

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

Lucas Raimundo Rauber

**PLANTAS DE COBERTURA E UMIDADE ANTECEDENTE AFETAM A  
INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM UM ARGISSOLO**

Santa Maria, RS  
2023

Lucas Raimundo Rauber

**PLANTAS DE COBERTURA E UMIDADE ANTECEDENTE AFETAM A  
INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM UM ARGISSOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo em 20/10/2023, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo

Orientador: Prof. Dr. Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS  
2023

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Rauber, Lucas Raimundo

Plantas de cobertura e umidade antecedente afetam a infiltração de água em um Argissolo / Lucas Raimundo Rauber.- 2023.

130 p.; 30 cm

Orientador: Dalvan José Reinert

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, RS, 2023

1. Hidrologia 2. Escoamento superficial 3. Conservação da água 4. Terraços 5. Adubação verde I. , Dalvan José Reinert II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, LUCAS RAIMUNDO RAUBER, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Lucas Raimundo Rauber**

**PLANTAS DE COBERTURA E UMIDADE ANTECEDENTE AFETAM A  
INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM UM ARGISSOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo em 20/10/2023, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Aprovada em 20 de outubro de 2023

---

**Dalvan José Reinert, Dr. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientador)**  
**(Videoconferência)**

---

**Paulo Ivonir Gubiani, Dr. (UFSM)**  
**(Videoconferência)**

---

**Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)**  
**(Videoconferência)**

---

**Jackson Adriano Albuquerque, Dr. (UDESC)**  
**(Videoconferência)**

---

**Luís Carlos Timm, Dr. (UFPel)**  
**(Videoconferência)**

Santa Maria, RS  
2023

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde e dom da vida. Agradeço aos meus pais Eugênio e Ivanir, pelo apoio e inspiração. Agradeço ao Professor Dalvan José Reinert, pela orientação na condução deste trabalho, pelo exemplo pessoal e profissional que representa e pela grande amizade formada. Agradeço a CAPES, pela concessão da bolsa de estudos. Agradeço a UFSM e ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS/UFSM), pela oportunidade de doutoramento. Agradeço a todos os professores e funcionários do PPGCS e departamento de Solos da UFSM, pelos ensinamentos dentro e fora de sala de aula e pela experiência profissional e pessoal repassada. Agradeço aos colegas de Pós-Graduação e de laboratório de Física do Solo, pelo convívio, amizade e ensinamentos e experiência repassados. Agradeço aos colegas de grupo de pesquisa Micael Stolben Mallman, Pablo do Amaral Alonço e Francieli de Vargas, pelos ensinamentos, ajuda na condução do trabalho e amizade formada. Agradeço ao colega Fábio Soares Pires, pela ajuda na proposição da automação de métodos pontuais de avaliação da infiltração. Agradeço aos bolsistas de iniciação científica Fábio Pedrazi de Vargas, Willian Pereira Costa, Luan Carlo Bosetti, João Krein Mozzaquatro e Carlos Eduardo Bertoldo, pelo convívio, ajuda no trabalho experimental e grande amizade formada. Agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho e no meu processo de doutoramento. Muito obrigado.

## RESUMO

### PLANTAS DE COBERTURA E UMIDADE ANTECEDENTE AFETAM A INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM UM ARGISSOLO

AUTOR: Lucas Raimundo Rauber  
ORIENTADOR: Dalvan José Reinert

Embora a importância hidrológica da infiltração de água no solo, a caracterização de suas variáveis é campo de incerteza na hidrologia. Além disso, relações da infiltração com plantas de cobertura, umidade antecedente e escalas de medição não estão suficientemente entendidas. Os objetivos foram: (i) propor sistemas automáticos de obtenção de dados de infiltração pontual para infiltrômetros (**capítulo I**); (ii) estudar como diferentes sistemas com plantas de cobertura se diferenciam no aumento da infiltração de água no solo e no controle do escoamento superficial (**capítulo II**); e (iii) estudar as relações da taxa de infiltração estável medida com infiltrômetros (Tie) com a umidade antecedente, com a permeabilidade da superfície do solo, com o método de medição e com o tempo de medição (**capítulo III**). A proposição da automação de infiltrômetros consistiu em uma etapa metodológica e de contribuição tecnológica. Os sistemas são de fácil construção e usam transdutores de pressão e microcontrolador de código aberto (Arduino). Além disso, esses sistemas possibilitaram a obtenção de um banco de dados robusto para relacionar a infiltração com vários fatores no **capítulo III**. Para atender o segundo e terceiro objetivos, dois protocolos experimentais foram utilizados, ambos sob Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico, em Santa Maria/RS. O primeiro protocolo consistiu no monitoramento da precipitação e do escoamento superficial em escala de parcelas (14,5 x 3 m) no ano de 2022, em que seis condições de cobertura foram analisadas: solo exposto com manutenção de crosta superficial; amendoim forrageiro; gramíneas permanentes; aveia e nabo forrageiro no inverno e feijão no verão; aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; e azevém no inverno e feijão no verão. Paralelamente, a infiltração foi medida com infiltrômetros em cada parcela. O segundo protocolo consistiu na medição da infiltração pontual em até 14 condições de umidade antecedente entre 2021 e 2023, duas condições de manejo (plantio direto; plantio direto com subsolagem), com dois métodos (duplo anel concêntrico e infiltrômetro de Cornell) e por tempo de até 48 h. Descobrimos que plantas de cobertura apresentam grande capacidade em atenuar escoamento superficial (97%), e que os benefícios foram mais evidentes em solo coberto com amendoim forrageiro que por cultivos anuais e gramíneas permanentes. Porém, a diferenciação das espécies no aumento da infiltração depende das características dos eventos de precipitação, da sazonalidade e da escala de medição. A taxa de infiltração estável medida com infiltrômetros depende da umidade antecedente do solo, da permeabilidade das camadas superficiais, do método de medição e sofre pouco efeito da ampliação do tempo de medição (> 2 h). Os efeitos do método e da permeabilidade superficial, contudo, diminuíram com o aumento da umidade antecedente. Sob perfil quase saturado, a infiltração vertical é adequadamente caracterizada por infiltrômetros. Logo, a umidade antecedente do solo é uma condicionante importante da taxa de infiltração estável que requer ser devidamente considerada.

**Palavras-chave:** Hidrologia, escoamento superficial, conservação da água, terraços, adubação verde.

## ABSTRACT

### COVER CROPS AND ANTECEDENT MOISTURE AFFECT WATER INFILTRATION IN A ULTISOL

AUTHOR: Lucas Raimundo Rauber

ADVISOR: Dalvan José Reinert

Despite the hydrological importance of soil water infiltration, the characterization of its variables is a field of uncertainty in hydrology. Furthermore, relationships of infiltration with cover crops, antecedent soil moisture, and measurement scales are not sufficiently understood. The objectives were: (i) to propose automatic systems for obtaining point infiltration data for infiltrometers (**chapter I**); (ii) study how different systems with cover crops differ in increasing soil water infiltration and controlling surface runoff (**chapter II**); and (iii) study the relationships of the steady state infiltration rate measured with infiltrometers ( $T_{ie}$ ) with the antecedent soil moisture, with the permeability of the surface soil, with the measurement method and with the measurement time (**chapter III**). The proposition of infiltrometer automation consisted of a methodological stage and technological contribution. The systems are easy to build and use pressure transducers and an open source microcontroller (Arduino). Furthermore, these systems made it possible to obtain a robust database to relate infiltration with various factors in **chapter III**. To achieve the second and third objectives, two experimental protocols were used, both in Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico (Ultisol), in Santa Maria/RS. The first protocol consisted of monitoring precipitation and surface runoff on a plot scale (14.5 x 3 m) in the year of 2022, in which six cover conditions were analyzed: bare soil with surface crust; forage peanuts; permanent grasses; oats and turnips in winter and beans in summer; oats and vetch in winter and beans in summer; and ryegrass in winter and beans in summer. In addition, infiltration was measured with infiltrometers in each plot. The second protocol consisted of measuring point infiltration in up to 14 antecedent soil moisture conditions between 2021 and 2023, two management conditions (no-till; no-till with soil chiseling), with two methods (double ring and Cornell infiltrometer) and by time up to 48 hours. We discovered that cover crops have a great capacity to attenuate surface runoff (97%), and that the benefits were more evident in soil covered with forage peanuts than in annual crops and permanent grasses. However, the differentiation of species in increasing infiltration depends on the characteristics of precipitation events, seasonality and measurement scale. The steady infiltration rate measured with infiltrometers depends on the antecedent soil moisture, the permeability of the surface layers, the measurement method and is low affected by extending the measurement time ( $> 2$  h). The effects of the method and surface permeability, however, decreased with increasing antecedent soil moisture. Under a nearly saturated profile, vertical infiltration is adequately characterized by infiltrometers. Therefore, the antecedent soil moisture is an important factor that affects the steady infiltration rate that requires proper consideration.

**Keywords:** Hydrology, surface runoff, water conservation, terraces, green manure.

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 10 |
| <b>2 HIPÓTESES</b> .....  | 17 |
| <b>3 OBJETIVOS</b> .....  | 18 |
| 3.1 OBJETIVO GERAL.....   | 18 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 18 |
| <b>4 CAPÍTULO I. AUTOMAÇÃO DE MEDIÇÕES DE INFILTRAÇÃO PONTUAL DE<br/>ÁGUA NO SOLO</b> .....                   | 19 |
| 4.1 RESUMO .....  | 19 |
| 4.2 ABSTRACT .....  | 20 |
| 4.3 INTRODUÇÃO.....   | 21 |
| 4.4 MATERIAL E MÉTODOS .....  | 21 |
| 4.4.1 Sistemas de leitura .....   | 21 |
| 4.4.2 Instalação dos sensores nos infiltrômetros .....  | 24 |
| 4.4.3 Calibração dos sensores .....   | 29 |
| 4.4.4 Medição da infiltração no campo com os infiltrômetros automatizados.....                                | 30 |
| 4.4.5 Validação .....   | 33 |
| 4.4.6 Análise estatística.....  | 35 |
| 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....  | 35 |
| 4.6 CONCLUSÕES.....   | 40 |
| REFERÊNCIAS .....   | 40 |
| <b>5 CAPÍTULO II. ATENUAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL POR PLANTAS<br/>DE COBERTURA NO SUL DO BRASIL</b> ..... | 42 |
| 5.1 RESUMO .....  | 42 |
| 5.2 ABSTRACT .....  | 43 |
| 5.3 INTRODUÇÃO.....   | 44 |
| 5.4 MATERIAL E MÉTODOS .....  | 46 |
| 5.4.1 Caracterização da área e dos tratamentos .....  | 46 |
| 5.4.2 Monitoramento da precipitação e do escoamento superficial .....   | 49 |
| 5.4.3 Precipitação natural .....  | 50 |
| 5.4.4 Precipitação simulada .....   | 53 |
| 5.4.5 Particionamento da precipitação .....   | 54 |
| 5.4.6 Hietograma e hidrograma.....  | 55 |



|   |           |
|---|-----------|
| 5.4.7 Umidade do solo .....   | 55        |
| 5.4.8 Rugosidade superficial.....   | 55        |
| 5.4.9 Biomassa vegetal .....  | 56        |
| 5.4.10 Infiltração pontual .....  | 56        |
| 5.4.11 Caracterização físico hídrica do solo .....  | 57        |
| 5.4.12 Análise estatística .....  | 58        |
| 5.5 RESULTADOS .....  | 58        |
| 5.5.1 Características hidrológicas do solo .....  | 58        |
| 5.5.2 Aporte de biomassa .....  | 59        |
| 5.5.3 Respostas hidrológicas aos padrões de chuva e à sazonalidade.....   | 61        |
| 5.5.4 Atenuação do escoamento superficial pelas plantas.....  | 64        |
| 5.5.5 Infiltração pontual .....   | 66        |
| 5.6 DISCUSSÃO .....   | 68        |
| 5.7 CONCLUSÕES .....  | 77        |
| REFERÊNCIAS.....  | 78        |
| <b>6 CAPÍTULO III. RELAÇÕES DA UMIDADE ANTECEDENTE DO SOLO COM<br/>TAXA DE INFILTRAÇÃO ESTÁVEL MEDIDA COM INFILTRÔMETROS.....</b> | <b>83</b> |
| 6.1 RESUMO.....   | 83        |
| 6.2 ABSTRACT.....   | 84        |
| 6.3 INTRODUÇÃO .....  | 85        |
| 6.3.1 A base física na modelagem da infiltração pontual.....  | 85        |
| 6.3.2 Explorando a relação da infiltração com as condições de medição.....  | 88        |
| 6.4 MATERIAL E MÉTODOS.....   | 89        |
| 6.4.1 Local de estudo e delineamento experimental.....  | 89        |
| 6.4.2 Monitoramento da umidade do solo.....   | 91        |
| 6.4.3 Sondas FDR: Calibração e validação .....  | 92        |
| 6.4.4 Determinação da infiltração.....  | 96        |
| 6.4.5 Taxa de infiltração após ampliação do tempo de medição .....  | 98        |
| 6.4.6 Umedecimento adicional do solo com irrigação .....  | 99        |
| 6.4.7 Determinação de propriedades físicas do solo.....   | 100       |
| 6.4.8 Biomassa sobre o solo .....   | 101       |
| 6.4.9 Análise estatística .....   | 101       |
| 6.5 RESULTADOS .....  | 102       |
| 6.5.1 Características hidrológicas do solo .....  | 102       |

|  |            |
|--|------------|
| <b>6.5.2 Relações da taxa de infiltração estável com umidade antecedente .....</b> | <b>103</b> |
| <b>6.6 DISCUSSÃO .....</b>   | <b>111</b> |
| <b>6.6.1 Efeito da umidade antecedente.....</b>                                    | <b>111</b> |
| <b>6.6.2 Efeito da umidade condicionado pela permeabilidade superficial .....</b>  | <b>115</b> |
| <b>6.6.3 Efeito da umidade condicionado pelo método de medição .....</b>           | <b>119</b> |
| <b>6.6.4 Efeito da umidade condicionado pelo tempo de medição .....</b>            | <b>119</b> |
| <b>6.7 CONCLUSÕES .....</b>  | <b>120</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>120</b> |
| <b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>124</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>127</b> |

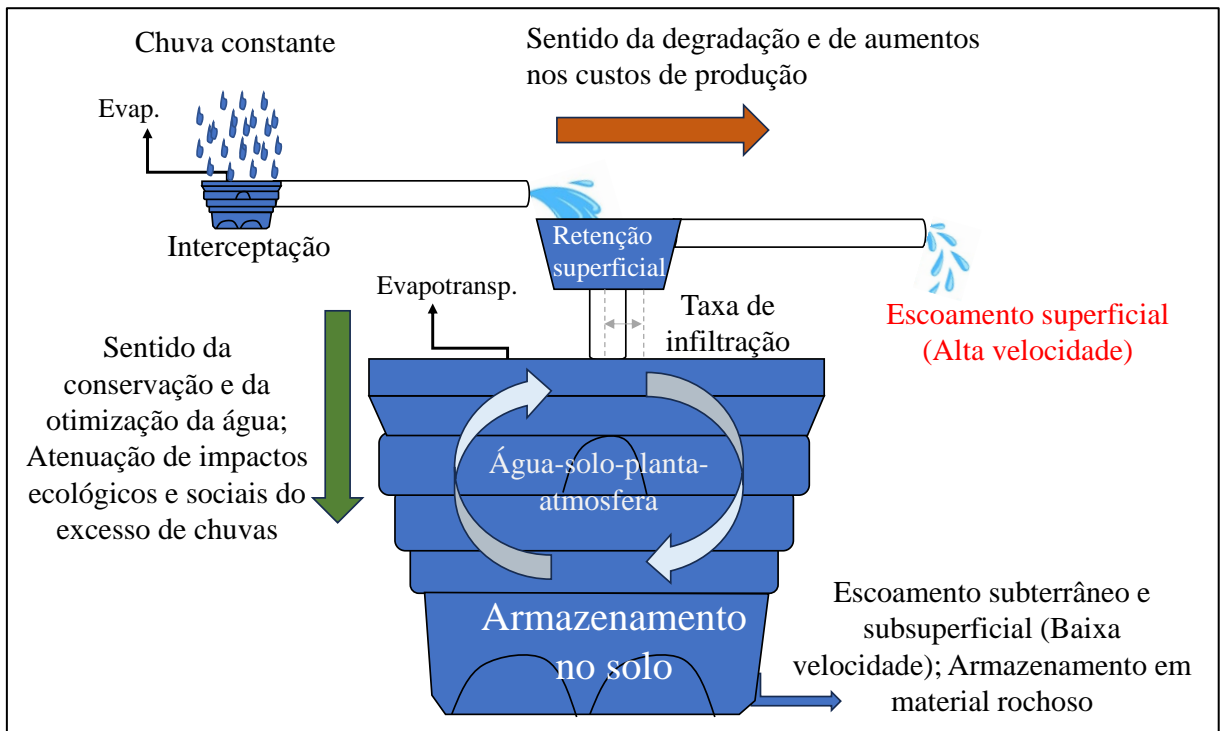
## 1 INTRODUÇÃO

Na hidrologia de superfície, o armazenamento de água no solo configura o principal compartimento hidrológico (em tamanho) que abstrai a chuva, enquanto a infiltração o processo dinâmico mais importante que particiona a água da chuva e que determina o sentido e a magnitude dos fluxos da água na encosta (ASSOULINE, 2013; BERTOL et al., 2015). O escoamento superficial controlado pela infiltração, apresenta elevada velocidade e conseqüentemente capacidade em gerar perda de solo e nutrientes e degradação dos recursos hídricos (MERTEN; MINELLA, 2015). Para a agricultura conservacionista e sistemas mais sustentáveis, o processo de infiltração de água no solo pode ser considerado um grande “gargalo” em se tratando de conservação ambiental e manejo integrado de recursos hídricos (ROCKSTRÖM et al., 2010). Aumento na infiltração potencializa o suprimento de água às plantas e organismos, aumenta as transformações no sistema água-solo-planta-atmosfera decorrentes e diminui a velocidade de movimento da água até os rios (MERTEN; MINELLA, 2015), configurando uma via de fluxo mais sustentável (HARUNA et al., 2018) e de otimização de recursos chave como a água da chuva (ROCKSTRÖM et al., 2010) (Figura 1). Ao mesmo tempo, a infiltração regula a magnitude dos impactos sociais do excesso de chuvas. A quantificação de variáveis da infiltração, portanto, como infiltração acumulada e taxa de infiltração estável, é central para modelagem hidrológica, planejamentos conservacionistas e medida do nível de sustentabilidade de sistemas de manejo (ASSOULINE, 2013; BERTOL et al., 2015).

Como reflexo dos experimentos em rede estabelecidos nos Estados Unidos pelo serviço de conservação do solo local, com proposição de modelos preditivos empíricos de perda de solo por erosão como USLE e RUSLE (RENARD et al., 1996; WISCHMEIER; SMITH, 1978), estabeleceu-se no século passado, em vários países, uma base experimental forte em se tratando de erosão hídrica pluvial, em que as perdas de água eram monitoradas complementarmente. No Brasil, por exemplo, as pesquisas foram intensas especialmente entre 1960 e 2000 (ANACHE et al., 2017). Contudo, numa abordagem mais contemporânea, parece haver um foco especial na água em si (ROCKSTRÖM et al., 2010), insumo crítico na agricultura de sequeiro devido à distribuição irregular e que requer maximização no aproveitamento, especialmente num cenário de mudanças climáticas com alto potencial de geração de insegurança alimentar (IPCC, 2023). No conceito emergente de gestão mais eficiente dos recursos hídricos, por exemplo, propõem-se medidas de aumento da produtividade da água *in situ*, como melhoria na infiltração ou na eficiência transpiratória das plantas, e medidas *ex situ*, como condução da chuva excedente de

forma disciplinada até reservatórios de abastecimento para períodos de estiagem (ROCKSTRÖM et al., 2010). Paralelamente, há uma atenção especial para a base hidrológica da degradação. A perda de solo via erosão hídrica pluvial, por exemplo, é uma consequência do descontrole do escoamento superficial regulado pela infiltração (MERTEN; MINELLA, 2015).

Figura 1 - Hidrologia de superfície. Uma ideia simplificada do tamanho dos principais compartimentos que abstraem a chuva e dos processos que mediam a compartimentalização da água na encosta.



Evap.: Evaporação; Evapotransp.: Evapotranspiração. Fonte: Elaborado pelo autor.

A infiltração de água no solo é o objeto central deste estudo. Portanto, é importante definir fisicamente algumas de suas variáveis que serão utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Para coluna de solo vertical e homogênea (no espaço e no tempo), com existência de uma carga hidráulica na superfície, taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ) ( $L T^{-1}$ ) é definida como o valor final e constante da curva de infiltração e que tende à condutividade hidráulica de solo saturado (HILLEL, 2004); a infiltração acumulada ( $L$ ) é determinada pela integralização das taxas instantâneas. Importante salientar, porém, que embora a avaliação experimental da infiltração detecte uma taxa de infiltração constante, não necessariamente expressa as condições de contorno utilizadas para definição da  $T_{ie}$ ; isso será melhor explorado no capítulo III. De qualquer forma, a  $T_{ie}$  será utilizada neste trabalho como sendo a taxa final e constante da

infiltração medida com infiltrômetros. A condutividade hidráulica do solo (densidade de fluxo por unidade de gradiente hidráulico) será utilizada como principal indicativo da permeabilidade do solo à água. Outro termo importante que será abordado neste estudo (especialmente capítulo II) é “infiltração aparente”, definida como a diferença entre precipitação e escoamento superficial; desconsidera-se outros processos hidrológicos de abstração da precipitação, como interceptação (ROSE, 2004).

Dado a importância hidrológica, econômica, ecológica e social da infiltração de água no solo, são diversas as implicações das variáveis da infiltração em projetos relacionados à conservação de água e solo, engenharia civil e sistemas de irrigação (ASSOULINE, 2013). Por exemplo, a taxa de infiltração estável é utilizada para dimensionar obras hidráulicas de contenção do escoamento superficial, como terraços (PRUSKI et al., 1997), importantes para manutenção da integridade da agricultura conservacionista (DEUSCHLE et al., 2019; KOPPE et al., 2022; LONDERO et al., 2021). Além disso, a taxa de infiltração estável é empregada no dimensionamento de sumidouros de descarte de efluentes líquidos, conforme diretriz técnica nº 05/2017 (FEPAM, 2019). Outra implicação importante é que a taxa de infiltração estável determina a taxa máxima de precipitação em sistemas de irrigação (ASSOULINE, 2013). Paralelamente, a infiltração é largamente utilizada como indicativo da qualidade do sistema poroso do solo, pois configura propriedade emergente do sistema decorrente da interação dos fatores controladores e altamente sensível às mudanças no uso e manejo do solo (FAILACHE; ZUQUETTE, 2021; HARUNA et al., 2018; MATULA, 2003; RAUBER et al., 2021).

Na escala pontual, a infiltração depende de fatores que afetam o gradiente hidráulico e a permeabilidade do meio. Por exemplo, diminuição na umidade antecedente do solo aumenta o gradiente hidráulico inicial e conseqüentemente aumenta a taxa de infiltração inicial e a infiltração acumulada (LIU et al., 2019), enquanto o aumento na quantidade, continuidade e estabilidade de macroporos no solo aumenta a permeabilidade do solo à água e conseqüentemente favorece a infiltração (ALBUQUERQUE; SANGOI; ENDER, 2001; ELA; GUPTA; RAWLS, 1992; FAILACHE; ZUQUETTE, 2021; HAGHNAZARI; SHAHGHOLI; FEIZI, 2015; LANZANOVA et al., 2010; LIPIEC et al., 2006; MATULA, 2003). Nesse sentido, atividade biológica (plantas, meso e macrofauna) representa a principal via de formação de poros grandes, estáveis e contínuos (BERTOL et al., 2015; ELA; GUPTA; RAWLS, 1992; GHESTEM; SIDLE; STOKES, 2011). Diminuição na umidade inicial também pode aumentar a porosidade entre agregados e conseqüentemente favorecer a infiltração, especialmente nos estágios iniciais (LIU et al., 2019). A infiltração, porém, pode ser reduzida sob alta quantidade

de raízes ocupando os poros (CUI et al., 2019; LIU et al., 2019) ou ar aprisionado no solo (LOIZEAU et al., 2017; WANG et al., 1998).

Como reflexo de fatores que afetam indiretamente a infiltração, como textura, gradiente textural, mineralogia, profundidade do perfil, estratificação do solo quanto à permeabilidade à água e localização no perfil de camadas limitantes ao fluxo, a infiltração de água no solo, especialmente a taxa de infiltração estável, é altamente dependente do tipo de solo (BERTOL et al., 2015). As limitações naturais dos solos quanto à permeabilidade, portanto, necessitam ser devidamente consideradas nos planejamentos conservacionistas.

O serviço de conservação do solo dos Estados Unidos (SCS, 1972) propôs quatro grupo hidrológicos de solos para auxiliar na estimativa da chuva excedente, numa escala que vai de A (solos com alta permeabilidade) a D (solos com baixa permeabilidade). Esse modelo, no entanto, foi inicialmente desenvolvido para solos de clima temperado. Portanto, foi adaptado para condições tropicais no Brasil devido às características mineralógicas intrínsecas locais (SARTORI; LOMBARDI NETO; GENOVEZ, 2005a, 2005b). Solos profundos a muito profundos, de textura média a argilosa, com baixo gradiente textural e argila de atividade baixa, como Latossolos Vermelhos em geral, se enquadram no grupo A. No grupo B se enquadram solos profundos, de argila de atividade baixa e com gradiente textural moderado (1,2 a 1,5), como Latossolos Amarelos e alguns Argissolos. No grupo C se enquadram solos profundos com mudança textural abrupta ( $<1,5$ ), como Argissolos; a baixa permeabilidade no topo do horizonte B textural - com formação de lençol freático temporário em função da sazonalidade - é a principal limitação hidrológica desses solos. No grupo D se enquadram solos rasos (como Neossolos Litólicos) e solos profundos com argila de atividade alta (como Planossolos e Vertissolos).

Alternativamente, a classificação hidrológica de solos pode ser realizada conforme disposição no perfil, espessura e condutividade hidráulica de solo saturado ( $K_{sat}$ ) da camada mais restritiva (SCS, 1972). Por exemplo, para situação em que a camada mais limitante à infiltração se situa entre 50 e 100 cm de profundidade e apresenta espessura entre 50 e 100 cm (como horizonte Bt de alguns Argissolos), os grupos hidrológicos são definidos com base nas seguintes faixas de condutividade hidráulica de solo saturado da camada mais restritiva ( $K_{sat}$ ): maior que  $144 \text{ mm h}^{-1}$  (grupo A); entre  $36$  e  $144 \text{ mm h}^{-1}$  (Grupo B); entre  $3,6$  e  $36 \text{ mm h}^{-1}$  (grupo C); menor que  $3,6 \text{ mm h}^{-1}$  (grupo D).

Na escala da encosta, os processos hidrológicos são mais complexos que na escala pontual. Além de refletir os fatores atuantes no perfil, a infiltração aparente em áreas grandes depende da variabilidade espacial da infiltração pontual, da variabilidade de solos e de como

condições transitórias de superfície, como rugosidade e biomassa, propagam o escoamento superficial. Aumento na variabilidade espacial da infiltração pontual aumenta a possibilidade de infiltração do excedente dos pontos com menor infiltração, especialmente se os pontos com maior capacidade estiverem dispostos nas cotas inferiores da encosta (HAWKINS; CUNDY, 1987). Aumento na biomassa sobre o solo, além de ser positivo para minimizar a desagregação e o selamento superficial pela chuva e enxurrada, desacelera o escoamento e favorece a infiltração (ALMEIDA et al., 2018; BERTOL et al., 2015; HUANG; WU; ZHAO, 2013; PANACHUKI et al., 2011; RAO et al., 1998; REPULLO-RUIBÉRRIZ DE TORRES et al., 2018; SANTOS et al., 2014). A rugosidade superficial tem efeito tanto no gradiente hidráulico - gradiente de pressão formado na ocorrência de empocamento - como na contenção e desaceleração do escoamento, especialmente quando orientada em nível (BERTOL et al., 2015; TAROLLI; CAVALLI; MASIN, 2019). Com base nos processos de dissipação do escoamento, portanto, embora a lâmina de água retida como interceptação e retenção superficial seja geralmente pequena, a biomassa sobre solo e a rugosidade superficial tem papel importante no controle da infiltração aparente (Figura 1). Além desses fatores, a forma e grau do declive influenciam a infiltração por serem condicionantes da velocidade, convergência e continuidade da enxurrada (CHEN et al., 2022).

A maior parte da base física da compreensão da geração do escoamento superficial na encosta se deu sob a ótica “hortoniana”, que pressupõe que a chuva excedente é uniforme na encosta e controlada pela taxa de infiltração. Porém, especialmente em encostas grandes, regiões mais úmidas cuja área é dinâmica em função da sazonalidade - e localizadas especialmente nos pontos de convergência dos fluxos (como talvegues) - contribuem muitas vezes para a grande parte do escoamento superficial, configurando escoamento “dunniano” (DUNNE; BLACK, 1970). Nessas áreas, o aumento no nível do lençol freático devido (i) à convergência dos fluxos superficiais e (ii) ao acúmulo do escoamento subsuperficial das regiões a montante, podem ocasionar escoamento superficial mesmo com taxa de precipitação menor que a taxa de infiltração (DUNNE, 1983). Logo, requerem atenção especial no planejamento conservacionista (MERTEN; MINELLA, 2015).

