

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Daniel Boeno

**FLUXO LATERAL NA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA MEDIDA COM O DUPLO
ANEL CONCÊNTRICO**

Santa Maria, RS
2019

Daniel Boeno

**FLUXO LATERAL INFILTRAÇÃO DE ÁGUA MEDIDA COM DUPLO ANEL
CONCÊNTRICO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof^o Dr. Paulo Ivonir Gubiani

Santa Maria, RS
2019

Boeno, Daniel
FLUXO LATERAL NA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA MEDIDA COM O
DUPLO ANEL CONCÊNTRICO / Daniel Boeno.- 2019.
32 p. ; 30 cm

Orientador: Paulo Ivonir Gubiani
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2019

1. Infiltração de água 2. Fluxo lateral 3. Perfil
estratificado I. Ivonir Gubiani, Paulo II. Título.

Daniel Boeno

**FLUXO LATERAL NA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA MEDIDA COM DUPLO ANEL
CONCÊNTRICO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Aprovado em 26 de fevereiro de 2019:

Paulo Ivonir Gubiani, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Dalvan José Reinert, Dr. (UFSM)

Marta Sandra Drescher, Dr.^a. (UERGS)

Santa Maria, RS
2019

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais Deolindo Boeno e Helena Boscaini Boeno, verdadeiros guerreiros, meu exemplo de vida, de luta e persistência. Minha maior fortaleza e fonte de inspiração. Temos um sonho e irei correr atrás dele todos os dias.

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho ocorreu, principalmente pelo auxílio, compreensão e dedicação de várias pessoas. Sou grato a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste estudo, em especial, agradeço:

- a um ser maior, ao qual faço meus pedidos e orações;

- a minha família, em especial, meus pais, Deolindo e Helena Boscaini Boeno, e irmãos, Cassiane, Jussara e Flávio, que nunca mediram esforços e sempre, desde criança, me incentivaram a seguir estudando e buscar meus sonhos;

- ao meu orientador Paulo Ivonir Gubiani, pela confiança em mim depositada e pelo exemplo de dedicação em tudo o que faz. Suas correções e ensinamentos jamais serão esquecidos;

- sem citar nomes para evitar esquecer alguém, agradeço aos meus muitos amigos que pude fazer aqui em Santa Maria, alguns já conhecidos antes, pela acolhida, pelos momentos de ajuda, descontração, conversa e conselhos;

- a algumas pessoas especiais que apareceram em minha vida que, em momentos difíceis, não mediram esforços e foram essenciais para que eu pudesse seguir adiante;

- ao PPGCS, professores e demais profissionais, pelo conhecimento adquirido e troca de experiências;

- à Universidade Federal de Santa Maria, uma universidade pública, gratuita e de qualidade, pela chance de ingressar em um universo de sabedoria, experiências e oportunidades;

Enfim, a todos àqueles que me acompanharam, não só durante o período de mestrado, mas ao longo de minha jornada e que são essenciais para eu ser uma pessoa melhor.

*Quando você se sentir fraquejar, lembre-se das
pessoas que mais torcem pelo seu sucesso.*

(Autor desconhecido)

RESUMO

FLUXO LATERAL NA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA MEDIDA COM O DUPLO ANEL CONCÊNTRICO

AUTOR: Daniel Boeno
ORIENTADOR: Paulo Ivonir Gubiani

A taxa de infiltração básica de água no solo (TIB) é importante na definição da taxa de irrigação e no planejamento de sistemas de conservação do solo. A estimativa da TIB tem sido feita frequentemente com duplo anel concêntrico, devido à facilidade de utilização e o baixo custo. Contudo, existem evidências de que a taxa de infiltração estável medida com o duplo anel concêntrico (TIE_{AC}) é maior do que a determinada por outros métodos e superestima a TIB. A carga hidráulica presente na superfície do solo e a ausência de formação ou de incremento do selamento superficial são particularidades do método que favorecem a superestimativa da TIB. Porém, uma lacuna ainda não explorada é se o fluxo lateral no interior do perfil, principalmente em perfis de solo heterogêneos, pode ser um grande causador da superestimativa da TIB pela TIE_{AC} . Uma maneira de detectar a existência de fluxo lateral é verificar se existem diferenças de TIE_{AC} medida em diferentes profundidades. Usando esta estratégia, o objetivo deste estudo foi investigar se existe discordância entre TIE_{AC} e o fluxo saturado medido em diferentes profundidades do perfil de solo. Medições de TIE_{AC} foram feitas no topo dos horizontes A, E e Bt (fator pedogenético), em uma área experimental com condições de solo compactado, escarificado, e ausência de ambos (fator antrópico). Não houve efeito das condições de solo na TIE_{AC} , provavelmente porque as medições ocorreram 7 meses após o estabelecimento das condições. Foi possível detectar a interferência pedogenética na TIE_{AC} , pois a TIE_{AC} do horizonte A foi 10 vezes maior do que a do Bt, este considerado o mais restritivo. O decréscimo da TIE_{AC} em profundidade indica que a TIE_{AC} medida na superfície do solo é uma superestimativa da TIB.

Palavras-chave: Camada restritiva. Superestimativa. Lateralização de fluxo.

ABSTRACT

LATERAL FLOW IN THE WATER INFILTRATION MEASURED WITH THE DOUBLE RING INFILTROMETER

AUTHOR: Daniel Boeno
ADVISOR: Paulo Ivonir Gubiani

The basic infiltration rate (TIB) is important in the definition of the irrigation rate and in the planning of soil conservation systems. The TIB's estimate has often been made with a double concentric ring, due to its easy usage and low cost. However, there is evidence that the rate of stable infiltration measured by the double concentric ring (TIE_{AC}) is greater than that determined by other methods and it overestimates the TIB. The hydraulic load present on the soil surface and the absence of formation or increase of the surface sealing are particularities of the method that favor the overestimation of the TIB. However, a gap that has not been explored yet is whether the lateral flow inside the profile, especially in heterogeneous soil profiles, may be a major cause of the overestimation of TIB by TIE_{AC} . A way of detecting the existence of lateral flow is to verify if there are differences in measured TIE_{AC} at different depths. Using this strategy, the objective of this study was to investigate if there is any disagreement between TIE_{AC} and the saturated flow measured at different depths of the soil profile. TIE_{AC} measurements were made at the top of horizons A, E and Bt (pedogenetic factor), in an experimental area with compacted, scarified soil conditions, and absence of both (anthropic factor). There was no effect of soil conditions in the TIE_{AC} , probably because the measurements occurred 7 months after the establishment of the conditions. It was possible to detect the pedogenetic interference in the TIE_{AC} , because the TIE_{AC} of the horizon A was 10 times greater than the Bt, which is considered the most restrictive. The decrease of the TIE_{AC} in depth indicates that the TIE_{AC} measured at the soil surface is an overestimation of the TIB.

Keywords: Restrictive layer. Overestimate. Flow lateralization.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	111
2. ARTIGO: ESTIMATIVA DO FLUXO LATERAL NA TAXA DE INFILTRAÇÃO ESTÁVEL MEDIDA COM O DUPLO ANEL CONCÊNTRICO.....	122
2.1. RESUMO.....	122
2.2. INTRODUÇÃO.....	123
2.2.1. Estimativa da taxa de infiltração básica do solo com duplo anel concêntrico	123
2.2.2. Fundamentação teórica e condições de contorno para a suposição $TIE_{AC} = TIB$	144
2.3. MATERIAL E MÉTODOS	177
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	199
2.5. CONCLUSÃO	254
2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	295
3. CONCLUSÃO.....	28
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	299
5. APÊNDICES.....	31

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da taxa de infiltração de água no solo é importante, pois trata-se de um processo sensível a modificações do sistema poroso, sendo, por isso, muito relacionado com a textura, com o estado de agregação e alterado pelo uso e manejo do solo (Sales et al., 1999). Por ser reflexo da habilidade do solo transmitir água, a infiltração é uma informação relevante no planejamento de sistemas de proteção do solo e da água e definição de projetos de irrigação e drenagem (Guerra, 2000). Segundo Sales (1999), trata-se de um processo com grande sensibilidade para identificar alterações causadas pela compactação, selamento superficial e bioporosidade, essa última tem grande capacidade de transmissão de água (Oades, 1993) e, por isso, afeta muito a infiltração.

A infiltração pode ser entendida como o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo, atingindo as camadas mais profundas. No início do evento de infiltração, seja por ocasião da chuva ou da irrigação, a taxa de infiltração será tanto maior quanto mais seco o solo estiver, e decresce com passar do tempo até atingir um valor constante, denominado de taxa de infiltração básica (TIB), na condição de solo em estado de saturação (Silva, 2017).

Vários métodos de medição da infiltração são utilizados para se obter uma estimativa da TIB, tais como o infiltrômetro de tensão, permeâmetro e/ ou infiltrômetro de pressão (Pott; De Maria, 2003), simulador de chuva (COSTA et al, 1999) e infiltrômetro de duplo anel concêntrico (Pruski et al., 1997, Bernardo et al, 2006; Brandão et al., 2006).

