



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

LUIZ EDUARDO VIEIRA DE ARRUDA

**SIMULAÇÃO PELO MODELO HYDRUS 2D DA DINÂMICA DE ÁGUA E
TRANSPORTE DE POTÁSSIO EM UM CAMBISSOLO DO SEMIÁRIDO
POTIGUAR**

MOSSORÓ

2018

LUIZ EDUARDO VIEIRA DE ARRUDA

**SIMULAÇÃO PELO MODELO HYDRUS 2D DA DINÂMICA DE ÁGUA E
TRANSPORTE DE POTÁSSIO EM UM CAMBISSOLO DO SEMIÁRIDO
POTIGUAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Manejo do solo e da água no ambiente agrícola

Orientador: José Francismar de Medeiros, Dr.

Coorientador: Sérgio Luiz Aguilar Levien, Dr.

MOSSORÓ

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A773s Arrruda, Luiz Eduardo Vieira de.
SIMULAÇÃO PELO MODELO HYDRUS 2D DA DINÂMICA DE
ÁGUA E TRANSPORTE DE POTÁSSIO EM UM CAMBISSOLO DO
SEMIÁRIDO POTIGUAR / Luiz Eduardo Vieira de
Arrruda. - 2018.
144 f. : il.

Orientador: José Francismar de Medeiros.
Coorientador: Sérgio Luiz Aguilar Levien.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2018.

1. Manejo da irrigação. 2. Irrigação por
gotejamento superficial. 3. Fluxo de água no
solo. 4. Transporte de soluto no solo. 5.
Modelagem matemática. I. Medeiros, José
Francismar de, orient. II. Levien, Sérgio Luiz
Aguilar, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LUIZ EDUARDO VIEIRA DE ARRUDA

**SIMULAÇÃO PELO MODELO HYDRUS 2D DA DINÂMICA DE ÁGUA E
TRANSPORTE DE POTÁSSIO EM UM CAMBISSOLO DO SEMIÁRIDO
POTIGUAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água.

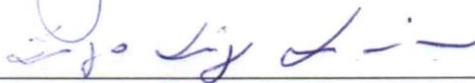
Linha de Pesquisa: Manejo do solo e da água no ambiente agrícola

Defendida em: 24 / 04 / 2018

BANCA EXAMINADORA



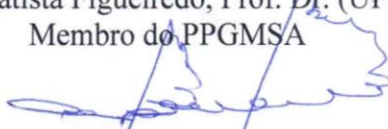
José Francismar de Medeiros, Dr. (UFERSA)
Presidente



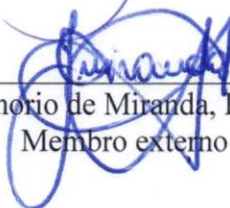
Sérgio Luiz Aguilar Levien, Dr. (UFERSA)
Coorientador



Vladimir Batista Figueirêdo, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro do PPGMSA



Celsemy Eleutério Maia, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro externo ao PPGMSA



Jarbas Honorio de Miranda, Prof. Dr. (ESALQ/USP)
Membro externo à UFERSA

Aos meus pais ***Lúcia Fátima da Silva***
e ***Jaime Vieira de Queiroz*** por todos
os ensinamentos, conselhos, carinho e
amor.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares que sempre me apoiaram e são a base para realização de todos os meus sonhos e em especial a Katiana Karina de Arruda, Fabrício Freitas de Oliveira, Walkíria Karízia da Silva, Vítória Karízia da Silva Souza, Valentina Karízia da Silva Souza e Kaio Fábio de Arruda Freitas e Maria Clara de Arruda Freitas.

Ao Orientador José Francismar de Medeiros pela confiança creditada a mim, desde o princípio, e por todos os ensinamentos, orientações e conselhos.

Ao Orientador Sérgio Luiz Aguilar Levien, por estar presente em todos os momentos, ensinando, aconselhando e incentivando a fazer sempre o melhor.

À minha namorada Maria da Conceição da Silva Leite por se fazer presente, mesmo estando longe, sempre disposta a ouvir, aconselhar e incentivar em todos os momentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água e a todos os professores que fazem parte deste e que contribuíram direta e indiretamente para esta pesquisa, e em especial aos professores Vladimir Batista Figueirêdo, Luis César de Aquino Lemos Filho e Jeane Cruz Portela, que foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos Hudson, Danniely, Júnior, Larissa, Márcio, Lucas Ramos, Eduardo Bruno, Priscila, Marquinhos, Havilla, Marcos, Lurdinha, Raimundinha (madrinha), Toinho (padrinho), Dário, Michele, Junior Resende, Welington, André Paulo, Bruno, Leonardo, Paulo Roberto, Dayvison e Laura que sempre me apoiaram e ajudaram a enfrentar os momentos difíceis.

Aos funcionários da UFERSA Antônio Carlos da Silva, Maria Valdete da Costa, Elídio Andrade Barbosa, Ana Kaline da Costa Ferreira, Antônio Tomaz da Silva Neto e ao servidor terceirizado Sérgio, por me apoiarem e ajudarem na realização deste trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa e ao Programa de Manejo de Solo e Água pela oportunidade de realização deste curso.

“A vida é uma grande universidade, mas pouco ensina a quem não sabe ser aluno.”

Augusto Cury

RESUMO

ARRUDA, L. E. V. de. Simulação pelo modelo HYDRUS 2D da dinâmica de água e transporte de potássio em um Cambissolo do Semiárido Potiguar. 2018. 144f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.

Nas regiões áridas e semiáridas do Nordeste Brasileiro a água é um recurso escasso e sua retirada excessiva, nas últimas décadas, vem acarretando aumento da concentração de sais e, conseqüentemente, redução da sua qualidade. É necessário conhecer a dinâmica de água e o transporte de solutos no solo, quando estes são aplicados na superfície do solo, com o objetivo de prever sua distribuição espacial, que é fundamental para se estabelecer a melhor maneira de se monitorar umidade, salinidade e nutrientes na zona do sistema radicular das culturas. Para isto, é preciso que o irrigante utilize ferramentas que o auxiliem no manejo da produção agrícola. Objetivou-se com este trabalho avaliar a aplicação do software HYDRUS 2D na simulação da dinâmica de água e transporte de potássio no solo no interior do bulbo úmido sob irrigação por gotejamento superficial. Para isto, foi realizado um experimento em ambiente controlado, em vasos de, aproximadamente, 60 L preenchidos com solo (Cambissolo), onde foram aplicadas três diferentes vazões (0,72; 1,52 e 2,50 L h⁻¹) e três concentrações de potássio (0,165; 0,450 e 0,750 mg cm⁻³), via irrigação por gotejamento superficial. Para tanto, o experimento foi conduzido com a finalidade aplicação de obter dados de entrada para a simulação com o software HYDRUS 2D e dados para a validação e confrontação com os dados obtidos na simulação do software. O mesmo constou de caracterização inicial do solo e o desenvolvimento dos tensiômetros digitais e sensores de condutividade elétrica do solo com suas respectivas calibrações; montagem dos vasos; condução e monitoramento do experimento durante a aplicação de 5,0 L de solução (irrigação) e posterior redistribuição até 72 h; ao final, determinação dos atributos físicos do solo. Também foram elaboradas Breakthrough Curves (BTC) para determinação dos parâmetros de transporte de potássio no solo; foram realizadas simulações com o modelo HYDRUS 2D; e, posteriormente, a análise estatística do desempenho do modelo HYDRUS 2D utilizando a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e o Erro Absoluto Médio (EAM); e, por fim, a análise de sensibilidade do modelo. Verificou-se um bom ajuste entre os dados observados e os simulados com o modelo, para a distribuição e a redistribuição de água e o transporte de potássio no solo, com baixos valores obtidos de REQM e EAM. Pode-se concluir que o modelo forneceu resultados robustos para distribuição e redistribuição de água

no solo, em ambiente protegido, sob irrigação por gotejamento superficial, em relação aos dados observados experimentalmente; bem como, para as simulações do transporte e redistribuição de potássio no solo, sob diferentes concentrações da solução aplicada.

Palavras-chave: Manejo da irrigação. Irrigação por gotejamento superficial. Fluxo de água no solo. Transporte de soluto no solo. Modelagem matemática.

ABSTRACT

ARRUDA, L. E. V. de. Simulation by HYDRUS 2D model of water dynamics and potassium transport in an Inceptisol of the Potiguar Semiarid. 2018. 144f. Thesis (Doctor of Science in Manejo de Solo e Água), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.

In arid and semiarid regions of the Brazilian Northeast the water is a scarce resource and its excessive removal in recent decades, is resulting increased of concentration of salts and, consequently, reducing their quality. It is necessary to know the water dynamics and the solutes transport in the soil, when they are applied on the soil surface, in order to predict their spatial distribution, which is fundamental to establish the best way to monitor moisture, salinity and nutrients in the root system zone of crops. For this, it is necessary that the irrigator use tools that assist him in the management of the agricultural production. The objective of this work was to evaluate the use of HYDRUS 2D software in the simulation of water dynamics and the transport of potassium in the soil inside the wetted bulb under surface drip irrigation. For this, an experiment was carried out in a controlled environment in pots of approximately 60 L filled with soil (Inceptisol), where were applied three different flow rates (0.72, 1.52 and 2.50 L h⁻¹), and three concentrations of potassium (0.165, 0.450 and 0.750 mg cm⁻³) via surface drip irrigation. To do so, the experiment was conducted with the purpose of obtaining input data for the simulation with the HYDRUS 2D software and data for validation and comparison with the data obtained in the software simulation. The same consisted of initial characterization of the soil and the development of the digital tensiometers and electrical conductivity sensors of the soil with their respective calibrations; filling the pots; conduction and monitoring of the experiment during the application of 5.0 L of solution (irrigation) and subsequent redistribution up to 72 h; at the end, determination of the soil physical attributes. Breakthrough Curves (BTC) were also elaborated to determine the potassium transport parameters in the soil; simulations were performed using the HYDRUS 2D model; and later, the performance statistical analysis of the HYDRUS 2D model using the Root Mean Square Error (RMSE) and the Mean Absolute Error (MAE); and, finally, the sensitivity analysis of the model. A good fit was observed between the observed and simulated data with the model, for the distribution and redistribution of water and the transport of potassium in the soil, with low values obtained from RMSE and MAE. It can be concluded that the model provided robust results for the distribution and redistribution of water in the soil, in protected environment, under surface drip irrigation, in relation to the data

observed experimentally; as well as for simulations of transport and redistribution of potassium in the soil under different concentrations of the solution applied.

Keywords: Irrigation management. Surface drip irrigation. Water flow in the soil. Solute transport in the soil. Mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Local de coleta do solo.....	43
Figura 2. Layout do tensiômetro digital	45
Figura 3. Esquema representativo do sistema de aquisição de dados	46
Figura 4. Fornecimento de alimentação, dissociação e filtragem de saída recomendados pelo fabricante do transdutor de tensão	46
Figura 5. Características operacionais do transdutor de tensão MPX 5100AP	47
Figura 6. Layout do sensor de condutividade elétrica do solo	49
Figura 7. Calibração dos sensores em solução	49
Figura 8. Detalhe da calibração dos sensores de condutividade elétrica do solo em pasta (solo mais solução).....	50
Figura 9. Detalhes do preenchimento dos vasos	53
Figura 10. Esquema dos tratamentos para avaliação da frente de molhamento e redistribuição de água e soluto no solo.....	53
Figura 11. Processamento de imagem utilizando o software ImageJ para determinação da área saturada (charco).....	55
Figura 12. Disposição dos sensores de tensão e condutividade elétrica no solo para monitoramento da dinâmica de água e transporte de soluto no solo: (A) corte transversal; (B) vista superior	56
Figura 13. Disposição dos tensiômetros e sensores de condutividade elétrica no solo.....	56
Figura 14. Detalhe da coleta das amostras indeformadas.....	57
Figura 15. Detalhe dos procedimentos iniciais para elaboração da BTC: (A) pesagem da coluna; (B) preenchimento das colunas com solo	62
Figura 16. Procedimento de saturação da coluna de solo, por capilaridade, com água destilada, para elaboração das curvas de distribuição de efluentes	62
Figura 17. Procedimento de lavagem do solo com água destilada.....	62
Figura 18. Nomeação e descrição do projeto	64
Figura 19. Detalhe das informações iniciais do modelo HYDRUS: (A) geometria, unidade e dimensões da área de trabalho; (B) simulação do fluxo de água e transporte de soluto	65
Figura 20. Informações do tempo de simulação.....	65
Figura 21. Informações da saída de dados das simulações.....	66
Figura 22. Configurações dos critérios de interação das simulações	66

Figura 23. Seleção do modelo de van Genuchten-Mualem e utilização da condição de não histerese	67
Figura 24. Parâmetros físico-hídricos do solo estudado.....	67
Figura 25. Informações sobre transporte de soluto.....	68
Figura 26. Detalhe das janelas: (A) parâmetros de transporte de soluto; (B) parâmetros de reação para o soluto	69
Figura 27. Dados do tempo de aplicação da solução e simulação; vazão aplicada e concentração de soluto.....	69
Figura 28. Parâmetros para a configuração do tamanho da malha de elementos finitos.....	70
Figura 29. Layout da área de estudo para simulação no HYDRUS 2D	70
Figura 30. Detalhe da malha de elementos finitos não estruturados	71
Figura 31. Disposição dos pontos de observação	71
Figura 32. Edição das condições iniciais: (A) conteúdo de água no solo por camada; (B) concentração inicial de potássio no solo	72
Figura 33. Detalhe das distintas camadas do solo: (A) diferentes conteúdos de água por camada; (B) diferentes concentrações iniciais de potássio por ponto de observação	72
Figura 34. Seleção da condição de gotejamento superficial com posição à esquerda.....	73
Figura 35. Condições de contorno utilizadas na simulação	73
Figura 36. Exemplo de resultado de uma simulação do movimento de água no solo, em diferentes tempos.....	74
Figura 37. Resultados da simulação para os nós de observação: (A) representação gráfica; (B) formato .txt	75
Figura 38. Tensiômetro construído.....	78
Figura 39. Detalhes dos componentes do sistema de aquisição e armazenamento de dados dos tensiômetros.....	78
Figura 40. Exemplo de dados armazenados de um tensiômetro: data, hora e valor das tensões de água no solo, respectivamente	79
Figura 41. Sistema de aquisição das leituras: (A) sensor de condutividade elétrica do solo montado; (B) condutivímetro utilizado para realização das leituras de condutividade elétrica	80
Figura 42. Teste de comportamento dos sensores na medição da CE em diferentes soluções	81
Figura 43. Relação entre leituras de condutividade elétrica da solução obtidas com o condutivímetro de bancada (CEs) e o sensor proposto (CEsensor)	81

Figura 44. Relação entre a condutividade elétrica lida com os sensores (CEsensor) e a condutividade elétrica do extrato saturado estimada com as equações (CEest).....	83
Figura 45. Relação entre a condutividade elétrica do extrato saturado estimada com as equações (CE _{est}) e a condutividade elétrica do extrato saturado (CE _{es})	83
Figura 46. Relação entre concentração de potássio (C _K ⁺) e condutividade elétrica do extrato saturado (CE _{es}).....	84
Figura 47. Diferentes tratamentos e condução do experimento	85
Figura 48. Curvas de distribuição de efluente (BTC) do íon potássio (K ⁺), para o Cambissolo, usando diferentes concentrações de potássio: (A) 0,165 mg cm ⁻³ ; (B) 0,450 mg cm ⁻³ ; e (C) 0,75 mg cm ⁻³	87
Figura 49. Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o HYDRUS 2D, para a vazão de 0,72 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	89
Figura 50. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 0,5; 3,5 e 7,0 h, para a vazão de 0,72 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	90
Figura 51. Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o HYDRUS 2D, para a vazão de 1,52 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	90
Figura 52. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 0,5; 2,0 e 3,25 h, para a vazão de 1,52 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	91
Figura 53. Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o HYDRUS 2D, para vazão de 2,50 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	92
Figura 54. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 0,5; 1,0 e 2,0 h, para a vazão de 2,50 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	93
Figura 55. Valores de umidade do solo, durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de 0,72 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	94
Figura 56. Valores de umidade do solo, durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o HYDRUS 2D, para vazão de 1,52 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	95

Figura 57. Valores de umidade do solo, durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o HYDRUS 2D, para vazão de 2,50 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	95
Figura 58. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 7,0; 24,0 e 72,0 h, para a vazão de 0,72 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	97
Figura 59. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 3,25; 24,0 e 72,0 h, para a vazão de 1,52 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	97
Figura 60. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 2,0; 24,0 e 72,0 h, para a vazão de 2,50 L h ⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	98
Figura 61. Valores de concentração de potássio, durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de 0,165 mg cm ⁻³ e vazão de 1,52 L h ⁻¹	100
Figura 62. Valores de concentração de potássio, durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³ e vazão de 1,52 L h ⁻¹	100
Figura 63. Valores de concentração de potássio, durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de 0,750 mg cm ⁻³ e vazão de 1,52 L h ⁻¹	101
Figura 64. Perfis de concentração de potássio no solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função dos tempos de irrigação 7,0; 24,0 e 72,0 h, para concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³ a vazão de 1,52 L h ⁻¹	101
Figura 65. Perfis de concentração de potássio no solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função dos tempos de irrigação 3,25; 24,0 e 72,0 h, para concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³ a vazão de 1,52 L h ⁻¹	102
Figura 66. Perfis de concentração de potássio no solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função dos tempos de	

irrigação 2,0; 24,0 e 72,0 h, para concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$ a vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ 102

Figura 67. Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros do movimento de água no solo para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$: (A) vazão (Q); (B) condutividade hidráulica do solo saturado (Ks); e (C) umidade inicial do solo (θ_i) 104

Figura 68. Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros de transporte de soluto no solo para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$: (A) concentração inicial do potássio (C_{iK^+}); (B) concentração de potássio aplicada (C_K^+); (C) coeficiente de distribuição (Kd); (D) dispersividade (λ); e (E) massa específica do solo (ρ_s) 106

Figura 69. Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros do movimento de água sobre a concentração de potássio no solo para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$: (A) vazão (Q); (B) condutividade hidráulica do solo saturado (Ks); e (C) umidade inicial do solo (θ_i) 107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos físicos do solo coletado (Cambissolo).....	44
Tabela 2. Caracterização química do solo coletado (Cambissolo).....	44
Tabela 3. Parâmetros de ajustes das curvas de retenções de água no solo, segundo o modelo de van Genuchten-Mualem.....	44
Tabela 4. Parâmetros para análise de sensibilidade do modelo.....	77
Tabela 5. Análise estatística do teste de comportamento dos sensores em solução.....	81
Tabela 6. Resultados da condutividade hidráulica do solo saturado obtidos pelo método proposto por Shani et al. (1987)	85
Tabela 7. Parâmetros do ajuste da curva de retenção de água no solo, para o Cambissolo, obtidos com o software RETC segundo o modelo de van Genuchten-Mualem.....	86
Tabela 8. Parâmetros de transporte do soluto para o íon potássio em um Cambissolo.....	87
Tabela 9. Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição de água no solo, durante a formação do bulbo úmido, para concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	93
Tabela 10. Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição e da redistribuição de água no solo, para concentração de potássio de 0,450 mg cm ⁻³	98
Tabela 11. Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição e da redistribuição do potássio no solo, para vazão de 1,52 L h ⁻¹	103

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1 Recursos hídricos.....	23
2.2 Solos	25
2.3 Irrigação	25
2.3.1 Métodos e sistemas de irrigação	29
2.3.2 Irrigação por gotejamento.....	30
2.3.3 Fertirrigação.....	31
2.3.4 Volume de solo molhado.....	33
2.4 Movimento de água no solo.....	35
2.5 Transporte de soluto no solo.....	37
2.6 Modelagem de água e soluto no solo	39
2.7 Modelo HYDRUS 2D/3D	40
3 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 Etapa 1: Pré-experimento.....	43
3.1.1 Desenvolvimento do sistema de tensiômetros digitais	45
3.1.2 Calibração do transdutor de tensão.....	47
3.1.3 Desenvolvimento do sensor de condutividade elétrica do solo	48
3.1.4 Calibração do sensor de condutividade elétrica do solo em solução.....	49
3.1.5 Calibração do sensor de condutividade elétrica em pasta (solo mais solução)	49
3.1.6 Calibração do sensor de condutividade elétrica para estimativa da concentração de potássio no solo	51
3.2 Etapa 2: Instalação do experimento	52
3.2.1 Condutividade hidráulica do solo saturado	53
3.3 Etapa 3: Monitoramento do fluxo de água no solo.....	55
3.4 Etapa 4: Monitoramento do transporte de soluto no solo	56
3.5 Etapa 5: Caracterização dos atributos físicos do solo utilizados no experimento	57
3.6 Etapa 6: Caracterização química do solo utilizado no experimento.....	59
3.7 Etapa 7: Determinação dos parâmetros de transporte de soluto no solo	59
3.7.1 Obtenção dos parâmetros de transporte de soluto no solo.....	61
3.8 Etapa 8: Definição e preenchimento dos parâmetros de entrada do HYDRUS 2D/3D	64
3.9 Etapa 9: Análise estatística do desempenho do modelo	75
3.10 Etapa 10: Análise de sensibilidade do modelo	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
4.1 Equipamentos desenvolvidos para obtenção de dados experimentais.....	78
4.1.1 Tensiômetro digital.....	78
4.1.2 Sensores de condutividade elétrica.....	80
4.2 Instalação e condução do experimento	84

4.2.1 Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado pelo método proposto por Shani et al. (1987).....	84
4.2.2 Obtenção dos dados experimentais de movimento de água e transporte de soluto no solo	85
4.2.3 Determinação dos parâmetros da curva de retenção do solo.....	85
4.2.4 Obtenção dos dados para simulação do transporte de soluto no solo.....	86
4.3 Resultados da dinâmica de água no solo	88
4.3.1 Distribuição de água no solo	89
4.3.2 Redistribuição de água no solo	94
4.4 Dinâmica de transporte de soluto no solo.....	98
4.4.1 Distribuição e redistribuição de potássio no solo	99
4.5 Análise de sensibilidade do modelo	103
5 CONCLUSÕES.....	108
REFERÊNCIAS	109
APÊNDICES	131

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da população e, conseqüentemente, de alimentos, a demanda por água para a produção agrícola está cada vez maior. Sabe-se que, no mundo, cerca de 70% de toda a água doce captada é utilizada para irrigação, sendo que, o seu uso indiscriminado tem gerado ambientes cada vez mais ameaçados. Nas regiões áridas e semiáridas a água, além de ser um recurso escasso, nas últimas décadas, tem reduzido sua qualidade, principalmente, em virtude do aumento da concentração de sais.

Segundo estimativas da FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura) aproximadamente 20% de toda a área de solo agricultável no mundo são irrigadas, representando em torno de 40% de todo o alimento consumido e chegando a duplicar e até quadruplicar a produção de alimentos das áreas de sequeiro. Baseado em dados da ANA (Agencia Nacional de Águas, Ministério do Meio Ambiente), cada hectare irrigado no Brasil tem uma produtividade física equivalente a três (3) hectares e uma produtividade econômica equivalente a sete (7) hectares em agricultura de sequeiro. Estima-se que, nos próximos 25 anos, os cultivos irrigados irão fornecer 80% dos produtos necessários para satisfazer as necessidades da população.

Por isso, é preciso que haja uma utilização eficiente da água devido, principalmente, à escassez de recursos hídricos em muitas regiões do mundo e ao elevado custo da energia utilizada para captação, o que torna necessário o uso de metodologias apropriadas ao manejo racional da água.

Como alternativa para um melhor uso da água na agricultura tem-se a irrigação localizada, pois apresenta como principais características a aplicação de água no solo próximo às raízes das plantas e a economia de água pela maior eficiência de aplicação, quando manejada adequadamente. Quando utilizado o sistema de irrigação por gotejamento superficial, este, durante a aplicação da água, gera um volume de solo molhado, também denominado bulbo úmido, favorecendo a concentração das raízes das plantas no seu interior e sais no seu entorno, o que tem causado, muitas vezes, mais áreas salinizadas.

Para que o sistema de irrigação por gotejamento apresente maior eficiência é necessário que a estimativa da porcentagem de solo molhado, seja obtida de forma precisa. Pois, a superestimativa gera maiores custos com equipamentos hidráulicos e desperdícios de água, devido a perdas por percolação profunda, energia e fertilizantes; já a subestimativa acarreta risco ao desenvolvimento e à produção da cultura, causado por estresse hídrico.

Na região Nordeste do Brasil, principalmente na microrregião de Mossoró, parte da água destinada à agricultura é originária de poços artesianos profundos, sendo que estas apresentam boa qualidade, mas sua obtenção é bastante onerosa, o que torna, muitas vezes, inviável sua utilização na produção agrícola. Como alternativa, os produtores fazem uso de águas de poços do aquífero Jandaíra, que, por serem mais rasos, requerem um menor custo para sua obtenção, mas estas apresentam maior concentração de sais.

A utilização de água de baixa qualidade (maior concentração de sais) nas áreas irrigadas, principalmente, nas regiões áridas e semiáridas, como é o caso do Nordeste Brasileiro, devido a suas características climáticas (baixos índices pluviométricos, distribuição irregular das chuvas ao longo do ano e intensa evaporação) tem favorecido os processos de salinização e sodificação dos solos da região.

Aliado a isto, temos a utilização excessiva de nutrientes nas lavouras, entre eles o potássio, que, por ser um dos mais importantes para o desenvolvimento da cultura, desempenha papel fundamental na ativação de funções enzimáticas e de manutenção da turgidez das células. Porém, este apresenta alta mobilidade no solo, podendo ser lixiviado facilmente, causando aumento da sua concentração nas águas subterrâneas.

Por motivo disto, nas últimas décadas, pesquisadores tem se dedicado ao estudo do movimento da água e do transporte de soluto no solo, utilizando modelos matemáticos. A maioria destes modelos baseiam-se na solução de equações numéricas para a simulação.

Como vantagens dos modelos, quando comparados a experimentos de campo e análises laboratoriais, tem-se o auxílio em projetos, buscando soluções que propiciem melhores desempenhos, além da economia de tempo e capital. Quando os modelos são aplicados à irrigação, estes proporcionam maior eficiência no uso da água e insumos agrícolas, refletindo em maior produção, redução de custos e controle dos impactos ambientais negativos.

Dentre os modelos mais utilizados atualmente temos o HYDRUS 2D/3D que pode ser usado para simular processos como precipitação, irrigação, infiltração, evaporação, absorção de água radicular (transpiração), armazenamento de água do solo, ascensão capilar, drenagem profunda, recarga de água subterrânea e fluxo lateral.

Portanto, conhecendo-se a dinâmica de água e solutos no solo é possível prever a distribuição espacial, o que é fundamental para se estabelecer a melhor maneira de se monitorar umidade, salinidade e nutrientes no sistema radicular das culturas. Por isso, faz-se necessário a difusão da tecnologia de modelagem para o manejo da irrigação e da

fertirrigação, visando a otimização do uso de água e nutrientes, para as diversas condições da agricultura irrigada.

Baseado no exposto anteriormente, objetivou-se com este trabalho avaliar o uso do software HYDRUS 2D na simulação da dinâmica de água e do transporte de potássio no solo no interior do bulbo úmido sob irrigação por gotejamento superficial.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Recursos hídricos

A água é um recurso natural indispensável à sobrevivência dos seres vivos do Planeta, pois é o principal constituinte de todos os organismos vivos. Pode ser utilizado com distintas finalidades, entre as quais se destacam o abastecimento de água, a geração de energia, a irrigação, a navegação, a aquicultura e a harmonia paisagística (Moraesa & Jordão, 2002). Infelizmente, devido a ações do homem, está cada vez mais limitado e exaurido (Paz et al., 2000).

Estima-se que a quantidade total de água na Terra seja de 1386 milhões de km³, sendo que 97,50% da disponibilidade mundial da água estão nos oceanos (água salgada); 2,493% encontram-se em regiões polares ou subterrâneas (geleiras ou aquíferos); e somente 0,007% da água disponível é própria para o consumo humano (água doce), e estão presentes em rios, lagos e pântanos. A água salgada é imprópria ao consumo humano, mas pode ser utilizada se sofrer algum processo de dessalinização. Este processo é bastante caro, bem como o processo de utilização de água de geleiras e extração de água subterrânea.

A demanda mundial de água é amplamente influenciada pelo crescimento da população, urbanização, políticas de segurança alimentar e energética, e processos macroeconômicos como globalização do comércio e aumento do consumo. Em 2050, a demanda global de água deverá aumentar em 55%, principalmente devido às crescentes demandas de produção agrícola, que deverá produzir 60% mais de alimentos a nível mundial e 100% mais nos países em desenvolvimento, geração de eletricidade térmica e uso doméstico. Portanto, como as taxas de crescimento atuais da demanda global de água agrícola são insustentáveis, o setor precisará aumentar sua eficiência no uso da água, reduzindo as perdas de água e, o mais importante, aumentará a produtividade das culturas em relação à água (WWAP, 2015).

O Brasil possui abundância de recursos hídricos, porém, tende a desperdiçá-los (Moraesa & Jordão, 2002). Possui 13,7% da água doce superficial disponível no mundo, porém, mais de 73% da água doce produzida no País encontra-se na bacia Amazônica que é habitada por menos de 5% da população (Werneck, 2001). Logo, apenas 27% dos recursos hídricos estão disponíveis para 95% da população. Já a região Nordeste do país, apresenta locais onde a disponibilidade de água por habitante por ano é inferior a 2000 litros, mínimo recomendado pela ONU (Marengo, 2008).

Na Região Nordeste do Brasil, notadamente no Semiárido Brasileiro, os baixos índices de precipitação e a irregularidade do seu regime, aliados a elevadas temperaturas durante todo o ano, gerando altas taxas de evapotranspiração, configuram um balanço hídrico negativo, o qual juntamente ao contexto hidrogeológico, contribuem para a baixa disponibilidade hídrica da região (ANA, 2016).

O Semiárido Brasileiro é constituído por 1189 cidades em nove estados: Alagoas, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. É uma região caracterizada pelo clima seco, com poucas chuvas, elevada evapotranspiração e solos pouco desenvolvidos (Araújo, 2011).

Apesar disto, o Semiárido Brasileiro é um dos mais chuvosos do planeta, embora em algumas áreas a precipitação média não ultrapasse os 400 mm anuais, apresentando como características grande variabilidade espacial e temporal das chuvas (Montenegro & Montenegro, 2012).

Conforme ANA (2016), devido à baixa disponibilidade hídrica, as bacias da Região Semiárida, no Nordeste do país, estão em situação crítica. Segundo Medeiros et al. (2016), o volume de água armazenado nos reservatórios do Semiárido Brasileiro, no ano de 2016, atingiu 8,01 mil hm³, o que representa apenas 21% da capacidade total de armazenamento, que é de 40,25 mil hm³. Sendo que, dos reservatórios monitorados, aproximadamente 63% apresentavam-se em estado de colapso e/ou em estado crítico, com maiores índices registrados nos estados do Ceará (37%), Paraíba (31%), Pernambuco (16%) e Rio Grande do Norte (13%).

Para contornar a escassez de águas superficiais, sejam elas de rios ou açudes, os órgãos governamentais têm utilizado como fonte de abastecimento humano as águas subterrâneas. Estas apresentam predominância de teor elevado de sais, devido os solos serem constituídos, predominantemente, por rochas cristalinas. Exceção são os locais onde ocorrem as formações sedimentares, em que as águas, normalmente, apresentam melhor qualidade (Cirilo, 2008).

No Rio Grande do Norte os principais aquíferos são representados pelas formações Jandaíra e Açu. A utilização destes aquíferos vem sendo intensificada nos últimos anos, com o emprego de suas águas para fruticultura irrigada. O crescimento desordenado da exploração gerou, em 2003, rebaixamentos excessivos nas captações, chegando a comprometer a produção de frutas e conseqüentemente trazendo prejuízos significativos para a economia da região (Feitosa & Feitosa, 2011).

2.2 Solos

Solo é o material não consolidado que cobre a superfície da terra, constituído de materiais minerais e orgânicos resultantes das interações dos fatores de formação (clima, organismos vivos, material de origem e relevo), através do tempo. Apresenta as seguintes funções básicas no ambiente: sustentar o crescimento das plantas, reter água, ciclagem de nutrientes, ou seja, armazenar e transformar resíduos, habitat de organismos vivos ou mortos e servir de suporte às edificações (Coelho et al., 2013).

Os principais solos da Região Nordeste do Brasil são: Latossolos (29,5%), Neossolos (24,0%), Argissolos (16,7%), Luvisolos (8,7%), Planossolos (7,3%), Plintossolos (6,3%), Cambissolos (3,4%), e outros (4,1%). Esta grande quantidade de solos é oriunda da grande diversidade de ambientes, climas, formações vegetais, tipos de rochas e conformações do relevo (Marques et al., 2014).

Os Cambissolos ocorrem em maiores áreas no estado da Bahia, tendo ainda grande expressão na Chapada do Apodi, localizado na divisa do Rio Grande do Norte e Ceará (Santos, 2017), os quais tem se destacado como polo agrícola para a produção da fruticultura irrigada (Ferreira, 2013).

São solos constituídos por rochas e sedimentos diversificados, além de possuírem grande heterogeneidade de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos. São pouco variáveis em função das texturas superficiais e subsuperficiais, mas seus minerais primários são facilmente alteráveis. Podem ser bastantes férteis, apresentando elevada capacidade de armazenamento de água e alto potencial para a agricultura irrigada (Marques et al., 2014; Santos, 2017).

Os solos da Chapada do Apodi possuem atributos diferenciados em relação aos demais solos da região Nordeste. Devido às características climáticas com baixa precipitação pluviométrica associada a elevadas temperaturas e evapotranspiração, é favorecida a formação de minerais de argila do tipo 2:1 com atividade alta (Mota et al., 2004; Ferreira, 2013).

2.3 Irrigação

Define-se como irrigação o conjunto de técnicas, formas ou meios utilizados para aplicar água artificialmente ao solo, visando proporcionar a umidade adequada ao desenvolvimento normal das plantas nele cultivadas (Mello & Silva, 2009; Testezlaf, 2017). A irrigação nasceu da necessidade de disponibilizar água às plantas em locais onde as chuvas

eram escassas ou sua distribuição era irregular, portanto, buscando corrigir e/ou suprir a distribuição natural das chuvas.

Segundo os historiadores, a irrigação começou a ser desenvolvida às margens dos grandes rios: Nilo, Egito (6000 a.C.); Tigre e Eufrates, Mesopotâmia (4000 a.C.); Amarelo, China (3000 a.C.); e Indo e Ganges, Índia (2500 a.C.). Os Qanats, desenvolvidos na antiga Pérsia (cerca de 800 a.C.), estão entre os mais antigos métodos de irrigação conhecidos ainda em uso nos dias de hoje. As obras de irrigação do antigo Sri Lanka (cerca de 300 a.C.) foram um dos sistemas de irrigação mais complexos do mundo antigo. Na região de Szechwan, pertencente ao Estado de Qin da China antiga, o sistema de irrigação de Dujiangyan foi construído em 256 a.C. para irrigar uma enorme área de terras agrícolas que ainda hoje fornece água. No continente Americano, a mais antiga evidência de agricultura irrigada de que se tem notícia foi descoberto no vale Zaña, na encosta da Cordilheira do Andes, onde pesquisadores confirmaram a existência de três canais com pelo menos 5,4 mil anos de existência (Mantovani et al., 2009). Nos Estados Unidos, a irrigação já era praticada pelos indígenas da região sudoeste em 100 a.C. A implantação de sistemas de irrigação para fins agrícolas no Brasil, por volta de 1589, credita-se aos padres jesuítas, na antiga Fazenda Santa Cruz, no estado do Rio de Janeiro (Mello & Silva, 2009). Só a partir de 1995 é que houve um aumento significativo da irrigação no país, com a implementação de projetos particulares e privados e a diversificação dos métodos de irrigação (Mello & Silva, 2009).

A partir do uso da irrigação, os povos mudaram sua forma de economia de subsistência, baseada na busca por comida, para a produção de alimentos e consequente desenvolvimento social dessas regiões (Mantovani et al., 2009).

A irrigação é considerada uma arte e uma ciência. A ciência fornece vários conceitos e métodos dos processos envolvidos na irrigação. Estes, quando aliados ao conhecimento do agricultor sobre sua lavoura e o campo, são de extrema importância para que se possam realizar irrigações de forma eficaz e eficiente. As irrigações eficazes produzem respostas desejadas da colheita e, no caso de irrigações eficientes, estas fazem o melhor uso da água disponível. Portanto, é preciso que as irrigações sejam eficazes, a fim de produzir e gerar lucro e devido as crescentes pressões sobre o uso da água na agricultura e sua qualidade, é necessário que se use este recurso da forma mais eficiente possível.

Para que se possam realizar irrigações efetivas e eficientes é preciso saber responder as seguintes perguntas: Por que, Como, Quando e Quanto irrigar. “POR QUE IRRIGAR?” está atrelado ao fato da área onde será implantada a cultura apresentar irregularidades de chuvas, ou escassez de água, sendo assim necessária a implementação de uma forma de suprimento de

água à cultura. “COMO IRRIGAR?” diz respeito ao modo como se deve disponibilizar água às plantas, sempre buscando os métodos/sistemas melhor adaptados para cada situação. “QUANDO IRRIGAR?” baseia-se em uma decisão agronômica, fundamentada em como cada um deseja que a cultura se desenvolva. “QUANTO IRRIGAR?” refere-se à relação entre quanto de água existe no solo e o quanto de água a planta necessita.

Porém, o agricultor, na maioria das vezes, por não dispor de conhecimentos suficientes acaba irrigando em excesso, temendo que a cultura sofra estresse hídrico. Não sabendo ele que isto provocará diversas consequências, que vão desde o desperdício de água e energia até o comprometimento da produção. Logo, é preciso que se faça o manejo racional da irrigação, que consiste em aplicar a quantidade requerida pela cultura, no momento adequado, e da melhor forma possível, evitando os desperdícios.

As áreas sob irrigação podem oferecer safras que são duas a quatro vezes maiores do que é possível com a agricultura de sequeiro, e atualmente fornece 40% dos alimentos do mundo em aproximadamente 20% de todas as terras agrícolas (FAO, 2011). Segundo ANA (2004), no Brasil, cada hectare (ha) irrigado equivale a 3 ha de sequeiro em produtividade física e a 7 ha em produtividade econômica. Esses dados são fundamentais para mostrar a importância da irrigação no contexto alimentar (Paulino et al. 2011).

A irrigação no Brasil depende de fatores climáticos, sendo que, no Semiárido do Nordeste Brasileiro é uma técnica absolutamente necessária, pois os níveis de chuva são insuficientes para suprir a demanda hídrica das culturas. No Brasil, por apresentar características físico-climáticas mais favoráveis, inicialmente a agricultura começou a se desenvolver em regiões onde a quantidade e a distribuição espacial e temporal das chuvas eram capazes de suprir a necessidade das culturas. Deste modo, a irrigação começou a emergir em períodos mais recentes, a partir da década de 1900 com o cultivo do arroz no Rio Grande do Sul, e nas outras regiões do país a intensificação se deu entre as décadas de 1970 e 1980 (ANA, 2017).

Analisando e comparando os dados obtidos pelo Censo Agropecuário 1995-1996 (IBGE, 1998) com os obtidos pelo Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2009), observa-se que a área irrigada no país deu um salto de 3.121.644 para 4.453.925 ha, o que representou um aumento de 1,3 milhões de hectares, ou seja, 42% em aproximadamente 10 anos, o que resulta em um ritmo médio de 150 mil hectares por ano (Paulino et al., 2011), sendo que cerca de 90% dessas áreas irrigadas eram desenvolvidos pela iniciativa privada e os 10% restantes por projetos públicos (ANA, 2009).

Em 2014, a área irrigada no Brasil foi estimada em 6,11 milhões de hectares ou 21% do potencial nacional (ANA, 2016). A projeção considerada para o ano de 2030 é de 10,09 milhões de hectares, a qual corresponderá a um incremento de 45% sobre a área atual irrigada (ANA, 2017).

As regiões com as maiores áreas irrigadas do Brasil são, respectivamente, Sudeste (39,0%), Sul (24,4%), Centro-Oeste (17,0%), Nordeste (16,8%) e Norte (2,8%); sendo a região Centro-Oeste a que apresentou a maior expansão em área irrigada (ANA, 2017).

Segundo ANA (2003) a população da região Nordeste ultrapassa 28% da população do País e possui 156 milhões de ha (18% do território nacional), ocupando a maior parte da Região Semiárida do Brasil. A mesma apresentou um acelerado processo de incorporação de áreas irrigadas, a partir da década de 1980, resultado de investimentos em perímetros públicos e em outras infraestruturas hídricas que impulsionaram o setor privado. Segundo dados de ANA (2015) esta região apresenta 16,8% da área irrigada do país, ficando em quarto colocado no ranking. Na última década, com exceção da Bahia, nota-se a relativa estabilidade ou retração de áreas, consequência da redução dos investimentos para ampliação da infraestrutura hídrica e da própria crise hídrica experimentada nos últimos anos (ANA, 2017).

Diversos fatores contribuem para a necessidade de irrigação. Em regiões afetadas pela escassez contínua de água, como no Semiárido Brasileiro, a irrigação é fundamental, ou seja, uma parte importante da agricultura só se viabiliza mediante a aplicação artificial de água. A irrigação é imprescindível em regiões áridas e semiáridas, a exemplo do Semiárido Brasileiro, onde a segurança produtiva é bastante afetada pela escassez contínua de água, minimizada apenas no período mais úmido, entre dezembro e março, onde algumas culturas de sequeiro ainda podem se desenvolver.

Os principais perímetros irrigados no Semiárido são os da região de Petrolina (PE)/Juazeiro (BA) e o perímetro Jaguaribe-Apodi (CE). Atualmente, os perímetros irrigam 218,8 mil hectares em 79 projetos, em 88 municípios e, configuram-se como importantes expressões de iniciativas de desenvolvimento regional, notadamente no Semiárido Brasileiro, devido, principalmente, ao seu impacto potencial no balanço hídrico (regiões com baixa disponibilidade hídrica) (ANA, 2017).

Devido à diminuição da disponibilidade de recursos hídricos e à crescente competição por água entre usuários residenciais, industriais e agrícolas, além das variações climáticas, que tem consequências diretas na distribuição das chuvas, principalmente nas regiões áridas e semiáridas, associada a uma constante redução dos recursos hídricos naturais, tem gerado uma grande preocupação para as autoridades de água e agricultura em todo o mundo (Wang et al.,

2013), aumentando ainda mais a exigência sobre o setor agrícola, para que adotem sistemas de irrigações eficientes associados a práticas adequadas de manejo.

Tais preocupações estão atreladas ao fato de que as práticas de manejo de água no campo são os fatores que mais afetam o rendimento das culturas, particularmente na agricultura irrigada em regiões áridas e semiáridas (Al-Omran et al., 2005). Face o exposto há uma grande preocupação em relação à sustentabilidade dos recursos hídricos, atrelada à baixa eficiência de irrigação (média de 65,26%), conforme pode ser observado em Christofidis (2008). Devido ao fato dos sistemas de irrigação brasileiros ser, em maior quantidade pressurizados, existe a possibilidade de melhorias na eficiência de aplicação de água, ou seja, no uso adequado dos recursos hídricos, se aplicadas práticas básicas de manejo, quando comparados aos sistemas de irrigação por superfície (Paulino et al., 2011).