Dada a complexidade dos fatores controladores relacionados ao ponto e à escala, há necessidade de mais estudos para compreensão de como e exatamente quanto diferentes condições de manejo ou fatores influenciam a infiltração em escala de parcela ou encosta (ANACHE et al., 2017). Estudos nessas escalas, porém, são de difícil condução e os resultados são muito dependentes das características hidrológicas e clima locais, além de necessitarem longo prazo para adequada amostragem dos padrões de precipitação (ANACHE et al., 2017).

Embora tenha-se avançado na modelagem física da infiltração, modelos simples, puramente empíricos, mas de base experimental forte como o da curva número (SCS, 1972), continuam sendo largamente utilizados, revisados e parametrizados para estimativa da chuva excedente (AJMAL et al., 2016; ALVES et al., 2019; LAL et al., 2017; LAL; MISHRA; PANDEY, 2015; LING et al., 2020; LONDERO et al., 2021; SHI et al., 2021). Isso sugere que o processo físico da geração de escoamento superficial ainda não está suficientemente entendido ou parametrizado. Há necessidade de novos estudos experimentais, especialmente em escala de parcela/encosta e com monitoramento contínuo dos eventos de chuva e vazão, para caracterizar melhor as relações de variáveis hidrológicas com o manejo, com a sazonalidade, com os padrões de chuva, etc. Por exemplo, é vago como diferentes consórcios e sucessões de espécies de plantas de cobertura se diferenciam na atenuação do escoamento superficial, especialmente em áreas consolidadas de cultivo conservacionista no sul do Brasil.

Como extrapolar dados de infiltração pontual para a encosta é um dos grandes campos de incerteza na hidrologia (MERTEN; MINELLA, 2015). Métodos pontuais, como infiltrômetro de anéis (BOUWER, 1986), permeâmetro de disco (CLOTHIER; WHITE, 1981), infiltrômetro de tensão (SCHWÄRZEL; PUNZEL, 2007), permeâmetro de Guelph (SOIL MOISTURE CORP., 2012) e infiltrômetro de Cornell (ES; SCHINDELBECK, 2003; OGDEN; VAN ES; SHINDELBECK, 1997; SERATTO et al., 2019), entre outros, são os métodos geralmente utilizados para caracterização da infiltração (RAHMATI et al., 2018), dado a praticidade e porque estudos em escala de parcela ou encosta se concentram na área da pesquisa e são de difícil condução. Contudo, a extrapolação de dados pontuais pode gerar superestimativa (RAO et al., 1998) ou subestimativa (KOPPE et al., 2022) da infiltração aparente da encosta, cujo desalinhamento entre as escalas pode estar relacionado à despadronização nas condições de medição. No entanto, há poucos estudos estabelecendo relações da infiltração com as condições de medição ou explorando conexões da infiltração medida em diferentes escalas que possam servir de “luz” para uma melhor aproximação entre as escalas. O efeito da escala nos processos hidrológicos tem sido pouco explorado na literatura.

Uma etapa inicial com possível contribuição tecnológica deste trabalho foi o desenvolvimento de sistemas automáticos de obtenção de dados de infiltração pontual (capítulo I). A automação foi proposta para possibilitar a coleta de um elevado número de pontos e consequentemente minimizar a influência da variabilidade espacial da infiltração perante os fatores de interesse nos estudos subsequentes (especialmente capítulo III). O relato com detalhes do procedimento de construção e de validação dos infiltrômetros automáticos foi realizado para possibilitar a reprodução metodológica em outros estudos. No capítulo II,



estudamos como diferentes espécies de plantas de cobertura se diferenciam na capacidade em aumentar a infiltração de água no solo e em controlar o escoamento superficial. Subsequentemente, estudamos as relações de variáveis da infiltração pontual medida com infiltrômetros com as condições de medição, como umidade inicial, método e tempo de medição (capítulo III). Finalmente, apresentamos considerações gerais dos estudos, explorando as relações da infiltração com plantas, umidade e escalas, com possíveis implicações relevantes e novos problemas de pesquisa.

## 2 HIPÓTESES

- a. Plantas de cobertura de solo apresentam grande capacidade em atenuar escoamento superficial. Os benefícios são mais evidentes em solo coberto com amendoim forrageiro que por culturas anuais e gramíneas permanentes.
- b. A taxa de infiltração estável apresenta relação inversamente proporcional com umidade antecedente do solo, e essa relação depende da permeabilidade da superfície do solo, do método de medição e do tempo de medição.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Estudar as relações dinâmicas da infiltração de água no solo com plantas de cobertura, com a umidade antecedente e com a escala de medição.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Desenvolver e validar sistemas compactos de automação para obtenção de dados de infiltração pontual de água para infiltrômetro de anéis concêntricos e de Cornell.
- b. Estudar como diferentes sistemas com plantas de cobertura se diferenciam no aumento da infiltração de água no solo e na atenuação do escoamento superficial.
- c. Estudar se a umidade antecedente influencia as variáveis da infiltração pontual medidas com infiltrômetros, especialmente a taxa de infiltração estável, e se essa influência depende da permeabilidade da superfície do solo, do método de medição e do tempo de medição.

## **4 CAPÍTULO I. AUTOMAÇÃO DE MEDIÇÕES DE INFILTRAÇÃO PONTUAL DE ÁGUA NO SOLO**

### **4.1 RESUMO**

A obtenção de variáveis da infiltração de água no solo é chave para modelagem hidrológica e elaboração de projetos relacionados à conservação do solo e da água e engenharia civil. Contudo, a medição da infiltração com infiltrômetros manuais é laboriosa e requer várias pessoas para execução, o que pode limitar a caracterização adequada do processo. Nosso objetivo foi desenvolver sistemas automatizados e compactos de obtenção de dados de infiltração para infiltrômetro de anéis concêntricos e de Cornell. Os sistemas se baseiam em sensores de pressão diferencial de ar e microcontrolador utilizando código aberto e construção simples. Desenvolvemos 10 conjuntos de infiltrômetros automáticos para cada método, sendo cada um devidamente calibrado. Os equipamentos foram validados a campo e considerado satisfatório o alinhamento da infiltração medida de forma automática com a manual. Os sistemas propostos possibilitam o registro do processo de infiltração e variáveis associadas com menos dependência do operador do que as estratégias de medições manuais. Além disso, com maior resolução decorrente da automação dos infiltrômetros, a curva de infiltração fica melhor caracterizada, sobretudo na fase inicial de infiltração.

**Palavras-chave:** infiltrômetro de anéis, infiltrômetro de Cornell, microcontrolador, Arduino.

## 4.2 ABSTRACT

In hydrological modeling and for the development of projects related to soil and water conservation and civil engineering, the determination of variables of water infiltration into the soil plays a key role. However, measuring infiltration with manual infiltrometers is work-intensive and requires the work of several people, which calls a consistent description of the process into question. Our objective was to develop automated and compact systems for data acquisition by double concentric ring and Cornell infiltrometers. The systems are based on air differential pressure sensors and microcontroller using open code and simple construction. We developed 10 sets of automatic infiltrometers for each method, each of which was properly calibrated. The equipment was validated in the field and the alignment of the automatically measured with the hand-measured infiltration data was considered satisfactory. The proposed systems make data records of infiltration and associated variables possible, with less operator dependence than manual measurement strategies. In addition, with the increased resolution resulting from infiltrometer automation, the infiltration curve is more representative, especially in the initial infiltration stage.

**Keywords:** ring infiltrometer, Cornell infiltrometer, microcontroller, Arduino software

### 4.3 INTRODUÇÃO

Em função da elevada variabilidade espacial da infiltração pontual, um número grande de medições seria necessário para a obtenção de variáveis da infiltração representativas de uma área, o que constitui desafio operacional para pesquisadores e técnicos de diferentes áreas do conhecimento (LEWIS et al., 2021; MORBIDELLI et al., 2018). Além disso, a necessidade de registro manual do processo, comumente feito com infiltrômetros de anéis ou discos (RAHMATI et al., 2018), torna o procedimento laborioso e requer várias pessoas para execução. Nesse sentido, a automação das medições tem sido proposta e investigada. Por exemplo, sistemas com transdutores de pressão constituem uma das principais formas de automação da leitura da infiltração (ABDELMONEIM et al., 2021; ARRIAGA et al., 2010; CERNICCHIARO; BARMAK; TEIXEIRA, 2019; DI PRIMA, 2015; DI PRIMA et al., 2016; FATEHNIA et al., 2016; MORET-FERNÁNDEZ et al., 2012), dado que o princípio de medição na maioria dos métodos é a variação de uma carga hidráulica no tempo; alternativamente, o monitoramento na carga hidráulica pode ser realizado com câmera de Smartphone (LATORRE et al., 2021). Outra forma de avaliação automática da infiltração é com sistema *tipping bucket* de monitoramento do escoamento e da precipitação (SOMAVILLA; GUBIANI; ZWIRTZ, 2019).

A maioria dos sistemas de automação acima propostos foram testados em infiltrômetros de anéis ou discos, havendo menos investigação de automação para o infiltrômetro de Cornell -simulador de chuva portátil (ES; SCHINDELBECK, 2003; OGDEN; VAN ES; SHINDELBECK, 1997; SERATTO et al., 2019). Além disso, sistemas mais simples e compactos de automação, associados a microcontroladores de baixo custo e de código aberto, podem ser mais amplamente testados para tornar ainda mais prático o processo de medição de infiltração. Assim, nosso objetivo foi desenvolver e validar sistemas compactos de automação para obtenção de dados de infiltração pontual de água para infiltrômetro de anéis concêntricos e de Cornell.

### 4.4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 4.4.1 Sistemas de leitura

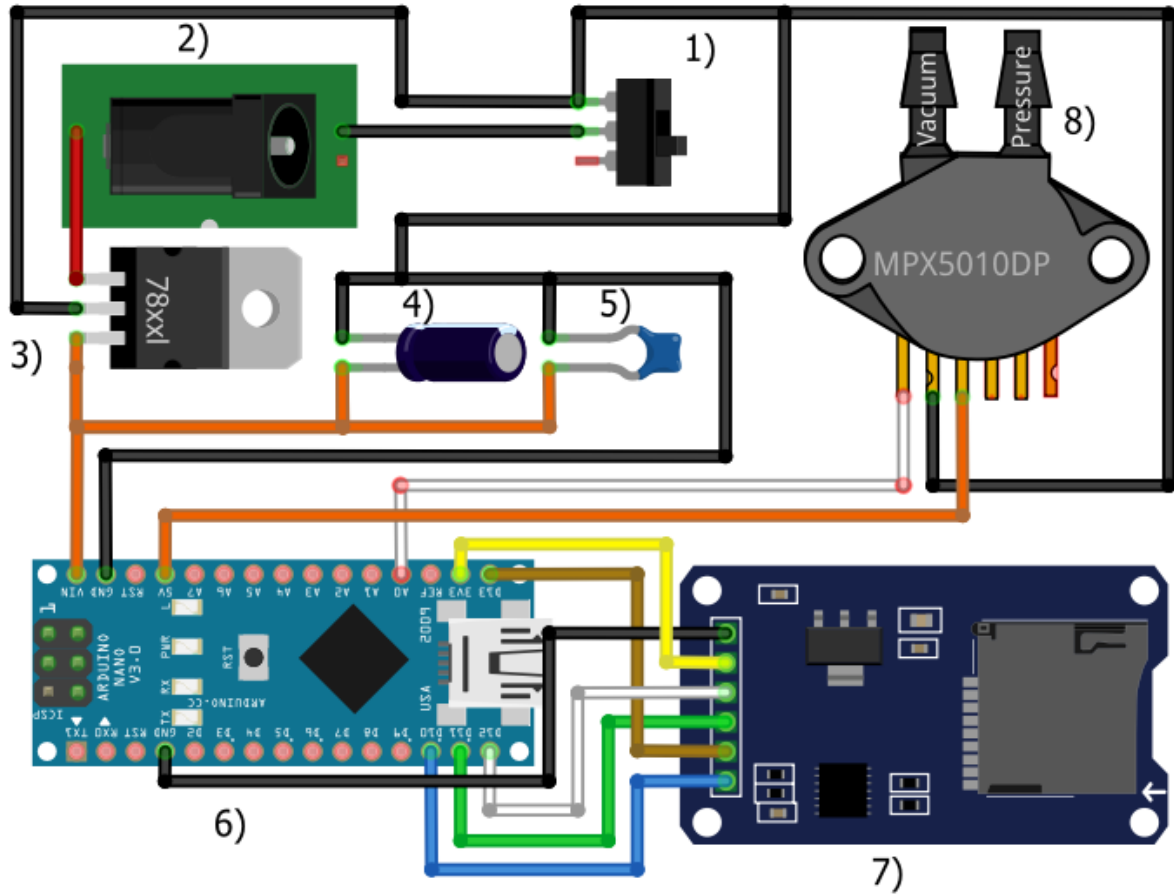
Os sistemas de leitura consistem em sensores de pressão diferencial de ar ligados a um microcontrolador para monitoramento da infiltração. Esses sensores são amplamente utilizados

para monitoramento de carga hidráulica via leitura de pressão ou sucção de ar que posteriormente é correlacionada com carga hidráulica. Esse princípio se aplica em infiltrômetros porque a infiltração pontual envolve a descarga de água de tanques ou reservatórios, nos quais pode-se monitorar a carga hidráulica com os sensores de pressão diferencial e, com isso, calcular a quantidade de água que infiltra no solo.

Nos sensores utilizados há dois orifícios, um de vácuo e outro de pressão positiva (maior que a atmosférica). Para o infiltrômetro de anéis foram usados sensores NXP Semiconductors modelo MPX5010DP (Figura 1), que apresentam limite de operação até uma pressão diferencial de 100 cm de coluna de água. No infiltrômetro de Cornell foram usados dois sensores NXP Semiconductors modelo MPXV4006DP (Figura 2), com limite de operação de 60 cm de coluna de água. Essa diferença no limite de operação entre os métodos foi em função das características de cada infiltrômetro. Um mesmo volume de água infiltrado causa decréscimo menor na coluna de água do infiltrômetro de Cornell do que na coluna de água do infiltrômetro de anéis, o que exige sensores com maior resolução no infiltrômetro de Cornell para haver acurácia semelhante nas medições feitas com os dois infiltrômetros.

Para ambos os infiltrômetros foram desenvolvidos 10 conjuntos de sistemas automatizados (infiltrômetro com sistema de leitura automática). Para cada conjunto, o sistema com interruptor, microcontrolador, cartão SD para armazenamento de dados, capacitores (demais detalhes nas Figuras 1 e 2) foi inserido em uma caixa plástica de dimensão 29x42x82 mm; apenas os sensores e a bateria 12 V permaneceram externamente à caixa. Cabe colocar, porém, que há espaço adicional suficiente dentro da caixa para acomodação de uma bateria 9V se o intuito for dispensar a bateria 12 V e o cabeamento de energia da bateria até o microcontrolador. Detalhes dos componentes e de como proceder as conexões seguem nas Figuras 1 e 2. A programação dos sistemas foi realizada para que ocorresse registro da pressão diferencial a cada 1s.

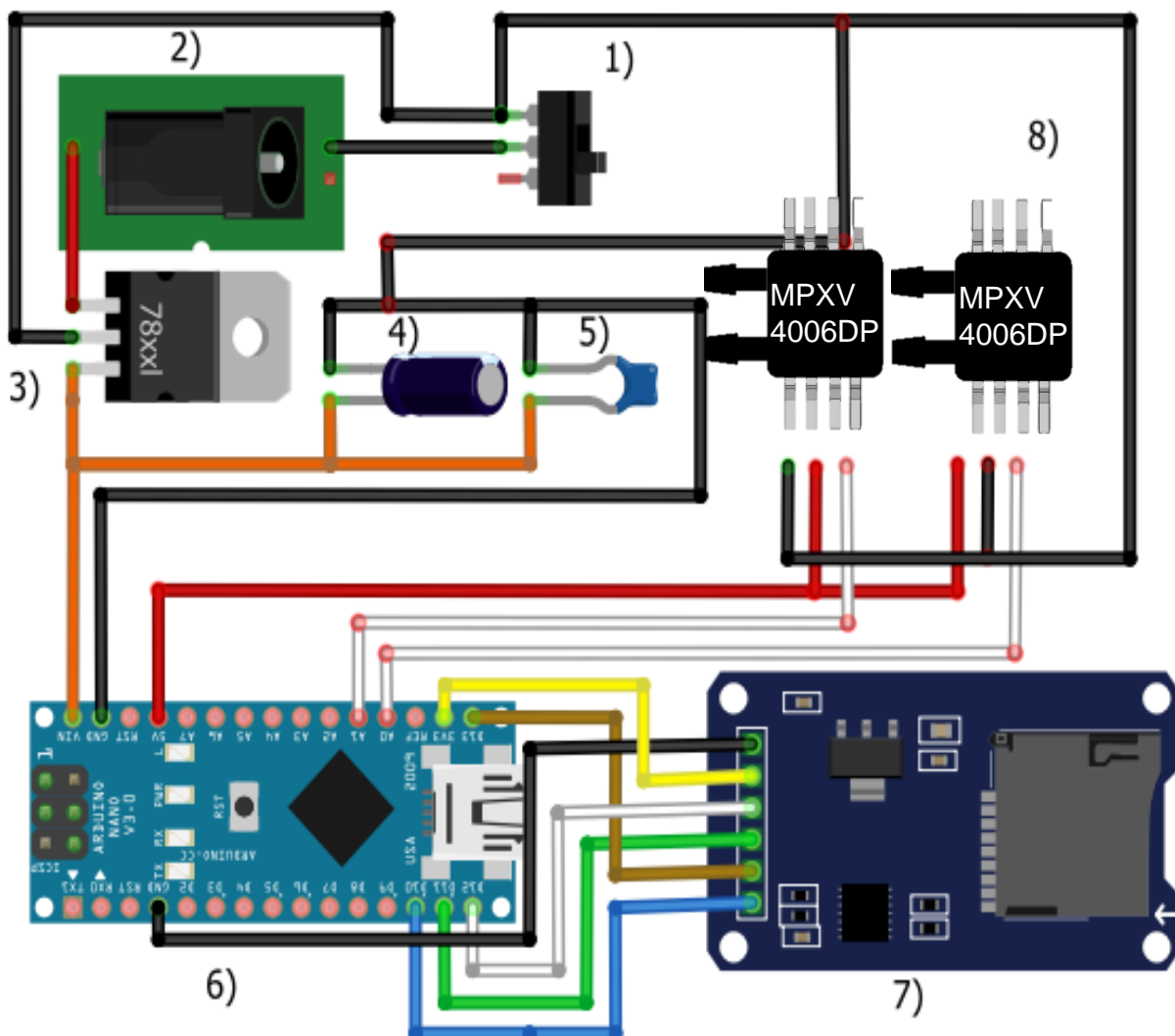
Figura 1 - Esquema demonstrando um sistema automático de obtenção de dados para avaliação de infiltração de água no solo com duplo anel concêntrico. 1) interruptor; 2) plug para entrada de energia (12 V); 3) regulador de tensão (7809); 4 e 5) capacitores; 6) microcontrolador; 7) módulo SD card; 8) sensor de pressão diferencial de ar (MPX5010DP).



Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 2 - Esquema demonstrando um sistema automático de obtenção de dados para avaliação de infiltração de água no solo com infiltrômetro de Cornell (simulador de precipitação portátil). 1) interruptor; 2) plug para entrada de energia (12 V); 3) regulador de tensão (7809); 4 e 5) capacitores; 6) microcontrolador; 7) módulo sd card; 8) sensores de pressão diferencial de ar (MPXV4006DP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4.2 Instalação dos sensores nos infiltrômetros

Em medições da infiltração com duplo anel concêntrico, a altura da coluna de água sobre o solo pode ser variável ou constante (BOUWER, 1986). O sistema automático de leitura que propomos é para carga constante. Inicialmente, colunas de Mariotte com tubo PVC de 10 cm de diâmetro e 100 cm de altura foram confeccionadas (Figura 3). Nas partes superior e inferior desses tubos foram instalados tampões e adaptadores do tipo flange com anel de PVC para acoplamento de registros de esferas (1/4") (Figura 3). Na parte superior de cada tubo foi realizada uma abertura de cerca de 10 mm para acoplamento do sensor de pressão diferencial,

responsável pela leitura da sucção (Figura 3); o sensor permanece com o orifício de vácuo em contato com a sucção de ar interna sob a coluna de água no infiltrômetro, enquanto o segundo orifício permanece exposto externamente, à pressão atmosférica. Além disso, foi instalada uma mangueira transparente externamente a cada tubo de PVC, interligando as partes internas superior e inferior do tubo, para possibilitar o monitoramento visual da variação do nível da água dentro do tubo. Para fixação dos tubos de PVC sob o solo foram utilizados tripés metálicos (Figura 3).

O princípio de medição da infiltração de água aparente com o infiltrômetro de Cornell consiste na diferença entre precipitação e escoamento superficial (ES; SCHINDELBECK, 2003; OGDEN; VAN ES; SHINDELBECK, 1997; SERATTO et al., 2019). O infiltrômetro é acoplado sob um anel inserido no solo e gera precipitação artificial sobre o mesmo (Figura 4). Há um orifício lateral no anel para conduzir o escoamento superficial até um reservatório; a variação na coluna de água do infiltrômetro e volume de escoamento geralmente são quantificados a cada 3 min para determinação das taxas e acumulados de precipitação, escoamento superficial e infiltração (SERATTO et al., 2019).

Para construção e adaptação dos infiltrômetros de Cornell, nos baseamos no modelo inicial do método (ES; SCHINDELBECK, 2003; OGDEN; VAN ES; SHINDELBECK, 1997) e em algumas adaptações sugeridas no modelo inicial (SERATTO et al., 2019). Para cada infiltrômetro, um tubo de acrílico de 25 cm de diâmetro e 50 cm de altura foi inicialmente vedado nas extremidades com placas de polipropileno (Figura 4). Na placa inferior foram inseridos 112 microtúbulos de 0,06 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento, que foram sifonados para ocasionarem gotejamento de água durante os testes. Na extremidade superior, o infiltrômetro apresenta dois orifícios (Figura 4). Um dos orifícios é usado para a fixação de um tubo capilar de vidro inserido em rolha de vedação, pelo qual o ar entra no infiltrômetro e mantém constante a intensidade da precipitação pelo princípio de Mariotte. A intensidade de precipitação pode ser ajustada mudando a profundidade da extremidade do capilar que fica submersa. O outro orifício é utilizado para abastecimento com água. No método manual, esse orifício é vedado com rolha para evitar a entrada de ar durante o teste. Para as medições automatizadas, no entanto, realizamos uma abertura na rolha, de aproximadamente 10 mm, para inserção de um segundo capilar. Isso permitiu o acoplamento do sensor de pressão diferencial (MPXV4006DP) no infiltrômetro, responsável pela leitura automática da sucção de ar; o sensor foi acoplado pelo orifício de vácuo na extremidade superior do segundo capilar (Figura 4).

Para automatizar a leitura do escoamento superficial no infiltrômetro de Cornell, um sensor (NXP Semiconductors modelo MPXV4006DP) foi instalado diretamente no reservatório

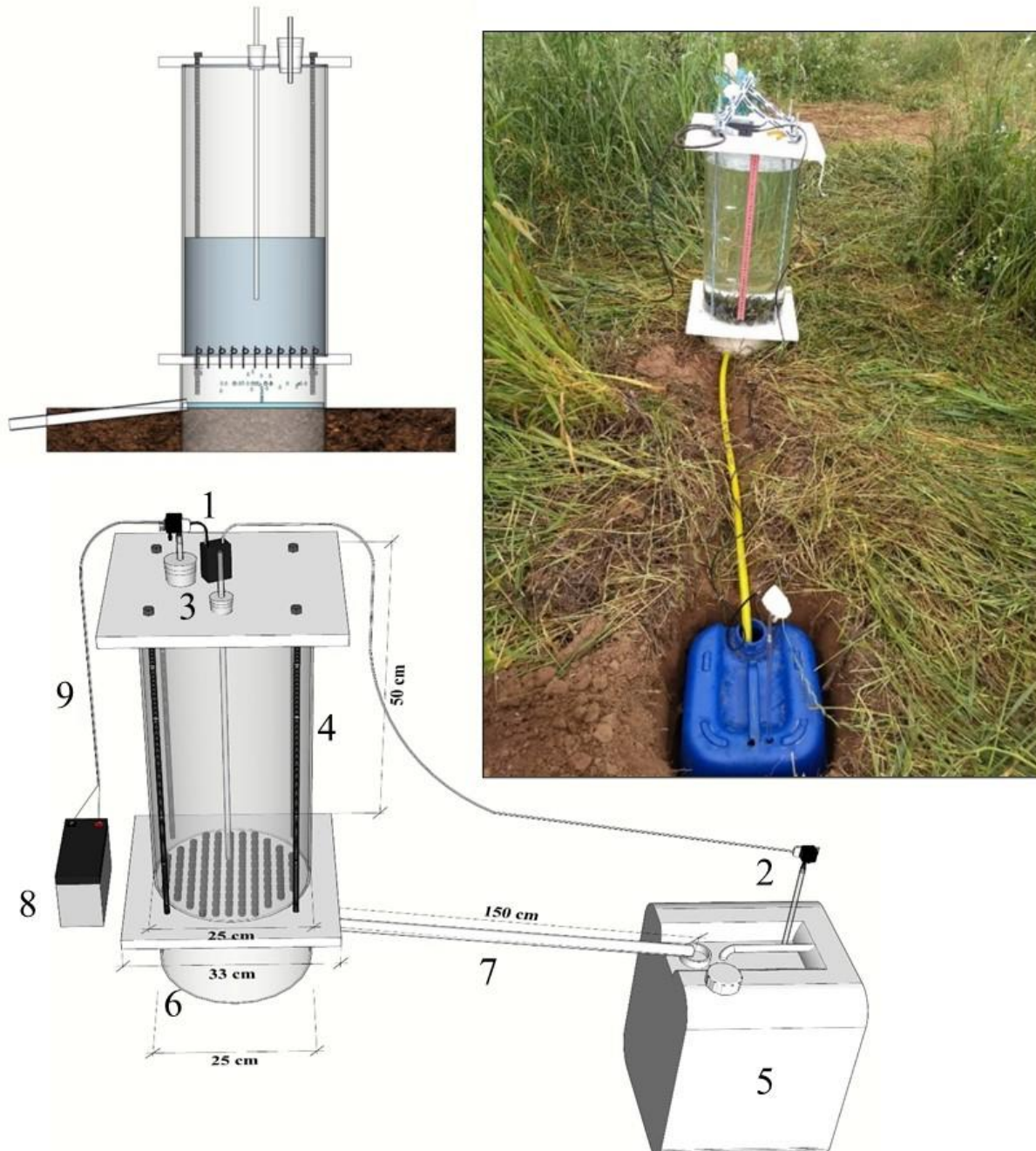
coletor do escoamento. O reservatório foi instalado em uma trincheira a 1,5 m de distância do anel de infiltração (Figura 4). Uma mangueira acoplada ao anel com rolha conduzia a água até o reservatório, o qual permanecia em cota inferior à do orifício de saída da água do anel. A capacidade do reservatório para este estudo foi de 20 l, que é próxima da capacidade máxima do infiltrômetro de Cornell. Assim, os equipamentos conseguem monitorar todo o escoamento superficial gerado nos testes até em casos com infiltração próxima de zero. O sensor de medição do escoamento foi acoplado em um tubo capilar de vidro inserido verticalmente dentro do reservatório coletor do escoamento. Esse tubo capilar é inicialmente imerso verticalmente em proveta com água para então realizar o acoplamento do orifício de vácuo do sensor na extremidade superior do capilar. Só então o conjunto capilar/sensor é transferido para o recipiente de coleta do escoamento (Figura 4). Propomos isso por detectar que nas medições de sucção ao invés de pressão positiva de ar há melhor vedação na superfície de contato entre o sensor e o capilar.

Figura 3 - Aspectos gerais do infiltrômetro de duplo anel concêntricos construído, e do acoplamento do sistema para obtenção automática dos dados de infiltração. 1) caixa com microcontrolador e sensor de pressão diferencial (MPX5010DP); 2) abertura para abastecimento de água, com tampa do tipo rolha para vedação; 3) coluna de PVC que abastece a água do anel interno; 4) mangueira transparente para verificação manual do nível de água; 5) tripé de sustentação; 6) adaptador do tipo flange com registro de esferas para saída da água; 7) bateria 12 V; 8) cabo duas vias para alimentação de energia; 9) anel interno; 10) anel externo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4 - Aspectos gerais do infiltrômetro de Cornell construído e do acoplamento do sistema para obtenção automática dos dados de infiltração. 1) caixa com microcontrolador onde são ligados dois sensores de pressão diferencial (MPXV4006DP), sendo o primeiro acoplado no infiltrômetro para monitoramento da precipitação e o segundo (2) alocado sob capilar de vidro inserido verticalmente no recipiente de coleta do escoamento; 3) capilar de vidro que permite entrada de água no equipamento, que sob o princípio de Mariotte mantém a taxa de precipitação constante; 4) reservatório de água do Cornell; 5) reservatório para acumular o escoamento superficial; 6) anel de infiltração; 7) mangueira para condução do escoamento superficial; 8) bateria 12 V; 9) cabo para alimentação de energia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4.3 Calibração dos sensores

O microcontrolador utilizado transforma a pressão diferencial de ar medida pelos sensores em uma escala de 0 a 4064 mV e as registra em um cartão SD a cada instante de tempo pré-determinado. Posteriormente, para conversão das leituras dos sensores em fluxo de água é necessário a utilização de curvas de calibração.

A calibração foi realizada individualmente para cada sensor. Para isso, foi provocada a alteração na altura de uma coluna de água em repouso dentro de um recipiente vedado na superfície, com posterior registro manual da carga hidráulica ou volume de água e dos valores registrados pelos sensores em cada *step* (intervalo) de mudança na carga hidráulica. Para monitoramento em tempo real das leituras dos sensores utilizamos o software Arduino (IDE) de código aberto. Nesse caso, os sistemas com microcontrolador e sensor foram ligados diretamente em notebook.