O baixo custo e a facilidade de utilização fazem com que o infiltrômetro de duplo anel concêntrico seja um equipamento muito usado para estimar a TIB. Entretanto, há várias evidências e suposições de que a taxa de infiltração estável obtida com o duplo anel concêntrico superestima a TIB, assunto que está detalhado no artigo a seguir resultante desta dissertação. Sem desprezar a importância da carga hidráulica acima do solo e o selamento superficial do solo como fatores que fazem com que a taxa de infiltração estável obtida com o duplo anel concêntrico seja diferente da TIB (Simões, 2005), esta dissertação tem foco específico no fluxo lateral, que pode ocorrer no interior do perfil, facilitando a entrada de água pela superfície do solo (Chowdary et al., 2006; Zhang et al., 2016).

A expectativa de ocorrência de fluxo lateral é naturalmente maior em perfis de solo heterogêneos, nos quais camadas menos permeáveis, por consequência da gênese ou da compactação causado pelo manejo do solo, forçariam a ocorrência de fluxo lateral nas camadas subjacentes mais permeáveis. Por isso, a oportunidade de fazer medições de infiltração em diferentes profundidades possibilita investigar a existência de fluxo lateral na taxa de infiltração estável medida com o duplo anel concêntrico (TIE_{AC}).

Se é comum estimar a TIB com medidas de TIE_{AC} obviamente é de grande relevância e necessidade saber o quanto esta é afetada por fluxo lateral.

2. ARTIGO: FLUXO LATERAL NA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA MEDIDA COM O DUPLO ANEL CONCÊNTRICO

2.1. RESUMO

A taxa de infiltração básica de água no solo (TIB) é importante na definição da taxa de irrigação e no planejamento de sistemas de conservação do solo. A estimativa da TIB tem sido feita frequentemente com duplo anel concêntrico, devido à facilidade de utilização e o baixo custo. Contudo, existem evidências de que a taxa de infiltração estável medida com o duplo anel concêntrico (TIE_{AC}) é maior do que a determinada por outros métodos e superestima a TIB. A carga hidráulica presente na superfície do solo e a ausência de formação ou de incremento do selamento superficial são particularidades do método que favorecem a superestimativa da TIB. Porém, uma lacuna ainda não explorada é se o fluxo lateral no interior do perfil, principalmente em perfis de solo heterogêneos, pode ser um grande causador da superestimativa da TIB pela TIE_{AC} . Uma maneira de detectar a existência de fluxo lateral é verificar se existem diferenças de TIE_{AC} medida em diferentes profundidades. Usando esta estratégia, o objetivo deste estudo foi investigar se existe discordância entre TIE_{AC} e o fluxo saturado medido em diferentes profundidades do perfil de solo. Medições de TIE_{AC} foram feitas no topo dos horizontes A, E e Bt (fator pedogenético), em uma área experimental com condições de solo compactado, escarificado, e ausência de ambos (fator antrópico). Não houve efeito das condições de solo na TIE_{AC} , provavelmente porque as medições ocorreram 7 meses após o estabelecimento das condições. Foi possível detectar a interferência pedogenética na TIE_{AC} , pois a TIE_{AC} do horizonte A foi 10 vezes maior do que a do Bt, este considerado o mais restritivo. O decréscimo da TIE_{AC} em profundidade indica que a TIE_{AC} medida na superfície do solo é uma superestimativa da TIB.

2.2. INTRODUÇÃO

2.2.1. Estimativa da taxa de infiltração básica do solo com o duplo anel concêntrico

A definição de taxa de infiltração básica de água no solo (TIB) não é totalmente clara nem tem exata e igual descrição entre os cientistas do solo. Hillel (2004), descreve a TIB como um processo que acontece em perfil de solo com gradiente mátrico nulo. Nesta condição e, em um solo homogêneo e com estrutura estável, o direcionamento do fluxo ocorre somente na vertical, por influência da gravidade. Conforme Bouwer (1986), a taxa de infiltração básica é um fluxo de pistão

vertical, e destaca a estratificação de camadas como um possível ocasionador de erros no valor de TIB.

Sem o propósito de sugerir um conceito preciso e universal, neste texto, nós usaremos um conceito de TIB que é útil operacionalmente para avaliar em relação a ele, desvios resultantes da tentativa de quantificá-lo com o uso de duplo anel concêntrico. Assim, consideraremos que a TIB expressa à *taxa de fluxo de água que entra pela superfície do solo, se propaga exclusivamente na direção vertical e descendente, saturando um perfil de solo semi-infinito*. Sob essas condições, a taxa de fluxo em qualquer seção ao longo do perfil de solo é constante e igual a TIB.

A TIB tem sido utilizada para estabelecer a taxa máxima de irrigação afim de evitar perdas de água por escoamento superficial e os riscos de erosão hídrica (Vilarinho et al., 2013). A TIB é utilizada também para o planejamento de sistemas de conservação do solo e para avaliar alterações advindas dos cultivos agrícolas e das práticas de manejo do solo (Riquelme, 2012; Vilarinho, 2013).

O duplo anel concêntrico tem sido amplamente usado como técnica de estimativa da TIB (Minosso et al., 2017; Pott e De Maria, 2003; Simões et al., 2005; Souza et al., 2014). O equipamento mantém uma lâmina de água na superfície do solo, e dela resulta uma curva contínua de taxa de infiltração que tende a um valor estável com a passar do tempo, chamado de taxa de infiltração estável (TIE) (Zwirtes et al., 2013; Da Silva et al., 2017). Neste texto, nós usaremos a sigla TIE_{AC} para explicitar sua obtenção com duplo anel concêntrico (subscrito AC).

A suposição ao se medir a TIE_{AC} é que ela seja uma boa estimativa da TIB. Contudo, observações experimentais ou análise das condições em que a TIE_{AC} é obtida indicam que a TIE_{AC} superestima a TIB do solo, que seria obtida sob precipitação natural, por vários motivos: (i) no teste não há alteração da permeabilidade da superfície do solo, mas durante a chuva pode haver diminuição da permeabilidade da superfície se ocorrer desagregação e selamento superficial (Brito et al., 1996); (ii) o teste aplica carga hidráulica na superfície do solo, fazendo com que ocorra aumento da infiltração em relação à que ocorreria em condição de chuva, sem formação de lâmina de água na superfície de solo (Costa et al., 1999); (iii) a infiltração de água proveniente do anel externo pode ser insuficiente para compensar todo o fluxo lateral que forma o bulbo de infiltração produzido pela sucção matricial do entorno do ponto onde a água está sendo aplicada na superfície do solo (Ahuja et al., 1976; Wu et al., 1997). Sob essa condição, parte da água proveniente do anel interno também seria desviada lateralmente no interior do perfil de solo (Wu et al., 1997). Em condições de chuva, a frente de umedecimento é aproximadamente plana sem ter forma de bulbo, o que eliminaria o efeito da sucção matricial na direção lateral; (iv) camadas menos permeáveis em subsuperfície, resultantes da pedogênese ou da compactação decorrente do uso do solos, forcem a lateralização do fluxo acima delas (Skaggs et al., 1980 e Bouwer, 1986). No teste de infiltração com duplo anel a camada sobrejacente mais permeável está saturada apenas dentro do bulbo de

saturação, e a resistência ao fluxo lateral da água é menor (pequena distância para o fluxo saturado lateral) do que quando toda a camada estiver saturada pela frente de umedecimento formada sob chuva (grande distância para o fluxo saturado lateral).

De todos os fatores mencionados que fariam a TIE_{AC} superestimar a TIB, o que mais carece de observação experimental é o fluxo lateral interno no perfil. Na busca bibliográfica feita para embasar este estudo não foram encontradas observações experimentais a campo evidenciando a interferência que pode haver de fluxo lateral na TIE_{AC} . A fundamentação teórica a seguir sugere que pode haver parcela significativa de fluxo na TIE_{AC} , motivando sua verificação experimental.

2.2.2. Fundamentação teórica e condições de contorno para a suposição $TIE_{AC} = TIB$

Para o propósito de compreender as condições de contorno para ser aceita a igualdade $TIB = TIE_{AC}$ é suficiente fazer uma análise simplificada da base física para o fluxo de água, considerando um perfil do solo semi-infinito, homogêneo e com condição inicial (conteúdo de água, potencial matricial e condutividade hidráulica) igual em todo o perfil. De acordo com a equação de Darcy-Buckingham, a densidade de fluxo de água entre dois pontos é diretamente proporcional à condutividade hidráulica e à diferença de potencial total, mas inversamente proporcional à distância entre os pontos (Libardi, 2010).

$$q = -K(\theta) \frac{\Delta\Psi}{\Delta x} \quad (1)$$

Em que q é a densidade de fluxo de água ($L T^{-1}$), $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica ($L T^{-1}$), como função da umidade volumétrica ($\theta, L^3 L^{-3}$), $\Delta\Psi$ é a diferença de potencial total (L) entre os pontos, Δx é a distância entre os pontos (L).

