIMENTAL	-
K_s	Condutividade hidráulica do solo saturado	EXPERIMENTAL	-
ε	Fator de tortuosidade	HYDRUS	<i>Default</i>
SOLO			
ρ_d (ML^{-3})	Densidade do solo	EXPERIMENTAL	-
λ (L)	Dispersividade	EXPERIMENTAL	-
Frac=0	Conteúdo de água considerado para o modelo de equilíbrio	HYDRUS	<i>Default</i>
Difus. ($L^2 T^{-1}$).	Difusividade em água	EXPERIMENTAL	-
K_d	Coefficiente de adsorção	EXPERIMENTAL	-
$Nu=1$	Parâmetro n de adsorção da isoterma de Langmuir (sorção linear– K_d)	HYDRUS	<i>Default</i>
Beta	Expoente de adsorção da isoterma de Freundlich (igual a 1 para sorção linear)	HYDRUS	<i>Default</i>
R (adimensional)	Fator de retardamento	EXPERIMENTAL	
CONDIÇÕES DE CONTORNO			
Precipitação (L)	Volume de água	EXPERIMENTAL	-
Evapotranspiração (L)	Perda de água do sistema solo-planta	EXPERIMENTAL	-
Fronteiras impermeáveis (L)	Ausência de fluxo de água e nutriente	HYDRUS	SELECIONADO
Fluxo variável ($L T^{-1}$);	Limite superior sujeito as condições atmosféricas	HYDRUS	SELECIONADO
Drenagem livre (L)	Limite inferior no qual toda água que infiltra é conduzida para a zona parcialmente saturada e posteriormente saturada	HYDRUS	SELECIONADO

Obs.O termo *Default* refere-se ao catálogo de dados presente no Hydrus.

Os métodos de absorção de água e de soluto pelas raízes foram determinados pelo modelo de FEDDES et al. (1978) (eq. 29) para absorção da água e para o soluto como modelo sem déficit de solutos:

$$WU(h, r, z) = \gamma(h)RDF(r, z)WT_{pot} \quad (\text{Eq. 29})$$

em que:

$\gamma(h)$ = função de déficit hídrico no solo (adimensional);

RDF= distribuição normalizada da absorção de água pelas raízes (T);

T_{pot} = taxa de transpiração potencial ($L T^{-1}$);

W= raio da superfície do solo associada a transpiração (L).

WU= função da absorção de água e soluto pelas raízes (T).

Os parâmetros utilizados pelo modelo para simulação do potencial de água extraído pela raiz (descrita na figura 1 no item 2.7.1) são apresentados na tabela 7. Para tais parâmetros, o HYDRUS assume nomenclatura própria. Foi aplicado o método de FEDDES (1978), que relaciona a quantidade de água retirada do solo em função da profundidade de raízes, com variáveis adotadas pelo padrão do software. Sob condições ótimas de umidade, a extração de água pela raiz na zona radicular é igual à taxa de transpiração potencial.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados pelo modelo para simulação do potencial de água extraído pela raiz.

Parâmetro do HYDRUS	P0 (cm)	P0pt	P2H	P2L	P3	r2H	r2L
			-----cm-----			---cm.d ⁻¹ ---	
Valor adotado	-10	-25	-300	-1500	-8000	0,5	0,1

Em relação aos itens da tabela, deve-se considerar P2H = valor limitante para tensão, abaixo dos quais as raízes não podem extrair água à taxa máxima possível (assumindo a taxa potencial de r2H); P2L = mesma descrição anterior, com taxa de transpiração potencial de r2L; r2H = é a taxa de transpiração potencial, fixada em 0,5 cm dia⁻¹ e r2L = taxa de transpiração potencial, fixada em 0,1 cm dia⁻¹.

No modelo HYDRUS, um banco de dados para diferentes plantas em relação aos parâmetros de absorção da água pelas raízes é fornecido com base em estudos feitos por Taylor e Ashcroft (1972).

No Hydrus, foi selecionado também o modelo de absorção de solutos pelas raízes, para o qual se assumiu que a absorção de solutos foi proporcional ao produto do fluxo de água absorvida pelas raízes e da concentração do soluto dissolvido na água.

A simulação do transporte de soluto foi realizada considerando o modelo dispersivo-convectivo representado pela equação diferencial (Equação 2). Foram inseridos os parâmetros obtidos pelo método do deslocamento miscível em amostras indeformadas retiradas dos lisímetros, densidade do solo, dispersividade do soluto, difusão do mesmo em água e o valor de coeficiente empírico de distribuição, assim como as propriedades físico-químicas presentes no modelo Hydrus, por meio da seleção da opção *Default*.

Posteriormente foram inseridos os dados: evapotranspiração; intensidade da irrigação, drenagem (cm dia^{-1}) e a quantidade de potássio e nitrato aplicado (g cm^{-3}). Finalizada as janelas de simulações, iniciou-se o desenho da região que se desejava simular a movimentação da água, nitrato e potássio no solo. Definiram-se os pontos de observação para o conteúdo de água, concentração de potássio e nitrato no solo. Estes pontos possuem as mesmas coordenadas das sondas de TDR instaladas nos lisímetros, para posterior comparação entre os dados observados usando a TDR e estimados pelo modelo.

Por último, foram selecionadas as condições de contorno de topo, laterais e base e as condições iniciais do problema descritas no item 3.4 (Informações computacionais para as simulações pelo modelo computacional Hydrus 2D).

3.4.3.1 Calibração

O procedimento para a minimização dos erros entre os dados medidos e simulados foi delineado na calibração, por meio de um processo iterativo, no qual se alterou os valores dos parâmetros do modelo a cada tentativa.

Foram realizadas várias tentativas a fim de que os valores dos parâmetros continuassem sendo modificados nessa direção. Seguiu-se esse processo iterativo

até encontrar um conjunto de parâmetros para os quais foi considerado que os resultados do modelo são os mais apropriados para o processo de simulação.

Os cenários consideraram a variação do teor de água obtidos dos sensores TDR instalados no lisímetro; das propriedades hidráulicas; do tempo; dos parâmetros de transporte de soluto e das concentrações iniciais dos solutos. Estes foram usados como base para alterações e ajustes no modelo a fim de torná-lo mais seguro para permitir compreender melhor a dinâmica de água e nutriente envolvidos e a previsão de cenários futuros.

A primeira etapa da calibração foi a de inicialmente trabalhar com uma grande variedade de passos de tempo. Posteriormente, com o objetivo de obter o mínimo de erro entre os valores medidos e os simulados, a opção utilizada foi a de trabalhar com a variação do parâmetro condutividade hidráulica de solo saturado. Esse parâmetro apresenta alta variabilidade tanto entre as camadas verticais de solo como espacialmente (VAN DAM e FEDDES, 2000). Os resultados obtidos a partir do modelo foram analisados em termos de perfis de umidade.

Os parâmetros de transporte foram obtidos a partir dos dados experimentais procedentes dos ensaios em laboratório, após sucessiva aplicação do modelo HYDRUS ajustado a um cenário de aplicação da fertirrigação com nitrato de potássio nas concentrações 3, 6 e 9 g/L.

Foi feita a comparação entre os valores dos teores de água e de concentração de nitrato e potássio na solução do solo, simulados pelo modelo e os valores observados destas variáveis. Os valores de concentração de nitrato e potássio observados foram retirados da solução do solo do lisímetro em diferentes profundidades.

O período de observações utilizado na calibração foi referente à fase inicial da bananeira. Durante esta etapa, utilizou-se a calibração manual, com o objetivo de estimar os valores dos parâmetros que melhor representassem os valores observados. Desta maneira, foram comparados visualmente os resultados obtidos com os valores medidos a fim de verificar se a modificação alcançou uma aproximação da representação dos dados.

Uma vez calibrados os parâmetros do modelo, este foi validado para os demais períodos de cultivo da bananeira. A validação teve como objetivo verificar a capacidade de previsão do modelo, simulando as condições de funcionamento com base nos parâmetros calibrados.

Para comparar os valores médios de nitrato e potássio medidos na solução do solo e simulado pelo software Hydrus-2D, utilizou-se o coeficiente de concordância (d) (equação 16), proposto por Willmott (1981), raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE) (equação 17), o grau de ajuste da variável dependente (Y) com a variável independente (X), mediante o estabelecimento de uma equação do tipo $Y = \beta X$ (β é o coeficiente angular) e o coeficiente de correlação de Pearson (r).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estimativa de nitrato na solução do solo em lisímetro de drenagem com auxílio da TDR

Para estimativa da CE_w , os modelos de VOGELER et al. (1996) e MUÑOZ-CARPENA et al. (2005) apresentaram valores baixos de RMSE (<0,1920) e índice de concordância (d) próximos à unidade (0,9999), o que sinaliza o bom desempenho dos modelos (tabela 8).

Tabela 8- Modelos para estimativa de CE_w para solos da textura Argilo-arenoso e Areia franca.

Solo	Modelo	R^2	r	d	RMSE	Classif. do Método (c = $R^2 \times d$)	
Areia franca	Vogeler et al. (1996)	$CE_w = \frac{[CE_a + 2,5438\theta - 0,3730]}{-0,0871\theta + 0,7388}$	0,818	0,859	0,998	0,1677	Muito bom
	Muñoz-Carpena et al. (2005)	$CE_w = \frac{CE_a + 19,6472\theta^2}{-41,3941\theta^2 + 19,4093\theta}$	0,754	0,871	0,999	0,1537	Bom
Argilo-arenoso	Vogeler et al. (1996)	$CE_w = \frac{[CE_a - 0,0315\theta - 0,1111]}{-0,4152\theta + 0,4264}$	0,779	0,883	0,999	0,1538	Muito bom
	Muñoz-Carpena et al. (2005)	$CE_w = \frac{CE_a - 1,0981\theta^2}{-10,0371\theta^2 + 4,3187\theta}$	0,655	0,830	0,999	0,1920	Bom

O modelo de VOGELER et al. (1996) apresentou maior coeficiente de determinação da regressão para os solos em estudo, o que levou a uma melhor classificação (Muito bom: solo Areia franca e Argilo-arenoso) quanto à capacidade de estimar CE_w a partir da CE_a e θ , quando comparado ao modelo de MUÑOZ-CARPENA et al. (2005) (Bom: solo Areia franca e Argilo-arenoso – tabela 8).

Esses resultados corroboram os dados obtidos por PONCIANO (2012), responsável por observar que na estimativa da CE_w o modelo de VOGELER et al. (1996) ajusta-se melhor a solos com características de texturas argilosas tanto pela aplicação de KCl como pela aplicação de KNO_3 via água de irrigação; e no solo arenoso, os modelos VOGELER et al. (1996) e MUÑOZ-CARPENA et al. (2005)

apresentaram qualidade de ajustes semelhantes, sendo classificados com “Muito bom”.

São mostrados nas tabelas 9 e 10 os modelos para as estimativas da concentração do nitrato e do potássio (mg L^{-1}), os coeficientes de determinação (R^2), os coeficientes de correlação de Pearson (r), raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE), os índices de concordância (d) e o critério de interpretação do desempenho do modelo, de acordo com índice “ c ” ($c = R^2 \times d$), para os solos areia franca e argilo-arenoso.

Observa-se, para ambos os solos, que há uma correlação positiva ($r+$) para a estimativa da concentração de nitrato e potássio na solução do solo a partir de dados de teor de água (θ) e condutividade elétrica aparente (CEa), quando se introduz nos modelos adaptados (VOGELER et al. (1996) e MUNÓZ-CARPENA et al. (2005)) uma relação do tipo linear ou do tipo potência. Esta relação pode ser vista a partir das mínimas diferenças entre os coeficientes de determinação, apresentando, assim, mesma classificação para o índice “ c ” para relação de CEw- NO_3^- do tipo linear e do tipo potência (tabela 9), o que também foi observado na relação de CEw-K do tipo linear e do tipo potência (tabela 10).

No geral, apesar do índice de concordância (d) próximo à unidade (0,9999), o modelo de VOGELER et al. (1996) foi superior ao modelo de MUNÓZ-CARPENA et al. (2005), apresentando sempre menor RMSE e maior coeficiente de determinação (R^2), o que levou o modelo de VOGELER et al. (1996) a obter melhor classificação segundo o índice “ c ” para os modelos de estimativa da concentração do nitrato e potássio (mg L^{-1}) para solo Areia franca e Argilo-arenoso (tabelas 9 e 10).

Os resultados deste trabalho se alinham aos dados obtidos por Santana et al. (2006), os quais relatam que em relação aos modelos utilizados, os de RHOADES et al. (1976) e de VOGELER et al. (1996) proporcionaram as melhores estimativas de concentração de K na solução do solo. Santos et al. (2010) afirmam que, para os solos Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho, o modelo para estimativa da concentração de nitrato foi obtido combinando-se o modelo linear com o de VOGELER et al. (1996).

Tabela 9 – Modelos para estimativa da concentração do nitrato (mg L^{-1}) para solo Areia franca e Argilo-arenoso.