Para o infiltrômetro de anéis, a calibração foi realizada diretamente nos infiltrômetros. Inicialmente, cada tubo de PVC foi preenchido totalmente com água. Com o registro superior fechado foi acoplado o sensor no infiltrômetro. Posteriormente, o nível da água dentro do infiltrômetro foi rebaixado gradativamente. A cada *step* (intervalo) de descarga, a altura da coluna de água era lida manualmente via régua graduada dispostas externamente ao infiltrômetro, e as leituras dos sensores eram registradas pelo sistema. Apenas as leituras dos sensores após estabilidade foram posteriormente consideradas, ou seja, no momento em que a coluna de água entrava em repouso após cada *step* de rebaixamento da carga hidráulica. Por fim, uma equação linear entre as leituras registradas pelo sistema (mV) e a altura da coluna de água lida manualmente no infiltrômetro foi ajustada. Da reta de calibração, foi extraído o coeficiente angular ( $\text{cm mV}^{-1}$ ), que representa a resolução de leitura do sistema.

Para a calibração dos sensores de precipitação do infiltrômetro de Cornell foi seguido o mesmo princípio utilizado para o infiltrômetro de anéis. Entretanto, neste caso, os sensores foram acoplados na extremidade externa de um tubo capilar de vidro inserido verticalmente dentro de proveta transparente; externamente à proveta foi disposta uma régua graduada. O tubo capilar foi inicialmente imerso verticalmente em proveta com água, e então acoplado o orifício de vácuo do sensor na extremidade superior do capilar. Então, o capilar com o sensor foi retirado da proveta com água e colocado verticalmente em uma segunda proveta, essa inicialmente sem água e onde foi realizado o procedimento de calibração; para este sensor também observamos que sob sucção, ao invés de pressão positiva de ar, há melhor vedação no contato sensor/capilar. Assim, foi adicionado água gradativamente dentro da proveta; a cada *step* de mudança na carga

hidráulica era lida manualmente a posição da água na proveta bem como anotados os valores registrados pelo sistema automático. Por fim, o coeficiente angular do ajuste linear foi obtido.

A calibração dos sensores de leitura do escoamento superficial no infiltrômetro de Cornell foi realizada diretamente nos recipientes de coleta do escoamento. Pelo fato de os recipientes usados para coleta do escoamento não terem formato geométrico de cilindro ou cubo, o monitoramento da altura de água nos recipientes não possibilitaria cálculo preciso do volume de água escoado. Por isso, a calibração foi feita com a relação entre volume de água acumulado no recipiente (ml) e leituras dos sensores de pressão (mV). Desse modo, para cada *step* da calibração foi registrado o volume de água adicionado no recipiente utilizando proveta graduada e o correspondente valor de sucção registrado pelo sistema automático. O sensor foi acoplado na extremidade externa de um tubo capilar de vidro disposto verticalmente no recipiente (Figura 4). Entretanto, esse capilar foi inicialmente imerso em proveta com água para posterior acoplamento do orifício de vácuo do sensor na extremidade superior do capilar. Só então o conjunto capilar/sensor foi adicionado no recipiente, para assim operar no modo de sucção, como os demais sensores. Por fim, um modelo quadrático entre volume acumulado (ml) e unidades de registro do sistema (mV) foi ajustado.

#### **4.4.4 Medição da infiltração no campo com os infiltrômetros automatizados**

Inúmeros testes de infiltração foram realizados no campo com os dois tipos de infiltrômetros automatizados. Para o infiltrômetro de anéis, houve oscilação importante das leituras dos sensores no momento em que havia descarga de água e entrada de ar na coluna de PVC (Figura 5), o que causava alívio da carga hidráulica e sucção dentro da coluna de PVC. Com a elevação do nível da água dentro do anel interno havia interrupção da entrada de ar na coluna de PVC, interrompendo também a saída de água. Rapidamente, a carga hidráulica (na base) e sucção (no topo) internas estabilizavam e eram corretamente lidas pelos sensores. Por isso, as leituras nos instantes de descarga de água e entrada de ar foram retiradas, mantendo-se as leituras de interesse, representadas pelos pontos em vermelho na Figura 5. Pelo fato de o tempo para a leitura estabilizar após cada descarga de água ser da ordem de 5 a 10 s, uma alta frequência de leitura é necessária para a delimitação clara dos pontos atípicos a serem removidos (Figura 5). A identificação e remoção dos pontos atípicos foi realizada com algoritmo VBA no Excel, procedimento similar ao realizado por Di Prima (2015). Após a definição dos pontos de interesse, a taxa de infiltração para cada intervalo de descarga foi calculada com a equação 1, cuja integral representa a infiltração acumulada.



$$i \text{ duplo anel} = \left( \frac{a(X_{n+1}-X_n)}{t_{n+1}-t_n} \right) * \frac{Ab1}{Ab2} \quad (1)$$

onde  $i$  é a taxa de infiltração ( $\text{cm h}^{-1}$ ),  $a$  é o coeficiente angular da calibração ( $\text{cm mV}^{-1}$ ),  $X_n$  e  $X_{n+1}$  são as leituras dos sensores (mV) nos tempos  $t_n$  e  $t_{n+1}$  (h), respectivamente,  $Ab1$  é a área de base interna do tubo de PVC do infiltrômetro ( $\text{cm}^2$ ) e  $Ab2$  é a área de base do anel interno inserido no solo ( $\text{cm}^2$ ).

Para o infiltrômetro de Cornell não foram observadas leituras atípicas dos sensores de pressão diferencial, tanto no infiltrômetro como no recipiente de coleta do escoamento (Figura 6). Possivelmente, isso ocorreu porque a coluna de água em ambos os reservatórios não sofre oscilações abruptas. Assim, a delimitação dos pontos de interesse pode ser realizada sem tratamento prévio dos dados. Mesmo assim, parece importante haver alta frequência de registro dos dados para possibilitar a realização da média dos valores a cada intervalo de interesse e consequentemente minimizar qualquer erro oriundo da flutuação natural dos valores registrados pelo sistema (Figura 6). A intensidade de precipitação ( $prec$ ) para cada intervalo de tempo pode ser obtida pela equação 2, e a taxa de escoamento com a equação 3. Por fim, a taxa de infiltração é obtida pela diferença entre precipitação e escoamento superficiais instantâneos (equação 4). O tempo para empoçamento na metodologia do infiltrômetro de Cornell pode ser facilmente detectado, pois ele corresponde ao instante de tempo no qual ocorre mudança na tendência dos valores registrados pelo sensor de escoamento após o início do teste (Figura 6). O tempo para empoçamento representa o tempo transcorrido desde o início da precipitação até o escoamento iniciar ou ser devidamente detectado pelo sistema de leitura (Figura 6). O acumulado de precipitação até o tempo para empoçamento representa a abstração inicial, variável também utilizada em modelos hidrológicos. A precipitação, escoamento superficial e infiltração acumulados são obtidos pela integralização das equações 2, 3 e 4, respectivamente.

$$prec = \left( \frac{a(X_{n+1}-X_n)}{t_{n+1}-t_n} \right) * \frac{Ab3}{Ab4} \quad (2)$$

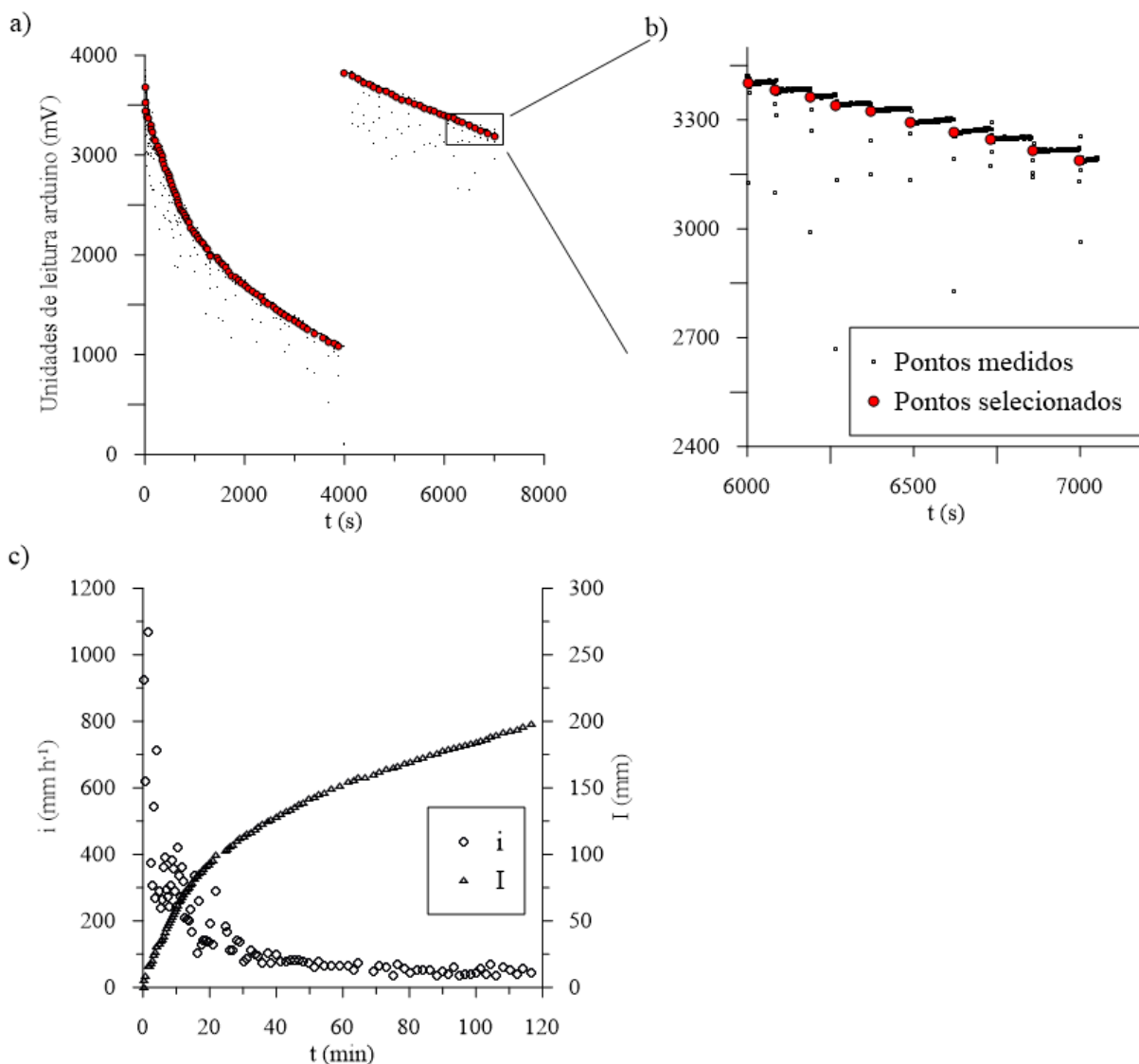
$$esc = \left( \frac{V(X_{n+1})-V(X_n)}{t_{n+1}-t_n} \right) / Ab4 \quad (3)$$

$$i \text{ cornell} = prec - esc \quad (4)$$



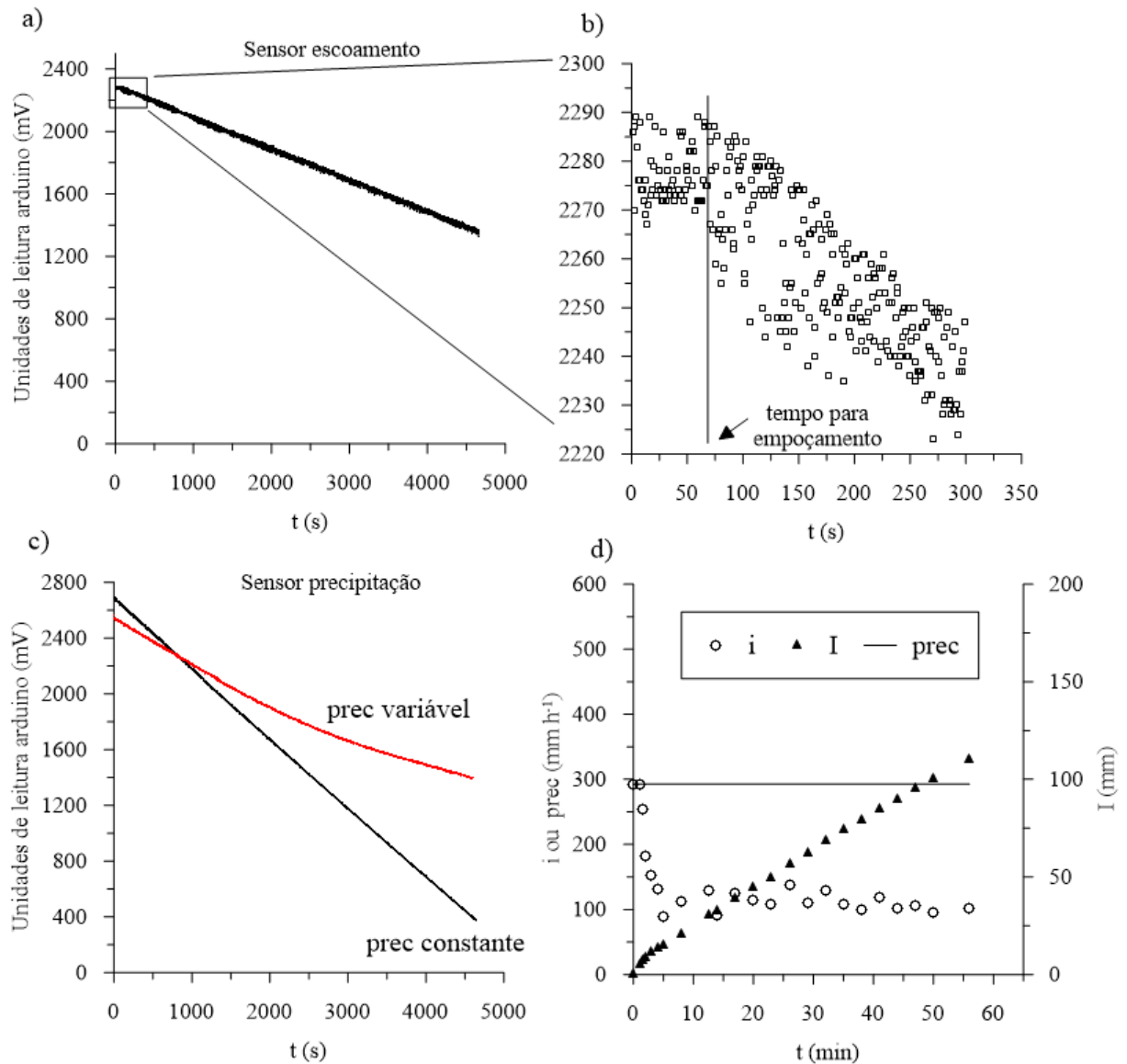
onde  $prec$  é a precipitação instantânea ( $\text{cm h}^{-1}$ ),  $X_n$  e  $X_{n+1}$  são as leituras dos sensores de precipitação (mV) nos tempos  $t_n$  e  $t_{n+1}$  (h),  $a$  é o coeficiente angular ( $\text{cm mV}^{-1}$ ),  $Ab3$  é a área de base interna do infiltrômetro de cornell ( $\text{cm}^2$ ),  $Ab4$  é a área de base interna do anel inserido no solo ( $\text{cm}^2$ ),  $V(X_n)$  e  $V(X_{n+1})$  são os volumes acumulados de água (ml) obtidos com a equação de calibração para os pontos  $X_n$  e  $X_{n+1}$  nos tempos  $t_n$  e  $t_{n+1}$  (h),  $esc$  é o escoamento superficial instantâneo ( $\text{cm h}^{-1}$ ), e  $i$  é a taxa de infiltração ( $\text{cm h}^{-1}$ ).

Figura 5 - Dados obtidos experimentalmente com infiltrômetro duplo anel automatizado. a) dados registrados pelo sensor, com escala ampliada em b para facilitar a visualização dos pontos selecionados (em vermelho); c) correspondente taxa de infiltração ( $i$ ) calculada com a equação (1) e sua integração resultando na infiltração acumulada ( $I$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 - Dados obtidos experimentalmente com sistema automatizado com infiltrômetro de Cornell. a) registros obtidos pelo sensor de escoamento, com escala ampliada na figura b para detectar o tempo para empoçamento (tempo transcorrido desde o início da precipitação até o escoamento superficial iniciar); c) registros do sensor de precipitação no tempo, demonstrando condição com linearidade na tendência da sucção no tempo e, portanto, intensidade de precipitação (prec) constante e condição com não linearidade da sucção no tempo, indicando intensidade de precipitação variável; d) variáveis da infiltração obtidas, em que  $i$  é a taxa de infiltração e  $I$  é a infiltração acumulada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4.5 Validação

Para a etapa de validação analisamos a relação entre as variáveis da infiltração avaliadas pelos conjuntos automatizados e avaliação manual. Ambas as avaliações, automatizado e manual, foram realizadas no mesmo equipamento ao mesmo tempo, uma vez que os equipamentos permitem as duas formas de leitura. A validação foi realizada em um Argissolo

Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico (Tabela 1) (SANTOS et al., 2018) – Ultisol (SOIL SURVEY STAFF, 2014) -, em Santa Maria/RS, em área com plantio direto consolidado (~20 anos) e em área com plantio direto com subsolagem (29°43'11''S 53°42'12''W). Essas duas condições de manejo foram utilizadas com o intuito de ampliar o domínio de valores de infiltração. Por exemplo, infiltração expressivamente maior é esperada na área subsolada. Utilizamos 10 conjuntos de infiltrômetros de cada método para avaliação automática e manual nas duas condições de manejo. Em cada condição de manejo e método, os pontos de medição da infiltração foram distanciados 3 a 6 m entre si, e uma bateria de 12 V (45 Ah) foi utilizada para alimentação de energia dos sistemas. Como variáveis de interesse utilizamos a infiltração acumulada e a taxa de infiltração estável obtidas com duplo anel, bem como a taxa de precipitação, o escoamento superficial e a infiltração acumulados e a taxa de infiltração estável obtidos com o infiltrômetro de Cornell.

Tabela 1 - Distribuição granulométrica para diferentes horizontes de um um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico, no qual a validação dos infiltrômetros automatizados foi realizada, em Santa Maria/RS, Brasil.

| Horizonte | Camada<br>cm | Total | Areia  |                            | Silte | Argila |
|-----------|--------------|-------|--------|----------------------------|-------|--------|
|           |              |       | Grossa | Fina<br>g kg <sup>-1</sup> |       |        |
| Ap        | 0 - 10       | 648   | 239    | 409                        | 262   | 90     |
| A1        | 10 - 40      | 624   | 230    | 394                        | 268   | 108    |
| A2        | 40 - 60      | 586   | 176    | 410                        | 293   | 121    |
| E         | 60 - 80      | 604   | 164    | 440                        | 341   | 55     |
| Bt1       | 80 - 90      | 525   | 144    | 381                        | 347   | 128    |
| Bt2       | 90+          | 417   | 128    | 289                        | 290   | 293    |

Distribuição granulométrica determinada pelo método da pipeta. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para duplo anel concêntrico realizamos testes com 2 h de duração em cada ponto. As leituras manuais foram realizadas a cada 2 min no início do teste (até 10 min) e posteriormente a cada 10 min até o final do teste. A carga hidráulica foi constante de 3 cm. Para o infiltrômetro de Cornell os testes tiveram duração de 1 h, aproximadamente; o tempo de duração exato do teste depende da intensidade da precipitação utilizada, dado que não foi utilizado reabastecimento do infiltrômetro para não interromper o teste. A intensidade de precipitação geralmente utilizada é de 300 mm h<sup>-1</sup> (SERATTO et al., 2019), mas intensidades entre 168 e 476 mm h<sup>-1</sup> foram usadas para avaliar se a acurácia dos sistemas seria afetada pela taxa de precipitação. As leituras manuais de precipitação e de escoamento superficial acumulados foram realizadas a cada 3 min.

#### 4.4.6 Análise estatística

A qualidade dos ajustes da etapa de calibração foi avaliada por meio da análise dos resíduos. Os testes de Shapiro-Wilk (normalidade na distribuição), de Durbin Watson (independência) e de Breusch-Pagan (homogeneidade de variância) foram executados em ambiente R, considerando uma probabilidade de erro de 5%. Além disso, a acurácia dos ajustes foi analisada pelo *root mean squared error* (RMSE).

A acurácia dos métodos na validação foi avaliada pelo RMSE, pelo *Nash-Sutcliffe model efficiency* (NSE), pelo índice de concordância de Willmott (Willmott) e pelo *Percent Bias* (Pbias) entre a leitura manual e automática das variáveis taxa de infiltração estável e infiltração acumulada (para ambos os métodos) e também o RMSE, NSE, Willmott e Pbias da taxa de precipitação, taxa de infiltração estável e escoamento superficial e infiltração acumulados para o infiltrômetro de Cornell. Além disso, para cada variável foi ajustada uma equação linear entre leitura manual e automática, com a devida análise dos resíduos.

#### 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O coeficiente angular, as estatísticas de ajuste e de análise dos resíduos para cada sensor avaliados na etapa de calibração estão nas Tabelas 2 a 4. O coeficiente angular médio foi 0,0274 cm mV<sup>-1</sup> para duplo anel e 0,0161 cm mV<sup>-1</sup> para o sensor de precipitação de Cornell. Para esses ajustes, os resíduos foram normais, independentes e apresentaram variância homogênea, o que indica satisfatória linearidade de ajuste e capacidade de transformação das leituras dos sensores em fluxo de água em toda a escala de medição do microcontrolador (0-4064 mV). Também se observa pequena diferença no coeficiente angular entre os conjuntos montados para um mesmo método (Tabelas 2 e 3). O coeficiente angular menor do sensor de precipitação de Cornell (Tabela 3) em relação ao do duplo anel (Tabela 2) decorre da diferença no limite de operação dos sensores. Os resíduos do ajuste do modelo quadrático utilizado para calibração dos sensores de escoamento superficial para infiltrômetro de Cornell também foram normais, independentes e apresentaram variância homogênea (Tabela 4). O RMSE na calibração dos sensores do infiltrômetro de anéis e de precipitação e escoamento do infiltrômetro de Cornell foi de 0,25 cm, 0,42 cm e 57 ml, respectivamente, o que equivale à 0,25, 0,69 e 0,28 % da escala total de leitura.

Tabela 2 - Calibração e análise dos resíduos dos ajustes dos sensores de pressão diferencial utilizados no infiltrômetro de anéis.

| Sensor | coef. Ang<br>(cm mV <sup>-1</sup> ) | p valor (F<br>significativo) | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(cm) | Normalidade | Independência<br>p valor | Homocedasticidade |
|--------|-------------------------------------|------------------------------|----------------|--------------|-------------|--------------------------|-------------------|
| 1      | 0,0275                              | 2,76E-29                     | 0,999          | 0,1380       | 0,4400      | 0,1700                   | 0,8381            |
| 2      | 0,0273                              | 2,24E-32                     | 0,999          | 0,1508       | 0,3240      | 0,0620                   | 0,1244            |
| 3      | 0,0274                              | 4,91E-26                     | 0,999          | 0,1449       | 0,0800      | 0,8100                   | 0,8275            |
| 4      | 0,0274                              | 3,87E-13                     | 0,999          | 0,2690       | 0,7700      | 0,1580                   | 0,1445            |
| 5      | 0,0274                              | 5,31E-13                     | 0,999          | 0,2830       | 0,2750      | 0,4980                   | 0,8807            |
| 6      | 0,0275                              | 1,25E-11                     | 0,999          | 0,2210       | 0,9860      | 0,5100                   | 0,4692            |
| 7      | 0,0276                              | 1,83E-09                     | 0,999          | 0,2220       | 0,1800      | 0,6800                   | 0,3347            |
| 8      | 0,0275                              | 7,21E-10                     | 0,999          | 0,1640       | 0,4690      | 0,8780                   | 0,1789            |
| 9      | 0,0275                              | 6,94E-11                     | 0,999          | 0,3140       | 0,6355      | 0,8460                   | 0,1900            |
| 10     | 0,0273                              | 1,58E-10                     | 0,999          | 0,3710       | 0,8691      | 0,9020                   | 0,4242            |

Coef. Ang: coeficiente angular do ajuste linear. RMSE: root mean squared error. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Calibração e análise dos resíduos dos ajustes dos sensores de pressão diferencial utilizados no infiltrômetro de Cornell para determinar a precipitação.

| Sensor | coef. Ang<br>(cm mV <sup>-1</sup> ) | p valor (F<br>significativo) | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(cm) | Normalidade | Independência<br>p valor | Homocedasticidade |
|--------|-------------------------------------|------------------------------|----------------|--------------|-------------|--------------------------|-------------------|
| 1      | 0,0161                              | 6,29E-23                     | 0,999          | 0,2372       | 0,1803      | 0,8900                   | 0,5404            |
| 2      | 0,0161                              | 6,15E-17                     | 0,999          | 0,2455       | 0,2200      | 0,4620                   | 0,8240            |
| 3      | 0,0159                              | 3,03E-22                     | 0,999          | 0,4245       | 0,8975      | 0,3940                   | 0,3103            |
| 4      | 0,0160                              | 4,63E-16                     | 0,998          | 0,6000       | 0,8189      | 0,1120                   | 0,2716            |
| 5      | 0,0162                              | 6,47E-17                     | 0,999          | 0,5100       | 0,5500      | 0,7240                   | 0,2738            |
| 6      | 0,0163                              | 7,74E-13                     | 0,999          | 0,1726       | 0,5031      | 0,5880                   | 0,5371            |
| 7      | 0,0160                              | 1,17E-17                     | 0,999          | 0,4290       | 0,5031      | 0,1080                   | 0,4917            |
| 8      | 0,0159                              | 2,58E-23                     | 0,999          | 0,4280       | 0,5436      | 0,4700                   | 0,1291            |
| 9      | 0,0160                              | 8,51E-20                     | 0,999          | 0,1757       | 0,0600      | 0,1480                   | 0,1322            |
| 10     | 0,0161                              | 2,26E-21                     | 0,999          | 0,3582       | 0,4496      | 0,1260                   | 0,1422            |

Coef. Ang: coeficiente angular do ajuste linear. RMSE: root mean squared error. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa de validação, as variáveis determinadas com os sensores estiveram fortemente alinhadas com as respectivas variáveis determinadas manualmente (Figuras 7 e 8). Por exemplo, os coeficientes angulares das retas de ajuste entre leitura manual e automática, bem como os valores dos índices NSE e Willmott, foram próximos de 1 (Figuras 7 e 8), independentemente da variável da infiltração, o que indica elevada concordância dos valores de infiltração medidos entre as formas manual e automática. Os valores Pbias próximos de 0 indicam que não há superestimativa ou subestimativa importante das variáveis da infiltração pela metodologia proposta (automática) em comparação à manual (Figuras 7 e 8). Além disso, o RMSE entre leitura automática e manual das variáveis da infiltração foi relativamente pequeno e possivelmente desprezível hidrológicamente e para as principais implicações da medição da infiltração com infiltrômetros. Para a metodologia do infiltrômetro de Cornell, porém, os

resíduos foram um pouco maiores do que os do duplo anel, talvez porque os erros dos dois sensores se somem. Por exemplo, para taxa de infiltração estável, o RMSE na metodologia do duplo anel foi de 1,53 mm h<sup>-1</sup> (Figura 7) e na metodologia de Cornell de 4,33 mm h<sup>-1</sup> (Figura 8). Entretanto, também é preciso considerar que a leitura manual está sujeita a erros. Além disso, a aleatoriedade dos resíduos, independentemente do método de medição (Cornell ou duplo anel) ou variável da infiltração, demonstra que a acurácia do sistema não foi afetada pela faixa de medição registrada (Figuras 7 e 8). Os sistemas automáticos propostos para duplo anel, por exemplo, se mostraram acurados para pontos com taxa de infiltração estável de até ~270 mm h<sup>-1</sup> (Figura 7a). Por outro lado, embora o ajuste linear no domínio das medições, não há garantia que fora dele a relação continuará com mesma tendência.