Aplicando a equação (1) em apenas uma direção, considerando um ponto na superfície do solo dentro no anel interno (A) e outro ponto na frente do bulbo de saturação (B), e explicitando as componentes gravitacional, de pressão e matricial, ela assume a forma da equação (2).

$$q = K_s \left(\frac{\psi}{\Delta x} + \frac{H}{\Delta x} + \cos(\alpha) \right) \quad (2)$$

Em que K_s é a condutividade hidráulica de solo saturado ($L T^{-1}$), ψ é o potencial matricial na frente de umedecimento (L), H é a carga hidráulica na superfície do solo dentro do anel interno (L), α é o ângulo entre uma linha de fluxo e a coordenada vertical. O termo $\cos(\alpha)$ representa o gradiente

gravitacional, variando de 0 para fluxo horizontal até 1 para fluxo vertical e Δx é a distância entre os pontos (L)

Com o passar do tempo de infiltração, Δx aumenta em todas as direções de fluxo, e os gradientes matricial ($\psi/\Delta x$) e de pressão ($H/\Delta x$) decrescem como aumento de Δx . A TIE_{AC} seria uma boa estimativa da TIB se (i) o gradiente gravitacional das direções diferentes da vertical e os gradientes matricial e de pressão de todas as direções forem desprezíveis ou (ii) se a parcela de água movimentada por estes gradientes for proveniente apenas da água fornecida pelo anel externo, garantido que toda a água do anel interno infiltre verticalmente. Para o atendimento das condições (i) Δx deve ser suficientemente grande, o que se supõem acontecer quando ocorre a estabilização da taxa de infiltração. Satisfeitas as condições $\psi/\Delta x \sim 0$ e $H/\Delta x \sim 0$ em todas as direções, a água do anel interno infiltra verticalmente no solo atuando nela o gradiente gravitacional na direção vertical ($\cos(\alpha) = 1$). Assim, a equação (2) assume a forma da equação (3), demonstrando que a TIE_{AC} é igual a K_s do perfil, conforme mencionam (Bouwer, 1986; Sales et al, 1999; Vilarinho et al., 2013; Reichardt, 2012).

$$q = K_s = TIE_{AC} = TIB \quad (3)$$

Contudo, em um perfil heterogêneo, a existência de uma camada restritiva (baixa K_s) ao fluxo vertical da água do anel interno força o surgimento de gradientes $H/\Delta x$ acima dela, que poderão causar fluxo lateral na camada sobrejacente mais permeável (maior K_s). Consequentemente, as igualdades da equação (3) não são verdadeiras, e a TIE_{AC} superestima q e TIB por uma quantidade de taxa de infiltração (i , $L T^{-1}$) proporcional aos gradientes laterais de $H/\Delta x$ que surgem na camada mais permeável.

$$q + i = K_s + i = TIE_{AC} = TIB + i \quad (4)$$

A situação de solo descrita acima, na qual surge a componente “ i ” da equação (4), poder ser representada por uma analogia de acoplamento de tubos perfurados (Figura 1). O diâmetro e as perfurações laterais do tubo superior, são maiores que no tubo inferior, para indicar uma camada superior mais permeável (maior K_s) e uma camada inferior menos permeável (menor K_s). A água que flui exclusivamente na vertical em todo o perfil (setas em vermelho direcionadas para baixo) é determinada pela camada inferior menos permeável. A água que entra a mais na camada superior (setas em azul) mais permeável encontra resistência ao chegar na camada inferior, provocando o surgimento de pressão interna na camada superior, que se dissipa gerando fluxo lateral “ i ” na

camada superior mais permeável. Em decorrência disso, a TIE_{AC} , ou seja, a taxa de entrada de água medida na superfície do solo, representa o somatório $q + i$.

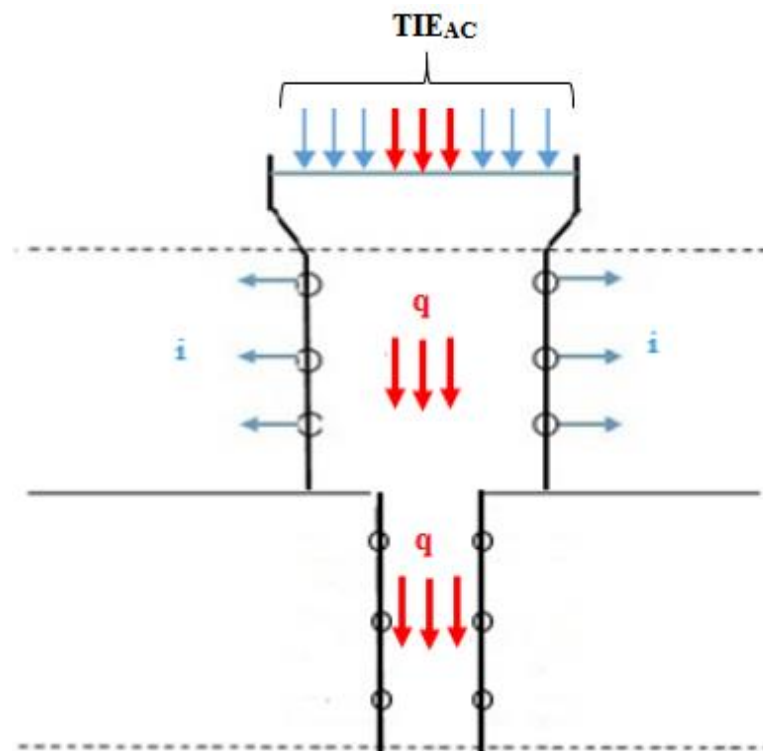


Figura 1 – Acoplamento de tubos perfurados como analogia de sequência de camadas de solo com diferentes permeabilidades para ilustrar componentes da equação (4).

Em perfis de solo, a presença de camada superior mais permeável que a camada subjacente é muito comum em solos pedogeneticamente estratificados como os Argissolos, nos quais os horizontes A e E são mais permeáveis que o horizonte Bt (Franco, 2010; Betim, 2013). Também é amplamente relatada a presença de camada subsuperficial compactada e menos permeável em solos cultivados em plantio direto (Drescher et al., 2011; Bonini et al., 2011). Portanto, em muitas condições de solo pode haver grande componente de fluxo lateral na TIE_{AC} .

A detecção de fluxo lateral resultante exclusivamente da água proveniente do anel interno é uma tarefa difícil de ser operacionalizada em experimento de campo. Embora seja possível instalar sensores para monitorar o conteúdo de água e o avanço do bulbo de umedecimento, é muito difícil separar a contribuição de cada anel (interno e externo) para o fluxo lateral. Essa mesma dificuldade implica em outra, a dificuldade de quantificar precisamente o fluxo saturado exclusivamente na vertical. Portanto, neste estudo será usada uma estratégia para se obter uma aproximação tanto de fluxo saturado exclusivamente na vertical como de fluxo lateral. A estratégia consiste em comparar medições de TIE_{AC} em diferentes profundidades do perfil. Como a TIE_{AC} é um fluxo estável e também o menor valor de fluxo que é obtido no teste de infiltração, ela serve como medida de

limite de fluxo na posição que está sendo medida. Se as condições de contorno consideradas para que a equação (3) seja válida são atendidas no perfil de solo, a TIE_{AC} medida em diferentes profundidades deveria ser a mesma, e a TIE_{AC} medida em superfície seria uma estimativa apropriada da TIB. Caso contrário, a TIE_{AC} medida em superfície não representa a noção de TIB presente na equação (3). Por estas razões, este estudo tem como objetivo testar a hipótese de que existe **decréscimo da** TIE_{AC} com o aumento da profundidade.

2.3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria-RS (29° 43' 14" Sul e 53° 42' 18" Oeste, com altitude aproximada de 113m), em Argissolo Vermelho Distrófico arênico (SANTOS et al., 2013). As medições de TIE_{AC} foram feitas em um experimento implantado em agosto de 2017, composto por nove parcelas com três condições de solo, distribuídas em delineamento inteiramente casualizado. Antes da implantação do experimento, a área vinha sendo cultivada em plantio direto por aproximadamente 7 anos.

A partir da implantação, o experimento foi conduzido com a sequência de manejos: o solo de todas as parcelas foi revolvido até 0,4 m de profundidade para incorporação de calcário (01/08/2016); semeadura de aveia preta (18/08/2016); três parcelas foram escarificadas até 0,15 m de profundidade e três foram compactadas com duas passadas do rodado de trator (16/11/2016); semeadura da soja (13/12/2016); semeadura de aveia preta (07/08/2017); reaplicação da escarificação e compactação (15/11/2017); semeadura da soja (05/12/2016). Essa sequência de atividades foi feita para atender ao propósito do experimento que era calibrar parâmetros de fatores de estresse físico do solo em modelo de crescimento de plantas. O experimento foi aproveitado para o estudo desta dissertação por incluir variabilidade vertical pedogenética de Argissolos e mudanças na estrutura do solo causadas pelo manejo de solo e plantas.

Os testes de infiltração foram realizados nas nove parcelas do experimento no período de 31/05/2018 a 22/06/2018. As parcelas foram denominadas conforme o manejo de solo adotado a partir da implantação do experimento, ou seja, sob três condições distintas de solo, compactado, escarificado e ausência de escarificação e compactação (três parcelas de 3 x 2 metros em cada condição). A profundidade e espessura dos horizontes A, E e Bt (Figura 2) foram caracterizadas considerando principalmente a textura do solo, pelo método de tato realizado a campo.

