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

Infiltração da água em amostras de solo indeformadas e remodeladas em colunas utilizando modelos determinísticos

Verena Benício de Oliveira

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutora em Ciências. Área de concentração: Solos
e Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2018**

Verena Benício de Oliveira
Engenheira Agrônoma

**Infiltração da água em colunas de solo indeformadas e remodeladas em
colunas utilizando modelo determinísticos**

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO LEONEL LIBARDI**

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutora em Ciências. Área de concentração: Solos
e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Oliveira, Verena Benício

Infiltração da água em amostras de solo indeformadas e remodeladas em colunas utilizando modelos determinísticos / Verena Benício de Oliveira. Piracicaba, 2018.

82 p.

Tese (Doutorado) - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Estrutura do solo 2. Amostragem do solo 3. Atenuação por raios gama 4. Perfil de conteúdo de água do solo B. O. V. Infiltração da água em amostras de solo indeformadas e remodeladas em colunas utilizando modelos determinísticos

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Elza e Valdemir,
por todo amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, amigo de todas as horas.

À minha família, minha base: meus pais, meus irmãos Vanessa e Vinícius, minha sobrinha Manuela e minha avó Olga, pelo incentivo, apoio, amor e cuidado.

Ao Professor Laércio Alves de Carvalho, por me incentivar a continuar os estudos após a graduação.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – Brasil.

Ao querido Professor e Orientador, Paulo Leonel Libardi, por seu apoio, incentivo, amizade e paciência, fundamentais para a elaboração desta Tese.

Ao Professor Quirijn de Jong van Lier, pela disponibilidade do Laboratório de Radiação Gama, essencial para este estudo.

Aos Professores Jarbas Honório de Miranda e Sergio Oliveira Moraes, pelos ensinamentos e experiências compartilhadas.

Aos amigos e colegas de Pós-Graduação, Fernando, Márcio, Aline, Camila, Gabriela, Tamirys e Thaís, pelos momentos de alegria compartilhados.

Ao amigo Ismael, pelo apoio integral na execução de todas as fases deste trabalho.

Aos funcionários Antonio, Francisco Dias e Francisco de Oliveira, pelo auxílio nos dias de campo e manufatura de equipamentos.

Aos funcionários da biblioteca, meus sinceros agradecimentos.

Aos amigos Laiane, Flávia e Rony pela amizade, paciência, incentivo e agradável convivência diária.

Ao Flávio, por todo apoio, amor, carinho e compreensão durante esses anos.

EPÍGRAFE

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”

Chico Xavier

SUMÁRIO

RESUMO	07
ABSTRACT	08
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Movimentação da água no solo	15
2.2. Equações de infiltração da água no solo	16
2.3. Radiação Gama	19
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Solos utilizados	23
3.2. Delineamento Experimental	24
3.3. Amostragem e preparo da amostra	25
3.4. Acondicionamento das amostras de solo com estrutura deformada	26
3.5. Acondicionamento das amostras de solo com estrutura indeformada	27
3.6. Procedimento experimental durante a infiltração	31
3.7. Análise dos Resultados	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5. CONCLUSÕES	77
REFERENCIAS	79

RESUMO

Infiltração da água em amostras de solo indeformadas e remodeladas em colunas utilizando modelos determinísticos

Define-se infiltração da água no solo como a entrada da água através da superfície do solo. O processo de infiltração separa, assim, quanto da precipitação pluvial, por exemplo, flui sobre a superfície do solo e quanto flui abaixo da superfície do solo, esta última tanto vertical como horizontalmente. Diversos fatores interferem neste processo, podendo-se destacar aqueles relacionados ao tipo de solo e declividade do terreno e às características do solo e da cobertura vegetal, bem como aquelas relacionadas à precipitação. São conhecidas diversas equações de infiltração, propostas para expressar a lei da infiltração da água em solos, que é o gráfico da taxa de infiltração da água com o tempo. São equações desenvolvidas empiricamente ou a partir de considerações físicas e aplicam-se somente a solos homogêneos e que permanecem homogêneos durante o processo. Dados da literatura têm mostrado que para nossos solos o avanço da frente de molhamento no processo de infiltração vertical também é proporcional à raiz quadrada do tempo, como a solução da equação de Richards obtida por Philip para a infiltração horizontal, porém com uma velocidade maior. Dado este fato, levanta-se a hipótese de utilizar a equação proposta por Philip para a infiltração na direção horizontal também para a direção vertical, em colunas com amostra de solo indeformada e com amostra de solo homogeneamente remodelada. Este trabalho trata do processo da infiltração de água no solo, especificamente a vertical descendente. Pretendeu-se avaliar as equações clássicas da lei da infiltração em amostras homogêneas de três solos estruturalmente distintos com estrutura deformada e indeformada. O experimento foi conduzido em laboratório, em nove colunas com amostras de três solos com características distintas, sendo um Cambissolo Háplico, um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico e um Nitossolo Vermelho eutrófico. As curvas da taxa de infiltração foram determinadas em laboratório e o conteúdo de água foi determinado pela técnica da atenuação gama. A equação proposta por Kostiakov para a lei da infiltração ajustou-se muito bem (máximo R^2 para todos os solos, com exceção da coluna indeformada do Nitossolo) por praticamente coincidir com a equação de ajuste estatístico dos dados. Já o mesmo não ocorreu com a equação proposta por Horton para a qual os coeficientes de determinação variaram de 0,528 a 0,898 (sem considerar a amostra do Nitossolo indeformada). Com relação ao modelo de Green & Ampt que, ao contrário das equações de Kostiakov e Horton que são modelos empíricos, pode-se dizer tratar-se de um modelo semi-analítico, os ajustes dos dados também não foram muito bons (R^2 variando de 0,802 a 0,898, sem considerar a amostra do Nitossolo indeformada). O modelo quase todo analítico de Philip, baseado na solução da equação de Richards para a direção horizontal, ajustou-se muito bem aos dados desta pesquisa que foi desenvolvida para a direção vertical descendente, visto que o gráfico da posição de frente de molhamento em relação a fonte de água em função da raiz quadrada do tempo de infiltração resultou numa linha reta com alto coeficiente de determinação para todas as amostras (R^2 maior que 0,99 para as deformadas e R^2 maior que 0,95 para as deformadas). Todos os modelos apresentaram um ajuste ruim (R^2 menor que 0,1) para a coluna indeformada do solo 3 (Nitossolo). Provavelmente devido à presença de bioporo no interior da coluna, com fluxo preferencial da água ou também ao processo de amostragem que é muito dificultado devido a forte estruturação deste solo.

Palavras-chave: Estrutura do solo; Amostragem do solo; Atenuação por raios gama; Perfil de conteúdo de água do solo

ABSTRACT

Infiltration of water in undisturbed and remodeling soil samples in columns using deterministic models

Soil water infiltration is defined as the entry of water through the soil surface. The infiltration process thus separates how much of the rainfall, for example, flows over the soil surface and how much it flows below the surface of the soil, the latter both vertically and horizontally. Several factors interfere in this process, being possible to highlight those related to the type of soil and slope of the terrain and to the characteristics of the soil and vegetation cover, as well as those related to precipitation. Several infiltration equations are known, proposed to express the law of water infiltration in soils, which is the graph of the infiltration rate of water as a function of time. They are equations developed empirically or from physical considerations and apply only to homogeneous soils that remain homogeneous during the process. Literature data have shown that for our soils the advance of the wetting front in the vertical infiltration process is also proportional to the square root of the time, as the solution of the Richards equation obtained by Philip for horizontal infiltration, but with a higher velocity. Given this fact, the hypothesis is proposed to use the equation proposed by Philip for the infiltration in the horizontal direction also for the vertical direction, in columns with undisturbed soil sample and with homogeneously remodeled soil sample. This work deals specifically with the process of vertical descending soil water infiltration. It was intended to evaluate the classical equations of the infiltration law in homogeneous samples of three structurally distinct soils with disturbed and undisturbed structure. The experiment was carried out in a laboratory, in nine columns with three soils distinct characteristics, being a Haplic Cambisol, a Dystrophic Yellow Red Latosol and an eutrophic Red Nitosol. The infiltration rate curves were determined in the laboratory and the water content was determined by the gamma ray attenuation technique. The equation proposed by Kostiaikov for the infiltration law adjusted very well (maximum R^2 for all soils, except for the undisturbed Nitosol column) since it practically coincide with the equation of statistical fit of the data. The same did not occur with the equation proposed by Horton for which the coefficients of determination ranged from 0,528 to 0.898 (not considering the undisturbed column of Nitosol. In relation to the Green & Ampt model, unlike the Kostiaikov and Horton equations that are empirical models, it can be said that it is a semi-analytical model, the data adjustments were also not good changing from 0,802 to 0,848 also not considering the undisturbed Nitosol. Philip's almost all-analytical model, based on the solution of the Richards equation for the horizontal direction, fitted very well the data from this work that were conducted in the downward vertical direction, since the graph of the wet facing front position the water source as a function of the square root of the infiltration time resulted in a straight line with a high coefficient of determination for all samples (R^2 greater than 0.99 for the deformed and R^2 greater than 0.95 for the deformed ones). All models presented a poor fit (R^2 less than 0.01) for the undisturbed soil 3 column (Nitosol). Probably due to the presence of biopore inside the column, with preferential flow of water or to the sampling process that is very difficult due to the strong structure of this soil.