Tabela 4 - Calibração e análise dos resíduos dos ajustes dos sensores (S) de monitoramento do escoamento no infiltrômetro de Cornell.

| S  | Int<br>(ml) | X        | coeficientes   |                |                | p valor<br>(F sig) | R <sup>2</sup> | RMSE<br>(ml) | Norm. | Ind. | Hom. |
|----|-------------|----------|----------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|--------------|-------|------|------|
|    |             |          | X <sup>2</sup> | X <sup>3</sup> | X <sup>4</sup> |                    |                |              |       |      |      |
| 1  | 26606       | -8,7536  | -0,0025        | 3,11E-07       | 1,08E-10       | 2,7E-45            | 0,99           | 45           | 0,28  | 0,19 | 0,45 |
| 2  | 27808       | -11,2153 | -0,0010        | 2,98E-07       | -1,25E-11      | 6,2E-42            | 0,99           | 51           | 0,24  | 0,81 | 0,14 |
| 3  | 27699       | -11,8176 | 0,0002         | -4,48E-07      | 1,37E-10       | 1,8E-40            | 0,99           | 45           | 0,34  | 0,41 | 0,24 |
| 4  | 28090       | -13,7971 | 0,0023         | -1,30E-06      | 2,61E-10       | 8,7E-42            | 0,99           | 41           | 0,39  | 0,49 | 0,59 |
| 5  | 26164       | -5,2494  | -0,0075        | 3,18E-06       | -4,71E-10      | 2,2E-40            | 0,99           | 45           | 0,06  | 0,81 | 0,42 |
| 6  | 28299       | -6,0870  | -0,0073        | 3,28E-06       | -5,15E-10      | 5,4E-40            | 0,99           | 49           | 0,05  | 0,36 | 0,73 |
| 7  | 29726       | -13,6984 | 0,0012         | -5,02E-07      | 9,55E-11       | 1,9E-39            | 0,99           | 43           | 0,40  | 0,22 | 0,24 |
| 8  | 26092       | -1,6994  | -0,0110        | 4,62E-06       | -6,85E-10      | 2,8E-44            | 0,99           | 38           | 0,15  | 0,52 | 0,35 |
| 9  | 30026       | -17,9559 | 0,0062         | -2,97E-06      | 5,14E-10       | 3,1E-37            | 0,99           | 83           | 0,07  | 1,00 | 0,56 |
| 10 | 26726       | -5,5977  | -0,0082        | 4,27E-06       | -7,69E-10      | 1,5E-38            | 0,99           | 73           | 0,18  | 0,12 | 0,46 |

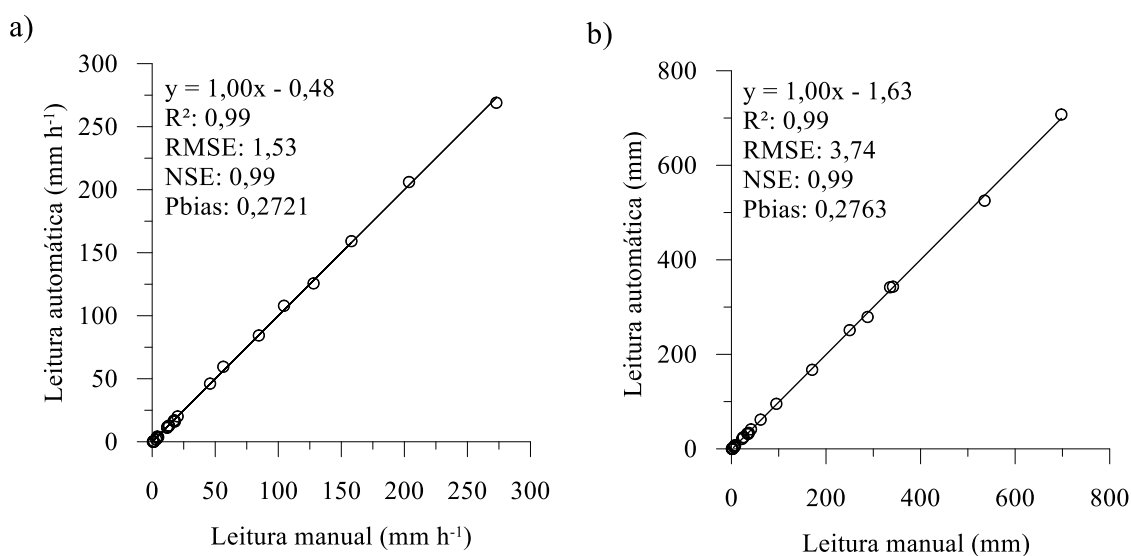
Int: Intersecção; Norm: Normalidade dos resíduos; F sig: F significativo; Ind: Independência dos resíduos; Hom. Homocedasticidade. RMSE: root mean squared error. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os sistemas de avaliação da infiltração propostos são compactos, o que gera alta praticidade na avaliação da infiltração de água. Além disso, a automação possibilita definir bem a curva de infiltração, especialmente quando avaliada com duplo anel. No teste apresentado na Figura 5, por exemplo, ocorreram 98 *steps* de descarga da água do infiltrômetro, todos posteriormente considerados como intervalos de leitura da curva de infiltração. Na medição manual, por outro lado, em que o intervalo de tempo entre duas leituras é maior e definido a priori, pode não haver delimitação exata dos pontos de descarga da água e gerar uma curva de infiltração mais irregular. O método também possibilita a quantificação da infiltração que ocorre nos primeiros segundos de teste, o que geralmente não é possível em leituras manuais. Isso possivelmente representa um ganho de informações importante para análise de alguns

fatores na infiltração inicial, como umidade antecedente, presença de crosta superficial, raízes, etc. Outro ponto positivo da automação, nesse caso especificamente para o infiltrômetro de Cornell, é que a mesma permite quantificar se a intensidade de precipitação é constante no tempo (Figura 6 c). Na metodologia manual tradicional, geralmente é assumido que a intensidade de precipitação é constante, o que é esperado no princípio de Mariotte e se o infiltrômetro estiver bem vedado. Nesse caso, medidas da carga hidráulica no início e no fim do teste seriam suficientes para determinar a intensidade de precipitação. No entanto, pequenos vazamentos de ar, por vezes imperceptíveis a campo, podem fazer com que a taxa de precipitação diminua no tempo; isso pode ser facilmente detectado no registro dos dados do sensor de precipitação se as medidas registradas no tempo apresentarem uma tendência não linear (Figura 6 c).

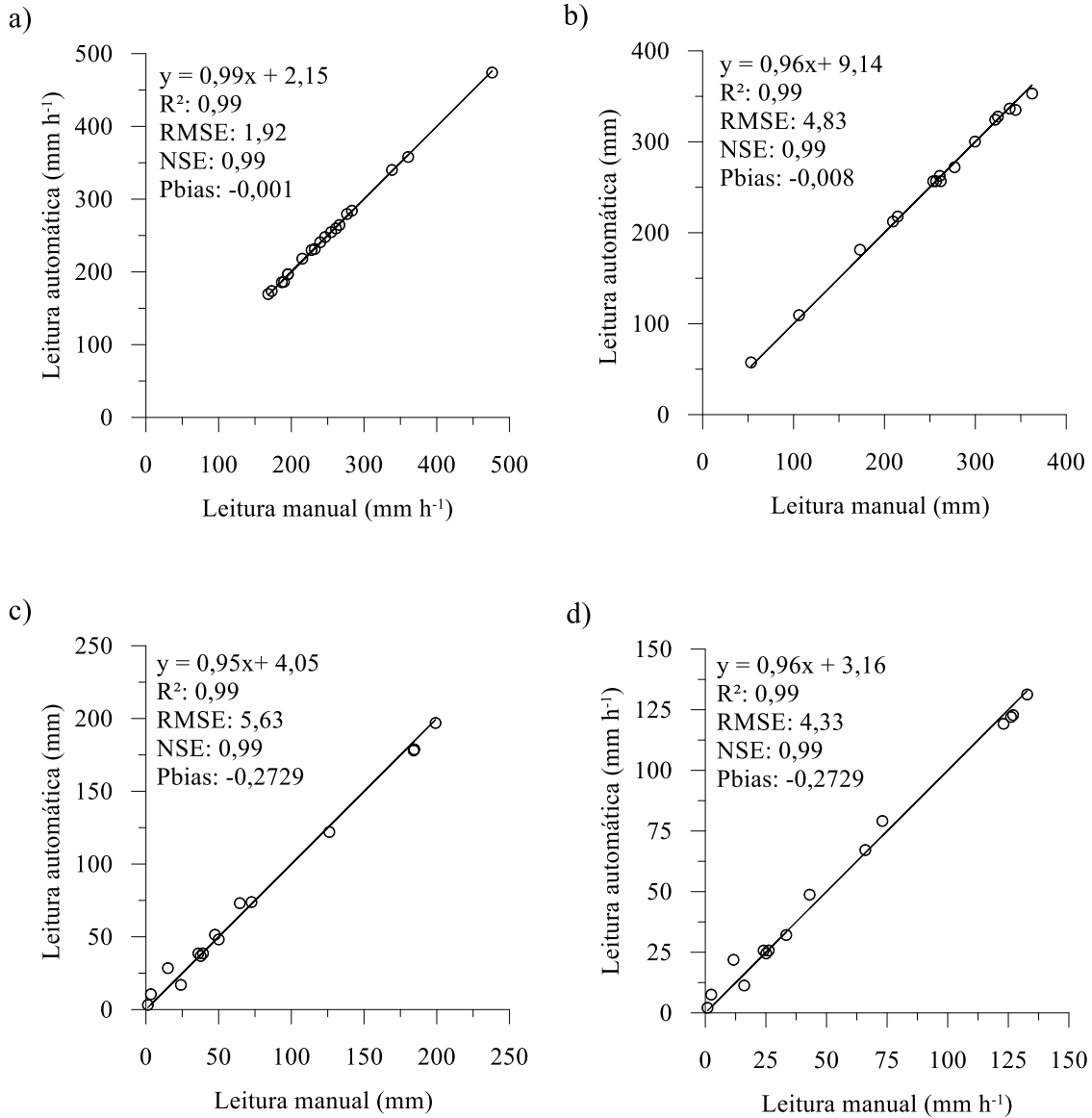
Os sistemas são de fácil construção e usam transdutores de pressão e microcontrolador de código aberto (<https://www.arduino.cc>). Isso facilita a medição da infiltração pontual de água no solo bem como melhora a determinação da curva de infiltração em relação à avaliação manual.

Figura 7 - Validação dos equipamentos e da estratégia utilizados para obtenção automática de variáveis da infiltração de água no solo com duplo anel concêntrico, demonstrando o alinhamento entre leitura manual e automática para taxa de infiltração estável (a) e para infiltração acumulada (b). A equação apresentada em cada variável representa o ajuste linear entre leitura manual e automática. RMSE: root mean squared error entre leitura manual e automática. NSE: Nash-Sutcliffe model efficiency entre leitura manual e automática. Willmott: Índice de concordância de Willmott entre leitura manual e automática. Pbias: Percent Bias entre leitura manual e automática. A linha preta representa a reta 1:1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 - Validação dos equipamentos e da estratégia utilizados para obtenção automática de variáveis da infiltração de água no solo com infiltrômetro de Cornell, demonstrando o alinhamento entre a leitura manual e automática para intensidade da precipitação (a), para escoamento superficial acumulado (b), para infiltração acumulada (c) e para taxa de infiltração estável (d). A equação apresentada em cada variável representa o ajuste linear entre leitura manual e automática. RMSE: root mean squared error entre leitura manual e automática. NSE: Nash-Sutcliffe model efficiency entre leitura manual e automática. Willmott: Índice de concordância de Willmott entre leitura manual e automática. Pbias: Percent Bias entre leitura manual e automática. A linha preta representa a reta 1:1.



Fonte: Elaborado pelo autor.



## 4.6 CONCLUSÕES

Sistemas compactos e automatizados para medição de infiltração pontual de água no solo com os infiltrômetros de anéis concêntricos e de Cornell foram desenvolvidos e validados.

A automação com sensores de pressão diferencial monitorados com microcontrolador Arduino de código aberto possibilita a confecção de sistemas de medição da infiltração pontual. Além de serem compactos, os sistemas são de baixo custo e possibilitam o registro do processo de infiltração e variáveis associadas com menos dependência do operador do que as estratégias de medições manuais.

Com maior resolução decorrente da automação dos infiltrômetros, a curva de infiltração fica melhor caracterizada, sobretudo na fase inicial de infiltração.

## REFERÊNCIAS

- ABDELMONEIM, A. A. et al. Internet of Things (IoT) for double ring infiltrometer automation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 188, n. July, p. 106324, 2021.
- ARRIAGA, F. J. et al. A method for automating data collection from a double-ring infiltrometer under falling head conditions. **Soil Use and Management**, v. 26, n. 1, p. 61–67, 2010.
- BOUWER, H. Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. v. 9p. 825–844.
- CERNICCHIARO, G.; BARMAK, R.; TEIXEIRA, W. G. Digital interface device for field soil hydraulic conductivity measurement. **Journal of Hydrology**, v. 576, n. June, p. 58–64, 2019.
- DI PRIMA, S. Automated single ring infiltrometer with a low-cost microcontroller circuit. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 118, p. 390–395, 2015.
- DI PRIMA, S. et al. Testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments. **Geoderma**, v. 262, p. 20–34, 2016.
- ES, H. VAN; SCHINDELBECK, R. Field Procedures and Data Analysis for the Cornell Sprinkle Infiltrometer. In: [s.l.] Cornell University. College of Agriculture and Life Sciences. Department of Crop and Soil Sciences Research Series R03-01, 2003.
- FATEHNIA, M. et al. Automating double ring infiltrometer with an Arduino microcontroller. **Geoderma**, v. 262, p. 133–139, 2016.
- LATORRE, B. et al. Smartphone-based tension disc infiltrometer for soil hydraulic characterisation. **Journal of Hydrology**, v. 600, n. June, 2021.
- LEWIS, J. D. et al. Comparison of cornell sprinkle infiltrometer and double-ring infiltrometer methods for measuring steady infiltration Rate. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 2021.

MORBIDELLI, R. et al. Role of slope on infiltration: A review. **Journal of Hydrology**, v. 557, n. January, p. 878–886, 2018.

MORET-FERNÁNDEZ, D. et al. An automated disc infiltrometer for infiltration rate measurements using a microflowmeter. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 2, p. 240–245, 2012.

OGDEN, C. B.; VAN ES, H. M.; SHINDELBECK, R. Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 61, p. 1041–1043, 1997.

RAHMATI, M. et al. Development and analysis of the Soil Water Infiltration Global database. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 3, p. 1237–1263, 2018.

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SERATTO, C. D. et al. **Infiltrômetro de aspersão de Cornell aperfeiçoado: aspectos construtivos, operacionais e de manutenção**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2019. v. 1

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy - Soil Survey Staff, twelfth edition**. Washington D.C: US Department of Agriculture, 2014.

SOMAVILLA, A.; GUBIANI, P. I.; ZWIRTZ, A. L. Tipping bucket prototype for automatic quantification of surface runoff rate in plots. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 43, p. 1–7, 2019.

## 5 CAPÍTULO II. ATENUAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL POR PLANTAS DE COBERTURA NO SUL DO BRASIL

### 5.1 RESUMO

Embora a importância de plantas de cobertura e/ou adubação verde para a integridade da agricultura conservacionista, permanece pouco compreendido como e exatamente quanto diferentes espécies ou consórcios influenciam processos chave de conservação de água e do solo, como escoamento superficial. Para preencher essa lacuna, implementamos um experimento em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico com o objetivo de identificar composições com plantas de cobertura com grande potencial de reduzir o escoamento superficial. Em delineamento blocos ao acaso, seis tratamentos com três repetições foram utilizados: solo exposto com manutenção de crosta superficial; amendoim forrageiro; gramíneas permanentes; aveia e nabo forrageiro no inverno e feijão no verão; aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; e azevém no inverno e feijão no verão. As unidades experimentais eram parcelas de 14,5 x 3 m delimitadas com chapas metálicas. O escoamento de água era conduzido até uma caixa com sistema *tipping bucket* (ligada a um datalogger) de registro automático da lâmina e vazão de escoamento. Houve monitoramento contínuo dos eventos de chuva e vazão para o ano de 2022. Paralelamente, 12 eventos de precipitação simulada de água foram realizados para análise de cenários extremos de geração de escoamento superficial. Plantas de cobertura e de adubação verde apresentaram capacidade em atenuar até 97% a perda anual de água por escoamento superficial. Além disso, houve diferença de até 35 % na perda anual de água entre as espécies. Maior infiltração aparente, maior abstração inicial, maior tempo para empoçamento, menor taxa de pico da enxurrada e menor escoamento superficial ocorre no amendoim forrageiro, seguido das espécies anuais e por fim gramíneas permanentes. Na medida que os eventos se tornam mais críticos (maior lâmina de precipitação) a capacidade das espécies em atenuar escoamento diminui, mas a diferença entre as espécies nas variáveis hidrológicas aumenta. Plantas apresentam grande capacidade em atenuar a perda anual de água por escoamento superficial, mas são insuficientes para controlar completamente as perdas. Os benefícios são mais evidentes em solo com cobertura de amendoim forrageiro, leguminosa perene em com alto potencial de produção de biomassa abaixo e acima do nível do solo.

**Palavras-chave:** Hidrologia, infiltração, conservação do solo, adubação verde, terraços

## 5.2 ABSTRACT

Despite the importance of cover crops and/or green manure to the integrity of conservation agriculture, it remains poorly understood how and exactly how much different species or intercrops influence key processes for water and soil conservation such as surface runoff. To study this gap, we implemented an experiment in an Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico (Ultisol) with the aim of identifying compositions with cover plants with great potential to reduce surface runoff. In a randomized block design, six treatments with three replications were used: bare soil with surface crust; forage peanuts; permanent grasses; oats and turnips in winter and beans in summer; oats and vetch in winter and beans in summer; and ryegrass in winter and beans in summer. The experimental units were plots of 14.5 x 3 m delimited with metal sheets. The water flow was led to a box with a tipping bucket system (connected to a datalogger) for automatic recording of the water depth and flow rate. There was continuous monitoring of rainfall and flow events for the year 2022. At the same time, 12 simulated water precipitation events were carried out to analyze extreme scenarios of surface runoff generation. Coverage and green manure plants were able to mitigate annual water loss by surface runoff by up to 97%. Furthermore, there was a difference of up to 35% in annual water loss between species. Greater apparent infiltration, greater initial abstraction, longer time for ponding, lower peak runoff rate and lower surface runoff occur in forage peanuts, followed by annual species and finally permanent grasses. As events become more critical (higher precipitation levels), the ability of species to attenuate runoff decreases, but the difference between species in hydrological variables increases. Plants have a great capacity to mitigate annual water loss through surface runoff, but are insufficient to completely control losses. The benefits are most evident in soil covered with forage peanuts, a perennial legume with high potential for biomass production below and above ground level.

**Keywords:** Hydrology, infiltration, soil conservation, green manure, terraces

### 5.3 INTRODUÇÃO

A agricultura conservacionista, baseada no mínimo revolvimento do solo, na manutenção permanente de cobertura sobre o solo e na rotação de culturas, é amplamente utilizada para intensificação mais sustentável de produção de alimentos (FAO, 2022), especialmente em condições tropicais (SCOPEL et al., 2013). No Brasil, por exemplo, o sistema de plantio direto - forma predominante de implementação dos princípios básicos da agricultura conservacionista nos agroecossistemas - cobre 61% das áreas de lavoura (FUENTES-LLANILLO et al., 2021). Também estima-se que de 2006 para 2017 a área sob plantio direto no país aumentou 85% (FUENTES-LLANILLO et al., 2021), e que atualmente passa por uma fase de consolidação. Nesses sistemas, a utilização de plantas de cobertura é central para promoção integral das propriedades emergentes decorrentes da agricultura conservacionista, como aumento no estoque de carbono no sistema, melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e conservação e otimização de recursos como a água (ADETUNJI et al., 2020; GILLER et al., 2015; HARUNA et al., 2018; SCOPEL et al., 2013).

Embora a importância ecológica da utilização de plantas de cobertura, no sul do Brasil há uma ampla diversidade de espécies comerciais, de cobertura e de adubação verde, anuais e permanentes, com capacidades desconhecidas em influenciar processos hidrológicos chave, como escoamento superficial, especialmente em sistemas de cultivo consolidados. Por exemplo, espécies como aveia, nabo forrageiro, ervilhaca e azevém (consorciados ou não), são amplamente utilizados em áreas de lavoura e pomares para cobrir o solo no período de outono/inverno (FILHO et al., 2023). Contudo, poucos estudos avaliaram como essas espécies se diferenciam de espécies permanentes, especialmente leguminosas, na atenuação do escoamento superficial. Alguns estudos demonstram que em solo coberto com pastagem natural o escoamento superficial é maior que em cultivos anuais (BERTOL et al., 2004; LANZANOVA et al., 2010). Por outro lado, amendoim forrageiro (leguminosa), embora amplamente recomendada para adubação verde e proteção do solo contra agente erosivos, devido ao grande aporte de biomassa acima e abaixo do nível do solo pela espécie (FILHO et al., 2023; VALENTIM; CARNEIRO; SALES, 2001), foi bem pouco estudada para controle do escoamento superficial.

Infiltração de água no solo e escoamento superficial são processos hidrológicos complexos que requerem medição em escala de parcela ou encosta para serem adequadamente estudados, pois a dissipação do escoamento superficial pela cobertura e rugosidade pode não ser devidamente expressa na escala pontual (KINNELL, 2016; KOPPE et al., 2022;

LANGHANS et al., 2019; SADEGHI; SEGHALEH; RANGAVAR, 2013). Nesse sentido, experimentos em parcelas dispostas em encostas no Brasil iniciaram em 1940 e cresceram em número de 1960 a 2000 (ANACHE et al., 2017). Contudo, há necessidade de mais estudos nessas escalas envolvendo mais condições em plantio direto (ANACHE et al., 2017; MERTEN et al., 2015). A maior parte dos trabalhos focou nas perdas acumuladas de solo e água anuais, como reflexo da experiência bem sucedida norte americana em quantificar perda de solo via erosão hídrica pluvial e em propor equações de estimativa (RENARD et al., 1996; WISCHMEIER; SMITH, 1978). Há uma lacuna em conhecer como é a relação de diferentes coberturas do solo com as características do hidrograma.

A caracterização da relação entre chuva e vazão de escoamento superficial é importante para obtenção de variáveis hidrológicas como tempo de concentração, tempo para empoçamento, lâmina da abstração inicial e taxa máxima de enxurrada, chaves para modelagem hidrológica, análise de diferentes cenários e dimensionamento de obras hidráulicas de contenção ou disciplinamento do escoamento superficial. Esforços têm sido feitos para explorar algumas dessas variáveis no sul do Brasil em escala de parcela (BARBOSA et al., 2012; BERTOL et al., 2011, 2015) e utilizando simuladores de precipitação (BERTOL; BERTOL; BARBOSA, 2012; SWANSON, 1965). Simuladores são ferramentas importantes para complementar o banco de dados e especialmente simular eventos extremos, que sob condições naturais requerem longo prazo para amostragem (BERTOL; BERTOL; BARBOSA, 2012; KINNELL, 2016; MHAZO; CHIVENGE; CHAPLOT, 2016). Mais recentemente, estudos explorando erosão e variáveis do escoamento superficial (incluindo vazão) foram desenvolvidos em condição de precipitação natural e em escalas de encosta e bacia de ordem zero no sul do Brasil (DEUSCHLE et al., 2019; KOPPE et al., 2022; LONDERO et al., 2021). Contudo, os trabalhos tem focado mais no efeito do preparo, da presença de resíduos, da semeadura em contorno, de práticas complementares como terraços, etc, do que nas espécies ou consórcios de cobertura, além de terem sido conduzidos em solos com características hidrológicas diferentes, o que influencia as respostas hidrológicas (MHAZO; CHIVENGE; CHAPLOT, 2016).

No cenário atual de mudanças climáticas, com aumento na frequência de eventos extremos (falta e excesso de chuvas) (E ÁVILA; ALBUQUERQUE; CAMPOS, 2022) e alto potencial para geração de insegurança alimentar (IPCC, 2023), delimitação de coberturas com grande capacidade em minimizar o escoamento superficial permitiria (i) equacionar melhor a necessidade de práticas conservacionistas complementares e (ii) otimizar mais a água na agricultura tropical e subtropical, especialmente em pequenas propriedades, onde a

implementação dos princípios conservacionistas enfrenta mais desafios (GILLER et al., 2015). Adicionalmente, isso possibilitaria delimitar características das coberturas que poderiam servir de critério de escolha das espécies mais adaptáveis a diferentes finalidades e cenários de solo e clima (BAETS et al., 2009), bem como definir uma quantidade mínima de biomassa de plantas para controlar de forma expressiva o escoamento superficial.

A hipótese é que plantas de cobertura apresentam expressiva capacidade em aumentar a infiltração de água no solo e conseqüentemente em atenuar o escoamento superficial, e que os benefícios são mais evidentes em solo coberto com amendoim forrageiro que por cultivos anuais e gramíneas permanentes.

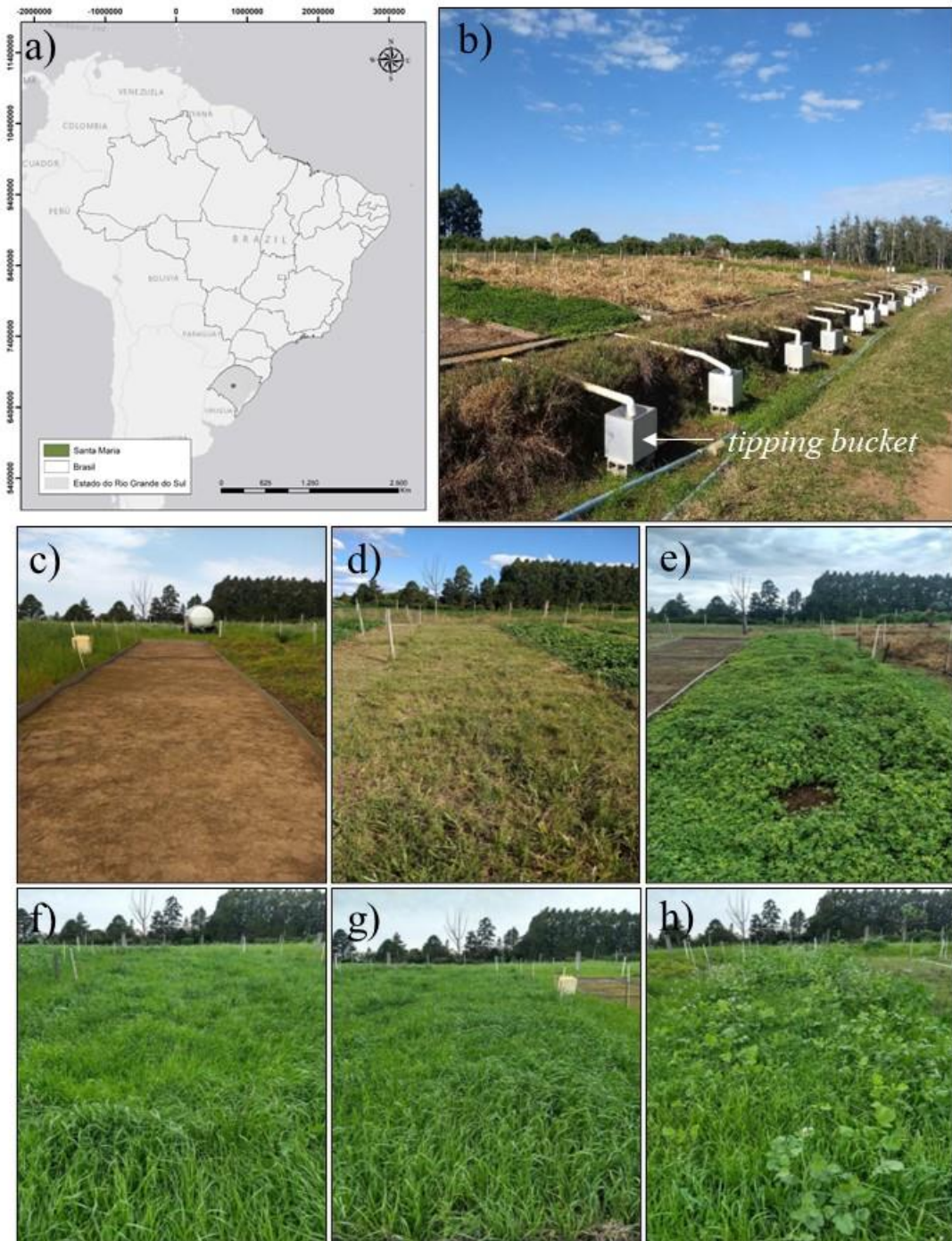
O objetivo foi estudar como diferentes sistemas com plantas de cobertura se diferenciam no aumento da infiltração de água no solo e na atenuação do escoamento superficial.

## 5.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.4.1 Caracterização da área e dos tratamentos

O estudo consistiu no monitoramento do escoamento superficial resultante de eventos de precipitação natural e simulada ocorridos em parcelas cultivadas com seis condições de cobertura vegetal no ano de 2022 (Figura 1). O experimento foi implantado em 2016, em área de lavoura sob plantio direto com sucessão aveia (*Avena strigosa*) e milho (*Zea mays*) desde 2000, pertencente à área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (29°43'11''S 53°42'12''W, altitude de 86 m). O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto, segundo sistema brasileiro (SANTOS et al., 2018), e como Ultisol segundo o Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2014), cujas propriedades físico-hídricas estão apresentadas na Tabela 1. O material originário é rocha sedimentar (siltito argiloso), formação Santa Maria. A mineralogia predominante é caulinita, quartzo, vermiculita (com interestratificados), goethita e hematita (PEDRON et al., 2018). A precipitação média anual é de 1700 mm com base em banco de dados (1961 a 2022) extraído de estação meteorológica do INMET, localizada na UFSM e a aproximadamente 1500 m do protocolo experimental. O clima é do tipo Cfa segundo classificação de Köeppen.

Figura 1 - a) Localização do experimento; b) protocolo de monitoramento do escoamento superficial em nível de parcela em seis condições de cobertura; c) solo exposto com manutenção de crosta superficial; d) gramíneas permanentes; e) amendoim forrageiro; f) azevém no inverno e feijão no verão; g) aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; h) aveia e nabo no inverno e feijão no verão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As unidades experimentais consistiram de 18 parcelas com dimensões de 3 x 14,5 m (43,5 m<sup>2</sup>), delimitadas com chapas galvanizadas de 30 cm de altura, inseridas 10 cm no solo (Figura 1). O maior comprimento foi orientado paralelamente à direção do declive, que é uniforme e na ordem de 6% ( $\pm 0,7$ ). Seis condições de cobertura vegetal foram dispostas em



delineamento blocos ao acaso com três repetições (Figura 1): solo exposto com manutenção de crosta superficial (SE); amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) (AF); gramíneas permanentes (predomínio de *Paspalum notatum*) (GP); aveia e nabo forrageiro no inverno (*Avena strigosa*; *Raphanus sativus*) e feijão preto (*Phaseolus vulgaris*) ou caupi (*Vigna unguiculata*) no verão (NA); aveia e ervilhaca (*Vicia villosa*) no inverno e feijão preto ou caupi no verão (AE); e azevém (*Lolium multiflorum*) no inverno e feijão preto ou guandu (*Cajanus cajan*) no verão (AZ). As espécies foram delimitadas buscando-se representar condições de cobertura vegetal e de adubação verde mais utilizadas na região de estudo e contemplar seus contrastes sobre produção de biomassa (acima e abaixo do nível solo), aporte de nitrogênio no sistema, arquitetura do sistema radicular, proteção do solo contra agentes erosivos, etc.