2.3.1 Métodos e sistemas de irrigação

A irrigação é dividida em métodos e sistemas de irrigação. Segundo a bibliografia (dicionários), método é a maneira de agir ou fazer as coisas, modo de proceder, enquanto sistema é a disposição das partes ou dos elementos de um todo, coordenados entre si, e que funcionam como estrutura organizada (Mantovani et al., 2009; Pereira et al., 2010; Testezlaf, 2017). Logo, método de irrigação é a forma pela qual a água pode ser aplicada às culturas. Cada método tem um ou mais sistemas associados, sendo que, a escolha do mais adequado depende de diversos fatores, tais como topografia (declividade do terreno), tipo de solo (taxa de infiltração), tipo de cultura (sensibilidade da cultura ao molhamento) e clima (frequência e quantidade de precipitações, temperatura e efeitos do vento).

Os métodos e seus respectivos sistemas de irrigação estão divididos em: irrigação por superfície (sulco, faixa, inundação e subirrigação), irrigação por aspersão (aspersão convencional, aspersão em malha, pivô central, canhão hidráulico e autopropelido), irrigação localizada (gotejamento superficial, microaspersão e bubbler), e irrigação subterrânea (elevação do lençol freático e sistemas de subirrigação em ambientes protegidos, mesas capilares, calhas de hidroponia, entre outros) (Mantovani et al., 2009; Pereira et al., 2010; Testezlaf, 2017).

A irrigação por superfície (ou gravidade) é o método mais antigo em uso e consiste na aplicação de água por gravidade em áreas irrigadas. Sua importância ainda é relevante para o desenvolvimento da irrigação, não só porque corresponde a aproximadamente 80% das áreas irrigadas do mundo, mas por continuar sendo o método mais apropriado, tecnicamente, para

solos argilosos (pesados) e economicamente para muitos cultivos e sistemas de produção (Pereira et al., 2010; USDA, 2012).

A irrigação por aspersão é o método em que a água é aspergida sobre as plantas ou na subcota, simulando uma precipitação (chuva) natural, através de sistemas pressurizados (Mantovani et al., 2006; 2009; Pereira et al., 2010; USDA, 2016).

A micro irrigação, ou irrigação localizada, é definida como a aplicação frequente de pequenas quantidades de água, próximo ao caule das plantas, sobre ou abaixo da superfície do solo na forma de gotas, fluxo contínuo ou pulverização através de emissores ou aplicadores colocados ao longo de uma linha de distribuição de água (Keller & Bliesner, 1990; Frizzzone et al., 2012; USDA, 2013).

Na irrigação subterrânea, a aplicação de água é realizada abaixo da superfície do solo, dentro do volume explorado pelas raízes das plantas, através da ascensão capilar, fenômeno este em que a água se eleva ao longo do perfil do solo por diferença de potencial total (USDA, 1991; Testezlaf, 2017).

2.3.2 Irrigação por gotejamento

À medida que a população cresce, aumenta a demanda por alimentos e água para a agricultura irrigada, sendo esta chamada a produzir mais alimentos usando menos água, sem degradar o solo e os recursos hídricos. Para isto, a irrigação por gotejamento pode ajudar a enfrentar esse desafio, pois, quando bem manejada, fornece aos agricultores maior controle sobre a aplicação de água, fertilizantes e pesticidas (Skaggs et al., 2004).

O avanço na irrigação por gotejamento ocorreu no início dos anos 60, primeiro em Israel e depois nos Estados Unidos, sendo um marco na história da ciência e tecnologia da Engenharia de Irrigação (Frizzzone et al., 2012). As primeiras aplicações no campo foram realizadas em regiões desérticas, onde os métodos clássicos (irrigação por superfície e aspersão) apresentavam resultados pouco satisfatórios, devido à natureza do solo (arenoso) e das águas salinas (Vermeiren & Jobling, 1980).

Em regiões áridas e semiáridas, devido a sua precisão na aplicação de água e de produtos químicos em quantidade e posição, a irrigação localizada por gotejamento tem sido priorizada, quando comparada a outros métodos de irrigação (Li et al., 2007). Tal fato tem feito com que a irrigação por gotejamento esteja se difundindo rapidamente em áreas onde a conservação da água é importante ou a água apresenta baixa qualidade e quantidade, e esperam-se altos rendimentos econômicos das culturas (USDA, 2013).

A irrigação por gotejamento pode ser classificada em superficial e subsuperficial. No sistema de gotejamento superficial, a água é aplicada na superfície do solo na forma de gotas ou pequenos fluxos, por meio de emissores (gotejadores e microtubos). O sistema subsuperficial consiste na aplicação de água abaixo da superfície do solo através de emissores (gotejadores), em profundidades que permitam que a água aplicada atinja o volume explorado pelas raízes (USDA, 2013; Testezlaf, 2017).

Neste sistema, a água é aplicada de forma precisa e uniforme em altas frequências a taxas de fluxo muito baixas (0,5 a 10,0 L h⁻¹), em tubo de plástico equipado com saídas (emissores/gotejadores), próximo à zona das raízes (Testezlaf, 2017). O conteúdo de água do solo é mantido próximo à capacidade do campo, aumentando potencialmente o rendimento da cultura e reduzindo a salinidade e a drenagem do solo da zona radicular (Hanson et al., 2009). Este sistema utiliza entre 30% e 50% menos água do que a irrigação superficial e pode atingir até 95% de eficiência de irrigação, se bem manejado (World Bank, 2006).

As vantagens do sistema de irrigação por gotejamento, quando bem dimensionado e manejado, são: maior eficiência no uso da água; redução no custo com fertilizantes; reduzida mão-de-obra; baixo consumo de energia; facilidade de instalação, inspeção, mudança de posição e limpeza de emissores (Nogueira et al., 2000); menor risco de salinização do solo, principalmente onde o lençol freático é raso (Hanson et al., 2009); e redução na perda de água, seja por percolação profunda ou escoamento superficial (Saxena et al., 2015). E, devido a menor área de superfície de solo molhado, há redução por perdas evaporativas, menor probabilidade de doenças transmitidas pelo solo e menos desenvolvimento de ervas daninhas (Hammami & Zayani, 2016).

Se operado com alta eficiência de aplicação e uniformidade de distribuição este sistema ainda apresenta como vantagens: menor consumo de energia, possibilidade de automação, facilidade nas práticas culturais, justifica o uso de terras marginais na agricultura, e reduz os impactos ambientais, pois a percolação profunda e o escoamento superficial são evitados (Frizzzone et al., 2012).

2.3.3 Fertirrigação

A agricultura moderna tem utilizado cada vez mais produtos químicos na produção agrícola, onde utilizam uma ampla quantidade de pesticidas, fertilizantes, fungicidas e elementos tóxicos, que são aplicados rotineiramente nas lavouras e tem gerado graves problemas ambientais para a agricultura atual, devido a lixiviação destes nutrientes e

pesticidas da zona radicular para águas subterrâneas e superficiais (van Dam et al., 1996; Simunek et al., 2013). Tudo isto tem tornado a agricultura uma das mais importantes fontes de poluição do solo e da água (Simunek et al., 2013). Devido a isto, é preciso que haja um aumento no uso de metodologias que melhorem a aplicação destes insumos.

Como alternativa temos a fertirrigação, que consiste na aplicação de fertilizantes juntamente com a água de irrigação para as culturas no campo (Bar-Yosef, 1991) e pode ser facilmente inserida no sistema de irrigação por gotejamento, através do qual os nutrientes requeridos pela cultura podem ser atendidos com precisão (Elhindi et al., 2016). A fertirrigação consiste de uma técnica agrícola relativamente moderna, que tem como objetivos maximizar o rendimento da cultura e minimizar os impactos negativos sobre o meio.

A fertirrigação é indicada como uma das melhores maneiras de aplicar água e nutrientes através do sistema de irrigação por gotejamento (Monteiro et al., 2014; Ibrahim et al., 2016). Aplicar fertilizantes de forma precisa e uniforme no volume de solo molhado, em quantidades pequenas e frequentes, onde a maioria das raízes ativas é concentradas, conforme necessário, tem o potencial de reduzir as aplicações de fertilizantes totais, a lixiviação e o escoamento superficial (Kafkafi & Tarchitzky, 2011). Deste modo, é possível aplicar quantidades adequadas de nutrientes, para atender a demanda do cultivo durante o seu crescimento (Battilani & Solimando, 2006).

Um dos elementos mais importantes para o desenvolvimento da cultura é o potássio, pois, boa parte das plantas possui uma alta demanda por este nutriente, ou seja, necessitam em grande quantidade, além de desempenhar papel fundamental na ativação de funções enzimáticas e de manutenção da turgidez das células.

Entre as fontes de potássio mais utilizadas tem-se o cloreto de potássio (KCl), que apresenta um menor custo e, conseqüentemente, é a mais utilizada; e o nitrato de potássio (KNO_3), que possui alta solubilidade, baixo potencial salino, em relação aos demais fertilizantes, porém maior custo (Carrijo et al., 2004).

O transporte do potássio no solo é influenciado pelos seguintes fatores: a condutividade hidráulica do solo, o pH do solo, o método e a taxa de aplicação deste elemento, a umidade do solo e a taxa de absorção pela planta (Rivera, 2004; Grecco, 2016). Este, quando está na solução do solo, apresenta-se na forma de cátion, sendo adsorvido à matriz do solo de forma mais acentuada, quanto maior a capacidade de troca de cátions deste (Melo et al., 2006). Portanto, o tipo de argila e a quantidade de matéria orgânica no solo influenciam no transporte deste soluto no solo (Johnston et al., 1993; Shepherd & Bennett, 1998).

Dentre as justificativas para se estudar o transporte do potássio no solo temos a eficiência do uso do fertilizante; a alta demanda pelas culturas, principalmente as frutíferas (melão, melancia), bastante cultivadas na região Semiárida do Rio Grande do Norte; e a facilidade de lixiviação para o lençol freático (Kolahchi & Jalali, 2006), causando aumento na concentração de potássio nas águas subterrâneas. Este fato é comumente observado em áreas agrícolas que utilizam água de poços (Grecco, 2016).

Diante disso, conhecer o movimento de água e o transporte do potássio no solo, quando aplicado via fertirrigação e irrigação localizada (gotejamento), torna-se extremamente importante para o melhor manejo da produção agrícola. Uma vez que, irá suprir as necessidades nutricionais e hídricas da planta de forma precisa, uniforme e eficiente evitando desperdícios de água e nutrientes e a poluição do meio.

2.3.4 Volume de solo molhado

O volume de solo molhado é definido como sendo a forma tridimensional que ocupa a frente de molhamento da água de irrigação a partir de um ponto de emissão (Gispert & Garcia, 1999), na irrigação localizada ou microirrigação.

Um dos parâmetros básicos para um melhor projeto de irrigação por gotejamento superficial é a distribuição de umidade no solo, sob uma fonte de gotejamento, para diferentes taxas de descarga de emissores e tempos de aplicação (Lubana & Narda, 2001). Neste tipo de sistema de irrigação, onde a água é aplicada pelo emissor, forma inicialmente na superfície do solo, em torno do gotejador, um pequeno charco por onde acontece a infiltração da água no solo. Com o passar do tempo, decresce o fluxo aumentando gradativamente o tamanho do charco, até que este se estabilize, momento em que temos um equilíbrio entre o fluxo vertical de água na superfície e a vazão do gotejador (Dasberg & Bresler, 1985).

No sistema de irrigação localizada conhecer a forma do volume de solo molhado (também denominado bulbo úmido), com suas profundidade e largura máximas, é um aspecto importante a ser considerado, para otimizar o uso da água, evitando perdas por percolação profunda e superposição exagerada dos emissores (Gispert & García, 1999; Maia, 2010). Tal aspecto é de fundamental importância, pois além de auxiliar na estimativa adequada do número de gotejadores por planta, garantindo a aplicação de água requerida e sua localização em relação às plantas ou linhas de plantas, influencia diretamente nos custos do projeto de irrigação e no rendimento das culturas (Lubana & Narda, 2001).

Do ponto de vista agrônômico, as dimensões do volume de solo molhado são úteis para se determinar onde as raízes das plantas se encontram mais concentradas, assim como, auxiliar nos cálculos de lâmina de água e quantidade de nutriente a serem aplicados no referido volume (Maia, 2010), e a melhor localização para instalação de sensores de umidade do solo (Nogueira et al., 2000).

O volume de solo molhado varia de acordo com o tipo de solo. Para solos argilosos, considerando uma mesma vazão, o bulbo úmido tende a ser mais extenso lateralmente e pouco profundo, devido às forças capilares serem mais acentuadas nesses solos (Souza et al., 2007). Nos solos arenosos, ocorre o contrário, o movimento de água é preferencial na direção vertical, haja vista a maior intensidade da força gravitacional. Por sua vez os solos de textura franca apresentam uma forma intermediária (Gomes, 1994).

As dimensões do volume de solo molhado dependem também da taxa de descarga do emissor. Se considerarmos um mesmo solo, uma pequena taxa de descarga produzirá um bulbo menor do que uma taxa de descarga mais alta (Brandt et al., 1971; Bresler et al., 1971). Se analisarmos esse comportamento em relação ao tipo de solo, observamos que os emissores com altas taxas de descarga são adequados para uso em solos arenosos, enquanto que em solos argilosos é recomendável diminuir a taxa de descarga ou aumentar a separação entre os emissores, para que não forme uma grande sobreposição (Levien et al., 2011).

Infelizmente, essas dimensões, por demandar estudos de campo ou utilização de modelos matemáticos, são, muitas vezes, negligenciadas e as práticas atuais no Brasil e em outras partes do mundo são baseadas em informações empíricas ou em dados obtidos indiscriminadamente da literatura (Souza & Matsura, 2004).

Dentre os fatores que afetam a forma do volume de solo molhado estão: umidade inicial do solo, vazão do emissor, frequência e duração da irrigação, movimento capilar da água, capacidade de retenção de água pelo solo, tipo de solo e sua estratificação (Pizarro, 1996, Levien et al., 2010; Maia & Levien, 2010), além de condutividade hidráulica e estrutura do solo (Schwartzman & Zur, 1986; Cote et al., 2003; Gardenas et al., 2005; Skaggs et al. 2010), espaçamento entre gotejadores (Shan et al., 2011), posição do gotejador (superficial ou subsuperficial), disposição dos gotejadores (fonte pontual ou fonte em linha), número de gotejadores e propriedades físicas do solo (textura, massa específica do solo e grau de compactação). Tudo isto provoca modificações na sua distribuição espacial, na atividade do sistema radicular das plantas e no manejo da irrigação (Coelho & Or, 1996).

As dimensões do volume de solo molhado podem ser determinadas ou estimadas através de várias formas usando métodos numéricos, analíticos, empíricos ou em ensaios de campo (Levien et al., 2010; Subbaiah, 2013).

De acordo com Ramírez de Cartagena (1995) e Levien et al. (2011), a estimativa das dimensões, do volume de solo molhado pode ser feita mediante o uso de tabelas ou gráficos (tais como, Karmeli et al., 1985; Keller & Bliesner, 1990; USDA, 1991; Rodrigo, 1996; USDA, 1997; Rodrigo & Cordero, 2003; Medeiros et al., 2004; USDA, 2013) ou de outras ferramentas tais como equações simples ou softwares de fácil manuseio (tais como, Schwartzman & Zur, 1986; Zazueta, 1992; Cook et al., 2003; Medeiros et al., 2004; Maia et al., 2010; Maia & Levien, 2010), que proporcionam boas aproximações a partir de profundidade das raízes, tipo de solo e/ou grau de estratificação do solo para um emissor de vazão determinada. O problema da utilização de tabelas e gráficos é que seus dados são escassos e que não tem caráter geral. Logo o seu uso deve ser realizado com precaução e em condições muito similares às que os mesmos foram obtidos (Levien, 2012; Levien et al., 2012).

A porcentagem de área molhada e o perfil de molhamento do solo são dados importantes e necessários para o dimensionamento e manejo da irrigação localizada, uma vez que afetam a produção da cultura e o seu crescimento (Medeiros et al., 2004). Portanto, o uso de modelos para descrever ou estimar a distribuição de água no volume de solo molhado tem se tornado uma ferramenta alternativa importante para auxiliar o produtor nas tomadas de decisões.

2.4 Movimento de água no solo

O movimento de água no solo é impulsionado pelo equilíbrio entre as forças da gravidade, a capilaridade e as forças coloidais, devido ao atrito com as superfícies sólidas e dentro do próprio fluido e forças inerciais (Jarvis, 2007). O movimento de água no solo ocorre em condições saturadas e não saturadas. Em condições saturadas, o movimento da água é predominantemente horizontal, com menores componentes do fluxo na direção vertical. E, em zona insaturada, este movimento acontece de forma mais acentuada na direção vertical, mas também pode ter grandes componentes laterais, principalmente em solos argilosos (Radcliffe & Rasmussen, 2002).

A água em um solo tende a se mover de um local onde a energia potencial é maior para um local onde a energia potencial é menor. A energia potencial da água em um solo é

denominada potencial total e é composta principalmente por potencial matricial, potencial gravitacional e potencial osmótico, sendo este último considerado insignificante. Os dois primeiros contribuem para as forças motrizes da água em todos os solos. O potencial osmótico afeta principalmente os solos argilosos, pois influencia no maior ou menor fluxo de água nos solos (Miyazaki, 2005).

Darcy (1856) desenvolveu a equação que permite quantificar o movimento de água em um meio poroso saturado, sob condições isotérmicas, para fluidos incompressíveis, fluxo laminar e situações em que as interações solo-água não resultem em variações na fluidez e na condutividade hidráulica:

$$q = -K_o \frac{dH}{ds} \quad (1)$$

em que:

q - densidade de fluxo, $L T^{-1}$;

K_o - condutividade hidráulica do meio saturado, $L T^{-1}$;

dH/ds - gradiente de potencial hidráulico, $L L^{-1}$;

H - potencial hidráulico, L ; e,

s - coordenada de posição, L .

O sinal negativo na equação serve para indicar que o sentido do movimento é contrário ao do crescimento do potencial hidráulico.

Quando o solo não está saturado, o ar presente nos poros tende a reduzir o fluxo, aumentando a tortuosidade do fluxo remanescente, acarretando a redução na condutividade hidráulica (Prevedello, 1996). Buckingham (1907) foi, provavelmente, o primeiro a postular que a Lei de Darcy também é válida para um solo parcialmente saturado de água e que, neste caso, a condutividade hidráulica é função do teor de água do solo. Ele desenvolveu uma equação para representar esta condição, hoje chamada de equação de Darcy-Buckingham:

$$q = -K(\theta) \frac{dH}{ds} \quad (2)$$

em que:

$K(\theta)$ - condutividade hidráulica em função da umidade (θ), $L T^{-1}$;

H - potencial hidráulico total da água no solo, L ; e,

s - coordenada de posição qualquer, x, y ou z, L.

Richards (1931) formulou as bases teóricas para descrever a percolação de água em um meio poroso não saturado. Em consequência, a equação geral do movimento de água em um meio poroso não saturado, isotermicamente e isobaricamente, baseada no princípio da conservação da massa, e na equação de Darcy-Buckingham, recebeu o nome de equação de Richards. Essa equação pode ser escrita, unidimensionalmente, sem considerar a histerese, da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (3)$$

em que:

θ - conteúdo volumétrico de água; $L^3 L^{-3}$;

t - tempo, T;

h - potencial matricial, L; e,

z - coordenada espacial, L.

O estudo do movimento de água através do solo é fundamental para a resolução de diferentes aspectos da engenharia hidráulica e da programação de irrigação (Gispert & García, 1999). Em geral, o foco principal dos estudos de movimento de água no solo tem sido o de prever a umidade do solo para sistemas de irrigação por superfície e subsuperficial, e para isto foram desenvolvidos vários modelos empíricos, analíticos e numéricos (Philip, 1968; Schwartzman & Zur, 1986; Singh et al., 2006; Bhatnagar & Chauhan, 2008).

2.5 Transporte de soluto no solo

A busca por uma descrição adequada do movimento químico descendente, através do solo não saturado, tem sido uma grande prioridade dos cientistas do solo e do meio ambiente nas últimas décadas. Os primeiros esforços para descrever o processo de transporte se concentraram em caracterizar o movimento sob fluxo de água em estado estacionário, através de colunas de solo, cuja dimensão lateral era pequena em comparação com a vertical (Ellsworth & Jury, 1991).

A capacidade de prever a taxa de transporte de solutos no solo e o efeito do solo nesta taxa é útil para muitos propósitos, tais como formulação mais precisa da quantidade de nutrientes a ser aplicados nas lavouras; projetar esquemas de gerenciamento que minimizem as perdas de fertilizantes e mantenham a concentração de determinados solutos, como o nitrato, dentro de padrões aceitáveis de qualidade da água; compreensão do transporte de pesticidas e outros compostos tóxicos, metais pesados, vírus e materiais radioativos, uma vez que, aplicados aos solos, é essencial para prever seu impacto no meio ambiente; recuperar solos afetados por sais e elaborar práticas de manejo para áreas irrigadas para evitar a acumulação excessiva de sal no solo. Finalmente, uma compreensão do transporte de soluto para as raízes permite uma melhor previsão do efeito do solo sobre a nutrição das plantas (Bittelli et al., 2015).

Desta forma, o entendimento dos processos que envolvem o transporte de soluto no solo é de fundamental importância, pois auxilia na redução por lixiviação de nutriente e/ou contaminantes para as camadas subsuperficiais (Miranda & Duarte, 2002), além de permitir o desenvolvimento de procedimentos para evitar seus efeitos tanto no solo, como nas águas (Ayers & Westcot, 1991).

A teoria do transporte de soluto desenvolveu-se ao longo de linhas conceitualmente semelhantes, com a teoria da advecção-dispersão (Jarvis, 2007). Esta teoria pressupõe que os processos de mistura lateral são rápidos em relação ao transporte convectivo vertical (Jury & Fluhler, 1992).

Conforme Poletika & Jury (1994) existem dois processos pelos quais solutos e água são variáveis espacialmente em solo estruturado. O primeiro é o movimento lateral juntamente com a redistribuição da solução na entrada da superfície do solo; o outro consiste do transporte de soluto através dos macroporos. Os padrões do fluxo nos macroporos variam com teor de umidade atual do solo, intensidade de precipitação, tipo de solo e morfologia, prática de preparo do solo e atividade biológica (minhocas e insetos) (Shipitalo et al., 1990; Edwards et al., 1992; Granovsky et al., 1993; Quisenberry et al., 1994; Bejat et al., 2000).

Os solutos no solo se movem juntamente com a água e são em parte adsorvidos ao complexo coloidal, absorvidos pelas plantas e ainda precipitados. Além disto, podem também ocorrer os processos de difusão, em resposta a gradientes de concentração (Ferreira et al., 2006). Todas essas interações são influenciadas por uma gama de processos físicos e químicos como concentração, composição, acidez, temperatura e potencial de óxido-redução da solução do solo (Prevedello, 1996).

O solo apresenta grande diversidade física e química, além de ser um meio poroso. Devido a isto, a troca de solutos entre os poros de diferentes tamanhos pode ser dada de três formas: fluxo convectivo ou transporte de massa, transporte difusivo e transporte dispersivo (van Genuchten & Wierenga, 1986). O transporte convectivo, também denominado fluxo de massa, compreende o movimento passivo do soluto juntamente com a água corrente, e é descrito pelo fluxo de água e a concentração de soluto dissolvido (Rivera, 2004; Álvarez-Benedí et al., 2005). A difusão molecular ou iônica é um mecanismo importante para o transporte de soluto em solos em direções onde há pouco ou nenhum fluxo de água (Leij & van Genuchten, 2002). Consiste de um processo espontâneo, resultante do movimento natural de moléculas e íons em solução, proporcionado por gradientes de concentração (Rivera, 2004) e independe da existência de fluxo da solução (Bear, 1972). Já o transporte dispersivo resulta de variações locais no fluxo de água em um meio poroso (Leij & van Genuchten, 2002). Este fluxo pode ser maior em poros maiores e menor em poros pequenos. Devido a isto, a dispersão é um processo passivo, e que diferente da difusão, ocorre somente durante o movimento de água (van Genuchten & Wierenga, 1986).

2.6 Modelagem de água e soluto no solo

Aris (1994) define modelos como sendo equações matemáticas capazes de representar fenômenos da natureza. Este conceito surgiu da necessidade do homem em compreender como a natureza e seus componentes funcionam. No ambiente agrícola esta ferramenta auxilia os produtores no manejo da cultura, prevendo safras e rendimentos, administrando a irrigação e a adubação, entre outros (Scarpore, 2011). Tudo isto acarretará em redução de custo e otimização dos recursos naturais e financeiros.

Na maioria dos casos, a solução analítica para as equações de fluxo de água e transporte de soluto, em um ambiente não saturado, é impossível (Javadzadeh et al., 2017). Resolver problemas envolvendo fluxo de água, transporte de solutos e processos bioquímicos no ambiente subsuperficial requer ferramentas de modelagem adequadas, condizentes com cada situação (Simunek et al., 2008).

Segundo Qiao (2014) existem diversos modelos para simular o movimento de água e o transporte de soluto no solo, tais como: RZWQM2, CHEMFLO-2000, APEX, LEACHM, HYDRUS 1D e HYDRUS 2D/3D.

O RZWQM (Root Zone Water Quality Model 2) é um modelo baseado em processo unidimensional que simula o fluxo de água, o transporte de soluto e os processos biológicos

em um sistema de cultivo agrícola (Ma et al., 2012). O CHEMFLO-2000 é um software interativo para simulação de água e movimento de substâncias químicas em solos não saturados, em uma dimensão (Nofziger & Wu, 2003). O APEX (Agricultural Policy/Environmental eXtender Model) é uma ferramenta de gerenciamento para simular balanço hidrológico, erosão pelo vento e água, crescimento e competição de cultivos, ciclagem de carbono, drenagem subsuperficial, entre outros, em escala de bacia hidrográfica ou subdividida tanto quanto for necessário, para garantir que cada subárea seja relativamente homogênea em termos de solo, uso do solo, gerenciamento e clima. (Williams et al., 2008). O LEACHM (Leaching Estimation And CHemistry Model), ou modelo de estimativa de lixiviação química, simula o fluxo de água, transporte e reações de solutos e absorção pelas plantas na zona das raízes (Wagenet, 1987; Hutson & Wagenet, 1989). O HYDRUS 1D e o HYDRUS 2D/3D são modelos para simular o fluxo de água, transporte de soluto, calor em um meio poroso variável em uma e duas/três dimensões, respectivamente (Simunek et al., 2009; 2016a; 2016b).

Durante as últimas décadas muitos estudos foram realizados para avaliar o movimento de água e o transporte de soluto no solo, baseando nos fatores que afetam esse fluxo, como a textura do solo, a densidade aparente, a condutividade hidráulica do solo saturado, o teor de umidade inicial, o tempo de aplicação, a descarga do emissor e a posição do emissor (tais como, Lazarovitch et al., 2005; Li et al., 2005; Elmaloglou & Diamantopoulos, 2010; Naglic et al., 2014). Outros estudos se concentraram no desenvolvimento de modelos numéricos (tais como, Simunek et al., 1999a; 2006; Arbat et al., 2013; Elmaloglou et al., 2013), analíticos (tais como, Cook et al., 2003; Sepaskhah & Chitsaz, 2004; Hammami & Zayani, 2016), ou empíricos (tais como, Schwartzman & Zur, 1986; Amin & Ekhmaj, 2006; Malek & Peters, 2011; Al-Ogaidi et al., 2015; 2016), para simular os padrões de molhamento.

2.7 Modelo HYDRUS 2D/3D

O modelo HYDRUS (Simunek et al., 1999a) é um pacote de software baseado na plataforma Windows que usa técnicas numéricas para simular movimento de água, calor e/ou transporte de soluto em meio poroso, variavelmente saturado. Foi desenvolvido para resolver numericamente a equação de Richards, para fluxo de água saturado e não saturado, e as equações do tipo convecção-dispersão, para transporte de calor e soluto, em uma, duas ou três dimensões. Portanto, pode ser usado para simular processos como precipitação, irrigação, infiltração, evaporação, absorção de água radicular (transpiração), armazenamento de água no

solo, ascensão capilar, drenagem profunda, recarga de água subterrânea e fluxo lateral (Simunek et al., 2006; 2012).

O modelo HYDRUS 2D é capaz de estimar as propriedades hidráulicas do solo e os parâmetros de transporte de soluto usando a solução inversa. Este modelo considera o fluxo de água em duas dimensões, e utiliza a equação de Richards como a equação governante:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) - S(h, x, z) \quad (4)$$

onde:

- θ - conteúdo volumétrico de água, $L^3 L^{-3}$;
- h - potencial mátrico de água no solo, L;
- t - tempo, T;
- x - coordenada espacial horizontal, L;
- z - coordenada espacial vertical, L;
- K - condutividade hidráulica do solo; $L T^{-1}$; e,
- S - termo de extração de água do solo pelas raízes, T^{-1} .

E para o transporte de soluto o modelo utiliza a equação Advecção-Dispersão da seguinte forma:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \lambda RC \quad (5)$$

onde:

- R - fator de retardamento, adimensional;
- C - concentração de soluto, $M L^{-3}$;
- D_L - coeficiente de dispersão longitudinal, $L^2 T^{-1}$;
- D_T - coeficiente de dispersão transversal, $L^2 T^{-1}$;
- v - velocidade média da água no poro, $L T^{-1}$; e
- λ - constante de degradação, T^{-1} .

Diversos pesquisadores tem utilizado o HYDRUS para simular e estudar o fluxo de água no solo (tais como, Assouline et al., 2006; Cook et al., 2006; Warrick & Lazarovitch,

2007; Lazarovitch et al., 2009; Mubarak et al., 2009; Hinnell et al., 2010; Kandelous & Simunek, 2010; Skaggs et al., 2010; Kandelous et al., 2011; Naglic et al., 2014; Dabach et al., 2015), e conjuntamente o fluxo de água e transporte de soluto no solo (tais como, Hanson et al., 2008; 2009; Roberts et al., 2008; 2009; Shan & Wang, 2012; Selim et al., 2012; 2013; Phogat et al., 2014; Grecco, 2016), ambos em irrigação por gotejamento superficial e/ou subsuperficial em duas ou três dimensões.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Hidroponia, pertencente à área experimental do Centro de Ciências Agrárias (CCA), no lado oeste do Campus Central da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), município de Mossoró, Rio Grande do Norte, no período de janeiro de 2016 a outubro de 2017.

O solo utilizado no experimento foi coletado em uma área de produção agrícola (melão, melancia, milho, entre outros), localizada no município de Upanema, Rio Grande do Norte ($5^{\circ}33' S$ e $37^{\circ}11' O$). O local escolhido para coleta de solo, dentro da propriedade, apresentava-se em pousio por 10 anos (Figura 1).



Figura 1. Local de coleta do solo

3.1 Etapa 1: Pré-experimento

Para a caracterização da área de coleta do solo foram coletadas amostras deformadas na camada de 0,00 a 0,30 m. Estas amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 2 mm de malha e armazenadas em recipiente plástico, para posterior realização das análises físicas e químicas. Também foram coletadas amostras indeformadas nas profundidades de 0,10 e 0,30 m, as quais foram utilizadas para determinação da massa específica do solo e curva de retenção de água no solo.

Na Tabela 1 constam os dados referentes aos atributos físicos: textura (areia grossa, fina e total, silte e argila), massa específica do solo, massa específica de partículas e classificação textural do solo de acordo com Santos et al. (2013). Na Tabela 2 estão apresentados os atributos químicos da camada de solo (0,00 a 0,30 m), utilizada para

realização do experimento. E na Tabela 3 são apresentados os parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo, segundo o modelo de van Genuchten-Mualem.

Tabela 1. Atributos físicos do solo coletado (Cambissolo)

Camada	Distribuição do tamanho das partículas					ρ_s	ρ_p	Classificação Textural
	Areia Grossa	Areia Fina	Areia Total	Silte	Argila			
m	g g ⁻¹					g cm ⁻³	g cm ⁻³	
0,00 - 0,30	0,5443	0,2226	0,7669	0,0441	0,1890	1,45	2,57	Franco Arenosa

ρ_s - massa específica do solo; e ρ_p - massa específica das partículas

Tabela 2. Caracterização química do solo coletado (Cambissolo)

Atributos químicos	Unidades	Solo
pH	-	6,60
CEes	dS m ⁻¹	0,67
MO	g kg ⁻¹	9,20
P		4,17
K ⁺	mg dm ⁻³	209,04
Na ⁺		42,57
Ca ²⁺		3,75
Mg ²⁺		1,28
Al ³⁺		0,00
(H+Al)	cmolc dm ⁻³	0,00
SB		5,75
t		5,75
CTC		5,75
V		100
m	%	0,00
PST		3,22

pH - potencial hidrogeniônico; CEes - condutividade elétrica do extrato saturado; MO - matéria orgânica; P - fósforo; Na⁺ - sódio; K⁺ - potássio; Ca²⁺ - cálcio; Mg²⁺ - magnésio; Al³⁺ - alumínio; (H+Al) - acidez potencial; SB - soma de bases; t - capacidade de troca catiônica efetiva; CTC - capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V - saturação por bases; m - saturação por alumínio trocável; e PST - percentagem de sódio trocável

Tabela 3. Parâmetros de ajustes das curvas de retenções de água no solo, segundo o modelo de van Genuchten-Mualem

Profundidade	θ_r	θ_s	α	n	m
m	cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³	cm ⁻¹	-	-
0,10	0,0963	0,4276	0,0485	2,1874	0,5428
0,30	0,1099	0,4251	0,0553	1,7587	0,4314

θ_r - umidade residual; θ_s - umidade de saturação; α - parâmetro empírico referente ao inverso do ponto de entrada de ar; e n e m - constantes empíricas que afetam a forma da curva

Além disso, foram desenvolvidos equipamentos para medição do avanço e redistribuição da água no solo (tensiômetros digitais) e medição do avanço e redistribuição dos solutos no solo (sensores de condutividade elétrica do solo). Os tensiômetros digitais

medem a tensão com que a água é retida às partículas do solo, sendo que, através da curva de retenção de água no solo, é possível determinar a umidade correspondente a cada tensão. Os sensores de condutividade elétrica do solo, que são utilizados diretamente no solo dispensam a realização de análises de laboratório que são onerosas e trabalhosas; sendo que os mesmos foram confeccionados, calibrados e testados para o solo em estudo.

3.1.1 Desenvolvimento do sistema de tensiômetros digitais

Para o monitoramento do movimento de água no solo foram desenvolvidos tensiômetros digitais que possuem como característica, o uso de cápsulas cerâmicas de menores dimensões quando comparados aos tensiômetros convencionais, devido a necessidade de determinações de tensões pontuais, fornecendo assim uma maior precisão nas leituras, principalmente em experimentos de laboratório. Além disso, utilizam um sistema de aquisição e armazenamento de dados, ao longo do tempo, que serve para auxiliar na melhor compreensão da dinâmica de água no solo. Outra vantagem deste equipamento, quando comparado com os tensiômetros convencionais, é que, depois de instalados, praticamente não há mais contato do operador com o tensiômetro, minimizando o risco de quebra da cápsula porosa e deslocamento do mesmo, o que poderia ocasionar danos ao equipamento.

Como mostrado na Figura 2 o modelo proposto é composto por: 1) tampa de borracha siliconada; 2) tubo de acrílico transparente, 15 mm; 3) tubo de acrílico transparente, 12 mm; 4) cápsula porosa (20 mm de comprimento e diâmetro externo de 12 mm); 5) mangueira plástica transparente; 6) conector de borracha; e 7) transdutor de tensão modelo Motorola® MPX 5100AP.



Figura 2. Layout do tensiômetro digital

A automação foi necessária para que fosse possível obter uma maior quantidade de dados em tempo reduzido, possibilitando assim uma melhor compreensão do movimento da água no solo.

Para a construção do sistema de aquisição dos dados utilizou-se uma placa Arduino® modelo MEGA 2560, três capacitores para condicionar o sinal do sensor e acoplamento/desacoplamento da alimentação destes, sendo dois capacitores cerâmicos e um eletrolítico, placa fenolítica (10 x 20 cm), bornes, jumpers, cabo quatro vias, RTC (Real Time Clock, usado para realizar a contagem do tempo) modelo DS1307 com bateria de lítio CR2032, display de cristal líquido (16 x 2), módulo de cartão de memória SD card para armazenamento dos dados, de acordo com o esquema apresentado na Figura 3. Para a alimentação do sistema foi utilizada uma fonte de computador bivolt com tensão de 12 Vcc. O sistema foi acondicionando em uma caixa plástica.

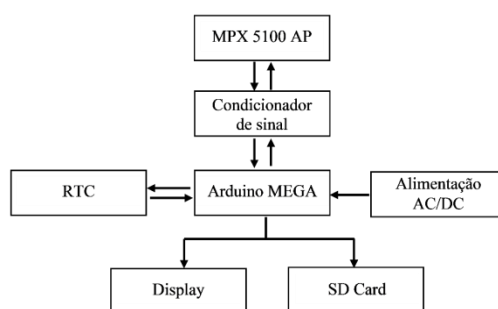
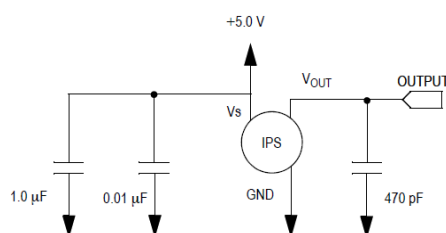


Figura 3. Esquema representativo do sistema de aquisição de dados

Na Figura 4 é mostrado o diagrama do circuito de alimentação e condicionamento do sinal do sensor, recomendado para a interface do sensor integrado à entrada A/D de um microprocessador ou microcontrolador. O acoplamento/desacoplamento da alimentação é realizado pelos capacitores de cerâmica de 1 μF e 0,01 μF , e a filtragem dos dados através do capacitor eletrolítico de 470 pF.



Fonte: Catálogo do fabricante

Figura 4. Fornecimento de alimentação, dissociação e filtragem de saída recomendados pelo fabricante do transdutor de tensão

Na Figura 5 são apresentadas as especificações do transdutor de tensão. Dentre as informações pode-se verificar a acurácia de 2,5% do fundo de escala médio de 4,5 V. Como a sensibilidade é de 45 mV kPa⁻¹, podemos esperar uma variação de leitura, em média, de 2,5 kPa acima ou abaixo da real.

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range ⁽¹⁾ Gauge, Differential: MPX5100D/MPX5100G/MPXV5100G Absolute: MPX5100A	P _{OP}	0 15	— —	100 115	kPa
Supply Voltage ⁽²⁾	V _S	4.75	5.0	5.25	V _{DC}
Supply Current	I _O	—	7.0	10	mAdc
Minimum Pressure Offset ⁽³⁾ @ V _S = 5.0 V	V _{OFF}	0.088	0.20	0.313	V _{DC}
Full Scale Output ⁽⁴⁾ @ V _S = 5.0 V	V _{FSO}	4.587	4.700	4.813	V _{DC}
Full Scale Span ⁽⁵⁾ @ V _S = 5.0 V	V _{FSS}	—	4.500	—	V _{DC}
Accuracy ⁽⁶⁾	—	—	—	±2.5	%V _{FSS}
Sensitivity	V/P	—	45	—	mV/kPa
Response Time ⁽⁷⁾	t _R	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	I _{O+}	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time ⁽⁸⁾	—	—	20	—	ms
Offset Stability ⁽⁹⁾	—	—	±0.5	—	%V _{FSS}

Fonte: Catálogo do fabricante

Figura 5. Características operacionais do transdutor de tensão MPX 5100AP

A programação foi realizada em um ambiente do Arduino chamado Sketch, a qual é uma plataforma “Open Source” em linguagem de programação C. No programa desenvolvido, os dados foram armazenados em diferentes arquivos para cada sensor, evitando a perda de dados de sensor para sensor na leitura. A gravação dos dados foi realizada em intervalos de 25 segundos.

3.1.2 Calibração do transdutor de tensão

Para a calibração do transdutor de tensão foi utilizada uma mangueira transparente flexível com comprimento de 5 m e diâmetro de 1,25 cm, fita métrica, fita adesiva, adesivo plástico transparente e um tensiômetro de 2 m de altura com cápsula de borracha, conectado à mangueira transparente, para a determinação das sucções com mangueira flexionada no sistema em “U” por diferenças de altura. Foram aplicadas diferentes alturas na mangueira (diferentes alturas manométricas) e feitas as devidas leituras no transdutor de tensão. Posteriormente, foi realizada uma análise de regressão, para determinação da equação de calibração linear, do tipo:

$$T = a \cdot \text{count} + b \quad (6)$$

em que:

T - valor da tensão, cm;

count - valor medido no transdutor de tensão, bits mV^{-1} ;

a - inclinação da equação de ajuste, $\text{cm}/(\text{bits } \text{mV}^{-1})$; e

b - interceptação da equação de ajuste, cm.

3.1.3 Desenvolvimento do sensor de condutividade elétrica do solo

O princípio de funcionamento dos sensores se baseia na determinação da condutividade elétrica obtida a partir da resistividade elétrica de um meio (neste caso, o solo). O sistema segue o princípio dos dois eletrodos ou duas pontas, e sua configuração consiste em utilizar dois eletrodos afastados por uma pequena distância e aplicar uma corrente elétrica, a fim de medir a alteração no potencial elétrico, na região em que a corrente elétrica transitou.

No caso deste sensor foi utilizado um condutivímetro de bancada para medição das leituras, as quais, através das equações propostas, podem ser convertidas em condutividade elétrica do extrato saturado (CE_{es}) do solo.

Os sensores de condutividade elétrica foram confeccionados manualmente (artesanalmente). Devido a isto não foi possível obter os mesmos padrões dos componentes envolvidos. Logo, necessitou-se, além da calibração, a avaliação de todos os sensores, cujo objetivo era determinar uma equação geral, para todos os sensores, ou uma equação individual para cada sensor, caso houvesse grandes diferenças nos valores das leituras obtidas.

Como mostrado na Figura 6 os sensores são compostos por: 1) cabo de duas vias; 2) tubo de acrílico; 3) anel de borracha; 4) haste de inox; 5) anel de inox; 6) camada de cola epóxi, para evitar contato entre a haste e o anel.

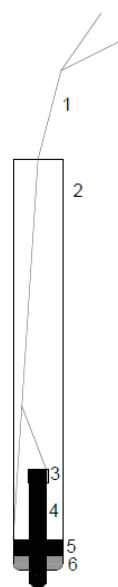


Figura 6. Layout do sensor de condutividade elétrica do solo

3.1.4 Calibração do sensor de condutividade elétrica do solo em solução

Inicialmente, foi realizado um teste de comportamento dos sensores em solução, para verificar se os mesmos obtinham o mesmo padrão de leitura, haja vista que, estes poderiam apresentar diferenças nas dimensões dos seus componentes. Para isto foram preparadas 10 soluções de cloreto de potássio (KCl), com condutividades elétricas variando de 0,53 a 4,91 dS m^{-1} . Após, realizou-se as leituras com nove (9) sensores construídos (Figura 7) e com o leitor de CE padrão (condutivímetro de bancada), para as soluções preparadas.