Keywords: Soil structure; Soil sampling; Gamma ray attenuation; Soil water content profile

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Configuração das colunas experimentais (cotas em cm)	25
Figura 2. Montagem das colunas de solo homogêneas e estratificadas	27
Figura 3. Escultura de solo feita a partir do horizonte diagnóstico do Latossolo .	28
Figura 4. Suporte e anel encaixados na coluna de Nitossolo	29
Figura 5. Amostra indeformada de Cambissolo.....	29
Figura 6. Coluna de solo indeformada com espuma de poliuretano nas laterais	30
Figura 7. Frente de molhamento durante o procedimento experimental.....	31
Figura 8. Distribuição do tamanho de poros a partir de amostras de estrutura indeformada do horizonte diagnóstico dos três solos estudados	38
Figura 9. Distribuição do tamanho de poros a partir de amostras de estrutura deformada do horizonte diagnóstico dos três solos estudados	39
Figura 10. Distribuição do tamanho de poros a partir de amostras de estrutura deformada dos três horizontes do Cambissolo.....	39
Figura 11. Distribuição do tamanho de poros a partir de amostras de estrutura deformada dos três horizontes do Latossolo	40
Figura 12. Distribuição do tamanho de poros a partir de amostras de estrutura deformada dos dois horizontes do Nitossolo	40
Figura 13. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea	42
Figura 14. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 2 (Latossolo), coluna homogênea	42
Figura 15. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea	43
Figura 16. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada.....	43
Figura 17. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 2 (Latossolo), coluna estratificada.....	44
Figura 18. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada.....	44
Figura 19. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada	45
Figura 20. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 2 (Latossolo), coluna indeformada	46
Figura 21. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada	46
Figura 22. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiaikov em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea.....	47

Figura 23. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna homogênea.....	47
Figura 24. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea	48
Figura 25. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada	48
Figura 26. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna estratificada.....	49
Figura 27. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada	49
Figura 28. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada	50
Figura 29. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna indeformada.....	50
Figura 30. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada	51
Figura 31. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea	51
Figura 32. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna homogênea.....	52
Figura 33. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea	52
Figura 34. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada	53
Figura 35. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna estratificada.....	53
Figura 36. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada	54
Figura 37. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada	54
Figura 38. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna indeformada.....	55
Figura 39. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada	55
Figura 40. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea	56
Figura 41. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna homogênea.....	56
Figura 42. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea	57
Figura 43. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada	57
Figura 44. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna estratificada.....	58
Figura 45. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada	58
Figura 46. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada	59
Figura 47. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna indeformada.....	59

Figura 48. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada.....	60
Figura 49. Distância da fonte da solução à frente de molhamento versus a raiz quadrada do tempo para as colunas homogêneas, solos 1 (Cambissolo) (a), 2 (Latossolo) (b) e 3 (Nitossolo) (c).....	61
Figura 50. Distância da fonte da solução à frente de molhamento versus a raiz quadrada do tempo para as colunas estratificadas, solos 1 (Cambissolo) (a), 2 (Latossolo) (b) e 3 (Nitossolo) (c).....	62
Figura 51. Distância da fonte da solução à frente de molhamento versus a raiz quadrada do tempo para as colunas indeformadas, solos 1 (Cambissolo) (a), 2 (Latossolo) (b) e 3 (Nitossolo) (c).....	63
Figura 52. Perfis de conteúdo de água do solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea	64
Figura 53. Perfis de conteúdo de água do solo 2 (Latossolo), coluna homogênea	64
Figura 54. Perfis de conteúdo de água do solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea	65
Figura 55. Perfis de conteúdo de água do solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada.....	65
Figura 56. Perfis de conteúdo de água do solo 2 (Latossolo), coluna estratificada	65
Figura 57. Perfis de conteúdo de água do solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada.	66
Figura 58. Perfis de conteúdo de água do solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada	66
Figura 59. Perfis de conteúdo de água do solo 2 (Latossolo), coluna indeformada	66
Figura 60. Perfis de conteúdo de água do solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada	67
Figura 61. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea.....	67
Figura 62. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna homogênea	68
Figura 63. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea.....	68
Figura 64. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada	69
Figura 65. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna estratificada.....	69
Figura 66. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada	70
Figura 67. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada.....	70
Figura 68. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna indeformada	71
Figura 69. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição granulométrica, classe textural e matéria orgânica dos diferentes horizontes do Cambissolo, Latossolo e Nitossolo.....	34
Tabela 2. Densidade do solo, densidade de sólidos do solo e porosidade total para os diferentes horizontes do Latossolo, Cambissolo e Nitossolo.....	35
Tabela 3. Parâmetros do modelo de Kostiakov ajustados aos dados da taxa de infiltração medida em função do tempo, para os três solos, colunas homogênea, estratificada e indeformada.....	70
Tabela 4. Parâmetros do modelo de Horton ajustados aos dados da taxa de infiltração medida em função do tempo para dos três solos, colunas homogênea, estratificada e indeformada.....	71
Tabela 5. Parâmetros do modelo de Green & Ampt ajustados aos dados da taxa da infiltração medida em função do tempo para os três solos, colunas homogênea, estratificada e indeformada.....	71
Tabela 6. Parâmetros do modelo de Philip ajustados aos dados da taxa da infiltração medida em função do tempo para os três solos, colunas homogênea, estratificada e indeformada.....	72
Tabela 6. Coeficiente de determinação da taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos.....	73

1. INTRODUÇÃO

Define-se infiltração da água no solo como a entrada da água através da superfície do solo. O processo de infiltração separa, assim, quanto da precipitação pluvial, por exemplo, flui sobre a superfície do solo e quanto flui abaixo da superfície do solo, esta última tanto vertical como horizontalmente. Diversos fatores interferem neste processo, podendo-se destacar aqueles relacionados ao tipo de solo e declividade do terreno e às características do solo e da cobertura vegetal, bem como aquelas relacionadas à precipitação.

É um processo importante dentro do ciclo hidrológico, afetando diretamente o escoamento superficial, com implicações para projetos de irrigação, erosão e conservação do solo e da água. São conhecidas diversas equações de infiltração, propostas para expressar a lei da infiltração da água em solos, que é o gráfico da taxa de infiltração da água com o tempo. São equações desenvolvidas empiricamente ou a partir de considerações físicas e aplicam-se somente a solos homogêneos e que permanecem homogêneos durante o processo.

Classicamente, existem as seguintes equações utilizadas para o ajuste dos dados da lei da infiltração: A equação de Green e Ampt (1911) que é uma equação analítica, desenvolvida com base na equação de Darcy-Buckingham; a equação de Kostiaikov (1932) e a equação de Horton (1940), que são totalmente empíricas. Já as equações de Philip (1957), para a infiltração horizontal e para a infiltração vertical descendente, baseiam-se na solução da equação diferencial geral que rege o movimento da água no solo (ou equação de Richards).

A hipótese deste trabalho baseia-se no fato de que os modelos desenvolvidos para o estudo da infiltração da água no solo levam em consideração que o solo é homogêneo e que ele permanece assim durante todo o processo, o que não reflete as condições reais de campo. Assim, propõe-se que a infiltração da água no solo acontece de modo diferente quando utilizadas amostras com estrutura preservada. Além disso, dados da literatura têm mostrado que para nossos solos o avanço da frente de molhamento no processo de infiltração vertical também é proporcional à raiz quadrada do tempo, como a solução da equação de Richards obtida por Philip para a infiltração horizontal, porém com uma velocidade maior. Dado este fato, levanta-se a hipótese de utilizar a equação proposta por Philip para a infiltração na

posição horizontal também para a posição vertical, em colunas com amostra de solo indeformada e com amostra de solo homogeneamente remodelado.

Dessa forma, este trabalho trata do processo da infiltração de água no solo, especificamente a vertical descendente. Pretendeu-se avaliar as equações clássicas da lei da infiltração em amostras homogêneas de três solos estruturalmente distintos com estrutura deformada e indeformada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Movimentação da água no solo

A quantificação do movimento da água no solo sob condição de regime estacionário é dada pela equação de Darcy-Buckingham a qual, para uma situação em que o movimento pode se dar em todas as direções e o solo é isotrópico com relação à condutividade hidráulica, é escrita como:

$$\vec{q} = -K(\theta)\vec{\nabla}\phi_t \quad (1)$$

em que $\vec{q}$ é o vetor densidade de fluxo da água no solo (m s^{-1}), K a condutividade hidráulica do solo (m s^{-1}), função do conteúdo de água no solo θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e $\vec{\nabla}\phi_t$ o vetor gradiente de potencial total. O sinal negativo indica que o sentido do vetor $\vec{q}$ é contrário ao sentido do vetor $\vec{\nabla}\phi_t$.

No caso da infiltração da água (ou solução) no solo, o potencial total é igual à soma do potencial gravitacional ϕ_g (m) e do potencial mátrico ϕ_m (m), o qual é função de θ , isto é, $\phi_m(\theta)$. Levando em conta esta dependência funcional entre ϕ_m e θ , se ela for única a equação (1) se transforma em:

$$\vec{q} = -\left[K(\theta)\frac{d\phi_m}{d\theta}\vec{\nabla}\theta + K(\theta)\vec{\nabla}\phi_g \right]$$

ou,

$$\vec{q} = -\left[D(\theta)\vec{\nabla}\theta + K(\theta)\vec{\nabla}\phi_g \right] \quad (2)$$

sendo a função $D(\theta)$, isto é, a difusividade da água no solo D ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) em função do conteúdo de água θ dada por:

$$D(\theta) = K(\theta)\frac{d\phi_m}{d\theta} \quad (3)$$

Considerando-se agora o movimento da água sob condição de regime transiente, há necessidade de utilização da equação da continuidade, dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{q} \quad (4)$$

em que t é o tempo (s) e o ponto indicando o produto escalar do vetor $\vec{\nabla}$ pelo vetor $\vec{q}$.