Tabela 1 - Características físico-hídricas do solo de estudo (Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto).

| Horizonte | Camada<br>cm | Total | Areia  |                            | Silte | Argila | Ksat<br>mm h <sup>-1</sup> | Ds<br>Mg m <sup>-3</sup> | Mac<br>m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> | Mic  |
|-----------|--------------|-------|--------|----------------------------|-------|--------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------------|------|
|           |              |       | Grossa | Fina<br>g kg <sup>-1</sup> |       |        |                            |                          |                                       |      |
| Ap        | 0 - 10       | 648   | 239    | 409                        | 262   | 90     | 121                        | 1,40                     | 0,14                                  | 0,32 |
| A1        | 5 - 20       | 624   | 230    | 394                        | 268   | 108    | 40                         | 1,65                     | 0,10                                  | 0,26 |
|           | 20 - 40      |       |        |                            |       |        |                            |                          |                                       |      |
| A2        | 40 - 60      | 586   | 176    | 410                        | 293   | 121    | 39                         | 1,60                     | 0,13                                  | 0,26 |
| E         | 60 - 80      | 604   | 164    | 440                        | 241   | 55     | 35                         | 1,66                     | 0,14                                  | 0,22 |
| Bt1       | 80 - 90      | 525   | 144    | 381                        | 247   | 128    | 8                          | 1,71                     | 0,12                                  | 0,22 |
| Bt2       | 90+          | 417   | 128    | 289                        | 290   | 293    | 15                         | 1,54                     | 0,10                                  | 0,31 |

Ksat: Condutividade hidráulica saturada em cada camada (média para a área de estudo). Ds: Densidade do solo; Mac: Macroporosidade; Mic: Microporosidade. A textura é franco arenosa de Ap a E, franca em Bt1 e franco argilosa em Bt2. Fonte: Elaborado pelo autor.

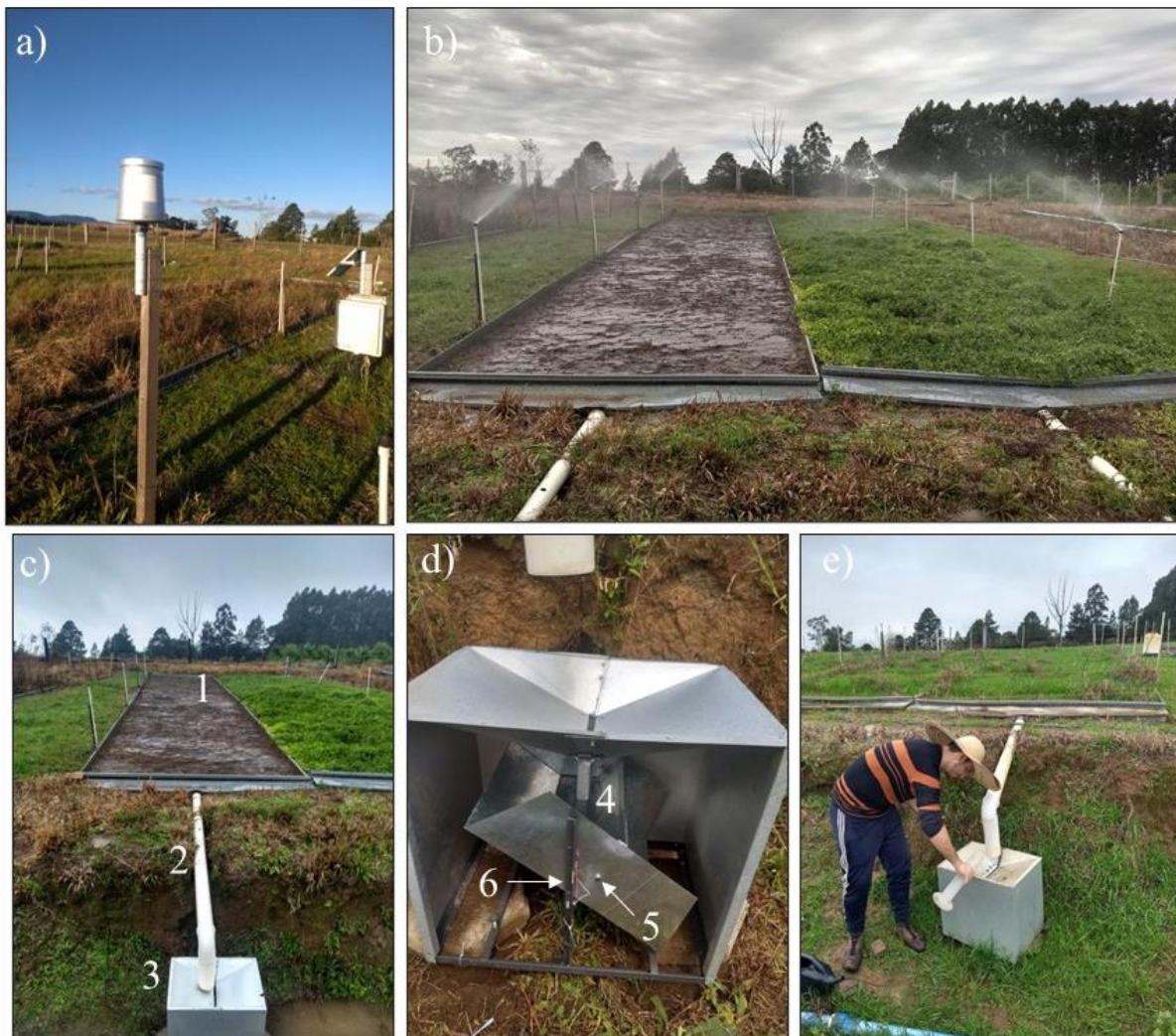
O plantio e semeadura das espécies foram realizados da mesma forma que é praticado na região de estudo. As plantas de cobertura de inverno anuais (azevém, aveia/ervilhaca e aveia/nabo) foram semeadas manualmente a lanço, no período de abril a maio de cada ano (5/05/2022 para o ano deste estudo), enquanto as de verão foram semeadas em linha (espaçamento entre linhas de 45 cm), de novembro a dezembro (28/11/2022 no ano deste estudo). Previamente à semeadura das plantas anuais, os resíduos e vegetação remanescente foram roçados e deixados sobre o solo. As gramíneas permanentes foram periodicamente roçadas para manutenção de dossel com aproximadamente 20 cm de altura. O amendoim forrageiro foi implantado através de mudas; periodicamente era realizada a retirada manual de algumas plantas invasoras. Nas parcelas com solo exposto, a área foi periodicamente dessecada com herbicida *Glyphosate*. Desde a implantação, a área do experimento foi mantida sem tráfego de máquinas e revolvimento do solo.

De 2016 a 2022 não foi realizada adubação de cobertura. No entanto, em 2022, para correção da fertilidade química da área tendo em vista a baixa disponibilidade de nutrientes e exigência nutricional das culturas (CQFS, 2016), foi realizada (i) aplicação de 110 kg ha<sup>-1</sup> de N nas parcelas com culturas anuais de inverno (9/06/2022); e (ii) aplicação de uma formulação NPK 5:20:20 no período precedente à implantação do feijão (21/11/22), com 800 kg ha<sup>-1</sup> nas parcelas com culturas anuais e amendoim forrageiro e 570 kg ha<sup>-1</sup> nas gramíneas permanentes.

#### **5.4.2 Monitoramento da precipitação e do escoamento superficial**

A precipitação natural foi monitorada com pluviógrafo ligado a um datalogger CR1000, programado para registrar o acumulado de precipitação a cada 1 min (Figura 2). A precipitação simulada (descrita no próximo tópico) foi quantificada com copos coletores distribuídos nas parcelas. O escoamento superficial foi monitorado com sistema *tipping bucket* (Figura 2). O escoamento gerado em cada parcela era conduzido até uma calha coletora que o conduzia através de tubos PVC para a caixa com as caçambas com capacidade de 4,3 litros de água. A cada basculamento das caçambas, o sistema registrava 1 pulso, que correspondia a 0,1 mm de escoamento (relação entre a capacidade da caçamba, 4,3 litros, e a área da parcela, 43,5 m<sup>2</sup>). O sistema foi ligado a um datalogger CR1000, e a programação realizada para haver registro contínuo de dados a cada 1 min. Periodicamente, cada caixa foi calibrada para estimativa do volume de água por pulso registrado (Figura 2). Era contabilizado o número de pulsos do sistema para um volume conhecido de água adicionado nas caixas.

Figura 2 - a) pluviógrafo para registro automático da precipitação natural; b) demonstração da alocação dos aspersores de irrigação lateralmente às parcelas na ocasião de um evento de precipitação simulada; c e d) sistema de condução e de registro do escoamento superficial; e) procedimento de calibração das caixas *tipping bucket*.



1- parcela experimental (43,5 m<sup>2</sup>); 2 - tubo PVC que conduz o escoamento superficial até 3- caixa *tipping bucket*; 4 - reservatório de água; 5 - ímã; 6 - interruptor magnético ligado a um datalogger. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.4.3 Precipitação natural

Com relação aos eventos de precipitação natural, foi considerado como evento efetivo aquele com capacidade de geração de escoamento superficial em no mínimo uma parcela do solo exposto. O número de eventos que atenderam esse requisito no ano de monitoramento (2022) foi 37. Para separação de dois eventos considerou-se a necessidade de haver um período mínimo de 6 h sem precipitação. As variáveis consideradas de cada evento foram lâmina acumulada (P), intensidade média ( $i_p$ ), intensidade do pico ( $i_{p_{pico}}$ ), duração (t), tempo de retorno ( $Tr$ ), e padrão (avançado, intermediário e atrasado). A intensidade média é determinada pela divisão entre lâmina acumulada e duração da chuva. A intensidade de pico se refere à intensidade máxima instantânea para o período de 1 min (intervalo mínimo de registro dos

dados). O tempo de retorno foi determinado com base em equações intensidade/duração/frequência (IDF) das chuvas (eq. 1 a 3) locais e de duas formas: (i) considerando a intensidade média e duração total do evento; e (ii) considerando a intensidade de pico e tempo de 1 min (estimativa do tempo de retorno do pico de intensidade). Os padrões da chuva foram definidos conforme a posição do pico de maior intensidade da precipitação (terço inicial, médio ou final do tempo de duração da precipitação).

$$ip = \frac{a \times Tr^b}{(t+c)^d} \quad (1)$$

em que  $ip$  é a intensidade média da chuva ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $Tr$  é o período de retorno (anos),  $t$  é a duração da chuva (min), e  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  os parâmetros de ajuste. Na equação 2 está apresentada a parametrização da equação 1 para a região de Santa Maria, RS, obtida por Roman (2015). Na equação 3 é apresentado o rearranjo da equação 2 para possibilitar a estimativa do período de retorno em função da intensidade/duração do evento ou pico.

$$ip = \frac{870,289 \times Tr^{0,1632}}{(t+8,76)^{0,7258}} \quad (2)$$

$$Tr = \left( \frac{ip \times (t+8,76)^{0,7258}}{870,289} \right)^{\frac{1}{0,1632}} \quad (3)$$

A intensidade média dos eventos efetivos variou de 1 a 29  $\text{mm h}^{-1}$ , enquanto a intensidade máxima instantânea de 19 a 190  $\text{mm h}^{-1}$  (Tabela 2). A duração desses eventos foi de 0,3 a 46 h, e a precipitação acumulada foi de 5 a 125 mm. A precipitação acumulada nos cinco dias anteriores aos eventos variou de 0 a 222 mm. O tempo de retorno das chuvas foi de até sete anos, mas na maioria dos eventos foi menor que um ano. O tempo de retorno dos picos de intensidade dos eventos considerados foi de até 2 anos (Tabela 2).

Tabela 2 - Caracterização dos eventos de precipitação natural efetivos do ano de 2022 e da precipitação acumulada nos dias anteriores.

| Data       | P (mm) | Padrão | Duração (h) | ip (mm h <sup>-1</sup> ) | ip <sub>pico</sub> (mm h <sup>-1</sup> ) | P (mm) últimos |        |         | Tr (anos) | Tr <sub>pico</sub> (anos) |
|------------|--------|--------|-------------|--------------------------|--|----------------|--------|---------|-----------|---------------------------|
|            |        |        |             |                          |  | 2 dias         | 5 dias | 10 dias |           |                           |
| 21/01/2022 | 43     | I      | 1,6         | 27                       | 108                                      | 0              | 10     | 14      | 1         | <1                        |
| 26/01/2022 | 30     | Av     | 2,9         | 10                       | 132                                      | 0              | 67     | 78      | <1        | <1                        |
| 28/02/2022 | 32     | Av     | 10,3        | 3                        | 151                                      | 18             | 24     | 27      | <1        | 1                         |
| 06/03/2022 | 46     | I      | 12,4        | 4                        | 113                                      | 3              | 3      | 59      | <1        | <1                        |
| 11/03/2022 | 29     | Av     | 7,4         | 4                        | 38                                       | 17             | 71     | 73      | <1        | <1                        |
| 30/03/2022 | 50     | Av     | 5,3         | 9                        | 170                                      | 4              | 4      | 17      | <1        | 1                         |
| 03/04/2022 | 125    | At     | 14,1        | 9                        | 57                                       | 0              | 55     | 63      | 7         | <1                        |
| 07/04/2022 | 9      | I      | 1,8         | 5                        | 54                                       | 0              | 125    | 180     | <1        | <1                        |
| 22/04/2022 | 20     | I      | 5,5         | 4                        | 81                                       | 0              | 0      | 2       | <1        | <1                        |
| 25/04/2022 | 38     | Av     | 11,0        | 3                        | 136                                      | 0              | 20     | 20      | <1        | <1                        |
| 28/04/2022 | 44     | Av     | 5,9         | 8                        | 108                                      | 3              | 41     | 61      | <1        | <1                        |
| 30/04/2022 | 13     | Av     | 10,8        | 1                        | 27                                       | 44             | 85     | 105     | <1        | <1                        |
| 03/05/2022 | 47     | At     | 46,5        | 1                        | 27                                       | 165            | 222    | 263     | <1        | <1                        |
| 27/05/2022 | 9      | At     | 3,7         | 3                        | 27                                       | 17             | 17     | 24      | <1        | <1                        |
| 28/05/2022 | 31     | Av     | 21,6        | 1                        | 27                                       | 9              | 27     | 27      | <1        | <1                        |
| 05/06/2022 | 56     | At     | 25,3        | 2                        | 81                                       | 0              | 0      | 40      | <1        | <1                        |
| 16/06/2022 | 31     | Av     | 16,2        | 2                        | 81                                       | 0              | 0      | 191     | <1        | <1                        |
| 04/07/2022 | 5      | I      | 7,9         | 1                        | 27                                       | 0              | 0      | 8       | <1        | <1                        |
| 08/07/2022 | 42     | At     | 17,8        | 2                        | 81                                       | 0              | 5      | 10      | <1        | <1                        |
| 11/07/2022 | 27     | Av     | 5,3         | 5                        | 57                                       | 0              | 42     | 48      | <1        | <1                        |
| 14/07/2022 | 61     | Av     | 34,7        | 2                        | 54                                       | 0              | 27     | 75      | <1        | <1                        |
| 16/07/2022 | 23     | At     | 5,6         | 4                        | 54                                       | 61             | 87     | 130     | <1        | <1                        |
| 22/07/2022 | 13     | At     | 9,2         | 1                        | 19                                       | 0              | 148    | 231     | <1        | <1                        |
| 28/07/2022 | 21     | Av     | 4,8         | 4                        | 38                                       | 0              | 0      | 161     | <1        | <1                        |
| 03/08/2022 | 38     | Av     | 41,1        | 1                        | 81                                       | 0              | 0      | 21      | <1        | <1                        |
| 09/08/2022 | 15     | Av     | 13,1        | 1                        | 19                                       | 0              | 0      | 38      | <1        | <1                        |
| 01/09/2022 | 35     | Av     | 3,0         | 12                       | 190                                      | 0              | 205    | 205     | <1        | 2                         |
| 18/09/2022 | 26     | At     | 19,9        | 1                        | 27                                       | 0              | 0      | 3       | <1        | <1                        |
| 06/10/2022 | 23     | I      | 5,3         | 4                        | 85                                       | 167            | 167    | 172     | <1        | <1                        |
| 26/10/2022 | 16     | At     | 5,4         | 3                        | 19                                       | 0              | 0      | 3       | <1        | <1                        |
| 30/10/2022 | 23     | Av     | 17,1        | 1                        | 38                                       | 0              | 16     | 19      | <1        | <1                        |
| 13/11/2022 | 21     | Av     | 6,2         | 3                        | 19                                       | 0              | 0      | 0       | <1        | <1                        |
| 14/11/2022 | 12     | I      | 2,5         | 5                        | 132                                      | 21             | 21     | 21      | <1        | <1                        |
| 22/11/2022 | 9      | At     | 11,5        | 1                        | 19                                       | 0              | 0      | 33      | <1        | <1                        |
| 04/12/2022 | 29     | Av     | 1,8         | 16                       | 102                                      | 0              | 0      | 0       | <1        | <1                        |
| 23/12/2022 | 9      | Av     | 0,3         | 29                       | 76                                       | 0              | 0      | 0       | <1        | <1                        |
| 28/12/2022 | 19     | Av     | 4,1         | 5                        | 102                                      | 0              | 12     | 12      | <1        | <1                        |

P: lâmina da precipitação; ip é a intensidade média; ip<sub>pico</sub> é a intensidade máxima instantânea do evento para o período de 1 min; Tr é o tempo de retorno do evento; Tr<sub>pico</sub> é o tempo de retorno do pico do evento. Av: avançado; I: intermediário; At: atrasado. Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.4.4 Precipitação simulada

Entre março de 2022 e janeiro de 2023, 12 eventos de precipitação simulada foram realizados para análise de cenários extremos de geração de escoamento superficial e assim complementar o banco de dados (Figura 2). Não há garantias que os eventos simulados geraram características de gotas semelhantes à chuva natural; o objetivo foi gerar precipitação de água com taxa constante e distribuição uniforme nas parcelas para analisar o efeito das diferentes coberturas na resistência ao escoamento superficial. Em um desses eventos (21/06/2022), precipitação natural ocorreu simultaneamente. Todos os eventos simulados foram efetivos na geração de escoamento superficial. As variáveis consideradas foram lâmina acumulada (P), intensidade média (ip), duração (t) e tempo de retorno (Tr). Para as precipitações simuladas, o tempo de retorno foi determinado considerando apenas a intensidade média e tempo total da precipitação, dado que o pico de intensidade é igual numericamente à intensidade média, pois a intensidade de precipitação é constante.

As precipitações foram realizadas em datas e períodos estratégicos, em que a velocidade de vento era mínima. Procurou-se, por exemplo, realizar as simulações nos períodos da noite ou manhã, em que a velocidade do vento geralmente era menor que na média diária. Utilizou-se um sistema de irrigação não intermitente, com quatro aspersores jato SempreVerde/Fabrimar 180° alocados lateralmente a cada parcela, a uma altura de 1,5 m da superfície solo e distanciados 3 m entre si (Figura 2). Além disso, a altura de projeção da água de cada aspersor é de aproximadamente 1 m (Figura 2b). Logo, a altura total de queda das gotas de água da precipitação simulada é de ~ 2,5 m (Figura 2b). A pressão aplicada na bomba correspondeu a um raio de molhamento de 3 m de cada aspersor, o suficiente para a precipitação abranger toda a parcela. A intensidade da precipitação foi constante em cada evento, mas entre os eventos foram utilizadas taxas de precipitação diferentes com o intuito de gerar eventos com condições distintas quanto à capacidade de geração de escoamento. Nesse sentido, a duração também foi diferente entre os eventos. Com exceção do evento do dia 10/01/2023, no qual a precipitação foi realizada por blocos e com número de aspersores duplicado para obter maior intensidade, todas as parcelas foram irrigadas ao mesmo tempo. O sistema abrange a área total e uma borda adicional de molhamento de cerca de 3 m. A precipitação acumulada variou de 68 a 238 mm entre os eventos, e a duração de 3 a 8 h (Tabela 3). A intensidade média variou de 23 a 60 mm h<sup>-1</sup>. Para um mesmo evento, a variabilidade espacial da intensidade e da lâmina da precipitação foi de ~ 20%. A precipitação acumulada nos cinco dias anteriores foi de 0 a 128 mm. O tempo

de retorno variou de 3 a 3319 anos. Além disso, seis eventos apresentaram tempo de retorno acima de 100 anos (Tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização dos eventos de precipitação simulada utilizados no estudo e da precipitação acumulada nos dias anteriores.

| Data       | P (mm) | Duração (h) | ip (mm h <sup>-1</sup> ) | P (mm) últimos |        |         | Tr (anos) |
|------------|--------|-------------|--------------------------|----------------|--------|---------|-----------|
|            |        |             |                          | 2 dias         | 5 dias | 10 dias |           |
| 12/03/2022 | 144    | 6,3         | 23                       | 42             | 54     | 102     | 67        |
| 01/05/2022 | 165    | 4,0         | 41                       | 13             | 60     | 118     | 342       |
| 06/06/2022 | 188    | 5,5         | 34                       | 56             | 56     | 96      | 445       |
| 21/06/2022 | 132    | 5,0         | 26                       | 0              | 31     | 31      | 60        |
| 18/07/2022 | 148    | 4,0         | 37                       | 23             | 83     | 152     | 180       |
| 29/08/2022 | 202    | 8,0         | 25                       | 3              | 3      | 3       | 341       |
| 06/10/2022 | 157    | 4,3         | 36                       | 10             | 10     | 15      | 223       |
| 15/10/2022 | 68     | 3,0         | 23                       | 0              | 10     | 200     | 3         |
| 12/12/2022 | 99     | 4,0         | 25                       | 0              | 0      | 29      | 15        |
| 03/01/2023 | 128    | 4,0         | 32                       | 0              | 0      | 23      | 74        |
| 05/01/2023 | 121    | 4,0         | 30                       | 128            | 128    | 148     | 51        |
| 10/01/2023 | 238    | 4,0         | 60                       | 0              | 121    | 249     | 3319      |

P: lâmina da precipitação; ip é a intensidade média; Tr é o tempo de retorno do evento. Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.4.5 Particionamento da precipitação

Com relação ao escoamento, foram considerados de cada evento: (i) escoamento superficial acumulado (R); (ii) coeficiente de escoamento; (iii) taxa máxima instantânea da enxurrada para o período de 1 min (Q max) (intervalo mínimo de registro dos dados); (iv) lâmina das abstrações iniciais (Ia); (v) tempo para empoçamento ( $t_{emp}$ ); e (vi) tempo de concentração (TC). O coeficiente de escoamento representa a relação (%) entre lâmina de escoamento superficial e lâmina da precipitação. A abstração inicial corresponde à lâmina de precipitação acumulada desde o início da precipitação até o escoamento superficial iniciar; e o intervalo de tempo representa o tempo para empoçamento. O tempo de concentração é o tempo transcorrido desde o final da precipitação até a taxa de escoamento superficial cessar. É uma variável hidrológica que indica a velocidade de propagação da chuva excedente do ponto hidráulicamente mais remoto da parcela até o exutório (caixa *tippink bucket*); representa a resistência hidráulica da superfície à enxurrada. Para o evento mais extremo de precipitação simulada, realizado em 10/01/2023, também se determinou a taxa de infiltração instantânea para obtenção da capacidade mínima de infiltração aparente da parcela. Para isso, a taxa de infiltração aparente (ia) foi inicialmente determinada pela diferença entre taxa de precipitação (ip) e taxa de escoamento (Q) instantâneos ( $ia = ip - Q$ ), considerando tempo de discretização

de 1 min. Atribuiu-se taxa de infiltração mínima à média das taxas instantâneas dos últimos 20 min da precipitação. Além de apresentar o maior período de retorno com base na intensidade/duração, o evento do dia 10/01/2023 coincidiu com a maior umidade antecedente entre os eventos indicada pela precipitação acumulada nos últimos dez dias (Tabela 3). Por fim, o escoamento anual foi determinado para cada condição. Paralelamente, a abstração total anual ( $I$ ) foi determinada pela diferença entre precipitação e escoamento anuais acumulados ( $I = P - R$ ).

#### **5.4.6 Hietograma e hidrograma**

Para eventos representativos de precipitação natural (1/09/2022) e simulada (18/07/2022), hietogramas ( $ip \times t$ ) e hidrogramas ( $Q \times t$ ) foram gerados e devidamente analisados. Para isso, foi utilizada média móvel de 5 min dos valores de  $ip$  e  $Q$ . Isso possibilitou analisar graficamente algumas características do hidrograma como tempo para empocamento, taxa máxima de enxurrada, sensibilidade da taxa de escoamento a mudanças na intensidade da precipitação, etc.

#### **5.4.7 Umidade do solo**

O monitoramento da umidade do solo foi realizado utilizando sensores FDR (CS616), comprimento de haste 30 cm, instalados horizontalmente na profundidade de 5 cm, em um ponto no centro de cada parcela. As sondas foram ligadas em um datalogger CR1000, com programação realizada para ocorrer registro dos dados a cada 5 min. Para complementar a caracterização da umidade do solo foram determinadas as lâminas acumuladas de precipitação natural e simulada para dois, cinco, dez e 20 dias anteriores a cada evento. Para isso, inicialmente foram tabelados os valores de precipitação diária no ano (365 valores). Posteriormente, soma móvel da precipitação foi realizada considerando os últimos dois, cinco, dez e 20 dias.

#### **5.4.8 Rugosidade superficial**

A rugosidade superficial foi avaliada em dois períodos, 26/04/2022 e 11/11/2022, antes e após o ciclo das coberturas de inverno, respectivamente. Foi utilizado um microperfilômetro com 75 varetas espaçadas em 1 cm. O perfilômetro foi alocado em quatro pontos distanciados



em 20 cm dentro de cada parcela; em cada ponto a cota nas 75 varetas foi medida. Por fim, a rugosidade superficial aleatória foi representada pelo desvio padrão das cotas (KAMPHORST et al., 2000). Adicionalmente, a capacidade máxima de armazenamento depressional de água na superfície foi determinada segundo Onstad (1984) (eq. 4).

$$Arm = 1,12RR + 0,31RR^2 - 0,12RR * D \quad (4)$$

em que *Arm* é o armazenamento depressional (mm), *RR* é a rugosidade aleatória (mm) e *D* é a declividade (%).

#### 5.4.9 Biomassa vegetal

Nos períodos de estabelecimento, florescimento e maturação fisiológica das culturas, a biomassa total sobre o solo foi coletada em uma área amostral de 0,5 x 0,5 m de cada parcela. O objetivo foi quantificar a biomassa para os períodos de mínima e máxima produção de matéria seca pelas culturas. Assim, a biomassa para os demais períodos pôde ser estimada via interpolação linear. A biomassa foi seca em estufa a 60°C por 72 h. No período de florescimento das culturas anuais de inverno (6/09/2022) e de verão (20/01/2023), a biomassa de raízes foi quantificada em um ponto de todas as parcelas nas camadas 0-10 e 10-20 cm. Blocos de solo de 10x10x20 cm foram coletados em ambas as camadas, os quais foram desagregados e as raízes separadas via lavagem e peneiramento em malha de 2 mm. As raízes foram secas em estufa a 60 °C por 72 h para determinação da massa seca.

#### 5.4.10 Infiltração pontual

A infiltração pontual foi avaliada em três pontos em cada parcela (partes superior, média e inferior), no inverno (29/08 a 02/09/2022) e verão (14 a 17/02 e 28 a 30/02/2023), e com dois métodos: duplo anel concêntrico (BOUWER, 1986) e infiltrômetro de Cornell (ES; SCHINDELBECK, 2003; OGDEN; VAN ES; SHINDELBECK, 1997; SERATTO et al., 2019). No inverno, o solo estava quase saturado pela precipitação simulada, enquanto no verão o conteúdo de água no solo estava um pouco abaixo da capacidade de campo quando os testes iniciaram.

Para os testes com duplo anel (anéis internos de 20 cm de diâmetro e 15 cm de altura, inseridos 7,5 cm no solo; e anéis externos de 40 cm de diâmetro e 10 cm de altura, inseridos 5

cm no solo), o tempo de teste foi de 2 h, seguindo procedimento automático de obtenção de dados a cada 1 s e mantendo carga hidráulica constante sobre o solo de 3 cm (capítulo I). Por fim, foram consideradas as leituras de infiltração de intervalos de 2 a 3 min no início (0-10 min) do teste e de 10 min no restante do tempo. As variáveis extraídas de cada repetição foram infiltração acumulada em diferentes estágios (0-30, 30-60, 60-90, 90-120 min) e taxa de infiltração estável (média dos últimos dois a três valores estáveis).

Para Cornell (anel de 25 cm de diâmetro, 15 cm de altura e inserido 7,5 cm no solo) os testes tiveram cerca de 1 h de duração e intensidade de precipitação de aproximadamente 300 mm h<sup>-1</sup>. A precipitação e escoamento eram monitorados manualmente a cada 3 min. Embora também tenha-se desenvolvido procedimento automático de obtenção de dados para este método (capítulo I), o mesmo não foi aplicado na avaliação da infiltração pontual nas parcelas para evitar a abertura de trincheiras, cujo tamanho relativamente grande poderia ocasionar uma alteração importante da estrutura do solo e nas respostas hidrológicas da parcela. As variáveis extraídas de cada repetição foram infiltração acumulada em diferentes estágios (0-30, 30-60 min) e taxa de infiltração estável (média dos últimos dois a três valores estáveis).