Figura 7. Calibração dos sensores em solução

3.1.5 Calibração do sensor de condutividade elétrica em pasta (solo mais solução)

Utilizou-se para calibração dos sensores um solo coletado no município de Upanema, Rio Grande do Norte, na camada de 0,00 a 0,30 m, classificado como Cambissolo, de acordo

com Santos et al. (2013). O solo foi seco, destorroado e passado em peneira de 2 mm.

A calibração dos sensores foi realizada no Laboratório de Irrigação e Salinidade da UFERSA. Foram preparadas pastas (solo mais solução) com diferentes salinidades (1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 dS m⁻¹) e umidades (0,150; 0,175; 0,200 e 0,225 g g⁻¹), totalizando 16 pontos amostrais, para se ter um intervalo considerável de pontos (diferentes umidades e salinidades) e com isso reduzir possíveis erros.

As pastas (solo mais solução) foram colocadas em copos plásticos, a fim de evitar possíveis interferências por materiais condutivos, e em seguida foi inserido um sensor em cada recipiente. Posteriormente, os mesmos foram cobertos com papel alumínio (com intuito de evitar evaporação) e deixados em repouso por dois dias (para estabilização das trocas iônicas na pasta) e posterior realização das leituras. Para a realização das leituras foi utilizado um condutivímetro de bancada modelo Digimed CD-21, e um cabo adaptado para plugar aos fios do sensor e assim obter a leitura no aparelho (Figura 8).



Figura 8. Detalhe da calibração dos sensores de condutividade elétrica do solo em pasta (solo mais solução)

Foram realizadas leituras nos sensores, em intervalos de 2 h, até a estabilização dos valores (quatro leituras). Ao final, foram coletadas duas amostras de cada pasta, para determinação da umidade gravimétrica e condutividade elétrica do extrato saturado (CE_{es}), a qual foi utilizada na comparação com os dados observados. De posse dos resultados foram ajustadas três equações, por meio de planilha eletrônica (Microsoft® Excel) e ferramenta de solução Solver, correspondentes à conversão da leitura dos sensores em CE_{es} do solo.

Os três modelos de equações ajustadas foram:

$$CE_{est} = a \cdot CE_{sensor} + b \quad (7)$$

$$CE_{est} = c. CE_{sensor} \cdot \theta + d \quad (8)$$

$$CE_{est} = e. CE_{sensor} \cdot \theta + f. \theta + g \quad (9)$$

onde:

CE_{est} - condutividade elétrica do extrato saturado estimada pelas equações, $dS\ m^{-1}$;

CE_{sensor} - condutividade elétrica lida com o sensor, $dS\ m^{-1}$;

θ - umidade volumétrica do solo, $L^3\ L^{-3}$; e

a, b, c, d, e, f e g - parâmetros empíricos de ajuste das equações.

Não foi considerada a temperatura, na calibração dos sensores de CE, pois o ambiente onde foram testados e seriam utilizados, era controlado (temperatura constante). Porém, a sua utilização em ambientes sem controle (no campo), onde existe uma grande variação da temperatura do solo, a calibração tem que levar em consideração este fator, juntamente com as características do solo.

Os dados obtidos com o teste de comportamento foram analisados através da média e coeficiente de variação, enquanto que, os dados da calibração em pasta (solo mais solução) foram avaliados através do coeficiente de determinação (R^2).

3.1.6 Calibração do sensor de condutividade elétrica para estimativa da concentração de potássio no solo

Como o objetivo da pesquisa foi determinar o transporte do potássio no solo realizou-se determinação da relação entre a condutividade elétrica do extrato saturado (CEes) e a concentração de potássio no solo. Para isto foram preparadas 16 pastas (solo mais solução) com diferentes salinidades de KCl (reagente), variando de 0,00 a 3,00 $dS\ m^{-1}$. As pastas foram preparadas individualmente com a mesma umidade, relativo a 0,20 $g\ g^{-1}$ (base massa), correspondendo a 0,24 $cm^3\ cm^{-3}$ (base volume), pois se considerou a massa específica do solo igual a 1,20 $g\ cm^{-3}$. Cada pasta foi acondicionada em copo plástico, coberto com papel filme para evitar evaporação, e deixada em repouso por 24 h, para estabilização das trocas iônicas. Posteriormente, foram realizadas leituras com os sensores e, em seguida, foi extraída uma amostra da pasta para determinação do potássio trocável através de extração com solução diluída de HCl, e posterior determinação por meio do fotômetro de chama. Em seguida foi ajustada uma equação do tipo linear, através de regressão, para conversão da CEes em

concentração de potássio no solo (C_K^+). O valor de concentração, obtido por meio da equação, foi dividido pela unidade volumétrica utilizada para preparação da pasta ($0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), para conversão da concentração de K trocável em K solúvel.

Com todos os equipamentos desenvolvidos realizou-se um teste inicial, onde foram dispostos todos os sensores, em um vaso de 60 L, preenchido com o mesmo solo utilizado para calibração, simulando uma irrigação por gotejamento, a fim de comprovar a eficácia dos sensores desenvolvidos, e ajustar a melhor disposição destes no solo.

3.2 Etapa 2: Instalação do experimento

Foi coletada uma quantidade de solo da camada de 0,00 a 0,30 m da área escolhida, no campo, para utilização no experimento. O mesmo foi seco ao ar, destorroado e passada em peneira de malha de 2 mm. Para realizar a validação do modelo foram utilizados vasos polietilino de aproximadamente 60 L cada, preenchidos com o solo, representativo da Região Semiárida Nordestina, classificado como Cambissolo, de acordo com Santos et al. (2013).

Cada vaso foi posicionado sobre apoios, para facilitar o nivelamento. No preenchimento do vaso, previamente perfurado, foi colocada inicialmente uma manta geotêxtil no fundo do mesmo. Acima desta foi colocada uma camada de brita de 0,03 m. Posteriormente foi colocada outra manta geotêxtil para evitar a translocação do solo e consequente obstrução dos drenos. Após este procedimento inicial (instalação do sistema de drenagem) os vasos foram preenchidos com o referido solo, sendo acrescentados volumes de solo predeterminados a cada 0,10 m e realizada uma leve compactação, para que a massa específica do solo se mantivesse próxima a $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 9). Logo após, aplicou-se cerca de 5 L de água para acomodação do solo (adensamento) e posteriormente foi realizada a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado utilizando o método proposto por Shani et al. (1987).

A aplicação de água foi realizada via irrigação localizada, por gotejamento (utilizando microtubo). Sua alimentação se deu por meio de um frasco mariotte, para que fosse possível manter a vazão constante ao longo do tempo. A água foi aplicada utilizando três vazões, referentes as normalmente aplicadas na irrigação por gotejamento superficial, conjuntamente com três soluções contendo diferentes concentrações de cloreto de potássio (KCl). Avaliou-se, durante a irrigação, o avanço da frente de molhamento e do transporte de potássio no solo, por meio da aplicação de 5 L de solução de cloreto de potássio (KCl). Após cessar a irrigação foi avaliada a redistribuição da água e do potássio no solo. Portanto, o experimento consistiu de

nove tratamentos referentes a três vazões, 0,72; 1,52 e 2,50 L h⁻¹, respectivamente, V1, V2 e V3; três concentrações de potássio de 0,165; 0,450 e 0,750 mg cm⁻³, respectivamente, C1, C2 e C3; e um solo Cambissolo, S1; conforme a Figura 10. As concentrações de potássio correspondem, respectivamente, às condutividades elétricas de 0,55; 1,50 e 2,50 dS m⁻¹.



Figura 9. Detalhes do preenchimento dos vasos

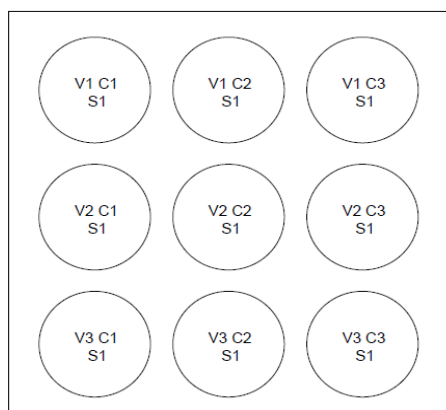


Figura 10. Esquema dos tratamentos para avaliação da frente de molhamento e redistribuição de água e soluto no solo

3.2.1 Condutividade hidráulica do solo saturado

Anteriormente à instalação dos sensores no solo foi determinada a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), pelo método do charco, proposto por Shani et al. (1987) utilizando metodologia descrita em Wooding (1968). Este apresentou uma solução aproximada da equação do fluxo bidimensional de água do solo, quando o raio da zona saturada se aproxima de um valor constante, assumindo condições de estado estacionário e soluções estacionárias, considerando o solo homogêneo e não-isotrópico, onde:

$$q = K_s + \frac{4.K_s}{\pi.\alpha} \cdot \frac{1}{r} \quad (10)$$

em que:

q - densidade de fluxo, $L T^{-1}$;

K_s - condutividade hidráulica do solo saturado, $L T^{-1}$;

α - característica do solo relacionada às propriedades de sorção do solo e descreve a redução da taxa de condutividade com o potencial matricial, L^{-1} ; e

r - raio saturado, L .

A densidade de fluxo (q) é determinada por:

$$q = \frac{Q}{\pi.r^2} \quad (11)$$

em que:

Q - vazão do emissor, $L T^{-1}$.

E, como,

$$q = a + b \cdot \frac{1}{r} \quad (12)$$

em que:

a - interceptação da equação linear; e

b - inclinação da equação linear.

e, a é dado por:

$$a = K_s \quad (13)$$

e, b é dado por:

$$b = \frac{4.K_s}{\pi.\alpha} \quad (14)$$

Logo, o K_s é estimado pela interceptação da regressão linear de q vs $1/r$ e o α é determinado por:

$$\alpha = \frac{4.K_s}{b.\pi} \quad (15)$$

Para cada tratamento foi realizada a obtenção do K_s na superfície do solo, através da aplicação de três vazões ($0,72$; $1,52$ e $2,50 \text{ L h}^{-1}$) com cinco repetições cada. A área saturada foi determinada através de fotografia e processamento de imagem pelo software ImageJ (Figura 11). Posteriormente foi determinado o K_s através da relação entre a taxa de fluxo (q) e o raio do charco (r).



Figura 11. Processamento de imagem utilizando o software ImageJ para determinação da área saturada (charco)

3.3 Etapa 3: Monitoramento do fluxo de água no solo

O monitoramento do fluxo de água no solo foi realizado através da avaliação do avanço da frente de molhamento em solo inicialmente úmido, onde foram utilizados tensiômetros digitais, que coletaram informações a cada 25 segundos, distribuídos radialmente em diferentes profundidades ($0,05$; $0,15$ e $0,25 \text{ m}$) e distâncias do emissor ($0,03$; $0,09$ e $0,15 \text{ m}$) de forma a se obter informações da distribuição e da redistribuição de água em duas dimensões (Figura 12).

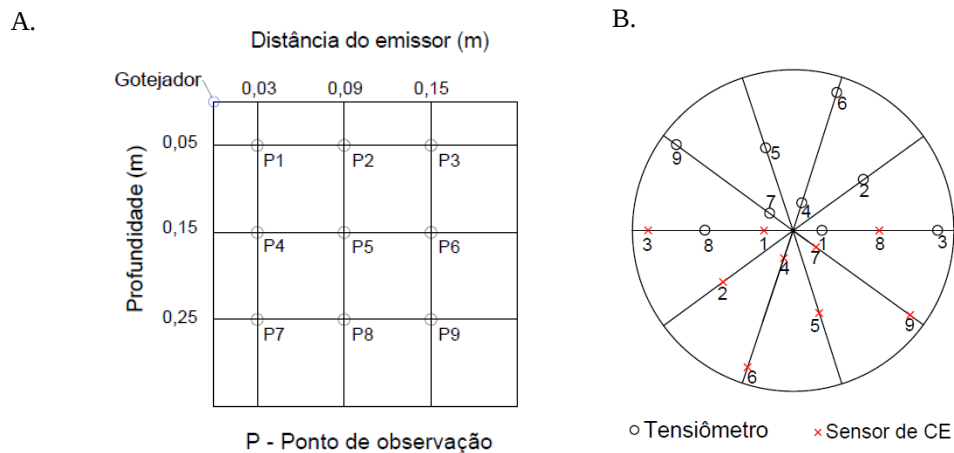


Figura 12. Disposição dos sensores de tensão e condutividade elétrica no solo para monitoramento da dinâmica de água e transporte de soluto no solo: (A) corte transversal; (B) vista superior

3.4 Etapa 4: Monitoramento do transporte de soluto no solo

O monitoramento do transporte de soluto no solo foi realizado diretamente em solo úmido, utilizando os condutivímetros desenvolvidos. Estes foram distribuídos radialmente, instalados nas profundidades (0,05; 0,15 e 0,25 m) e distâncias do emissor (0,03; 0,09 e 0,15 m). Assim como na avaliação da frente de molhamento, esta distribuição tem como objetivo obter resultados tridimensionais do transporte do soluto no solo (Figura 13).

Portanto, os tensiômetros e sensores de condutividade elétrica do solo, representados por “T” e “S”, respectivamente, foram posicionados da seguinte forma no solo: T1 e S1 - (0,03;0,05); T2 e S2 - (0,09;0,05); T3 e S3 - (0,15;0,05); T4 e S4 - (0,03;0,15); T5 e S5 - (0,09;0,15); T6 e S6 - (0,15;0,15); T7 e S7 - (0,03;0,25); T8 e S8 - (0,09;0,25) e T9 e S9 - (0,15;0,25) e conforme imagem abaixo (Figura 13).



Figura 13. Disposição dos tensiômetros e sensores de condutividade elétrica no solo

Ao final de cada tratamento foram coletadas amostras indeformadas, para realização de análises físicas (massa específica do solo e curva de retenção de água no solo), como mostrado na Figura 14.



Figura 14. Detalhe da coleta das amostras indeformadas

3.5 Etapa 5: Caracterização dos atributos físicos do solo utilizados no experimento

As amostras usadas para preenchimento dos vasos usado no experimento, após secas ao ar, foram destorroadas e passadas em peneira com 2 mm de abertura de malha.

Para a determinação da classificação textural, realizou-se a análise granulométrica das amostras indeformadas do solo recolhidas.

Para a determinação da massa específica das partículas (ρ_p) o método empregado foi o do balão volumétrico utilizando-se álcool. Este considera apenas o volume de solo ocupado efetivamente pelas partículas, sem considerar o espaço poroso, sendo seu valor determinado pela expressão:

$$\rho_p = \frac{m_{ss}}{V_s} \quad (16)$$

em que:

ρ_p - massa específica das partículas, $M L^{-3}$;

m_{ss} - massa de solo seco a 105°C/110°C, M; e

V_s - volume de sólidos, L^3 .

A massa específica do solo (ρ_s) foi determinada pelo método do anel volumétrico, com auxílio de anéis amostradores com dimensões de 0,05 m de diâmetro e 0,03 m de altura, através de amostras indeformadas coletadas ao final de cada experimento, usando a seguinte equação:

$$\rho_s = \frac{m_{ss}}{V} \quad (17)$$

em que:

ρ_s - massa específica do solo, $M L^{-3}$;

m_{ss} - massa de solo seco a 105°C/110°C, M; e

V - volume do anel, L^3 .

As referidas análises foram realizadas seguindo Teixeira et al. (2017).

Para a elaboração da curva de retenção de água no solo foram coletadas 12 amostras indeformadas do solo, na camada superficial (0,00 a 0,10 m), após o termino de cada tratamento. Foram utilizados anéis com dimensões de 0,05 m de diâmetro e 0,03 m de altura. As tensões aplicadas foram: 0; 5; 10; 20; 30; 40; 50; 100; 300; 500; 800; 2000; 5000; 10000 e 15000 cm. Para as baixas tensões, até 50 cm, utilizaram-se placas de areia; para as médias tensões, de 60 a 300 cm, utilizou-se a mesa de tensão; e, acima destes valores, utilizou-se as câmaras de Richards de baixa e alta pressão.

Posteriormente foram ajustados os parâmetros da curva de retenção de água no solo (θ_r , θ_s , α e n), obtidos pelo modelo de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) utilizando o programa RETC (van Genuchten et al., 1991):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^m} \quad (18)$$

e, assumindo-se:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (19)$$

em que:

θ - umidade do solo, $L^3 L^{-3}$;

θ_r - umidade residual, $L^3 L^{-3}$;

θ_s - umidade de saturação, $L^3 L^{-3}$;

α - parâmetro empírico referente ao inverso do ponto de entrada de ar, L^{-1} ;

h - tensão de água no solo, L; e

n e m - constantes empíricas que afetam a forma da curva, adimensional.

3.6 Etapa 6: Caracterização química do solo utilizado no experimento

As amostras deformadas do solo foram submetidas a análises químicas. Primeiramente foi realizada a quantificação do pH utilizando phmetro e a CE através do extrato de saturação com auxílio de um condutivímetro digital; os cátions trocáveis Ca+Mg através da extração com solução de KCl a 1 mol L^{-1} e determinação por complexiometria em presença dos indicadores negro de eriochromo e calcon, o Ca através da extração com solução de KCl a 1 M, e o Mg obtido por diferença, o Na e K através de extração com solução Mehlich-1 e posterior determinação por fotômetro de chama. Todas as análises foram realizadas seguindo Teixeira et al. (2017).

3.7 Etapa 7: Determinação dos parâmetros de transporte de soluto no solo

Os parâmetros de transporte de soluto determinados, para o solo utilizado no experimento, foram: velocidade da solução no poro (v), número de Peclet (P), fator de retardamento (R), coeficiente de dispersão (D), dispersividade do meio poroso (λ) e coeficiente empírico de distribuição (K_d). Os parâmetros foram obtidos através do ajuste numérico das curvas de distribuição de efluentes, conhecidas como Breakthrough Curve (BTC). Este ajuste pode ser feito utilizando softwares existentes na literatura tais como: STANMOD (Simunek et al., 1999b) e DISP (Borges Jr & Ferreira, 2006).

O número de Peclet (P) consiste de um parâmetro adimensional, que exprime a relação entre a velocidade de transporte por convecção e a velocidade de transporte por difusão molecular, de acordo com equação abaixo:

$$P = \frac{v.L}{D} \quad (20)$$

em que:

v - velocidade da solução no poro, $L\ T^{-1}$;

L - comprimento da coluna de solo, L ; e

D - coeficiente de dispersão, $L^2\ T^{-1}$.

Este parâmetro é utilizado no estudo da difusão através de um meio poroso, o qual serve para determinar quais mecanismos (convecção-dispersão ou difusão) domina o processo de transporte de solutos (Gonçalves, 2007). Baixos valores do número de Peclet indicam que o transporte por difusão predomina sobre o transporte por convecção; quando ocorre o inverso, valores maiores para o número de Peclet, o transporte por convecção-dispersão se sobrepõe ao processo por difusão (Wang, 2002; Gonçalves et al., 2008).

O coeficiente de Dispersão (D) é, geralmente, assumido como sendo uma função da velocidade do fluido, expresso pela seguinte equação:

$$D = \lambda \cdot v \quad (21)$$

em que:

λ - dispersividade do meio poroso, L .

A velocidade da solução no poro pode ser obtida pela relação entre o fluxo de água no solo e a umidade volumétrica do solo saturado:

$$v = \frac{q}{\alpha} \quad (22)$$

em que:

q - densidade de fluxo, $L\ T^{-1}$; e

α - porosidade total, $L\ L^{-3}$.

O fator de retardamento (R) representa a interação entre o soluto e a fase sólida do solo e é dado pela defasagem entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução no solo, conforme a seguinte expressão:

$$R = 1 + \frac{\rho \cdot K_d}{\theta} \quad (23)$$

em que:

R - fator de retardamento, adimensional;

ρ - massa específica do solo, $M L^{-3}$;

Kd - coeficiente empírico de distribuição, $L^3 M^{-1}$; e

θ - conteúdo volumétrico de água, $L^3 L^{-3}$.

O valor de Kd é igual a zero quando não há interação entre soluto e o solo.

3.7.1 Obtenção dos parâmetros de transporte de soluto no solo

Para a determinação dos parâmetros de transporte de solutos no solo foi necessária a elaboração de Breakthrough Curves (BTC).

Para a elaboração das BTC's foram utilizadas colunas de PVC, com 24 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro externo, as quais foram lixadas em seu interior para aumentar o atrito com as partículas do solo, evitando possíveis caminhos preferenciais. Instalou-se na sua parte inferior uma manta sintética sobre uma tela fixada por um cap com um furo no centro, que servia para drenar o efluente excedente. Para poder proporcionar uma carga hidráulica constante de 2 cm foi instalado um dreno na coluna, eliminando assim o excedente de efluente aplicado. A coluna de solo constava das seguintes dimensões: 20 cm de comprimento e 4,6 cm de diâmetro interno.

Inicialmente as colunas foram pesadas e, em seguida, preenchidas com solo seco (terra fina seca ao ar) passado em peneira de malha de 2 mm. A quantidade de solo, para cada coluna, foi previamente determinada considerando um comprimento de coluna de solo, a ser preenchida (20 cm) e massa específica do solo de $1,45 g cm^{-3}$. Em seguida, adicionou-se camadas de solo sobrepostas de 2 cm de espessura, com uma leve compactação até o preenchimento da coluna (Figura 15).

Inicialmente, as colunas de solo foram inseridas em um balde contendo água destilada, para promover a saturação por capilaridade. Adicionou-se água destilada, lentamente, até atingir 2/3 da altura da coluna, com o objetivo de expulsar o ar dos microporos. Logo após, deixou-se em repouso por 24 horas para a completa saturação (Figura 16).

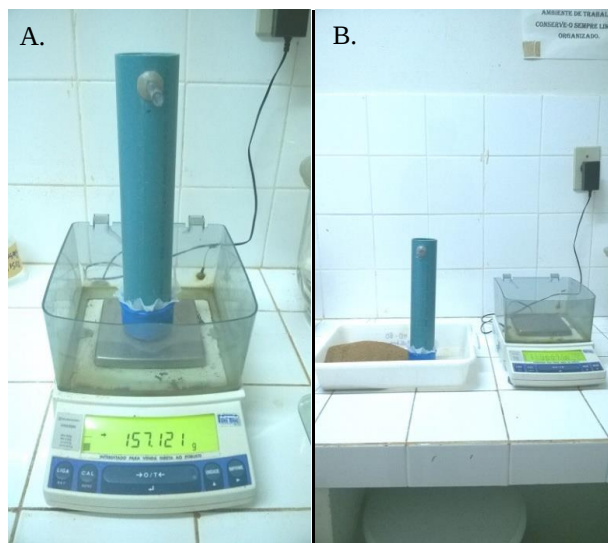


Figura 15. Detalhe dos procedimentos iniciais para elaboração da BTC: (A) pesagem da coluna; (B) preenchimento das colunas com solo



Figura 16. Procedimento de saturação da coluna de solo, por capilaridade, com água destilada, para elaboração das curvas de distribuição de efluentes

Posteriormente, procedeu-se o processo de lavagem da coluna de solo, o qual consistiu da passagem de água destilada através da camada de solo, até a completa eliminação de todos os íons solúveis presentes, que foi determinada quando a solução coletada apresentou CE igual à solução aplicada na superfície da coluna (Figura 17).



Figura 17. Procedimento de lavagem do solo com água destilada

As colunas, montadas desta forma, comportam-se como permeâmetros de carga constante. Logo, foi possível determinar a condutividade hidráulica do solo saturado, conforme a seguinte equação:

$$K_s = \frac{V_a \cdot L}{A \cdot t \cdot (h + L)} \quad (24)$$

em que:

K_s - condutividade hidráulica do solo saturado, $L \ T^{-1}$;

V_a - volume coletado do efluente, L^3 ;

L - altura da coluna de solo, L ;

A - área da coluna de solo, L^2 ;

t - tempo médio correspondente a coleta do volume do efluente, T ; e

h - carga hidráulica sobre a coluna de solo, L .

Para a determinação dos parâmetros do movimento de soluto no solo foram coletados frascos, contendo 50 mL cada. Cada frasco coletado representava uma pequena fração do volume total de poros (VP) do solo na coluna, sendo calculado em função do volume da coluna preenchida com solo ($332,4 \text{ cm}^3$) e da porosidade do solo:

$$VP = \alpha \cdot V \quad (25)$$

em que:

VP - volume de poros, L^3 ;

α - porosidade do solo, decimal; e

V - volume da coluna preenchida com solo, L^3 .

Ruiz et al. (2010) recomendam que, para íons móveis, como potássio e nitrato, 2,0 VP constituem, em geral, um valor apropriado. Porém, em testes preliminares, para o solo em estudo, foi observado que este valor não foi suficiente para obter uma concentração relativa (C/Co) próximo a 1,0. Logo, foram utilizados mais de 13 VP para se obter correlação relativa maior do que 0,8.

Foram elaboradas 9 BTC's, referentes a um solo (Cambissolo), três concentrações de potássio (0,165; 0,450 e 0,750 mg cm⁻³) e três repetições.

Ao final das coletas dos efluentes, cada amostra foi submetida a determinação da concentração de K pelo método do fotômetro de chama, de acordo com Teixeira et al. (2017). De posse destes valores e do número de poros foram ajustadas as curvas de eluição, para o K, referentes às diferentes concentrações, utilizando o código CFITIM (van Genuchten, 1981) no software STANMOD (Simunek et al., 1999b).

Os parâmetros de transporte de soluto no solo determinados através do software STANMOD foram: fator de retardamento (R) e número de Peclet (P), e a partir destes, determinou-se o coeficiente de dispersão (D), a dispersividade (λ) e o coeficiente de distribuição (Kd).

3.8 Etapa 8: Definição e preenchimento dos parâmetros de entrada do HYDRUS 2D/3D

As simulações de distribuição e redistribuição de água e soluto no solo foram realizadas utilizando o modelo HYDRUS 2D. Para a realização das simulações faz-se necessário o preenchimento de algumas janelas no software instalado. Após a inserção de todos os dados necessários, em cada janela, clica-se em “Next”, para ir para a próxima.

Na janela inicial do programa (Figura 18) foram informados o nome e a descrição do projeto a ser salvo no computador, sendo os resultados de saída das simulações armazenados quando se marcou a opção “Permanent” em “ Working Directory”.

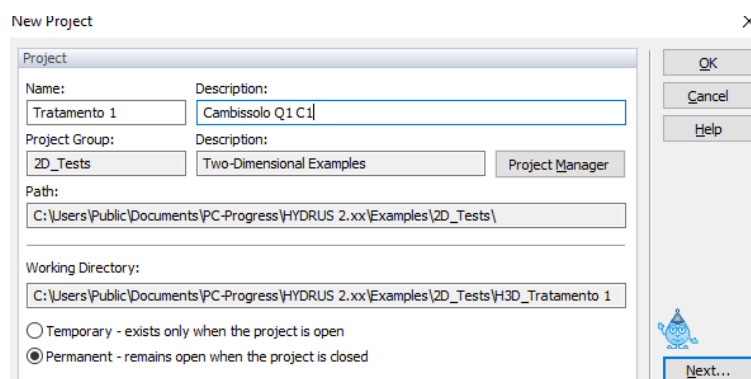


Figura 18. Nomeação e descrição do projeto

Em seguida, foram definidas as informações sobre o tipo de geometria (2D - General), em opções de domínio em duas dimensões (2D - Axisymmetrical Vertical Flow), unidade de comprimento (cm) e tamanho inicial do espaço “Inicial Workspace” (X = de -25,0 a 200,0 cm

e Y = de -125 a 50 cm) onde foi simulado o volume de solo molhado (Figura 19A). Na janela seguinte foram selecionados “Water Flow” e “Solute Transport”, para que o software simulasse o fluxo de água e transporte de soluto padrão (Figura 19B).

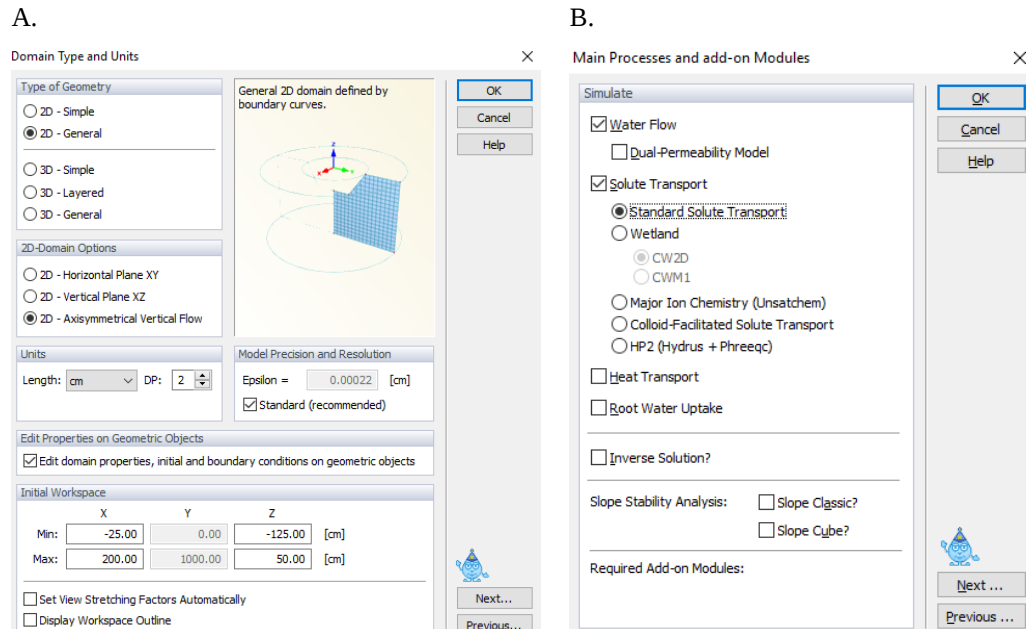


Figura 19. Detalhe das informações iniciais do modelo HYDRUS: (A) geometria, unidade e dimensões da área de trabalho; (B) simulação do fluxo de água e transporte de soluto

Na janela seguinte, “Time Information”, selecionou-se a unidade de tempo (horas) e forneceu-se o tempo necessário para as simulações. Em “Boundary Conditions” selecionou-se a opção “Time-Variable Boundary Conditions”; isto significa que as condições de contorno para o tempo de simulação foram distintas entre si. Desta forma, o tempo informado em “Final Time” foi o mesmo inserido em “Number of Time-Variable Boundary Records” (Figura 20).

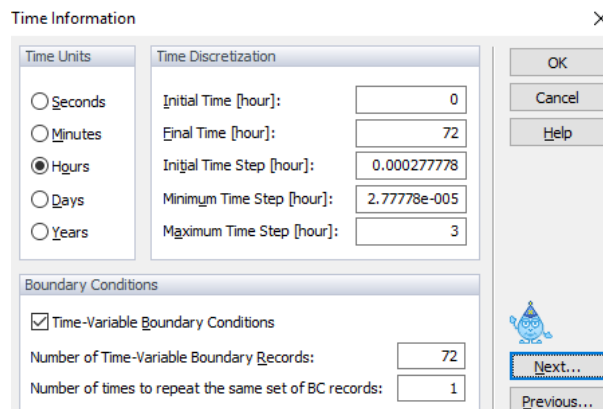


Figura 20. Informações do tempo de simulação

Os dados de saída foram determinados em função da vazão e do tempo necessário para aplicar 5,0 L, para a distribuição, e durante 72 h na redistribuição. Selecionou-se a opção “Interval Output” utilizando-se o valor de 0,25 h. Determinou-se, na opção “Count” em “Print Times”, o total de 288 valores de saída (Figura 21).

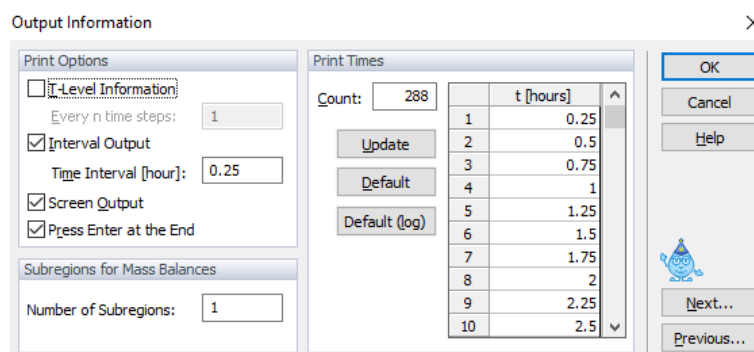


Figura 21. Informações da saída de dados das simulações

Na janela “Iteration Criteria” mantiveram-se as configurações recomendadas pelo manual do software HYDRUS 2D/3D, optando pela condição “In Water Contents”, na opção “Initial Condition”, referente ao conteúdo inicial de água no solo (Figura 22).

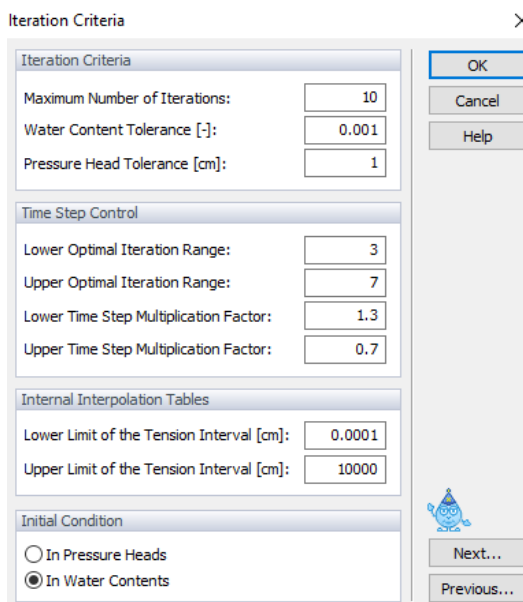


Figura 22. Configurações dos critérios de interação das simulações

Na janela “Soil Hydraulic Model” foi selecionado, na opção de “Single-Porosity Models”, o modelo de van Genuchten-Mualem sem a ocorrência de histerese (“No Hysteresis”) (Figura 23).

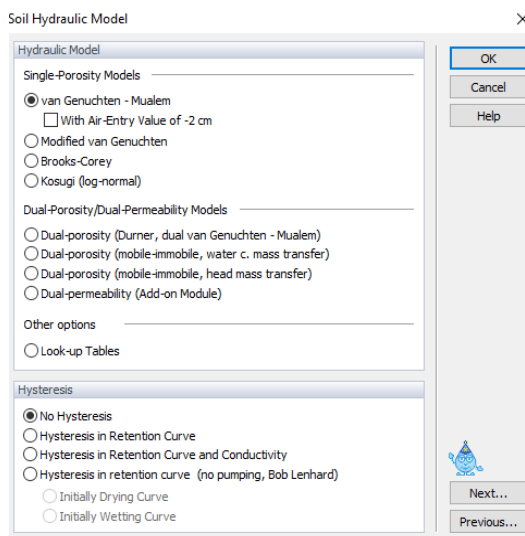


Figura 23. Seleção do modelo de van Genuchten-Mualem e utilização da condição de não histerese

Na janela “Water Flow Parameters” (Figura 24), preencheu-se os parâmetros do modelo de van Genuchten-Mualem com os dados obtidos de todos os tratamentos (nuvem de pontos) dos parâmetros das curvas de retenção de água no solo, os quais são apresentados no Apêndice A. O K_s considerado foi o determinado pela condutividade hidráulica média, durante os procedimentos para elaboração das BTC’s.

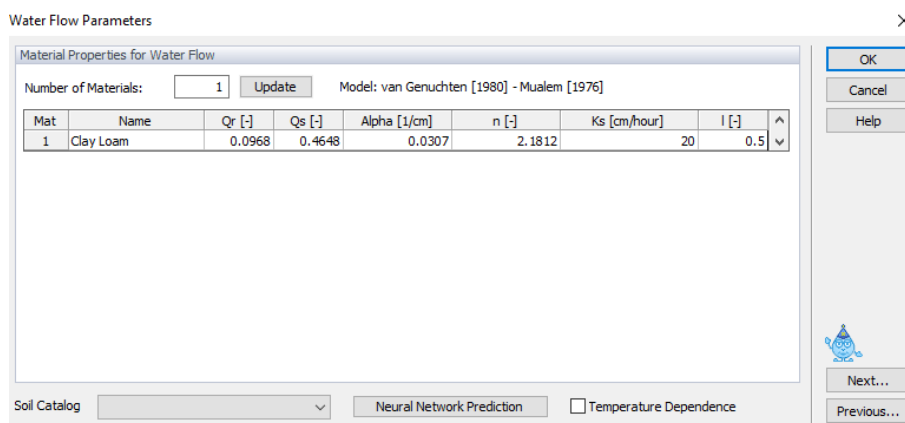


Figura 24. Parâmetros físico-hídricos do solo estudado

Na próxima janela, “Solute Transport”, foram inseridas algumas informações sobre o soluto (Figura 25). A simulação foi realizada com apenas um soluto, potássio (K). Utilizou-se a unidade de massa “mg” e a duração do pulso (h) foi a mesma utilizada para aplicar os 5 L de solução, para cada tratamento. O restante das informações se mantiveram iguais as inicialmente fornecidas pelo programa (default).

Figura 25. Informações sobre transporte de soluto

Em seguida, na janela “Solute Transport Parameters”, foram inseridos os parâmetros de transporte do soluto no solo, sendo primeiramente informado os parâmetros específicos do solo (massa específica do solo, dispersividade longitudinal e dispersividade transversal, considerada 10% da dispersividade longitudinal) e, em seguida, os parâmetros específicos do soluto (difusividade em água, que se encontra tabelado na bibliografia (Kemper, 1986)) (Figura 26A). E na janela seguinte, “Reaction Parameters for Solute”, foi inserido o valor do coeficiente empírico de distribuição (Kd) (Figura 26B).

Na janela, “Time Variable Boundary Conditions” (Figura 27), foram fornecidos os seguintes dados: Time (referente ao tempo de aplicação da solução, na primeira linha; e o tempo total de simulação, na segunda linha); hCritA; Var.Fl1 (vazão aplicada pelo gotejador, em $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$); e cValue1 (concentração de potássio aplicada, em mg cm^{-3}). Como o experimento foi conduzido em laboratório, sob temperatura constante de 25°C , não foi considerado o efeito da evaporação.

A janela seguinte serve para configurar os parâmetros da malha de elementos finitos, sendo estipulado o tamanho de 2 cm em “Targeted FE size” (Figura 28).

A.

Solute Transport Parameters

Soil Specific Parameters						Solute Specific Parameters		
Mat	Bulk.D. [M/cm ³]	Disp.L. [cm]	Disp.T. [cm]	Fract. [-]	Thimob. [-]	Sol	Diffus. W. [cm ² /hour]	Diffus. G. [cm ² /hour]
1	1.45	4.0813	0.40813	1	0	1	0.07056	0

OK
Cancel
Help
Next...
Previous...

B.

Reaction Parameters for Solute - 1

Boundary Conditions									
	cBnd1	cBnd2	cBnd3	cBnd4	cRoot	cWell	cBnd7	cAtm	d
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Reaction Parameters							
Mat	Kd [cm ³ /M]	Nu [cm ³ /mg]	Beta [-]	Henry [-]	Sink1.1 [1/hour]	SinkS1 [1/hour]	
1	2.0685	0	1	0	0	0	

< >

OK
Cancel
Help
Next...
Previous...

Figura 26. Detalhe das janelas: (A) parâmetros de transporte de soluto; (B) parâmetros de reação para o soluto

Time Variable Boundary Conditions

Parameters							
	Time [hours]	Precip. [cm/hour]	Evap. [cm/hour]	Transp. [cm/hour]	hCritA [cm]	Var.FI1 [cm/hour]	Var.H-1 [cm]
1	7	0	0	0	10000	720	0
2	72	0	0	0	10000	0	0

< >

Linear interpolation of time between the initial and final time

Surface area associated with transpiration: 0 [cm²]

OK
Cancel
Help
Add Line
Delete Line
Next...
Previous...

Figura 27. Dados do tempo de aplicação da solução e simulação; vazão aplicada e concentração de soluto

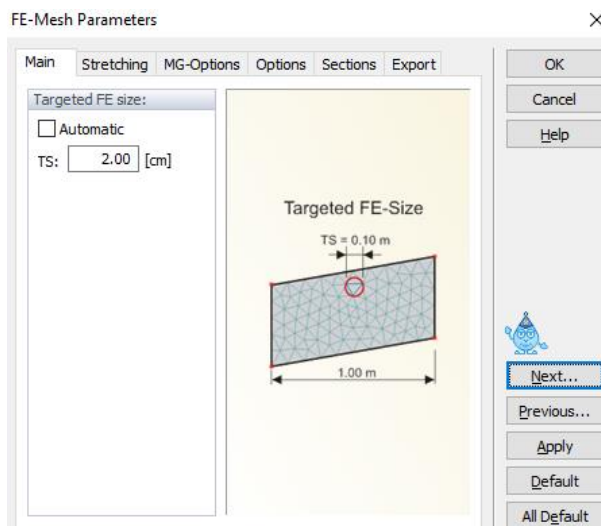


Figura 28. Parâmetros para a configuração do tamanho da malha de elementos finitos

Após a inserção dos parâmetros de entrada do HYDRUS 2D, realizou-se a delimitação do layout da área de estudo, utilizado para simular a dinâmica de água e transporte de soluto no solo. Este seguiu as mesmas dimensões do vaso instalado em laboratório, sendo que o layout representa a metade do recipiente e o mesmo foi dividido em camadas, para melhor inserção dos dados iniciais de umidade (Figura 29).

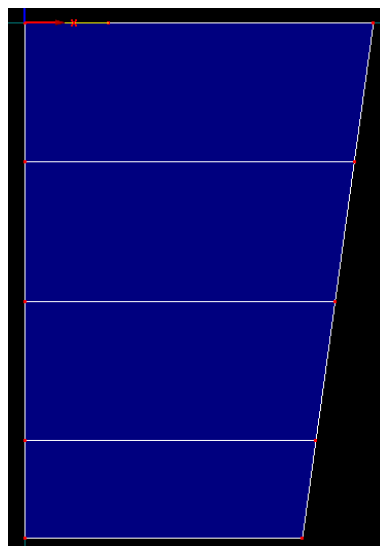


Figura 29. Layout da área de estudo para simulação no HYDRUS 2D

Após o layout, na aba “FE-Mesh”, gerou-se a malha de elementos finitos não estruturados com refinamento da malha próximo ao gotejador, com tamanho de 0.2 cm, aumentando-se gradualmente, à medida que se distanciava do emissor, até o limite de 2 cm (Figura 30).

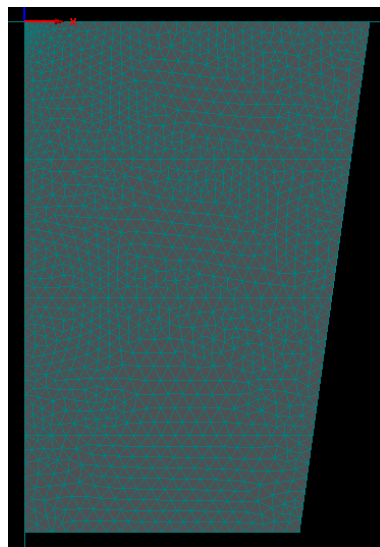


Figura 30. Detalhe da malha de elementos finitos não estruturados

Na aba “Domain Properties” foram definidos os pontos de observação, conforme Figura 31, para avaliação do conteúdo de água e concentração do potássio (K) no solo. Para que fosse possível a comparação fiel entre os dados observados e os simulados foram definidos nove pontos de observação (Observation Nodes), que possuíam as mesmas disposições (profundidade e distância do gotejador) dos tensiômetros digitais e sensores de CE instalados nos vasos.