Solo	Modelo		R ²	R	d	RMSE	Classificação do Método (c = R ² x d)
Adaptado para relação CEw-NO ₃ ⁻ do tipo linear							
Areia franca	Vogeler et al. (1996)	$\text{NO}_3^- = [\text{CEw} - 0,0283] \frac{1}{0,0024}$	0,7581	0,867	0,9999	66,7749	Muito bom
Areia franca	Muñoz-Carpena et al. (2005)	$\text{NO}_3^- = [\text{CEw} - 0,0860] \frac{1}{0,0024}$	0,6158	0,785	0,9999	90,0959	Mediano
Argilo-arenoso	Vogeler et al. (1996)	$\text{NO}_3^- = [\text{CEw} - 0,0955] \frac{1}{0,0034}$	0,8568	0,926	0,9999	35,1413	Ótimo
Argilo-arenoso	Muñoz-Carpena et al. (2005)	$\text{NO}_3^- = [\text{CEw} - 0,2126] \frac{1}{0,0027}$	0,8352	0,917	0,9995	37,6901	Muito bom
Adaptado para relação CEw-NO ₃ ⁻ do tipo potência							
Areia franca	Vogeler et al. (1996)	$\text{NO}_3^- = \left[\frac{1}{0,0038} \text{CEw} \right] \frac{1}{0,9257}$	0,7596	0,868	0,9999	69,1431	Muito bom
Areia franca	Muñoz-Carpena et al. (2005)	$\text{NO}_3^- = \left[\frac{1}{0,0074} \text{CEw} \right] \frac{1}{0,8242}$	0,6212	0,786	0,9998	90,0767	Mediano
Argilo-arenoso	Vogeler et al. (1996)	$\text{NO}_3^- = \left[\frac{1}{0,0108} \text{CEw} \right] \frac{1}{0,7994}$	0,8658	0,940	0,9998	32,5036	Ótimo
Argilo-arenoso	Muñoz-Carpena et al. (2005)	$\text{NO}_3^- = \left[\frac{1}{0,0231} \text{CEw} \right] \frac{1}{0,6623}$	0,8202	0,909	0,9998	39,3716	Muito bom

Tabela 10 – Modelos para estimativa da concentração do Potássio (mg L⁻¹) para solo Areia franca e Argilo-arenoso.

Solo	Modelo	R ²	r	d	RMSE	Classificação do Método (c = R ² x d)	
Adaptado para relação CEw-K ⁺ do tipo linear							
Areia franca	Vogeler et al. (1996)	$K^+ = [CEw - 0,0274] \frac{1}{0,0076}$	0,7134	0,840	0,9999	23,6440	Bom
Areia franca	Muñoz-Carpena et al. (2005)	$K^+ = [CEw - 0,0731] \frac{1}{0,0077}$	0,5580	0,747	0,9999	29,0023	Sofrível
Argilo-arenoso	Vogeler et al. (1996)	$K^+ = [CEw + 0,0191] \frac{1}{0,0059}$	0,6563	0,822	0,9994	41,4654	Bom
Argilo-arenoso	Muñoz-Carpena et al. (2005)	$K^+ = [CEw - 0,1637] \frac{1}{0,0039}$	0,6222	0,789	0,9999	43,4716	Mediano
Adaptado para relação CEw-K ⁺ do tipo potência							
Areia franca	Vogeler et al. (1996)	$K^+ = \left[\frac{1}{0,0121} CEw \right] \frac{1}{0,9073}$	0,7165	0,843	0,9999	23,5022	Bom
Areia franca	Muñoz-Carpena et al. (2005)	$K^+ = \left[\frac{1}{0,0167} CEw \right] \frac{1}{0,8529}$	0,5614	0,749	0,9998	28,8929	Sofrível
Argilo-arenoso	Vogeler et al. (1996)	$K^+ = \left[\frac{1}{0,0094} CEw \right] \frac{1}{0,9041}$	0,6430	0,827	0,9964	41,5647	Mediano
Argilo-arenoso	Muñoz-Carpena et al. (2005)	$K^+ = \left[\frac{1}{0,0173} CEw \right] \frac{1}{0,7562}$	0,6098	0,782	0,9998	44,1795	Mediano

Para ambos os solos, o modelo de VOGELER et al. (1996), adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear (equação 12), foi escolhido para estimar a concentração do nitrato e potássio na solução do solo ao longo do primeiro ciclo da cultura da bananeira no lisímetro de drenagem.

Durante a validação do modelo no lisímetro de drenagem, houve subestimativa (“ β ” < 1, em que “ β ” é o coeficiente angular da regressão linear $y = \beta x$) dos valores de nitrato e potássio estimado em função do íon medido na solução do solo (tabela 11).

Tabela 11 – Indicativos estatísticos para comparação dos valores médios de nitrato e potássio medidos na solução do solo e estimados pelo modelo de Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear.

Solo	Concentração g/L	Nitrato				Potássio			
		β	R ²	D	RMSE	β	R ²	d	RMSE
Areia franca	3,0	0,98	0,72	0,99	27,20	0,96	0,69	0,99	6,638
	6,0	0,87	0,67	0,99	32,17	0,88	0,72	0,99	7,89
	9,0	0,89	0,70	0,99	18,63	0,91	0,74	0,99	9,201
Argilo- arenoso	3,0	0,87	0,85	0,99	31,98	0,92	0,67	0,99	10,20
	6,0	0,94	0,72	0,99	23,54	0,84	0,71	0,99	16,24
	9,0	0,96	0,69	0,99	22,78	0,91	0,74	0,99	15,01

Verifica-se que, para os dois tipos de solos avaliados, o índice de concordância (d) foi 0,99 (próximos à unidade). Todavia, houve melhor desempenho na estimativa do potássio, sendo comprovados pelos valores mais baixos de RMSE, uma vez que quanto menores os valores absolutos de RMSE, menor a dispersão dos valores medidos em relação aos estimados.

No solo areia franca, os valores médios de nitrato foram subestimados em 2%, 13% e 11% e os valores médios de potássio em 4%, 12% e 9% para as concentrações de 3,6 e 9 g/L, respectivamente. No solo argilo-arenoso também houve subestimativa dos valores médios nitrato (13%, 6% e 4% para 3, 6 e 9 g/L) e potássio (8%, 6% e 9% para 3, 6 e 9 g/L – tabela 11).

Andrade Neto et al. (2012), em trabalho com um modelo potencial combinado com o modelo de Vogeler et al. (1996), relataram uma variação em

termos gerais de 20,0% (média dos erros normalizados) para os valores medidos em comparação com os estimados em um Latossolo Amarelo de textura franco-arenosa.

Segundo Andrade Neto e Coelho (2014) essas variações nos valores podem ser aceitáveis no manejo de íons no solo devido à natural variabilidade espacial dos atributos químicos do solo. Machado et al. (2007), ao avaliarem a distribuição e a dependência espacial dos atributos químicos do solo em uma lavoura sob sistema de plantio convencional, constataram variação de 27,19% do potássio em um Latossolo Vermelho.

Dessa maneira, observa-se que os resultados demonstrados na tabela 11 validam o modelo utilizado na estimativa do íon nitrato e potássio na solução do solo. A figura 12 também demonstra a adequação do modelo aos valores observados, em que o modelo de VOGELER et al. (1996) adaptado para a relação CE_w-C_i do tipo linear, referente às concentrações 3, 6 e 9 g/L, aproxima-se dos dados de nitrato e potássio medidos com os estimados ao longo do ciclo da cultura, nas fases de crescimento vegetativo, floração e crescimento do fruto, tanto no solo areia franca (figuras 12a e 12c), quanto no solo argilo-arenoso (figuras 12b e 12d).

Esses resultados corroboram com os obtidos por Andrade Neto et al. (2012), que concluíram a viabilidade de se estimar a concentração de K^+ na solução do solo a partir de dados do teor de água e CE_a , obtidos por meio da técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR), para condições de campo, com o uso da equação resultante da combinação de um modelo linear e um potencial. Santos et al (2009) concluíram que a técnica TDR, em conjunto com o uso de modelos ajustados, demonstrou-se adequado para o monitoramento do transporte de solutos no solo, independentemente do tipo de solo em uso e da dosagem do nutriente aplicada.

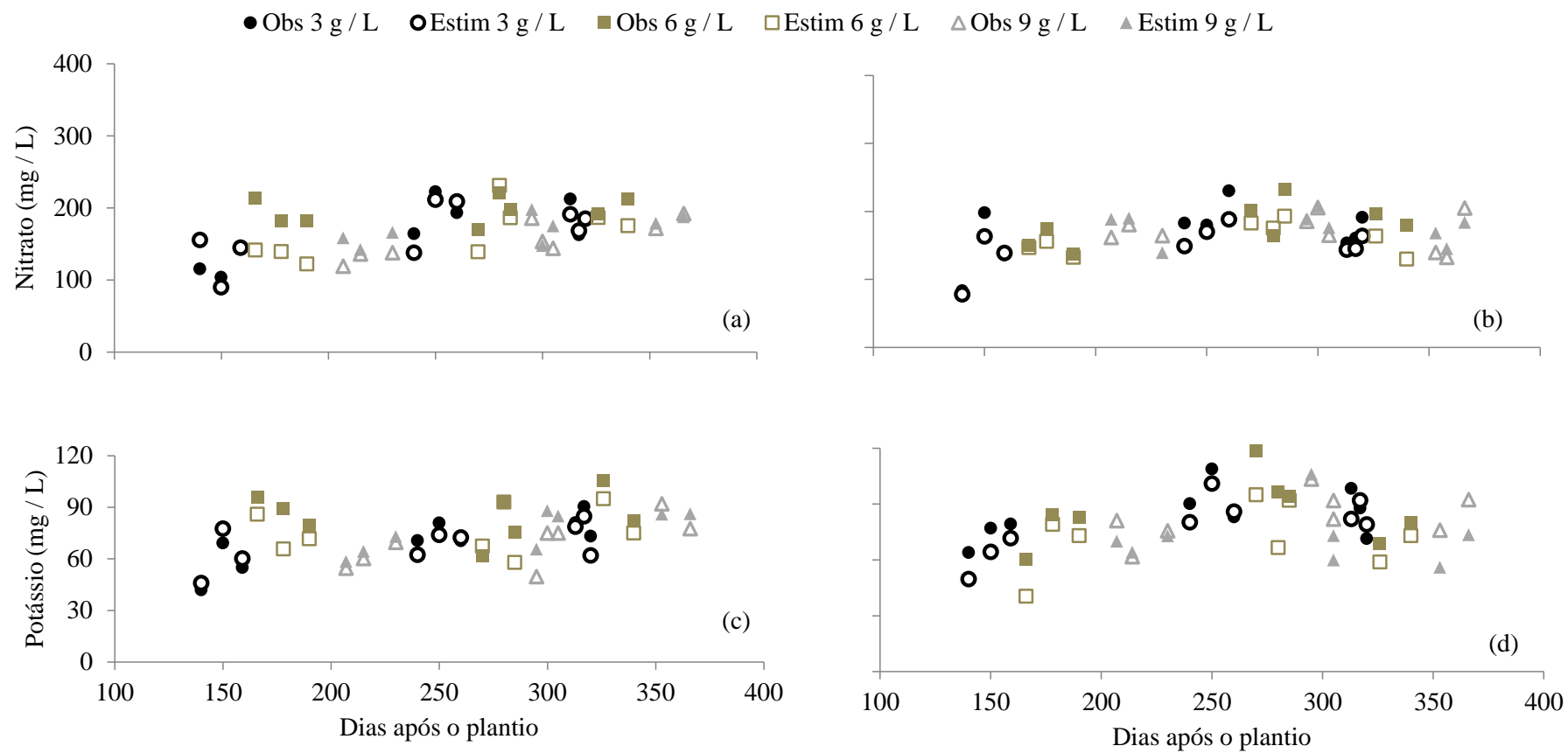


Figura 12 – Valores de nitrato e potássio medidos na solução do solo e estimados pelo modelo de Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear, referente às concentrações 3, 6 e 9 g/L no solo areia franca (a e c) e argilo-arenoso (b e d).

4.2 Componentes do balanço hídrico

Os valores dos componentes do balanço hídrico, medidos nos lisímetros de drenagem, ao longo dos 359 dias após o transplante, são apresentados na tabela 12. Os valores de ET da bananeira no solo areia franca oscilaram entre 2,18 e 3,87 mm/dia e no solo argilo-arenoso de 2,77 a 4,70 mm/dia, sendo a média igual a 3,30 e 3,86, respectivamente (tabela 12).

Tabela12 – Componentes do balanço hídrico da cultura da bananeira nos estádios fenológicos vegetativo, floração e frutificação, no período de 25 de março a 11 de novembro de 2015.

DAT	Estágios Fenológicos	P+I (mm)	D (mm)	ΔA (mm)	ETc (mm)	ETc (mm/dia)
Solo areia franca						
151-157	Cres. Vegetativo	12,00	8,94	-16,32	19,38	3,23
165-170	Cres. vegetativo	13,70	2,00	-7,66	19,36	3,87
207-214	Cres. vegetativo	21,20	8,00	-11,55	24,78	3,54
265-271	Floração	34,00	11,74	6,88	15,36	2,56
278-284	Floração	7,40	10,19	-21,97	19,2	3,20
284-293	Floração	21,20	0,38	-10,95	31,77	3,53
334-341	Cres. dos frutos	12,80	0,00	-14,23	27,02	3,86
348-355	Cres. dos frutos	22,00	0,00	-4,18	26,18	3,74
355-362	Cres. dos frutos	22,04	0,00	6,78	15,26	2,18
	Média					3,30
Solo argilo-arenoso						
131-137	Cres. vegetativo	26,70	2,50	7,55	16,65	2,78
165-170	Cres. vegetativo	16,30	0,00	-4,41	20,71	4,14
207-214	Cres. vegetativo	23,90	3,80	-5,00	25,1	3,59
265-271	Floração	38,60	5,32	5,07	28,21	4,70
278-284	Floração	10,00	2,12	-9,98	17,86	2,98
284-293	Floração	23,90	0,32	-7,69	31,27	3,47
334-341	Cres. dos frutos	19,00	0,00	-12,25	31,25	4,46
348-355	Cres. dos frutos	36,90	0,00	8,70	28,2	4,03
355-362	Cres. dos frutos	37,90	0,00	5,45	32,45	4,64
	Média					3,86

P+I - precipitação + irrigação, D – drenagem e ΔA – variação do armazenamento

Os elevados valores médios da evapotranspiração do solo argilo-arenoso podem estar relacionados com a maciça presença de argila, favorecendo maiores perdas de água por evaporação. O maior raio dos poros entre partículas de areia

resulta numa pequena ascensão capilar, visto que o movimento capilar é determinado pelo tamanho de poros.