Nestas condições, portanto, a substituição da equação (2) na equação (4) resulta na equação (5) abaixo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot \left[D(\theta) \vec{\nabla} \theta + K(\theta) \vec{\nabla} \phi_g \right] , \quad (5)$$

que é a equação diferencial geral que rege o movimento da água em solo homogêneo, isto é, isotrópico com relação a $K(\theta)$ e $D(\theta)$ e com curva de retenção $\phi_m(\theta)$ unívoca. A equação (5) é também conhecida como equação de Richards.

2.2 Equações de infiltração da água no solo

Históricamente pode-se dizer que o primeiro modelo que aparece na literatura é a equação de Green & Ampt (1911). Tal equação pode ser considerada um modelo analítico, tendo sido desenvolvida com base na equação de Darcy-Buckingham, assumindo que o perfil do conteúdo de água se apresenta como uma curva em formato de degrau e que o potencial mátrico na frente de molhamento permanece sempre o mesmo e igual ao seu valor antes da infiltração, situação impossível na prática. Estas suposições simplificam a equação de fluxo, tornando possível uma solução analítica. A equação obtida por estes autores relaciona o tempo de infiltração t com a infiltração acumulada I :

$$t = \frac{I - C \ln \left(1 + \frac{I}{C} \right)}{A} , \quad (6)$$

sendo A e C constantes do modelo, determinadas a partir das equações (7) e (8), através da regressão linear de i em função de $1/L$:

$$i = \frac{dI}{dt} = A + \frac{B}{L} \quad (7)$$

$$C = \frac{(\Delta\theta)B}{A} \quad (8)$$

A equação de Green-Ampt é uma das equações de infiltração mais utilizadas em modelos hidrológicos e de erosão (Govindaraju et al., 1996, Barry et al., 2005, Chen e Young, 2006, Hugo e Huang, 2007, Gowdish e Carpena, 2009). Este modelo foi aplicado inicialmente para solo seco, uniforme e de textura arenosa (Hillel e Gardner, 1970). O modelo original de infiltração foi estendido a inúmeras situações, apresenta bons resultados em solos onde a densidade aumenta com a profundidade (Childs e Baibordi, 1969), em solos onde a condutividade hidráulica aumenta com a profundidade (Bower, 1976) e em solos com encrostamento superficial (Hillel & Gardner, 1970; Ahuja, 1974). Bower (1969) mostrou que o teor de água inicial pode não ser uniforme e Morel-seytoux e Khanji (1974) verificaram que a fórmula de Green-Ampt para determinação da infiltrabilidade não variava quando se considera simultaneamente o movimento do ar e da água.

Mein e Larson (1973) modificaram o modelo original para simular a infiltração durante um evento de precipitação constante, essa forma do modelo é comumente chamada de modelo Green – Ampt Mein – Larson (GAML). Kargas e Kerkides (2011) calcularam um perfil de infiltração tipo Green-Ampt usando códigos de HYDRUS-1D (Simunek et al., 1998). Kale e Sahoo (2011) publicaram recentemente uma revisão de todas as variantes do modelo Green-Ampt. Embora essas simplificações permitam calcular analiticamente quantidades relevantes, elas podem levar a desvios significativos da realidade (Herrada et al., 2014; Mao et al., 2016).

Posteriormente, tem-se a equação de Kostiaikov (1932) a qual é uma equação totalmente empírica que relaciona a taxa de infiltração i com o tempo de infiltração t :

$$i = \dot{i}_i t^{-a} , \quad (9)$$

sendo i_i a taxa de infiltração no início da infiltração e a um parâmetro da equação.

A equação de Kostiakov é de interesse para diversas áreas, porque é uma equação simples, de dois parâmetros com valores fáceis de determinar a partir de dados de infiltração medidos, e devido ao seu ajuste razoável a dados de infiltração para muitos solos em curto período de tempo (Naeth et al., 1991). Esses modelos também são amplamente utilizados para irrigação de superfície e sulco (Tsakiris, 1985; Serralheiro, 1995; Holzapfel et al., 2004; Al-Kayssi e Mustafa, 2016).

A principal limitação do modelo de Kostiakov é que a taxa de infiltração aproxima-se de zero à medida que o tempo tende para infinito, enquanto a maioria dos solos tendem a ter uma taxa de infiltração estabilizada com valor constante maior que zero após certo tempo de infiltração (Silva, 2007). O modelo de Kostiakov-Lewis foi desenvolvido para suprir as limitações do modelo original, ou seja, para um tempo tendendo ao infinito, isto é, não mais tendendo a zero, mas sim para a taxa de infiltração básica.

Ainda na linha do tempo, classicamente, para interpretar a lei da infiltração da água no solo, a equação de Horton (1940) é bastante aceita pela sua simplicidade, é empírica e assume que a infiltração inicia com uma taxa inicial decrescente e exponencial com o tempo:

$$i = i_f + (i_i - i_f)e^{-Ct}, \quad (10)$$

em que i_f é a taxa de infiltração final constante, i_i a taxa de infiltração no início do experimento, C é uma constante da equação e e a base dos logaritmos neperianos.

O modelo de Horton tem grande vantagem para explicar a lei da infiltração por que se baseia em uma teoria física de escoamento em um meio poroso, descrita pela equação de Darcy-Buckingham. Segundo esse modelo, a redução da taxa de infiltração com o tempo é fortemente controlada por fatores relacionados à superfície do solo, tais como o selamento superficial e fenômenos de expansão e contração do solo (Prevedelo, 1996). A equação de Horton, sob condição de chuva simulada em área de plantio direto e plantio convencional mostrou-se mais adequada para a estimativa da taxa de infiltração da água, quando comparada ao modelo Kostiakov-Lewis (Alves Sobrinho et al., 2003).

Com os modelos de Philip (1955) e Philip (1957), foram introduzidos na ciência do solo os termos infiltração horizontal e infiltração vertical, respectivamente.

Tais modelos baseiam-se no perfil de conteúdo de água real e foram desenvolvidos a partir de uma solução da equação diferencial de Richards (equação 5).

Para o caso da infiltração horizontal, o gradiente de potencial gravitacional é evidentemente nulo e a equação de Richards (5) se torna:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (11)$$

Para se proceder experimentalmente à infiltração horizontal, utiliza-se uma coluna de solo homogêneo com um conteúdo de água inicial constante θ_0 na qual a água é aplicada e um conteúdo de água θ_1 é mantido na extremidade da coluna em $x=0$ durante a infiltração. Com isso, o conteúdo de água θ será função do ponto considerado x e do tempo t , conforme indica a solução da equação (11) a qual possui as seguintes condições inicial e de contorno, em função do procedimento experimental acima descrito:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \theta_0, & x &> 0, & t &= 0 \\ \theta &= \theta_1, & x &= 0, & t &> 0 \\ \theta &= \theta_0, & x &\rightarrow \infty, & t &> 0 \end{aligned} \right\} \quad . \quad (12)$$

A solução parcial da equação (10), sujeita as condições (12), obtida por Philip (1955) pela técnica das variáveis separáveis, foi:

$$x = \eta(\theta) \sqrt{t} \quad (13)$$

em que $\eta(\theta)$ é chamada de variável de Boltzmann e pode ser obtida experimentalmente ou por solução numérica como fez Philip (1955) a partir do conhecimento da função $D(\theta)$.

A partir do perfil do conteúdo de água obtido após um determinado tempo de infiltração, Philip (1955) obteve sua equação para a lei da infiltração horizontal:

$$i = \frac{C}{2\sqrt{t}} \quad (14)$$

em que a constante C foi apresentada por Philip como sortividade do solo, termo relacionado com a capacidade do solo em absorver água, a qual é dada por:

$$C = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \eta(\theta) d\theta \quad (15)$$

No caso da infiltração vertical, evidentemente a gravidade tem que ser considerada e portanto, a equação (5) se torna:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \right] \quad (16)$$

visto que $\vec{\nabla} \phi_g = 1$, quando se expressa o potencial gravitacional ϕ_g em energia/peso ou $J/N = m$ no Sistema Internacional de Unidades (SI).

Sob as mesmas condições experimentais da infiltração horizontal apresentada anteriormente, com a única diferença de a coluna ficar na posição vertical, Philip (1957) chegou a seguinte solução para a equação (16), sujeitas as mesmas condições inicial e de contorno (12) com substituição da coordenada horizontal de posição x pela coordenada vertical de posição y :

$$z = \eta(\theta)t^{1/2} + \chi(\theta)t + \Omega(\theta)t^{3/2} + \dots \quad (17)$$

Neste caso da infiltração vertical, Philip (1957) obteve as funções de θ da equação (17) por solução numérica a partir da integração da equação (16).

Também a partir do perfil do conteúdo de água após um determinado tempo de infiltração vertical descendente, Philip (1957) chegou a seguinte equação para a lei da infiltração:

$$i = \frac{C}{2\sqrt{t}} + F \quad (18)$$

em que a constante F , relacionada à contribuição da gravidade, é dada por:

$$F = -\int_{\theta_0}^{\theta_1} \chi(\theta) d\theta + q_s \quad (19)$$

sendo q_s a taxa de saída de água em $z \rightarrow \infty$.