A TIE_{AC} foi medida no topo dos três horizontes (Figura 2), com infiltrômetro de anéis concêntricos, com diâmetros de 0,20 e 0,40 m para anel interno e externo respectivamente, ambos

inseridos no solo até a profundidade de 0,10 m a partir do topo do horizonte, de acordo com a metodologia descrita por EMBRAPA (2011). Para instalação dos anéis em profundidade, trincheiras foram abertas manualmente com progressivo rebaixamento da superfície do solo, após a medição da TIE_{AC} no horizonte sobrejacente, até atingir o topo do próximo horizonte de medição. Durante a escavação, a base da trincheira não sofreu pisoteio para evitar o aumento do estado de compactação do solo. A TIE_{AC} foi considerada a média de 5 valores finais do teste, quando era atendido o pressuposto de estabilidade de fluxo, o que demorou de 1 a 1,75 horas. Não foi possível medir a TIE_{AC} em todas as parcelas e profundidades no mesmo dia, devido ao grande número de medições (27 testes). O intervalo de tempo relativamente grande para completar todas medições (31/05/2018 a 22/06/2018) também foi consequência da ocorrência de chuvas no período.

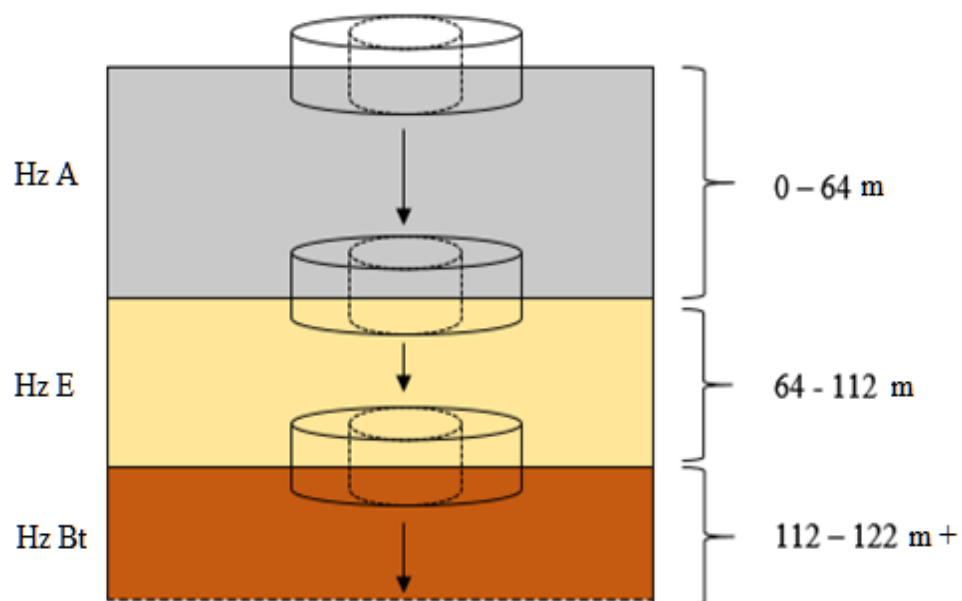


Figura 2 – Posições de inserção dos anéis concêntricos nos horizontes do Argissolo.

Para a medição de propriedades físicas do solo, o horizonte A e o horizonte E foram subdivididos em três e duas camadas, respectivamente. As camadas foram separadas por observação morfológica, considerando mudança de coloração (visual), textura (sensibilidade ao tato) e resistência percebida ao introduzir o objeto metálico pontiagudo. No horizonte Bt, as propriedades físicas foram medidas apenas na sua porção superficial.

No dia 20/09/2018 foram coletadas duas amostras de solo com estrutura preservada na posição mediana de cada camada do horizonte, utilizando cilindros metálicos com 0,04 m de altura e 0,057 m de diâmetro. As amostras foram saturadas por capilaridade por 48 horas, pesadas, submetidas à tensão de 6 kPa por 48 horas em coluna de areia (Reinert & Reichert, 2006) e pesadas

novamente. Posteriormente, as amostras foram novamente saturadas para determinação da condutividade hidráulica de solo saturado, com a utilização de permeâmetro de carga constante, conforme descrito por Libardi (2012). Três medições de fluxo de água foram feitas, com intervalos de 15 minutos para as amostras dos horizontes A e E e 30 minutos para as amostras do horizonte Bt, por este ser mais argiloso. Após a determinação da K_s as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 48 h. Para cada camada do perfil foi usada a K_s média de todas as medições nas duas amostras da camada. A porosidade total foi considerada como o conteúdo volumétrico de água na saturação; a macroporosidade foi considerada como o conteúdo volumétrico de água retido após o equilíbrio da amostra na tensão de 6 kPa; a macroporosidade foi calculada pela diferença entre porosidade total e microporosidade; e a densidade do solo foi calculada pela massa seca do solo dividida pelo volume do anel (Embrapa, 2011). Também para estas propriedades foi usada a média das duas amostras de cada espessura.

A granulometria foi determinada em amostras sem estrutura preservada coletadas em todas as espessuras. A determinação do teor de argila ($\Phi < 0,002$ mm), silte ($0,002 \leq \Phi < 0,05$ mm) e areia ($0,05 \leq \Phi < 2,0$ mm) foi feita com o método da pipeta, sendo utilizadas amostras de 20 gramas de terra fina seca ao ar. As amostras foram mantidas por uma noite em 60 mL de NaOH (1,0 %) como solução dispersante e após foram agitadas por 4 h, conforme procedimento descrito por Suzuki et al. (2015). Nas amostras da segunda camada do horizonte E determinou-se também a fração de cascalho ($\Phi > 2,0$ mm).

Os dados de condutividade hidráulica (K_s) não atenderam os pressupostos da normalidade e foram transformados em logaritmo de base 10 ($\text{Log}_{10}K_s$). O efeito dos horizontes e do manejo de solo sobre a porosidade total, densidade do solo, TIE_{AC} e $\text{Log}_{10}K_s$ foi testado pela análise de variância, seguida pelo teste Tukey para diferenciação das médias, considerando $p < 0,05$. As associações $\text{Log}_{10}K_s$ vs TIE_{AC} e porosidade total vs TIE_{AC} foram avaliadas com a análise de correlação de Pearson ($p < 0,05$). Os gráficos foram elaborados no programa Sigmaplot e as análises estatísticas no Sisvar (Ferreira, 2014).

2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve diferença significativa da TIE_{AC} entre as profundidades, mas não houve entre os manejos de solo (Figura 3). Importante destacar que as avaliações de infiltração foram realizadas sete meses após a adoção dos manejos de solo. Se houve interferência da compactação e da escarificação na TIE_{AC} em outubro de 2017, quando os manejos foram aplicados, esses efeitos não persistiram ou não foram detectados pela técnica de medição em maio de 2018, quando a TIE_{AC} foi determinada. Provavelmente a compactação e escarificação em outubro de 2017 devem ter alterado

a TIE_{AC} , mas esse efeito foi se dissipando no tempo, o que tem sido verificado por outros estudos. Por exemplo, Drescher et al. (2016) verificaram que, em um Latossolo, o efeito da escarificação sobre a TIE foi percebido até 24 meses após o manejo, porém com maior influência nos primeiros 12 meses. Prando et al. (2010) constataram que o efeito da escarificação em um Nitossolo Vermelho reduziu significativamente a TIE após um ano. Nas parcelas compactadas, possivelmente os bioporos criados com o sistema radicular da cultura da soja e pelos organismos do solo compensaram o efeito negativo da compactação na TIE_{AC} (Silva et al., 2009).

A TIE_{AC} medida na superfície (Hz A) foi 9 e 10 vezes maior em relação a TIE_{AC} medida no Hz E e Hz Bt, respectivamente (Figura 3). Essa grande diferença dificilmente seria causada por outros fatores que não fosse a ocorrência de fluxo lateral no perfil de solo. Sendo assim, podemos assumir que a TIE_{AC} medida no Hz A foi composta pelo fluxo saturado vertical do perfil de solo mais a componente de fluxo lateral. Esses resultados corroboram a hipótese deste estudo de que existe **decréscimo da** TIE_{AC} com o aumento da profundidade.