Segundo Tormena et al. (1998), a energia de retenção de água no solo regula em parte o processo evapotranspiratório, principalmente em razão do conteúdo de água disponível refletir as alterações na estrutura e, portanto, na distribuição do tamanho dos poros.

Os resultados obtidos por Coelho et al. (2003) foram incorporados à evolução do Kc no primeiro ciclo da bananeira ‘Prata Gorutuba’ em função do DAP para a cultura da bananeira (figura 13). A incorporação do Kc obtido por Coelho et al. (2003) no ajuste da equação foi feita para que assim abrangesse todo o primeiro ciclo da cultura da bananeira, já que as avaliações do experimento se iniciaram na fase de crescimento vegetativo, período em que a bananeira apresenta um aumento na marcha de absorção dos macronutrientes, quando há maior acúmulo de matéria seca e, conseqüentemente, de nutrientes, até o florescimento, estabilizando-se na colheita (BORGES; OLIVEIRA, 2000; SILVA; BORGES; MALBURG, 1999).

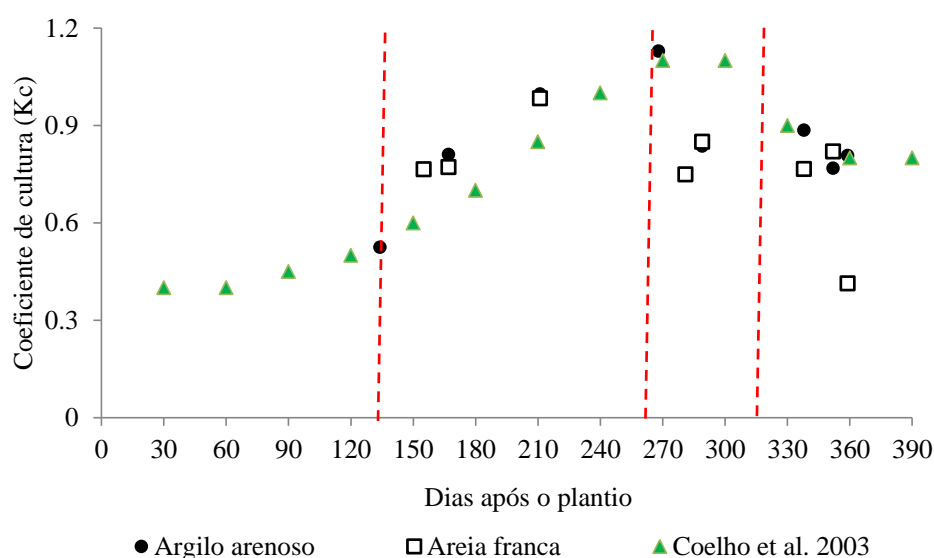


Figura 13 – Coeficiente de cultura em função dos dias após o plantio associado aos resultados obtidos por COELHO et al. (2003).

O solo areia franca apresentou valor mínimo (0,38), médio (0,74) e máximo (0,98) de Kc menores que o valor mínimo, médio e máximo do solo argilo-arenoso (0,53, 0,85 e 1,13). Esses resultados estão de acordo com COELHO et al. (2003), nas condições climáticas do Norte de Minas, em que desenvolveram no ano de 2001,

uma equação polinomial de ordem 3 que relaciona o Kc com os dias após o plantio (DAP) da bananeira e obtiveram valores de 0,50; 0,84 e 1,10 para o Kc mínimo, médio e máximo, respectivamente (figura 13).

Neste caso, o Kc foi menor no solo areia franca porque a ETc (tabela 12) foi menor e essa pequena diferença observada em relação ao solo argilo-arenoso pode ser atribuída às diferenças de evaporação da água do solo, já que o solo com maior presença de argila armazena maiores teores de água, conseqüentemente está susceptível a maiores perda por evaporação. Segundo Yang e Yanful (2002), no que se refere aos fatores de solo que interferem na evaporação, a estrutura, a densidade, a porosidade e a condutividade hidráulica não saturada são os mais importantes e afetam o teor e o fluxo de água no perfil do solo. Dalmago et al. (2010) afirmam que a disponibilidade elevada de água, num tempo maior de exposição às condições de demanda hídrica atmosférica, deve resultar em maior evaporação, se houver energia para o processo acontecer. Esses resultados também estão de acordo com Coelho et al. (2006) que, ao avaliarem a cultura da bananeira, cultivar Prata-Anã, na região de Cruz das Almas-Ba, observaram valores de Kc com uma amplitude de 0,58 a 1,18.

Na figura 14, encontra-se a equação de ajuste do modelo polinomial do terceiro grau para o Kc em função do DAP associado aos resultados obtidos por Coelho et al. (2003) aos 30, 60, 90, 120 e 150 dias após o plantio. O modelo polinomial de terceiro grau apresentou um coeficiente de determinação de aproximadamente 77,71% e 80,01% para o solo areia franca e argilo-arenoso, respectivamente, sinalizando o bom ajuste da equação e indicando a pertinência desta equação para descrever o Kc da bananeira, cultivar 'Prata Gorutuba', em função dos dias após o plantio para a região de Cruz das Almas – BA (figura 14).

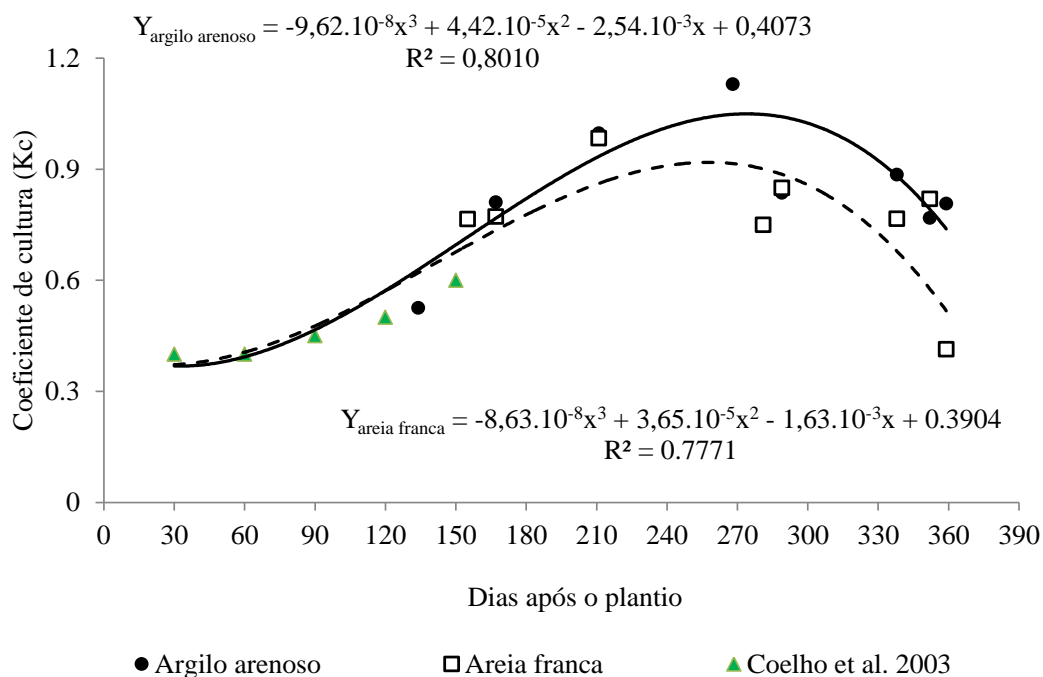


Figura 14 – Equação de ajuste para o coeficiente de cultura (Kc) em função dos dias após o plantio associado aos resultados obtidos por COELHO et al. (2003) aos 30, 60, 90, 120 e 150 dias após o plantio.

4.3 Extração do nitrato e potássio pela cultura da bananeira

No solo argilo-arenoso, as diferentes concentrações do adubo nitrato de potássio não promoveram efeito significativo na extração do nitrato pela planta da bananeira ‘Prata Gorutuba’. No solo areia franca, apenas na fase de crescimento dos frutos houve efeito estatístico das diferentes concentrações sobre nitrato extraído pela planta de bananeira (g/dia), em que a concentração de 3g/L promoveu maior extração do nitrato para a bananeira Prata-Anã que 6 e 9 g/L que não diferiram entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade (tabela 13).

Na concentração de 9 g/L, a quantidade de nitrato total extraído pela bananeira no solo argilo-arenoso foi maior do que aquelas encontradas para o solo areia franca, possivelmente em razão da alta mobilidade desse nutriente que sofre forte influência da textura do solo.

Tabela 13 – Quantidade de nitrato extraído pela planta de bananeira (g/dia) nas diferentes fases fenológicas para os dois solos avaliados.

Tipo de solo	Nitrato extraído pela planta de bananeira (g/dia)		
	Conc. 3 g/L	Conc. 6 g/L	Conc. 9 g/L
Crescimento vegetativo			
Areia franca	0,102545 A a	0,240290 A a	0,114990 B a
Argilo-arenoso	0,183880 A a	0,167980 A a	0,286250 A a
Floração			
Areia franca	0,594330 A a	0,452330 B a	0,637930 A a
Argilo-arenoso	0,644875 A a	0,789145 A a	0,643805 A a
Crescimento dos frutos			
Areia franca	0,462885 A a	0,269145 A b	0,252850 A b
Argilo-arenoso	0,336765 A a	0,310310 A a	0,302440 A a
Nitrato total extraído (g/planta)			
Areia franca	94,36 A a	104,90 A a	81,52 B a
Argilo-arenoso	106,16 A a	107,01 A a	128,54 A a

Dentro de cada fase fenológica, as médias seguidas por letras iguais em coluna (letras maiúsculas) e nas linhas (letras minúsculas), não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Este resultado é justificado pelo fato de o íon nitrato de carga negativa ser diretamente liberado na solução do solo assim que o nitrato de potássio dissolvido na água de irrigação entra no meio poroso, não sendo adsorvido pelas micelas (ALVES et al., 2010). De acordo com MUCHOVEJ e RECHCIGL (1994), solos de textura arenosa tendem a permitir maiores perdas de NO_3^- por lixiviação, enquanto as menores perdas devem ocorrer em solos argilosos. Conforme Cantarella (2007), a difusão do NO_3^- , maior em solos arenosos com pouca agregação e menor em solos argilosos com ou sem agregados de maior tamanho, afeta a taxa de lixiviação. Se a concentração de íons é maior que a capacidade de adsorção dos colóides, os íons serão lixiviados (TITO et al., 2012).

A extração do íon potássio pela planta da bananeira Prata-Anã nas diferentes fases fenológicas é mostrada na tabela 14. Não houve efeito estatístico do tipo de solo na extração do potássio pela planta da bananeira (g/dia). Assim, ambos os solos se comportaram de forma semelhante na absorção de potássio para as diferentes concentrações do adubo nitrato de potássio. Os efeitos das concentrações 3 e 6 g/L na extração do potássio não diferiram entre si e foram superiores a 9 g/L na fase de floração da cultura, que não se diferenciou das menores (3 e 6 g/L) nas demais fases fenológicas (tabela 14).

Tabela 14 – Quantidade de potássio extraído pela planta de bananeira (g/dia) nas diferentes fases fenológicas para os dois solos avaliados.

Tipo de solo	Potássio extraído pela planta de bananeira (g/dia)		
	Conc. 3 g/L	Conc. 6 g/L	Conc. 9 g/L
Crescimento vegetativo			
Areia franca	0,804935 A a	0,964025 A a	0,865195 A a
Argilo-arenoso	0,843180 A a	0,895785 A a	0,809705 A a
Floração			
Areia franca	2,724320 A a	2,734210 A a	2,097950 A b
Argilo-arenoso	2,732400 A a	2,759615 A a	2,099895 A b
Crescimento dos frutos			
Areia franca	0,992770 A a	1,146015 A a	0,986670 A a
Argilo-arenoso	0,959865 A a	1,013995 A a	1,170920 A a
Potássio total extraído (g/planta)*			
Areia franca	418,49 A a	471,61 A a	402,22 A a
Argilo-arenoso	425,54 A a	444,58 A a	404,41 A a

Dentro de cada fase fenológica, as médias seguidas por letras iguais em coluna (letras maiúsculas) e nas linhas (letras minúsculas), não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Teixeira et al. (2014), buscando definir a concentração da solução de injeção (3, 10 e 15 g/L de nitrato de potássio) mais adequada para duas frequências de fertirrigação para a bananeira Grand Naine, relataram que não houve, estatisticamente, qualquer efeito das diferentes concentrações e frequências de aplicação da solução injetora sobre o crescimento e produtividade da cultivar estudada. Nestas condições, corrobora-se com a assertiva de Barros et al. (2014), a qual aponta que nem a concentração da água de irrigação nem a frequência de fertirrigação influenciaram a produtividade da cultura para as concentrações da água de irrigação de até 15 g/L.