Vários trabalhos utilizando as equações de Philip (1955, 1957) têm sido realizados em nosso meio, podendo-se citar, por exemplo, os trabalhos de Libardi (1973), Manfredini et al (1979), Maniakas (1979) e, recentemente, Oliveira (2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Solos Utilizados

Foram selecionados três solos do Estado de São Paulo com características texturais distintas, classificados, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), como Cambissolo Háplico (Solo 1), Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (Solo 2) e Nitossolo Vermelho eutroférico (Solo 3). A área em cada um dos locais de estudo foi limpa em sua superfície com remoção do material vegetal e delimitada por um quadrado de 2,0 x 2,0 m. No centro deste quadrado, foi aberta uma trincheira até 1,2 m de profundidade para análise do perfil e coleta de amostras.

Solo 1: Cambissolo Háplico, de textura franco-arenosa

Horizonte A = 0 a 8 cm: cinzento-avermelhado-escuro (2,5 YR 4/1 seco), cinzento-avermelhado-escuro (2,5 YR 3/1 úmido); arenoso; moderada pequenos blocos subangulares; macio, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana.

Horizonte AB = 8 a 35 cm: cinzento-brunado-claro (10 YR 6/2 seco), bruno-acinzentado-escuro (10 YR 4/2 úmido); arenoso; moderada médio/grande blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana.

Horizonte Bi = 35 a 45 cm: bruno muito claro-acinzentado (10 YR 7/4 seco), bruno-amarelado (10 YR 5/4 úmido); arenoso; moderada médio/grande blocos subangulares; ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso; transição clara e plana.

Solo 2: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, de textura franco-arenosa

Horizonte A = 0 a 25 cm: bruno-escuro (7,5YR 3/4 úmido) e bruno (7,5YR 4/4 seco); franco-arenosa; fraca pequena blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição plana e difusa.

Horizonte AB = 25 a 52 cm: bruno-forte (7,5YR 4/6 úmido e 7,5YR 5/6 seco); franco-argilo-arenosa; maciça; muito dura, firme, ligeiramente plástica e não pegajosa; transição plana e difusa.

Horizonte Bw1 = 52 a 95 cm: vermelho-amarelado (5YR 5/6, úmido e seco); franco-argilo-arenosa; fraca pequena a média blocos subangulares que se desfaz em moderada pequena a média granular; dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.

Solo 3: Nitossolo Vermelho eutroférico, de textura argilosa

Horizonte A = 0 a 26 cm: bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 3/4 úmido e 2,5YR 2,5/4 seco); argilosa; forte média a grande blocos subangulares; cerosidade abundante e forte; extremamente dura, firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e difusa.

Horizonte Bt1 = 26 a 68 cm: bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 3/4 úmido) e vermelho-escuro (2,5YR 3/6 seco); muito argilosa; forte pequena a média blocos subangulares; cerosidade abundante e forte; muito dura, firme, muito plástica e pegajosa; transição plana e difusa.

Horizonte Bt2 = 68 a 114 cm: vermelho-escuro (2,5YR 3/6 úmido) e vermelho (2,5YR 4/6 seco); muito argilosa; moderada média a grande blocos subangulares; cerosidade comum e moderada; extremamente dura, friável, muito plástica e pegajosa; transição plana e difusa.

3.2. Configuração das Colunas Experimentais

O experimento será composto por 9 colunas de solo (Figura 1), sendo:

Configuração 1 = três colunas de solo com estrutura indeformada dos horizontes diagnóstico dos solos 1, 2 e 3;

Configuração 2 = três colunas de solo com estrutura deformada dos horizontes diagnóstico dos solos 1, 2 e 3;

Configuração 3 = três colunas de solo com estrutura deformada dos três primeiros horizontes dos solos 1, 2 e 3, com espessura de horizontes fixa, igual a 15 cm;

Figura 1. Configuração das colunas experimentais (cotas em cm).

3.3 Amostragem e preparo da amostra

Foi coletada uma amostra única na vertical, com estrutura indeformada do horizonte diagnóstico de cada solo. Para isso, foi utilizado um cilindro de material acrílico com parede de espessura de 2 mm, diâmetro interno de 0,1 m e comprimento de 0,5 m, tendo adaptado em uma de suas extremidades um dispositivo cortante em forma de bisel.

Adicionalmente, foi coletado um volume de solo com estrutura deformada dos três primeiros horizontes de cada solo para o acondicionamento em coluna e determinação da granulometria, densidade de partículas, carbono orgânico, e para a elaboração de amostras de solo acondicionadas em anéis volumétricos de 5 cm de altura e diâmetro, utilizadas na determinação da curva de retenção da água no solo.

3.4 Acondicionamento das amostras de solo com estrutura deformada

Para a confecção das colunas de estrutura deformada, o solo coletado foi seco ao ar e passado em peneira de malha 1 mm. Foram acondicionadas um total de seis colunas, três colunas com o horizonte diagnóstico de cada solo e três colunas com os três primeiros horizontes dos solos 1, 2 e 3, com espessura de horizonte fixa, igual a 15 cm.

A base inferior da coluna foi fechada com papel filtro exclusivamente para conter o volume de solo. Na extremidade aberta, foi fixada, temporariamente com fita adesiva, outra coluna (adicional) de 20 cm de comprimento, com o mesmo diâmetro e espessura de parede da coluna principal. A coluna composta (principal + adicional) foi colocada na posição vertical para o acondicionamento da amostra de solo.

O acondicionamento foi feito por meio de um funil com haste de comprimento igual à coluna composta. O procedimento consistiu em introduzir a haste do funil na coluna composta e preenchê-la com a amostra peneirada. A seguir o funil foi levantado vagarosamente permitindo a passagem do solo para a coluna composta, evitando com isso a segregação das partículas de solo, em movimento circular uniforme (Figura 2). A medida que a amostra de solo foi passando do funil para a coluna mais amostra foi sendo colocada no funil.

Figura 2. Montagem das colunas de solo homogêneas e estratificadas.

Uma vez cheia a coluna composta, o acondicionamento foi completado batendo-se na coluna com um martelo de borracha até que se atingisse a densidade desejada. Feito isto, desconectou-se o cilindro adicional e deixou-se, na parte superior da coluna, um espaço vazio de 3 cm, onde uma mangueira de água foi acoplada para que pudesse ser mantida uma lâmina de água que permitisse o umedecimento do solo de maneira uniforme em apenas uma direção.

A estratificação do solo em horizontes durante elaboração das colunas foi realizada com base nas informações de densidade do solo obtidas no campo, para os três solos e três horizontes iniciais, seguindo a configuração experimental exposta anteriormente (Figura 1). A proporção que cada horizonte tomou no interior da coluna foi controlada por uma régua impressa na parte exterior da coluna. Com a deposição do horizonte inferior, o horizonte intermediário passou a ser depositado, seguido do horizonte superior, sempre com o devido cuidado de manter a densidade do solo idêntica ao valor observado no campo, para o respectivo horizonte.

3.5 Obtenção das amostras de solo com estrutura indeformada

Inicialmente foi realizada uma escultura com a porção de solo de interesse e em seguida foram retiradas cuidadosamente as arestas desta escultura, adaptando-a para o recebimento da coluna de acrílico (Figura 3).

Figura 3. Escultura de solo feita a partir do horizonte diagnóstico do Latossolo.

Em seguida a coluna de solo foi inserida sob pequena pressão na extremidade superior da escultura. O dispositivo cortante que se localiza na base da coluna foi responsável pelo acabamento final e, além disso, houve uma armação de suporte do tipo guia para manter o alinhamento vertical da coluna no decorrer do encaixe na escultura de solo (Figuras 4 e 5).

Figura 4. Suporte e anel encaixados na coluna de Nitossolo.

Figura 5. Amostra indeformada de Cambissolo

Logo após a coleta, a coluna de solo indeformada foi levada ao laboratório, onde ficou durante semanas para secar até que sua umidade não variasse mais. Com o intuito de evitar o fluxo preferencial pelas laterais, foi utilizada a espuma de poliuretano A e B (PU A e B) para revestir as colunas de solo indeformadas (Figura 6), com aproximadamente 1cm de espessura. É uma espuma rígida, de baixa densidade, feita a partir da combinação dos componentes líquidos PU A e PU B.

Figura 6. Coluna de solo indeformada com espuma de poliuretano nas laterais

3.6 Radiação Gama

A determinação do conteúdo de água à base de volume e da densidade do solo ao longo das colunas de solo com estrutura deformada e indeformada foi feita por meio da técnica de atenuação da radiação gama (Davidson et al., 1963) na Divisão de Funcionamento de Ecossistemas Tropicais (DVECO) - CENA/USP. A fonte de radiação utilizada é a do Césio-137 e o sistema de detecção é constituído de um espectrômetro gama acoplado a um cristal cintilador. Ao ser emitida pela fonte, a radiação de fótons gama é colimada por uma fenda de 4 mm de diâmetro, atravessa a coluna de solo onde ocorre a atenuação pela natureza do solo e/ou conteúdo de água, sendo por fim, detectada pelo cintilador que realiza a contagem de fótons remanescentes após a interação com o solo, por um tempo programável. Devido à sua complexidade, o equipamento de emissão/detecção de radiação gama fica imóvel sobre uma bancada de suporte enquanto que a coluna de solo tem livre movimento na direção vertical por meio de uma abertura na mesma bancada, acoplada a um sistema de rosca sem fim.