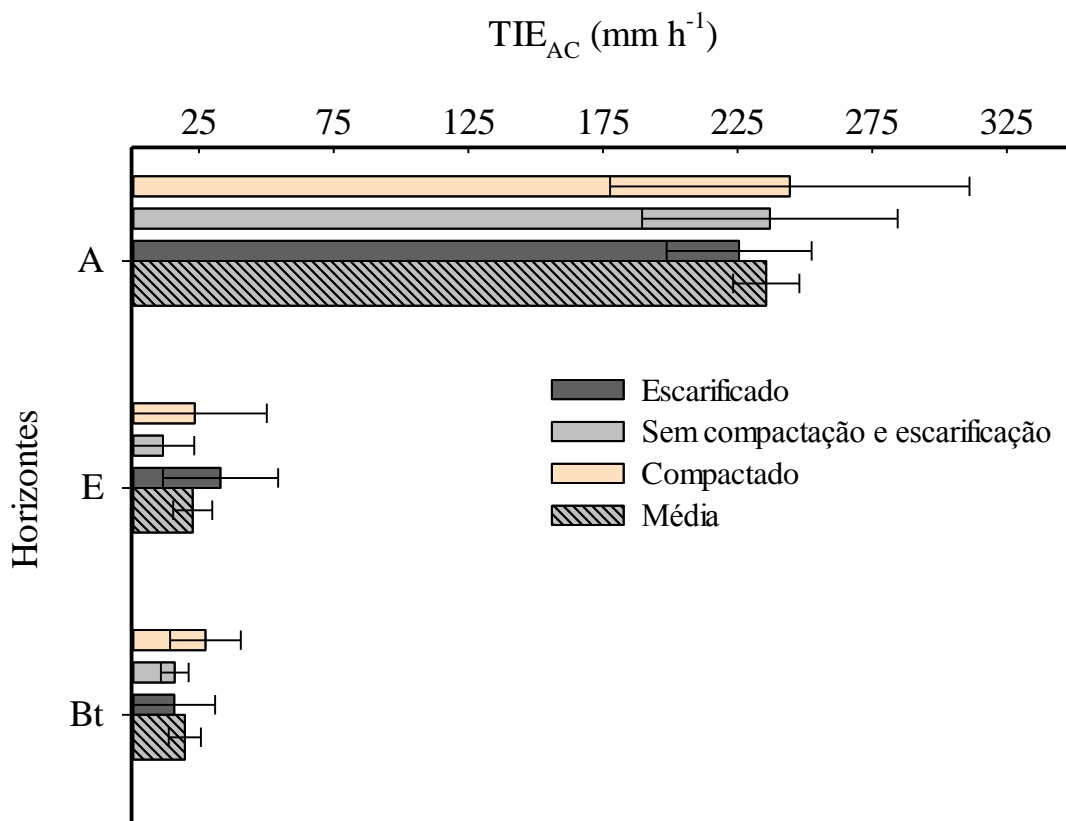


Figura 3 – Taxa de infiltração estável determinada com duplo anel concêntrico (TIE_{AC}), em diferentes condições de solo e profundidades do perfil de Argissolo.

Assumindo que no perfil de solo ocorreram as condições de contorno usadas na obtenção da equação (4), e considerando que o fluxo vertical do perfil (sinônimo de taxa de infiltração básica, TIB) seja a TIE_{AC} média entre os horizontes E e Bt (porção do perfil de maior restrição ao fluxo saturado), a substituição da TIB pela TIE_{AC} média entre os horizontes E e Bt na equação (4) produz uma estimativa da componente de fluxo lateral presente na TIE_{AC} medida na superfície (topo do horizonte A): $TIE_{AC} = TIB + i \rightarrow 235,66 \frac{mm}{h} = 24,16 \frac{mm}{h} + i \rightarrow i = 211,5 \frac{mm}{h}$. Isso significa que 90% da TIE_{AC} medida na superfície do solo foi constituída por fluxo lateral.

Essa estimativa de fluxo lateral no perfil pode estar subestimada. A equação (4) foi obtida com a pressuposição de perfil semi-infinito, ou seja, limitado na superfície e se aprofundando infinitamente. Porém, é coerente considerar que abaixo do horizonte Bt o substrato em decomposição e o material rochoso subjacente sejam menos permeáveis que o horizonte Bt. Por isso, as medições de TIE_{AC} feitas no topo do horizonte Bt também devem conter uma parcela que é fluxo lateral. Em decorrência disso, o fluxo vertical que representaria a TIB na equação (4) seria menor que a TIE_{AC} média entre os horizontes E e Bt, e o fluxo lateral que ocorre no perfil seria maior que o calculado para o horizonte A. Isso implicaria que para quantificar quanto da TIE_{AC} medida na superfície do perfil representa apenas fluxo vertical dela teria que ser descontado ainda o fluxo lateral dos horizontes E e Bt.

A equação (4) usa a noção de TIB como sendo o fluxo vertical saturado e constante no perfil semi-infinito. A dificuldade de aceitar essa noção para solos é que o limite real do solo na direção vertical pode estar a uma profundidade pequena a partir da superfície do solo em solos pouco profundos. Mesmo nos solos profundos, o perfil de solo tem profundidade finita, e o perfil semi-infinito extrapola o perfil de solo ao se propagar em direção ao substrato rochoso do qual o solo se originou. Possivelmente a TIB desse perfil semi-infinito saturado contendo o substrato rochoso raramente seria dependente da permeabilidade do solo, pois o solo teria que ser menos permeável que o substrato rochoso para ser ele o controlador da TIB.

Embora a conceito de TIB em perfil de solo seja questionável, as suposições de que a TIB da equação (4) existe, que ela é estimada pela TIE_{AC} e é modificada por ações de manejo são bem mais comuns na literatura do que a suposição de existência de fluxo lateral nas medições de TIE_{AC} . Com frequência, pesquisadores assumem que a TIB do solo é melhorada por ter havido aumento da TIE_{AC} medida na superfície do solo, em decorrência de ações de manejo, como o uso do sistema plantio direto (Santos et al., 2016), revolvimento superficial do solo por hastes de semeadoras (Drescher et al., 2017) e escarificadores (Camara & Klein, 2005; Prando et al., 2010; Drescher et al., 2016) ou melhoria da bioporosidade na camada de solo ocupada pelo sistema radicular (Prando et al., 2010; Gonçalves e Moraes, 2012; De Souza et al., 2014; Drescher et al., 2016). Contudo, há

grande chance de ter sido o fluxo lateral o fator diferenciador da TIE_{AC} , sem que nenhuma mudança tenha sido causada na TIB pelas ações de manejo. Embora não há dúvida que o aumento da permeabilidade na porção superficial do perfil de solo por qualquer ação de manejo aumenta a infiltração, armazenando mais água no solo antes de começar o escoamento superficial, a suposição que diferenças de medições de TIE_{AC} na superfície do solo representa o efeito de práticas de manejo na TIB é algo duvidoso e que carece melhor esclarecimento por novas pesquisas.

A TIE_{AC} medida na superfície também tem sido usada como estimativa da condutividade hidráulica de perfil de solo saturado (K_{ps}) (Bouwer, 1986; Zhang et al., 1999; Reynolds et al., 2002; Bodhinayake et al., 2004; Sales et al., 1999). A noção de K_{ps} deriva de fluxo saturado orientado na direção vertical e passando todo o perfil de solo com sua sequência de horizontes. Uma estimativa apropriada da K_{ps} seria obtida eliminando-se os fluxos horizontais preferenciais e removendo-se impedimentos causados pelo substrato subjacente ao perfil de solo. Como essas duas condições não podem ser satisfeitas na determinação da TIE_{AC} , a TIE_{AC} medida na superfície superestima a K_{ps} com magnitude proporcional ao fluxo lateral preferencial no perfil de solo. Na prática, há risco de os sistemas de drenagem baseados na K_{ps} (Riquelme et al., 2012; Vilarinho et al., 2013), não drenarem satisfatoriamente o excesso de água, assim como há risco de os terraços de contenção de enxurrada baseados na K_{ps} (Wolle e Carvalho, 1994) transbordarem se a TIE_{AC} usada para o dimensionamento desses sistemas superestimar a K_{ps} onde eles forem alocados.

Não houve interação entre manejo e camada para a condutividade hidráulica e densidade do solo, mas houve para a porosidade total (Tabela 2). A baixa condutividade hidráulica no horizonte E indica restrição à entrada de água vinda do horizonte A. Embora o horizonte E seja arenoso (Tabela 1), o que poderia lhe conferir maior permeabilidade, sua porosidade total foi menor que a do Bt em pelo menos uma das camadas (exceto na condição sem escarificação e compactação) e a condutividade hidráulica dele é menor que a da camada de 0 – 20 cm do horizonte A, que foi a maior e diferiu de todas as outras camadas (Tabela 2). O maior valor de condutividade hidráulica da primeira camada pode ter favorecido o aumento da TIE_{AC} medida na superfície do solo. Entretanto, é pouco seguro tentar explicar mudanças na TIE_{AC} usando diferenças de condutividade hidráulica, densidade e porosidade total, pois quase não houve correlação significativa entre os atributos e a TIE_{AC} (Tabela 3).

Tabela 1 – Granulometria do perfil de Argissolo.

Horizonte	Espessura (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Cascalho (%)
A	0 – 20	18	16	66	-
	20 – 43	21	18	61	-
	43 – 64	19	19	62	-
E	64 – 86	12	24	64	-

	86 – 112	10	18	64	8
Bt	112+	63	10	27	-

Tabela 2 – Propriedades físicas do perfil de Argissolo.

Horizonte	Espessura (cm)	Condições de solo			Média
		Compactado	Sem compactação e escarificação	Escarificado	
Condutividade hidráulica (mm h⁻¹)					
	0 – 20	46,37	86,38	274,28	135,68 a
A	20 – 43	8,32	9,62	7,44	8,46 b
	43 – 64	15,17	51,42	40,81	35,80 b
E	64 – 86	7,69	7,17	15,33	10,07 b
	86 – 112	3,21	3,89	3,80	3,64 b
Bt	112+	2,29	3,14	4,98	3,47 b
Média		13,84 A	26,94 A	57,77 A	-
Densidade do Solo (Mg m⁻³)					
	0 – 20	1,64	1,59	1,55	1,59 cd
A	20 – 43	1,69	1,58	1,68	1,65 bc
	43 – 64	1,65	1,58	1,56	1,60 cd
E	64 – 86	1,71	1,72	1,75	1,73 b
	86 – 112	1,88	1,77	1,85	1,84 a
Bt	112+	1,58	1,55	1,51	1,55 d
Média		1,69 A	1,63 B	1,65 AB	-
Porosidade Total (m³ m⁻³)					
	0 – 20	0,33 Bb	0,39 Aa	0,41 Aab	-
A	20 – 43	0,33 Ab	0,37 Aa	0,36 Abc	-
	43 – 64	0,36 Bab	0,37 Ba	0,45 Aa	-
E	64 – 86	0,36 Aab	0,38 Aa	0,36 Abc	-
	86 – 112	0,32 Bb	0,37 Aa	0,32 Bc	-
Bt	112+	0,41 Aa	0,41 Aa	0,43 Aa	-

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (P < 0,05).