Em todas as concentrações avaliadas, a quantidade de nitrato e potássio extraído foi crescente até a fase de floração, havendo decréscimo da fase de floração até a colheita, conforme constataram Martin-Prével e Montagut (1966) ao afirmar que, no período que se estende da floração à colheita, a absorção de nitrogênio e potássio diminui, ocorrendo uma maior redistribuição.

Em ambos os solos, as quantidades de potássio extraído (tabela 13) foram bem superiores aos valores de nitrato (tabela 14), o que se aproxima das considerações de MARTIN-PRÉVEL et al. (1968) ao afirmarem que o potássio é o macronutriente extraído em maior quantidade pela planta, por causa da ação direta

nas trocas metabólicas, no transporte da seiva elaborada, na retenção de água e nas qualidades organolépticas do fruto.

A partir dos valores médios de nitrato e potássio nas diferentes fases fenológicas (tabelas 13 e 14) e considerando o ciclo para bananeira de 383 dias (dos quais 248 dias correspondentes ao crescimento vegetativo; 49 dias, à floração e 86 à fase de crescimento dos frutos à colheita), as quantidades totais de nitrato extraído no solo areia franca foram 94,36; 104,90 e 81,52 g/planta. Já no solo argilo-arenoso, os valores foram 106,16; 107,01 e 128,54 g/planta para as concentrações de 3, 6 e 9 g/L, respectivamente. Esses valores demonstram que nossa pesquisa acompanha os dados já obtidos e estudados por Borges e Silva (1995), que citam as quantidades de nutrientes encontrados na planta como variáveis entre 93,8 e 159,6 g planta⁻¹ para o nitrogênio.

No solo areia franca, os valores totais de potássio extraído foram 418,49 (3 g/L), 471,61 (6 g/L), 402,22 gramas por planta⁻¹ (9 g/L), e no solo argilo-arenoso foram 425,54 (3 g/L), 444,58 (6 g/L) e 404,41 gramas por planta⁻¹ (9 g/L). Segundo Faria (1997), a quantidade total de potássio absorvida foi 314,0 g planta⁻¹ com as plantas em 2,5 x 3 m. Neves et al. (1991), trabalhando com bananeira ‘Pacovan’ nos estádios de “mãe, filha e neta”, relata que as plantas extraíram por touceiras, aproximadamente, 756,3 g de potássio. Borges e Silva (1995) encontraram na planta 379 a 718,5 g planta⁻¹.

Vale ressaltar que para a produção ser econômica e sustentável, deve-se adequar as quantidades e as proporções de fertilizante aplicado às necessidades nutricionais da cultura. Após a fertirrigação, a distribuição dos teores de água (a, d, g), nitrato (b, e, h) e potássio (c, f, i) nos solos avaliados, para as diferentes fases de desenvolvimento, no interior do lisímetro, são apresentadas nas figuras 15 e 16. Verifica-se que o teor de água ao longo do perfil do solo no lisímetro se comporta de forma multidimensional, com valores mais elevados para o solo argilo-arenoso. Havia uma previsibilidade quanto a este resultado, devido às características físico-hídricas do referido solo, promotor de uma maior retenção de água.

As umidades no solo, após a irrigação, apresentaram comportamento uniforme, com pequena variação ($\leq 10\%$) entre os seus valores para a camada entre 0 e 40 cm. Em geral, nessa camada do solo os teores de água variaram de 0,20 a 0,22 cm³.cm⁻³ aproximadamente para o solo areia franca e 0,27 a 0,30 cm³.cm⁻³ para argilo-arenoso (figuras 15 e 16). Esses resultados ratificam os altos valores do

coeficiente de uniformidade de Christiansen (89,44%), conforme apresentado no item 3.3.1.

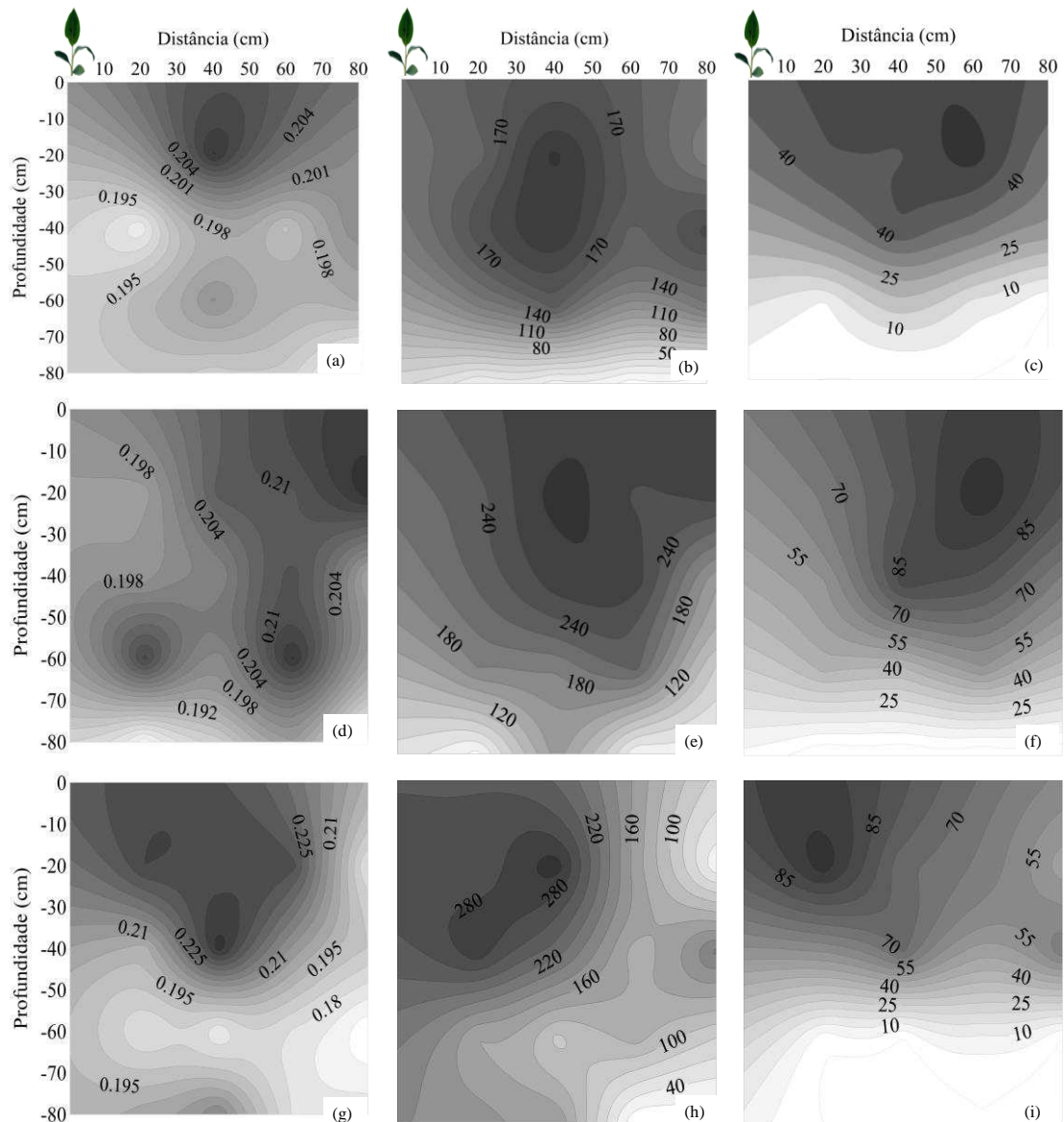


Figura 15 – Isolinhas de distribuição dos teores médios de água em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (a, d, g) e das concentrações em mg.L^{-1} de nitrato (b, e, h) e de potássio (c, f, i) no solo areia franca, para as fases de crescimento vegetativo (a,b,c), floração (d,e,f) e frutificação (g,h,i) no interior do lisímetro após a fertirrigação.

Percebe-se que a distribuição do nutriente foi afetada pelo teor de água no solo, tendo em vista que os sais aplicados no solo via fertirrigação eram conduzidos para as camadas mais profundas, juntamente com a frente de umedecimento, o que pode ser verificado em função da concentração do nitrato e potássio em cada profundidade (figuras 15 e 16), as quais apresentavam valores maiores que zero. De acordo com Zanini (1991), o conhecimento da conformação dos bulbos para as

diferentes condições de campo é muito importante para projetos de irrigação e para a prática da fertirrigação e, de maneira geral, os locais de maiores concentrações de K^+ coincidem com os locais de maior valor de umidade do solo, evidenciando seu caminhamento por fluxo de massa. No que se refere à sua mobilidade no solo, comumente o potássio se desloca pelo processo de difusão. Entretanto, segundo Malavolta (2005), pode haver fluxo de massa se forem aplicadas doses elevadas do elemento no solo. Neste caso, a fração imobilizada do elemento seria devido à adsorção à matriz do solo.

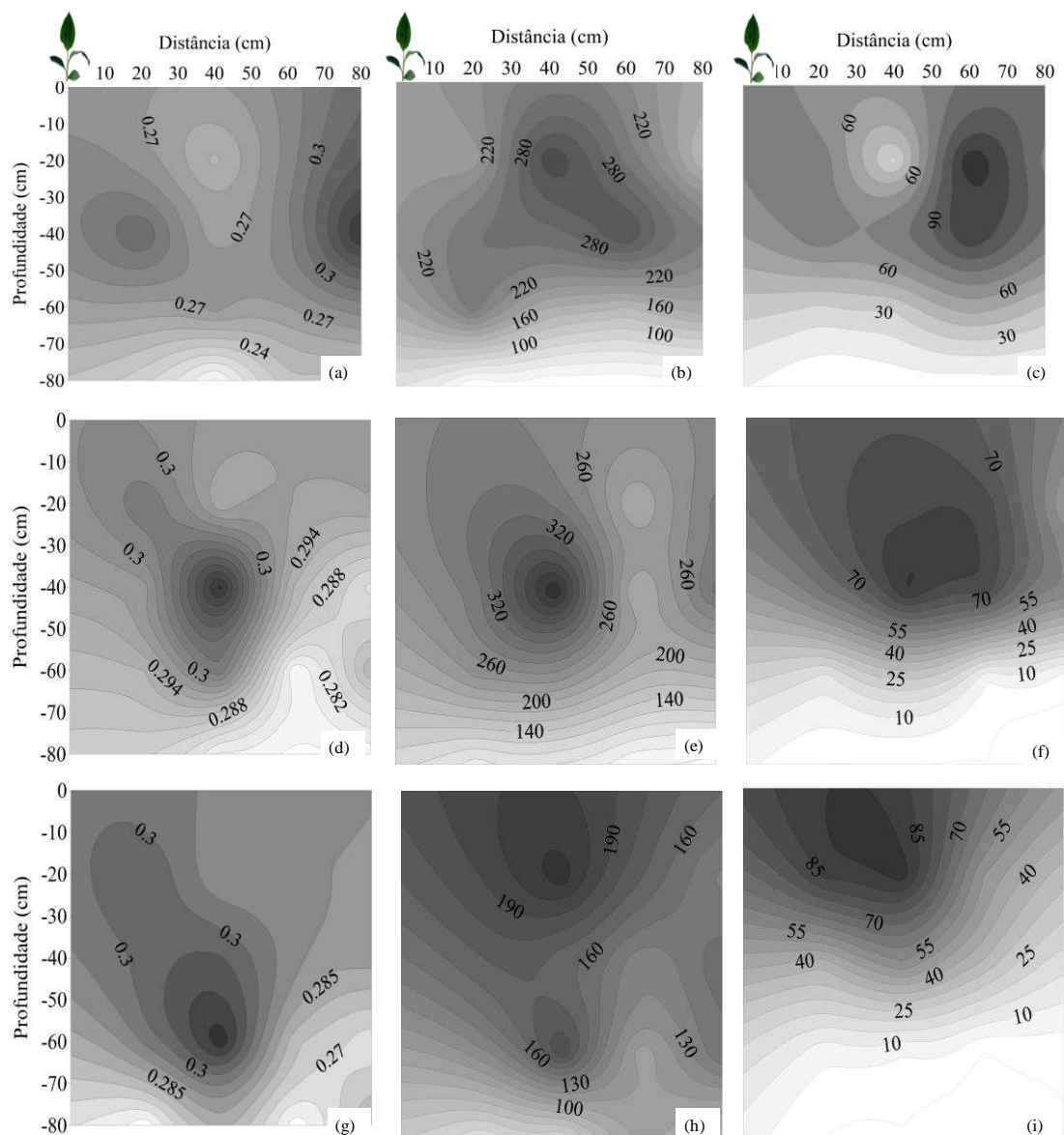


Figura 16 – Isolinhas de distribuição dos teores médios de água em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (a, d, g), nitrato em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (b, e, h) e potássio em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (c, f, i) no solo argilo-arenoso para as fases de

crescimento vegetativo, floração e frutificação, respectivamente, no interior do lisímetro após a fertirrigação.