3.7 Procedimento experimental durante a infiltração

No processo da infiltração, a coluna de solo, com conteúdo de água residual (amostra seca ao ar) uniforme, foi colocada com sua extremidade de cima acoplada a um frasco de Mariotte, preenchido com uma solução de Sulfato de Cálcio (CaSO_4) 0,005 M. A princípio, o frasco de Mariotte foi mantido à uma altura elevada em relação a coluna até o início do processo de infiltração, quando foi abaixado, mantendo sua entrada de ar um pouco acima da superfície da amostra de solo na coluna, obtendo-se assim o conteúdo de água de saturação θ_s na superfície (em $Z=0$).

O volume de solução infiltrado e a distância da superfície do solo (fonte d'água) à frente de molhamento (Figura 7) foram medidos ao longo do tempo de infiltração desde o início do contato da solução com o solo ($t=0$) até que a frente de molhamento alcançasse a profundidade de 15 cm, aproximadamente, quando o fornecimento de solução foi então interrompido. Imediatamente após a interrupção, foi feita a determinação do conteúdo de água ao longo da coluna, pelo método da atenuação da radiação gama. Antes do processo de infiltração, a densidade do solo foi também determinada pela mesma técnica ao longo da coluna. A distribuição da densidade do solo serviu assim como critério para a avaliação da homogeneidade das colunas de solo (Figura 1).

Figura 7. Frente de molhamento durante o procedimento experimental

3.8 Caracterização Físico-Hídrica

Após a descrição do perfil foram coletadas amostras para a caracterização físico-hídrica dos solos. Foram coletadas amostras com estrutura indeformada e deformada representativas dos três primeiros horizontes de cada solo. As amostras de solo com estrutura deformada foram colocadas para secar ao ar em local coberto (Terra Seca ao Ar), posteriormente foram destorroadas e passadas em peneira com malha de 2mm (Terra Fina Seca ao Ar). Uma subamostra foi levada a estufa para determinação da umidade residual.

A granulometria foi obtida pelo método da pipeta, conforme descrito em Almeida et al. (2012).

A densidade do solo foi determinada pela razão entre a massa da amostra de solo seco a 105°C durante 48 horas e o volume do anel cilíndrico por ela ocupada, também conhecido como método do anel volumétrico:

$$\rho = \frac{ms}{V} \quad (20)$$

A densidade dos sólidos do solo foi determinada utilizando o picnômetro a gás, modelo ACCUPIC 1330. A porosidade total foi obtida pela relação de vazios, determinada pela equação (21).

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (21)$$

sendo ρ a densidade do solo e ρ_s a densidade dos sólidos do solo.

A curva de retenção da água no solo foi determinada utilizando amostras de solo com estrutura indeformada coletadas em anéis, com 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura, do horizonte diagnóstico dos três solos. Amostras com estrutura deformada, acondicionadas em anéis volumétricos como nas colunas, dos três horizontes iniciais dos três solos foram utilizadas também para a determinação da curva de retenção em cada ponto de interesse na curva.

O ajuste dos dados de conteúdo de água relacionados ao potencial mátrico na representação da curva foi realizado selecionando os pontos de avaliação nas

tensões de 5, 10, 50 e 100 hPa, utilizando funil com placa porosa, e 50, 100, 300 e 500 kPa, utilizando câmara de pressão com placa porosa.

3.9 Carbono Orgânico

A determinação do carbono orgânico foi feita pelo método de Walkey-Black, de acordo com Anderson e Ingram (1992), por meio da equação (22),

$$C_{org} = 39,9798 \left[1 - \left(\frac{V_a}{V_b} \right) \frac{1}{m} \right] \quad (22)$$

sendo V_a o volume da solução de sulfato ferroso amoniacal consumido na titulação da amostra (ml), V_b o volume da solução de sulfato ferroso amoniacal consumido na titulação do teste em branco (ml) e m a massa de solo (g).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização Físico Hídrica do Solo

Na tabela 1 estão apresentados os dados obtidos nas análises de granulometria e matéria orgânica dos solos estudados em seus respectivos horizontes. O Cambissolo apresentou teor de argila variando de 107 a 143 g kg⁻¹, silte de 155 a 212 g kg⁻¹ e areia total de 681 a 715 g kg⁻¹; o Latossolo apresentou teores de argila variando de 136 a 200 g kg⁻¹, de silte entre 81 e 84 g kg⁻¹ e de areia total entre 716 a 782 g kg⁻¹; O Nitossolo apresentou teor de argila variando de 422 a 589 g kg⁻¹, silte entre 201 e 266 g kg⁻¹ e areia total entre 210 e 312 g kg⁻¹.

De modo geral o que se verifica é que o Cambissolo e o Latossolo apresentaram predominância da fração areia, em relação ao silte e a argila, sendo classificados de acordo com sua textura como francos arenosos. Com relação ao fracionamento da areia, esses solos apresentaram teores elevados das frações areia fina (F) e muito fina (MF), que associados a outros fatores, podem influenciar em propriedades importantes do solo como, uniformidade estrutural, capacidade de retenção e infiltração da água no solo, distribuição do tamanho dos poros do solo e suscetibilidade a processos de degradação do solo, como o aumento da densidade do solo (Caetano, 2006). O Nitossolo, por sua vez, apresentou classificação textural argilosa, o que é determinante para muitas características e processos físico-hídricos no solo.

O Cambissolo se destacou com o maior conteúdo de matéria orgânica, seguido pelo Nitossolo e depois pelo Latossolo. Isso pode estar relacionado com as características pedogenéticas de cada solo e também com as condições locais de maior aporte de material orgânico. Cambissolos, geralmente, são solos relativamente jovens, neste caso, devido o local de estudo estar localizado em uma área com predominância de gramínea e com pouca interferência de agentes externos, houve um maior acúmulo de carbono orgânico. Os teores de matéria orgânica do Nitossolo e do Latossolo estão diretamente relacionados a sua constituição textural, o primeiro com teores mais elevados e o segundo com os menores valores. Isso acontece porque como o Latossolo, apresenta maiores teores de areia em sua composição, há maior facilidade da ação de agentes externos, como o clima e microorganismos, na decomposição do material orgânico. De modo

oposto, a granulometria mais fina do Nitossolo age protegendo, pela maior agregação e estrutura mais desenvolvida, o material orgânico presente no solo da decomposição.

Foi observado que, conforme a profundidade aumenta, o conteúdo de matéria orgânica do solo diminui. Moraes et al. (2013) e Gimenes (2017) também observaram em seus estudos uma redução nos teores de carbono orgânico à medida que se aprofunda nos perfis de solos, sendo essa amplitude peculiar para cada solo.

Segundo a análise do coeficiente de variação, houve baixa magnitude de variação para a fração areia, silte e argila, contudo, a matéria orgânica do solo demonstrou média variação para o horizonte Bi do Cambissolo, A do Latossolo e Bt2 do Nitossolo, bem como alta variação no horizonte Bw do Latossolo.

Tabela 1. Distribuição granulométrica, classe textural e matéria orgânica dos diferentes horizontes do Cambissolo, Latossolo e Nitossolo.

Distribuição granulométrica											
Solo	Horizonte	Areia*						Silte	Argila	M.O.**	Classe textural
		MG	G	M	F	MF	Total				
		----- g.kg ⁻¹ -----									
Cambissolo	A	0	12	67	534	84	697	160	143	25,1	Franco arenosa
	AB	0	08	50	580	77	715	155	130	12,1	
	Bi	1	13	71	505	91	681	212	107	7,3	
Latossolo	A	0	16	195	451	120	782	82	136	10,8	Franco arenosa
	AB	0	22	213	365	116	716	84	200	7,2	
	Bw	1	18	149	432	124	724	81	195	3,5	
Nitossolo	A	1	13	58	160	80	312	266	422	19,3	Argilosa
	Bt	1	08	36	103	62	210	201	589	8,2	
	Bt2	1	09	41	119	65	235	218	547	6,8	
								Areia	Silte	Argila	M.O.
CV***											
Cambissolo	A							0,2	2,4	4,2	9,7
	AB							0,1	1,6	1,0	8,8
	Bi							0,0	4,0	1,1	54,9
Latossolo	A							0,0	3,0	1,3	19,1
	AB							0,1	0,9	3,6	5,6
	Bw							0,1	2,1	1,7	63,9
Nitossolo	A							0,2	1,2	1,3	3,6
	Bt							0,9	0,6	1,4	8,5
	Bt2							3,4	1,7	1,4	17,9

* MG = Muito grossa (1 - 2 mm); G = Grossa (0,5-1 mm); M = Média (0,25 - 0,5 mm); F = Fina (0,106-0,25 mm); MF= Muito fina (0,053 - 0,106mm);

** M.O. = Matéria orgânica;

*** CV = Coeficiente de variação, %;

Na tabela 2 estão apresentados os valores de densidade de solo, densidade dos sólidos do solo e porosidade total para os diferentes horizontes dos solos

estudados. A densidade do solo do Latossolo foi superior à do Nitossolo e do Cambissolo. Este fato está relacionado às características pedogenéticas de cada solo, podendo também ser afetada pelo manejo adotado na área. O Latossolo possui maior porcentagem de areia em sua composição, portanto menor área superficial específica e menor espaço poroso total. Já o Cambissolo e o Nitossolo possuem maior porcentagem de argila e silte, e, com isso, maior quantidade de poros intra-agregados, maior área superficial específica e maior porosidade total.

Tabela 2. Densidade do solo, densidade de sólidos do solo e porosidade total para os diferentes horizontes do Latossolo, Cambissolo e Nitossolo.