#### **5.4.11 Caracterização físico hídrica do solo**

Coletas de solo com estrutura preservada foram realizadas utilizando anéis de aço inox de 4 cm de altura e 6 cm de diâmetro, na data de 05/09/2022. As camadas amostradas foram 0-5, 5-20, 20-40 e 40-60 cm, em duplicata em cada camada e parcela. Paralelamente, 20 amostras dos horizontes E, Bt1 e Bt2 foram coletadas em trincheira aberta paralelamente ao experimento. Em laboratório, as amostras foram inicialmente saturadas via capilaridade por aproximadamente 3 dias e então determinada a condutividade hidráulica saturada utilizando permeâmetro de carga constante (2 cm). Posteriormente, as amostras foram submetidas a tensão de 6 kPa em mesa de tensão de areia para determinação de macro e microporos (REINERT; REICHERT, 2006). Por fim, as amostras foram secas em estufa a 105°C por 48 h para determinação da densidade. A porosidade total foi determinada pelo princípio da densidade de partículas (2,61 Mg m<sup>-3</sup>) (TEIXEIRA et al., 2017). Paralelamente, no perfil onde foram retiradas as amostras das camadas mais subsuperficiais (E, Bt1 e Bt2), descrição morfológica com separação de horizontes diagnósticos foi realizada para fins de classificação do solo. Em cada horizonte, amostras foram coletadas para determinação da distribuição granulométrica (TEIXEIRA et al., 2017). Por fim, com a condutividade hidráulica de solo saturado média e espessura de cada camada, a condutividade hidráulica vertical efetiva para o perfil do solo

saturado ( $K_{ef}$ ) foi determinada seguindo equação de Darcy para N camadas (eq. 5). Para o horizonte Bt2 foi considerada espessura de 50 cm (Tabela 1).

$$K_{ef} = \frac{Z}{\left[ \frac{dz_1}{K_1} + \frac{dz_2}{K_2} + \frac{dz_3}{K_3} + \dots + \frac{dz_n}{K_n} \right]} \quad (5)$$

em que  $Z$  é a profundidade do perfil (L),  $dz$  é a espessura (L) e  $K$  ( $L T^{-1}$ ) é a condutividade hidráulica de solo saturado de cada camada representada pelos índices 1, 2, ..., n.

#### 5.4.12 Análise estatística

A análise de variância (ANOVA) ( $p < 0,05$ ) foi usada para avaliar o efeito das plantas de cobertura no escoamento superficial acumulado, na taxa de infiltração mínima aparente, na rugosidade superficial, no armazenamento depressional e em cada variável da infiltração pontual obtida com cada método e época, seguida pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para comparação de médias. Análise gráfica utilizando *box-plot* foi utilizada para analisar como é a variabilidade dos valores, para um mesmo tratamento, de taxa máxima de escoamento, da lâmina das abstrações iniciais, do tempo para empoçamento e de concentração para quando há escoamento superficial. Além disso, análise de regressão foi utilizada para analisar o efeito da biomassa de plantas no escoamento superficial. Os pressupostos da ANOVA (resíduos normais, independentes e com variância homogênea) foram devidamente verificados e atendidos.

### 5.5 RESULTADOS

#### 5.5.1 Características hidrológicas do solo

O solo apresenta permeabilidade relativamente baixa à água, com condutividade hidráulica vertical efetiva de perfil saturado de  $15 \text{ mm h}^{-1}$  (Tabela 1). No método do serviço de conservação de solos dos Estados Unidos para estimativa da chuva excedente adaptado para condições tropicais, se enquadra no grupo C (SARTORI; LOMBARDI NETO; GENOVEZ, 2005a, 2005b); os grupos hidrológicos vão de A (solos com baixo potencial ao escoamento superficial) a D (solos com alto potencial ao escoamento superficial). As camadas ou horizontes com maior restrição ao fluxo de água com base na condutividade hidráulica de solo saturado são 20-40 cm e horizonte Bt (Tabela 1).

### 5.5.2 Aporte de biomassa

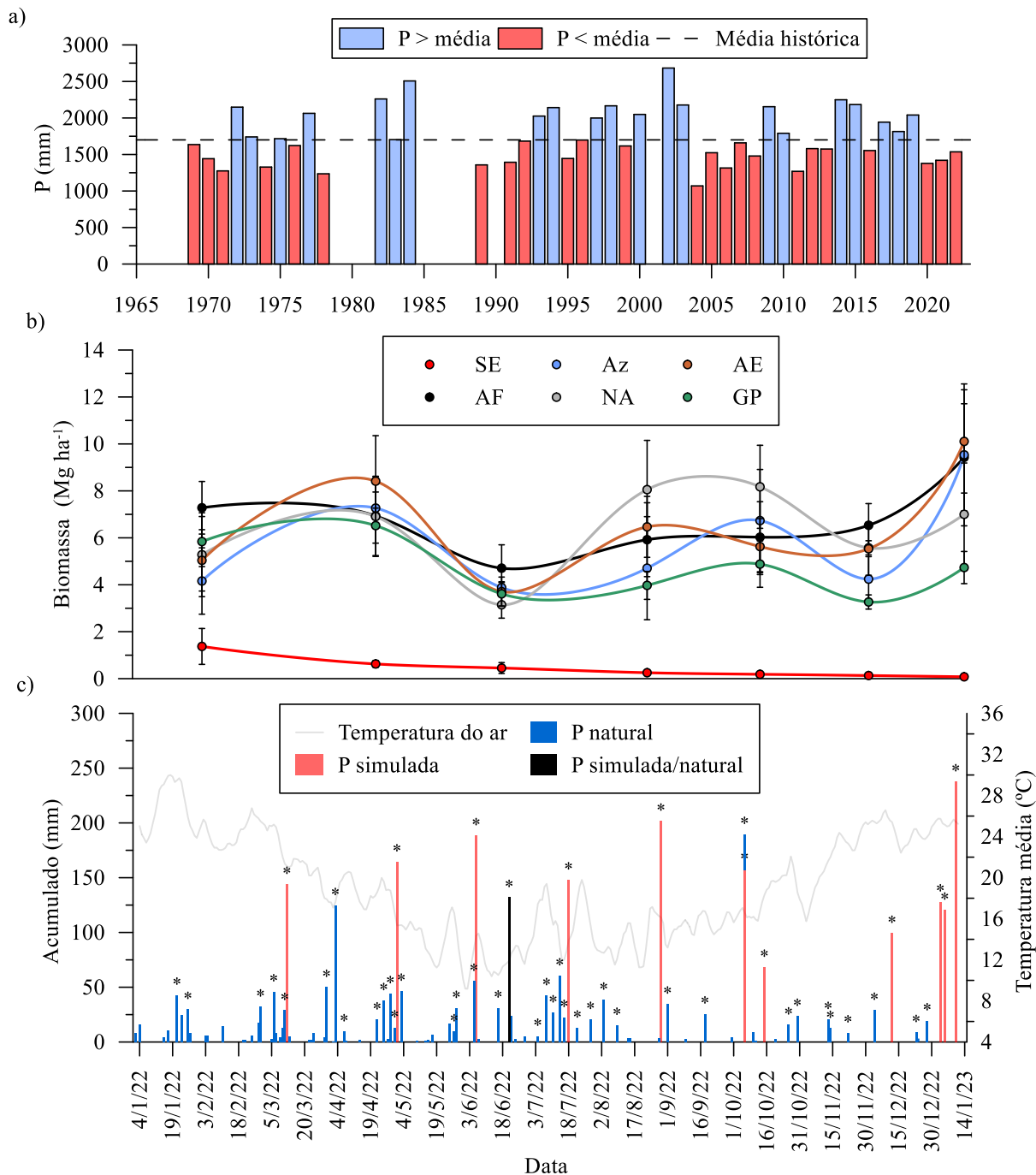
A biomassa de raízes no solo foi maior nas espécies permanentes do que nas anuais, especialmente na camada 0-10 cm e para o período de verão (Tabela 4). Houve maior biomassa abaixo (Tabela 4) do que acima (Figura 3) do nível do solo nas espécies permanentes. A biomassa seca média sobre o solo durante o ano foi de 6,7 Mg ha<sup>-1</sup> no amendoim forrageiro, 6,4 Mg ha<sup>-1</sup> em aveia e ervilhaca/feijão, 6,3 Mg ha<sup>-1</sup> em aveia e nabo/feijão, 5,8 Mg ha<sup>-1</sup> em azevém/feijão, 4,7 Mg ha<sup>-1</sup> em gramíneas permanentes e de 0,4 Mg ha<sup>-1</sup> no solo exposto (Figura 3). A quantidade mínima instantânea de biomassa nas espécies anuais foi 3,2 Mg ha<sup>-1</sup>, o que coincidiu com os períodos de estabelecimento das culturas de inverno (Figura 3). No amendoim forrageiro e gramíneas permanentes houve menor oscilação sazonal da biomassa sobre o solo (Figura 3).

Tabela 4 - Biomassa seca de raízes (Mg ha<sup>-1</sup>) de coberturas vegetais em duas camadas de solo, avaliadas no inverno de 2022 e verão de 2023.

| Tratamento | Camada 0 - 10 cm    |    |                    |   | Camada 10 - 20 cm   |    |                    |   |
|------------|---------------------|----|--------------------|---|---------------------|----|--------------------|---|
|            | inverno (6/09/2022) |    | verão (20/01/2023) |   | inverno (6/09/2022) |    | verão (20/01/2023) |   |
| AF         | 7,2                 | ns | 8,9                | a | 1,2                 | ns | 1,6                | a |
| GP         | 6,0                 |    | 11,2               | a | 0,8                 |    | 1,3                | a |
| Az         | 2,2                 |    | 1,8                | b | 0,4                 |    | 0,1                | b |
| NA         | 1,9                 |    | 1,6                | b | 0,2                 |    | 0,1                | b |
| AE         | 2,3                 |    | 1,2                | b | 0,3                 |    | 0,2                | b |
| SE         | 0,2                 |    | 0,2                |   | 0,1                 |    | 0,1                |   |

SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. Para cada camada e época de avaliação, médias com letras distintas na coluna diferem os tratamentos pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Para análise de variância e testes de média foi desconsiderado o tratamento SE. Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3 - a) Lâmina de chuva (P) anual (1961 a 2022) para o local de estudo (anos com falhas no registro de dados foram desconsiderados); b) biomassa seca total acima do nível do solo em diferentes condições de cobertura do solo e épocas de avaliação em 2022; c) temperatura média do ar durante o período de estudo (2022) e distribuição dos eventos de precipitação com e sem geração de escoamento superficial.



\*eventos com geração de escoamento superficial. P simulada: evento de precipitação simulada; P natural: eventos de precipitação natural; P simulada/natural: evento de precipitação simulada e natural ocorridos simultaneamente. Os dados de temperatura do ar representam uma média móvel de dez dias. SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.5.3 Respostas hidrológicas aos padrões de chuva e à sazonalidade

Os 37 eventos naturais efetivos na geração de escoamento superficial (Tabela 2; Figura 3) representaram 79% da precipitação natural ocorrida no ano monitorado (1420 mm). A maior parte desses eventos foi de padrão avançado (20 eventos), seguido de padrão atrasado (10 eventos) e intermediário (7 eventos) (Tabela 2). O padrão avançado também foi o que gerou maior coeficiente de escoamento médio (5,67%), seguido de intermediário (4,99%) e atrasado (4,85 %). O escoamento absoluto médio foi de 12 mm no padrão avançado, 11,7 mm no padrão atrasado e de 7,2 mm no padrão intermediário. A precipitação média acumulada nos cinco dias anteriores (indicativo da umidade do solo) foi de 32 mm para os eventos de padrão avançado, 46,6 mm para os de padrão intermediário e de 53,5 mm para os de padrão atrasado. Isso demonstra que eventos de precipitação com padrão avançado apresentam maior capacidade de geração de escoamento superficial, principalmente por terem maior intensidade de pico.

Julho a setembro (inverno) correspondeu o período mais crítico para geração de escoamento, mesmo com lâmina de chuva mensal abaixo da média histórica, especialmente entre agosto a dezembro (Tabela 5; Figura 4). O coeficiente de escoamento mais alto nesse período coincidiu com umidade do solo mais elevada que nas demais épocas (Figura 5). Embora o acumulado de chuvas no período tenha sido apenas 22% do acumulado de chuvas do ano, foi nesse período que ocorreu 40% e 60% do total escoado no ano, respectivamente para as condições sem e com cobertura (Figura 4). Por exemplo, nas condições com cobertura, um único evento nesse período (01/09/2022) gerou escoamento correspondente a 35% do escoamento anual (Tabela 5; Figura 4). Nesse evento, a precipitação foi 35 mm (2,4% da precipitação natural anual), com padrão avançado e pico de intensidade elevado ( $190 \text{ mm h}^{-1}$ ) (Tabela 2) e ocorreu em solo com umidade relativamente elevada (205 mm de precipitação acumulada nos cinco dias anteriores). Nas condições com plantas, três eventos (1/09, 14/07 e 5/06/2022; nessa sequência de importância, Tabela 5) geraram 57% do escoamento superficial anual (Tabela 5; Figura 4). Os eventos ocorridos em 14/07 e 5/06/2022 apresentaram duração de 34,7 e 25,3 h, lâmina acumulada de 61 e 56 mm e padrão avançado e atrasado, respectivamente (Tabela 2).

A precipitação natural anual (1420 mm) foi 16 % menor que a média histórica (1700 mm) (Figura 3). Apenas nos meses de março, abril, junho e julho a precipitação natural mensal foi maior que a média histórica (Figura 3). Contudo, considerando a precipitação acumulada adicional oriunda dos eventos simuladas (1791 mm entre 03/2022 a 01/2023, Tabela 3), o

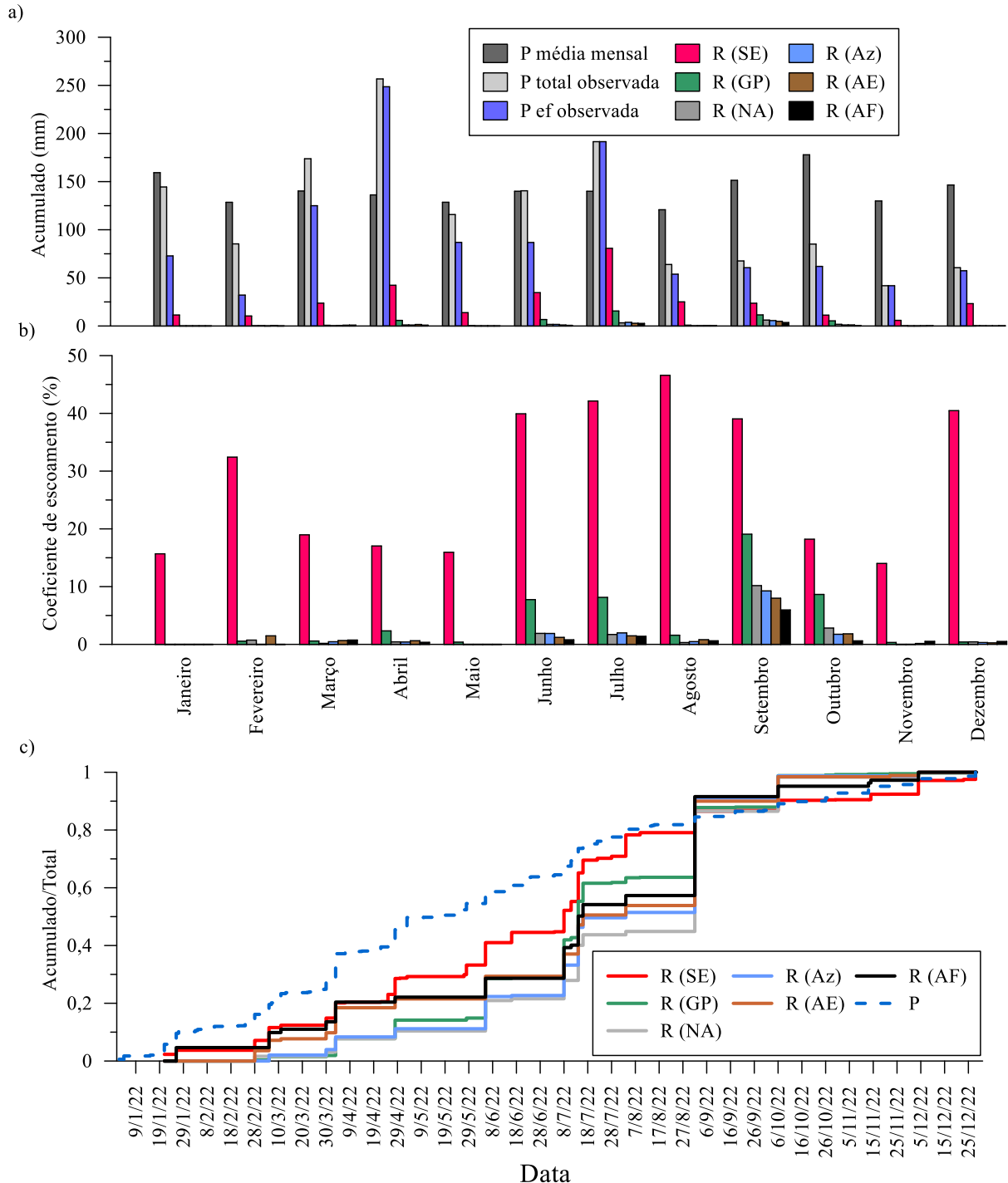
somatório da precipitação natural com a precipitação simulada foi praticamente o dobro da precipitação anual acumulada média da região de estudo.

Tabela 5 - Precipitação (P) e escoamento superficial (R) acumulados e coeficiente de escoamento superficial para eventos efetivos de precipitação natural ocorridos em 2022 em solo com diferentes condições de cobertura.

| Data       | P<br>(mm) | SE   | GP  | R (mm) |     |     |     | Coeficiente de escoamento (%) |    |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
|------------|-----------|------|-----|--------|-----|-----|-----|-------------------------------|----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|
|            |           |      |     | NA     | Az  | AE  | AF  | SE                            | GP | NA  | Az | AE  | AF |    |    |    |    |    |    |
| 21/01/2022 | 43        | 7,1  | 0,0 | 0,0    | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0                           | 16 | 0   | 0  | 0   | 0  | 0  |    |    |    |    |    |
| 26/01/2022 | 30        | 4,4  | 0,0 | 0,0    | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5                           | 15 | 0   | 0  | 0   | 0  | 2  |    |    |    |    |    |
| 28/02/2022 | 32        | 10,4 | a   | 0,2    | b   | 0,2 | b   | 0,0                           | b  | 0,5 | b  | 0,0 | b  | 32 | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  |
| 06/03/2022 | 46        | 13,6 | 0,5 | 0,0    | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 30                            | 1  | 0   | 1  | 1   | 1  | 1  |    |    |    |    |    |
| 11/03/2022 | 29        | 2,5  | a   | 0,0    | a   | 0,0 | a   | 0,0                           | a  | 0,1 | a  | 0,1 | a  | 9  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 30/03/2022 | 50        | 7,6  | a   | 0,2    | b   | 0,2 | b   | 0,3                           | b  | 0,3 | b  | 0,3 | b  | 15 | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 03/04/2022 | 125       | 16,0 | a   | 2,8    | b   | 0,7 | b   | 0,6                           | b  | 1,2 | b  | 0,7 | b  | 13 | 2  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| 07/04/2022 | 9         | 0,8  | a   | 0,0    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 9  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 22/04/2022 | 20        | 0,6  | a   | 0,0    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 3  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 25/04/2022 | 38        | 7,7  | a   | 0,0    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 20 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 28/04/2022 | 44        | 16,9 | a   | 3,0    | b   | 0,4 | b   | 0,4                           | b  | 0,4 | b  | 0,2 | b  | 38 | 7  | 1  | 1  | 1  | 0  |
| 30/04/2022 | 13        | 0,4  | a   | 0,0    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 3  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 03/05/2022 | 47        | 1,7  | a   | 0,0    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 4  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 27/05/2022 | 9         | 2,0  | a   | 0,0    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 21 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 28/05/2022 | 31        | 10,1 | a   | 0,3    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 33 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 05/06/2022 | 56        | 23,8 | a   | 6,5    | b   | 1,6 | bc  | 1,6                           | bc | 1,1 | c  | 0,7 | c  | 43 | 12 | 3  | 3  | 2  | 1  |
| 16/06/2022 | 31        | 10,8 | a   | 0,2    | b   | 0,1 | b   | 0,1                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 35 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 04/07/2022 | 5         | 0,7  | a   | 0,0    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 13 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 08/07/2022 | 42        | 22,7 | a   | 6,1    | b   | 0,9 | c   | 1,5                           | c  | 1,0 | c  | 1,1 | c  | 53 | 14 | 2  | 4  | 2  | 3  |
| 11/07/2022 | 27        | 9,4  | a   | 0,4    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,1 | b  | 35 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 14/07/2022 | 61        | 30,3 | a   | 6,0    | b   | 1,8 | b   | 1,9                           | b  | 1,4 | b  | 1,1 | b  | 50 | 10 | 3  | 3  | 2  | 2  |
| 16/07/2022 | 23        | 13,5 | a   | 3,0    | b   | 0,5 | c   | 0,5                           | c  | 0,5 | c  | 0,4 | c  | 60 | 13 | 2  | 2  | 2  | 2  |
| 22/07/2022 | 13        | 2,0  | a   | 0,0    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 15 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 28/07/2022 | 21        | 2,1  | a   | 0,1    | a   | 0,0 | a   | 0,0                           | a  | 0,0 | a  | 0,0 | a  | 10 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 03/08/2022 | 38        | 22,7 | 0,8 | 0,2    | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 59                            | 2  | 0   | 1  | 1   | 1  |    |    |    |    |    |    |
| 09/08/2022 | 15        | 2,3  | a   | 0,1    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 15 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 01/09/2022 | 35        | 22,7 | a   | 11,5   | b   | 6,2 | b   | 5,6                           | b  | 4,8 | b  | 3,6 | b  | 65 | 33 | 18 | 16 | 14 | 10 |
| 18/09/2022 | 26        | 1,0  | a   | 0,1    | a   | 0,0 | a   | 0,0                           | a  | 0,0 | a  | 0,0 | a  | 4  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 06/10/2022 | 23        | 10,6 | a   | 5,2    | b   | 1,8 | bc  | 1,1                           | c  | 1,1 | c  | 0,4 | c  | 46 | 23 | 8  | 5  | 5  | 2  |
| 26/10/2022 | 16        | 0,5  | a   | 0,1    | ab  | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 3  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 30/10/2022 | 23        | 0,2  | a   | 0,1    | a   | 0,0 | a   | 0,0                           | a  | 0,0 | a  | 0,0 | a  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 13/11/2022 | 21        | 0,1  | 0,1 | 0,0    | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0                             | 0  | 0   | 0  | 0   | 0  | 1  |    |    |    |    |    |
| 14/11/2022 | 12        | 5,7  | a   | 0,0    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,1 | b  | 46 | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 22/11/2022 | 9         | 0,1  | a   | 0,1    | a   | 0,0 | a   | 0,0                           | a  | 0,1 | a  | 0,0 | a  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  |
| 04/12/2022 | 29        | 14,5 | a   | 0,1    | b   | 0,2 | b   | 0,2                           | b  | 0,2 | b  | 0,3 | b  | 50 | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 23/12/2022 | 9         | 1,2  | a   | 0,0    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 13 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 28/12/2022 | 19        | 7,6  | a   | 0,1    | b   | 0,0 | b   | 0,0                           | b  | 0,0 | b  | 0,0 | b  | 39 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |

SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aaveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aaveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. Para cada evento, médias seguidas de letras distintas diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.

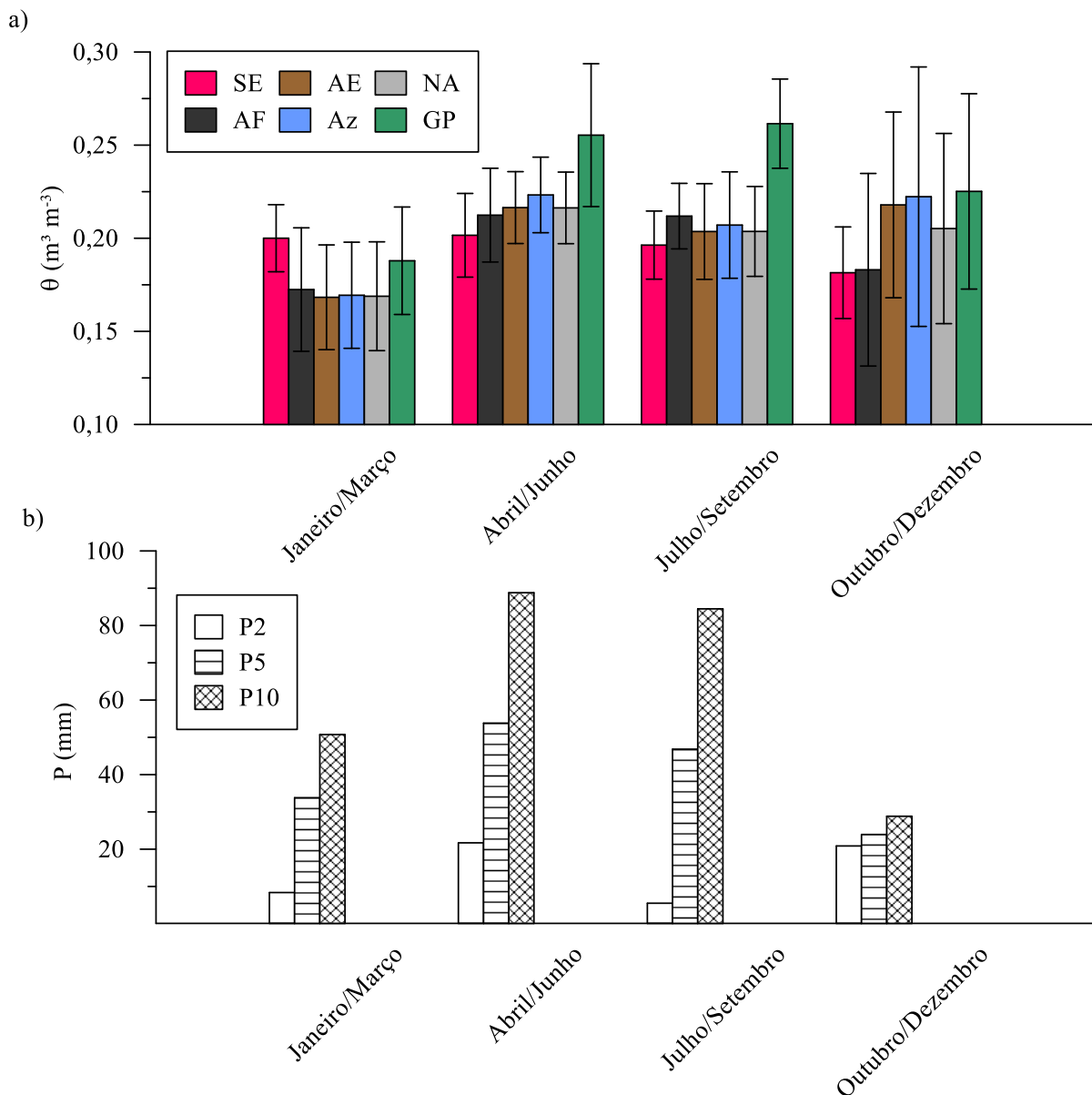
Figura 4 - a) Precipitação natural mensal (P) e respectivo escoamento superficial acumulado (R) em diferentes condições de cobertura do solo; b) coeficiente de escoamento mensal dos eventos de precipitação natural efetivos; c) precipitação e escoamento acumulados relativos para os eventos de precipitação natural.



SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. A razão entre acumulado e total (gráfico c) se refere à proporção da precipitação ou escoamento acumulados ao longo do ano para cada condição. Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 5 - a) Umidade média do solo na profundidade de 5 cm antecedente aos eventos de precipitação natural em diferentes épocas do ano e condições de cobertura do solo; b) precipitação natural e simulada média nos últimos dois, cinco e dez dias anteriores aos eventos de precipitação natural.



SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. P2: Precipitação natural e simulada nos últimos dois dias; P5: Precipitação natural e simulada nos últimos cinco dias; P10: Precipitação natural e simulada nos últimos dez dias. A barra de erros demonstra a variabilidade na umidade antecedente entre os eventos de precipitação para uma mesma época e condição de cobertura. Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.5.4 Atenuação do escoamento superficial pelas plantas

Da lâmina total de precipitação natural ocorrida no ano de monitoramento, 22% foi convertida em escoamento superficial no solo exposto. Considerando, no entanto, apenas a precipitação efetiva (1119 mm), o coeficiente de escoamento foi de 27% no solo exposto. A

presença de plantas de cobertura reduziu, em média, 93% a perda anual de água por escoamento superficial considerando os eventos naturais e em 63% considerando os eventos simulados (Tabelas 5, 6 e 7). Nos eventos simulados, as perdas de água em geral foram maiores e a capacidade das plantas em atenuar o escoamento menor (Tabelas 5 e 6). Diferença de até 35% na atenuação do escoamento superficial entre as espécies foi verificada (Tabela 7). Maior abstração da precipitação e menor escoamento superficial totais (Tabela 7), bem como maior tempo para empoçamento e maior abstração inicial (Figura 6), ocorreu no amendoim forrageiro, seguido das coberturas anuais por fim gramíneas permanentes.