Nas figuras 15 e 16, é possível observar uma maior concentração dos nutrientes, logo após a fertirrigação, nas camadas superficiais até 40cm de profundidade. O nitrato de potássio foi aplicado segundo a recomendação de 250kg ha⁻¹ano⁻¹ de nitrato, em uma frequência de aplicação semanal, fato que provavelmente favoreceu uma maior adsorção em menores profundidades, uma vez que a redução na quantidade aplicada e na concentração promove menor saturação de sítios de adsorção de nitrato no solo (SANTOS et al., 2009).

Os valores de nitrato, observados sob as condições avaliadas em relação à concentração de nitrato de potássio da água de irrigação, ficaram dentro das faixas de valores encontrados por COELHO et al. (2013), nas quais se identifica teores de nitrato até 250,0 mg L⁻¹ à 60cm de profundidade, em concentração do íon nitrato em função da concentração da ureia e nitrato de potássio na água de irrigação. Essas variações de valores também foram similares às taxas encontradas por Andrade Neto (2012) em estudo de validação de modelos de estimativa de nitrato. O referido autor monitorou, durante 400 dias, níveis de nitrato na solução do solo entre 50 e 200,0 mg L⁻¹ e ficaram próximas das faixas obtidas por COMETTI et al. (2008), que obtiveram teores de nitrato na solução do solo entre 21,8 a 174 mg L⁻¹.

Os níveis de nitrato na água devem ser inferiores a 10 mgL⁻¹, enquanto no solo até 400 mgL⁻¹ (DIMENSTAIN,1999) são mais adequados às culturas. O monitoramento constante de nitrato na solução do solo torna-se imprescindível para um manejo racional da fertirrigação. Quando a concentração de nitrato atinge valores acima de 10 mg L⁻¹ na água de consumo humano, considerado o limite crítico pela legislação brasileira (CONAMA, 2005), pode ser ocasionados problemas à saúde dos consumidores.

Verifica-se que o deslocamento do K⁺ em profundidade foi menor do que o NO₃⁻. Considerando o NO₃⁻, a menor mobilidade do K⁺ está provavelmente relacionada ao caráter aniônico do primeiro, que leva à sua repulsão pelas cargas negativas predominantes no solo. Além deste fator, na camada superficial há mais matéria orgânica, o que implica na predominância de cargas negativas nas micelas do solo. A maior ocorrência de raízes das plantas de bananeira localiza-se próximo à superfície do solo, com 80% deste a 0,51m de profundidade e distância efetiva de 0,66m do pseudocaule da planta (SANT'ANA et al., 2012). Abaixo desta

profundidade, a concentração de K^+ foi menor, provavelmente devido à absorção por parte das raízes de grande parte do K^+ presente na solução do solo, diminuindo a lixiviação deste elemento para camadas mais profundas.

Comparando-se a distribuição do nitrato nos solos em estudo, verifica-se a influência das características físicas do solo na adsorção deste nutriente, visto que o nitrato movimentou-se menos no solo de textura argilosa, enquanto o solo arenoso apresentou a maior lixiviação de nitrato, principalmente na fase de floração da cultura, conforme pode ser visualizado na tabela 13, indicando que no solo areia franca houve menor extração de nitrato pela planta de bananeira. Oliveira et al. (2000), ao estudarem a adsorção de nitrato em Latossolo de cerrado, verificaram que este fenômeno ocorre na subsuperfície do solo, em razão da inversão de cargas.

Conforme Donagemma et al. (2008), considerando a capacidade diferencial de reter os nutrientes e a diferença de risco de contaminação de água subterrânea, as recomendações de doses de nutrientes em fertirrigação deveriam considerar também o tipo de solo e não somente o tipo de cultura.

4.4 Deslocamento miscível das soluções

Os valores médios dos parâmetros de transporte dos íons estudados encontram-se na tabela 15. Verifica-se que os valores do fator de retardamento (R) foram maiores que 1, indicando interação entre o soluto e o solo, ou seja, quando a solução passa no solo, ele adsorve parte do soluto.

Observa-se que ocorreu aumento dos valores do fator de retardamento para os íons potássio e nitrato, em função das concentrações crescentes, as quais contribuem para a redução da lixiviação, já que ao escoar através do solo parte do soluto foi adsorvida. Do ponto de vista eletroquímico, existe uma grande diferença entre a adsorção de nitrato ao solo e a de outros íons, pois ele não é adsorvido especificamente, sendo sua adsorção apenas eletrostática, dependente exclusivamente da carga do solo (ALCÂNTARA e CAMARGO, 2005). Em solos que apresentam inversão de carga em subsuperfície, a retenção de nitrato deve ser maior do que naqueles em que a carga elétrica líquida é negativa em todo o perfil (OLIVEIRA, 2000).

Tabela 15 – Parâmetros de transporte do nitrato e potássio: fator de retardamento (R), coeficiente dispersivo difusivo (D), número de Peclet (P) e coeficiente de adsorção (K_d) para os dois solos estudados.

Nitrato								
Conc.	Solo Areia franca				Solo Argilo-arenoso			
	R	K _d	D(cm ² /h)	P(e)	R	K _d	D(cm ² /h)	P(e)
3	1,33	0,07	59,48	13,02	1,63	0,20	92,19	5,02
6	1,40	0,08	73,70	10,93	1,68	0,22	76,18	6,34
9	1,68	0,14	43,80	17,36	1,71	0,23	64,23	7,16
Potássio								
3	1,71	0,14	27,12	28,56	1,96	0,31	73,14	6,33
6	1,75	0,15	54,01	14,91	1,93	0,30	35,66	13,54
9	1,92	0,18	56,44	13,47	2,11	0,36	46,07	9,99

O íon potássio foi o que apresentou maior valor de R, demonstrando a efetiva interação que ele estabelece com o solo, se comparado ao nitrato. Além disso, este valor indica maior retenção do elemento pelo solo, possivelmente devido à interação entre o cátion e as cargas negativas do solo (tabela 15).

Em geral, nota-se que os números de Peclet (P) foram elevados, indicando deslocamento dos solutos. Esta ocorrência se deu no solo areia franca, majoritariamente, por convecção, por ser um solo com elevado teor de areia, o que permite a condução de água mais facilmente e, juntamente com ela, carrega os solutos dissolvidos, predominando o transporte por convecção.

Segundo MARTINEZ et al. (2010), valores elevados do “Número de Peclet” acontecem normalmente quando a velocidade média do escoamento é elevada. Caso contrário, há predomínio do fluxo dispersivo: quanto menor a velocidade de avanço da solução na coluna de solo, maior é o tempo de contato entre os íons e os colóides do solo, promovendo maior oportunidade de retenção dos solutos (TITO et al., 2012).

O coeficiente de difusão-dispersão (D) apresentou diferentes valores no mesmo solo, nas diferentes concentrações avaliadas. Tal distinção pode ser consequência das inúmeras velocidades de avanço das soluções aplicadas. Oliveira et al. (2004) observaram a mobilidade do potássio para cinco solos do Estado de Minas Gerais, variando a concentração deste e dos íons amônio e fosfato na solução

deslocadora, porém os autores não observaram relação nítida entre as concentrações dos solutos e os parâmetros de transporte obtidos.

Para os íons estudados, os valores mais altos dos coeficientes de dispersão-difusão (D) dizem respeito ao solo argilo-arenoso. Acredita-se que as mais baixas velocidades de avanço da solução encontradas no solo argilo-arenoso tenham proporcionado aos íons avaliados maior tempo de contato com os sítios de adsorção. Valores mais elevados dos coeficientes de difusão-dispersão estão relacionados às menores inclinações das curvas de efluente e, conseqüentemente, ao alargamento da faixa de mistura entre as soluções deslocadora e deslocada no perfil do solo (NIELSEN e BIGGAR, 1962).

Matos et al. (2013), estudando os parâmetros de transporte dos íons potássio, cálcio e magnésio aplicados via vinhaça, encontraram altos valores de coeficiente de dispersão e fatores de retardamento maior que 1. O potássio, segundo Malavolta (1980), é um macronutriente que tem caminhamento no solo predominantemente pelo processo de difusão.

4.5 Simulações das concentrações de nitrato e potássio no solo usando o modelo HYDRUS-2D

A análise de transporte de solutos contemplou o modelo bidimensional. Para avaliação do desempenho do modelo Hydrus-2D, foi realizada uma análise conjunta com índice estatístico “d” para verificar se havia concordância entre os valores simulados e os experimentais. O valor $d = 0$ demonstra que não há concordância e o valor $d = 1$ sinaliza concordância total.

Nota-se que, em geral, as simulações realizadas para o deslocamento de nitrato e potássio no solo apresentaram altos índices de concordância (d) e os valores de RMSE foram mais baixos (tabela 16) que aqueles observados com uso do modelo paramétrico (tabela 11). Os valores simulados pelo software Hydrus-2D apresentaram, portanto, menor dispersão dos dados.

Os índices “ β ” ratificam o bom desempenho do software Hydrus 2D na simulação da concentração do íon nitrato e potássio na solução do solo ao longo do ciclo da cultura. Todos os valores de “ β ” foram próximos da unidade, apresentando pouca diferença com superestimativa de 6% dos valores de nitrato na concentração de 3 g/L (solo areia franca) e de 7% e 2% dos valores de nitratos na concentração de

3 g/L e 9 g/L, respectivamente (solo argilo-arenoso), tendo as demais simulações apresentado subestimativa dos valores de nitrato e potássio pelo software Hydrus2D.

Montenegro et al. (2010), Silva et al. (2012), Montenegro et al. (2013) e Pinho et al. (2014) também empregaram índices estatísticos para avaliar a qualidade do ajuste entre valores medidos e simulados.

Tabela 16 – Indicativos estatísticos para comparação dos valores médios de nitrato e potássio medidos na solução do solo e simulado pelo software Hydrus-2D.

Solo	Concentração g/L	Nitrato				Potássio			
		β	R ²	d	RMSE	β	R ²	d	RMSE
Areia franca	3	1,06	0,65	0,99	18,36	0,96	0,64	0,99	6,99
	6	0,97	0,57	0,99	14,83	0,92	0,75	0,99	8,85
	9	0,85	0,68	0,99	22,81	0,95	0,56	0,99	8,01
Argilo- arenoso	3	1,07	0,70	0,99	19,06	0,86	0,68	0,99	9,66
	6	0,93	0,72	0,99	16,07	0,94	0,70	0,99	7,17
	9	1,02	0,64	0,99	17,38	0,97	0,71	0,99	6,78

A relação entre os valores medidos e simulados, bem como de nitrato e potássio medidos na solução do solo e simulado pelo software Hydrus-2D ao longo do ciclo da cultura da bananeira é expressa na figura 17. Nota-se que, mesmo com a ocorrência de subestimativa e superestimativa dos dados neste estudo, as concentrações de nutrientes simuladas no solo para 3, 6 e 9 g/L foram bem representadas nas simulações pelo modelo HYDRUS-2D, que acompanhou razoavelmente bem a dinâmica de nutriente e suas oscilações na solução do solo durante o ciclo da cultura no lisímetro (figura 17). Esses resultados estão de acordo com Oliveira et al. (2010), Ribeiro et al. (2011) e Pinho et al. (2014), que afirmaram que o modelo HYDRUS foi eficiente nas simulações de deslocamento do potássio e da água.

Na figura 18, observa-se as correlações dos valores médios de nitrato e potássio medidos na solução do solo com os valores simulados pelo software Hydrus-2D e pelos valores estimados pelo modelo Vogeler et al. (1996), adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear no solo areia franca e argilo-arenoso. Verifica-se que os dados medidos pouco diferiram dos dados simulados, em que tanto o modelo Vogeler et al. (1996), adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear, quanto Hydrus-2D apresentaram correlação positiva (r+) com os dados medidos.