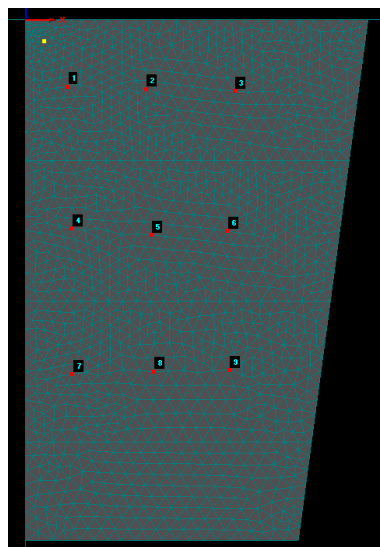


Figura 31. Disposição dos pontos de observação

Na aba “Initial Conditions” foram determinados os conteúdos iniciais de água no solo, para cada camada, em função da tensão (convertida em umidade através da curva de retenção de água do solo) obtida com os tensiômetros digitais, antes da aplicação de cada solução. A

concentração inicial de potássio (K) no solo considerada foi a determinada em cada ponto de observação, pelos sensores, em mg cm^{-3} (Figura 32 e 33).

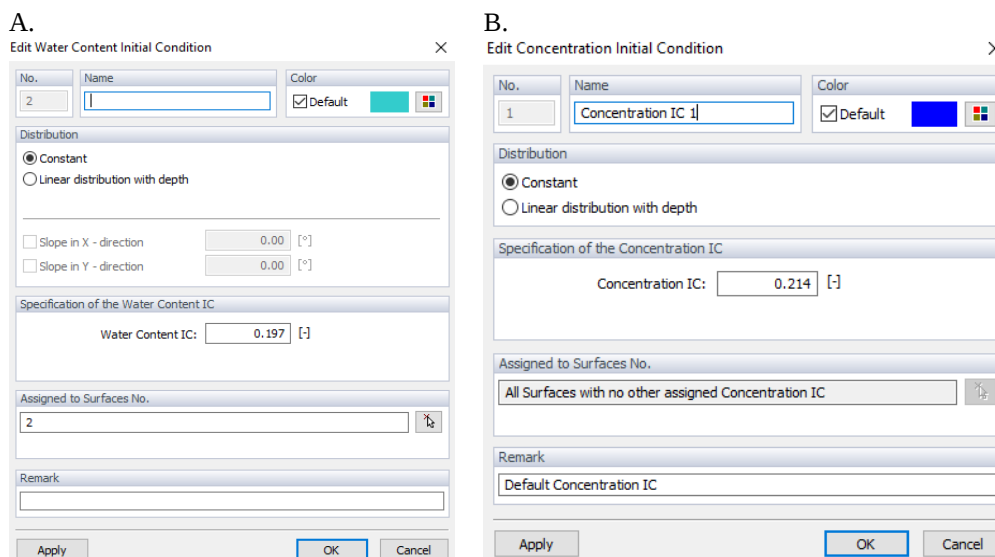


Figura 32. Edição das condições iniciais: (A) conteúdo de água no solo por camada; (B) concentração inicial de potássio no solo

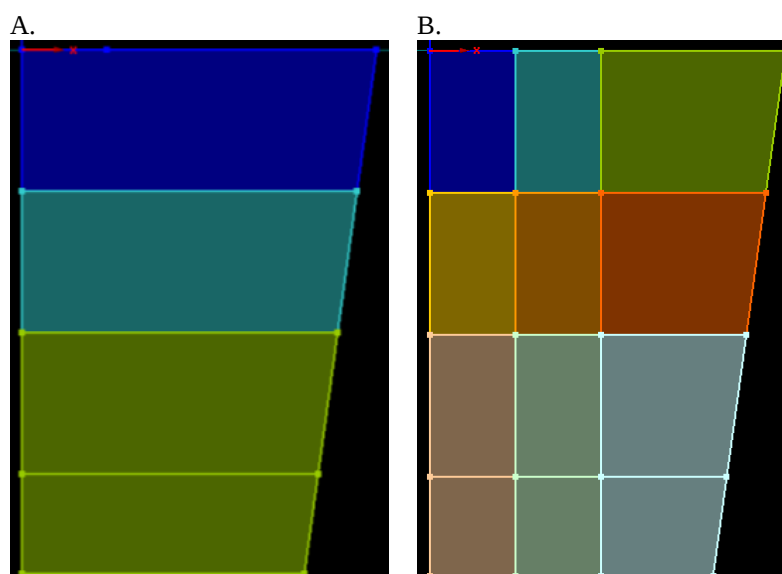


Figura 33. Detalhe das distintas camadas do solo: (A) diferentes conteúdos de água por camada; (B) diferentes concentrações iniciais de potássio por ponto de observação

Na aba “Bandary Conditions Options” na opção “Special Boundary Conditions” selecionou-se as condições “Surface Drip with Dynamic Wetting” e “From left to right”, referentes a irrigação por gotejamento superficial, com posição do gotejador à esquerda (Figura 34).

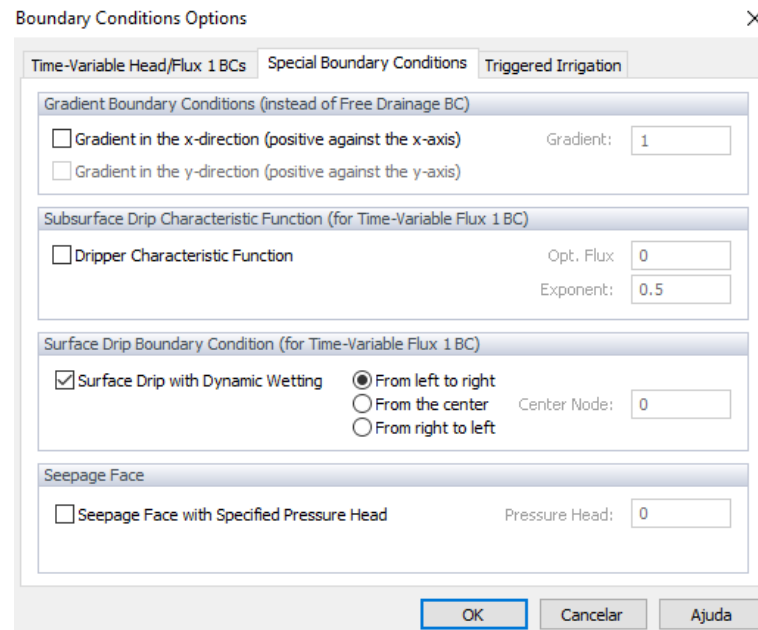


Figura 34. Seleção da condição de gotejamento superficial com posição à esquerda

Na aba “Boundary Conditions”, considerou-se que o emissor estava localizado na parte superior esquerda, delimitado pela linha na cor roxa, representando o raio saturado (Variable Flux 1). O limite superior restante, assim como nos lados direito e esquerdo considerou-se a condição de fluxo zero (No flux) e o limite inferior foi definido como drenagem livre (Free Drainage) (Figura 35).

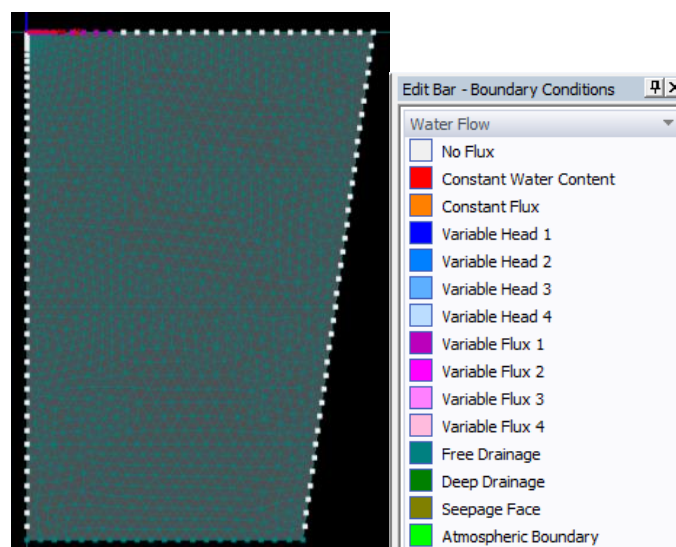


Figura 35. Condições de contorno utilizadas na simulação

Após a inserção dos dados de entrada, requeridos pelo modelo, das condições de contorno e das configurações para a simulação numérica do movimento de água e transporte

de soluto no solo, clicou-se no botão “Run Calculation”, para o software realizar os cálculos da simulação.

Por fim, ao clicar na aba “Results” são disponibilizados os resultados das simulações realizadas pelo modelo HYDRUS. Na pasta “Results-Graphical Display” estão disponíveis os resultados de tensão de água, conteúdo de água, concentração de soluto e velocidade de deslocamento. Tais informações são apresentadas na tela principal do modelo, de forma interativa, como se pode observar na Figura 36.

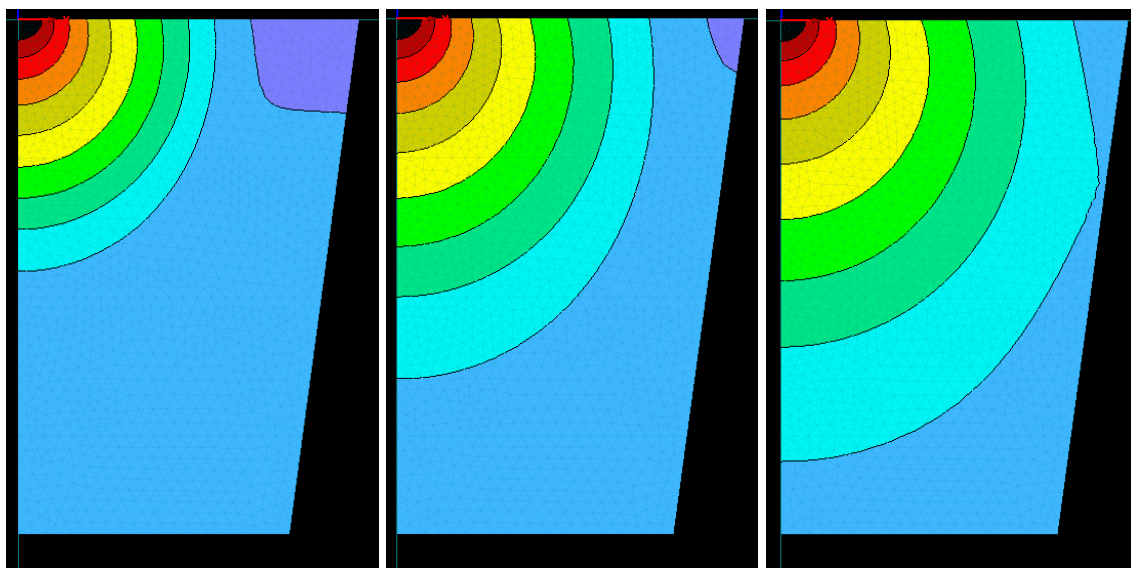


Figura 36. Exemplo de resultado de uma simulação do movimento de água no solo, em diferentes tempos

Ao clicar-se na pasta “Results-Other Information” e em seguida em “Observation Nodes” é possível obter, graficamente, os resultados de conteúdo de água, concentração do íon estudado, entre outros, em função do tempo de simulação, para cada nó de observação determinado, como também, exportar os valores das simulações, para cada nó de observação, no formato .txt (Figura 37).

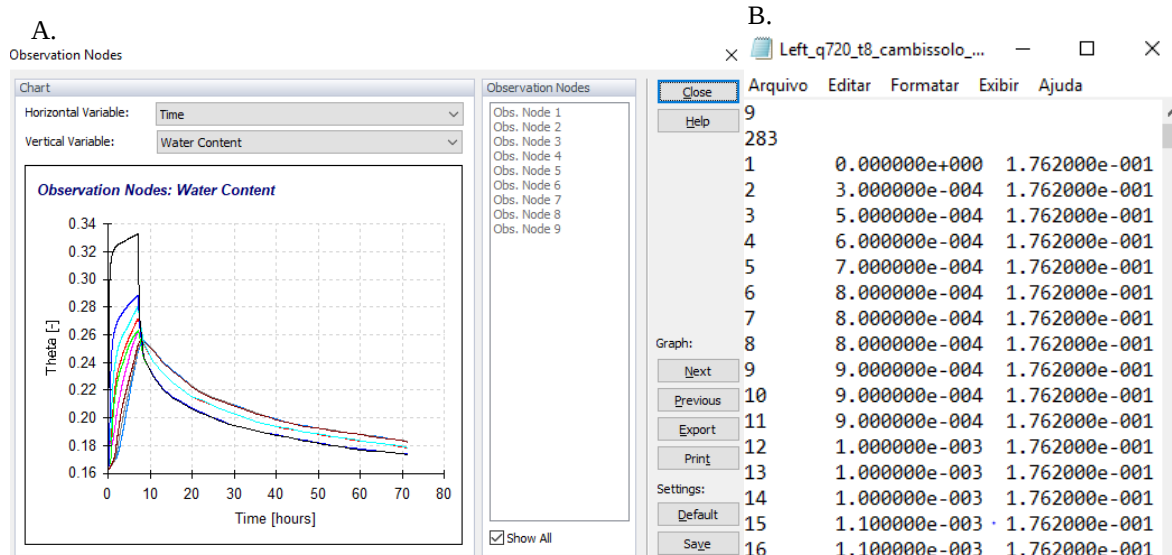


Figura 37. Resultados da simulação para os nós de observação: (A) representação gráfica; (B) formato .txt

3.9 Etapa 9: Análise estatística do desempenho do modelo

A análise estatística consiste de um conjunto de métodos matemáticos utilizados para organizar e analisar dados e informações. Dentre estes métodos temos a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), que é uma importante ferramenta estatística de validação de modelos. Esta informa o tamanho do erro produzido pelo modelo matemático utilizado (Willmott, 1981), ou seja, descrevem a diferença entre as simulações do modelo e os dados observados. É dada pela seguinte equação:

$$REQM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad (26)$$

em que:

P_i - dados estimados pelo modelo;

O_i - dados observados; e

n - número de observações.

Outro método matemático, utilizado na análise de modelos, é o Erro Absoluto Médio (EAM), que mede a magnitude média dos erros em um conjunto de previsões, sem considerar sua direção, ou seja, em análise de modelo é a diferença absoluta média entre dados preditos e observados. É dado pela seguinte equação:

$$EAM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (27)$$

Quando utilizados, conjuntamente, EAM e REQM, observa-se que, em geral, $REQM \geq EAM$, para a maioria dos valores. O grau que REQM excede EAM é um indicador da extensão em que os valores são muito diferentes entre os dados existentes (ou variação nas diferenças entre os valores modelados e observados) (Legates & McCabe Jr, 1999). Ambos, REQM e EAM, são amplamente aplicados em estudos de avaliação de modelos (Chai & Draxler, 2014).

De posse dos parâmetros físicos dos solos foram realizadas simulações com o modelo HYDRUS 2D e, posteriormente, a comparação destes resultados com os dados obtidos experimentalmente.

O desempenho do modelo HYDRUS 2D foi avaliado comparando-se os dados preditos pelo modelo com os respectivos dados observados experimentalmente, utilizando para análise estatística a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e o Erro Absoluto Médio (EAM).

3.10 Etapa 10: Análise de sensibilidade do modelo

Segundo Parsinejad et al. (2006), os modelos de simulação, por mais complicados que sejam, ainda são uma versão simplificada da realidade física. Como exemplo, muitas vezes, algumas propriedades do solo são ignoradas ou simplificadas em modelos que predizem o movimento de água no solo. Tais simplificações tornam os modelos menos perfeitos, necessitando, portanto, que os mesmos sejam validados.

Em muitos casos, os parâmetros de entrada dos modelos são estimados, o que pode resultar em erros em suas previsões. O efeito de tais erros de predição e a importância de uma maior precisão nas previsões, a partir de uma estimativa melhorada dos parâmetros de entrada, se disponíveis, precisam ser avaliados (Thabane et al., 2013). Uma análise de sensibilidade pode identificar os parâmetros mais influentes e suas interações e como esses parâmetros afetam os resultados (Saltelli, 2002).

De forma simplificada, a análise de sensibilidade é uma ferramenta para avaliar o efeito de mudanças nos valores dos parâmetros de entrada nos valores de saída de um modelo de simulação. Mais especificamente, esta análise é usada em modelos para fins de validação, simplificação, calibração, lidar com dados pobres ou ausentes e até mesmo identificar

parâmetros importantes para estudos futuros (Islam, 2017). Portanto, esta análise é importante para avaliar a robustez dos modelos e garantir uma interpretação apropriada dos resultados, levando em consideração os parâmetros que podem ter um impacto sobre eles (Thabane et al., 2013), ou seja, serve para determinar quais parâmetros influenciam mais no resultado do modelo.

Para realização da análise de sensibilidade do modelo foram utilizados os seguintes parâmetros: vazão (Q), umidade inicial (θ_i); condutividade hidráulica do solo saturado (Ks), concentração de potássio aplicada (C_K^+), concentração inicial de potássio no solo (C_{iK}^+), coeficiente de distribuição (Kd), dispersividade (λ) e massa específica do solo (ρ_s). Estes foram alterados individualmente e obtidos os respectivos valores da Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), tendo como base, os parâmetros de entrada do tratamento 5 (vazão de 1,52 L h⁻¹ e concentração de potássio aplicada de 0,450 mg cm⁻³). Os valores originais de simulação e respectivos valores para análise de sensibilidade são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros para análise de sensibilidade do modelo

Q L h ⁻¹	Ks cm h ⁻¹	θ_i cm ³ cm ⁻³	C_{iK}^+ mg cm ⁻³	C_K^+ mg cm ⁻³	Kd cm ³ g ⁻¹	λ cm	ρ_s g cm ⁻³
0,72	4	0,109	0,00	0,165	1,00	1,00	1,35
1,00	12	0,124	0,10	0,310	2,00	3,00	1,40
1,52*	20*	0,140	0,20***	0,450*	2,75*	5,02*	1,45*
2,00	24	0,186**	0,30	0,600	4,00	7,00	1,50
2,50	28	0,191	0,40	0,750	5,00	9,00	1,55

*Valor original de simulação; **valor médio para simulação da umidade inicial do solo; ***valor médio para simulação da concentração do potássio no solo; Q - vazão; Ks - condutividade hidráulica do solo saturado; θ_i - umidade volumétrica inicial; C_{iK}^+ - concentração inicial de potássio no solo; C_K^+ - concentração de potássio aplicada; Kd - coeficiente de distribuição; λ - dispersividade; e ρ_s - massa específica do solo

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Equipamentos desenvolvidos para obtenção de dados experimentais

4.1.1 Tensiômetro digital

Na Figura 38 é apresentado o tensiômetro construído, constando de todos os componentes propostos no projeto.



Figura 38. Tensiômetro construído

Na Figura 39 é apresentado o sistema de aquisição de dados (SAD), construído para leitura de 16 tensiômetros simultaneamente, em que é possível observar todos os componentes do circuito desenvolvido para armazenamento das leituras de tensão de água no solo.

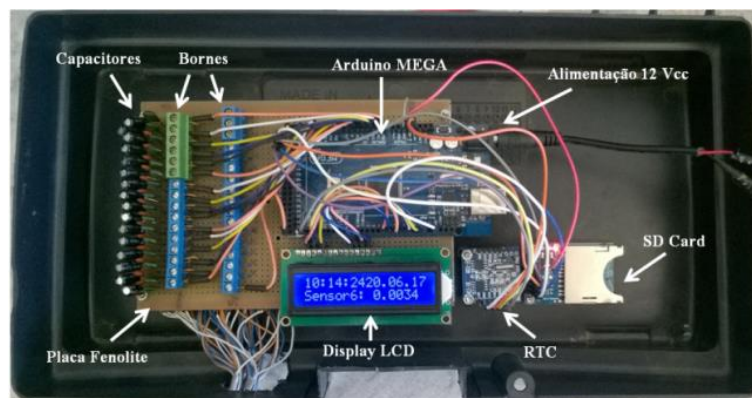


Figura 39. Detalhes dos componentes do sistema de aquisição e armazenamento de dados dos tensiômetros

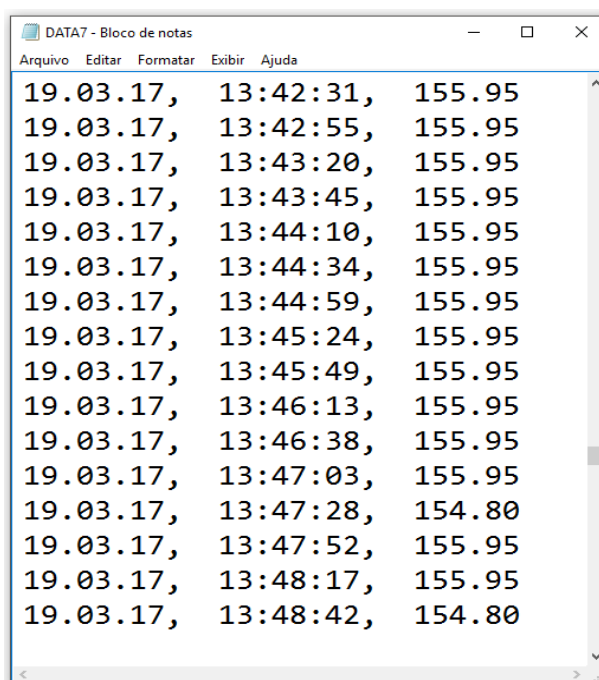
Observou-se, durante os ensaios, que o SAD ficou bastante robusto, de fácil manuseio e que as leituras permaneceram estáveis. Verificou-se também que, para testes ou leituras com este SAD, os transdutores de pressão devem ser calibrados de acordo com a temperatura ambiente. Não foi necessário realizar este procedimento, pois os testes foram realizados em ambiente controlado.

Como resultado da calibração do transdutor de tensão foi obtido a seguinte equação:

$$T = -1,1504.\text{count} + 954,33 \quad (28)$$

O coeficiente de determinação (R^2) da equação é igual a 0,9996, apresentando ótimo ajuste de acordo com o valor obtido.

Os dados gerados no equipamento (Figura 40) são registrados e armazenados no formato de texto (.txt), apresentando para cada sensor o arquivo de nome DATA seguido do número do sensor correspondente (por exemplo: DATA7; o qual corresponde aos dados do sensor 7). Cada arquivo gerado apresenta três colunas, sendo a primeira referente à data (dd.mm.aa), a segunda à hora do registro da leitura (hh:mm:ss) e a terceira correspondendo ao valor da tensão lido pelo sensor em cm de coluna de água. Os dados podem ser utilizados em planilhas e editores de texto com a devida conversão.



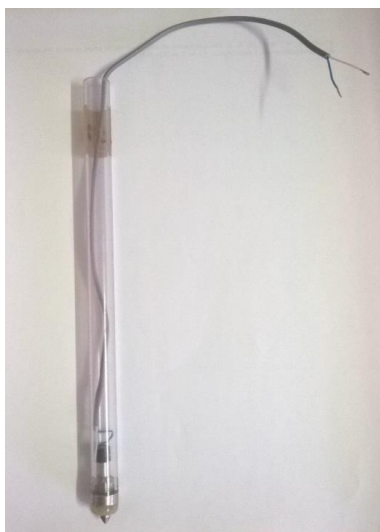
Data (dd.mm.aa)	Hora (hh:mm:ss)	Valor da tensão (cm de água)
19.03.17,	13:42:31,	155.95
19.03.17,	13:42:55,	155.95
19.03.17,	13:43:20,	155.95
19.03.17,	13:43:45,	155.95
19.03.17,	13:44:10,	155.95
19.03.17,	13:44:34,	155.95
19.03.17,	13:44:59,	155.95
19.03.17,	13:45:24,	155.95
19.03.17,	13:45:49,	155.95
19.03.17,	13:46:13,	155.95
19.03.17,	13:46:38,	155.95
19.03.17,	13:47:03,	155.95
19.03.17,	13:47:28,	154.80
19.03.17,	13:47:52,	155.95
19.03.17,	13:48:17,	155.95
19.03.17,	13:48:42,	154.80

Figura 40. Exemplo de dados armazenados de um tensiômetro: data, hora e valor das tensões de água no solo, respectivamente

4.2.2 Sensores de condutividade elétrica

Para obtenção dos dados de condutividade elétrica (CE) do solo foram desenvolvidos sensores capazes de medir diretamente no solo a CE. Na Figura 41 é apresentado o sensor de condutividade elétrica do solo construído e o condutivímetro utilizado para realização das leituras de CE.

A.



B.



Figura 41. Sistema de aquisição das leituras: (A) sensor de condutividade elétrica do solo montado; (B) condutivímetro utilizado para realização das leituras de condutividade elétrica

Os sensores de condutividade elétrica foram avaliados em solução e os resultados são apresentados na Figura 42, Tabela 4 e Figura 43. Observa-se que, os sensores superestimaram os valores de leituras para uma mesma concentração salina (Figura 43), demonstrando que a constante de célula dos sensores é superior a um, pois esta foi a utilizada no aparelho para medir a CE das soluções.

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios para cada concentração e os respectivos coeficientes de variação entre os valores. Quando se comparam somente os valores obtidos com os sensores, estes se mostram bem ajustados, com baixo coeficiente de variação, variando de 2,70% a 5,09%, indicando que os mesmos apresentaram uma construção uniforme.

Na Figura 44 observa-se a relação entre a condutividade elétrica da solução (CEs), obtida com o condutivímetro de bancada, e a condutividade elétrica lida com o sensor (CEsensor) (média dos valores lidos pelos nove sensores).

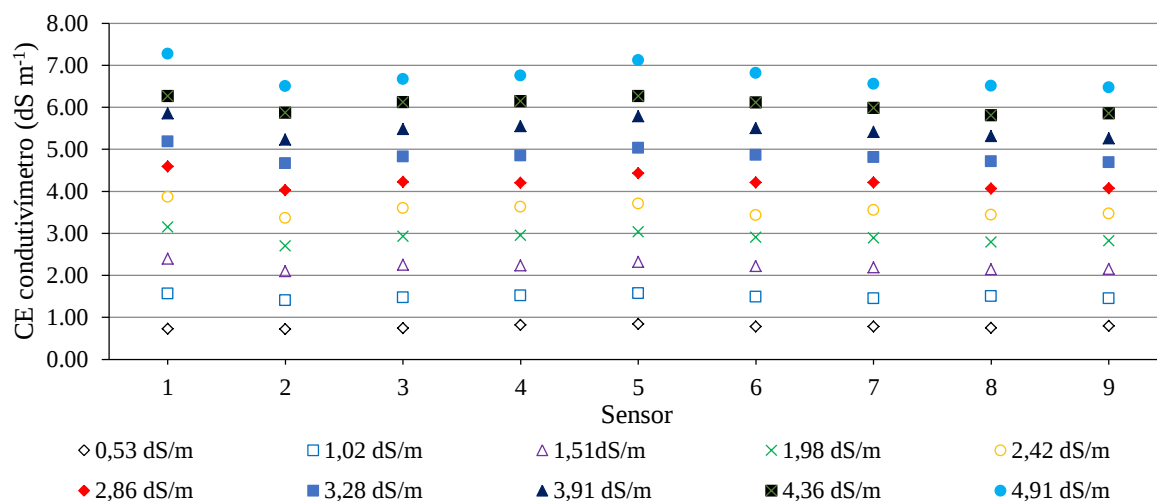


Figura 42. Teste de comportamento dos sensores na medição da CE em diferentes soluções

Tabela 5. Análise estatística do teste de comportamento dos sensores em solução

Estatística	Condutividade elétrica da solução									
	dS m ⁻¹									
	0,53	1,02	1,51	1,98	2,42	2,86	3,28	3,91	4,36	4,91
Média (dS m ⁻¹)	0,77	1,49	2,22	2,91	3,56	4,22	4,85	5,49	6,04	6,74
CV (%)	5,09	3,47	3,87	4,31	4,14	4,10	3,26	3,73	2,70	4,00

CV - coeficiente de variação

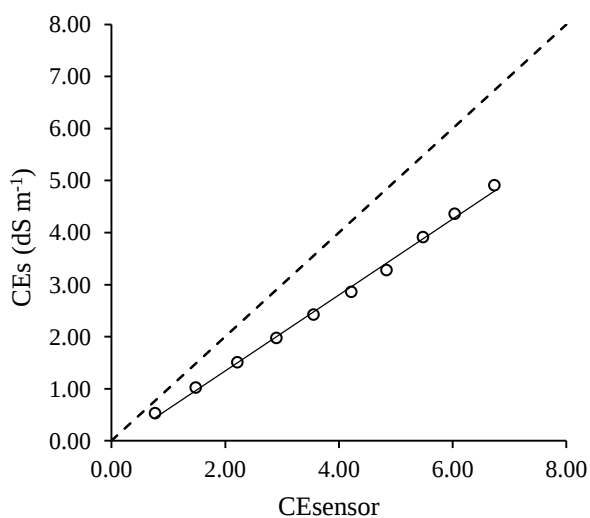


Figura 43. Relação entre leituras de condutividade elétrica da solução obtidas com o condutivímetro de bancada (CEs) e o sensor proposto (CEsensor)

Observa-se na Figura 44 que os valores de CEs foram superestimados pelos sensores de CE.

A partir deste gráfico obteve-se a seguinte equação de ajuste do tipo linear:

$$CEs = 0,7294.CEsensor - 0,1157 \quad (29)$$

O coeficiente de determinação (R^2) obtido com a equação foi de 0,9968, ou seja, apresentou um bom ajuste entre os valores.

Os sensores de CE foram calibrados em pasta (solo mais solução), para conversão da CE_{sensor} (lida com os sensores) em CE do extrato saturado do solo estimado pelas equações (CE_{est}). Por meio desta calibração foram obtidas equações de regressão linear e múltipla, sendo esta última para as equações que apresentavam como variável a umidade volumétrica do solo (θ), através de planilha eletrônica e solução numérica por meio da ferramenta solver, conforme apresentadas abaixo:

$$CE_{\text{est}} = 3,0565 \cdot CE_{\text{sensor}} - 0,1636 \quad (30)$$

$$CE_{\text{est}} = 5,9486 \cdot CE_{\text{sensor}} \cdot \theta + 0,2639 \quad (31)$$

$$CE_{\text{est}} = 1,9189 \cdot CE_{\text{sensor}} + 1,5859 \cdot \theta - 0,3865 \quad (32)$$

Observa-se, na Figura 44, a relação entre a CE_{sensor} e a CE_{est} . Nota-se que, para todos os casos, usando ou não a umidade, os valores da CE_{est} superestimaram os valores obtidos com os sensores.

As diferentes equações propostas proporcionaram ajustes muito similares, com coeficiente de determinação (R^2) iguais a 0,9566; 0,9716 e 0,9665, respectivamente, para as equações (30), (31) e (32), confirmando a alta relação entre os valores.

Apesar da pequena diferença entre os modelos testados e, mesmo a equação (31) proporcionar um melhor ajuste, para a faixa de umidade do solo estudada (0,150 a 0,225 g g⁻¹), recomenda-se utilizar a equação (30), por requerer uma única variável independente; para tal basta apenas realizar a leitura direta da CE com os sensores para obter a CE_{es} do solo, não necessitando dos dados de umidade para as devidas correções.

Na Figura 45 é mostrada a relação entre os valores obtidos pelas equações propostas (CE_{est}) e os valores obtidos pelo leitor de condutividade elétrica padrão (CE_{es}), mostrando o bom desempenho das equações testadas.

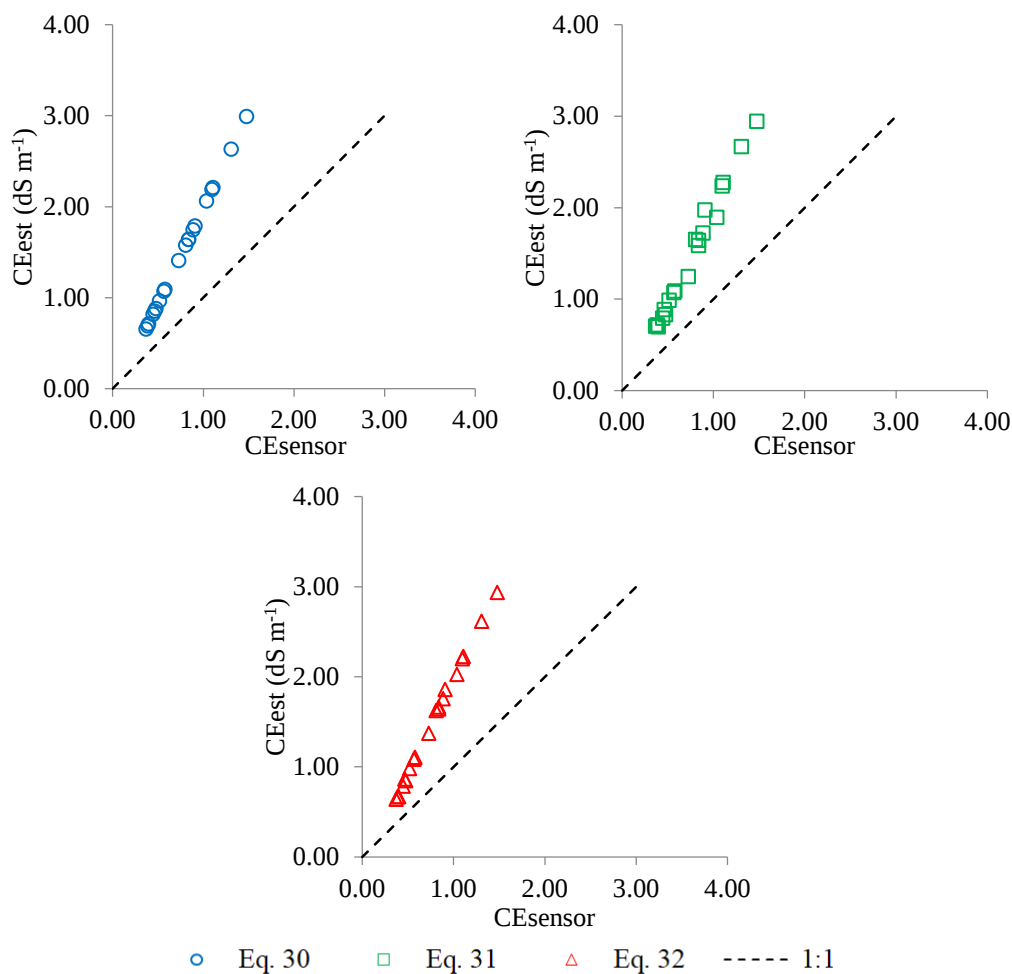


Figura 44. Relação entre a condutividade elétrica lida com os sensores (CE_{sensor}) e a condutividade elétrica do extrato saturado estimada com as equações (CE_{est})

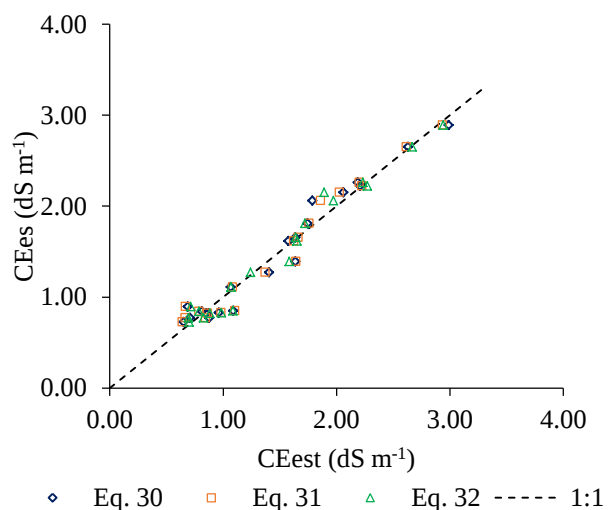


Figura 45. Relação entre a condutividade elétrica do extrato saturado estimada com as equações (CE_{est}) e a condutividade elétrica do extrato saturado (CE_{es})

Porém, como objetivou-se, com esta pesquisa, avaliar o movimento do íon potássio no solo foram preparadas 16 pastas (solo mais soluções de cloreto de potássio), para

determinação da relação entre concentração de potássio e condutividade elétrica. Na Figura 46, observa-se que a relação apresentou um bom coeficiente de determinação, R^2 de 0,9143, e a seguinte equação do tipo linear:

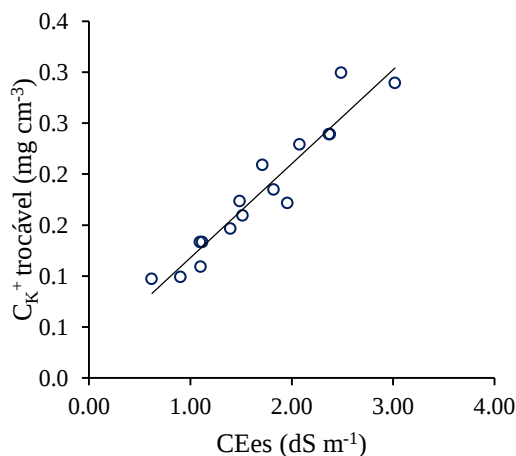


Figura 46. Relação entre concentração de potássio (C_K^+) e condutividade elétrica do extrato saturado (CE_{es})

$$C_{K^+} = 0,3838.CE_{es} - 0,1079 \quad (33)$$

em que:

C_K^+ - concentração de potássio, $mg\ cm^{-3}$.

4.2 Instalação e condução do experimento

4.2.1 Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado pelo método proposto por Shani et al. (1987)

Na Tabela 6 temos os valores das condutividades hidráulicas para os diferentes tratamentos, utilizando o método proposto por Shani et al. (1987).

Observa-se que os dados de Ks apresentaram grande discrepância entre os tratamentos, variando de 1,458 a 27,447 $cm\ h^{-1}$. Esta variação pode estar relacionada a uma maior ou menor compactação do solo (Al-Jabri et al., 2002), mas a principal causa das diferenças é provavelmente causada pela variabilidade espacial e temporal das propriedades da superfície do solo (Al-Jabri et al., 2006), ou seja, irregularidades na superfície do solo (relevo), que propicia maiores ou menores valores de Ks. Para isto alguns pesquisadores sugerem a suavização e o nivelamento da superfície do solo, promovendo assim uma área homogênea e

simétrica (Or, 1996; Yitayew et al., 1998). Devido a isto, não foram considerados como dados de entrada para simulação do modelo HYDRUS 2D.

Tabela 6. Resultados da condutividade hidráulica do solo saturado obtidos pelo método proposto por Shani et al. (1987)

Tratamentos	Ks
	cm h ⁻¹
T1	10,740
T2	27,447
T3	1,458
T4	8,799
T5	18,641
T6	8,524
T7	17,533
T8	7,459
T9	26,351

Ks - condutividade hidráulica do solo saturado

4.2.2 Obtenção dos dados experimentais de movimento de água e transporte de soluto no solo

Os sensores foram instalados nos vasos para obtenção dos dados de dinâmica de água e transporte de potássio no solo (Figura 47). Para isto foram simulados eventos de irrigação localizada (gotejamento superficial) onde se aplicaram três vazões (0,72; 1,52 e 2,50 L h⁻¹), juntamente com três concentrações de potássio (0,165; 0,450 e 0,750 mg cm⁻³). Avaliou-se durante os eventos de irrigação, o avanço da frente de molhamento e do transporte de soluto no solo. Após cessar a irrigação (aplicação de água no solo) foi avaliada a redistribuição de água e soluto no solo.



Figura 47. Diferentes tratamentos e condução do experimento

4.2.3 Determinação dos parâmetros da curva de retenção do solo

Com as amostras indeformadas, coletadas após o término do experimento em cada tratamento, foram elaboradas curvas de retenção de água no solo. Estas foram ajustadas

segundo o modelo de van Genuchten-Mualem, utilizando o software RETC. Como os dados obtidos em cada tratamento não apresentaram grande diferença entre si (Apêndice A), optou-se por considerar, como dados de entrada do modelo HYDRUS 2D, os valores obtidos pelo ajuste da nuvem de pontos das curvas de retenção de água no solo de todos os tratamentos (Tabela 7).

Tabela 7. Parâmetros do ajuste da curva de retenção de água no solo, para o Cambissolo, obtidos com o software RETC segundo o modelo de van Genuchten-Mualem

Solo	θ_r $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	θ_s $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	α cm^{-1}	n -	m -
Cambissolo	0.0968	0.4648	0.0307	2.1812	0.5415

θ_r - umidade residual; θ_s - umidade de saturação; α - parâmetro empírico referente ao inverso do ponto de entrada de ar; e n e m - constantes empíricas que afetam a forma da curva

4.2.4 Obtenção dos dados para simulação do transporte de soluto no solo

Para a simulação da dinâmica de transporte do soluto no solo foram elaboradas curvas de distribuição de efluentes (BTC's) do íon potássio (K^+), para o Cambissolo, com as concentrações de 0,165; 0,450 e 0,750 mg cm^{-3} , ajustadas pelo programa STANMOD. As BTC's estão apresentadas na Figura 48.

Devido às características do solo, não foi possível atingir concentração relativa máxima (igual a 1 ou 100%), mesmo chegando a 17,25; 14,84 e 13,81 volumes de poros (VP), para as concentrações de potássio de 0,165; 0,450 e 0,750 mg cm^{-3} , respectivamente. Para a concentração de potássio de 0,165 mg cm^{-3} só foi possível atingir uma concentração relativa de 0,56, mesmo assim foi ajustado uma curva para obtenção dos parâmetros do transporte de potássio no solo. Dificuldades similares foram encontradas por Andrade et al. (2014) que as relacionaram à baixa concentração aplicada, acarretando um maior retardo no processo de lixiviação do soluto. Observa-se, ainda, que a BTC com concentração de 0,450 mg cm^{-3} atingiu uma concentração relativa de 0,83; e a BTC elaborada com uma maior concentração de potássio necessitou de um menor VP para atingir uma maior concentração relativa (0,86).

Os resultados dos parâmetros de transporte de soluto no solo obtidos com as curvas de efluentes e ajustados pelo programa STANMOD, para o íon potássio, estão apresentados na Tabela 8.