Solo	Horizonte	Propriedades do solo				
		Densidade do solo	CV	Densidade de sólidos do solo	CV	Porosidade total
		g.cm ⁻³	%	g.cm ⁻³	%	%
Cambissolo	A	1,35	3,4	2,74	0,5	50,73
	AB	1,42	1,6	2,80	0,1	49,29
	Bi	1,37	2,2	2,82	0,3	51,42
Latossolo	A	1,77	0,6	2,85	0,9	37,89
	AB	1,68	1,1	2,88	0,5	41,67
	Bw	1,52	1,6	2,87	0,3	47,04
Nitossolo	A	1,48	3,5	3,08	0,4	51,95
	Bt	1,40	3,7	3,08	0,1	54,55
	Bt2	1,26	5,0	3,08	0,2	59,09

A análise do coeficiente de variação indicou baixa magnitude de variação para a densidade do solo e a densidade de sólidos do solo. A porosidade do solo situou-se na faixa estabelecida para solos de textura franca e argilosa, que varia de 47% a 53% e de 53% a 61%, respectivamente (Freire, 2006; Libardi, 2012), com exceção dos horizontes A e AB do Latossolo, que apresentam indícios de compactação.

Nas Figuras 8 a 12 tem-se a distribuição do tamanho de poros dos solos estudados em seus respectivos horizontes, estimado a partir da curva de retenção. É possível observar que, nas amostras com estrutura indeformada, o Nitossolo apresentou maior proporção de microporos. O Latossolo foi o que apresentou maior porcentagem de mesoporos e macroporos. O Cambissolo também apresentou alta proporção de microporos, seguido de valor intermediário de mesoporos e menor proporção de macroporos.

Como já era esperado, nas amostras com estrutura deformada ocorreu uma diminuição da porcentagem de macroporos e um aumento na porcentagem de mesoporos e microporos nos três solos estudados e seus horizontes.

Quando comparamos as amostras de estrutura indeformada com as amostras de estrutura deformada dos horizontes diagnósticos do Cambissolo, Latossolo e Nitossolo, nota-se que houve uma diminuição de 89% de macroporos no Cambissolo e um aumento de 11% em mesoporos e 10% em microporos. No Latossolo, a redução de macroporos foi de 76%, 66% de aumento de mesoporos e 6% microporos a menos. No Nitossolo houve redução de 89% na porcentagem de macroporos, 67% de aumento em mesoporos e 17% em microporos.

Figura 8. Distribuição do tamanho de poros apartir de amostras de estrutura indeformada do horizonte diagnóstico dos três solos estudados.

Figura 9. Distribuição do tamanho de poros apartir de amostras de estrutura deformada do horizonte diagnóstico dos três solos estudados.

Figura 10. Distribuição do tamanho de poros apartir de amostras de estrutura deformada dos três horizontes do Cambissolo.

Figura 11. Distribuição do tamanho de poros a partir de amostras de estrutura deformada dos três horizontes do Latossolo.

Figura 12. Distribuição do tamanho de poros a partir de amostras de estrutura deformada dos dois horizontes do Nitossolo.

4.2. Infiltração da água no solo

Os valores medidos da taxa de infiltração para os três solos estudados, colunas homogêneas, estratificadas e indeformadas estão apresentados nas figuras 13 a 21. As curvas obtidas descrevem bem o processo de infiltração mostrando que, no início a taxa de infiltração é alta e decresce exponencialmente com o tempo, aproximando-se a um valor constante, normalmente chamado de velocidade de

infiltração básica (VIB). Isso ocorre, pois no início do experimento o solo se encontra relativamente seco, tendo, assim, um gradiente de potencial mais elevado. Após um período de tempo o gradiente de potencial diminui e a taxa de infiltração decresce. O nível de umidade do solo (grau de saturação) afeta diretamente a taxa de infiltração, quanto mais saturado o solo, menor a taxa de infiltração (HAGHNAZARI et al., 2015).

Para o solo 1 (Cambissolo) o processo de infiltração nas colunas com estrutura deformada, tanto na homogênea quanto na estratificada, foi mais rápido quando comparado com a coluna de estrutura indeformada. Além da umidade inicial, as características físicas do solo também afetam diretamente a taxa de infiltração da água (ORUK, 2011; CZYZYK; SWIERKOT, 2017) A elevada proporção de silte na composição do Cambissolo contruibuiu para a maior porcentagem de microporos, que influencia diretamente na infiltração da água. Este solo também apresentou maior conteúdo de matéria orgânica, o que eleva a retenção de água no solo.

O solo 2 (Latosolo) apresentou maior taxa de infiltração quando comparado com os outros solos. Isso já era previsto pois este foi o solo que apresentou maior proporção de macroporosidade e mesoporosidade, devido ao maior teor de areia em sua composição. A coluna com estrutura indeformada foi ainda mais rápida que as colunas com estrutura homogênea e estratificada. No momento da confecção das colunas com estrutura homogênea e estratificada, com a destruição da estrutura do solo e acomodação das partículas, os macroporos foram reduzidos em 76% e isso influenciou diretamente no resultado da infiltração da água. A coluna com estrutura indeformada apresentou, portanto, maior taxa de infiltração, pois sua estrutura e, conseqüentemente, seus macroporos estavam preservados.

O solo 3 (Nitossolo) foi o que apresentou o menor taxa de infiltração nas colunas homogênea e estratificada. Como visto na caracterização físico-hídrica este solo possui maior porcentagem de argila e microporos, e tem como característica o movimento lento da água. Já a coluna com estrutura indeformada do mesmo solo apresentou um pico da taxa de infiltração logo após o início. Durante a coleta das amostras de solo com estrutura deformada e indeformada pode-se observar uma intensa atividade biológica em todo o perfil do Nitossolo. Além da presença de raízes, também podia ser visto a presença de galerias e grandes bioporos

preenchidos por com material solto e microgranular. Isso também foi observado por Cooper e Vidal-Torrado (2005) na mesma área.

Portanto esse pico provavelmente pode ser devido à presença de bioporo no interior da coluna, com fluxo preferencial da água ou também no processo de amostragem que é muito dificultado devido a forte estruturação do solo.

Figura 13. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea.

Figura 14. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 2 (Latossolo), coluna homogênea.

Figura 15. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea.

Figura 16. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada.

Figura 17. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 2 (Latossolo), coluna estratificada.

Figura 18. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada.

Figura 19. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada.

Figura 20. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 2 (Latossolo), coluna indeformada.

Figura 21. Curva dos valores médios medidos da taxa de infiltração em função do tempo juntamente com a linha de tendência para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada.

As Figuras 22 a 30 apresentam os valores da taxa de infiltração medidos e estimados pelo modelo de Kostiakov. Visualmente pode-se notar que o modelo de Kostiakov é o que mais bem representou a taxa de infiltração medida. Resultados semelhantes a este foram obtidos por muitos autores (MBAGWU, 1993; HAGHNAZARI et al., 2015). Isso ocorre pois, apesar de apresentar parâmetros empíricos, o modelo realiza quase que um ajuste estatístico dos dados. Apesar de, em alguns casos, subestimar o início da taxa de infiltração. Para o solo 3, coluna indeformada, o modelo subestima esse pico de infiltração no meio do processo, indicando que realmente não se aplica a solos que não permanecem homogêneos ao longo do perfil.

Figura 22. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea.

Figura 23. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna homogênea.

Figura 24. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea.

Figura 25. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada.

Figura 26. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna estratificada.

Figura 27. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada.

Figura 28. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada.

Figura 29. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna indeformada.

Figura 30. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Kostiakov em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada.

As figuras 33 a 41 mostram os valores da taxa de infiltração medidos e estimados pelo modelo de Horton para os três solos estudados. O modelo em geral não representa bem a curva do processo, em todas as situações.

Figura 31. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea.

Figura 32. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 2 (Latosolo), coluna homogênea.

Figura 33. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea.

Figura 34. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada.

Figura 35. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 2 (Latosolo), coluna estratificada.

Figura 36. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada.

Figura 37. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada.

Figura 38. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna indeformada.

Figura 39. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Horton em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada.

Nas Figuras 42 a 50 pode-se observar os gráficos da taxa de infiltração com os valores medidos e estimados pelo modelo de Green & Ampt. O modelo teórico,

também para este modelo, não estima bem os valores da taxa de infiltração, nem mesmo para as colunas homogêneas.

Figura 40. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea.

Figura 41. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 2 (Latosolo), coluna homogênea.

Figura 42. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea.

Figura 43. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada.

Figura 44. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna estratificada.

Figura 45. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada.

Figura 46. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada.

Figura 47. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 2 (Latosolo), coluna indeformada.

Figura 48. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Green & Ampt em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada.

Nas Figuras 49 a 51 estão apresentados os gráficos da distância da fonte de água à frente de molhamento (x_f) em função da raiz quadrada do tempo. É possível observar que os coeficientes de regressão linear foram maiores que 0,9, indicando alta correlação. O avanço da frente de molhamento foi proporcional à raiz quadrada do tempo para todos os solos e estruturas estudados. Os solos com estrutura homogênea foram os que apresentaram maiores coeficientes de regressão linear e os de estrutura indeformada os menores, 0,99 e 0,95, respectivamente. A infiltração vertical nesse caso se comportou como a Horizontal e não como Philip (1957) indica. O mesmo foi observado por outros autores (Libardi e Reichardt, 1974; Oliveira, 2015), mas em colunas com solo homogêneo. Isso indica que a equação proposta por Philip para infiltração horizontal também pode ser utilizada para as colunas com estrutura indeformada na direção vertical.