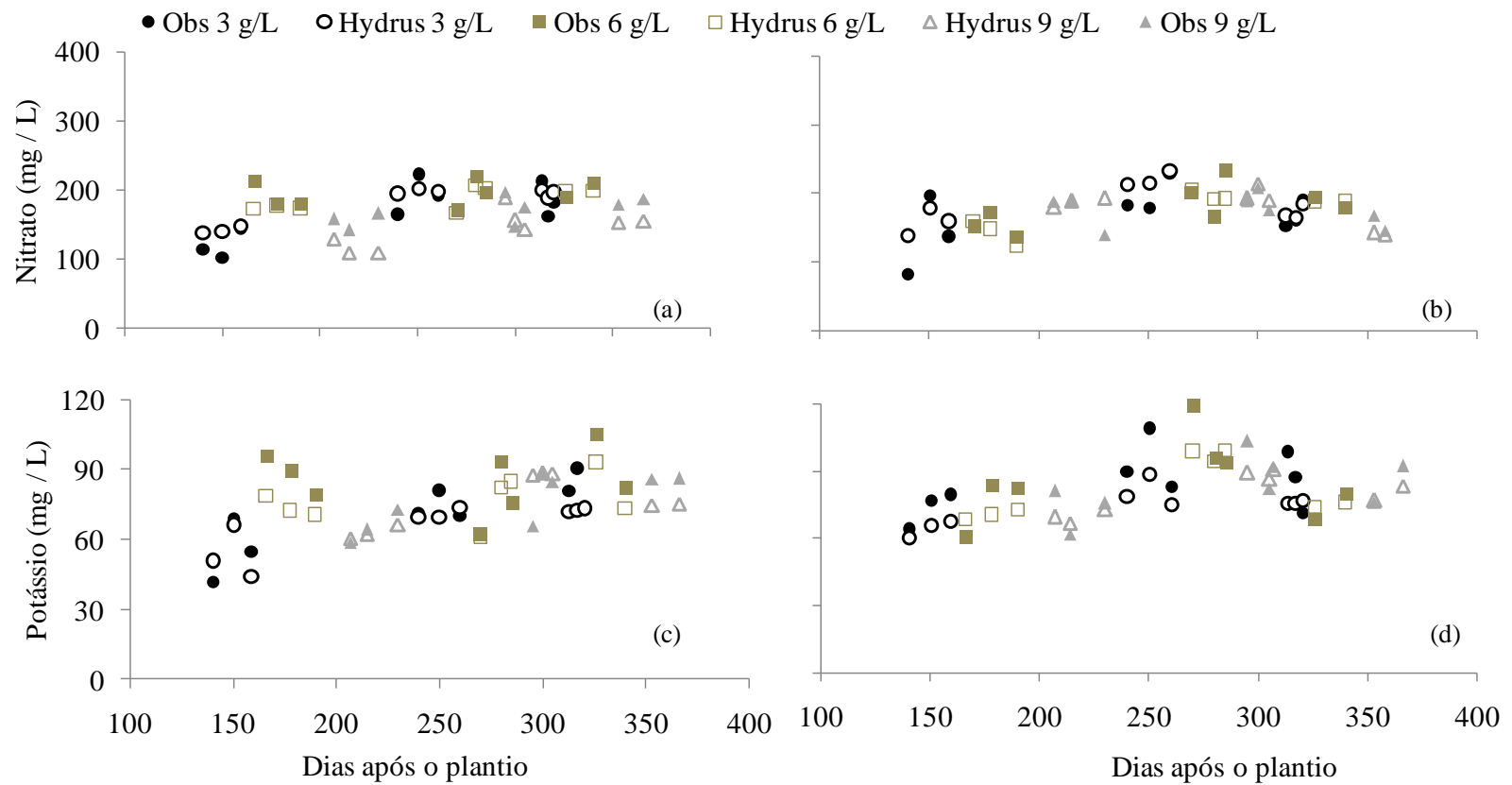


Figura 17 – Valores médios de nitrato e potássio medidos na solução do solo e simulado pelo software Hydrus-2D, referente às concentrações 3, 6 e 9 g/L no solo areia franca (a e c) e argilo-arenoso (b e d).

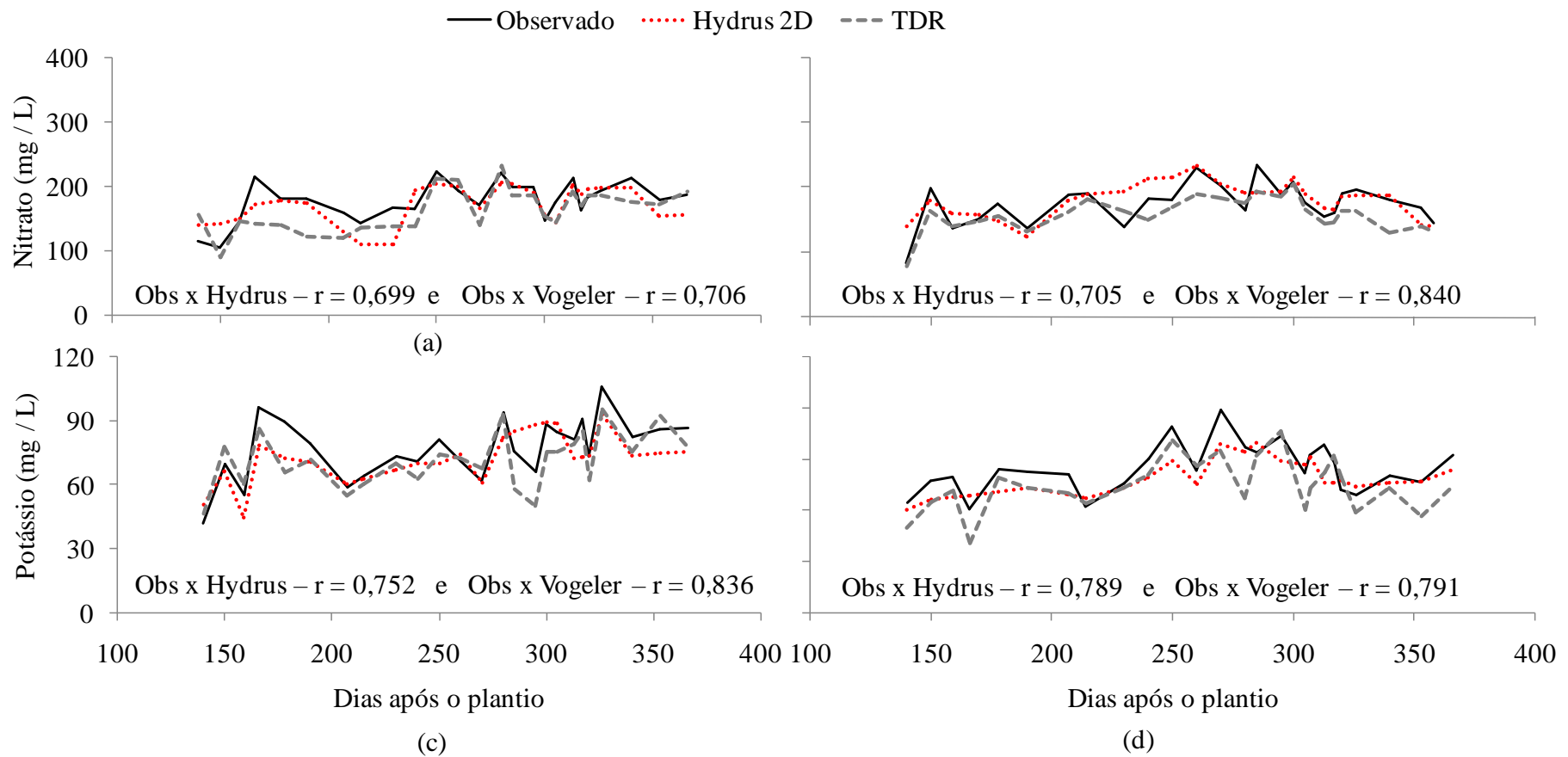


Figura 18 – Valores médios de nitrato e potássio, referente às concentrações 3, 6 e 9 g/L, medidos na solução do solo com os valores simulado pelo software Hydrus-2D e pelos valores determinados por meio da TDR através do modelo Vogeler et al. (1996) adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear no solo areia franca (a e c) e argilo-arenoso (b e d).

De acordo com Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009), uma correlação perfeita se estabelece para o valor de $r = 1$, independente do sinal. Nestes casos, o sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Por outro lado, quando se tem $r = 0$, não há relação linear entre as variáveis.

Nesse estudo, todos os valores de r ficaram acima de 0,70, o que demonstra uma correlação alta entre os dados medidos e estimados (figura 18) conforme a classificação de Cohen (1988). Segundo a qual, $r = 0,10-0,29$ podem ser considerados pequenos; $r = 0,30-0,49$ médios; e entre 0,50-1,0 altos.

Desse modo, observa-se que a utilização do modelo matemático e do software Hydrus 2D se mostraram viáveis para a pesquisa – notadamente o software, consagrado como uma importante ferramenta que pode ser usada de modo satisfatório para a descrição da concentração de nitrato e potássio da solução do solo em condições de campo. Deve ser ressaltado que o software Hydrus 2D necessita de mais parâmetros para a simulação quando comparado com a estimativa por meio dos dados obtidos pela TDR, com auxílio do modelo matemático utilizado por VOGELER et al. (1996), combinado com o modelo linear, fato que poderá levar a uma estimativa mais próxima da realidade dos dados pelo Hydrus 2D, por utilizar mais fatores, relacionados à condição de estudo, para simulação dos dados.

Contudo, a possibilidade de variações nos valores dos parâmetros requeridos pelo modelo exige ajustes precisos para refletir a qualidade das simulações, visto que a quantidade de dados de entrada exigidos aumenta com a complexidade das simulações devido à necessidade de maiores quantidades de parâmetros de entrada.

5. CONCLUSÕES

Em todas as três concentrações avaliadas, a quantidade de nitrato e potássio extraído foi crescente até a fase de floração, havendo decréscimo entre a fase de floração e frutificação, sendo as quantidades de potássio extraído superiores aos valores de nitrato. Verificou-se também que quaisquer uma das três concentrações (3; 6 e 9 g L⁻¹) podem ser utilizadas na fertirrigação com nitrato de potássio sem prejuízos para cultura, conforme os valores de nitrato observados na solução do solo que ficaram dentro dos limites aceitáveis (abaixo de 400 mgL⁻¹).

Houve uma menor mobilidade do K⁺ no perfil do solo em relação ao NO₃⁻, o qual apresentou uma maior lixiviação, principalmente na fase de floração da cultura. O modelo de Vogeler et al. (1996), adaptado para a relação CEw-Ci do tipo linear, apresenta-se como uma boa opção de ferramenta para estimativa dos valores NO₃⁻ e K⁺ no perfil do solo. Por fim, enfatizamos que o programa Hydrus apresenta uma caracterização aceitável na simulação do NO₃⁻ e K⁺ e suas oscilações nas diferentes profundidades no perfil do solo, mostrando-se como um importante meio para a prevenção contra perdas de nutrientes e contaminação das águas subterrâneas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCANTARA, M. A. K.; CAMARGO, O. A. Adsorção de nitrato em solos com cargas variáveis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 369-376, Apr. 2005.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M.. Crop **Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, 1998, 300 p.

ALVES, E. J. **A cultura da banana: aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustriais**. Brasília: EMBRAPA-SPI; Cruz das Almas: EMBRAPA CNPMF, 1997. 585 p.

ALVES, M. S.; COELHO, E. F.; PAZ, V. P. S.; ANDRADE NETO, T. M. Crescimento e produtividade da bananeira cv. Grande Naine sob diferentes combinações de nitrato de cálcio e ureia. **Revista Ceres**, v.57, p.125-131, 2010.

ANDRADE NETO, T. M. de; COELHO, E. F.; SANTANA, J. A. do V.; SANTANA JÚNIOR, E. B.; ALVES, M. da S. Estimativa de potássio na solução do solo baseada na condutividade elétrica e umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16(6), 618-623, 2012.

ANDRADE NETO, T. M.; COELHO, EUGÊNIO F. **Concentração de potássio em função da condutividade elétrica da solução do solo**. *Water Resources and Irrigation Management*, v. 3, p. 13-19, 2014.

ANTONPOULOS, V. Z. Simulation of Water and Nitrogen Balances of Irrigated and Fertilized Corn-Crop Soil. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Vol. 127, No. 2, March/April p. 77-83, 2001.

BARBOSA, F. E. L. Crescimento, fisiologia e produção da bananeira prata anã associada a plantas de cobertura e lâminas de irrigação. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012. 92 f.

BARROS, A. C.; FOLEGATTI, M. V.; SOUZA, C. F.; SANTORO, B. L. Distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Irriga**, v.15, p. 361-372, 2010.

BARROS, D. L.; COELHO, E. F.; OLIVEIRA, B. R.; SANTOS, F. P.. Resposta da bananeira grandnaine a diferentes concentrações da água de irrigação e frequências de fertirrigação. In: **XXIII Congresso Brasileiro de Fruticultura**, 2014, Cuiabá-MT. XXIII Congresso Brasileiro de Fruticultura, 2014.

BORGES, A. L. SILVA, S. O. Extração de macronutrientes por cultivares de banana. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Cruz das Almas, BA, v. 17, n. 1, p. 57-66, 1995.

BORGES, A. L., OLIVEIRA, A. M. G. Nutrição, calagem e adubação. In: CORDEIRO, Z. (Org.). **Banana produção: aspectos técnicos**. Brasília: Embrapa, 2000. p. 47-59. (Frutas do Brasil, 1).

BORGES, A. L.; SILVA, T. O da; CALDAS, R. C.; ALMEIDA, I. E de. Adubação nitrogenada para bananeira-‘terra’(Musa sp. AAB, subgrupo Terra). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, p.189-193, 2002.

BORGES, A. L.; SOUZA, L. da F. **O Cultivo da Bananeira**. Embrapa Mandioca e Fruticultura, Cruz das Almas, 2004. 279 p.

CALDWELL, T. G., WÖHLING, T., YOUNG, M. H., Boyle, D. P., e McDonald, E. V. (2012). Characterizing disturbed desert soils using multiobjective parameter optimizations. **Vadose Zone Journal**, 12.

CAHN, M. D.; BOULDIN, D. R.; CRAVO, M. S. Nitrate sorption in the profile of acid soil. **Plant Soil**, Amsterdam, v.143, p.179-183, 1992.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p. 376-449.

CELIA, M. A.; BOULOUTAS, E. F; ZARBA, R. L. (1990) A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. **Water Resources Research**, 26(7), 1483-1496.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley, University of California: Agricultural Experiment Station, 1942. 124p. (Bulletin, 670).

CLOTE, C. M.; BRISTOW, K. L.; CHARLESWORTH, P. B.; COOK, F. J.; THORBURN, P. J. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. **Irrigation Science**. v. 22, n. 3-4, p. 143-156, 2003.

COELHO, F. C., RUIZ, H. A., FERREIRA, P. A., FRANÇA, G. E. de, ARAÚJO, C. A. de S., DUARTE, M. A. (2000). Transporte do amônio em colunas com agregados de um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 4(3), 362-367.