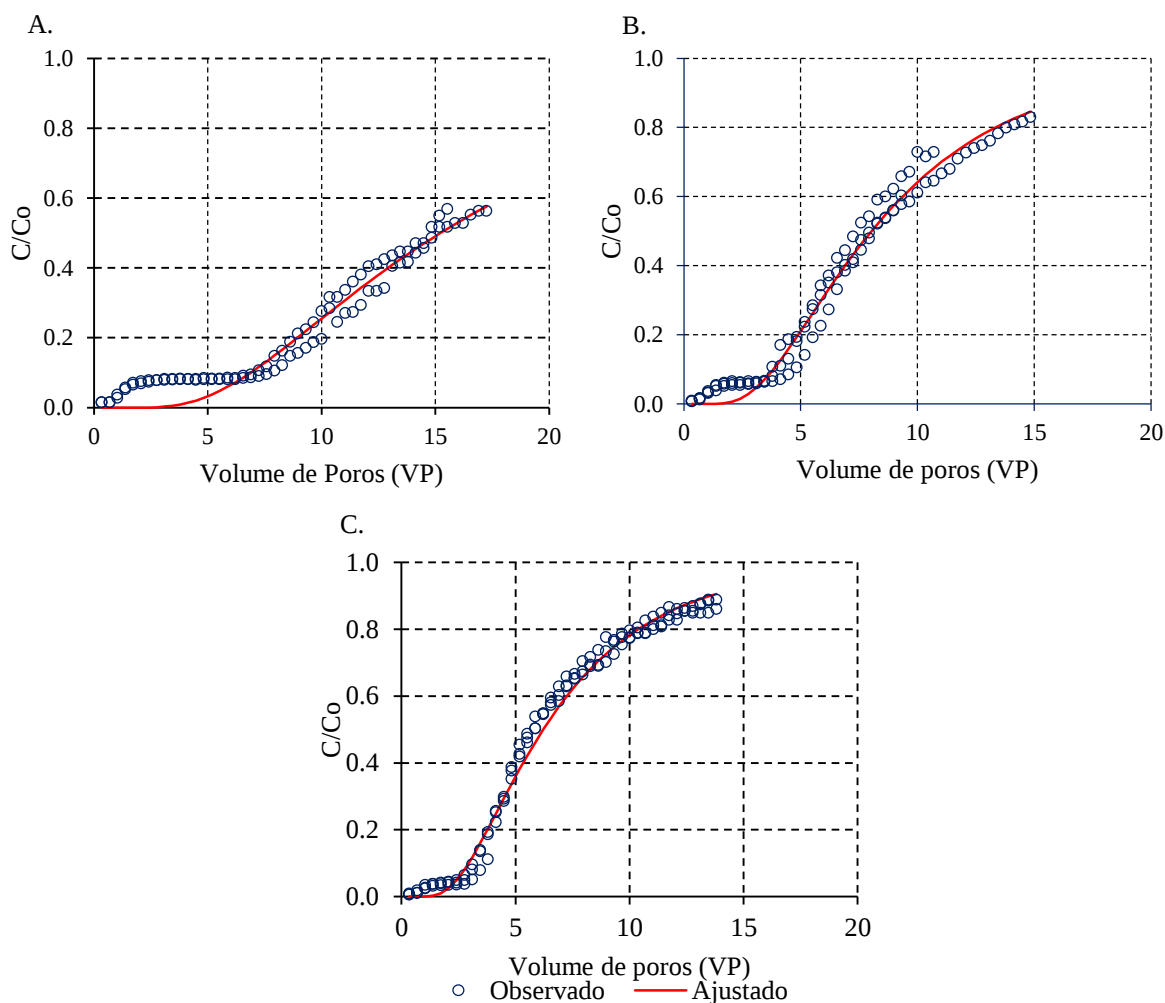


Figura 48. Curvas de distribuição de efluente (BTC) do íon potássio (K^+), para o Cambissolo, usando diferentes concentrações de potássio: (A) $0,165 \text{ mg cm}^{-3}$; (B) $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$; e (C) $0,75 \text{ mg cm}^{-3}$

Tabela 8. Parâmetros de transporte do soluto para o íon potássio em um Cambissolo

C_K^+ mg cm^{-3}	v cm h^{-1}	P -	R -	D $\text{cm}^2 \text{ h}^{-1}$	λ cm	K_d $\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$
0,165	53,1017	4,2199	18,7383	251,6740	4,7395	5,6860
0,450	66,3176	5,0111	9,6016	332,7710	5,0178	2,7572
0,750	55,0239	4,8999	7,4529	224,5911	4,0817	2,0685

C_K^+ - concentração de potássio; v - velocidade de escoamento; P - Peclet; R - fator de retardamento; D - coeficiente dispersivo-difusivo, λ - dispersividade; e K_d - coeficiente de distribuição

As diferenças de velocidades, observadas entre as três concentrações, podem ser explicadas pelas diferenças no processo de preenchimento das colunas de solo. O mesmo foi ressaltado por Andrade et al. (2014) que, utilizando um solo coletado em uma mesma área, apresentou valores diferentes de velocidade.

Observa-se que, o número de Peclet para as três concentrações salinas analisadas ($0,165$; $0,450$ e $0,750 \text{ mg cm}^{-3}$) foram, respectivamente, de $4,2199$; $5,0111$ e $4,8999$, ou seja,

inferiores a 10. Segundo Wang (2002), Gonçalves et al. (2008) e Andrade et al. (2014), isto indica que o processo de difusão predomina sobre o transporte convectivo.

O fator de retardamento (R), para as três concentrações estudadas, apresentou valores elevados, 18,7383; 9,6016 e 7,4529, respectivamente da menor para a maior concentração. De acordo com Melo et al. (2006), este parâmetro representa as interações entre as fases líquida e sólida que ocorrem durante a percolação, ou seja, retrata a capacidade do solo em reter os solutos à medida que o fluxo de massa avança. Logo, o solo em estudo apresenta alta capacidade em reter solutos, durante o fluxo de massa, ficando mais evidente, à medida que a concentração aplicada é reduzida.

De acordo com Nielsen & Biggar (1962) maiores valores do coeficiente dispersivo-difusivo (D) estão ligados às menores inclinações das BTC's e, conseqüentemente, ao aumento da faixa de mistura entre as soluções deslocadora e deslocada no perfil do solo. Pode-se afirmar que as diferenças apresentadas no valor de D, para as diferentes concentrações analisadas, são devido ao fato de que o D está diretamente relacionado com a velocidade de escoamento e inversamente proporcional ao valor de P. Portanto, a concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$ foi a que apresentou maiores valores de v ($66,3176 \text{ cm h}^{-1}$) e P ($5,0111$) e, conseqüentemente, maior valor de D ($332,7710 \text{ cm}^2 \text{ h}^{-1}$).

Para as diferentes soluções foram obtidos os coeficientes de distribuição (Kd) de 5,6860; 2,7572 e 2,0685 $\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$, respectivamente, da menor para a maior concentração. O coeficiente de distribuição (Kd) é um valor relativo a interação entre a matriz sólida e o soluto, ou seja, depende do tipo de solo e do tipo de soluto (Wanderley, 2000). Logo, quando aplicada uma solução com uma baixa concentração de potássio, este tende a sofrer maior interação com a matriz do solo, deslocando os demais íons presentes no solo, acarretando maior retardamento do soluto no solo.

4.3 Resultados da dinâmica de água no solo

De posse dos dados observados experimentalmente e simulados no modelo HYDRUS 2D foi avaliada a distribuição (irrigação propriamente dita) e a posterior redistribuição de água no solo, em intervalos de 15 min nos pontos de observação predeterminados. A irrigação foi realizada através da aplicação de 5 L de solução com diferentes concentrações de potássio ($0,165$; $0,450$ e $0,750 \text{ mg cm}^{-3}$), diferentes vazões ($0,72$; $1,52$ e $2,50 \text{ L h}^{-1}$) e, conseqüentemente, diferentes tempos de aplicação ($7,00$; $3,25$ e $2,00 \text{ h}$).

4.3.1 Distribuição de água no solo

Na Figura 49 são observados os dados da distribuição de água no solo, obtidos experimentalmente e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$, tempo de aplicação de água de 7 h e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$.

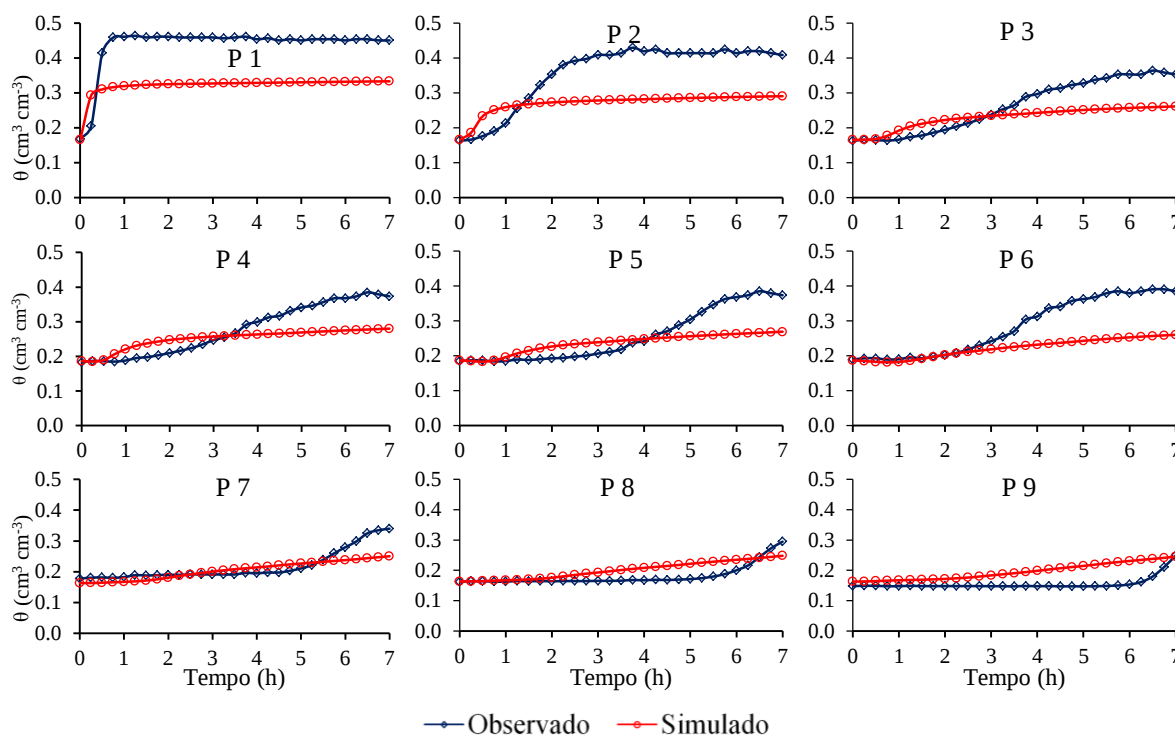


Figura 49. Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o HYDRUS 2D, para a vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

Nota-se na Figura 49 que o modelo subestimou os dados de umidade do solo nas menores profundidades e superestimou em maior profundidade (0,25 m), quando comparados aos obtidos com os tensiômetros, durante a maior parte do tempo analisado. Com o início do evento de irrigação, o teor de umidade do solo aumentou primeiramente nos pontos mais próximos ao emissor, chegando a atingir a saturação no primeiro tensiômetro (P1). O conteúdo máximo de água foi sempre maior próximo ao emissor, diminuindo à medida que aumentou a distância do emissor. Com a continuação da irrigação, a zona molhada expandiu-se nos sentidos vertical e horizontal.

Na Figura 50 são observados os perfis de conteúdo de água no solo simulados com o modelo HYDRUS 2D, para a distribuição de água no solo em função da vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$ e tempos de aplicação de 0,5; 3,5 e 7,0 h, respectivamente.

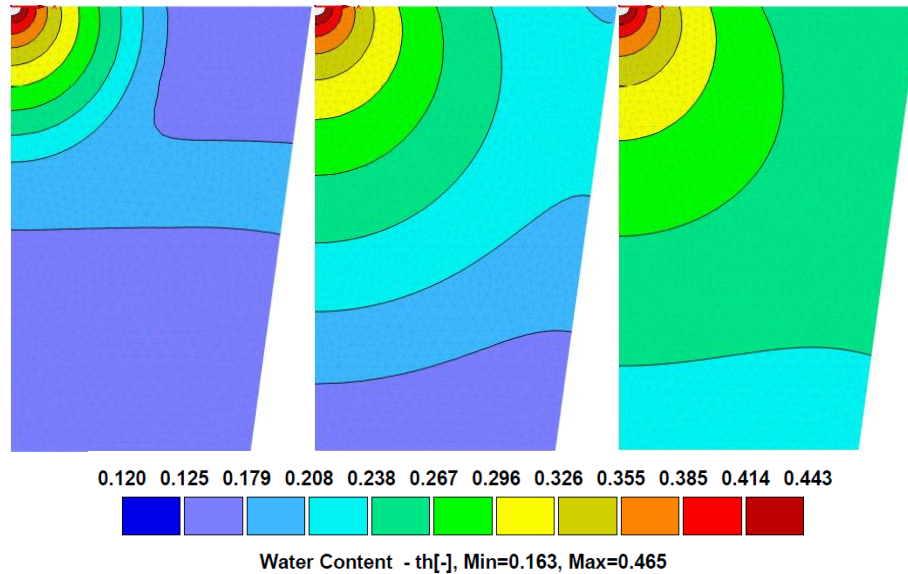


Figura 50. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 0,5; 3,5 e 7,0 h, para a vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

Na Figura 51 é possível observar os dados da distribuição de água no solo durante a irrigação, para a vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$, tempo de aplicação de água de 3,25 h e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$.

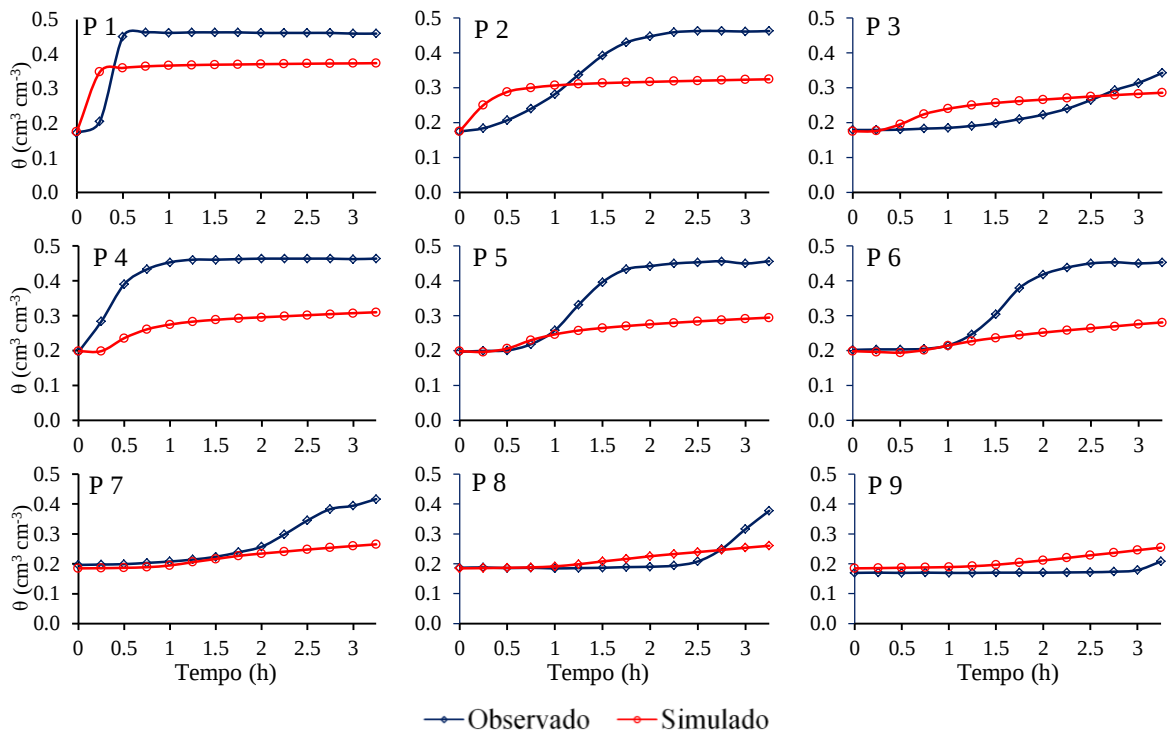


Figura 51. Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o HYDRUS 2D, para a vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

Assim, como visto na Figura 49, o modelo subestimou os dados de umidade, na maioria dos pontos observados, quando comparados aos obtidos com os tensiômetros, exceto para os pontos de observação P3 e P9. Nos pontos de observação mais superficiais houve uma rápida variação de umidade nos dados simulados. Isto pode ser justificado devido os tensiômetros serem constituídos por cápsulas porosas, e estas, dependendo da condutividade hidráulica, demandam um maior tempo para atingir o equilíbrio com a matriz do solo. Além disso, por apresentarem uma câmara de ar, qualquer variação do seu volume acarretará em uma diferença de tempo até que a pressão/tensão atinja o equilíbrio.

Na Figura 52 são apresentados os perfis de conteúdo de água no solo simulados com o modelo HYDRUS 2D, para a distribuição de água no solo em função da vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e tempos de aplicação de 0,5; 2,0 e 3,5 h, respectivamente.

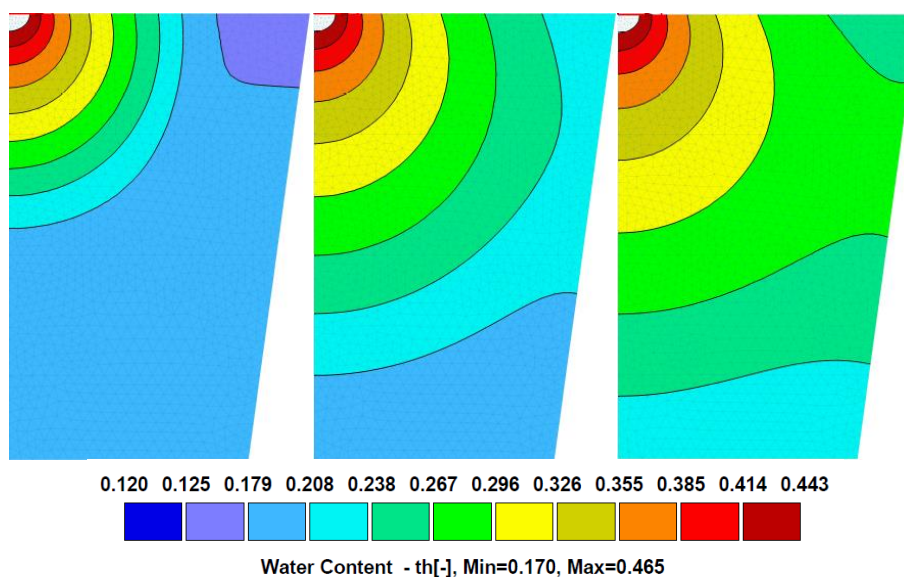


Figura 52. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 0,5; 2,0 e 3,25 h, para a vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

Na Figura 53 estão apresentados os dados obtidos e simulados do avanço da água no solo durante a irrigação, para vazão de $2,50 \text{ L h}^{-1}$, tempo de 2 h e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$. Assim como os demais resultados anteriormente apresentados, da distribuição de água sob irrigação por gotejamento superficial, na maior parte do tempo avaliado, o modelo subestimou os dados de umidade nos pontos de observação analisados, exceto para a camada mais profunda.

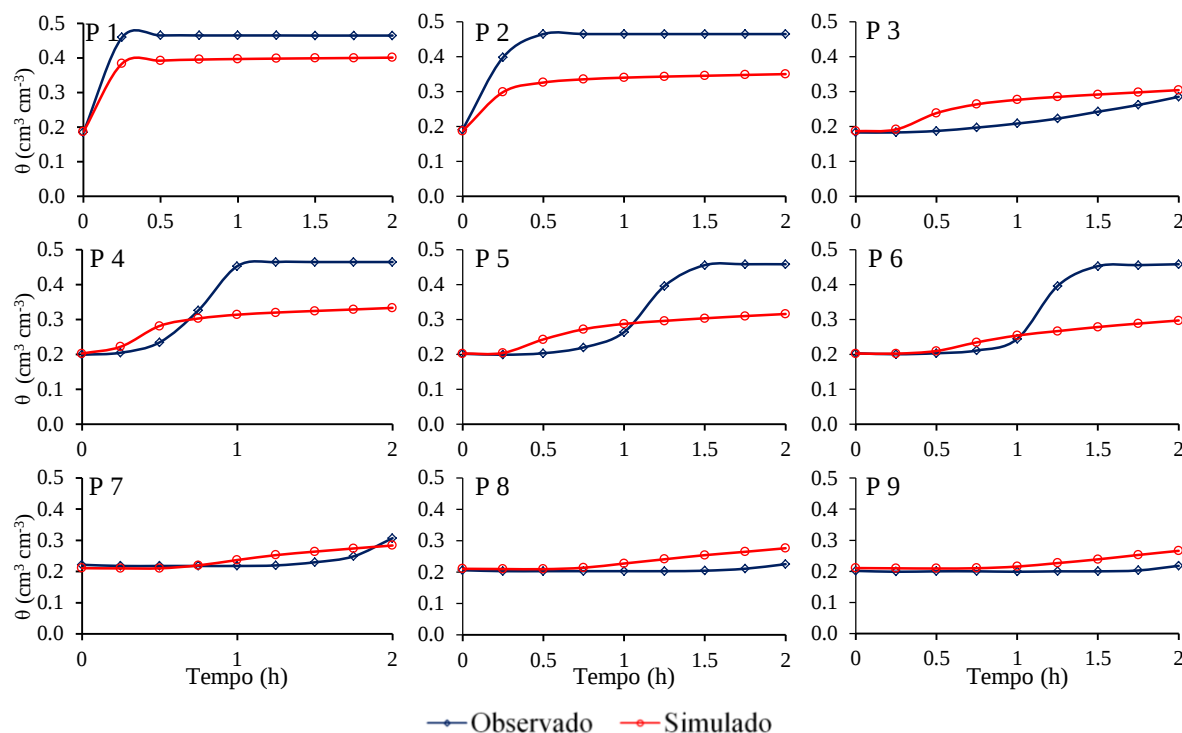


Figura 53. Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o HYDRUS 2D, para vazão de $2,50 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

Nota-se que na profundidade de 15 cm, representada pelos pontos de observação P4, P5 e P6, a umidade atingiu a saturação, nos dados obtidos pelos tensiômetros, após cerca de 1,0 a 1,5 h de aplicação de solução. Sendo que, pelo volume aplicado (5,0 L), não seria possível que isto acontecesse. Tal fato pode ser explicado devido a forma como o tensiômetro é inserido no solo. Entre o tensiômetro e o solo pode existir caminhos preferenciais, os quais facilitam o fluxo de água até a capsula porosa, proporcionando a saturação da mesma.

Na Figura 54 é possível observar os perfis de conteúdo de água no solo simulados com o modelo HYDRUS 2D, para a distribuição de água no solo em função da vazão de $2,50 \text{ L h}^{-1}$ e tempos de aplicação de 0,5; 1,0 e 2,0 h, respectivamente.

A análise de desempenho do modelo HYDRUS 2D, na distribuição de água no solo, é apresentada na Tabela 9, onde são apresentados os valores de Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e Erro Absoluto Médio (EAM), obtidos por meio da relação entre os dados observados e simulados com o modelo HYDRUS 2D, durante a fase de formação do bulbo úmido.

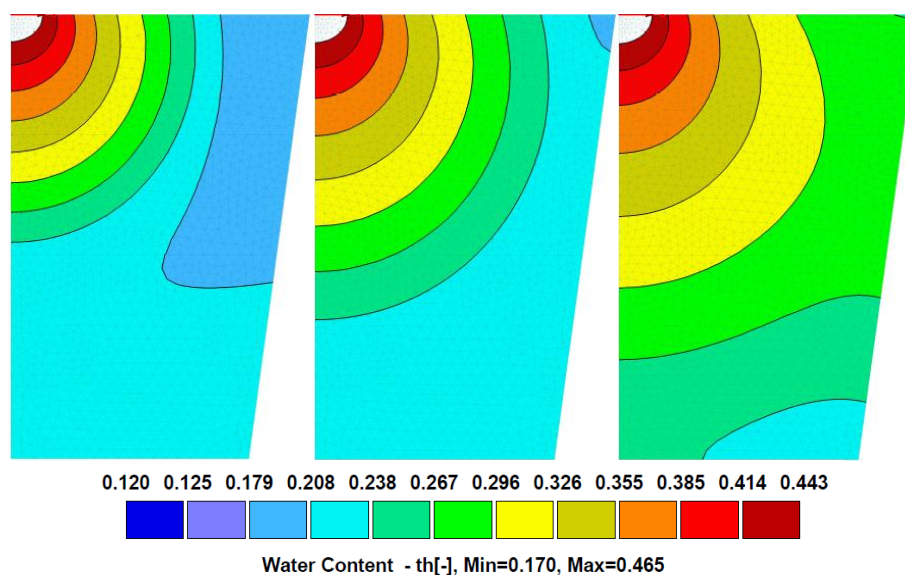


Figura 54. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 0,5; 1,0 e 2,0 h, para a vazão de 2,50 L h⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm⁻³

Tabela 9. Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição de água no solo, durante a formação do bulbo úmido, para concentração de potássio de 0,450 mg cm⁻³

Ponto de observação	Vazão					
	L h ⁻¹					
	0,72		1,52		2,50	
	REQM	EAM	REQM	EAM	REQM	EAM
	cm ³ cm ⁻³					
1	0,1242	0,1217	0,0925	0,0884	0,0645	0,0609
2	0,1100	0,1004	0,1035	0,0916	0,1142	0,1077
3	0,0596	0,0482	0,0395	0,0338	0,0468	0,0405
4	0,0577	0,0472	0,1551	0,1481	0,1047	0,0869
5	0,0577	0,0433	0,1237	0,0996	0,0945	0,0738
6	0,0829	0,0622	0,1228	0,0934	0,1063	0,0749
7	0,0337	0,0240	0,0718	0,0489	0,0212	0,0181
8	0,0310	0,0254	0,0403	0,0258	0,0337	0,0272
9	0,0464	0,0406	0,0392	0,0349	0,0291	0,0243
Média	0,0670	0,0570	0,0876	0,0738	0,0683	0,0571

Conforme a Tabela 9 REQM e EAM variaram de 0,0310 a 0,1242 e 0,0240 a 0,1217 cm³ cm⁻³, respectivamente, para a vazão de 0,72 L h⁻¹; de 0,0392 a 0,1551 e 0,0258 a 0,1481 cm³ cm⁻³, respectivamente para a vazão de 1,52 L h⁻¹; e de 0,0212 a 0,1142 e 0,0181 a 0,1077 cm³ cm⁻³, respectivamente para a vazão de 2,50 L h⁻¹. Os erros apresentaram variações tanto em profundidade como em distância do emissor, porém, quando observados os dados médios, estes apresentaram baixos valores, indicando boa relação entre os dados analisados. A partir desses valores, pode-se concluir que o conteúdo de água no solo, para o avanço da frente de

molhamento, simulados usando o modelo HYDRUS 2D se ajustou bem aos valores medidos com os tensiômetros.

Os dados da distribuição de água no solo referentes às vazões de 0,72; 1,52 e 2,50 L h⁻¹ e concentrações de potássio de 0,165 e 0,750 mg cm⁻³ estão disponíveis no Apêndice B.

4.3.2 Redistribuição de água no solo

Após a aplicação dos 5,0 L de solução, deixou-se que esta se redistribuísse no solo, sendo monitorada até 72 h após o início da aplicação. Esta avaliação foi realizada, assim como a distribuição, para diferentes vazões (0,72; 1,52 e 2,50 L h⁻¹) e concentrações de potássio (0,165; 0,450 e 0,750 mg cm⁻³).

Nas Figuras 55, 56 e 57 são apresentados os dados de umidade do solo observados e gerados pelo modelo, durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, para concentração de potássio de 0,450 mg cm⁻³ e vazões de 0,72; 1,52 e 2,50 L h⁻¹, respectivamente.

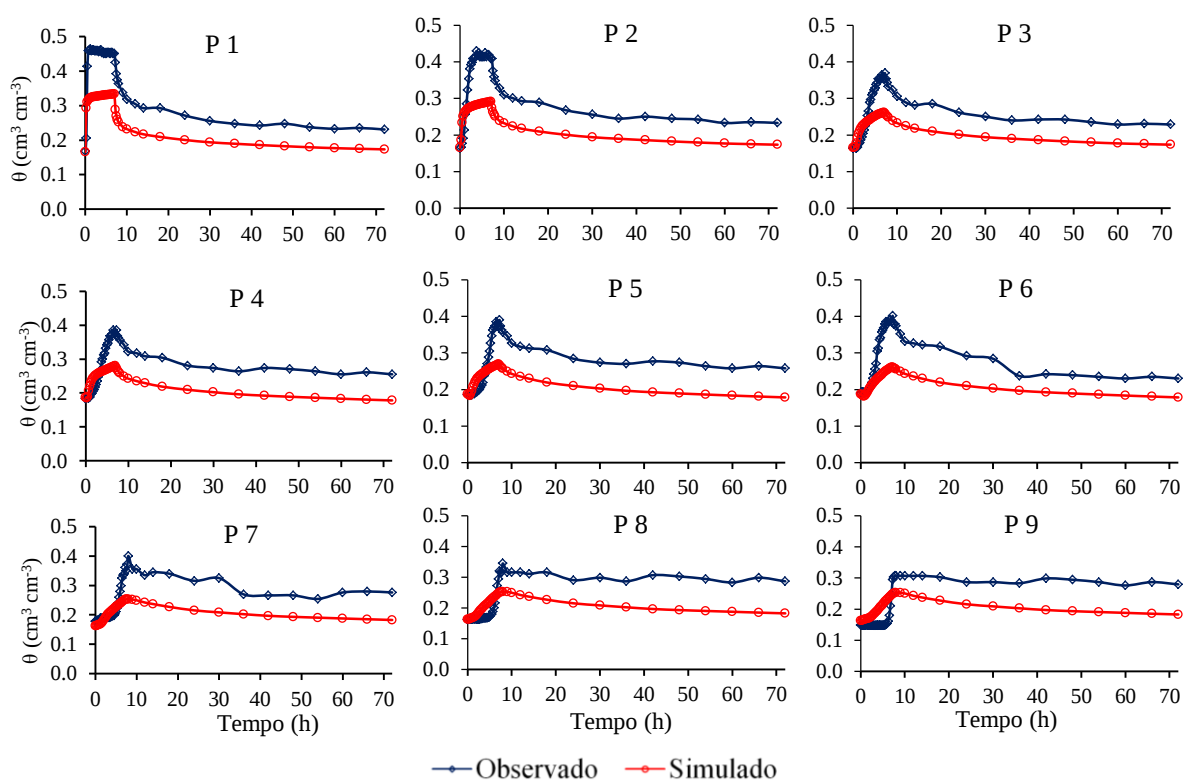


Figura 55. Valores de umidade do solo, durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de 0,72 L h⁻¹ e concentração de potássio de 0,450 mg cm⁻³

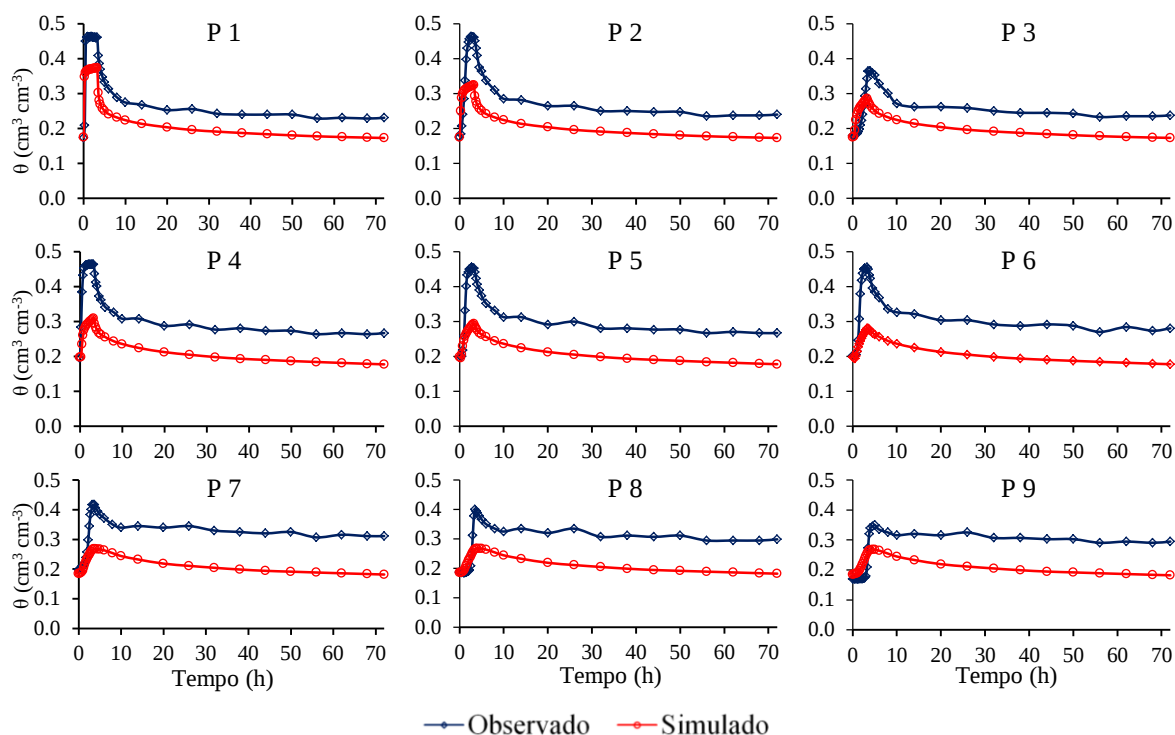


Figura 56. Valores de umidade do solo, durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o HYDRUS 2D, para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

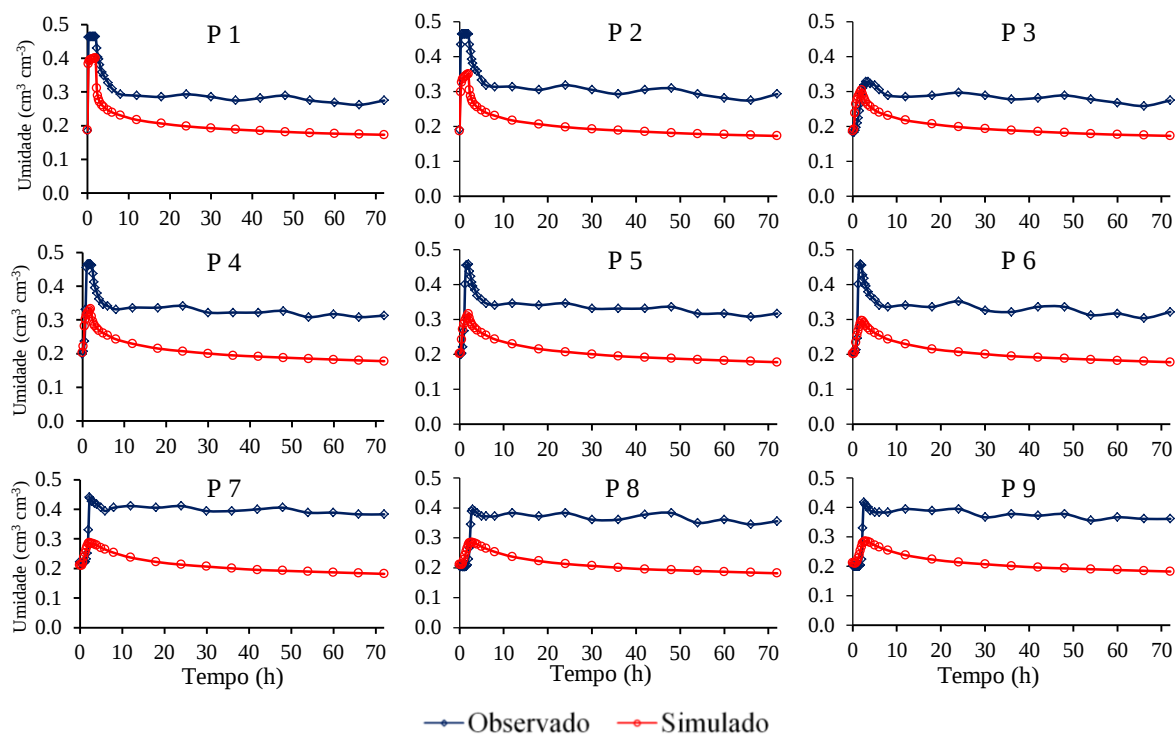


Figura 57. Valores de umidade do solo, durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o HYDRUS 2D, para vazão de $2,50 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

Na fase de redistribuição, após o término da irrigação, a água fluiu para as camadas

mais profundas do solo, gradativamente. A camada superficial ficou exposta ao ambiente acarretando evaporação (secagem), apresentando assim menor umidade, em relação às camadas mais profundas, ao final do período de redistribuição. O solo apresentou maior umidade em maior profundidade, devido ao movimento descendente (força da gravidade) ser maior do que as forças de adesão das partículas do solo com a água e também ao fato do solo apresentar textura franco arenosa, com 77% de areia, o que favorece o fluxo vertical de água no solo.

Observa-se nas Figuras 58, 59 e 60 os perfis de umidade do solo simulados com o modelo HYDRUS 2D, para a distribuição e a redistribuição de água no solo.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da análise de desempenho do modelo HYDRUS 2D, durante as fases de distribuição e redistribuição de água no solo, onde constam os valores de REQM e EAM, obtidos com os dados observados experimentalmente e simulados com o modelo HYDRUS 2D.

Considerando os valores dos erros (REQM e EAM), para os dados de distribuição e redistribuição de água no solo, verificou-se um bom ajustes entre os dados observados e os simulados com o modelo HYDRUS 2D. Haja vista que os valores de REQM e EAM variaram de 0,0593 a 0,1108 e 0,0485 a 0,1060 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente, para a menor vazão (0,72 L h^{-1}), de 0,0603 a 0,1168 e 0,0545 a 0,1162 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para a vazão de 1,52 L h^{-1} , respectivamente, e de 0,0697 a 0,1455 e de 0,0634 a 0,1249 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para a maior vazão (2,50 L h^{-1}), respectivamente. Verificou-se ainda que o aumento da vazão provocou um aumento nos erros, nas maiores profundidades.

Pode-se afirmar que, pelos resultados obtidos, o modelo HYDRUS 2D é adequado para simular a distribuição e a redistribuição de água no solo sob irrigação por gotejamento superficial.

Os dados da distribuição e da redistribuição de água no solo referentes às vazões de 0,72; 1,52 e 2,50 L h^{-1} e concentrações de potássio de 0,165 e 0,750 mg cm^{-3} estão disponíveis no Apêndice C.

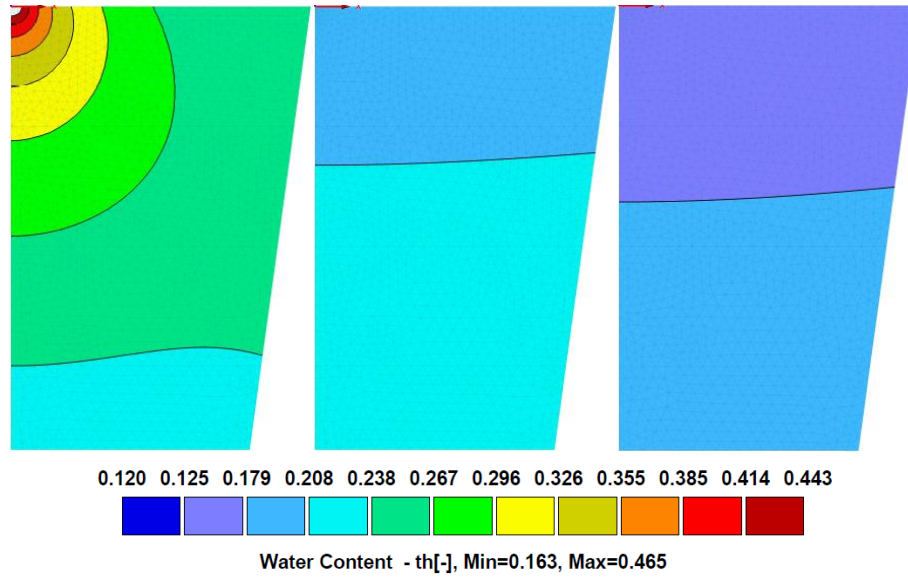


Figura 58. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 7,0; 24,0 e 72,0 h, para a vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

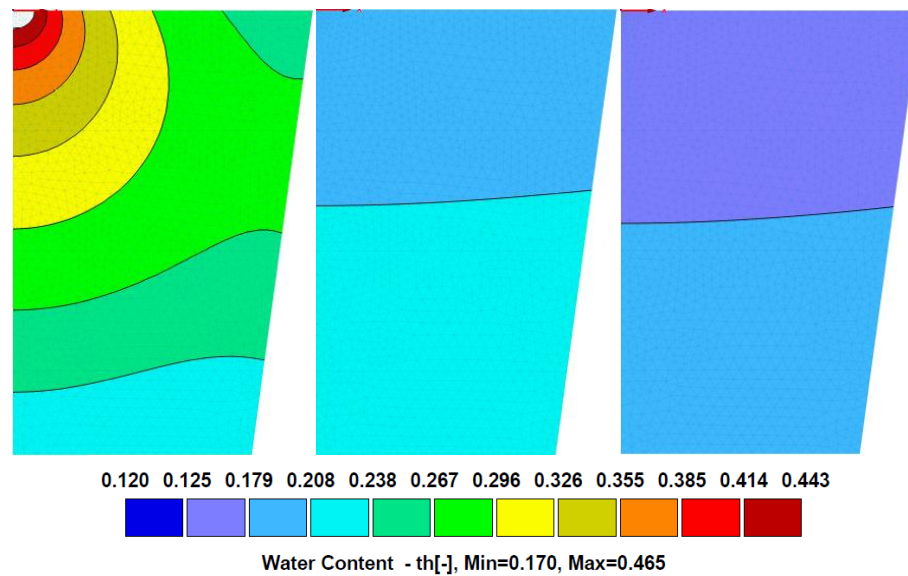


Figura 59. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 3,25; 24,0 e 72,0 h, para a vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

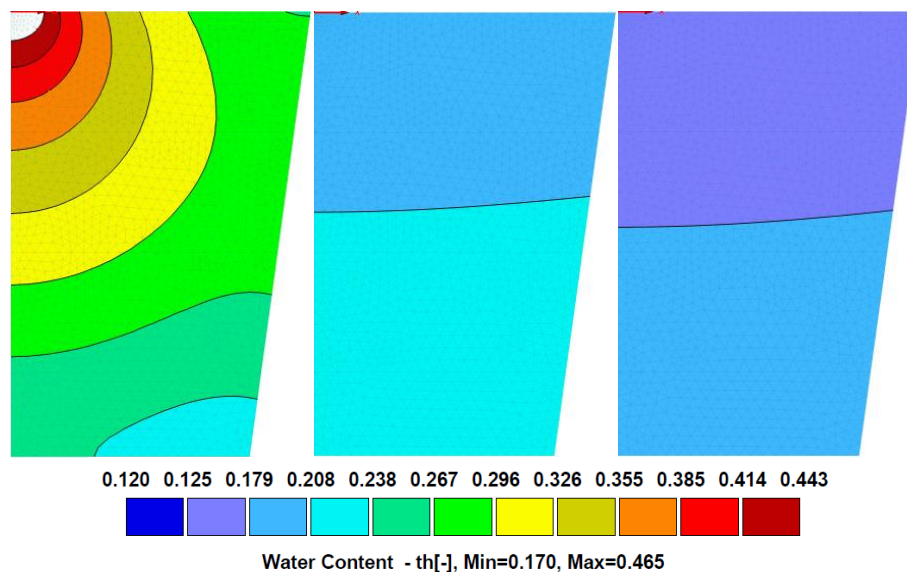


Figura 60. Perfis de umidade do solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição de água no solo, em função dos tempos de irrigação 2,0; 24,0 e 72,0 h, para a vazão de $2,50 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

Tabela 10. Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição e da redistribuição de água no solo, para concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$

Pontos de observação	Vazão					
	L h^{-1}					
	0,72		1,52		2,50	
	REQM	EAM	REQM	EAM	REQM	EAM
	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$					
1	0,1108	0,1060	0,0799	0,0758	0,0867	0,0836
2	0,0996	0,0916	0,0965	0,0877	0,1117	0,1089
3	0,0643	0,0562	0,0603	0,0545	0,0697	0,0634
4	0,0693	0,0613	0,1239	0,1162	0,1164	0,1096
5	0,0711	0,0602	0,1114	0,0992	0,1157	0,1076
6	0,0847	0,0698	0,1168	0,1028	0,1176	0,1065
7	0,0673	0,0523	0,1061	0,0925	0,1455	0,1249
8	0,0593	0,0485	0,0869	0,0732	0,1173	0,0998
9	0,0599	0,0536	0,0737	0,0652	0,1255	0,1081
Média	0,0762	0,0666	0,0951	0,0852	0,1118	0,1014

4.4 Dinâmica de transporte de soluto no solo

Com os dados coletados experimentalmente com os sensores de CE, realizou-se a calibração das leituras, obtida com os mesmos, para conversão em CEes, utilizando a equação (30) e, posteriormente, estes valores foram convertidos em concentração de potássio através da equação (33).