Figura 49. Distância da fonte da solução à frente de molhamento versus a raiz quadrada do tempo para as colunas homogêneas, solos 1 (Cambissolo) (a), 2 (Latossolo) (b) e 3 (Nitossolo) (c).

Figura 50. Distância da fonte da solução à frente de molhamento versus a raiz quadrada do tempo para as colunas estratificadas, solos 1 (Cambissolo) (a), 2 (Latossolo) (b) e 3 (Nitossolo) (c).

Figura 51. Distância da fonte da solução à frente de molhamento versus a raiz quadrada do tempo para as colunas indeformadas, solos 1 (Cambissolo) (a), 2 (Latossolo) (b) e 3 (Nitossolo) (c).

As figuras 54 a 62 mostram os perfis de conteúdo de água obtidos experimentalmente e os estimados pelo modelo de Philip. Com o perfil de conteúdo de água obtido experimentalmente determina-se a partir da função $\eta(\theta)$ de Philip perfil de umidade para qualquer tempo (LIBARDI, 2012).

Isso mostra a importância do modelo de Philip em prever o conteúdo de água, isto é, o valor de θ no tempo e profundidade do solo.

Figura 52. Perfis de conteúdo de água do solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea.

Figura 53. Perfis de conteúdo de água do solo 2 (Latossolo), coluna homogênea.

Figura 54. Perfis de conteúdo de água do solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea.

Figura 55. Perfis de conteúdo de água do solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada.

Figura 56. Perfis de conteúdo de água do solo 2 (Latossolo), coluna estratificada.

Figura 57. Perfis de conteúdo de água do solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada.

Figura 58. Perfis de conteúdo de água do solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada.

Figura 59. Perfis de conteúdo de água do solo 2 (Latosolo), coluna indeformada.

Figura 60. Perfis de conteúdo de água do solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada.

Nas Figuras 61 a 69 estão apresentados os gráficos da taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip. O modelo de Philip, como o modelo de Kostiakov, em geral representou bem a taxa de infiltração medida, quando comparada com os modelos de Horton e Green & Ampt. Para alguns solos o modelo subestimou o início do processo de infiltração.

Figura 61. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna homogênea.

Figura 62. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 2 (Latosolo), coluna homogênea.

Figura 63. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna homogênea.

Figura 64. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna estratificada.

Figura 65. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 2 (Latosolo), coluna estratificada.

Figura 66. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna estratificada.

Figura 67. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada.

Figura 68. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 2 (Latossolo), coluna indeformada.

Figura 69. Taxa de infiltração medida e estimada pelo modelo de Philip em função do tempo para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada.

Nas próximas tabelas (3 a 5) estão apresentados os valores dos parâmetros obtidos apartir do ajuste das equações da taxa de infiltração de Kostiakov, Horton, Green & Ampt, aos dados da taxa de infiltração medidos experimentalmente. O parâmetro C (Tabela 6), da equação de Philip, foi obtido a partir do perfil de conteúdo de no solo, também obtido experimentalmente.

O parâmetro i_i do modelo de Kostiakov está relacionado com a taxa de infiltração no início do processo. O solo 2 (Latossolo) apresentou maior valor de i_i . Esse valor já era esperado devido a maior proporção de areia em sua composição.

O maior valor do parâmetro a obtido pelo modelo, que indica quão rápido a taxa de infiltração decresce com o tempo a partir de i_i , foi obtido para solo 1 (Cambissolo), coluna indeformada. O processo todo de infiltração de água nessa coluna durou em torno de 120 minutos. O início da taxa de infiltração ocorreu mais rápido e logo decaiu, provavelmente devido a maior incidência de microporos em sua composição.

Os valores do parâmetro a obtidos pelo modelo de Kostiakov satisfazem a premissa de sempre ser positivo e menor que um, para que assim a taxa de infiltração sempre diminua e a infiltração acumulada não seja negativa (LIBARDI, 2012).

Tabela 3. Parâmetros do modelo de Kostiakov ajustados aos dados da taxa de infiltração medida em função do tempo, para os três solos, colunas homogênea, estratificada e indeformada

	Kostiakov					
	Homogênea		Estratificada		Indeformada	
	i_i (cm s ⁻¹)	a	i_i (cm s ⁻¹)	a	i_i (cm s ⁻¹)	a
Solo 1 (Cambissolo)	1,537	0,730	0,578	0,563	1,817	0,884
Solo 2 (Latossolo)	2,043	0,754	0,490	0,566	0,904	0,616
Solo 3 (Nitossolo)	0,420	0,556	0,552	0,635	1,077	0,643

No solo 2 (Latossolo) foram obtidos os maiores valores dos três parâmetros do modelo de Horton. Onde o i_i tem o mesmo significado do modelo de Kostiakov, o parâmetro i_f representa a taxa de infiltração final, ou seja, a VIB, e C está relacionado com o formato da curva. Quanto menor o valor de C mais acentuada é a curva. Valores semelhantes a esses também foram obtidos por outros autores (OLIVEIRA, 2015).

Tabela 4. Parâmetros do modelo de Horton ajustados aos dados da taxa de infiltração medida em função do tempo para dos três solos, colunas homogênea, estratificada e indeformada

	Horton								
	Homogênea			Estratificada			Indeformada		
	i_i (cm s ⁻¹)	i_f (cm s ⁻¹)	C	i_i (cm s ⁻¹)	i_f (cm s ⁻¹)	C	i_i (cm s ⁻¹)	i_f (cm s ⁻¹)	C
Solo 1 (Cambissolo)	0,635	0,014	0,239	0,335	0,008	0,107	0,050	0,002	0,006
Solo 2 (Latossolo)	0,988	0,029	0,480	0,860	0,013	0,268	0,387	0,018	0,056
Solo 3 (Nitossolo)	0,131	0,006	0,073	0,244	0,003	0,130	0,115	0,002	0,043

Os parâmetros do modelo de Green & Ampt estão listados na tabela 3. O parâmetro A, assim como no modelo de Horton, representa a taxa de infiltração final e é obtido a partir da regressão linear entre a taxa de infiltração e o inverso do comprimento de solo umedecido (Equação 7). O parâmetro B representa o coeficiente linear de regressão do ajuste.

Neste modelo o Solo 2 também apresentou os maiores valores para os parâmetros A e B, como no modelo de Horton.

Tabela 5. Parâmetros do modelo de Green & Ampt ajustados aos dados da taxa da infiltração medida em função do tempo para os três solos, colunas homogênea, estratificada e indeformada

	Green & Ampt					
	Homogênea		Estratificada		Indeformada	
	A	B	A	B	A	B
Solo 1 (Cambissolo)	0.166	1.221	0,005	0,186	0.006	0,093
Solo 2 (Latossolo)	0,200	1,580	0,018	0,307	0,019	0,388
Solo 3 (Nitossolo)	0,009	0,121	0,018	0,258	0,042	0,091

O parâmetro C do modelo de Philip representa a sortividade do solo. Este parâmetro indica a capacidade de um solo homogêneo de absorver água em relação

ao seu conteúdo de água inicial. O solo 2 novamente obteve o maior valor para esse parâmetro, seguido do solo 1, colunas homogêneas.

Tabela 6. Parâmetros do modelo de Philip ajustados aos dados da taxa de infiltração medida e em função do tempo, para os três solos, colunas homogênea, estratificada e indeformada

	Philip		
	Homogênea	Estratificada	Indeformada
	C	C	C
Solo 1 (Cambissolo)	1,4	0,9	0,5
Solo 2 (Latosolo)	1,5	0,7	1,0
Solo 3 (Nitossolo)	0,7	0,8	0,7

O coeficiente de determinação (R^2) é um índice que reflete a proximidade entre os valores observados e estimados, sendo assim uma medida da acurácia de modelos. Valores de R^2 próximos ou iguais a 1 indicam que a média dos valores preditos pelo modelo é uma estimativa tão boa quanto os medidos, e valores próximos a zero indicam que o modelo não apresentou uma boa estimativa em relação aos dados observados.

Os valores do coeficiente de determinação referentes à comparação entre a taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos são listados nas Tabelas 6. O modelo que apresentou melhor desempenho foi a equação proposta por Kostiaikov. Apresentou R^2 variando de 0,96 a 0,84 para todos os solos e configurações, menos para o solo 3 (Nitossolo), coluna indeformada. Esse alto valor do coeficiente de determinação ocorre pois a equação do modelo praticamente coincide com a equação de ajuste estatístico dos dados.

Outra equação que se ajustou muito bem aos dados foi a de Philip. O modelo baseado na solução da equação de Richards, para a direção horizontal, apresentou em media valores de R^2 maiores que 0,91. Com exceção também para a coluna indeformadas do solo 3 (Nitossolo), que apresentou R^2 igual a 0,098.

Os modelos de Green & Ampt e Horton, não se ajustaram tão bem aos dados medidos. O modelo de Horton foi o que obteve os valores mais baixos do coeficiente de determinação, valores médios de R^2 igual a 0,694.

Todos os modelos apresentaram um ajuste ruim (R^2 menor que 0,01) para a coluna indeformada do solo 3 (Nitossolo). O coeficiente de determinação obtido do ajuste dos dados medidos para a lei da infiltração também foi baixo (R^2 igual a 0,406) para a coluna indeformada deste solo. Como dito anteriormente, a coluna apresentou um pico da taxa de infiltração logo após o início. Isso provavelmente ocorreu devido à presença de bioporo no interior da coluna, com fluxo preferencial da água. Portanto, esses baixos valores de R^2 por parte dos modelos já eram esperados para a coluna indeformada do solo 3 (Nitossolo).