COELHO, E. F.; Costa, E. L.; Teixeira, A. H. C.; Oliveira, S. L. **Irrigação da bananeira**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2003. Circular Técnica, 53.

COELHO, E. F.; COSTA, F. da S; SILVA, A. C. P. da, CARVALHO, G. C. Concentração de nitrato no perfil do solo fertirrigado com diferentes concentrações de fontes nitrogenadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online], vol.18, n.3, p.263-269, ISSN 1415-4366, 2014.

COELHO, E. F.; LEDO, C. A. da S.; SILVA, S. de O. Yield of banana 'Prata Ana' and 'Grande Naine' at the third cycle under microsprinkler irrigation in the coastland of Bahia State. **Revista Brasileira de Fruticultura** [online], vol.28, n.3, p.435-438, 2006.

COHEN, J. **Statistical Power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1988.

COMETTI, N. N.; MATIAS, G. C. S.; ZONTA, E.; MARY, W.; FERNANDES, M. S.. Efeito da concentração da solução nutritiva no crescimento da alface em cultivo hidropônico-sistema NFT. **Horticultura Brasileira**, v.26, p.262-267, 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA (Brasil). **Ministério do Meio Ambiente**. Resolução n° 357 de 17 de março de 2005. Brasília, 2005. 23p.

COSTA, S. N. da; MARTINEZ, M. A.; MATOS, A. T. de; RAMOS, V. B. N. Mobilidade do nitrato em colunas de solo sob condições de escoamento não permanente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.2, p.190-194, 1999.

CRUZ, A. C. R. **Consumo de água por cultura de citros cultivada em latossolo vermelho amarelo**. 2003. 92 f. Tese (Doutorado em agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; KRÜGER, C. A. M. B.; BERGONCI, J. I.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.45, n.8, p.780-790, ago. 2010.

DIMENSTEIN, L. **Fertirrigação**. Fortaleza: Instituto Frutal, 1999. 31 p. Curso Técnico.

DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; ALVAREZ, V. H.; FERREIRA, P. A.; CANTARUTTI, R. B.; SILVA, A. T. da; FIGUEIREDO, G. C. Distribuição do amônio, nitrato, potássio e fósforo em colunas de latossolosfertirrigadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2493-2504, 2008.

DONATO, S. L. R.; ARANTES, A. de M.; COELHO, E. F.; RODRIGUES, M. G. V. Considerações ecofisiológicas e estratégias de manejo da bananeira (ecophysiological considerations and banana management strategies). Montes Claros-MG. Simposio Brasileiro de bananicultura. (2015).

ELMI, A.; NOHRA, J. S. A.; MADRAMOOTOO, C. A.; HENDERSHOT, W. Estimating phosphorus leachability in reconstructed soil columns using HYDRUS-1D model. **Environmental Earth Sciences**, v.65, n.6, p.1751-1758, 2012.

FARIA, N. G. **Absorção de nutrientes por variedades e híbridos promissores de bananeira**. Cruz das Almas, BA: UFBA Escola de Agronomia, 1997. 66 p. Dissertação de Mestrado.

FEDDES, R.A.; KOVALIK, P.J.; ZARADNY, H. Simulation of field water use and crop yield. New York: John Wiley, 1978. 188 p.

FERREIRA, P. A.; MATOS, A. T.; RUIZ, H. A.; GARCIA, G. O. de; BORGES JUNIOR, J. C. F. Transporte no solo de solutos presentes na água residuária de café conilon. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 28: 1-8, 2006.

FIDALSKI, J.; AULERI, P. A. M.; BERALDO, J. M. G.; MARUR, C. J.; FARIA, R. T. de; BARBOSA, G. M. de C. Availability of soil water under tillage systems, mulch management and citrus rootstocks. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 917-924, 2010.

FIGUEIREDO F. P. DE; MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. A.; COSTA L. C.; RAMOS, M. M.; OLIVEIRA, F. G. Produtividade e qualidade da banana prata anã, influenciada por lâminas de água, cultivada no norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.798-803, 2006.

FIGUEIREDO FILHO, D.; JÚNIOR, SILVA J. A. da. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). In: **Revista Política Hoje**, Vol. 18, nº 1, 2009.

FREITAS, P. S. MANTOVANI, L.; E. C., SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C. Efeito da cobertura de resíduo da cultura do milho na evaporação da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 85-91, 2004.

FREITAS, W. S.; RAMOS, M. M.; COSTA, S. L. Demanda de Irrigação da cultura da banana na bacia do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 04, p. 343-349, 2007.

GANESHAMURTHY, N.; SATISHA, G.; PRAKASH PATIL, P. Potassium Nutrition on yield and quality of fruit crops with special emphasis on banana and grapes. **Karnataka Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.24, n.1, p.29-38, 2011.

GARCIA, W. V.; ALCÂNTARA, M. A. K.; CAMARGO, O. A.; IZÁRIO FILHO, H. J.; ANDREOTE, F. D. Deslocamento miscível de um efluente de indústria de explosivo em colunas de solo. **BRAGANTIA**, Campinas, v. 71, n. 1, p. 98-105, 2012.

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

GENUCHTEN, M.T. Van. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Riverside: **US Salinity Laboratory**, 1987. 221 p. (Research Report).

GOMES, J. A. **Absorção de nutrientes pela bananeira cv. Prata (Musa AAB, subgrupo prata) em diferentes estádios de desenvolvimento**. 1988. 98 p. Dissertação (Mestrado em Fruticultura), Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

GONÇALVES, A. D. M. C.; MIRANDA, J. H.; ROSSI, P.; SABADIN, J. F. G.; KAMOGAWA, M.Y. Temperature effect in potassium and nitrate ions in soil transport. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 438-447, 2008.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers**. 7th ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2005. 515p.

HE, Z.; VAN NOSTRAND, J. D.; DENG, Y.; ZHOU, J. Development and applications of functional gene microarrays in the analysis of the functional diversity, composition, and structure of microbial communities. **Frontiers of Environmental Science & Engineering in China**, v. 5, n. 1, p. 1-20, 2011.

HEIMOVAARA, T. J., FOCKE, A. G., BOUTEN, W., VERSTRANTEN, J. M. Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.689-698, 1995.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004. 494 p.

HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: Departamento de Solos/UFRGS, 1970. 231p.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring hydraulic characteristics "in situ". **Soil Science**, v. 144, p. 395-400, 1972.

HOFFMANN, R.B.; OLIVEIRA, F.H.T. de; SOUZA, A.P. de; GHEYI, H.R.; SOUZA JÚNIOR, R.F. de. Acúmulo de matéria seca e de macronutrientes em cultivares de bananeira irrigada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.32, p.268-275, 2010.

KANZARI, S.; HACHICHA, M.; BOUHLILA, R.; BATTLE-SALES, J. Characterization and modeling of water movement and salts transfer in a semi-arid region of Tunísia (BouHajla, Kairouan) - Salinization risk of soils and aquifers. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.86, p.34-42, 2012.

KISSEL, E.; VAN ASTEN, P.; SWENNEN, R.; LORENZEN, J.; CARPENTIER, S.C. Transpiration efficiency versus growth: Exploring the banana biodiversity for drought tolerance. **Scientia Horticulturae**, v.185, n., p.175-182, 2015.

KRAUSS, A. Potassium effects on yield quality. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Eds.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, cap. 11, p. 281-299, 2005.

KUNZ, J. ÁVILA, V. S. de, PETRY, M. Distribuição temporal e espacial da umidade do solo em sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial. **Revista Monografias Ambientais - REMOA**, v.13, n.5, p.3963-3976, 2014.

LACOEUILHE, J.J. Rythm d'absortiondupotassium em relationaveclacroissance: cas de l'ananas e dubananier. In: INSTITUTO INTERNACIONAL DA POTASSA. **Potassium in tropical crops and soils**. Berne, 1974.p.177-183.

LANDIS, T. D., TINUS, R. W., MCDONALD, S. E., BARNETT J. P. The container tree nursery manual, 4. Agric. Handbk. 674. Washington, D.C.: Department of Agriculture, Forest Service, 1-67, 1989.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005. 335 p.

MAHOAUCHI, J.; LÓPEZ-CLIMENT, M.F.; GÓMEZ-CADENAS. A. Hormonal and hidroxcinnamic acids profiles in banana leaves in response to various periods of water stress. **The Scientific World Journal**, New York, p.1-9, 2014.

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: POTAFOS, 1997. 319p.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido. In: MEDEIROS, S. S.; GHEY, H. R. G.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. S. (Ed.). **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, p.383-422, 2011.

MARQUES, J. D. de O.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W. G.; FERREIRA, S. J. Variações do carbono orgânico dissolvido e de atributos físicos do solo sob diferentes sistemas de uso da terra na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.611-622, 2012.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3^a ed. Austrália: Elsevier, 2012, 651 p.

MARTINEZ, M.A.; SILVA, J.B.G.; PEREIRA, D.R. Modelagem do movimento de sais no solo. In: Hans Raj Gheyi; Nildo da Silva Dias; Claudivan Feitosa de Lacerda. (Org.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 1ed. Fortaleza. INCTsal, v. 1, p. 93-113, 2010.

MARTIN-PRÉVEL, P.; LACOEULHE, J.J.; MARCHAL, J. Les éléments minéraux dans le bananier 'Gros Michel' au Cameroun. **Fruits**, Paris, v.23, n.5, p.259-269, 1968.

MARTIN-PRÉVEL, P.; MONTAGUT, G. Essais sol-plante sur bananeiers; fonctions des divers organes dans l'assimilation de P, K, Ca, Mg. **Fruits**, Paris, v.21, n.8, p.395-416, 1966.

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

MATOS, A.T. DE; GARIGLIO, H.A. DE A.; MONACO, P.A.V.L.O. Deslocamento miscível de cátions provenientes da vinhaça em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.7, p.743-749, 2013.

MEDEIROS, R. M.; SILVA, J. A. S.; SILVA, A. O.; MATOS, R. M.; BALBINO, D. P. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para a área produtora da banana do município de Barbalha, CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.7, n.º. 4, p. 258 - 268, 2013.

MEDEIROS, R. M.; MATOS, R. M.; OLIVEIRA, R. C. S.; SILVA, P. F.; SABOYA, L. M. F. Balanço hídrico climatológico e classificação climática de cultivo de banana em Lagoa Seca - PB. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.3, p.178, 2015.

MINELLA, J. P. G. MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; CASSOL, E. A. Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. In: PRADO, R.B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. de (Ed.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 105- 121, 2010.

MIRANDA, J. H.; BÉRGAMO, L. R.; REIS, J. B. R. da S.; CRUCIANI, D. E.; DUARTE, S. N. Distribuição da concentração de potássio no solo em lisímetros cultivados com amendoim. **Engenharia Agrícola**, 30 (2), 253-262, 2010.

MOLINE, E. F. da V; BARBOZA, E; SIMÕES, L. P; FERREIRA FILHO, G. S; SOUZA, F. L. F; SCHLINDWEIN, J. A. Ponto de murcha permanente em solos arenoso e argiloso utilizando o tomateiro como cultura indicadora. **Global.SciTechnol**, Rio Verde, v. 06, n. 01, p.164 – 170. 2013.

MONTENEGRO, S. G.; MONTENEGRO, A. A. de A.; RAGAB, R. Improving agricultural water management in the semiarid region of Brazil: experimental and modelling study. **Irrigation Science**, v.28, n.4, p.301-316, 2010.

MONTENEGRO, S. G. L; DA SILVA JUNIOR, J. G; MONTENEGRO, A. A. de A; de CARVALHO, José F; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C. Experimentação e modelagem do avanço de sais no perfil do solo em área cultivada com repolho sob alternativas de manejo de irrigação, no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 2013, 8 (Sinmes).

MORAES, J. G. de; MARCIANO, C. R., AMARAL, C. A.; SOUSA, E. F. de; MARINHO, C. S. Balanço hídrico e coeficiente de cultura da laranjeira 'Folha Murcha' no Noroeste Fluminense. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.46, n. 2, p. 241-249, 2015.

MOTA, J.C.A. **Componentes do balanço de água em um Cambissolocultivado com meloeiro irrigado por gotejamento, com e sem cobertura da superfície**. 2010. 124 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutricao de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de Sao Paulo, Piracicaba, 2010.

MUCHOVEJ, R. M. C.; REHCIGL, 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**. Lewis Publication, 1994, p. 91-135.

MUÑOZ-CARPENA, R.; REGALADO, C. M.; ALVAREZ-BENEDÍ, J.; SOCORRO, A.R.; PÉREZ, N. Determinación simultánea mediante TDR del transporte de agua y un soluto salino en el suelo. In: López, J.J.; Quemada, M. **Temas de investigación en zona no saturada**. 5.ed., Pamplona: Universidade Pública de Navarra, p.1-7, 2001.

MUÑOZ-CARPENA, R.; REGALADO, C.M.; RITTER, A.; ALVAREZ-BENEDÍ, J.; SOCORRO, A.R. TDR estimation of electrical conductivity and saline solute concentration in a volcanic soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, p. 399-413, 2005.

MUTHUSAMY, M.; UMA, S.; BACKIYARANI, S.; SARASWATHI, M.S. Computational prediction, identification, and expression profiling of microRNAs in banana (*Musa spp.*) during soil moisture deficit stress. **The Journal of Horticultural Sciences & Biotechnology**, v.89, n.2, p.208-214, 2014.