Com os dados corrigidos e os valores simulados com o software HYDRUS 2D foi realizada a análise de desempenho do modelo, para determinação do transporte de potássio no solo.

4.4.1 Distribuição e redistribuição de potássio no solo

Nas Figuras 61, 62 e 63 são apresentados os dados observados experimentalmente e gerados pelo modelo, para o transporte do potássio no solo, durante as fases de distribuição e redistribuição, com concentrações de potássio de 0,165; 0,450 e 0,750 mg cm⁻³, respectivamente, e vazão de 1,52 L h⁻¹.

Nota-se que, para quase todos os pontos observados, na Figura 61, o modelo apresentou resultados semelhantes aos observados, com exceção para os pontos mais distantes do emissor. Verifica-se ainda que, durante a aplicação da solução, há um aumento da concentração de potássio, nos pontos de observação mais próximos ao gotejador (P1 e P2), e após cessar a irrigação (redistribuição) o valor da concentração permanece constante. Nos demais pontos de observação, na simulação, não houve variação nas concentrações, ou seja, o soluto não atingiu maiores profundidade e distância do emissor, devido à alta capacidade de retenção do solo, para este íon, em função da argila de atividade alta. Analisando os valores observados, da concentração de potássio no solo, estes aumentaram durante a aplicação da solução (irrigação) e reduziram durante a fase de redistribuição.

Na Figura 62 observa-se que, ao aplicar uma solução mais concentrada, há um maior incremento na concentração de potássio no solo, nos pontos mais próximos ao gotejador (P1 e P2) e, nos demais a concentração, praticamente, não foi alterada. Isto se deve ao fato que o soluto (íon potássio) apresenta alta capacidade de interação com a micela do solo, favorecendo sua troca com cátions bivalentes (Ca²⁺ e Mg²⁺), dificultando assim o seu transporte para maiores profundidades e distâncias no solo. Quanto aos dados observados, estes aumentaram durante a fase de distribuição do soluto no solo, para todos os pontos de observação e mantiveram-se, constantes durante a redistribuição.

Verifica-se na Figura 63 que, assim como nos demais casos analisados, durante a aplicação da solução houve um aumento na concentração do potássio, nos pontos de observação mais próximos ao gotejador (P1 e P2), mantendo-se constantes durante a fase de redistribuição, para os demais pontos simulados. Analisando os dados observados, estes aumentaram durante a fase de distribuição e na fase de redistribuição apresentaram variações durante o dia, ocasionadas por possíveis variações de temperatura no ambiente.

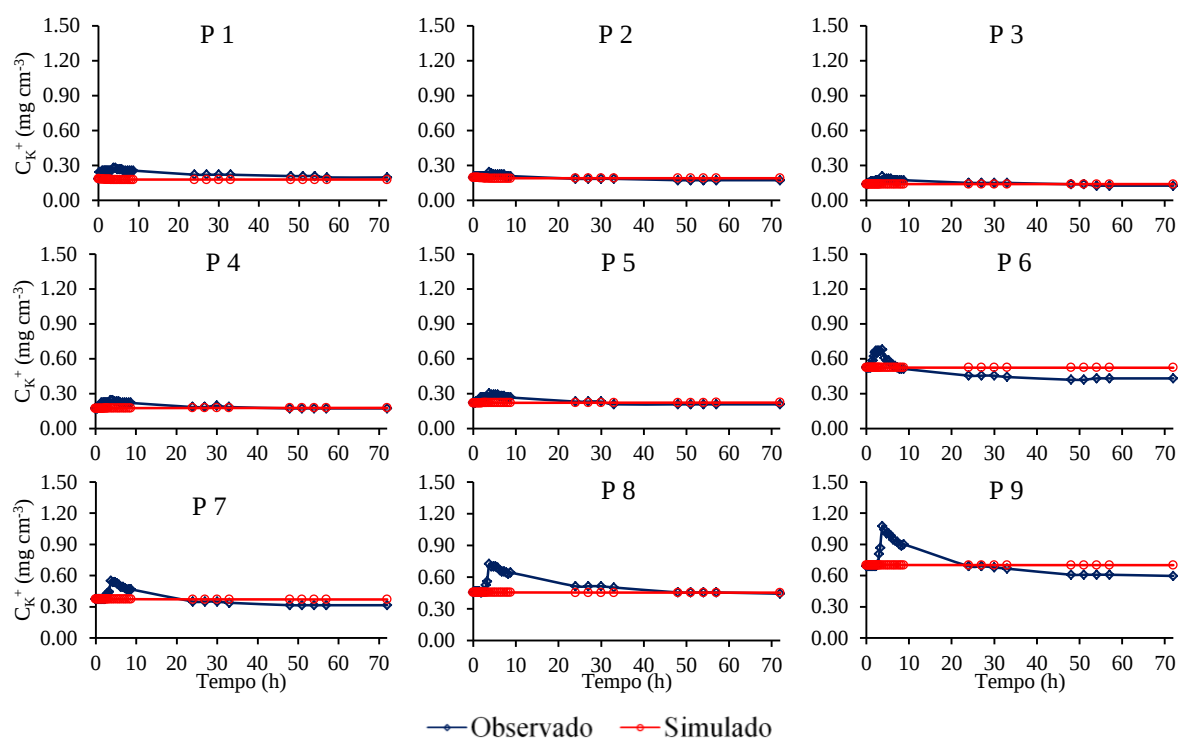


Figura 61. Valores de concentração de potássio, durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de $0,165 \text{ mg cm}^{-3}$ e vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$

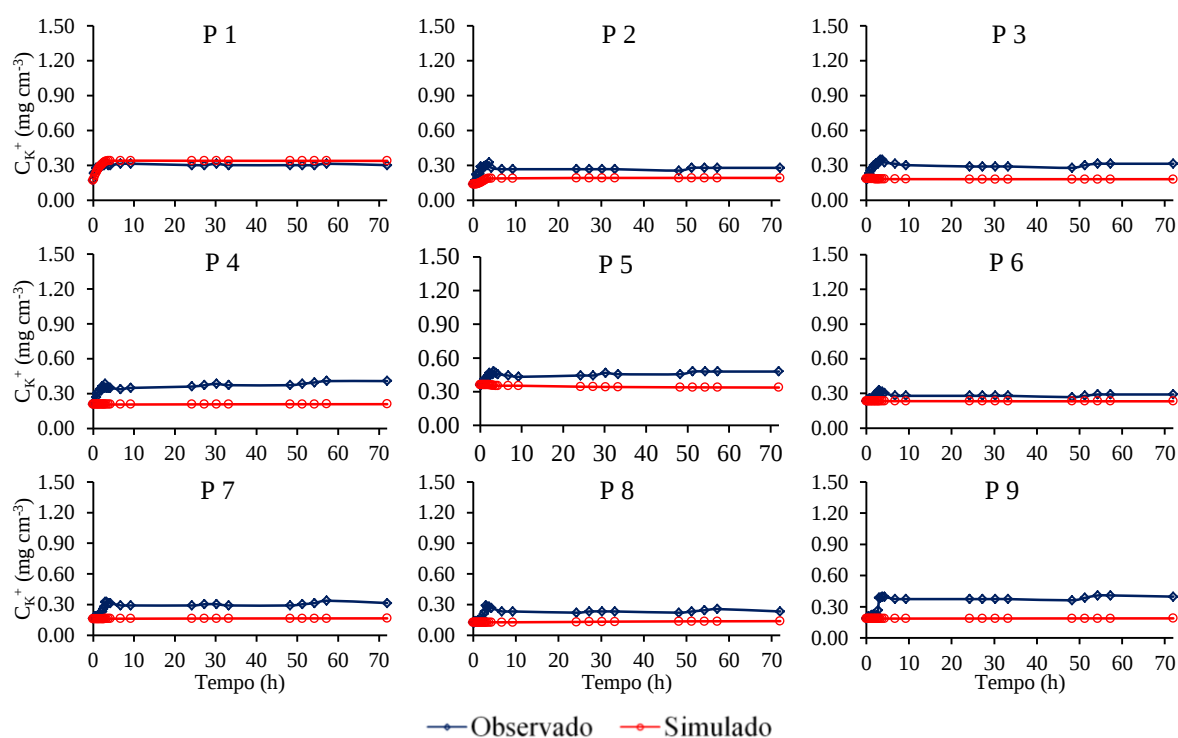


Figura 62. Valores de concentração de potássio, durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$ e vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$

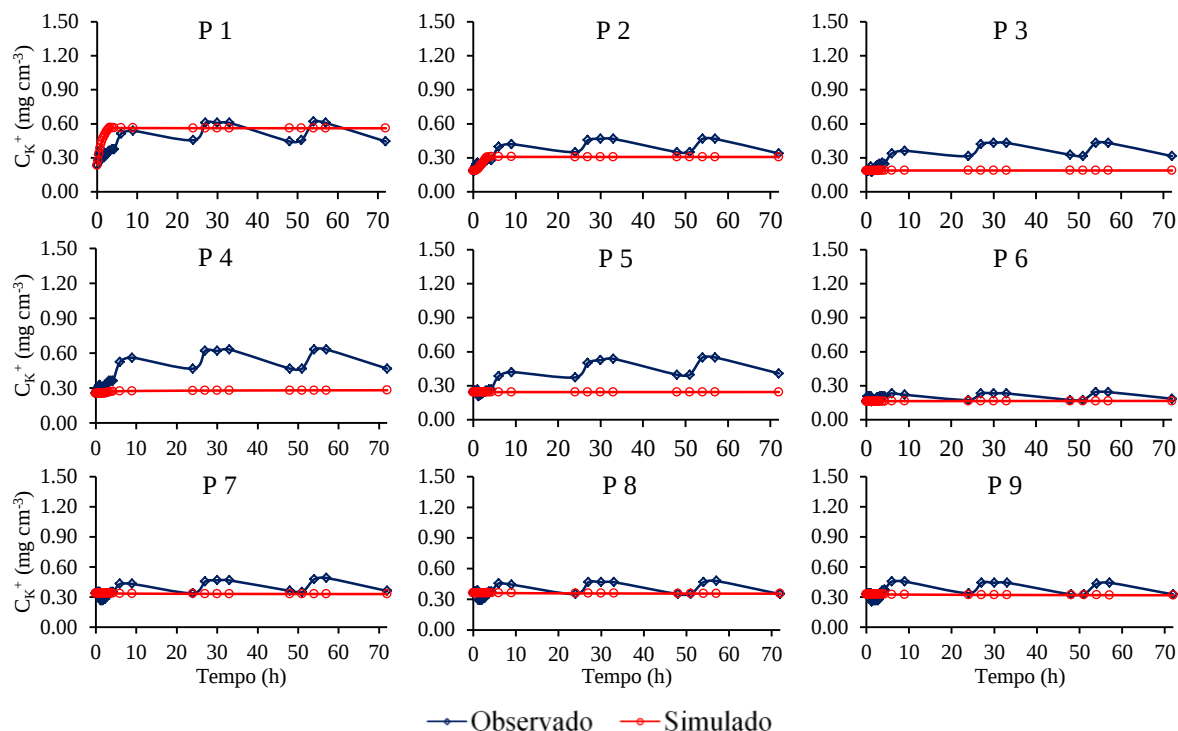


Figura 63. Valores de concentração de potássio, durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de $0,750 \text{ mg cm}^{-3}$ e vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$

Observa-se nas Figuras 64, 65 e 66 os perfis de concentração de potássio durante a distribuição e a redistribuição no solo simulados com o modelo HYDRUS 2D.

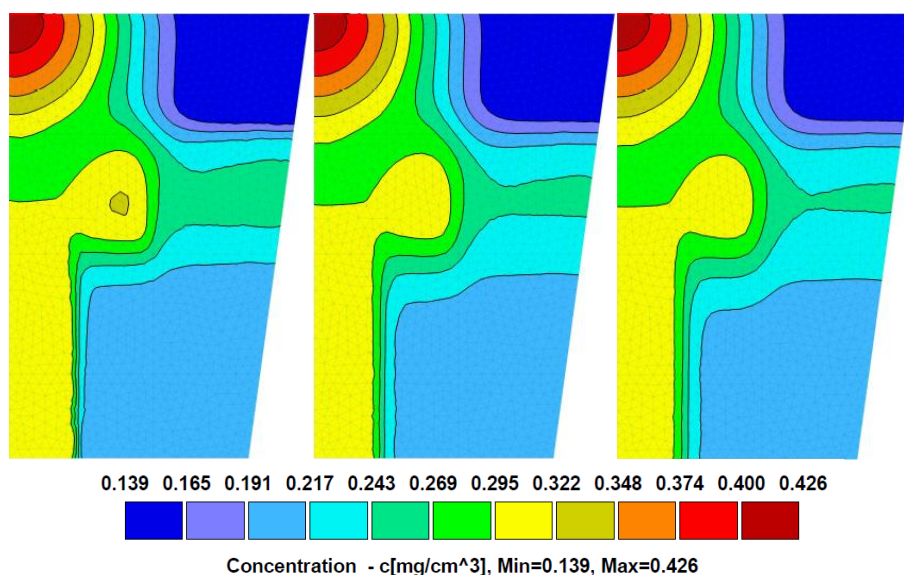


Figura 64. Perfis de concentração de potássio no solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função dos tempos de irrigação 7,0; 24,0 e 72,0 h, para concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$ a vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$

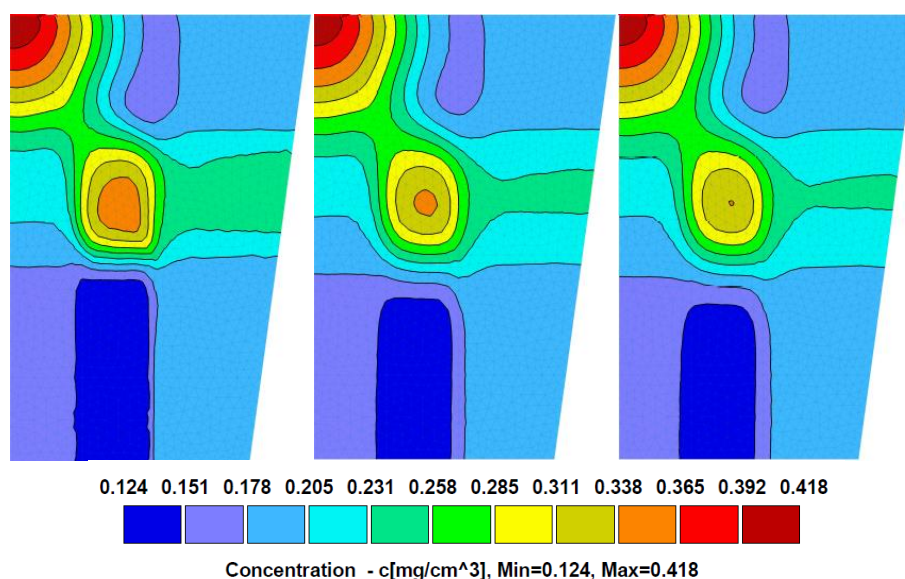


Figura 65. Perfis de concentração de potássio no solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função dos tempos de irrigação 3,25; 24,0 e 72,0 h, para concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$ a vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$

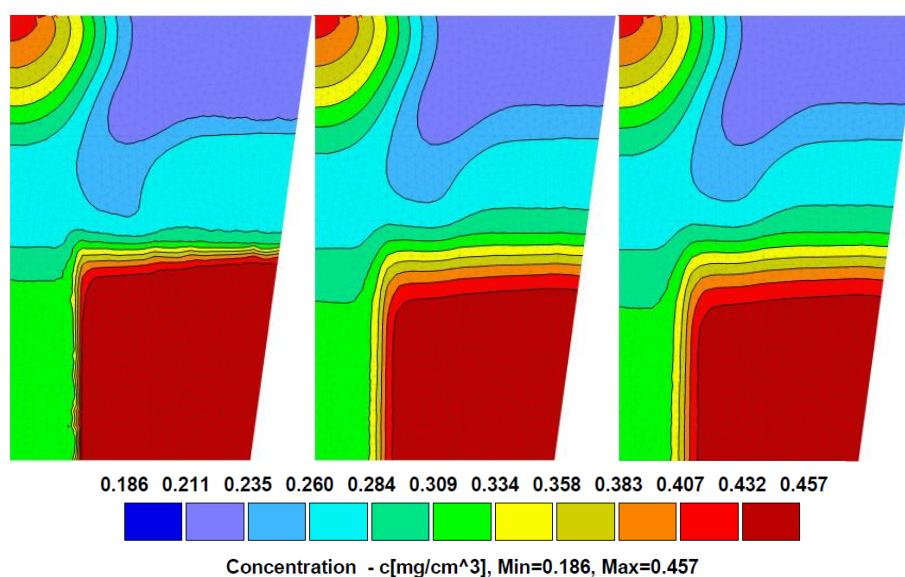


Figura 66. Perfis de concentração de potássio no solo gerados pelo modelo HYDRUS 2D durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função dos tempos de irrigação 2,0; 24,0 e 72,0 h, para concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$ a vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$

Na Tabela 11 constam os dados da análise de desempenho do modelo, com valores de REQM e EAM, obtidos com os dados observados experimentalmente e simulados com o modelo HYDRUS 2D, durante a fases de distribuição e redistribuição do potássio no solo.

Analisando os dados de REQM e EAM observa-se que houve variações destes, tanto em profundidade como distância do emissor. Os valores variaram de 0,0213 a 0,1617 e de 0,0184 a 0,1132 para REQM e EAM, respectivamente, na concentração de potássio de 0,165 mg cm⁻³; de 0,0284 a 0,1495 e de 0,0250 a 0,1319, para REQM e EAM, respectivamente, na concentração de 0,450 mg cm⁻³; e de 0,0167 a 0,1876 e de 0,0286 a 0,1448, para REQM e EAM, respectivamente, na concentração de 0,750 mg cm⁻³. Portanto, de forma geral, analisando os dados médios, houve um bom ajuste entre os dados obtidos experimentalmente e os simulados pelo modelo HYDRUS 2D.

Tabela 11. Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição e da redistribuição do potássio no solo, para vazão de 1,52 L h⁻¹

Pontos de observação	Concentração de potássio					
	mg cm ⁻³					
	0,165		0,450		0,750	
	REQM	EAM	REQM	EAM	REQM	EAM
	mg cm ⁻³					
1	0,0677	0,0631	0,0284	0,0250	0,1311	0,1088
2	0,0213	0,0184	0,0915	0,0855	0,0770	0,0531
3	0,0292	0,0246	0,1153	0,1063	0,1267	0,0925
4	0,0387	0,0319	0,1420	0,1319	0,1876	0,1448
5	0,0425	0,0352	0,0972	0,0876	0,0167	0,0136
6	0,0832	0,0655	0,0526	0,0470	0,0334	0,0286
7	0,0808	0,0588	0,1140	0,0991	0,0734	0,0546
8	0,1289	0,0860	0,0916	0,0755	0,0636	0,0480
9	0,1617	0,1132	0,1495	0,1224	0,0452	0,0371
Média	0,0727	0,0552	0,0980	0,0867	0,0839	0,0646

Pode-se afirmar que, pelos resultados obtidos, o modelo HYDRUS 2D é indicado para simular o transporte de potássio no solo, quando aplicado através da fertirrigação sob irrigação por gotejamento superficial.

Os dados da distribuição e da redistribuição de potássio no solo referentes às vazões de 0,72 e 2,50 L h⁻¹ e concentrações de potássio de 0,165; 0,450 e 0,750 mg cm⁻³ estão disponíveis no Apêndice D.

4.5 Análise de sensibilidade do modelo

Para análise de sensibilidade do modelo considerou-se, como padrão, as condições do tratamento 5, referente a vazão de 1,52 L h⁻¹, concentração de potássio de 0,450 mg cm⁻³ e demais dados de entrada considerados neste tratamento. Variaram-se os parâmetros que

influenciam o movimento da água e transporte de soluto no solo, conforme apresentado na Tabela 1.

Na Figura 67 são apresentados os dados da análise de sensibilidade do modelo, para todos os pontos de observação, considerando os parâmetros que interferem diretamente no fluxo de água no solo, que são: vazão (Q), condutividade hidráulica do solo saturado (Ks) e umidade inicial (θ_i).

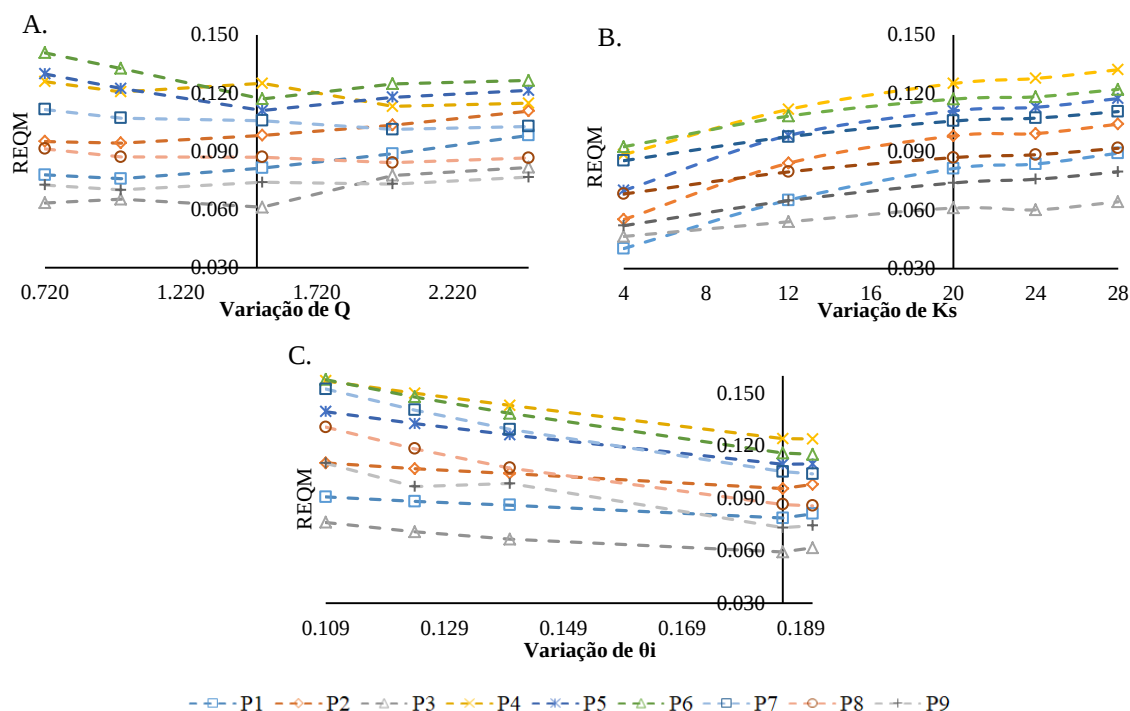


Figura 67. Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros do movimento de água no solo para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$: (A) vazão (Q); (B) condutividade hidráulica do solo saturado (Ks); e (C) umidade inicial do solo (θ_i)

Analisando as variações na vazão aplicada (Q) (Figura 67A), observa-se que menores vazões proporcionaram aumento no REQM, para os pontos P5 e P6 e os demais pontos se mantiveram, praticamente, inalterados. Para maiores vazões, o valor do erro quase não foi alterado, exceto para os pontos P1, P2 e P3 que apresentaram maior REQM com o aumento da vazão. Logo, é necessário que haja uma maior precisão na hora da obtenção deste dado, pois variações do mesmo interferem no movimento de água no solo e, conseqüentemente, no padrão de molhamento do solo.

Analisando as variações do parâmetro Ks (Figura 67B) é possível observar que valores menores de Ks proporcionaram menores valores de REQM. Comportamento contrário foi apresentado para valores maiores de Ks. Logo, para a condição estudada, quanto maior o valor de Ks maior o erro, ou seja, maiores valores deste parâmetro influenciaram

negativamente na simulação do modelo. Por ser um parâmetro fundamental, para o movimento de água, este deve ser obtido da melhor maneira possível, para se evitar possíveis erros durante o uso deste modelo.

Valores menores de umidade inicial (θ_i) provocaram um pequeno aumento nos valores de REQM, e maiores valores não acarretaram grandes diferenças no erro avaliado, ou seja, variações deste parâmetro não provocaram mudanças significativas nos resultados das simulações do modelo, para o caso em estudo (Figura 67C). Isto se deve à variação de umidade analisada, que ficou próxima à capacidade de campo do solo, faixa normal de trabalho na irrigação por gotejamento.

Os resultados da análise de sensibilidade do modelo, para os parâmetros que influenciam o transporte de soluto no solo (C_{iK}^+ , C_K^+ , K_d , λ e ρ_s), para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$, são mostrados na Figura 68.

Analisando as variações da concentração inicial (C_{iK}^+) do solo, de forma geral, para o caso em estudo, valores abaixo de $0,200 \text{ mg cm}^{-3}$ proporcionaram maior REQM e, valores acima deste, até $0,300 \text{ mg cm}^{-3}$, reduziram o erro, voltando a aumentar com o incremento no valor da C_{iK}^+ (Figura 68A). Portanto, determinar de forma precisa a concentração inicial do íon estudado é extremamente importante, pois, é através desta que o modelo irá determinar a taxa de reações e capacidade do solo em reter ou repelir aquele determinado íon, definindo assim sua mobilidade no solo.

Variações nos valores da concentração de potássio aplicada (C_K^+) não provocaram alterações nos erros, para a maioria dos pontos de observação, haja vista que, o potássio atingiu apenas os pontos P1 e P2 (Figura 68B). Portanto, maiores ou menores valores provocaram aumento do erro, para o P1. Para o P2, o erro foi reduzindo, à medida que se aumentou a concentração aplicada; no caso contrário, com a redução do valor, aumentou-se o erro. Por isto, este parâmetro deve ser estimado corretamente, uma vez que, a inserção de valores errados no modelo provocará a subestimação ou superestimação da concentração do íon no solo, induzindo a conclusões errôneas sobre o transporte do potássio no solo.

Para valores menores do que 2, do coeficiente de distribuição (K_d), os pontos de observação P1 e P5 apresentaram maior REQM (Figura 68C). Considerando as demais variações deste parâmetro, não houve variações no erro. Para os demais pontos, menores valores apresentaram redução do erro e maiores valores aumentaram o REQM, exceto para o P6, que se manteve constante, para o aumento ou redução dos valores. Apesar de este solo apresentar valor elevado para o K_d , indicando uma maior interação do soluto com a matriz do solo, notou-se que, o modelo foi sensível, apenas, para valores muito baixos.

Considerando as variações da dispersividade (λ) do potássio no solo (Figura 68D), os pontos de observação P1 e P2 apresentaram maior sensibilidade, ou seja, maior o erro, quanto menor o valor da dispersividade. No caso do aumento de λ , a análise não apresentou variações no erro. Para os demais pontos de observação não houve alterações do erro, haja vista que a solução não os atingiu.

Analisando o aumento ou a redução do valor da massa específica do solo (ρ_s) (Figura 68E), nota-se que estes não provocaram mudanças no erro (REQM). Portanto, o modelo não foi sensível a variações deste parâmetro, considerando as condições do estudo.

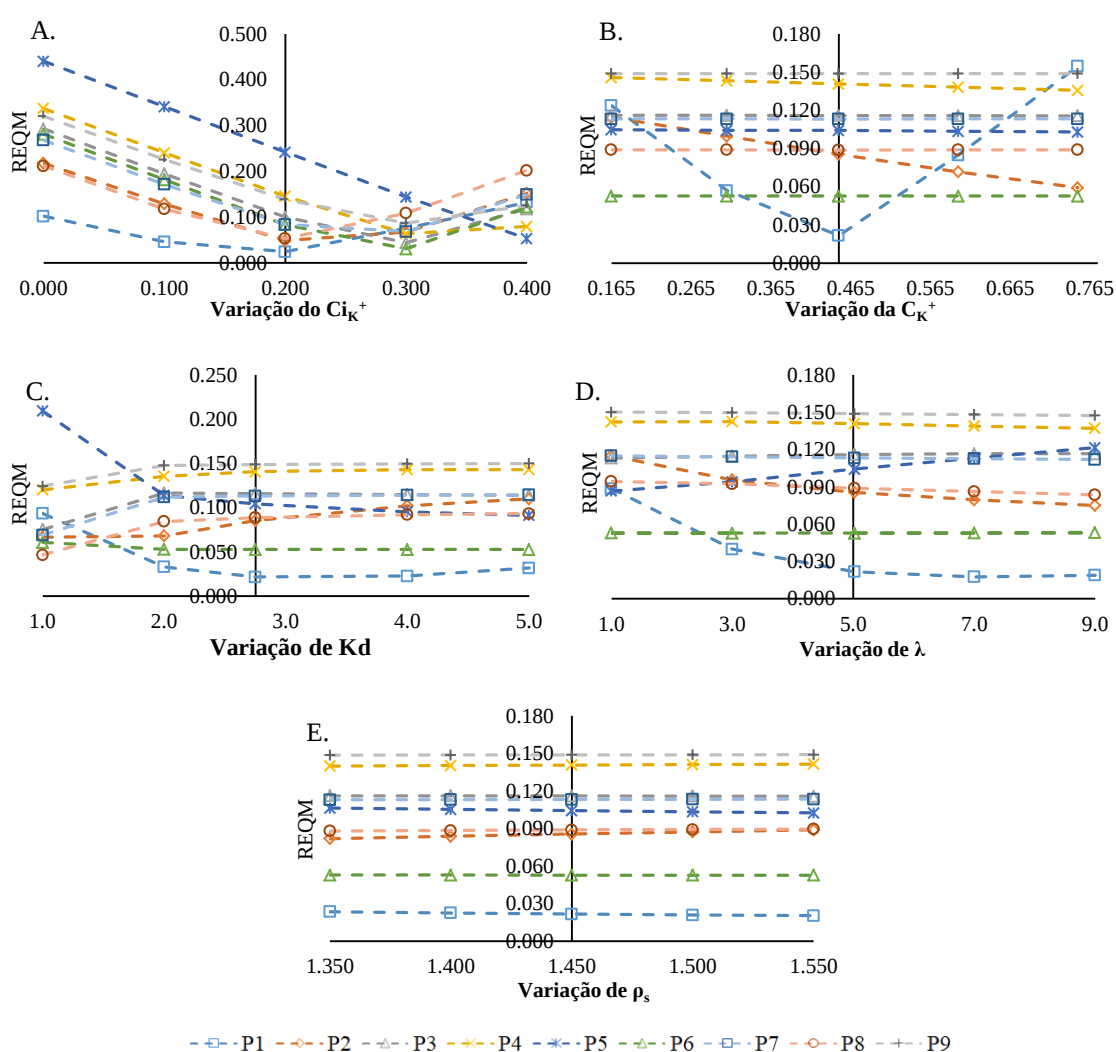


Figura 68. Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros de transporte de soluto no solo para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$: (A) concentração inicial do potássio (C_{iK^+}); (B) concentração de potássio aplicada (C_{K^+}); (C) coeficiente de distribuição (K_d); (D) dispersividade (λ); e (E) massa específica do solo (ρ_s)

Na Figura 69 se observa a influência dos parâmetros do movimento de água no solo (Q , K_s e θ_i) sobre a concentração de potássio no solo.

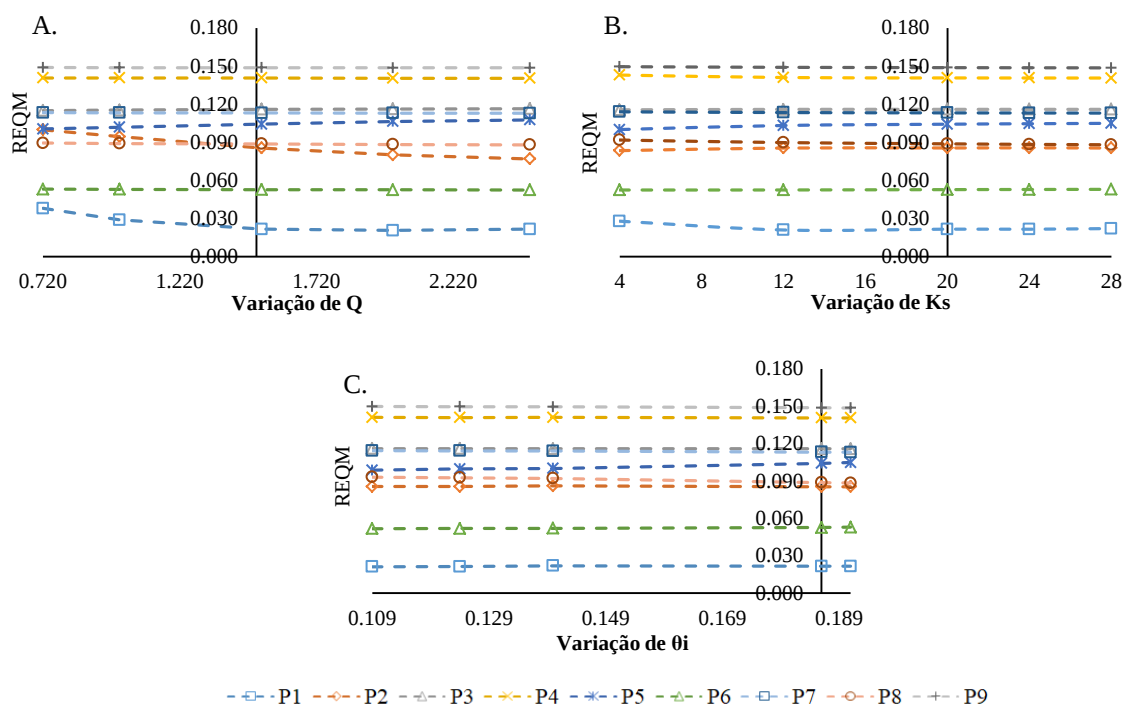


Figura 69. Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros do movimento de água sobre a concentração de potássio no solo para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$: (A) vazão (Q); (B) condutividade hidráulica do solo saturado (K_s); e (C) umidade inicial do solo (θ_i)

Menores valores de Q provocaram aumento do erro nos pontos P1 e P2. E o aumento do valor de Q reduziu o valor de REQM para o P2, e se manteve inalterado para o P1 (Figura 69A). Os demais pontos permaneceram constantes, haja vista, que o soluto não os atingiu. Apesar do que se esperava, maiores ou menores valores de K_s e θ_i não acarretaram alterações no REQM, ou seja, estes parâmetros não influenciaram na concentração do potássio no solo, para o caso em estudo (Figuras 69B e 69C). De forma geral, variações dos parâmetros do transporte de água no solo não provocaram alterações significativas sobre o transporte do potássio no solo.

5 CONCLUSÕES

- 1) O modelo HYDRUS 2D forneceu resultados robustos para o avanço e a redistribuição de água no solo sob diferentes vazões, em ambiente protegido, sob irrigação por gotejamento superficial, em relação aos dados observados experimentalmente.
- 2) Os resultados das simulações de transporte e redistribuição do potássio no solo, sob diferentes concentrações da solução, obtidos com o modelo, apresentaram boa concordância com os dados obtidos durante o experimento.
- 3) O modelo apresentou sensibilidade aos parâmetros vazão (Q), condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), umidade inicial do solo (θ_i) concentração inicial do potássio no solo (C_{K^+}), concentração aplicada de potássio (C_{K^+}); coeficiente de dispersão (K_d) e dispersividade (λ); e nenhuma sensibilidade à variação da massa específica do solo (ρ_s).

REFERÊNCIAS

- AL-JABRI, S. A.; HORTON, R.; JAYNES, D. B.; GAUR, A. Field determination of soil hydraulic and chemical transport properties. *Soil Science*, v.167, n.6, p.353-368, 2002.
- AL-JABRI, S. A.; LEE, J.; GAUR, A.; HORTON, R.; JAYNES, D. B. A dripper-TDR method for in situ determination of hydraulic conductivity and chemical transport properties of surface soils. *Advances in Water Resources*, v.29, n.2, p.239-249, 2006.
- AL-OGAIDI, A. A. M.; AIMRUN, W.; ROWSHON, M. K.; ABDULLAH, A. F. WPEDIS - Wetting Pattern Estimator under Drip Irrigation Systems. In: *International Conference on Agricultural and Food Engineering*, Kuala Lumpur, p.98-203, 2016.
- AL-OGAIDI, A. A. M.; WAYAYOK, A.; ROWSHON, M.; ABDULLAH, A. A Modified empirical model for estimating the wetted zone dimensions under drip irrigation. *Jurnal Teknologi*, v.76, n.15, p.69-73, 2015.
- AL-OMRAN, A. M.; SHETA, A. S.; FALATAH, A. M.; AL-HARBI, A. R. Effect of drip irrigation on squash (*Cucurbita pepo*) yield and water-use efficiency in sandy calcareous soils amended with clay deposits. *Agricultural Water Management*, v. 73, n.1, p. 43-55, 2005.
- ÁLVAREZ-BENEDÍ, J.; MUÑOZ-CARPENA, R.; van CLOOSTER, M. Modeling as a tool for the characterization of soil water and chemical fate and transport. In: *ÁLVAREZ-BENEDÍ, J.; MUÑOZ-CARPENA, R. Soil-water-solute process characterization: an integrated approach*. New York: CRC Press, 2005. Cap. 3. p.87-121.
- AMIN, M. S. M.; EKHMAJ, A. I. M. DIPAC - Drip irrigation water distribution pattern calculator. In: *7th International Micro Irrigation Congress, PWTC*, Kuala Lumpur, p.503-513. 2006.
- ANA. Agência Nacional de Águas. Agricultura irrigada: Estudo Técnico Preliminar, Brasília: ANA, 2004, 107p.

ANA. Agência Nacional de Águas. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. Brasília: ANA, 2017, 86p.

ANA. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2009. Brasília: ANA, 2009, 204p.

ANA. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe 2015. Brasília: ANA, 2015, 88p.

ANA. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos: Informe 2016. Brasília: ANA, 2016, 95p.

ANA. Agência Nacional de Águas. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Documento base de referência - minuta. Brasília: ANA, 2003. 265p.

ANDRADE, C. W. L. de; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. de A.; MIRANDA, J. H. de. Determinação dos parâmetros de transporte do íon sódio utilizando o modelo STANMOD. In: VI Congresso sobre uso e manejo do solo. Recife, p. 1-4. 2014.

ARAÚJO, S. M. S. de. A região semiárida do nordeste do Brasil: Questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. Rios Eletrônica - Revista Científica da FASETE, v.5, n.5, p.89-98, 2011.

ARBAT, G.; PUIG-BARGUÉS, J.; DURAN-ROS, M.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ de CARTAGENA, F. Drip-Irrigation: Computer software to simulate soil wetting patterns under surface drip irrigation. Computers and Electronics in Agriculture, v.98, p.183-192, 2013.

ARIS, R. Mathematical modeling techniques. New York: Dover, 1994. 269p.

ASSOULINE, S.; MÖLLER, M.; COHEN, S.; BEN-HUR, M.; GRAVA, A.; NARKIS, K.; SILBER, A. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: Bell pepper case study. Soil Science Society of America Journal, v.70, n.5, p.1556-1568, 2006.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade da água na agricultura. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29). Campina Grande. UFPB. 1991. 218p.

BAR-YOSEF, B. Fertilization under drip irrigation. In: DEKKER, M. Fluid fertilizer, science and technology. New York: CRC Press. 1991, p. 285-329.

BATTILANI, A.; SOLIMANDO, D. Yield, quality and nitrogen use efficiency of fertigated watermelon. *Acta Horticulturae*, v.700, p.85-90, 2006.

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

BEJAT, L.; PERFECT, E.; QUISENBERRY, V. L.; COYNE, M. S.; HASZLER, G. R. Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks. *Soil Science Society of America Journal*, v.64, n.3, p.818-826, 2000.

BHATNAGAR, P. R.; CHAUHAN, H. S. Soil water movement under single surface trickle source. *Agricultural Water Management*, v.95, n.7, p.799-808, 2008.

BITTELLI, M.; CAMPBELL, G. S.; TOMEI, F. Soil physics with Python: transport in the soil-plant-atmosphere system. Oxford: Oxford University Press, 2015. 449p.

BORGES JR., J. C. F.; FERREIRA, P. A. Programa computacional para cálculo do transporte de solutos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.10, p.604-611, 2006.

BRANDT, A.; BRESLER, E.; DINER, N.; BEN-ASHER, J.; HELLER, J.; GOLDBERG, D. Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models. *Soil Science Society of America Journal*, v.35, p.675-682, 1971.

BRESLER, E.; HELLER, J.; DINER, N.; BEN-ASHER, J.; BRANDT, A.; GOLDBERG, D. Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions. *Soil Science Society of America Journal*, v.35, n.5, p.683-689, 1971.

BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soil moisture. Bulletin 38. USDA, Bureau of Soils, Washington. 1907. 61p.

CARRIJO, O. A.; SOUZA, R. B. de; MAROUELLI, W. A.; ANDRADE, R. J. de. Fertirrigação de hortaliças. (Circular Técnico, 32). Brasília: EMBRAPA, 2004. 13p.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? - Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, v.7, n.3, p.1247–1250, 2014.

CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e segurança alimentar. *Revista ITEM*, n.77, p. 16-21, 2008.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o Semi-Árido. *Estudos Avançados*, v.22, n.63, p.61-82, 2008.

COELHO, E. F.; OR, D. A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, v.60, n.4, p.1039-1049, 1996.

COELHO, M. R.; FIDALGO, E. C.; SANTOS, H. G. dos; BREFIN, M. de L. M. S.; PÉREZ, D. V. Solos: tipos, suas funções no ambiente, como se formam e sua relação com o crescimento das plantas. In: MOREIRA, F. M. S; CARES, J. E.; ZANETTI, R.; STUMER, S. L. O ecossistema o solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal. Lavras: UFLA, 2013. Cap. 3, p.45-62.

COOK, F. J., FITCH, P.; THORBURN, P. J.; CHARLESWORTH, P. B.; BRISTOW, K. L. Modelling trickle irrigation: Comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Environmental Modelling & Software*. v.21, n.9, p.1353-1359, 2006.

COOK, F. J.; THORBURN, P. J.; FITCH, P.; BRISTOW, K. L. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. *Irrigation Science*, v.22, n.3-4, p.129-134, 2003.

COTE, 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.