Do total de dez correlações entre TIE_{AC} e K_s apenas uma foi significativa (Tabela 3), o que gera muita insegurança para explicar diferenças na TIE_{AC} com base na K_s. Contudo, de acordo com a lei de Darcy, $q = -K_s (dH/dX)$, o fluxo de água em solo saturado é diretamente proporcional à K_s (Libardi, 2010). Porém, há grande variabilidade na K_s (Mesquita et al., 2002; Smerud & Selker, 2001 e Betim, 2013), podendo ser de várias ordens de grandeza (De Almeida et al., 2018).

Alterações na estrutura do solo são inevitáveis durante a coleta, pode haver fluxo preferencial entre o solo e a parede do anel, e o tamanho reduzido da amostra pode não representar satisfatoriamente a configuração do sistema poroso da espessura de solo amostrada (Mohanty et al., 1998; Reynolds et

al., 2000). O mais provável é que a Ks medida nas amostras de 102 cm³ não caracterizou bem a Ks de cada espessura do perfil. Essas amostras podem ter excluído o efeito de poros grandes na Ks, como os bioporos. Diferentemente, o efeito desses poros e de outros fatores e melhor contemplado na medição da TIE com duplo anel concêntrico. Por isso, a variabilidade da infiltração medida a campo é menor que a variabilidade da Ks medida em amostras (Scherpinski et al., 2010). Isso também foi observado em nosso estudo, pois o coeficiente de variação da Ks foi 202 % e o da TIE_{AC} foi 32%. Embora o CV da Ks tenha sido alto, ele está dentro da faixa comum (48 a 320%) de ocorrência em solos (Jury et al., 1991).

Entre TIE_{AC} e porosidade total nenhuma correlação foi significativa (Tabela 3). Há resultados na literatura de estudos que detectaram (Sales et al., 1999; Miyazaki, 1996; Cadima et al., 1980; Brandão et al., 2006) e que não detectaram associação entre propriedades físicas do solo e taxa de infiltração estável (De Souza et al., 2014). Em nosso estudo, assim como no de De Souza et al. (2014), é bem provável que a magnitude da porosidade total medida nas amostras de solo não refletiu bem o nível de organização do sistema poroso do solo, visto que este é mais decisivo para o fluxo de água no solo do que o volume total de poros (Reis et al., 2018; Peth et al., 2008; Luo et al., 2008).

Tabela 3 – Coeficiente de correlação entre taxa de infiltração estável medida com o duplo anel concêntrico (TIE_{AC}) e condutividade hidráulica saturada (Ks) e porosidade total (PT).

Condutividade vs TIE_{AC}						
	KS A1	KS A2	KS A3	KS E1	KS E2	KS Bt
TIE (A)	-0.297	-0.706*	-0.336	-0.119	-0.093	-0.229
<i>P</i>	0.438	0.033	0.377	0.760	0.811	0.554
TIE (E)				0.377	0.219	-0.092
<i>P</i>				0.318	0.571	0.814
TIE (Bt)						0.138
<i>P</i>						0.723
Porosidade Total vs TIE_{AC}						
	PT (A1)	PT (A2)	PT (A3)	PT (E1)	PT (E2)	PT (Bt)
TIE (A)	0.101	0.243	-0.217	0.020	-0.468	0.047
<i>P</i>	0.797	0.528	0.576	0.959	0.204	0.904
TIE (E)				-0.445	-0.014	0.240
<i>P</i>				0.231	0.972	0.535
TIE (Bt)						-0.225
<i>P</i>						0.561

* significativo ao nível $P < 0,05$.

2.5. CONCLUSÃO

A hipótese de que haveria decréscimo da taxa de infiltração estável medida com o duplo anel concêntrico (TIE_{AC}) com o aumento da profundidade foi confirmada por nosso experimento. A TIE_{AC} medida na superfície do solo foi 9 e 10 vezes maior que TIE_{AC} medida no topo do horizonte E e no topo do horizonte Bt, respectivamente. Levando em conta que o menor valor de taxa de infiltração estável do perfil seja o que melhor estime a taxa de infiltração básica, então a taxa de infiltração estável medida na superfície do solo com o duplo anel concêntrico é uma superestimativa da taxa de infiltração básica.

2.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahuja LR, El-Swaify SA, AND Rahman A. Measuring hydrologic properties of soil with a double-ring infiltrometer and multiple depth tensiometers. *Soil Sci Soc Am J.* 1976;40:494-499. doi:10.2136/sssaj1976.03615995004000040016x.
- Aarao Reis FDA, Bolster D, Voller VR. Anomalous Behaviors During Infiltration Into Heterogeneous Porous Media. *Adv Water Resour.* 2018;113:180-188. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.01.010>
- Bernardo S, Soares AA, Mantovani EC. Manual de irrigação. 8. Viçosa: UFV, 2006.
- Betim LL. Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do córrego Palmital [Dissertação]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2010.
- Bodhinayake W, Si BC, Noborio K. Determination of hydraulic properties in sloping landscapes from tension and double-ring infiltrometers. *Vadose Zone J.* 2004;3:964-970. DOI: 10.2113/3.3.964.
- Bonini AK, Secco D, Santos RF, Reinert DJ, Reichert JM. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. *Ciênc Rural.* 2011;41:1543-1548. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782011005000122>.
- Bouwer H. Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. U.S. Water Conservation Laboratory, ARS, USDA, Phoenix, Arizona. Copyright, American of Agronomy- Soil Sci Soc Am; 1986. P. 825-842.
- Brandão VS, Cecílio RA, Pruski FF, Silva DD. Infiltração da água no solo. 3. ed. Viçosa: UFV, 2006.
- Brito LTL, Loureiro BT, Deniculi W, Ramos MM, Soares JM. Influência do método na determinação da velocidade de infiltração. *Rev Bras Ciênc Solo.* 1996;20:503-507.
- Buckingham E. Studies of the movement of soil moisture. USDA. Bur. Soil Bull. 38. US. Government Printing Office, Washington D.C; 1907.

Camara RK, Klein VA. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2005;29:789-796. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000500014>.

Cecilio RA, Martinez MA, Pruski FF. and Silva DD. da. Modelo para estimativa da infiltração de água e perfil de umidade do solo. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2013;37:411-421. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000200012>.

Costa EL, Silva AM, Colombo A, Abreu AR. Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis. *Rev Bras Eng Agríc Amb*. 1999;3:131-134. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n2p131-134>.

Darcy H. Les fontaines publique de la Ville de Dijon. Paris, Victor Dalmont, 1856.

Da Silva NF, Cunha FN, Filho FRC, Morais WA, Cunha ES, Roque RC, Alves DKM, Teixeira MB. Métodos para estimativa da infiltração de água em um Latossolo sob plantio direto e convencional. *Gl Sci Technol*. 2017;10:169-176.

De Almeida KSSA, Da Silva Souza, L, Da Silva Paz VP, Dos Santos Silva FT, Santos DN, & Pereira JDSL. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em latossolo amarelo distrocoeso, no município de Cruz das Almas. *Irriga*. 2018;22:259-274. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p259-274>

Cessa RMA, De Souza MF, Brachtvogel EL, De Souza FR, Panachuki E, Varão IJH, COSTA, J. S.; ARAÚJO, M. L.; CAÇOL, P. S. K. Velocidade de infiltração básica de água como indicador da qualidade porosa do solo. *Rev Agrogeoambiental* – v. 6, n. 2, 2014. <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v6n22014627>.

Drescher MS, Reinert DJ, Denardin JE, Gubiani PI, Faganello A, & Drescher GL. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. *Pesq agropec bras*. 2016;51:159-168. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200008>.

Drescher MS, Reinert DJ, Denardin JE, Gubiani PI, Faganello A, Silva BR Da & Zardin MC. (2017). Fertilizer shanks to promote soil decompaction in the seeding operation. *Ciênc Rural*, 47(3), e20160026. Epub January 05, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20160026>

Drescher MS, Eltz FLF, Denardin JE, Faganello A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob sistema plantio direto. *Rev Bras Ciênc Solo*, 35: 1713 – 1722, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000500026>.

Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, 2011.

Ferreira DF. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciênc agrotec*. 2014;38:109-112. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.

Franco GB. Fragilidade ambiental e qualidade da água na Bacia do Rio Almada [Tese]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2010.