NEVES, R. L. L.; FERREYRA, F. F. H.; MACIEL, R. F. P.; FROTA, J. N. E. Extração de nutrientes em banana (*Musa sp*) cv 'Pacovan'. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 22, p. 115-120, 1991.

NICOHELLI, L. M.; NASCENTES, R.; LIMA, E. B. N. R.; SOARES, F. S. C. Sorção de potássio em amostras de solo submetidas à aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16(7), 754-760, 2012.

NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Miscible displacement: III, Theoretical considerations. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.26, n.3, p.216-221, 1962.

NIELSEN, D. R.; VAN GENUCHTEN, M. T.; BIGGAR, J. W. Water flow and solute transport process in the unsaturated zone. **Water Resources Research**, Washington, v.22, n.9, p.89-108, 1986.

NIMMER, M.; THOMPSON, A.; MISRA, D. Water table Mounding Beneath storm water infiltration Basins. **Environmental & Engineering Geoscience**, v19, n°2, May. 2009, p67-79.

OLIVEIRA, F. de A.; MEDEIROS, J. F. de; DUARTE, S. N.; SILVA JÚNIOR, M. J. DA.; CAMPELO, C. M. Calibração de extratores providos de cápsula porosa para monitoramento da salinidade e da concentração de íons. **Engenharia Agrícola**, v.31, p.520-528, 2011.

OLIVEIRA, J.R.A. de; VILELA, L.; AYARZA, M.A. Adsorção de nitrato em solos de Cerrado do Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1199-1205, 2000.

OLIVEIRA, L.F.C.; LEMKE-DE-CASTRO, M.L.; RODRIGUES, C.; BORGES, J.D. Adsorção e deslocamento de íon cádmio em solos do Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 848-855, 2010.

OLIVEIRA, N. T.; CASTRO, N. M. R.; GOLDENFUM, J. A. Influência da palha no balanço hídrico em lisímetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.15, p.93-103, 2010.

OLIVEIRA, R. H.; ROSOLEM, C. A.; TRIGUEIRO, R. M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:439-445, 2004.

OLSON, R.A. Nitrogen use in dryland farming under semiarid conditions. In: HAUCK, R.D. (Ed.). **Nitrogen in crop production**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1984. p.335-347.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Caracterização e diagnóstico de sistemas de irrigação e práticas de manejo de água na citricultura do Norte do estado de São Paulo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 28, n. 2, p. 531- 551, 2011.

PAVAN, M.A. Alumínio em solos ácidos do Paraná: relação entre o alumínio não-trocável, trocável e solúvel, com o pH, CTC, porcentagem de saturação de Al e matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 7:39-46, 1983.

PAZ, I. S. R. ; MENEZES, L. C. A. ; VASCONCELLOS, C. A. B. ; ROTUNNO FILHO, O. C. ; AMORIM, J. C. C. ; PAIVA, K. . Modelagem Numérica do Fluxo de Água em Solos Não-Saturados. In: XIX SBRH, 2011, Maceió, AL. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

PEIXOTO, A. P. B. Análise da dinâmica do potássio e nitrato em colunas de solo não saturado por meio de modelos não lineares e multiresposta. **Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba**, 2013.

PERSSON, M.; UVO, C. B. Estimating soil solution electrical conductivity from time domain reflectometry measurements using neural networks. **Journal of Hydrology**, v. 273, n. 1/4, p. 249-256, 2003.

PINHO, R. E. da C. de; MIRANDA, J. H. de. Avaliação do modelo HYDRUS-1D na simulação do transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, p. 899-911, 2014.

PONCIANO, I. de M. Aplicação da reflectometria no domínio do tempo (TDR) na estimativa da condutividade elétrica da solução do solo e de concentrações de nitrato, potássio e cloreto em coluna de solo não saturado. **Tese** (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2012.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora Unesp, 2008. 407 p.

RAMOS. B. Z.; PAIS. P. S. M.; FREITAS. W. A.; D. JUNIOR. M. S. D. Avaliação dos atributos físico-hídricos em um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de manejo-Lavras/Minas Gerais/Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 36, n. 3, jul. 2013.

RAVI, I.; UMA, S.; VAGANAM, M.M.; MUSTAFFA, M.M. Phenotyping bananas for drought resistance. **Frontiers in physiology**, Ohio, v.4, n.1, p.1-15, 2013.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. Campinas**: Fundação Cargill, 1985. 486p.

RHOADES, J. D., MANTEGHI, N. A., SHOUSE, P. J., ALVES, W. J. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society America Journal**, v.53, p.433-439, 1989.

RHOADES, J. D.; RAATS, P. A.; PRATHER, R. J. Effects of liquid phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.40, n.5, p.651-655, 1976.

RIBEIRO, D.P.; MARTINEZ, M.A.; MATOS, A.T.; RUIZ, H.A.; PARREIRAS, M.S.N.; CECON, P.R. Relação da velocidade de escoamento da solução e do comprimento da coluna de solo com os parâmetros de transporte de potássio em um Latossolo e um Neossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 6, p. 1907-1916, 2011.

RICHETTI, J.; JOHANN, J. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; BECKER, W. R.; PALUDO, A. Uso de dados de sensoriamento remoto do modelo ECMWF para geração de balanço hídrico do solo na região oeste do Paraná. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA. **Anais...** p.2011–2014, 2014. Campo Grande - MS.

RIVERA, R. N. C.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; BOTREL, T. A. Modelo aplicado à dinâmica da água e do potássio no solo sob irrigação por gotejamento - análise de sensibilidade. **Revista de Engenharia Agrícola**, v.28, n.3, p.448-459, 2008.

RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: US Department of Agriculture, 1954. 160p. USDA Agricultural Handbook, 60.

ROSA, C. E. et al. (Org.). **Calagem e Adubação. Indicações técnicas da Comissão Sul Brasileira de Pesquisa de Trigo**. Cruz Alta: FUNDACEP, 2005. cap. 2, p. 55-71.

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

SAMPAIO, A. H. R.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F.; DANIEL, R.; MACHADO, V. V.; CARVALHO, G. C.; SANTANA JUNIOR, E. B. Déficit hídrico e secamento parcial do sistema radicular em pomar de lima ácida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 10, p. 1141-1148, 2010.

SANTANA, J.A. do V., COELHO, E.F. FARIA, M.A., SILVA, E.L., Donato, S.L.R. (2012). Distribuição de raízes de bananeira 'PrataAnã' no segundo ciclo de produção sob três sistemas de irrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.34, p.124-133.

SANTANA, G. da S.; COELHO, E.F.; SILVA, T. S. M. da, M. M. Estimativa da condutividade elétrica da solução do solo a partir do teor de água e da condutividade elétrica aparente do solo. **Eng. Agríc.** [online]. 2006, vol.26, n.3 [cited 2016-07-14], pp.672-685.

SANTANA, G. S.; COELHO, E. F.; SILVA, T. S. M.; RAMOS, M. M. Relação entre potássio na solução do solo, umidade e condutividade elétrica aparente do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 142-157, 2007.

SANTOS, F.; MONTENEGRO, A.; SILVA, J.; SOUZA, E. Determinação do consumo hídrico da cenoura utilizando lisímetros de drenagem, no agreste pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.4, n.3, p.304-310, jul.-set., 2009.

SANTOS, L. V.; POLIVANOV, H.; ALAMINO, R. C. J.; SILVA, V. H. G. Adsorção de cloreto e potássio em solos tropicais. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v.29, p.101-121, 2006.

SANTOS, M. R. dos; MARTINEZ, M. A.; ZONTA, J. H.; MATOS, A. T. de; OLIVEIRA, R. A. de. Uso da Reflectometria no Domínio do Tempo para avaliar a distribuição de nitrato em colunas de solos fertirrigados. *Revista Ambiente & Água*, v. 4, n. 3, p. 67-81, 2009.

SANTOS, M. R. dos; MARTINEZ, M. A.; ZONTA, J. H.; MATOS, A. T. de; OLIVEIRA, R. A. de. Uso da reflectometria no domínio do tempo para avaliar a distribuição de fósforo em colunas de solos fertirrigados. *Idesia*, v. 30, p. 45-53, 2012.

SANTOS, M. R.; MARTINEZ, M. A.; ZONTA, J. H. Modelos para determinação de fósforo e nitrato em neossoloquartzarênico e latossolo vermelho usando TDR. *Engenharia na Agricultura*, v. 18, p. 30-39, 2010.

SANTOS, R. S. da S.GONÇALVES, A. D. M. A. **Simulação da dinâmica do íon potássio pelo modelo HYDRUS-1D em condições de solo salino**. 2014. 133 p. tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SCANLON, B. Review of HYDRUS-1D. *Southwest Hydrol.*2004, 3(4):37.

SILVA JÚNIOR, M. J.; DUARTE, S. N.; OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F. de; DUTRA, I. Resposta do meloeiro à fertirrigação controlada através de íons da solução do solo: Desenvolvimento vegetativo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.715-722, 2010.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTEIRO, A. L. N.; SILVA JUNIOR, V. P.. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. *Agrária* (Recife. Online), v. 10, p. 293-303, 2015.

SILVA, J. T. A.; BORGES, A. L.; MALBURG, J. L. Solos, adubação e nutrição da bananeira. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 20, n. 196, p. 21-36, 1999.

SILVA, J.R.L da., MONTENEGRO, A. A. A de., MONTEIRO, A. L. N., SILVA JUNIOR, V. P de. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.10, n.2, p.293-303, 2015.

SILVA, L.L.; Ragab, R.; DUARTE, I.; LOURENÇO, E.; SIMÕES, N.; CHAVES, M.M. Calibration and validation of SALTMED model under dry and wet year conditions using chickpea field data from Southern Portugal. **Irrigation Science**, 2012.

SILVA, T. J. A.; MONTENEGRO, A. A.; RODRIGUES, J. J. V.; BONFIM, E. M. S. Aplicação de lisímetro de pesagem hidráulica na determinação da evapotranspiração de referência, em Petrolina - PE. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.511-520, 2003 9 (b).

SILVA, T.O.; BORGES, A.L.; CARVALHO, J.G.; DAMASCENO, J.E.A. Adubação com potássio e nitrogênio em três ciclos de produção da bananeira cv. Prata-Anã. **Revista Brasileira de Fruticultura**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 152-155, 2003(a).

ŠIMŮNEK, J.; HOPMANS, J. W. Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecol. Model.*, 220: 505-521, 2009.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.Th.; ŠEJNA, M. Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.7, p.587-600, 2008.

SOUZA, E. R. DE; FREIRE, M. B. G. dos S.; CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; RUIZ, H. A., LINS, C. T. Biomass, anatomical changes and osmotic potential in *Atriplex nummularia* Lindl. cultivated in sodic saline soil under water stress. **Environmental and Experimental Botany**, v.82, p.20-27, 2012.

SOUZA, E. R. de; MELO, H. F. de; ALMEIDA, B. G. de; MELO, D. V. M. de. Comparação de métodos de extração da solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 510-517, 2013.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop Yield Response to Water** - Irrigation and Drainage Paper FAO-66.Rome, 2012. 505 p.

TAYLOR, S.A.; ASHCROFT, G.M. **Physical edaphology**. San Francisco: Freeman, 1972. 533 p.

TEIXEIRA, J. de C.; COELHO, E. F.; BARROS, D. L. Concentração da solução de injeção e frequência de fertirrigação em latossoloamarelo. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2., 2014, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI, 2014.

TEIXEIRA, L.A.J.; QUAGGIO, J.A.; MELLIS, E.V. Ganhos de eficiência fertilizante em bananeira sob irrigação e fertirrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.33, p.272-278, 2011.

THOMAS, G.W.; BERTSCH, P.M. Potassium status of temperate region soils. In: MUNSON, R.D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA/CSSA/ SSSA. p.131-162, 1985.

TITO, G. A.; CHAVES, L. H. G.; GUERRA, H. O. C.. Mobilidade do zinco e do cobre em Argissolo com aplicação de argila bentonita. **Revista brasileira engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 938-945, Sept. 2012.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. & SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **R. Bras. Ci. Solo**, 22:301-309, 1998.

VANHOVE, A.C.; VERMAELEN, W.; PANIS, B.; SWENNEN, R.; CARPENTIER, S.C. Screening the banana biodiversity for drought tolerance: can an in vitro growth model and proteomics be used as a tool to discover tolerant varieties and understand homeostasis. **Frontiers in Plant Science**, Paris, v.3, n.176, p.1-10, 2012.

VALOCCHI, A. J. Describing the transport of ion-exchanging contaminants using an effective kd approach. **Water Resource Research**, v.20, n.4, p.499-503, 1984.

VOGELER, I.; CLOTRIER, B. E.; GREEN, S. R.; SCOTTER, D. R.; TILLMAN, R. W. Characterizing water and solute movement by TDR and disk permeametry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 1, p. 5-12, 1996.

VAN DAM, J.C.; FEDDES, R.A. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam v. 233, p.72-85, 2000.

VOSSELEN, V. A.; VERPLANCKE, H.; RANST, V. E. Assessing water consumption of banana: Traditional versus modelling approach. **Agricultural Water Management**, v.74, p.201-218, 2005.

YANG, M.D.; YANFUL, E.K. Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water Table conditions. **Advances in Environmental Research**, v.6, p.505-521, 2002.

WANG, Z.; LI, J.; LI, Y. Simulation of nitrate leaching under varying drip system uniformities and precipitation patterns during the growing season of maize in the North China plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 142, p. 19-28, 2014.

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, v.46, n.1, p.24-38, 1991.