Tabela 7. Coeficiente de determinação da taxa de infiltração medida e estimada pelos modelos

Colunas	Kostiakov	Horton	Philip	Green & Ampt
Solo 1 - Cambissolo				
Homogênea	0,962	0,668	0,912	0,898
Estratificada	0,898	0,753	0,919	0,802
Indeformada	0,963	0,898	0,978	0,820
Solo 2 - Latossolo				
Homogênea	0,918	0,604	0,909	0,839
Estratificada	0,938	0,697	0,954	0,867
Indeformada	0,945	0,830	0,992	0,897
Solo 3 – Nitossolo				
Homogênea	0,880	0,528	0,951	0,873
Estratificada	0,841	0,571	0,873	0,870
Indeformada	0,406	0,038	0,098	0,050

5. CONCLUSÕES

A equação proposta por Kostikov para a lei da infiltração ajustou-se muito bem por praticamente coincidir com a equação de ajuste estatístico dos dados. Já o mesmo não ocorreu com a equação proposta por Horton para a qual os coeficientes de determinação variaram de 0,571 a 0,898 (sem considerar a amostra indeformada do Nitossolo).

Com relação ao modelo de Green & Ampt que, ao contrário das equações de Kostikov e Horton que são modelos empíricos, pode-se dizer tratar-se de um modelo semi-analítico, os ajustes dos dados também não foram muito bons (R^2 variando de 0,802 a 0,898, sem considerar a amostra indeformada do Nitossolo).

O modelo quase todo analítico de Philip, baseado na solução da equação de Richards para a direção horizontal, ajustou-se muito bem aos dados desta pesquisa que foi conduzida para a direção vertical descendente, visto que o gráfico da posição de frente de molhamento em relação a fonte de água em função da raiz quadrada do tempo de infiltração resultou numa linha reta com alto coeficiente de determinação para todas as amostras (R^2 maior que 0,99 para as deformadas e R^2 maior que 0,95 para as deformadas).

Todos os modelos apresentaram um ajuste ruim da lei da infiltração (R^2 menor que 0,1) para a coluna indeformada do solo 3 (Nitossolo). Provavelmente devido à presença de bioporo no interior da coluna, com fluxo preferencial da água ou também no processo de amostragem que é muito dificultado devido a forte estruturação deste solo.

REFERÊNCIAS

- AHUJA, L.R. Applicability of the Green-Ampt approach to water infiltration through surface crust. **Soil Science**, Baltimore, v.18 p. 283-288, 1974.
- AL-KAYSSI, A.W.; MUSTAFA, S.H. Modeling gypsiferous soil infiltration rate under different sprinkler application rates and successive irrigation events. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 163, p.66–74, 2016.
- ALMEIDA, B.; DONAGEMMA, G.K.; RUIZ, H.A. **Comunicado técnico da embrapa**. 2012, 11p.
- BARRY, D.A.; PARLANGE, J.-Y.; LI, L.; JENG, D.-S.; CRAPPER, M. Green–Ampt approximations. **Advances in Water Resources**, Amsterdam, v.28, p.1003–1009, 2005.
- BOWER, H. Infiltration into Increasingly Permeable Soils. **Journal of Irrigation and Drainage Division**. Am. Soc. Civ. Engrs 102(IR1), p.127-136, 1976.
- BOWER, H. Infiltration of Water into Nonuniform Soil. **Journal of Irrigation and Drainage Division**. Am. Soc. Civ. Engrs 95(IR4), p.451-462, 1969.
- CAETANO, J.O. **Caracterização de atributos químicos e físicos de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes tempos de cultivo com soja e milho**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Rio Verde, 2006. 159 p.
- CHEN, L.; YOUNG, M.H. Green–Ampt infiltration model for sloping surfaces. **Water Resources Research**, Washington, v.42, p. 887–896, 2006.
- CHILDS, E.C.; BYBORDI, M. Vertical movement of water in stratified porous material. I. Infiltration. **Water Resources Research**, Washington, v.5, p.446–459, 1969
- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 581-595, 2005.
- CZYŻYK F., ŚWIERKOT Z. Recharging infiltration of precipitation water through the light soil, in the absence of surface runoff. **Journal of Water and Land Development**, Falenty, v. 32, p. 25–30, 2017.
- DAVIDSON, J.M.; BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R. Gamma radiation attenuation for measuring bulk density and transient water flow in porous materials. **Journal of Geophysical Research**, v.28, p.4777-4783, 1963.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2013. 306 p.

FREIRE, O. **Solos das regiões tropicais**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2006. 271 p.

GIMENES, F.H.S. **Propriedades de retenção e condução da água no solo determinadas sob condições de campo**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2017. 119p.

GOVINDARAJU, R.S.; KAVVAS, M.L.; JONES, S.E.; ROLSTON, D.E. Use of Green–Ampt model for analyzing one-dimensional convective transport in unsaturated soils. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.178, p.337–350, 1996.

GOWDISH, L.; CARPENA, M. An improved Green–Ampt infiltration and redistribution method for uneven multistorm series. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.8, p.470–479, 2009.

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. Studies in soil physics 1: The flow of air and water through soils. **Journal of Agronomy Science**, Umuarama, v. 4, p. 1-24, 1911.

HAGHNAZARI F., SHAHGHOLI H., FEIZI M. Factors affecting the infiltration of agricultural soils. **International Journal of Agronomy and Agricultural Research**, Herndon, v. 6, p. 21–35, 2015.

HERRADA, M.A.; GUTIÉRREZ-MARTIN, A.; MONTANERO, J.M. Modeling infiltration rates in a saturated/unsaturated soil under the free draining condition. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.515, p.10–15, 2014.

HILLEL, D.; GARDNER, W.R. Transient infiltration into crust-topped profile. **Soil Science**, Baltimore, v.109, p.69–76, 1970.

HOLZAPFEL, E.A.; JARA, J.; ZUÑIGA, C. Infiltration parameters for furrow irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.68, p.19–32, 2004.

HORTON, R.E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 5, p. 399-417, 1940.

HUGO, A.L., HUANG, A. Ponding analysis with Green–Ampt infiltration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.12, p.109–112, 2007.

KALE, R.; SAHOO, B. Green–Ampt infiltration models for varied field conditions: a revisit. **Water Resources and Management**, Washington, v.25, p.3505–3536, 2011.

KARGAS, G.; KERKIDES, P. A contribution to the study of the phenomenon of horizontal infiltration. **Water Resources and Management**, Washington, v.25, p.1131–1141, 2011.

KOSTIAKOV, A.N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying in from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Paris: International Soil Science Society, p. 17-21, 1932.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo: EDUSP, 2012. 346p.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Generalização do movimento da água no solo: II. Infiltração vertical. Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 1974. 16p. (Boletim Científico n.17).

MANFREDINI, S.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L. Absorção unidirecional da água em solos homogêneos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.3, p.5-8, 1979.

MANIAKAS, S. **Difusão da água no solo durante o processo de infiltração**. Dissertação de mestrado, ESALQ/USP, Piracicaba, 1979.

MAO, L.; LI, Y., HAO, W.; ZHOU, X.; XU, C.; LEI, T. A new method to estimate soil water infiltration based on a modified Green–Ampt model. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.162, p.31-37, 2016.

MBAGWU, J.S.C. Testing the goodness of fit of selected infiltration models on soils with different land use histories. International Atomic Energy Agency and UN Educational Scientific and Cultural Organization, IC/93/290, 1993.

MEIN, R.G.; LARSON, C.L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources and Research**, Washington, v.9, p.384–394, 1973.

MORAIS, V.A.; SILVA, C.A.; SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M.; ARAÚJO, E.J.G.; ASSIS, E.A. Modelagem do teor de carbono orgânico em solos de fragmentos de Cerrado de Januária e Bonito de Minas, Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, p.343-354, 2013.

MOREL-SEYROUX, H. J.; KHANJI, J. Derivation of an Equation of Infiltration. *Water Resources Research*, v.10, p.795-800, 1974.

NAETH, M.A., CHANASYK, D.S. BAILEY, A. W. Applicability of the Kostikov equation to mixed prairie and fescue grasslands of Alberta. **Journal of Range Management**, v. 44, n. 1, 1991.

OLIVEIRA, V.B. **Avaliação da Infiltração da água no solo utilizando modelos determinísticos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

ORUK, E. Infiltration rate assessment of coastal plain (ultisol) soils for sustainable crop production in the frontiers of Calabar – Nigeria. *Journal of Sustainable Development*, v. 4, p. 222–229, 2011.

PHILIP, J. R. The theory of infiltration: Sorptivity and algebraic infiltration equation, **Soil science**, Baltimore, v.84, p.57-264, 1957.

PHILLIP, J.R. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration- dependent. *Transactions of the Faraday Society*. 51, p. 885-892, 1955.

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

SERRALHEIRO, R. P. Furrow irrigation advance and infiltration equations for a mediterranean soil. J. Agric. Eng. Res. 62:117-126.doi:10.1006/jaer.1995.1070.1995

SILVA, L.L. Fitting infiltration equations to centre-pivot irrigation data in a Mediterranean soil. Agric. Water Manage. 94:83–92.doi:10.1016/j.agwat.2007.08.003. 2007

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; 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. US Salinity Laboratory, Riverside.1998

TSAKIRIS, G.P. Infiltration efficiency in sprinkler irrigation. Adv. Water Resour.8:44–47.doi:10.1016/0309-1708(85)90080-6. 1985