Tabela 6 - Precipitação (P) e escoamento superficial (R) acumulados e coeficiente de escoamento superficial para eventos de precipitação simulada em solo com diferentes condições de cobertura.

| Data       | P (mm) | R (mm) |    |      |    |      |    |      |    |      |    | Coeficiente de escoamento (%) |    |    |    |    |    |    |    |
|------------|--------|--------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
|            |        | SE     | GP | NA   | Az | AE   | AF | SE   | GP | NA   | Az | AE                            | AF |    |    |    |    |    |    |
| 12/03/2022 | 144    | 19,0   | a  | 14,2 | ab | 2,0  | b  | 3,3  | b  | 2,5  | b  | 3,9                           | b  | 13 | 10 | 1  | 2  | 2  | 3  |
| 01/05/2022 | 165    | 76,0   | a  | 59,8 | ab | 38,6 | b  | 37,8 | b  | 41,2 | ab | 25,0                          | b  | 46 | 36 | 23 | 23 | 25 | 15 |
| 06/06/2022 | 188    | 90,2   | a  | 70,5 | ab | 35,1 | bc | 41,8 | bc | 33,7 | bc | 23,3                          | c  | 48 | 37 | 19 | 22 | 18 | 12 |
| 21/06/2022 | 132    | 71,9   | a  | 36,7 | b  | 11,0 | b  | 16,0 | b  | 12,2 | b  | 11,0                          | b  | 54 | 28 | 8  | 12 | 9  | 8  |
| 18/07/2022 | 148    | 71,1   | a  | 36,5 | b  | 24,5 | b  | 23,4 | b  | 20,1 | b  | 13,0                          | b  | 48 | 25 | 17 | 16 | 14 | 9  |
| 29/08/2022 | 202    | 95,1   | a  | 56,0 | ab | 54,1 | ab | 57,5 | ab | 40,4 | b  | 28,1                          | b  | 47 | 28 | 27 | 28 | 20 | 14 |
| 06/10/2022 | 157    | 45,3   | a  | 15,5 | b  | 5,6  | bc | 1,1  | c  | 2,0  | c  | 1,6                           | c  | 29 | 10 | 4  | 1  | 1  | 1  |
| 15/10/2022 | 68     | 25,3   | a  | 9,9  | b  | 2,9  | c  | 1,9  | c  | 1,4  | c  | 0,8                           | c  | 37 | 14 | 4  | 3  | 2  | 1  |
| 12/12/2022 | 99     | 22,6   | a  | 5,6  | b  | 6,6  | b  | 3,6  | b  | 2,2  | b  | 0,3                           | b  | 23 | 6  | 7  | 4  | 2  | 0  |
| 03/01/2023 | 128    | 40,0   | a  | 13,8 | b  | 8,8  | b  | 5,0  | b  | 2,5  | b  | 0,7                           | b  | 31 | 11 | 7  | 4  | 2  | 1  |
| 05/01/2023 | 121    | 47,7   | a  | 26,7 | b  | 19,6 | bc | 20,2 | bc | 12,9 | bc | 6,6                           | c  | 40 | 22 | 16 | 17 | 11 | 5  |
| 10/01/2023 | 238    | 125,7  | a  | 73,7 | b  | 66,0 | b  | 65,8 | b  | 51,9 | b  | 44,2                          | b  | 53 | 31 | 28 | 28 | 22 | 19 |

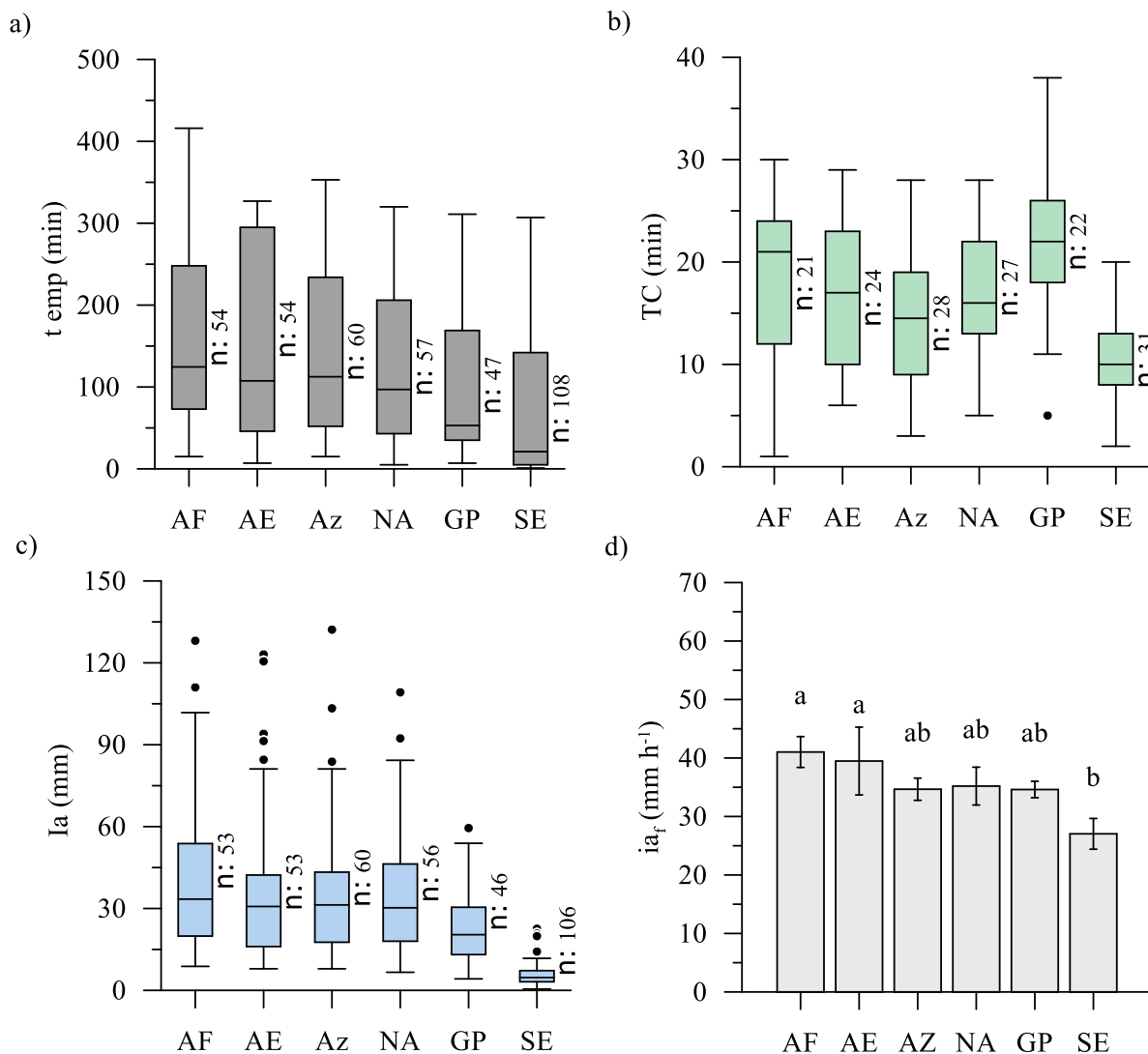
SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. Para cada evento, médias seguidas de letras distintas diferem pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Abstração (I) e escoamento superficial (R) acumulados de todos os eventos de precipitação natural e simulada ocorridos em solo com diferentes condições de cobertura.

| Trat | Precipitação natural (1420 mm) |        |          | Precipitação simulada (1791 mm) |        |          |
|------|--------------------------------|--------|----------|---------------------------------|--------|----------|
|      | I (mm)                         | R (mm) | CES (%)* | I (mm)                          | R (mm) | CES (%)* |
| SE   | 1113,8                         | 306,2  | -        | 1061,0                          | 730,0  | -        |
| GP   | 1372,5                         | 47,5   | 84       | 1372,0                          | 419,0  | 43       |
| NA   | 1405,2                         | 14,8   | 95       | 1516,3                          | 274,7  | 62       |
| AZ   | 1405,8                         | 14,2   | 95       | 1513,6                          | 277,4  | 62       |
| AE   | 1406,6                         | 13,4   | 96       | 1568,0                          | 223,0  | 69       |
| AF   | 1409,5                         | 10,5   | 97       | 1632,5                          | 158,5  | 78       |

\* CES: Controle do escoamento superficial em relação ao solo exposto. SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 - Tempo para empoçamento ( $t_{emp}$ ) (a), tempo de concentração (TC)(b), lâmina de abstração inicial ( $I_a$ ) (c) e taxa de infiltração aparente mínima ( $ia_f$ ) na parcela (para o evento mais extremo de precipitação simulada, 10/01/2023) (d) para condições de cobertura do solo.



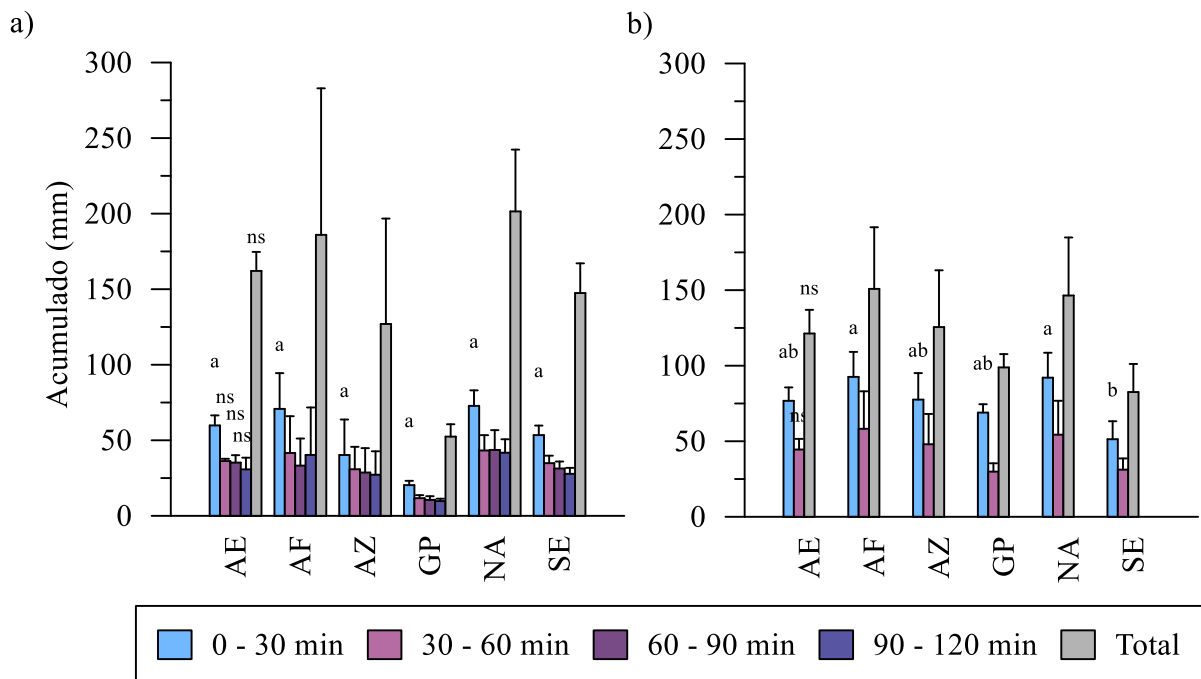
SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. A barra de erros no gráfico d representa o desvio padrão entre as parcelas de um mesmo tratamento. Médias seguidas por letras distintas do gráfico d diferem os tratamentos pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.5.5 Infiltração pontual

O solo exposto apresentou menor infiltração inicial (0-30 min) que solo coberto com amendoim forrageiro nos testes realizados com Cornell (Figura 7). Além disso, a taxa de infiltração estável determinada com Cornell no período de inverno foi menor nas gramíneas permanentes que em aveia/ervilhaca (Figura 8). Contudo, percebe-se de forma geral efeito relativamente pequeno das espécies de plantas nas variáveis da infiltração pontual (Figuras 7 e 8). Efeitos pontuais podem estar relacionados predominantemente com diferenças na umidade

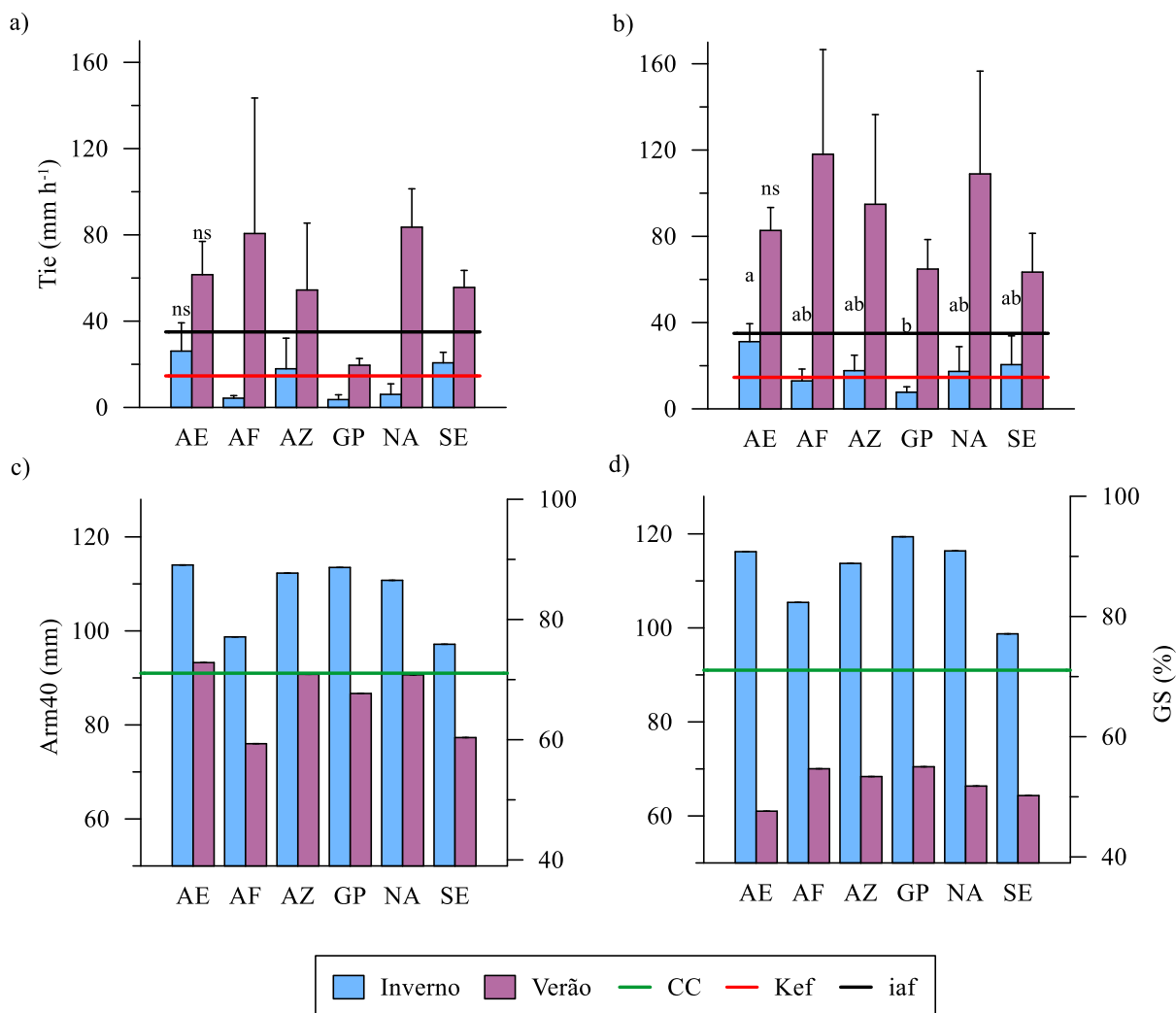
anterior aos testes de infiltração (Figura 8); houve correlação de  $-0,83$  entre umidade anterior e taxa de infiltração estável. Consequentemente, as diferenças entre os métodos e principalmente entre as épocas de medição também foram determinadas principalmente pela diferença na umidade anterior aos testes (Figura 8). Por exemplo, o expressivo aumento na infiltração do inverno para o verão coincidiu com um expressivo decréscimo na umidade anterior aos testes (Figura 8).

Figura 7 - Infiltração acumulada de água no solo em diferentes estágios de teste com duplo anel (a) e infiltrômetro de Cornell (b) em condições de cobertura do solo no verão de 2023.



SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. Para cada estágio da infiltração e método de avaliação, médias com letras distintas diferem os tratamentos pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 - Taxa de infiltração estável de água no solo medida com duplo anel concêntrico (a) e infiltrômetro de Cornell (b) em diferentes condições de cobertura do solo e épocas de medição (inverno e verão), e umidade do solo antecedente aos testes com duplo anel (c) e Cornell (d) nas diferentes condições de cobertura e épocas avaliadas.



SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; AZ: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. Para cada método e época de medição, médias com letras distintas diferem os tratamentos pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Arm40: Armazenamento na camada de 0-40 cm. GS: Grau de saturação do solo. CC: Capacidade de campo. Kef: Condutividade hidráulica vertical efetiva de perfil saturado determinada com equação de Darcy para N camadas. iaf: taxa de infiltração aparente mínima na parcela (média de todos os tratamentos), obtida nos 20 min finais da precipitação simulada de maior tempo de retorno (10/01/2023). Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.6 DISCUSSÃO

A manutenção da crosta superficial no solo exposto é central para explicar os resultados deste estudo. Além da baixa permeabilidade, a crosta apresenta baixa rugosidade (Tabela 8), o

que minimiza o armazenamento depressional na superfície do terreno (Tabela 8), diminui a resistência hidráulica à enxurrada (tempo de concentração expressivamente baixo, Figura 6) e aumenta a velocidade e continuidade do escoamento, o que corrobora com Carretta et al. (2021). Nas precipitações simuladas, o escoamento nesse tratamento inicia e tende a uma taxa máxima imediatamente após o início da precipitação, independentemente da umidade inicial do solo (Figura 9). Ao mesmo tempo, a lâmina de abstração inicial é baixa e apresenta baixa amplitude de valores entre os eventos (Figura 6). Além disso, a taxa de escoamento nessa condição é altamente sensível ao aumento na intensidade da chuva (Figuras 9 e 10), o que pode ser crítico para processos associados à enxurrada como erosão. Aproximadamente 50% dos valores de pico de enxurrada para eventos naturais no solo exposto estão entre 30 e 110 mm h<sup>-1</sup> (Figura 10). Nas parcelas com plantas, por outro lado, valores de até 35 mm h<sup>-1</sup> foram observados; valores acima de 15 mm h<sup>-1</sup> foram atípicos (Figura 10).

Tabela 8 - Rugosidade superficial aleatória e armazenamento depressional estimado em duas datas para solo sob diferentes condições de cobertura.

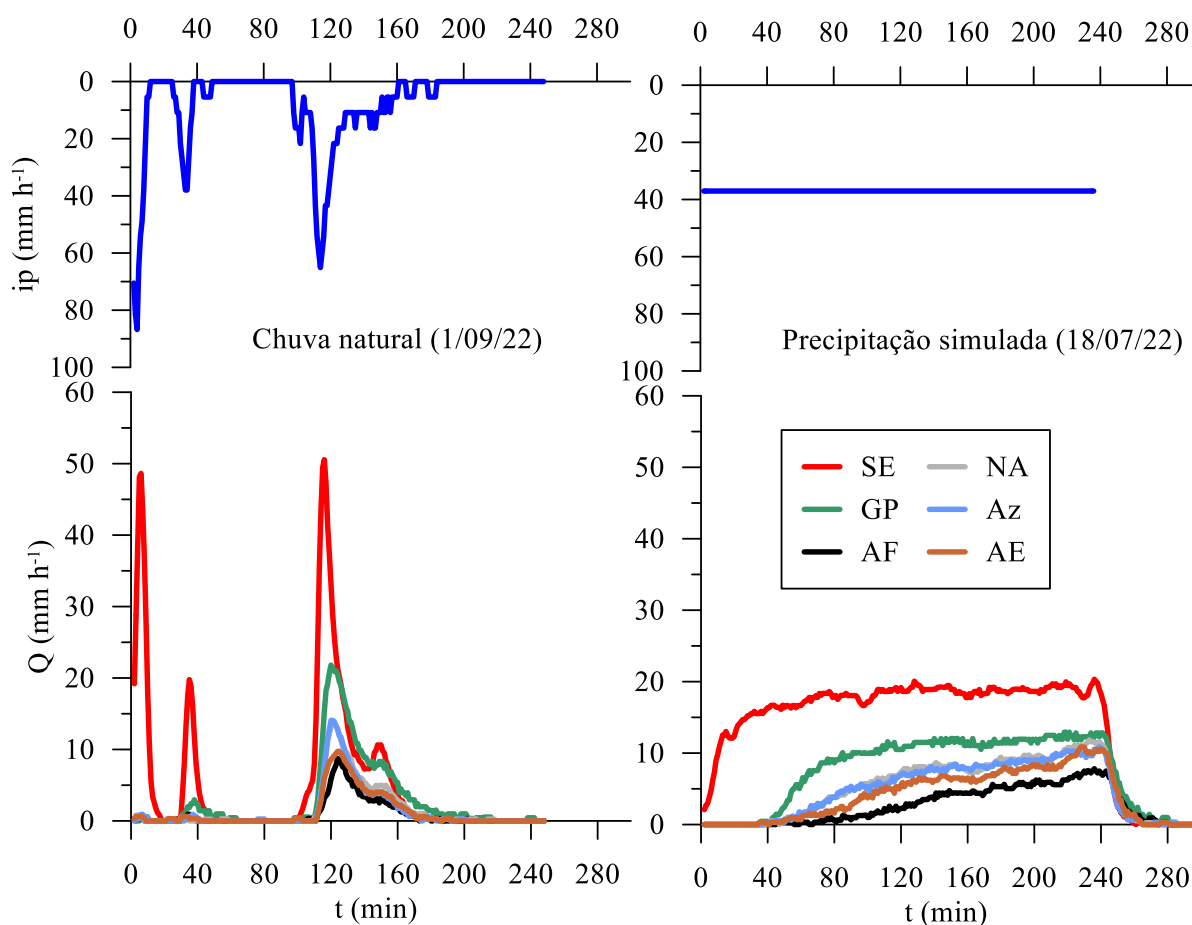
| Tratamento | Rugosidade superficial (mm) |    |            |    | Armazenamento depressional (mm) |    |            |    | D (%) |    |
|------------|-----------------------------|----|------------|----|---------------------------------|----|------------|----|-------|----|
|            | 26/04/2022                  |    | 11/11/2022 |    | 26/04/2022                      |    | 11/11/2022 |    |       |    |
| SE         | 4,2                         | b  | 4,3        | b  | 0,3                             | b  | 0,2        | ns | 6,3   | ns |
| AF         | 8,9                         | a  | 7,5        | ab | 0,6                             | ab | 0,5        |    | 6,3   |    |
| Az         | 8,3                         | ab | 6,9        | ab | 0,6                             | ab | 0,4        |    | 5,9   |    |
| NA         | 10,3                        | a  | 8,9        | a  | 0,8                             | a  | 0,6        |    | 5,8   |    |
| AE         | 11,6                        | a  | 7,2        | ab | 0,8                             | a  | 0,4        |    | 6,0   |    |
| GP         | 9,5                         | a  | 7,7        | ab | 0,7                             | a  | 0,5        |    | 5,6   |    |

SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. D: Declividade média da parcela. Para cada variável, médias seguidas de letras distintas, na coluna, diferem os tratamentos pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.

A crosta geralmente era desfeita nos experimentos de erosão hídrica pluvial para potencializar as perdas de solo (VEIGA; WILDNER, 1993), possivelmente porque apresenta elevada resistência à desagregação pela chuva e enxurrada. Neste trabalho, a mesma foi mantida para potencializar as perdas de água. Logo, a grande atenuação do escoamento superficial pela inserção de plantas, ocorreu porque a cobertura vegetal, por plantas e resíduos, melhora a estrutura do solo, dissipa a energia a cinética da chuva e enxurrada, controla a formação e extensão da crosta e dissipa o escoamento superficial (ALMEIDA et al., 2018; BERTOL et al., 2015; HUANG; WU; ZHAO, 2013; PANACHUKI et al., 2011; RAO et al., 1998; REPULLO-RUIBÉRRIZ DE TORRES et al., 2018; SANTOS et al., 2014). Na presença de plantas há maior tempo para empoçamento e aumento mais gradual na taxa de enxurrada decorrentes do aumento

da interceptação, da retenção superficial e principalmente da infiltração de água no solo pelas espécies (Figura 9), o que corrobora com Bertol et al. (2008). Além disso, a presença de plantas reduziu o número de eventos nos quais escoamento superficial ocorre e aumentou a amplitude dos valores da abstração inicial (Figura 6); há maior sensibilidade das variáveis hidrológicas às condições antecedentes (como umidade) nos tratamentos com plantas.

Figura 9 - Hietogramas e hidrogramas (média móvel de 5 min) obtidos para eventos de precipitação natural e simulada em escala de parcela para diferentes condições de cobertura do solo.

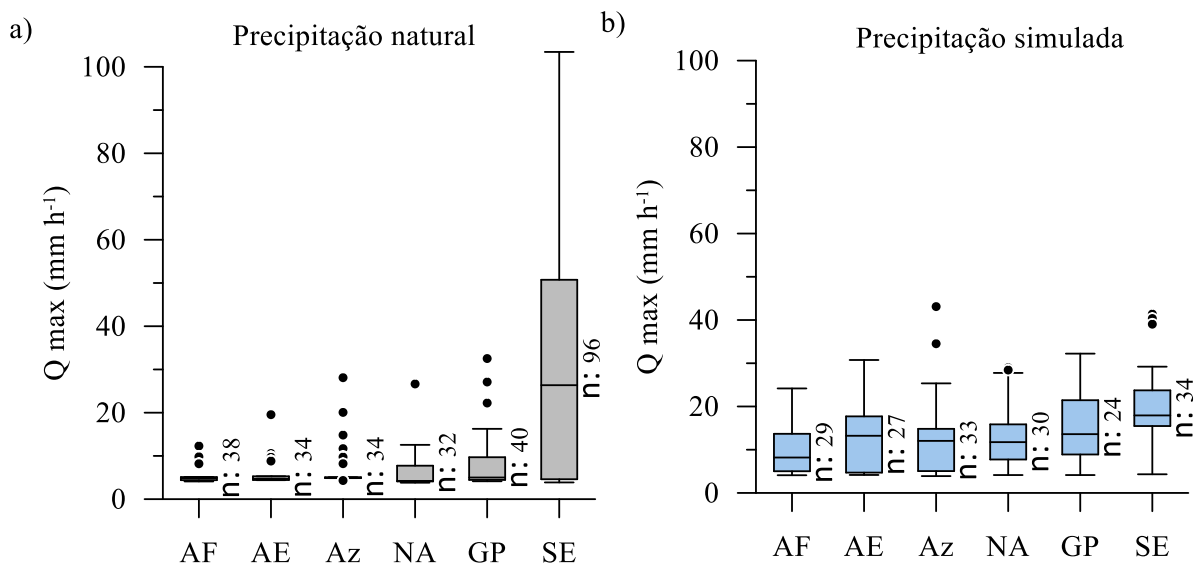


SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. Q é a perda de água por escoamento superficial; ip é a precipitação. Fonte: Elaborado pelo autor.

A biomassa média sobre o solo foi o principal fator que determinou a perda anual de água por escoamento superficial nos tratamentos considerados, independentemente do tipo de precipitação (natural ou simulada) (Figura 11). Nesse sentido, verifica-se que uma biomassa de  $5,4 \text{ Mg ha}^{-1}$  foi necessária para haver eficiência de 90% no controle do escoamento superficial pelas plantas em relação ao solo exposto (considerando eventos naturais) (Figura 11). Outros autores (RANAIVOSON et al., 2017) estimaram que, em média, para diferentes condições de

solo e clima, há necessidade mínima de 2 a 3 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos para haver a mesma eficiência (90%) no controle do escoamento superficial. Para condições tropicais, porém, uma quantidade mínima de 4 a 6 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos foi necessária para controlar de forma importante o escoamento superficial, especialmente em cultivos anuais (MERTEN et al., 2015; SANTOS et al., 2014), o que corrobora com os resultados deste estudo. No entanto, a originalidade deste trabalho é demonstrar uma quantidade crítica de biomassa de plantas ao invés de resíduos para controlar de forma expressiva o escoamento superficial (Figura 11).

Figura 10 - Taxa de escoamento máximo em 1 min (Q max) para eventos de precipitação natural (a) e simulada (b) em diferentes condições de cobertura do solo.



SE: Solo exposto com manutenção de crosta superficial; AE: Aveia e ervilhaca no inverno e feijão no verão; NA: Aveia e nabo no inverno e feijão no verão; Az: azevém no inverno e feijão no verão; AF: amendoim forrageiro; GP: Gramíneas permanentes. Fonte: Elaborado pelo autor.

A consolidação dos sistemas de cultivo possivelmente contribuiu para a expressiva redução do escoamento superficial pelas plantas neste estudo; houve tempo suficientemente grande para diluição dos efeitos negativos residuais do preparo convencional na hidrologia do solo, conforme discutido por autores (LANZANOVA et al., 2013; WOLSCHICK et al., 2021). Além disso, houve biomassa relativamente alta durante todo o período do ano (Figura 3), o que é central para minimizar a possibilidade de perdas expressivas de água em períodos críticos (ex. estabelecimento das culturas), especialmente nas espécies anuais (LIMA et al., 2018; SASAL; CASTIGLIONI; WILSON, 2010), em que há maior oscilação sazonal na biomassa (Figura 3). Poucos eventos contribuem para a grande parte do escoamento superficial anual (Figura 4, Tabela 5), especialmente se coincidirem com condições desfavoráveis à infiltração, como umidade inicial elevada e baixa biomassa sobre o solo.