DABACH, S.; SHANI, U.; LAZAROVITCH, N. Optimal tensiometer placement for high-frequency subsurface drip irrigation management in heterogeneous soils. *Agricultural Water Management*, v.152, p.91-98, 2015.

DARCY, H. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Victor Dalmont, 1856. 647p.

DASBERG, S.; BRESLER, E. *Drip irrigation manual*. Bet Dagan: International Irrigation Information Center, 1985. 95p.

EDWARDS, W. M.; SHIPITALO, M. J.; DICK, W. A.; OWENS, L. B. Rainfall intensity affects transport of water and chemicals through macropores in no-till soil. *Soil Science Society of America Journal*, v.56, n.1, p.52-58, 1992.

ELHINDI, K.; EL-HENDAWY, S.; ABDEL-SALAM, E.; ELGORBAN, A.; AHMED, M. Impacts of fertigation via surface and subsurface drip irrigation on growth rate, yield and flower quality of *Zinnia elegans*. *Soil and Plant Nutrition*, v.75, n.1, p.96-107, 2016.

ELLSWORTH, T. R.; JURY, W. A. A three-dimensional field study of solute transport through unsaturated, layered, porous media. 2. Characterization of vertical dispersion, *Water Resources Research*, v.27, n.5, p.967-981, 1991.

ELMALOGLOU, S.; DIAMANTOPOULOS, E. Soil water dynamics under surface trickle irrigation as affected by soil hydraulic properties, discharge rate, dripper spacing and irrigation duration. *Irrigation and Drainage*, v.59, n.3, 254-263, 2010.

ELMALOGLOU, S.; SOULIS, K. X.; DERCAS, N. Simulation of soil water dynamics under surface drip irrigation from equidistant line sources. *Water Resources Management*, v.27, n.12, p.4131-4148, 2013.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW): Managing systems at risk. FAO, Rome; Earthscan, London, 2011. 308p.

FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA, E. C. Realidade e perspectivas do uso racional de águas subterrâneas na região semiárida do Brasil. In: MEDEIROS, S. de S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. de O.; PAZ, V. P. da S. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande: INSA. 2011. Cap.9. p.269-305.

FERREIRA E. P. Gênese e classificação de solos em ambiente cárstico na Chapada do Apodi. 2013. 105f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2013.

FERREIRA, P. A.; GARCIA, G. de O.; MATOS, A. T. de; RUIZ, H. A.; BORGES JUNIOR, J. C. F. Transporte no solo de solutos presentes na água residuária de café conilon. Acta Scientiarum Agronomy, v.28, n.1, p.29-35, 2006.

FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L. de; REZENDE, R.; FARIA, M. A. de. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. Maringá: EDUEM, 2012. 356p.

GARDENAS, A.; HOPMANS, J. W.; HANSON, B. R.; SIMUNEK, J. Two dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. Agricultural Water Management, v.74, n.4, p.219-242, 2005.

GISPERT, J. R., GARCÍA, J. A. El volumen húmedo del suelo en el riego localizado. Importancia y evaluación. In: MUÑOZ-CARPENA, R.; RITTER, A.; TASCÓN, C. (eds): Estudios de la zona no saturada del suelo. ICIA, 1999. p.11-17.

GOMES, H. P. Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados aspersão e gotejamento. João Pessoa: UFPB, 1994. 344p.

GONÇALVES, A. D. M. A. Efeito da temperatura no transporte dos íons potássio e nitrato no solo. 2007. 83f. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola), Escola Superior de

Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

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

GRANOVSKY, A. V.; MCCOY, E. L.; DICK, W. A.; SHIPITALO, M. J.; EDWARDS, W. M. Water and chemical transport through long-term no-till and plowed soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.57, n.6, p.1560-1567, 1993.

GRECCO, K. L. N. Caracterização do volume de solo molhado em diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar sob gotejamento subsuperficial. 2016. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

HAMMAMI, M.; ZAYANI, K. An analytical approach to predict the moistened bulb volume beneath a surface point source. *Agricultural Water Management*, v.166, p.123-129, 2016.

HANSON, B. R.; MAY, D. E.; SIMUNEK, J.; HOPMANS, J. W.; HUTMACHER, R. B. Drip irrigation provides the salinity control needed for profitable irrigation of tomatoes in the San Joaquin Valley. *California Agriculture*, v.63, n.3, p.131-136, 2009.

HANSON, B. R.; SIMUNEK, J.; HOPMANS, J. W. Leaching with subsurface drip irrigation under saline, shallow ground water conditions. *Vadose Zone Journal*, v.7, n.2, p.810-818, 2008.

HINNELL, A. C.; LAZAROVITCH, N.; FURMAN, A.; POULTON, M.; WARRICK, A.W. Neuro-Drip: Estimation of subsurface wetting patterns for drip irrigation using neural networks. *Irrigation Science*, v.28, n.6, p.535-544, 2010.

HUTSON, J. L.; WAGENET, R. J. LEACHM: Leaching, Estimation and Chemistry Model: a process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Department of Agronomy, Cornell University, 1989. 148p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo agropecuário 2006: Brasil, grandes regiões e unidades da federação. Rio de Janeiro: IBGE. 2009. 777p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo agropecuário 1995-1996: n° 1 Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1998. 358p.

IBRAHIM, M. M.; EL-BAROUDY, A. A.; TAHA, A. M. Irrigation and fertigation scheduling under drip irrigation for maize crop in sandy soil. *International Agrophysics*, v.30, n.1, p.47-55, 2016.

ISLAM, M. S. Sensitivity analysis of unsaturated infiltration flow using head based finite element solution of Richards' equation. *Matematika*, v.3, n.2, p.131-148, 2017.

JARVIS, N. J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, v.58, n.3, p.523-546, 2007.

JAVADZADEH, F.; KHALEDIAN, M.; NAVABIAN, M.; SHAHINROKHSAR, P. Simulations of both soil water content and salinity under tape drip irrigation with different salinity levels of water. *Geosystem Engineering*, v.20, p.231-236, 2017.

JOHNSTON, A. E.; GOULDING, K. W. T.; MERCER, E. Potassium leaching from a sandy soil. *International Potash Institute*, v.12, n.4, p.450-456, 1993.

JURY, W.A.; FLUHLER, H. Transport of chemicals through soil: mechanisms, models, and field applications. *Advances in Agronomy*, v.47, p.141-201, 1992.

KAFKAFI, U.; TARCHITZKY, J. Fertigation: a tool for efficient fertilizer and water management. Paris: International Fertilizer Industry Association. 2011. 138p.

KANDELOUS, M. M.; SIMUNEK, J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, v.97, n.7, p.1070-1076, 2010.

KANDELOUS, M. M.; SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M. T.; MALEK, K. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. *Soil Science Society of America Journal*, v.75, n.2, p.488-497, 2011.

KARMELI, D.; PERI, G.; TODES, M. *Irrigation systems: design and operation*. Cape Town: Oxford University Press, 1985. 187p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. *Sprinkler and trickle irrigation*. New Jersey: The Blackburn Press, 1990. 652p.

KEMPER, W. D. Solute diffusivity. In: KLUTE, A. (ed.). *Methods of soil analysis, Part I. Physical and mineralogical methods*. (Agronomy Monograph n. 9). 2ed. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. 1986. p.1007-1024.

KOLAHCHI, Z.; JALALI, M. Simulation leaching of potassium in a sandy soil using simple and complex models. *Agricultural Water Management*, v.85, n.1-2, p.85-94, 2006.

LAZAROVITCH, N.; POULTON, M.; FURMAN, A.; WARRICK, A. W. Water distribution under trickle irrigation predicted using artificial neural networks. *Journal of Engineering Mathematics*, v.64, n.2, p.207-218, 2009.

LAZAROVITCH, N.; SIMUNEK, J.; SHANI, U. System-dependent boundary condition for water flow from subsurface source. *Soil Science Society of America Journal*, v.69, n.1, p.46-50, 2005.

LEGATES, D. R.; McCABE Jr., G. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, v.35, n.1, p.233-241, 1999.

LEIJ, F. J.; van GENUCHTEN, M. T. Solute transport. In: WARRICK, A. W. *Soil Physics Companion*. New York: CRC PRESS, 2002. Cap.6, p.189-248.

LEVIEN, S. L. A. Modelagem computacional da estimativa de dimensões do volume de solo molhado gerado por um emissor superficial sob irrigação por gotejamento. Relatório Técnico de Pós Doutorado, CAPES, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba. Projeto PROCAD-NF/CAPES 1460/2007, 2012. 55p.

LEVIEN, S. L. A.; MAIA, C. E.; MEDEIROS, J. F. de. Dimensions of wetted soil volume on the surface drip irrigation in Semiarid of Brazil. In: BILIBIO, C.; HENSEL, O.; SELBACH, J. Sustainable water management in the tropics and subtropics - and case studies in Brazil. Fundação Universidade Federal do Pampa, UNIKASSEL, PGCult-UFMA, v.1, p.983-1003, 2011.

LEVIEN, S. L. A.; MIRANDA, J. H. de; BEZERRA, A. H. F. Estimativa de dimensões de volume de solo molhado na irrigação por gotejamento superficial em solo de textura média: condição inicial de solo seco. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v.6, p. 127-135, 2012.

LEVIEN, S. L. A.; SILVA, C. A. da; MAIA, C. E.; MEDEIROS, J. F. de. Estimativa de largura e profundidade de bulbo molhado em solos de textura média sob irrigação por gotejamento superficial. Enciclopédia Biosfera, v.6, n.11, p.1-10, 2010.

LI, J.; JI, H.; LI, B.; LIU, Y. Wetting patterns and nitrate distributions in layered-textural soils under drip irrigation. Agricultural Sciences in China, v.6, n.8, p.970-980, 2007.

LI, J.; ZHANG, J.; RAO, M. Modeling of water flow and nitrate transport under surface drip fertigation. Transactions of the ASAE, v.48, n.2, p.627-637, 2005.

LUBANA, P. P. S.; NARDA, N. K. Modelling soil water dynamics under trickle emitters - a review. Journal of Agricultural Engineering, v.8, n.3, p.217-232, 2001.

MA, L.; AHUJA, L. R.; NOLAN, B. T.; MALONE, R. W.; TROUT, T. J.; QI, Z. Root Zone Water Quality Model (RZWQM2): model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, v.55, n.4, p.1425-1446, 2012.

MAIA, C. E. Aplicação de modelos matemáticos na estimativa do volume de bulbo molhado por gotejamento superficial em diferentes tipos de solo. *Ciência Rural*, v.40, n.11, p.2301-2309, 2010.

MAIA, C. E.; LEVIEN, S. L. A. Estimativa de dimensões de bulbo molhado em irrigação por gotejamento superficial aplicando modelo de superfície de resposta. *Ciência Rural*, v.40, n.6, p.1302-1308, 2010.

MAIA, C. E.; LEVIEN, S. L. A. MEDEIROS, J. F. de; DANTAS NETO, J. Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. *Revista Ciência Agronômica*, v.41, n.1, p.149-158, 2010.

MALEK, K.; PETERS, R. T. Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.137, n.8, p.530-536, 2011.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação - princípios e métodos. 1.ed. Viçosa: UFV, 2006. 318p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação: princípios e métodos. 3.ed. Viçosa: UFV, 2009. 355p.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, v.22, n.63, p.83-96 2008.

MARQUES, F. A.; NASCIMENTO, A. F. do; ARAUJO FILHO, J. C. de; SILVA, A. B. da. Solos do Nordeste. 1. ed. Recife: EMBRAPA, v.1, 2014. 16p.

MEDEIROS, J. F.; LEVIEN, S.L. A.; MAIA, C. E. Caracterização de bulbo úmido em solos utilizados na irrigação localizada na região de fruticultura irrigada no Agropolo Assu-Mossoró. Relatório Técnico, CNPq, Escola Superior de Agricultura de Mossoró, Mossoró. 2004. 89p.

MEDEIROS, S. de S.; LIMA, R. da C. C.; LIMA, J. P.; NUNES, T. H. C. Monitoramento dos reservatórios da região semiárida. *Campina Grande: INSA*, v.3, n.11, 2016.

MELLO, F. L. P.; SILVA, L. D. B. da. Irrigação. Apostila. Rio de Janeiro: UFRRJ, 2009. 190p.

MELO, R. F.; FERREIRA, P. A.; MATOS, A. T.; RUIZ, H. A.; OLIVEIRA, L. B. Deslocamento miscível de cátions básicos provenientes da água residuária de mandioca em colunas de solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.2, p.456-465, 2006.

MIRANDA, J. H. de; DUARTE, S. N. Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.2, p.235-241, 2002.

MIYAZAKI, T. Water flow in soils. 2.ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. 418p.

MONTEIRO, R. O. C.; COELHO, R. D.; MONTEIRO, P. F. C. Water and nutrient productivity in melon crop by fertigation under subsurface drip irrigation and mulching in contrasting soils. *Ciência Rural*, v.44, n.1, p.25-30, 2014.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Olhares sobre as políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. In: GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. da; MEDEIROS, S. de S.; GALVÃO, C. de O. Recursos hídricos em regiões semiáridas. Campina Grande: INSA, 2012. Cap. 1. p.2-27.

MORAESA, D. S. de L.; JORDÃO, B. Q. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. *Revista Saúde Pública*, v.36, n.3, p.370-374, 2002.

MOTA, J. C. A. Caracterização física, química e mineralógica, como suporte para manejo, dos principais solos explorados com a cultura do melão na Chapada do Apodi –RN. 2004. 96f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

MUBARAK, I.; MAILHOL, J. C.; ANGULO-JARAMILLO, R.; BOUARFA, S.; RUELLE, P. Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under

high-frequency drip irrigation. *Agricultural Water Management*, v.96, n.11, p.1547-1559, 2009.

NAGLIC, B.; KECHAVARZI, C.; COULON, F.; PINTAR, M. Numerical investigation of the influence of texture: surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size. *Irrigation Science*, v.32, n.6, p.421-436, 2014.

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.

NOFZIGER, D. L; WU, J. CHEMFLO-2000: Interactive software for simulating water and chemical movement in unsaturated soils. Stillwater: Oklahoma State University. 2003. 78p.

NOGUEIRA, C. C. P.; COELHO, E. F.; LEÃO, M. C. S. Características e dimensões do volume de um solo molhado sob gotejamento superficial e subsuperficial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.3, p.315-320, 2000.

OR, D. Drip irrigation in heterogeneous soils: Steady-state field experiments for stochastic model evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, v.60, p.1339-1349, 1996.

PARSINEJAD, M.; FENG, Y.; GHANBARIAN, B. Sensitivity analysis of hydraulic parameters in the simulation of unsaturated soil water dynamics. *Iran Agricultural Research*, v.24-25, n.1-2, p.1-14, 2006.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M. V.; ZOLIN, C. A.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; JOSÉ, J. V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o Censo Agropecuário 2006. *Irriga, Botucatu*, v.16, n.2, p.163-176, 2011.

PAZ, V. P. da S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.3, p.465-473, 2000.

PEREIRA, L. S.; JUAN VALERO, J. A. de; PICORNELL BUENDÍA, M. R.; TARJUELO MARTÍN-BENITO, J. M. *El Riego y sus tecnologías*. Albacete: CREA-UCLM, 2010. 296p.

PHILIP, J. R. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities. *Water Resources Research*, v.4, n.5, p.1039-1047. 1968.

PHOGAT, V.; SKEWES, M. A.; COX, J. W.; SANDERSON, G.; ALAM, J.; SIMUNEK, J. Seasonal simulation of water, salinity, and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (*Citrus reticulata*) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. *Journal of Hydrology*, v.513, p.504-516, 2014.

PIZARRO, F. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 511p.

POLETIKA, N. N.; JURY, W. A. Effects of soil management on water flow distribution and solute dispersion. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, n.4, p.999-1006, 1994.

PREVEDELLO, C. L. Física do Solo: com problemas resolvidos. Curitiba: SAEAFS, 1996. 446p.

QIAO, S, Y. Modeling water flow and phosphorus fate and transport in a tile-drained clay loam soil using HYDRUS (2D/3D). 2014. 102f. Tese (PhD in Bioresource Engineering), McGill University, Montreal, 2014.

QUISENBERRY, V. L.; PHILLIPS, R. E.; ZELEZNIK, J. M. Spatial distribution of water and chloride macropore flow in a well-structured soil. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, n.5, p.1294-1300, 1994.

RADCLIFFE, D. E.; RASMUSSEN, T. C. Soil water movement. In: WARRICK, A. W. *Soil Physics Companion*. New York: CRC PRESS, 2002. Cap.4, p.85-126.

RAMÍREZ DE CARTAGENA, F. Simulación numérica de la dinámica del agua en el suelo: aplicación al diseño de sistemas de riego LAF. 1995. 118p. Tesis (Doctoral Medi Ambient i Ciències del Sòl), Universitat de Lleida. Lleida. 1995.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*. v.1, n.5, p.318-333, 1931.

RIVERA, R. N. C. Modelagem da dinâmica da água e do potássio na irrigação por gotejamento superficial. 2004. 89f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ROBERTS, T. L.; LAZAROVITCH, N.; WARRICK, A. W.; THOMPSON, T. L. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-2D. *Soil Science Society of America Journal*, v.73, n.1, p.233-240, 2009.

ROBERTS, T. L.; WHITE, S. A.; WARRICK, A. W.; THOMPSON, T. L. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*, v.95, n.6, p.669-677, 2008.

RODRIGO, J. Riego localizado II: programas informáticos. 2ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1996. 247p.

RODRIGO, J.; CORDERO, L. Riego localizado: programas informáticos para Windows. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2003. 157p.

RUIZ, H. A.; FERREIRA, P. A. ROCHA, G. C.; BORGES JR., J. C. F. Transporte de solutos no solo. In: de JONG van LIER, Q. Física do Solo. 1.ed. Viçosa: SBCS. 2010. 298p.

SALTELLI, A. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices. *Computer Physics Communications*, v.145, n.2, p.280-297, 2002.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

SANTOS, M. C. dos. Solos do semiárido do Brasil. *Cadernos do Semiárido: Riquezas e Oportunidades*, n.10, p.17-55, 2017.

SAXENA, C. K.; GUPTA, S. K.; PUROHIT, R. C.; BHAKAR S. R. Salt water dynamics under point source of drip irrigation - A Review. *Indian Journal of Agricultural Research*, v.49, n.2, p.101-113, 2015.

SCARPARE, F. V. Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST. 2011. 163f. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.112, n.3. p.242-253, 1986.

SELIM, T.; BERNDTSSON, R.; PERSSON, M.; SOMAIDA, M.; EL-KIKI, M.; HAMED, Y.; MIRDAN, A.; ZHOU, Q. Influence of geometric design of alternate partial root-zone subsurface drip irrigation (APRSDI) with brackish water on soil moisture and salinity distribution. *Agricultural Water Management*, v.103, n.1, p.182-190, 2012.

SELIM, T.; BOUKSILA, F.; BERNDTSSON, R.; PERSSON, M. Soil water and salinity distribution under different treatments of drip irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, v.77, n.4, p.1144-1156, 2013.

SEPASKHAH, A. R.; CHITSAZ, H. Validating the Green-Ampt analysis of wetted radius and depth in trickle irrigation. *Biosystems Engineering*, v.89, n.2, p.231-236, 2004.

SHAN, Y.; WANG, Q. Simulation of salinity distribution in the overlap zone with double-point-source drip irrigation using HYDRUS-3D. *Australian Journal of Crop Science*, v.6, n.2, p.238-247, 2012.

SHAN, Y.; WANG, Q.; WANG, C. Simulated and measured soil wetting patterns for overlap zone under double points sources of drip irrigation. *African Journal of Biotechnology*, v.10, n.63, p.13744-13755, 2011.

SHANI, U.; HANKS, R. J.; BRESLER, E.; OLIVEIRA, A. S. Field method for estimating hydraulic conductivity and matric potential-Water content relations, *Soil Science Society of America Journal*, v.51, n.2, p.298-302, 1987.

SHEPHERD, M. A.; BENNETT, G. Nutrient leaching losses from a sandy in lysimeters. *Soil Science and Plant Analysis*, v.19, n.7-8, p.931-946, 1998.

SHIPITALO, M. J.; EDWARDS, W. M.; DICK, W. A.; OWENS, L. B. Initial storm effects on macropore transport of surface-applied chemicals in no-till soil. *Soil Science Society of America Journal*, v.54, n.6, p.1530-1536, 1990.

SIMUNEK, J.; JACQUES, D.; LANGERGRABER, G.; BRADFORD, S. A.; SEJNA, M.; van GENUCHTEN, M. T. Numerical modeling of contaminant transport using HYDRUS and its specialized modules. *Journal of the Indian Institute of Science*, v.93, n.2, p.265-284, 2013.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; SAIATO, H; SAKAI, H.; van GENUCHTEN, M. T. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: Version 4.08. University of California Riverside, Riverside, 2009. 330p.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; van GENUCHTEN, M.T. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0. USDA, ARS, USSSL, Riverside, USA. 1999a. 227p.

SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone Journal*, v.7, n.2, p.587-600, 2008.

SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M.; TORIDE, N.; LEIJ, F. J. The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection-dispersion equation. Riverside: USDA, U.S. Salinity Laboratory, 1999b. 32p.

SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M.T.; SEJNA, M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*, v.15, n.7, p.1-25, 2016a.

SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M.T.; SEJNA, M. The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Technical Manual, version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic. 2006. 213p.

SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M.T.; SEJNA, M. The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Technical Manual, version 2.0. PC Progress, Prague, Czech Republic. 2016b. 260p.

SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, T. M.; SEJNA, M. HYDRUS: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, v.55, n.4, p.1261-1274, 2012.

SINGH, D. K.; RAJPUT, T. B. S.; SINGH, D. K.; SIKARWAR, H. S.; SAHOO, R. N.; AHMAD, T. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural Water Management*, v.83, n.1-2, p.130-134, 2006.

SKAGGS, T. H.; TROUT, T. J.; ROTHFUSS, Y. Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water. *Soil Science Society of America Journal*. v.74, n.6, p.1886-1896, 2010.

SKAGGS, T. H.; TROUT, T. J.; SIMUNEK, J.; SHOUSE, P. J. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.130, n.4, p.304-310, 2004.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.8, n.1, p.7-15, 2004.

SOUZA, E. de A.; COELHO, E. F.; PAZ, V. P. da S. Distribuição da umidade num perfil de solo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. *Ciência e Agrotecnologia*, v.31, n.4, p.1161-1166, 2007.

SUBBAIAH, R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, v.31, n.3, p.225-258, 2013.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). Manual de métodos de análise de solos. 3.ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573p.

TESTEZLAF, R. Irrigação: métodos, sistemas e aplicações. 1. ed. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP. 2017. 215p.

THABANE, L.; MBUAGBAW, L.; ZHANG, S.; SAMAAAN, Z.; MARCUCCI, M. YE, C.; THABANE, M.; GIANREGORIO, L.; DENNIS, B.; KOSA, D.; DEBONO, V. B.; DILLENBURG, R.; FRUCI, V.; BAWOR, M.; LEE, J.; WELLS, G.; GOLDSMITH, C. H. A tutorial on sensitivity analyses in clinical trials: the what, why, when and how. *BMC Medical Research Methodology*, v.13, n.92, p.1-12, 2013.

USDA. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook. Chapter 4. Surface Irrigation. Washington, 2012. 131p.

USDA. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook. Chapter 7. Microirrigation. Washington, 2013. 230p.

USDA. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook. Chapter 11. Sprinkler Irrigation. Washington, 2016. 236p.

USDA. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook. Irrigation Guide. Washington, 1997. 754p.

USDA. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service. National Engineering Handbook. Section 15, Irrigation. Washington. 1991. 1262p.

van DAM, J. C.; WÖSTEN, J. H. M.; NEMES, A. Unsaturated soil water movement in hysteretic and water repellent field soils. *Journal of Hydrology*, v.184, n.3-4, p.153-173, 1996.

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

van GENUCHTEN, M. T. Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments. (Research Report, 119). Riverside: USDA, U.S. Salinity Laboratory, 1981. 94p.

van GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Riverside: USDA, U.S. Salinity Laboratory, 1991. 93p.

van GENUCHTEN, M. T.; WIERENGA, P. J. Solute dispersion coefficients and retardation factor. In: KLUTE, A. *Methods of Soil Analysis. 1-Physical and Mineralogical Methods*. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p.1025-1054.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. Localized irrigation. Design, installation, operation, evaluation. Rome: FAO, 1980. 203p.

WAGENET, R. J. LEACHM: Leaching Estimation And Chemistry Model: a process-based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Version 1.0. Center for Environmental Research, Cornell University, 1987. 80p.

WANDERLEY, R. M. Modelo advectivo-dispersivo de transporte de solutos em solo não-saturado utilizando os métodos das características e dos elementos finitos. 2000. 126f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

WANG, H. Describing and predicting breakthrough curves for non-reactive solute transport in statistically homogeneous porous media. 2002. Thesis (PhD in Crop and Soil Environmental

Science), Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2002.

WANG, J.; GONG, S.; XU, D.; JUAN, S.; MU, J. Numerical simulations and validation of water flow and heat transport in a subsurface drip irrigation system using HYDRUS-2D. *Irrigation and Drainage*, v.62, n.1, p.97-106, 2013.

WARRICK, A. W.; LAZAROVITCH, N. Infiltration from a strip source. *Water Resources Research*, v.43, n.7, p.1-5, 2007.

WERNECK, J. E. F. Recursos hídricos no Brasil e no mundo. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. 46p.

WILLIAMS, J. W.; IZAURRALDE, R. C.; STEGLIC, E. M. Agricultural Policy/Environmental eXtender model: theoretical documentation. Ver. 0604. Blackland Research and Extension Center, Temple, 2008. 131p.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models, *Physical Geography*, v.2, n.2, p.184-194, 1981.

WOODING, R. A. Steady Infiltration from a Shallow Circular Pond. *Water Resources Research*, v.4, n.6, p. 1259-1273.1968.

WORLD BANK. Reengaging in agricultural water management: challenges and options. Directions in Development Series. The World Bank, Washington, 2006. 242p.

WWAP. United Nations World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris: UNESCO, 2015. 122p.

YITAYEW, M.; KHAN, A. A.; WARRICK, A. W. In situ measurement of soil hydraulic conductivity using point application of water. *Applied Engineering in Agriculture*, v.14, n.2, p.115-120, 1998.

ZAZUETA, F.S. Microirrigación. Guadalajara: ICFA International, 1992. 212p.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Parâmetros das curvas de retenções de água no solo

Tabela A1. Parâmetros das curvas de retenções de água no solo de todos os tratamentos

Tratamento	θ_r	θ_s	α	n	m
	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	cm^{-1}	-	-
T1	0,1010	0,4796	0,0314	2,2134	0,5482
T2	0,0896	0,4721	0,0308	2,3372	0,5721
T3	0,0993	0,4587	0,0244	2,4404	0,5902
T4	0,1028	0,4774	0,0247	2,8055	0,6436
T5	0,0938	0,4794	0,0348	2,0414	0,5101
T6	0,0957	0,4589	0,0356	2,0471	0,5115
T7	0,0903	0,4588	0,0343	1,9789	0,4947
T8	0,0942	0,4321	0,0347	1,8473	0,4587
T9	0,1016	0,4693	0,0328	2,0766	0,5185
Média	0,0965	0,4651	0,0315	2,1986	0,5386
Desvio padrão	0,0046	0,0143	0,0040	0,2750	0,0529
Coeficiente de variação (%)	4,7962	3,0758	12,7204	12,5066	9,8185

APÊNDICE B - Resultados da distribuição de água no solo

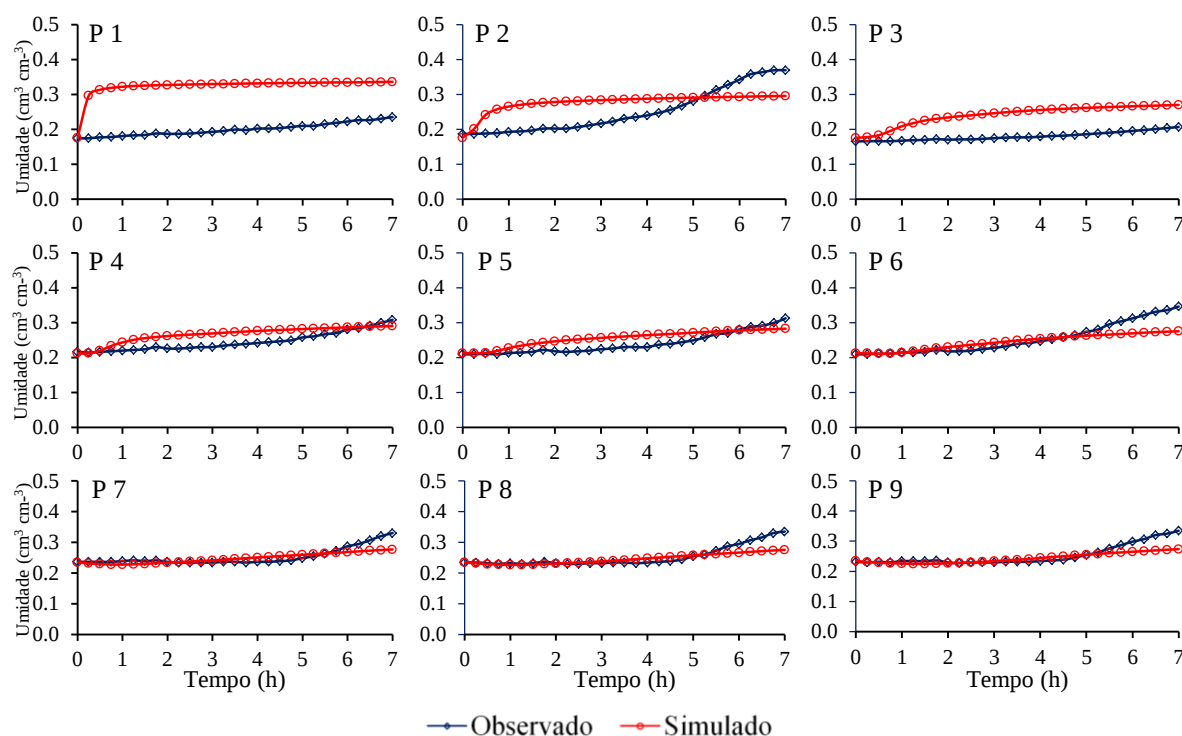


Figura B1, Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,165 \text{ mg cm}^{-3}$

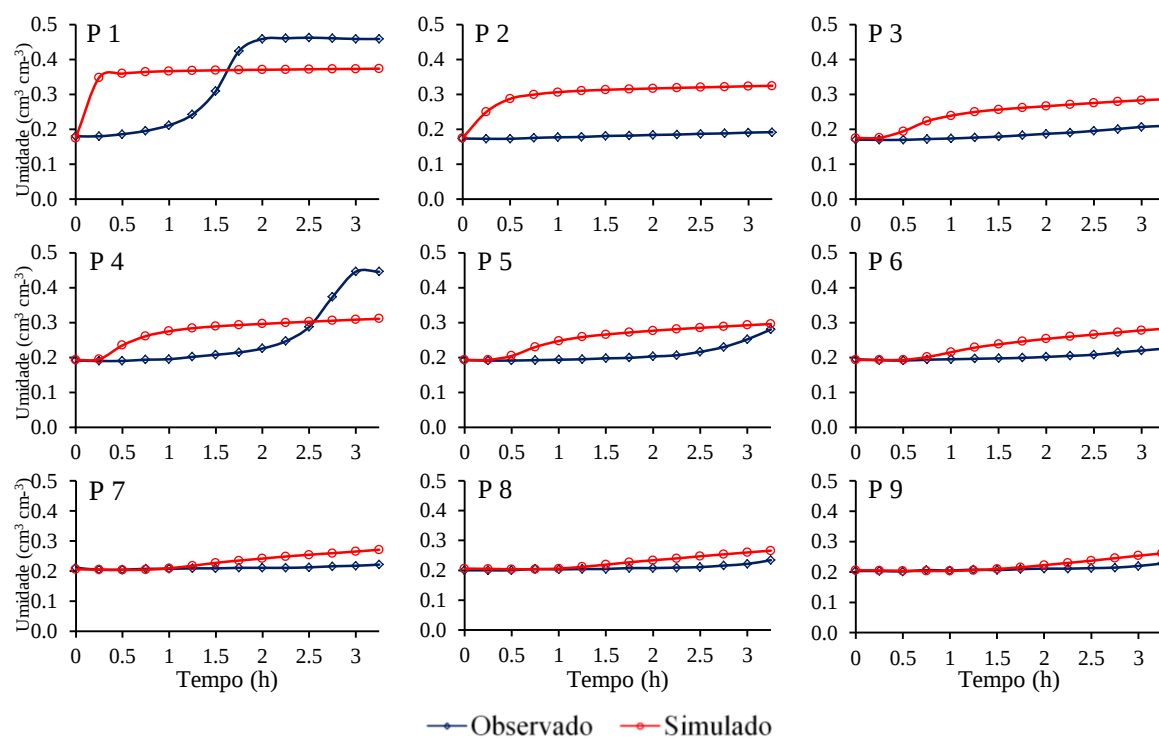


Figura B2, Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,165 \text{ mg cm}^{-3}$

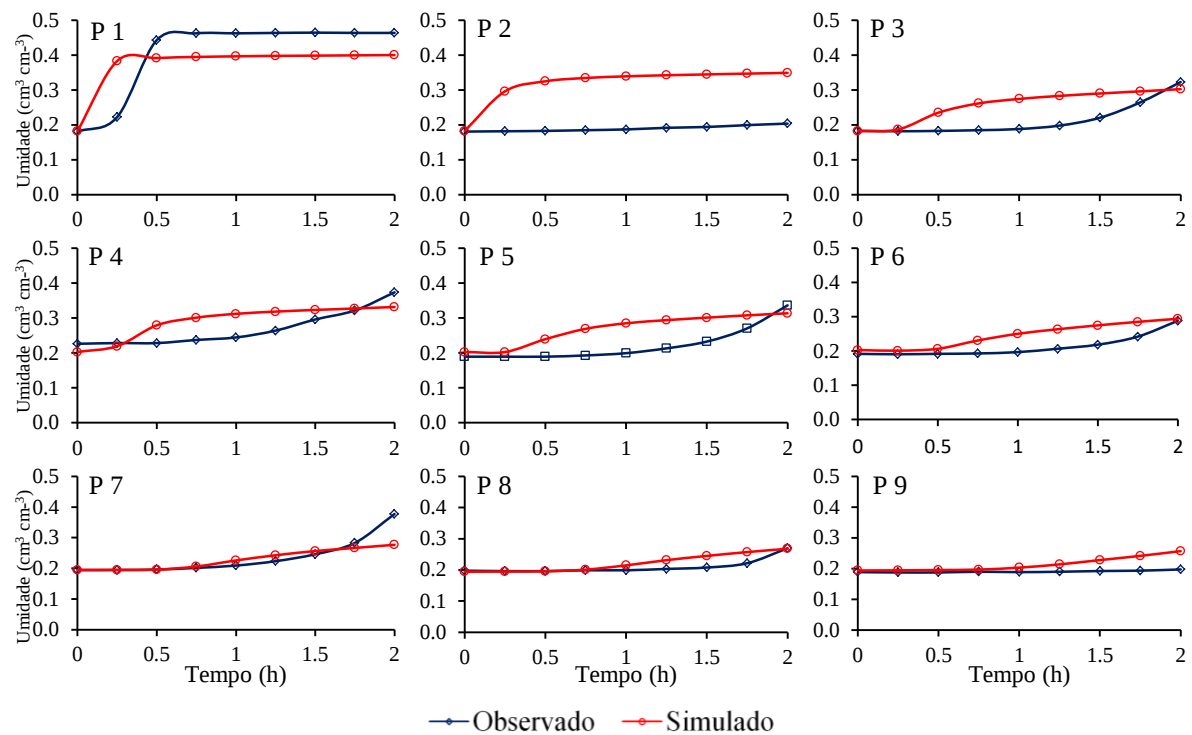


Figura B3, Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de 2,50 L h⁻¹ e concentração de potássio de 0,165 mg cm⁻³

Tabela B1, Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição de água no solo, durante a formação do bulbo úmido, para concentração de potássio de 0,165 mg cm⁻³

Ponto de observação	Vazão					
	L h ⁻¹					
	0,72		1,52		2,50	
	REQM	EAM	REQM	EAM	REQM	EAM
cm ³ cm ⁻³						
1	0,1264	0,1237	0,1132	0,1026	0,0775	0,0674
2	0,0576	0,0526	0,1225	0,1173	0,1361	0,1281
3	0,0642	0,0611	0,0665	0,0608	0,0573	0,0474
4	0,0269	0,0237	0,0766	0,0656	0,0382	0,0382
5	0,0233	0,0204	0,0531	0,0459	0,0569	0,0497
6	0,0268	0,0179	0,0416	0,0348	0,0381	0,0322
7	0,0179	0,0131	0,0289	0,0223	0,0352	0,0188
8	0,0210	0,0135	0,0232	0,0186	0,0203	0,0140
9	0,0216	0,0138	0,0177	0,0125	0,0300	0,0232
Média	0,0429	0,0378	0,0604	0,0534	0,0544	0,0466

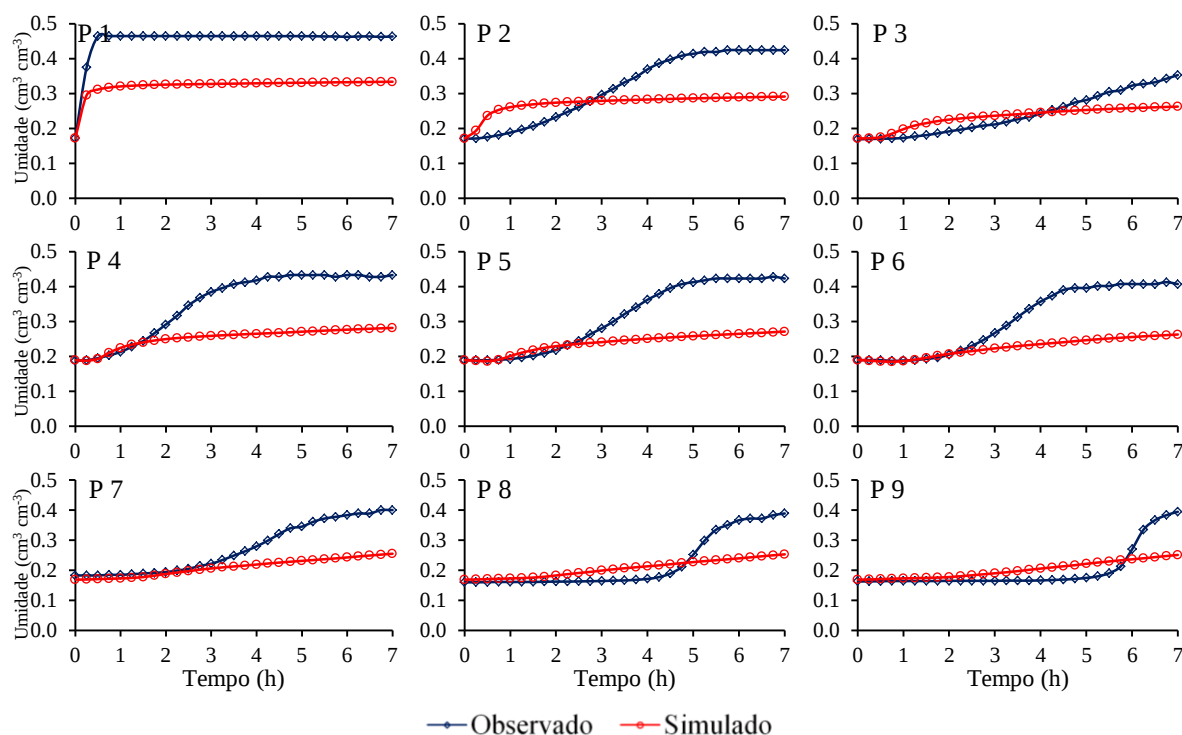


Figura B4, Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,750 \text{ mg cm}^{-3}$

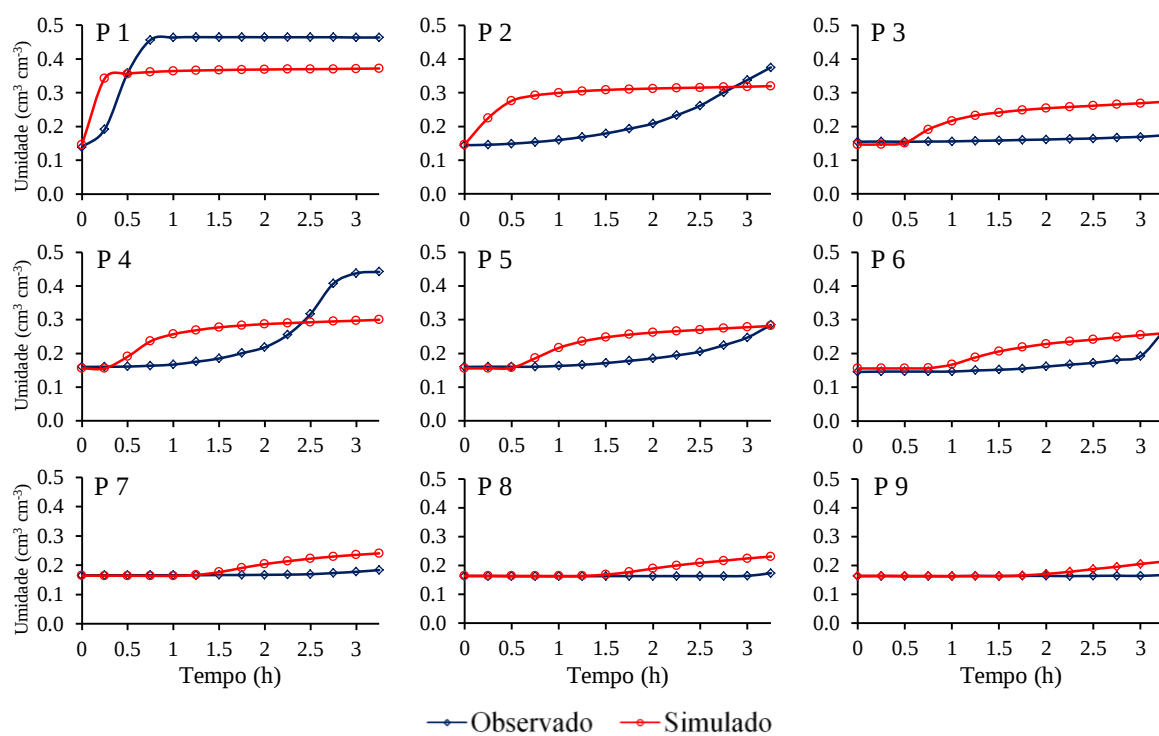


Figura B5, Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,750 \text{ mg cm}^{-3}$