- Gonçalves FC. e Moraes MH. Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo. *Irriga*. 2012;17:337 - 345. <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v17n3p337>
- Hillel D. *Introduction to environmental soil physics*. San Diego: Academic Press, 2003.
- Jury WA, Gardner WR, Gardner WH. *Soil physics*. New York: John Wiley and Sons, 1991.
- Libardi PL. Água no solo. In: Jong van Lier, Q. (Ed). *Física do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.
- Libardi PL. *Dinâmica da água no solo*. 2. Ed. São Paulo: EDUSP, 2012.
- Luo LF, Lin HS, Halleck P. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using X-ray computed tomography. *Soil Sci Soc Am J*. 2008;72:1058– 1069. doi:10.2136/sssaj2007.0179.
- Mesquita MGBF, Moraes SO, Corrente JE. More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity. *Sci Agric*. 2002;5:789-793. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162002000400025>.
- Minosso J, Antoneli V, Freitas AR. Variabilidade sazonal da infiltração de água no solo em diferentes tipos de uso na região sudeste do Paraná. *Geografia Meridionalis*. 2017;03:86-103. <http://dx.doi.org/10.15210/gm.v3i1.11041>
- Miyazaki T. Bulk density dependence of air entry suctions and saturated hydraulic conductivities of soils. *Soil Sci*. 1996;161:484-490. <http://dx.doi.org/10.1097%2F00010694-199608000-00003>
- Reichardt KA água na produção agrícola. Piracicaba: Fundação Cargill, 1987.
- Mohanty BP, Skaggs TH, Van Genuchten, M.T. Impact of saturated hydraulic conductivity on the prediction of tile flow. *Soil Sci Soc Am J*. 1998;62:1522- 1529.
- Otoni Filho TB, Otoni MV, Oliveira MB de and Macedo JR de. Estimation of field capacity from ring infiltrometer-drainage data. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 2014;38:1765-1771. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000600011>.
- Peth S, Horn R, Beckmann F, Donath T, Fischer J, Smucker AJM. Threedimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 2008;72:897– 907. doi:10.2136/sssaj2007.0130.
- Pott CA, De Maria IC. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2003;27:19-27. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000100003>.
- Prando MB, Olibone D, Olibone APE & Rosolem CA. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2010;34:693-700. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300010>.
- Pruski FF, Vendrade V, Oliveira EF de, Balbino LC, Ferreira PA, Werlang L, Carvalho L. Infiltração da água num Latossolo Roxo. *Pesq Agropec Bras*. 1997;32:77-84.
- Reichardt K, Timm LC. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. 2. ed., Barueri: Manole, 2012.

- Reinert DJ, Reichert JM. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo - protótipos e teste. *Ciênc Rural*. 2006;36:1931-1935. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000600044>.
- Reynolds WD, Bowman BT, Brunke CF, Drury CF, Tan CS. Comparasion of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci Soc Am J*. 2000;64:478-484. doi:10.2136/sssaj2000.642478x.
- Reynolds WD, Elrick DE & Youngs EG. Single-ring and double-or concentring-ring infiltrometers. In: Dane JH & Topp GC, eds. *Methods of soil analysis*. Madison, Soil Sci Soc Am J. 2002:821-826.
- Riquelme AM. Velocidade de infiltração de água em Latossolo Vermelho – Amarelo distrófico sob diferentes cultivos. *Rev Bras Ciênc Amazon*. 2012; 01:187-191.
- Sales LE de O, Ferreira MM, Oliveira MS, Curi N. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. *Pesq Agropec Bras*. 1999;34:2091- 2095. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X1999001100016>.
- Santos ILN, Filho RRG, De Carvalho CM, Santos KV, Oliveira DTB e Souza LG. Velocidade de infiltração da água no solo cultivado por milho doce com cobertura de crotalária. *Rev Bras Agric Irrig*. 2016;10:925 - 934. DOI: 10.7127/RBAI.V10N500469.
- Santos HG Dos, et al. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013.
- Scherpinski C, Uribe-Opazo MA, Vilas Boas MA, Sampaio SC & Johann JA. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo da água no solo. *Acta Sci Agron*. 2010;32:7-13. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.959>.
- Silva FG Da. *Condutividade hidráulica do solo saturado e fluxo preferencial em amostras confinadas de terra [Dissertação]*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2015.
- Silva NF, Cunha FN, Filho FRC, Morais WA, Cunha ES, Roque RC, Alves DKM, Teixeira MB.. Métodos para estimativa da infiltração de água em um latossolo sob plantio direto e convencional. *Global Sci-Tech*. 2017;10:169 – 176.
- Silva VR Da, Reichert JM, Reinert DJ, Bortoluzzi EC. Soil water dynamics related to the degree of compation of two brasilian oxisols under no-till sistem. *Rev Bras Ciênc Solo*. 2009;33:1097-1104. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000500003>
- Simões WL, Figueirêdo VB, Silva EL. Uso do cilindro infiltrômetro único em diferentes solos. *Eng Agríc, Jaboticabal*, 2005;25:359-366.
- Skaggs RW, Miller DE, & Brooks RH. Soil water. Part I - Properties. In: Jensen ME, ed. *Design and operation of farm irrigation systems*. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1980; 77-123.
- Suzuki LEAS, Reichert JM, *, Albuquerque JA, Reinert DJ, Kaiser DR. Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil. *Geoderma Regional*, 2015; 5:64 – 70. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.03.005>

Vilarinho MKC, et al. Determinação da taxa de infiltração estável de água em solo de Cerrado nativo. Rev Bras Agric Irrig. 2013; 7:17-26.
<https://www.google.com/search?q=doi+10.7127/rbai.v7n100097>.

Wolle CM, and Carvalho CS. Taludes Naturais. In F. F. Falconi and A. N. Jr. (eds), Solos do litoral de São Paulo. Associação Brasileira de Mecânica de Solos - Núcleo Regional de São Paulo - ABMS, São Paulo, 1994.

Wu LL, Pan MJ, Roberson And Shouse PJ. Numerical evaluation of ring-infiltrometer under various soil conditions. Soil Sci. 1997;162:771-777.
<http://dx.doi.org/10.1097/00010694-199711000-00001>.

3. CONCLUSÃO

Ao finalizar esta dissertação, primeiramente reforçamos a relevância da conclusão de caráter mais científico, que foi a conclusão do artigo oriundo deste trabalho.

A hipótese de que haveria decréscimo da taxa de infiltração estável medida com o duplo anel concêntrico (TIE_{AC}) com o aumento da profundidade foi confirmada por nosso experimento. A TIE_{AC} medida na superfície do solo foi 9 e 10 vezes maior que TIE_{AC} medida no topo do horizonte E e no topo do horizonte Bt, respectivamente. Levando em conta que o menor valor de taxa de infiltração estável do perfil seja o que melhor estime a taxa de infiltração básica, então a taxa de infiltração estável medida na superfície do solo com o duplo anel concêntrico é uma superestimativa da taxa de infiltração básica.

Além disso, é importante destacar detalhes operacionais que podem ser melhorados e oportunidades para novos estudos nesse tema. Dos detalhes operacionais, podemos destacar o tempo transcorrido entre a implantação dos manejos de solo e os testes de infiltração que devem ser menores do que o realizado nesse trabalho e as amostragens de solo para análise das propriedades físicas podem ser feitas com amostras maiores do que os 103 cm³, afim de aumentar sua representatividade. Das oportunidades de novos estudos a partir dos resultados oriundos desta dissertação, podemos citar a medição da TIE em diferentes condições de umidade, para isolar o efeito da umidade inicial do solo como possível causa de variações na TIE_{AC} e, medições de TIE em solos com perfil homogêneo pedogeneticamente, como o Latossolo, com e sem camada superficial compactada, para isolar o efeito de manejo.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHOWDARY, V. M.; RAO, M. D.; JAISWAL, C. S. Study of infiltration process under different experimental conditions. Agricultura l water management 83 (2006) 69 – 78.

EGUCHI, S.; HASEGAWA, S. Determination and characterization of preferential water flow in unsaturated subsoil of andisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.72, n.2, p.320-330, 2008.