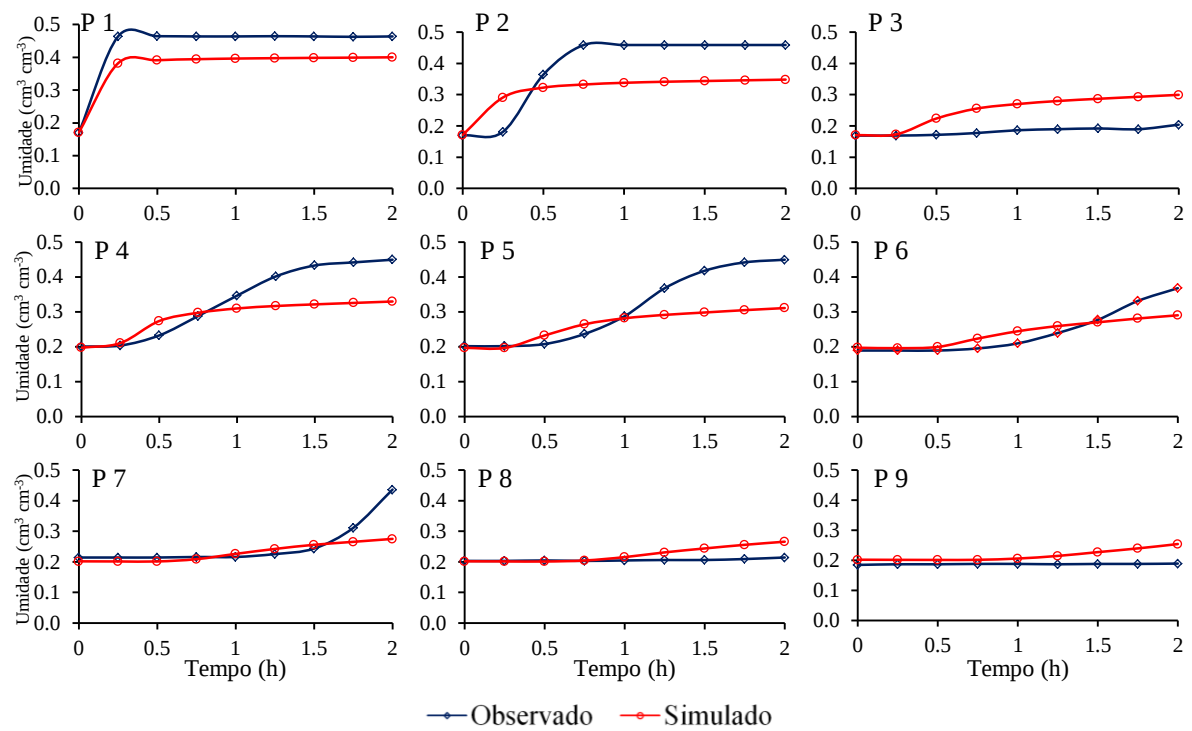


Figura B6, Valores de umidade do solo, durante a distribuição de água no solo, em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de 2,50 L h⁻¹ e concentração de potássio de 0,750 mg cm⁻³

Tabela B2, Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição de água no solo, durante a formação do bulbo úmido, para concentração de potássio de 0,750 mg cm⁻³

Ponto de observação	Vazão					
	L h ⁻¹					
	0,72		1,52		2,50	
	REQM	EAM	REQM	EAM	REQM	EAM
cm ³ cm ⁻³						
1	0,1327	0,1299	0,0938	0,0865	0,0652	0,0614
2	0,0915	0,0789	0,0978	0,0856	0,1036	0,0951
3	0,0398	0,0319	0,0765	0,0675	0,0766	0,0670
4	0,1207	0,1018	0,0834	0,0708	0,0750	0,0589
5	0,1041	0,0797	0,0527	0,0437	0,0813	0,0599
6	0,1029	0,0785	0,0475	0,0398	0,0353	0,0270
7	0,0843	0,0631	0,0345	0,0250	0,0569	0,0324
8	0,0664	0,0496	0,0318	0,0219	0,0279	0,0199
9	0,0536	0,0383	0,0201	0,0123	0,0340	0,0291
Média	0,0884	0,0724	0,0598	0,0503	0,0618	0,0501

APÊNDICE C - Resultados da distribuição e da redistribuição de água no solo

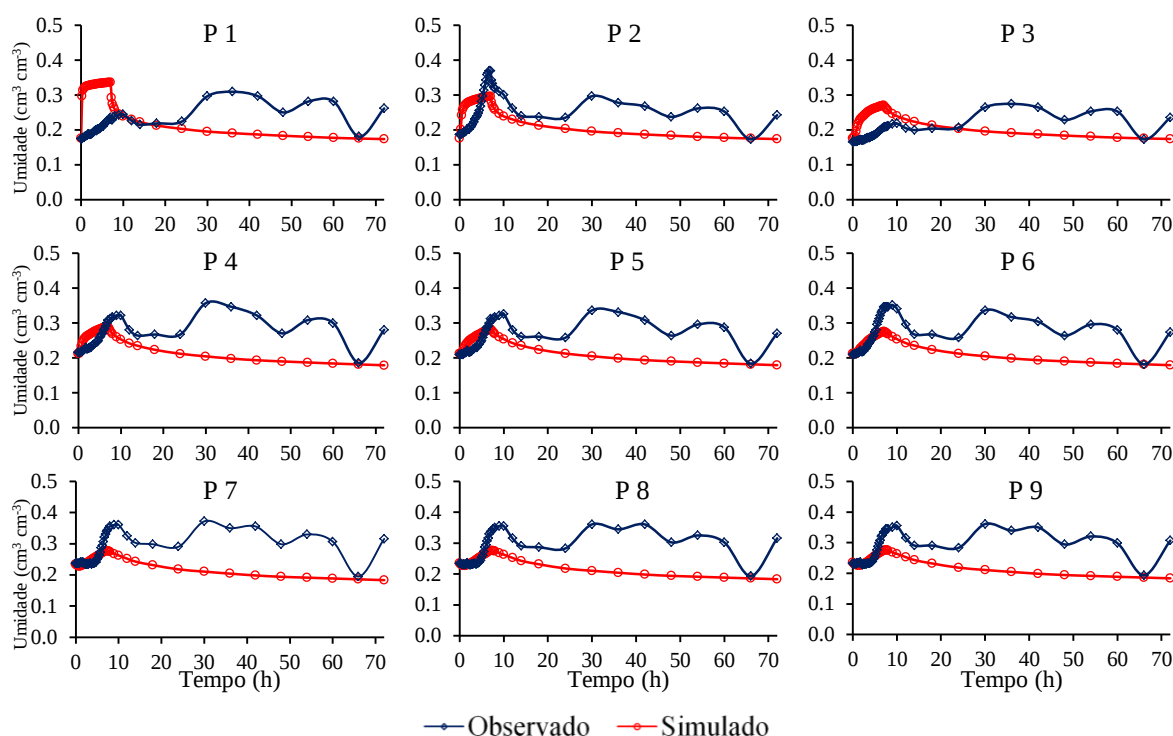


Figura C1, Valores da distribuição e redistribuição de água no solo em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,165 \text{ mg cm}^{-3}$

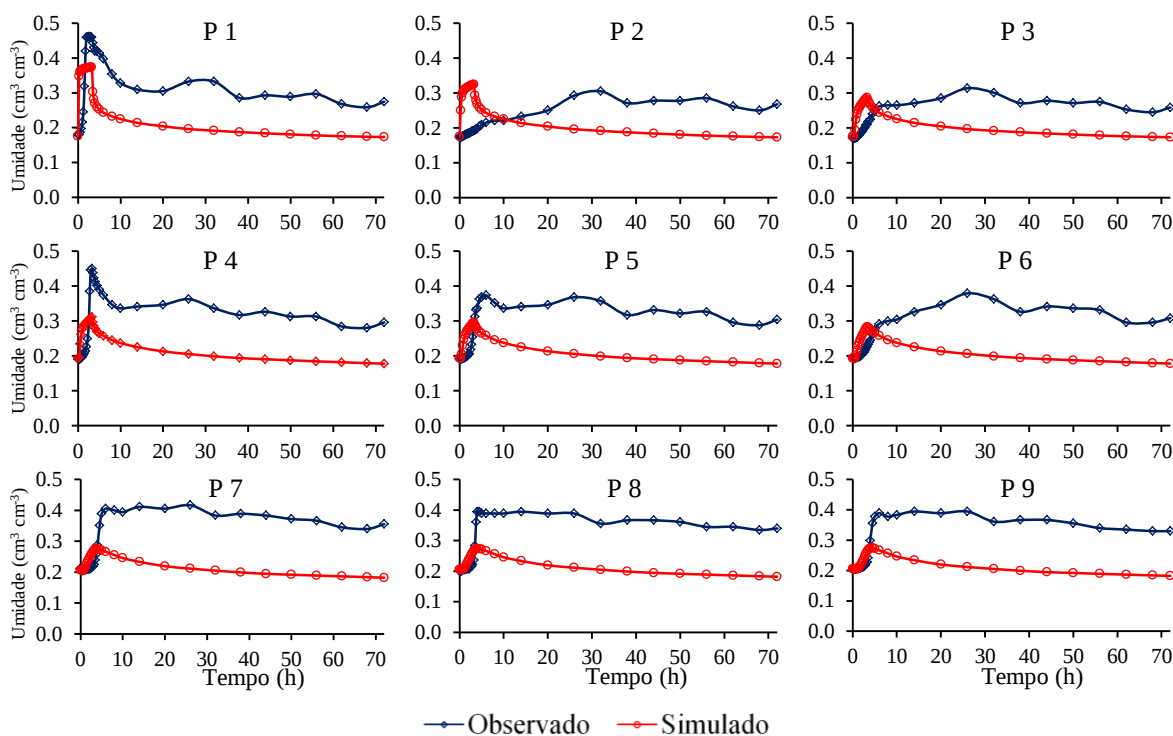


Figura C2, Valores da distribuição e redistribuição de água no solo em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,165 \text{ mg cm}^{-3}$

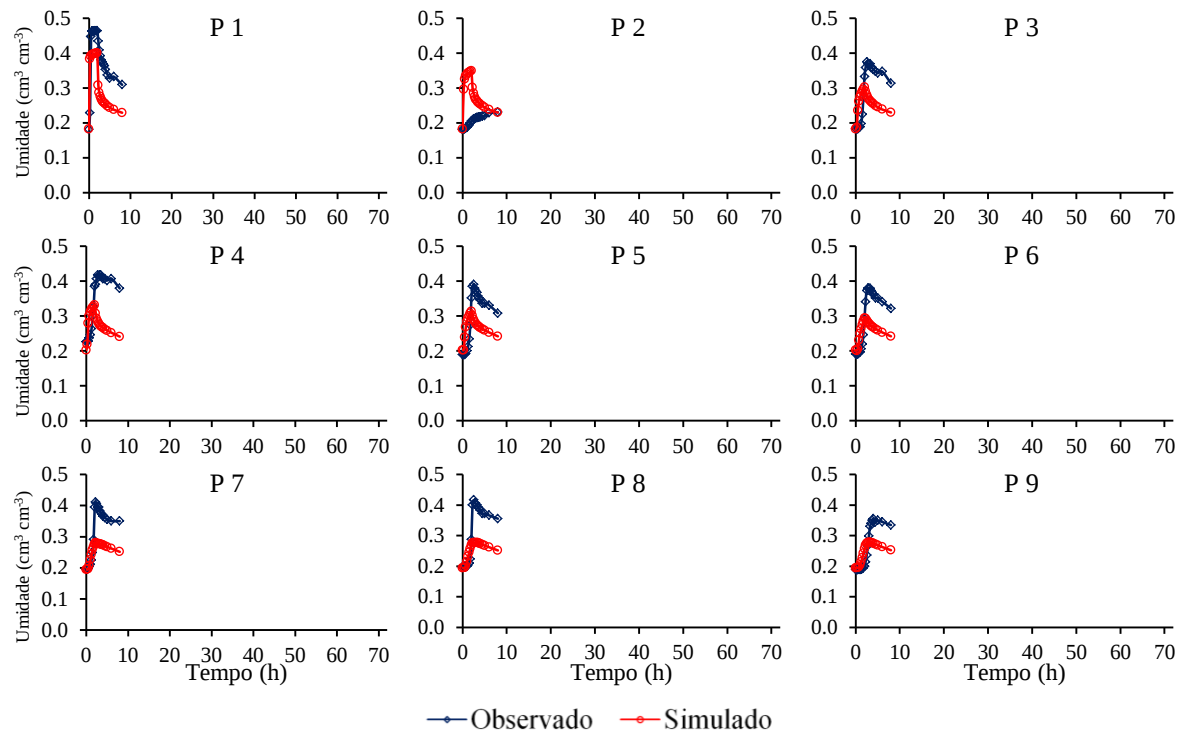


Figura C3, Valores da distribuição e redistribuição de água no solo em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de 2,50 L h⁻¹ e concentração de potássio de 0,165 mg cm⁻³

Tabela C1, Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição e da redistribuição de água no solo, para concentração de potássio de 0,165 mg cm⁻³

Ponto de observação	Vazão					
	L h ⁻¹					
	0,72		1,52		2,50	
	REQM	EAM	REQM	EAM	REQM	EAM
cm ³ cm ⁻³						
1	0,1073	0,0955	0,1195	0,1132	0,0940	0,0883
2	0,0594	0,0543	0,0986	0,0894	0,0969	0,0797
3	0,0596	0,0548	0,0696	0,0630	0,0819	0,0751
4	0,0563	0,0421	0,1078	0,0997	0,1070	0,0934
5	0,0506	0,0379	0,0944	0,0830	0,0739	0,0697
6	0,0557	0,0405	0,0869	0,0693	0,0728	0,0645
7	0,0653	0,0446	0,1170	0,0903	0,0841	0,0687
8	0,0637	0,0432	0,1106	0,0880	0,0895	0,0733
9	0,0616	0,0422	0,1038	0,0775	0,0521	0,0438
Média	0,0644	0,0506	0,1009	0,0859	0,0836	0,0729

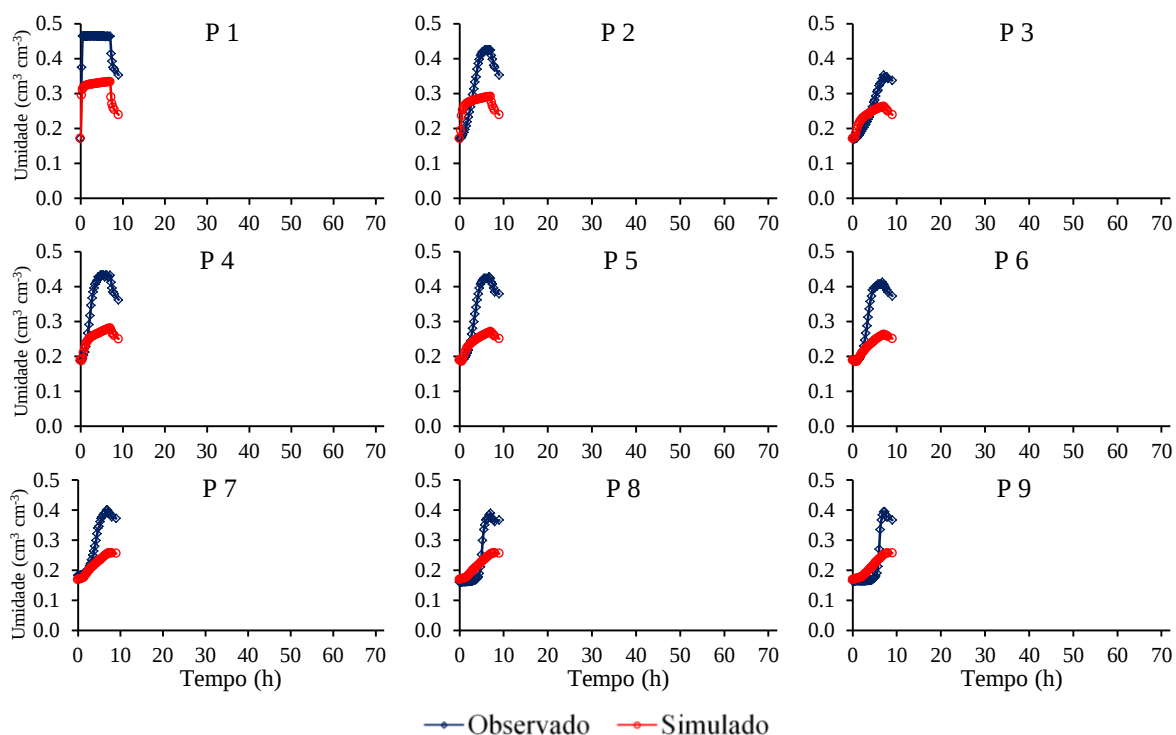


Figura C4, Valores da distribuição e redistribuição de água no solo em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,750 \text{ mg cm}^{-3}$

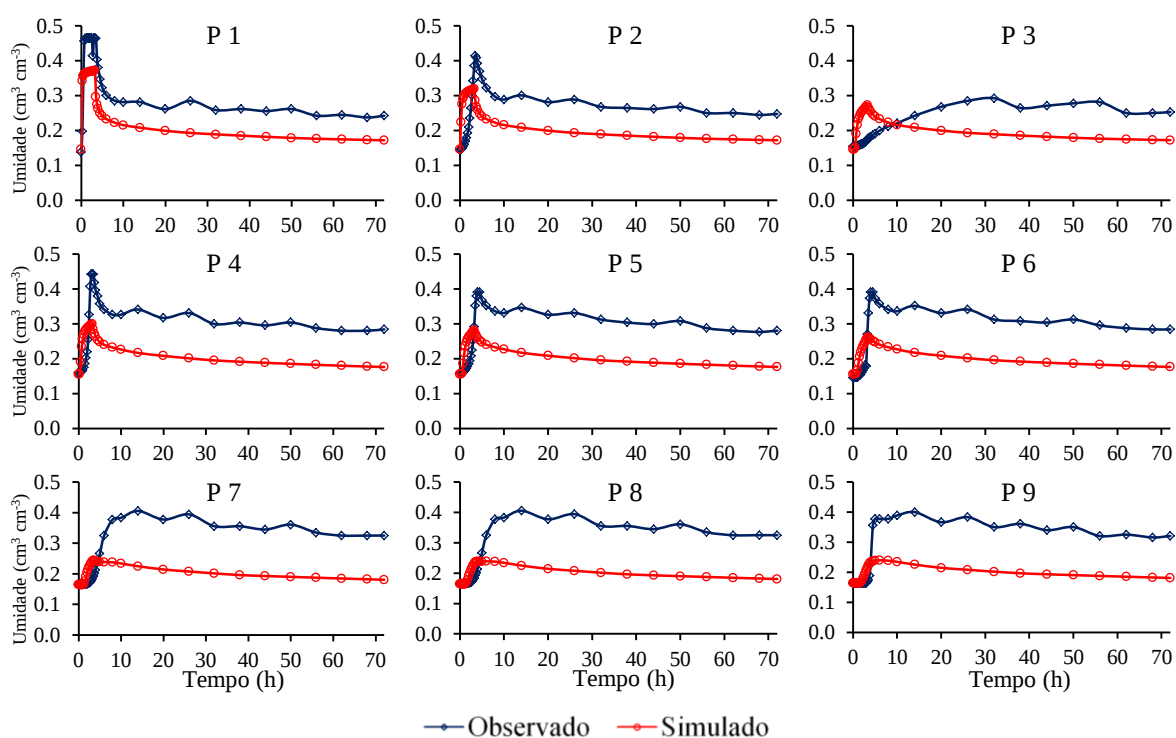


Figura C5, Valores da distribuição e redistribuição de água no solo em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de $1,52 \text{ L h}^{-1}$ e concentração de potássio de $0,750 \text{ mg cm}^{-3}$

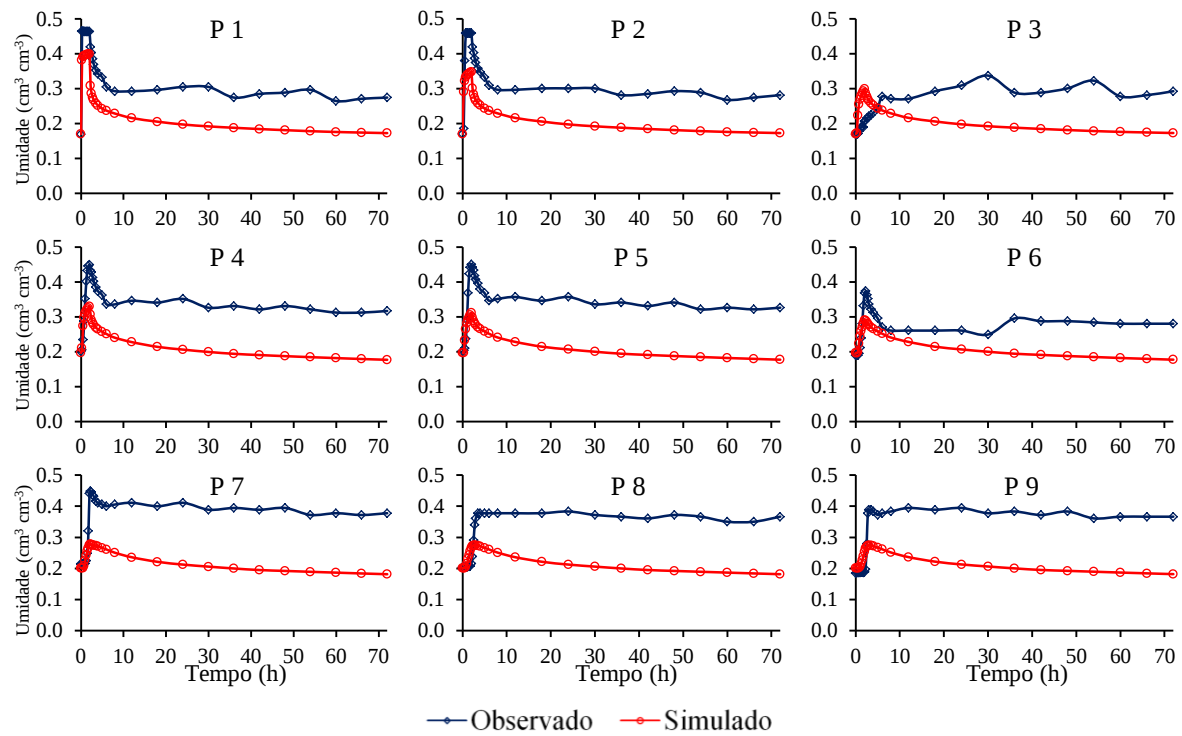


Figura C6, Valores da distribuição e redistribuição de água no solo em função do tempo, obtidos com os tensiômetros digitais e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para vazão de 2,50 L h⁻¹ e concentração de potássio de 0,750 mg cm⁻³

Tabela C2, Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição e da redistribuição de água no solo, para concentração de potássio de 0,750 mg cm⁻³

Ponto de observação	Vazão					
	L h ⁻¹					
	0,72		1,52		2,50	
	REQM	EAM	REQM	EAM	REQM	EAM
cm ³ cm ⁻³						
1	0,1312	0,1286	0,0889	0,0832	0,0891	0,0858
2	0,0967	0,0849	0,0961	0,0897	0,1013	0,0984
3	0,0492	0,0392	0,0751	0,0680	0,0848	0,0750
4	0,1211	0,1049	0,1036	0,0965	0,1126	0,1045
5	0,1092	0,0879	0,0926	0,0833	0,1204	0,1108
6	0,1075	0,0862	0,0949	0,0846	0,0638	0,0548
7	0,0918	0,0724	0,1030	0,0793	0,1482	0,1294
8	0,0747	0,0587	0,1017	0,0758	0,1163	0,0958
9	0,0688	0,0509	0,1044	0,0794	0,1246	0,1062
Média	0,0945	0,0793	0,0956	0,0822	0,1068	0,0956

APÊNDICE D - Resultados do transporte de potássio no solo

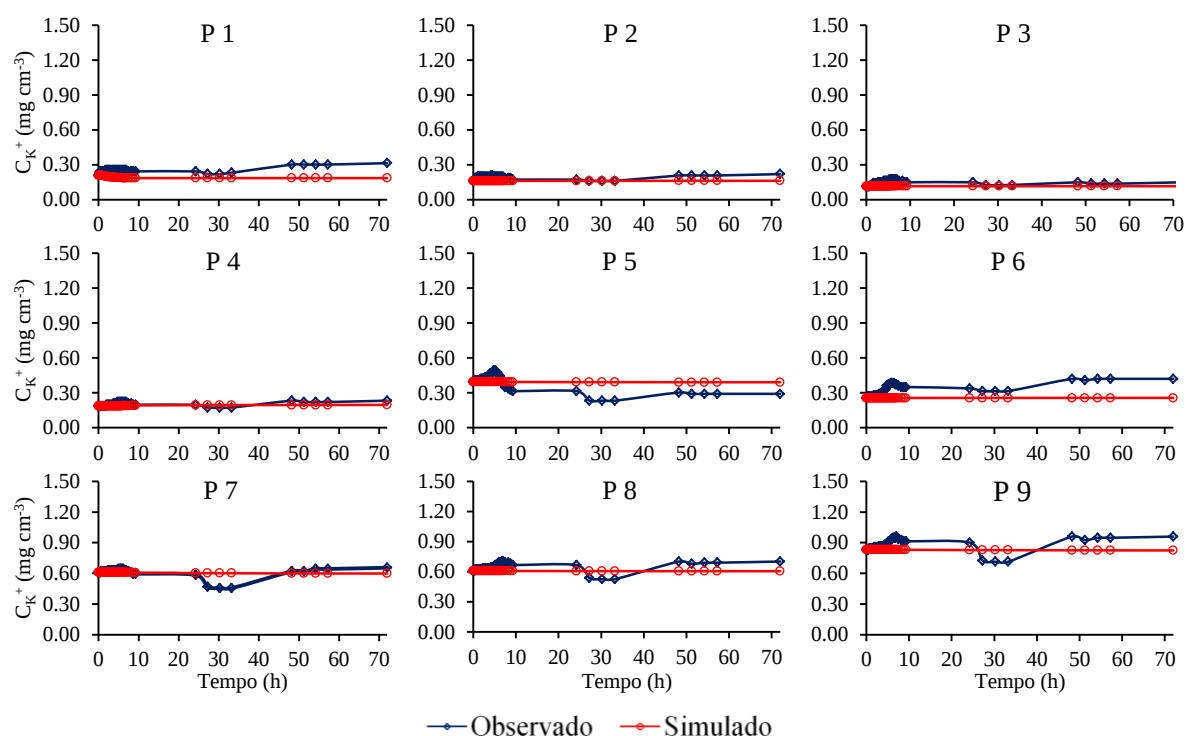


Figura D1, Valores de concentração de potássio, durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de $0,165 \text{ mg cm}^{-3}$ e vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$

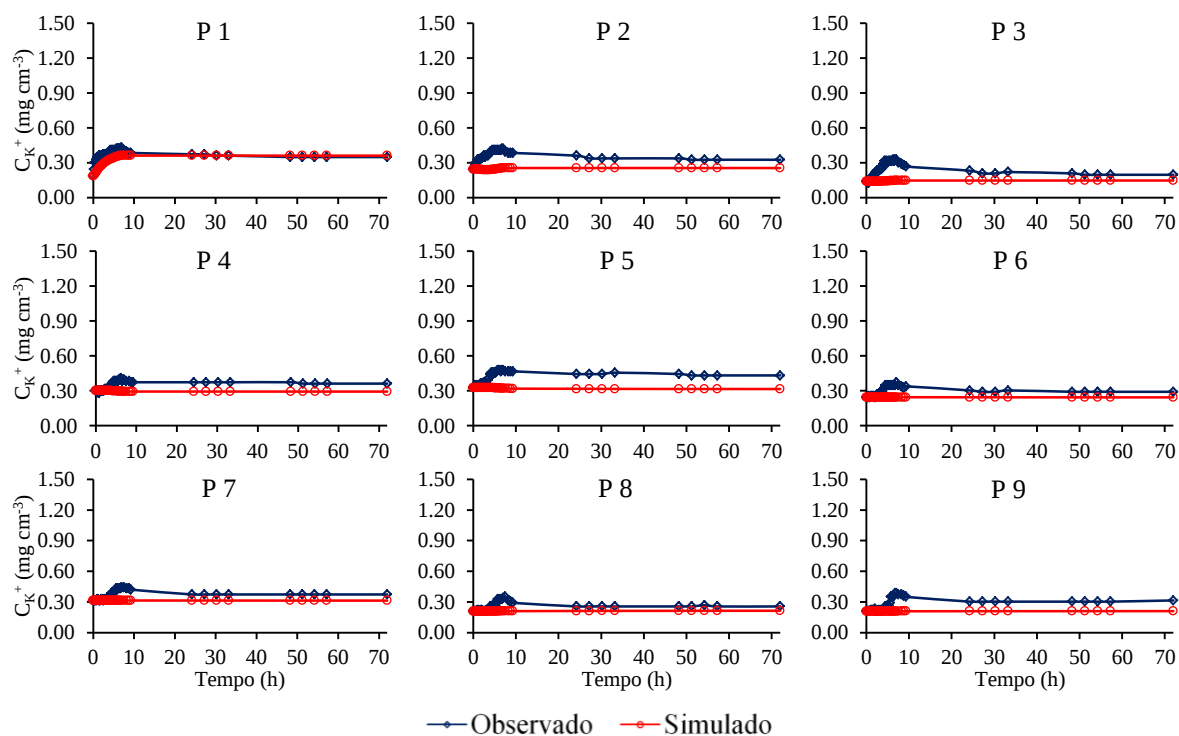


Figura D2, Valores de concentração de potássio, durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$ e vazão de $0,72 \text{ L h}^{-1}$

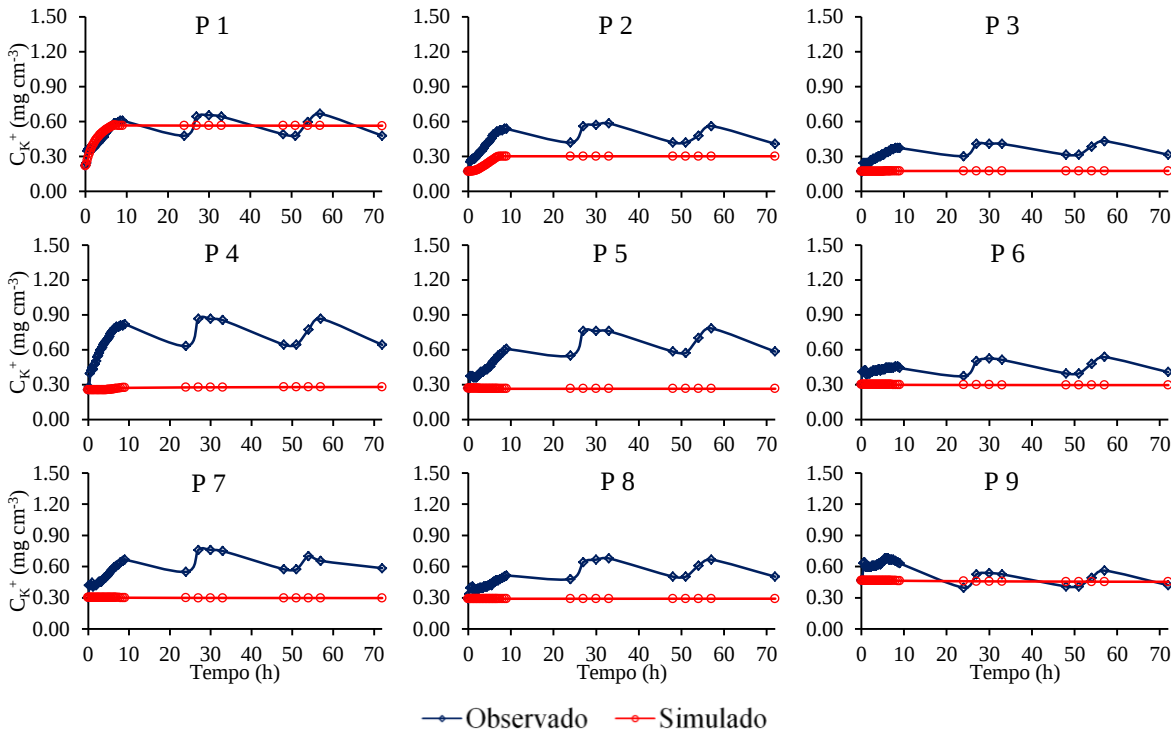


Figura D3, Valores de concentração de potássio, durante a distribuição e a redistribuição do potássio no solo, em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de 0,750 mg cm⁻³ e vazão de 0,72 L h⁻¹

Tabela D1, Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na simulação da distribuição e da redistribuição do potássio no solo, para vazão de 0,72 L h⁻¹

Pontos de observação	Concentração de potássio					
	mg cm ⁻³					
	0,165		0,450		0,750	
	REQM	EAM	REQM	EAM	REQM	EAM
mg cm ⁻³						
1	0,0675	0,0626	0,0655	0,0563	0,0494	0,0407
2	0,0337	0,0309	0,1214	0,1132	0,1759	0,1640
3	0,0369	0,0323	0,1163	0,1003	0,1479	0,1359
4	0,0221	0,0182	0,0676	0,0555	0,4149	0,3866
5	0,0721	0,0588	0,1110	0,0985	0,2578	0,2226
6	0,0916	0,0761	0,0695	0,0573	0,1354	0,1289
7	0,0449	0,0302	0,0708	0,0553	0,2573	0,2339
8	0,0460	0,0361	0,0645	0,0477	0,1842	0,1619
9	0,0626	0,0485	0,0904	0,0682	0,1486	0,1365
Média	0,0530	0,0437	0,0863	0,0725	0,1968	0,1790

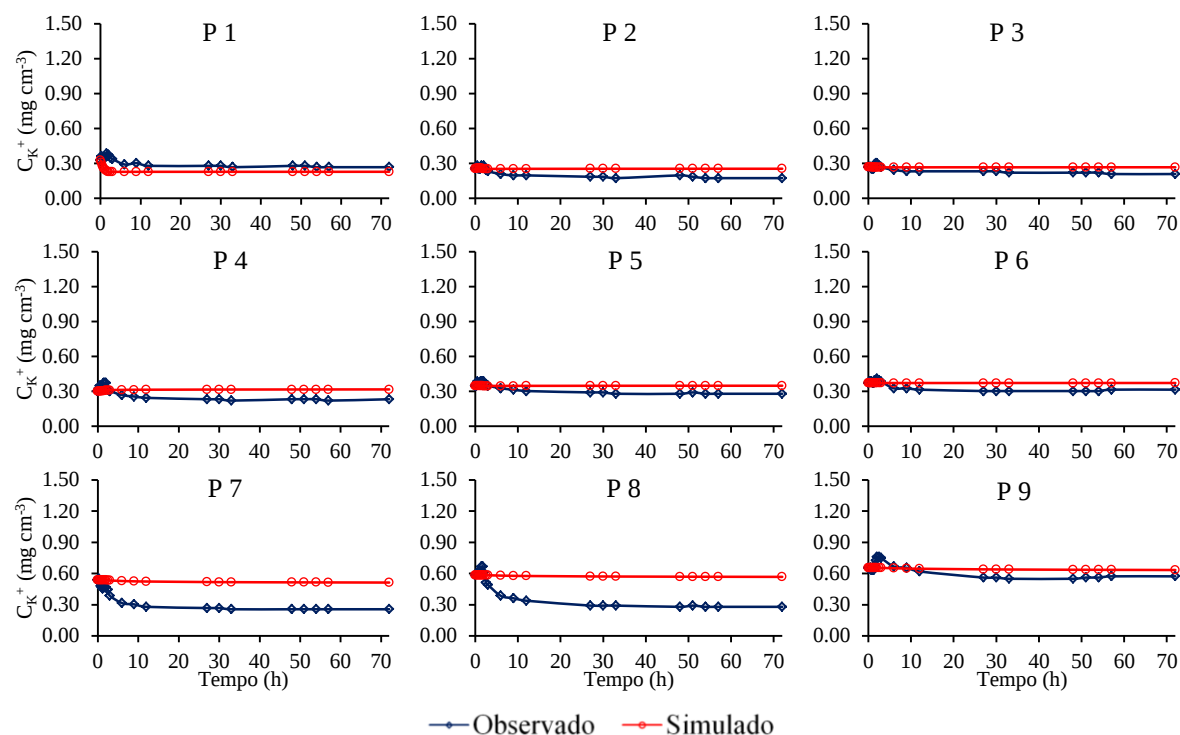


Figura D4, Valores da distribuição e redistribuição do potássio no solo em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de $0,165 \text{ mg cm}^{-3}$ e vazão de $2,50 \text{ L h}^{-1}$

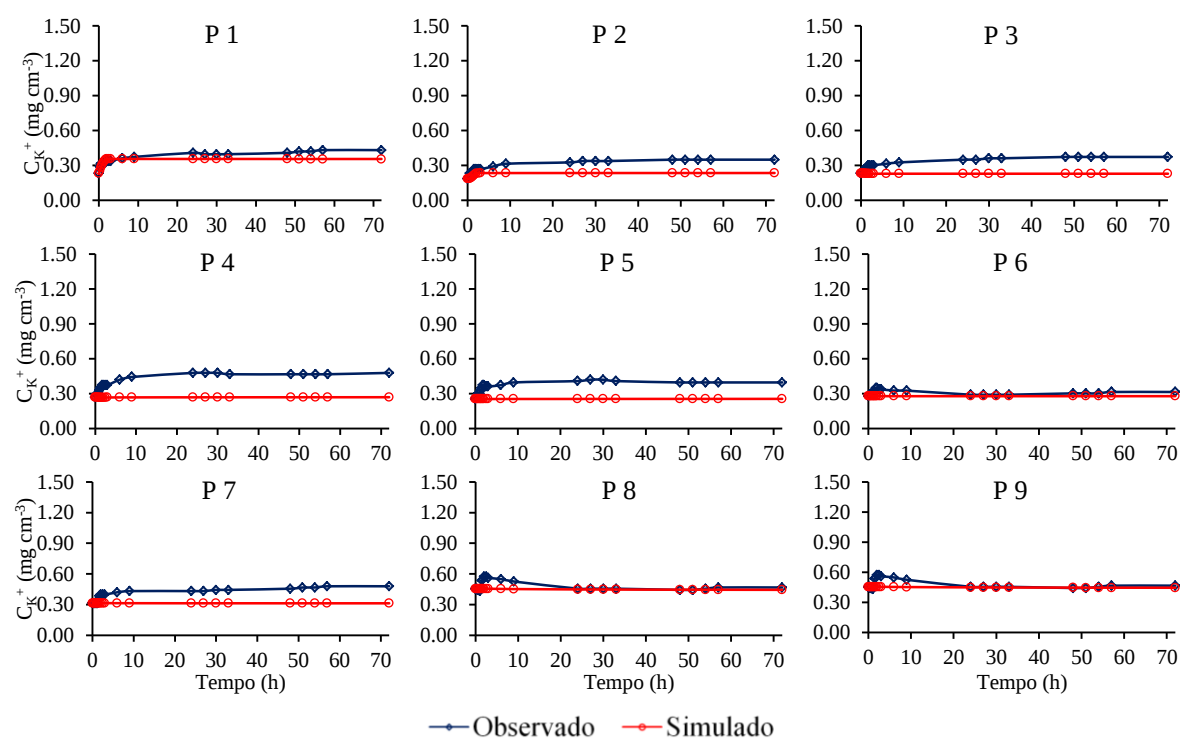


Figura D5, Valores da distribuição e redistribuição do potássio no solo em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de $0,450 \text{ mg cm}^{-3}$ e vazão de $2,50 \text{ L h}^{-1}$

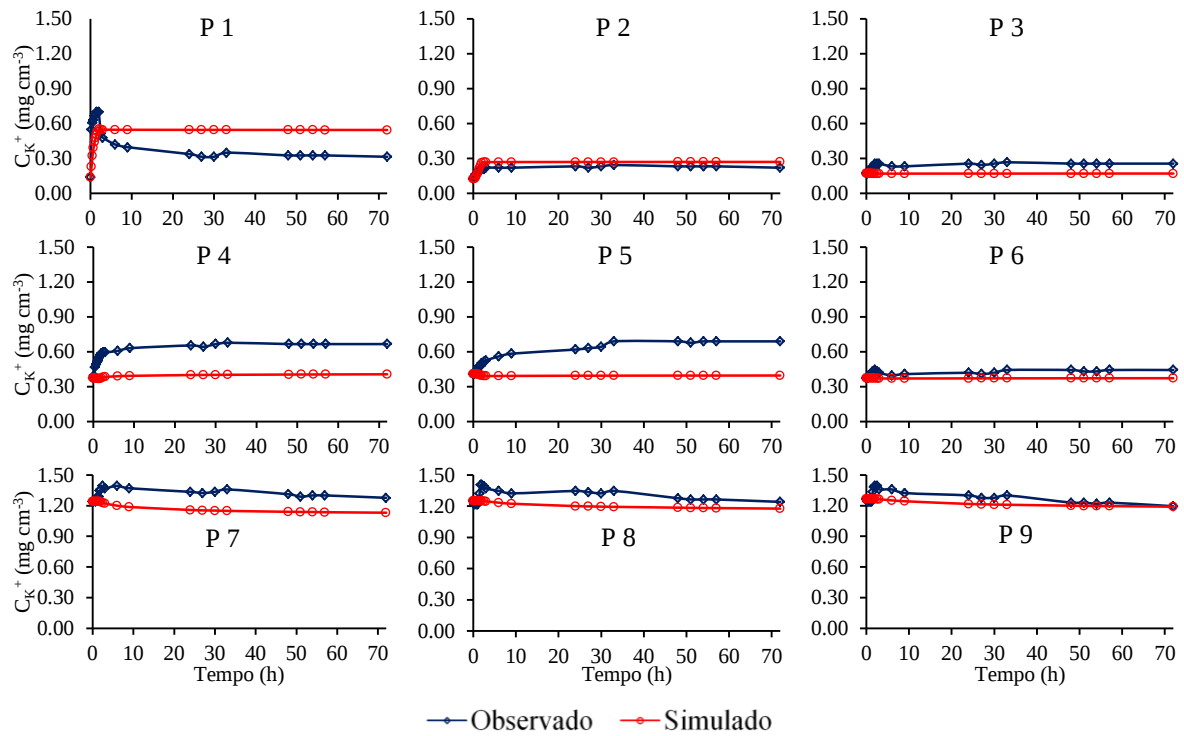


Figura D6, Valores da distribuição e redistribuição do potássio no solo em função do tempo, obtidos com os sensores de CE e simulados com o modelo HYDRUS 2D, para concentração de potássio de 0,750 mg cm⁻³ e vazão de 2,50 L h⁻¹

Tabela D2, Análise do desempenho do modelo HYDRUS 2D na distribuição e redistribuição do potássio no solo, para vazão de 2,50 L h⁻¹

Pontos de observação	Concentração de potássio					
	mg cm ⁻³					
	0,165		0,450		0,750	
	REQM	EAM	REQM	EAM	REQM	EAM
mg cm ⁻³						
1	0,2015	0,1874	0,0398	0,0316	0,0827	0,0732
2	0,0364	0,0326	0,0773	0,0679	0,0496	0,0398
3	0,0697	0,0629	0,0987	0,0861	0,0331	0,0275
4	0,2124	0,1980	0,1492	0,1312	0,0650	0,0585
5	0,1915	0,1580	0,1178	0,1063	0,0452	0,0392
6	0,0503	0,0453	0,0366	0,0307	0,0458	0,0378
7	0,1374	0,1168	0,1041	0,0847	0,1832	0,1551
8	0,1017	0,0892	0,0568	0,0375	0,1930	0,1546
9	0,0704	0,0578	0,0565	0,0369	0,0626	0,0517
Média	0,1190	0,1053	0,0819	0,0681	0,0845	0,0708