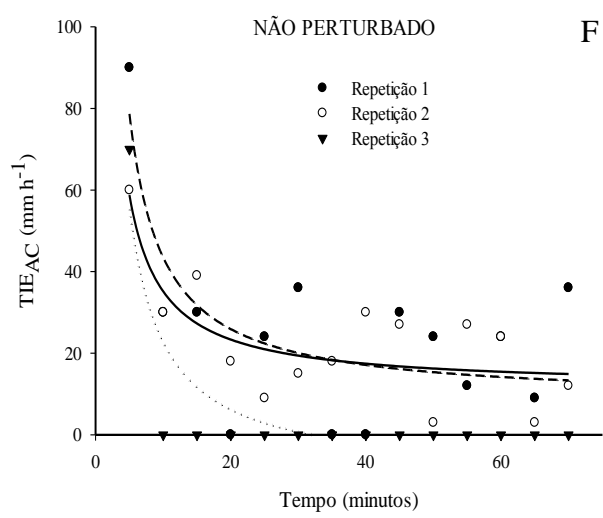
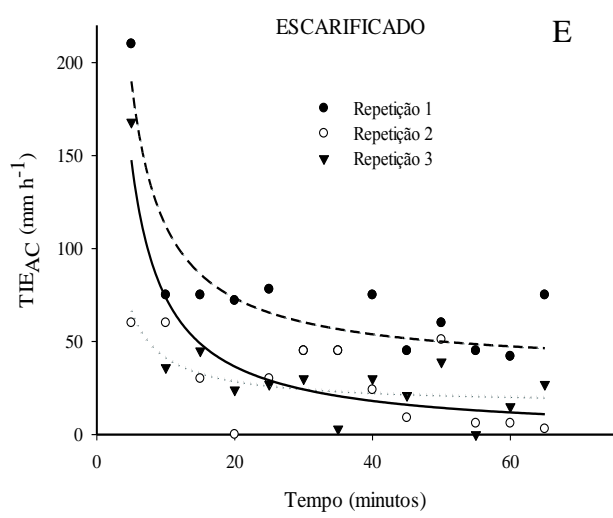
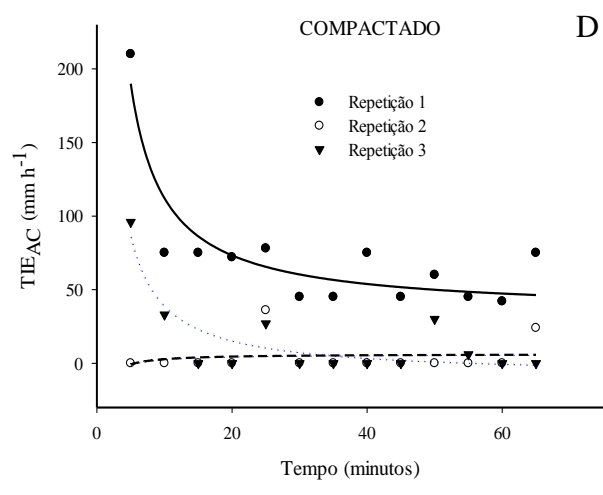
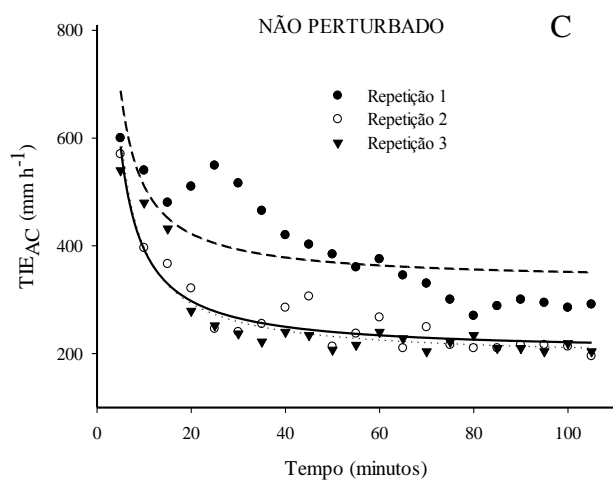
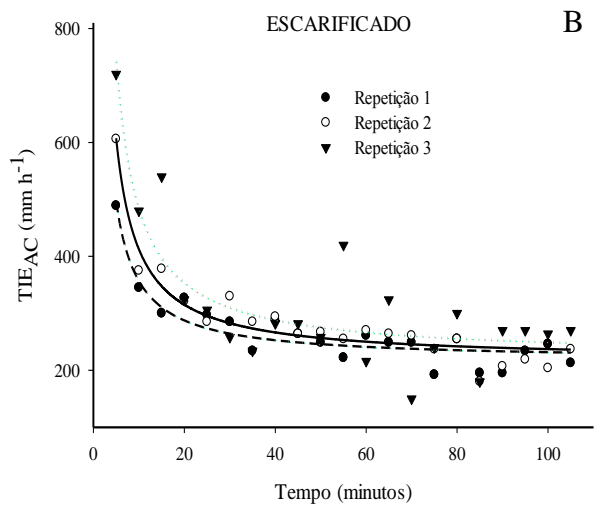
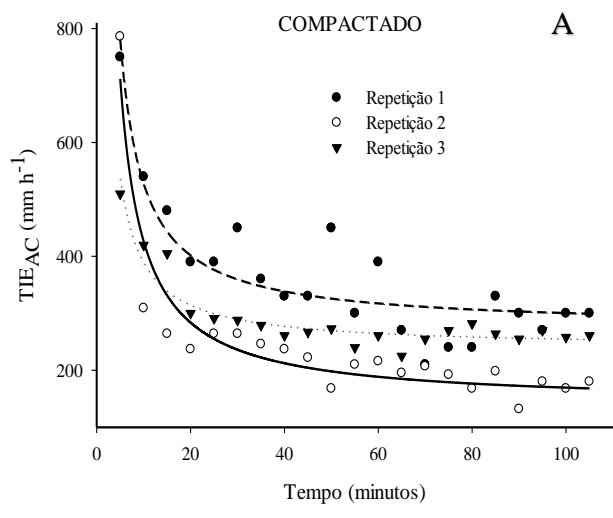
GUERRA, H. O. C. **Física dos solos**. Campina Grande: UFPB, 2000. 173p.

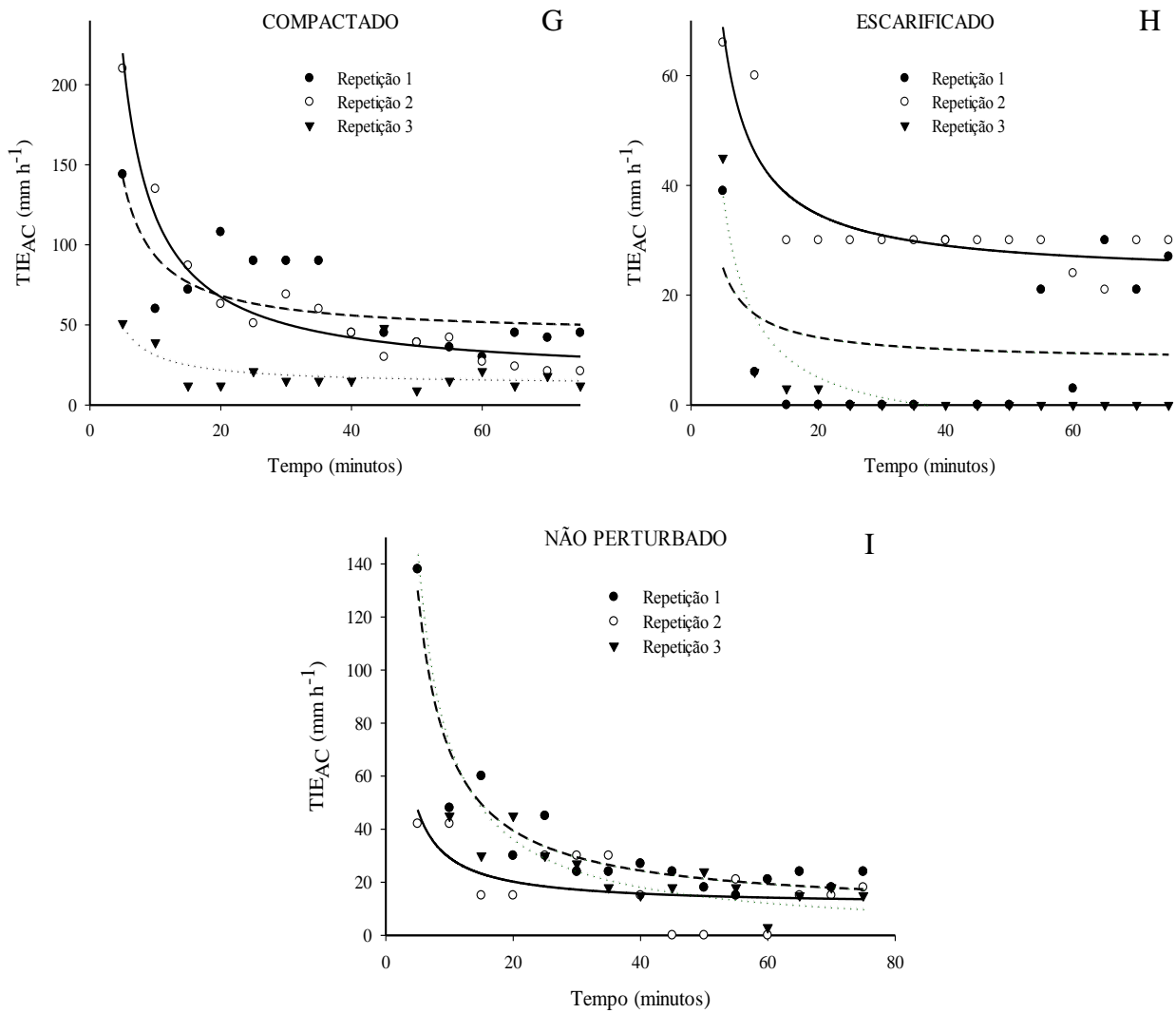
OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1-4, p. 377-400, 1993.

SIMÕES, W. L, FIGUEIRÊDO VB, SILVA EL. Uso do cilindro infiltrômetro único em diferentes solos. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.25, n.2, p.359-366, maio/ago. 2005.

SILVA, N. F.; et al. Métodos para estimativa da infiltração de água em um latossolo sob plantio direto e convencional. **Gl Sci Technol**. 2017;10:169 – 176.

5. APÊNDICES





Taxa de infiltração medida com duplo anel concêntrico no horizonte A (A, B, C), horizonte E (D, E, F) e horizonte Bt (G, H, I).