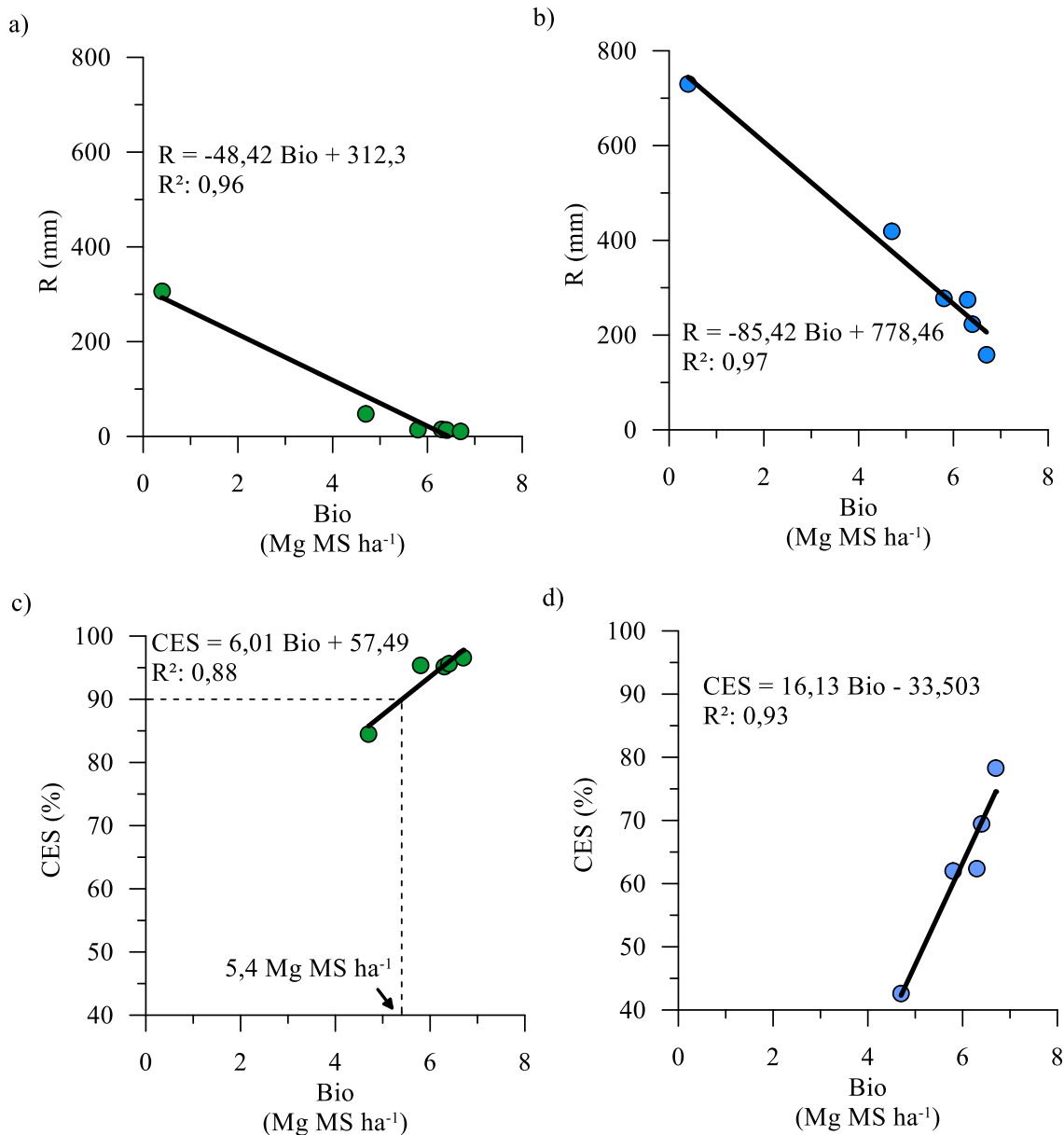
Em experimento paralelo e similar ao deste estudo, sob mesmo tipo de solo e declividade, porém em parcelas 3 x 22 m, Lanzasova et al. (2013) verificaram que de 1992 a 2008, o coeficiente de escoamento anual variou de 14 a 56% no solo exposto (com escarificação periódica da crosta), 0,4 a 16% no campo nativo, 0,2 a 17% no sistema com pousio invernal e soja ou milho no verão e de 0,4 a 3% em sistemas mais conservacionistas (consórcio de milho e mucuna no verão ou com cobertura no período invernal). Em geral, segundo os autores, a utilização de coberturas anuais diminuiu o escoamento superficial em até 97%, magnitude similar à que observamos no amendoim. As perdas absolutas de água neste estudo, porém, foram pouco menores, provavelmente em decorrência do fenômeno “La Niña” (três anos em sequência, Figura 3). Esse fenômeno influencia os padrões de umidade do solo, as características dos eventos de precipitação e o escoamento superficial decorrente (AMADO; PROCHNOW; ELTZ, 2002). No estudo de Lanzasova et al. (2013) provavelmente houve melhor amostragem dos diferentes padrões anuais de chuva; o escoamento superficial, conseqüentemente, foi maior. Um único evento crítico de “El Niño” pode representar escoamento superficial equivalente a um ano completo de “La Niña”, segundo Amado et al. (2002).

Em outro estudo, realizado sob Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico na região de Lavras/MG (Brasil), Lima et al. (2018) verificaram atenuação de apenas 40 a 71% no escoamento superficial em relação ao solo exposto (com manutenção de crosta) ao utilizar um consórcio de milho com feijão de porco (parcelas de 4 x 12 m). A magnitude de atenuação do escoamento superficial foi menor que neste estudo, talvez por influência do tipo de solo e demais condições hidrológicas intrínsecas locais. Latossolos, em geral, apresentam maior infiltração e conseqüentemente menor suscetibilidade ao escoamento superficial que Argissolos (SARTORI; LOMBARDI NETO; GENOVEZ, 2005b, 2005a). Logo, a eficiência de plantas na atenuação do escoamento superficial em Latossolos é possivelmente menor que em Argissolos. É bem reportado que em solos mais frágeis estruturalmente a eficiência relativa da cobertura em atenuar escoamento é maior (MHAZO; CHIVENGE; CHAPLOT, 2016).

A taxa de infiltração aparente tendeu a valores semelhantes entre as condições de manejo ao final da precipitação de maior intensidade e maior tempo de retorno (10/01/2023) (Figura 6 d). Além disso, se observa que a taxa máxima de enxurrada nas precipitações simuladas tendeu a valores semelhantes entre os tratamentos com plantas (Figura 10b). Isso indica que a eficiência das coberturas em atenuar o escoamento superficial diminui conforme as chuvas se tornam mais críticas em lâmina, especialmente se coincidirem com o período do inverno, em que o solo permanece mais úmido por mais tempo e a infiltração é possivelmente regulada

predominantemente por características de horizontes subsuperficiais. Por outro lado, percebe-se que os eventos simulados, que em geral foram mais críticos em intensidade/duração/frequência que os eventos naturais, exploraram melhor as diferenças entre as espécies na atenuação do escoamento. Por exemplo, o coeficiente angular (em módulo) da relação entre biomassa de plantas e escoamento superficial foi maior nos eventos simulados (Figura 11). Ao mesmo tempo, os resultados demonstram que plantas são insuficientes para controlar completamente o escoamento superficial em áreas consolidadas de cultivo conservacionista (Tabela 7), o que corrobora com demais autores (BERTOL et al., 2008; DEUSCHLE et al., 2019; KOPPE et al., 2022; LONDERO et al., 2021; MERTEN et al., 2015).

Figura 11 - Relação entre biomassa média anual de plantas sobre o solo (Bio) e escoamento superficial anual total para eventos de precipitação natural (a) e simulada (b), e relação entre Bio e controle do escoamento superficial anual (%) em relação ao solo exposto para eventos de chuva natural (c) simulada (d).



MS: Massa seca. Fonte: Elaborado pelo autor.

Gramíneas permanentes apresentaram maior resistência hidráulica à enxurrada (indicada pelo elevado tempo de concentração, Figura 6) que as demais espécies, o que provavelmente decorre da rota irregular do escoamento entre touceiras nesse tratamento. A rugosidade superficial, por outro lado, foi semelhante entre os tratamentos com plantas (Tabela 8). Alguns autores demonstram que para pastagem natural - condição semelhante a de gramíneas permanentes deste estudo - as perdas anuais de água são maiores que em cultivos anuais devido à menor macroporosidade e maior proporção de poros no solo ocupados por raízes (BERTOL et al., 2004; LANZANOVA et al., 2010). Neste estudo, também observa-se

elevada biomassa de raízes em gramíneas permanentes (Tabela 4) que poderiam obstruir os poros. Contudo, o maior escoamento superficial nesse tratamento é provavelmente explicado pela influência das plantas na umidade do solo; talvez devido à baixa evapotranspiração, especialmente nas épocas mais frias do ano e com formação de geadas, a umidade se manteve mais elevada que nas demais espécies (Figura 5). Aumento na umidade diminui o gradiente hidráulico e conseqüentemente diminui a infiltração e aumenta o escoamento superficial (CUI et al., 2019; LIU et al., 2019; WEI et al., 2022; YANG; ZHANG; PAN, 2020). Logo, as mudanças nos padrões de umidade do solo pelas gramíneas permanentes parece determinar a diferença no comportamento hidrológico em relação às demais espécies. Por outro lado, a menor biomassa sobre o solo nesse tratamento ajuda a explicar os resultados. Além disso, talvez os resíduos acomodados periodicamente sobre o solo com as operações de roçagem apresentam algum grau de hidrofobicidade que limita a infiltração.

A grande atenuação do escoamento superficial no amendoim forrageiro provavelmente integraliza efeitos positivos em diferentes escalas. Além de apresentar o maior aporte de biomassa abaixo e acima do nível do solo, amendoim forrageiro apresentou tempo de concentração elevado e semelhante ao de gramíneas permanentes (Figura 6). Possivelmente, isso decorre da densa camada de estolões desacelerando a enxurrada e talvez distribuindo a lâmina de água empoçada mais uniformemente sobre a superfície do solo que nas espécies anuais. Outro efeito central é a diminuição da umidade do solo nessa condição (Figura 5), especialmente em relação a gramíneas permanentes e para o período do verão (Figura 5), o que possivelmente contribui para o aumento da abstração da chuva. Há indicativos, porém, de algum efeito positivo adicional da espécie na hidrologia da parcela. Por exemplo, o efeito de diminuição da umidade predomina no verão (Figura 5), mas o amendoim forrageiro apresenta menor escoamento que as demais espécies durante todos os períodos do ano (Tabelas 5 e 6; Figura 4). Hipoteticamente, a elevada biomassa de raízes (Tabela 4) aumenta a taxa e a variabilidade espacial da infiltração pontual. Autores (ARMAND et al., 2009; LEYS et al., 2010) tem ressaltado que a variabilidade espacial da infiltração na encosta tem um papel na atenuação do escoamento superficial em sistemas conservacionistas. Talvez há pontos de alta taxa de infiltração que atuam como “gargalos” do escoamento superficial no amendoim forrageiro. Isso corrobora com outros estudos (TUAN et al., 2014) sobre a expressiva capacidade do amendoim forrageiro em controlar escoamento superficial.

Embora o efeito expressivo das plantas na atenuação do escoamento superficial na escala da parcela, o efeito das plantas nas variáveis da infiltração pontual (infiltração acumulada em diferentes estágios; taxa de infiltração estável) foi relativamente pequeno (Figuras 7 e 8).

Logo, assumindo-se que o número de testes pontuais foi suficientemente grande para representar adequadamente a variabilidade espacial da infiltração, a infiltração aparente na parcela integraliza mais processos ou fatores e conseqüentemente é mais sensível às condições de cobertura que a infiltração pontual medida com infiltrômetros. Isso corrobora com demais autores de que o comportamento hidrológico em escala de parcela depende mais de características da superfície, como biomassa e rugosidade (REPULLO-RUIBÉRRIZ DE TORRES et al., 2018; SASAL; CASTIGLIONI; WILSON, 2010), do que de propriedades do solo medidas no ponto. Provavelmente, a medição pontual da infiltração com infiltrômetros não expressa devidamente a dissipação do escoamento superficial pela cobertura. Por outro lado, era esperado que a medição pontual da infiltração sob umidade antecedente relativamente baixa (verão) pudesse diferenciar melhor as espécies comparativamente a medição sob solo quase saturado (inverno). Possivelmente, a grande variabilidade espacial da infiltração pontual (Figuras 7 e 8) confundiu e mascarou o efeito das espécies de cobertura, bem como diminuiu a sensibilidade das análises de variância e testes de comparação de médias.

Embora o efeito da escala na infiltração, era esperado uma maior limitação da infiltração pontual pela presença da crosta no solo exposto. Possivelmente, ocorreu alguma desagregação da crosta nas paredes dos anéis que ocasionou fluxo preferencial (ZHANG; LI, 2020). Paralelamente, a menor umidade antecedente aos testes nesse tratamento pode ter compensado a menor permeabilidade na infiltração (Figuras 7 e 8). Por outro lado, para o mesmo tipo de solo e em experimento paralelo, autores (LANZANOVA et al., 2010) verificaram elevada redução da infiltração pontual medida com duplo anel pela presença da crosta superficial, talvez por ter ocorrido menor desagregação do solo em contato com os anéis do que neste estudo ou por menor diferença na umidade antecedente entre os tratamentos.

A determinação da infiltração em diferentes escalas é uma das originalidades deste trabalho e tem implicações relevantes. Por exemplo, a taxa de infiltração estável determinada sob solo quase saturado foi numericamente semelhante à condutividade hidráulica efetiva de perfil saturado ( $K_{ef}$ ), enquanto a determinada sob umidade antecedente abaixo da capacidade de campo cerca 3 a 4 vezes maior que a  $K_{ef}$ . Contudo, chama a atenção que a taxa de infiltração mínima aparente na parcela foi cerca de 2 vezes maior que a taxa de infiltração estável medida sob solo quase saturado e que a  $K_{ef}$ . Possivelmente, isso reflete a contribuição do processo de dissipação do escoamento para a infiltração. Paralelamente, isso sugere que faz mais sentido fisicamente relacionar infiltração pontual com condutividade hidráulica efetiva do que com infiltração aparente. Resultados semelhantes foram verificados por Koppe et al. (2022); relacionaram dados de infiltração pontual medidos com duplo anel sob umidade antecedente na

capacidade de campo com infiltração mínima aparente na encosta (5000 a ~24000 m<sup>2</sup>), para área de plantio direto, em Nitossolo. Em outro estudo, Rao et al. (1998) verificaram que em solo franco argilo arenoso (Alfisol), na Índia, a taxa de infiltração medida com duplo anel e infiltrômetro de discos foi cerca de 5 a 6 vezes maior que a observada na parcela. Porém, a umidade antecedente na qual os testes com infiltrômetros foram realizados não foi apresentada nesse estudo.

## 5.7 CONCLUSÕES

Plantas de cobertura e/ou adubação verde apresentam expressiva capacidade (até 97%) em atenuar o escoamento superficial. Os benefícios são mais evidentes em solo coberto com amendoim forrageiro que por cultivos anuais ou gramíneas permanentes.

Na medida que as chuvas se tornam mais críticas em intensidade/duração/frequência, a capacidade das plantas de cobertura em atenuar escoamento diminui. Porém, eventos extremos diferenciam melhor as espécies quanto à capacidade de controlar escoamento superficial.

O período do inverno diminui o efeito das plantas na atenuação do escoamento superficial, portanto requer atenção especial no planejamento conservacionista de água e solo.

A medição da infiltração e do escoamento superficial na escala da parcela diferencia melhor as espécies de cobertura quanto à capacidade em aumentar a infiltração de água no solo que a medição na escala pontual (com infiltrômetros).

A taxa de infiltração mínima aparente na parcela é uma característica do Argissolo, pois é pouco influenciada pelas espécies de cobertura.

Em sistemas consolidados de cultivo conservacionista com inserção de espécies leguminosas anuais no verão (feijão), há uma ampla diversidade de espécies ou consórcios de cobertura e adubação verde de inverno (aveia/nabo; aveia/ervilhaca; azevém) que garantem expressiva atenuação do escoamento superficial pelo sistema.

Plantas de cobertura e adubação verde foram importantes, mas insuficientes para controlar o escoamento superficial.

A biomassa de plantas sobre o solo foi a principal variável que explicou a diferenciação das espécies no controle do escoamento superficial. Nesse sentido, conclui-se que é necessária uma biomassa média anual de plantas sobre o solo pelo menos 5,4 Mg ha<sup>-1</sup> para haver controle de 90% do escoamento superficial anual.

## REFERÊNCIAS

- ADETUNJI, A. T. et al. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 204, n. June, p. 104717, 2020.
- ALMEIDA, W. S. et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. September 2017, p. 130–138, 2018.
- AMADO, T. J. C.; PROCHNOW, D.; ELTZ, F. L. F. Perdas de solo e água em períodos de anomalias climáticas: “El Niño” e “La Niña” no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 819–827, 2002.
- ANACHE, J. A. A. et al. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. **Catena**, v. 152, p. 29–39, 2017.
- ARMAND, R. et al. Runoff generation related to intra-field soil surface characteristics variability. Application to conservation tillage context. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 1, p. 27–37, 2009.
- BAETS, S. DE et al. Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion: application to a Mediterranean ecosystem. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, n. March, p. 613–628, 2009.
- BARBOSA, F. T. et al. Critical slope length for water erosion for three crop residue types and rates in two sowing directions in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1279–1290, 2012.
- BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 155–163, 2004.
- BERTOL, I. et al. Escoamento superficial em diferentes sistemas de manejo em um Nitossolo Háplico típico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 243–250, 2008.
- BERTOL, I. et al. Erosão hídrica em campo nativo sob diversos manejos: Perdas de água e solo e de fósforo, potássio e amônio na água de enxurrada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1421–1430, 2011.
- BERTOL, I. et al. Water infiltration in two cultivated soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 583–588, 2015.
- BERTOL, I.; BERTOL, C.; BARBOSA, F. T. Simulador de chuva tipo empuxo com braços movidos hidráulicamente: Fabricação e calibração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1905–1910, 2012.
- BOUWER, H. Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. v. 9p. 825–844.
- CARRETTA, L. et al. Evaluation of runoff and soil erosion under conventional tillage and no-till management: A case study in northeast Italy. **Catena**, v. 197, n. 104972, 2021.
- CQFS. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. [s.l.] Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016.

- CUI, Z. et al. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils. **Journal of Hydrology**, v. 578, p. 124023, 2019.
- DEUSCHLE, D. et al. Erosion and hydrological response in no-tillage subjected to crop rotation intensification in southern Brazil. **Geoderma**, v. 340, p. 157–163, 2019.
- E ÁVILA, A. C. DE M.; ALBUQUERQUE, J. A.; CAMPOS, C. G. C. Climate change and its effect on the soil water balance of Lages, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 6, p. 2796–2809, 2022.
- ES, H. VAN; SCHINDELBECK, R. Field Procedures and Data Analysis for the Cornell Sprinkle Infiltrometer. In: [s.l.] Cornell University. College of Agriculture and Life Sciences. Department of Crop and Soil Sciences Research Series R03-01, 2003.
- FAO. Conservation Agriculture. **Plant Production and Protection Division**, p. 2–3, 2022.
- FILHO, O. F. DE L. et al. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil**. Brasília: Embrapa, 2023. v. 1
- FUENTES-LLANILLO, R. et al. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 208, n. June 2020, p. 104877, 2021.
- GILLER, K. E. et al. Beyond conservation agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. OCTOBER, 2015.
- HARUNA, S. I. et al. In situ infiltration as influenced by cover crop and tillage management. **Soil and Water Conservation Society**, v. 73, n. 2, p. 164–172, 2018.
- HUANG, J.; WU, P.; ZHAO, X. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. **Catena**, v. 104, p. 93–102, 2013.
- IPCC. Synthesis Report of the Ipcc Sixth Assessment Report (Ar6). n. 2, p. 85, 2023.
- KAMPHORST, E. C. et al. Predicting depression storage from soil surface roughness. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 5, p. 1749–1758, 2000.
- KINNELL, P. I. A. A review of the design and operation of runoff and soil loss plots. **Catena**, v. 145, p. 257–265, 2016.
- KOPPE, E. et al. Soil water infiltration evaluation from punctual to hillslope scales. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 4, 2022.
- LANGHANS, C. et al. Scale effects of runoff generation under reduced and conventional tillage. **Catena**, v. 176, n. December 2018, p. 1–13, 2019.
- LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos de um Argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1333–1342, 2010.
- LANZANOVA, M. E. et al. Residual effect of soil tillage on water erosion from a Typic Paleudalf under long-term no-tillage and cropping systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1689–1698, 2013.
- LEYS, A. et al. Scale effects on runoff and erosion losses from arable land under conservation and conventional tillage: The role of residue cover. **Journal of Hydrology**, v. 390, n. 3–4, p. 143–154, 2010.



- LIMA, P. L. T. et al. Relationship among crop systems, soil cover, and water erosion on a typic Hapludox. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 42, p. 1–16, 2018.
- LIU, Y. et al. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. **Catena**, v. 182, n. January 2018, 2019.
- LONDERO, A. L. et al. Quantifying the impact of no-till on runoff in southern Brazil at hillslope and catchment scales. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 3, p. 1–15, 2021.
- MERTEN, G. H. et al. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 152, p. 85–93, 2015.
- MHAZO, N.; CHIVENGE, P.; CHAPLOT, V. Tillage impact on soil erosion by water: Discrepancies due to climate and soil characteristics. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 230, p. 231–241, 2016.
- OGDEN, C. B.; VAN ES, H. M.; SHINDELBECK, R. Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 61, p. 1041–1043, 1997.
- ONSTAD, C. A. Depressional storage on tilled soil surfaces. **Transactions - American Society of Agricultural Engineers**, v. 27, n. 3, p. 729–732, 1984.
- PANACHUKI, E. et al. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, n. 1, p. 1777–1785, 2011.
- PEDRON, F. DE A. et al. Clay mineralogy of subtropical soils under long-term organic fertilization in no-tillage systems. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 42, p. 1–14, 2018.
- RANAIVOSON, L. et al. Agro-ecological functions of crop residues under conservation agriculture. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 37, n. 4, 2017.
- RAO, K. P. C. et al. Rainfall infiltration and runoff from an Alfisol in semi-arid tropical India. II. Tilled systems. **Soil and Tillage Research**, v. 48, n. 1–2, p. 61–69, 1998.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1931–1935, 2006.
- RENARD, K. G. et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service**, v. 703, 1996.
- REPULLO-RUIBÉRRIZ DE TORRES, M. A. et al. Efficiency of four different seeded plants and native vegetation as cover crops in the control of soil and carbon losses by water erosion in olive orchards. **Land Degradation and Development**, v. 29, n. 8, p. 2278–2290, 2018.
- ROMAN, C. A. **Controle da drenagem na fonte e sua compatibilização ao plano municipal de saneamento ambiental de Santa Maria**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2015.
- SADEGHI, S. H. R.; SEGHALEH, M. B.; RANGAVAR, A. S. Plot sizes dependency of runoff and sediment yield estimates from a small watershed. **Catena**, v. 102, p. 55–61, 2013.
- SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.
- SANTOS, M. A. DO N. DOS et al. Water infiltration in an Ultisol after cultivation of

common Bean. **Bras. Ci. Solo**, v. 38, n. 1, p. 1612–1620, 2014.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005a.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19–29, 2005b.

SASAL, M. C.; CASTIGLIONI, M. G.; WILSON, M. G. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 108, n. 1–2, p. 24–29, 2010.

SCOPEL, E. et al. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 1, p. 113–130, 2013.

SERATTO, C. D. et al. **Infiltrômetro de aspersão de Cornell aperfeiçoado: aspectos construtivos, operacionais e de manutenção**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2019. v. 1

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy - Soil Survey Staff, twelfth edition**. Washington D.C: US Department of Agriculture, 2014.

SWANSON, N. P. Rotating-Boom Rainfall Simulator. **Am. Soc. Agric. Eng.**, 1965.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2017.

TUAN, V. D. et al. Mitigation potential of soil conservation in maize cropping on steep slopes. **Field Crops Research**, v. 156, p. 91–102, 2014.

VALENTIM, J. F.; CARNEIRO, J. C. DA; SALES, M. F. L. Amendoim forrageiro cv. Belmonte: Leguminosa para a diversificação das pastagens e conservação do solo no Acre (In Portuguese). **Circular Técnica 43 (Embrapa)**, p. 18, 2001.

VEIGA, M.; WILDNER, L. P. Manual para la instalacion y conduccion de experimentos de perdida de suelos. **EPAGRI/FAO**, n. December 1993, p. 34, 1993.

WEI, L. et al. Experimental Investigation of Relationship between Infiltration Rate and Soil Moisture under Rainfall Conditions. **Water (Switzerland)**, v. 14, n. 9, 2022.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses - a guide to conservation planning. **U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service**, n. 537, 1978.

WOLSCHICK, N. H. et al. Remaining effect of long-term soil tillage on plant biomass yield and water erosion in a Cambisol after transition to no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 213, n. August 2020, 2021.

YANG, M.; ZHANG, Y.; PAN, X. Improving the Horton infiltration equation by considering soil moisture variation. **Journal of Hydrology**, v. 586, n. January, p. 124864, 2020.

ZHANG, J.; LI, S. Surface-positioned double-ring to improve traditional infiltrometer for

measuring soil infiltration. **Soil Research**, v. 58, n. 3, p. 314–321, 2020.

## 6 CAPÍTULO III. RELAÇÕES DA UMIDADE ANTECEDENTE DO SOLO COM TAXA DE INFILTRAÇÃO ESTÁVEL MEDIDA COM INFILTRÔMETROS

### 6.1 RESUMO

Embora a importância hidrológica da infiltração de água no solo, não é devidamente compreendida a relação experimental da umidade antecedente com a taxa de infiltração estável (Tie) obtida com infiltrômetros. Para estudar isso, conduzimos um experimento no sul do Brasil, sob um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto, para explorar as relações da Tie medida com infiltrômetros com a umidade antecedente, com a permeabilidade das camadas superficiais, com o método de medição e com o tempo de medição. A infiltração foi avaliada em até 14 condições de umidade antecedente, em duas condições de solo (plântio direto e plântio direto com subsolagem), com dois métodos de medição (duplo anel e Cornell) e por tempo de até 48 h, utilizando 10 repetições. A Tie depende da umidade antecedente, da permeabilidade das camadas superficiais, do método de medição e sofre pouco efeito da ampliação do tempo de medição ( $> 2$  h). A Tie foi três vezes maior no tratamento com subsolagem comparativamente ao plântio direto e duas vezes maior quando determinada com Cornell comparativamente ao duplo anel. Os efeitos do método e da permeabilidade superficial, contudo, diminuíram com o aumento da umidade antecedente. Sob perfil de solo inicialmente saturado ou quase saturado, a Tie tendeu a valores mínimos e semelhantes entre os dois manejos e iguais numericamente à condutividade hidráulica vertical efetiva de perfil saturado, especialmente quando avaliada com duplo anel concêntrico. Concluímos que em solo estratificado quanto à permeabilidade é necessário perfil de solo inicialmente saturado ou quase saturado para caracterizar adequadamente a infiltração vertical com infiltrômetros. Não havendo essa condição, o fluxo de água em solo saturado e em única direção é melhor expressado pela condutividade hidráulica vertical efetiva para perfil saturado determinada com equação de Darcy. Além disso, o método do duplo anel é mais apropriado que Cornell para determinar infiltração vertical, especialmente se a permeabilidade da superfície do solo for suficientemente alta.

**Palavras-chave:** escoamento superficial; conservação do solo; terraços; fluxo lateral.

## 6.2 ABSTRACT

Despite the hydrological importance of water infiltration into the soil, the experimental relationship between antecedent moisture and steady state infiltration rate (Tie) obtained with infiltrometers is not properly understood. To study this, we conducted an experiment in southern Brazil, under an Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico (Ultisol), to explore the relationships of Tie measured with infiltrometers with the antecedent soil moisture, with the permeability of the surface layers, with the measurement method and with the measurement time. Infiltration was evaluated in up to 14 conditions of antecedent moisture, in two soil conditions (no-till and no-till with soil chiseling), with two measurement methods (double ring and Cornell) and for a time of up to 48 h, using 10 repetitions. Tie depends on the antecedent soil moisture, the permeability of the surface layers, the measurement method and suffers low effect from the extension of the measurement time ( $> 2$  h). Tie was three times higher in the chiseling treatment compared to no till and twice higher when determined with Cornell compared to the double ring. The effects of the method and surface permeability, however, decreased with increasing antecedent moisture. Under an initially saturated or near saturated soil profile, Tie tended to reach minimum and similar values between the two managements and numerically equal to the effective vertical hydraulic conductivity of a saturated profile, especially when evaluated with double ring infiltrometer. We conclude that in soil stratified in terms of permeability, an initially saturated or near saturated soil profile is necessary to adequately characterize vertical infiltration with infiltrometers. If this condition does not exist, water flow in saturated soil and in one direction is best expressed by the effective vertical hydraulic conductivity for a saturated profile determined with the Darcy equation. Furthermore, the double ring method is more appropriate than Cornell for determining vertical infiltration, especially if the soil surface permeability is sufficiently high.

**Keywords:** surface runoff; soil conservation; terraces; lateral flow

### 6.3 INTRODUÇÃO

Embora a importância hidrológica da infiltração de água no solo, não é claro como é a relação da taxa de infiltração estável (Tie) obtida experimentalmente com a umidade antecedente do solo. Com base nos modelos de base física de infiltração é geralmente assumido que a Tie não sofre efeito do gradiente hidráulico inicial (HILLEL, 2004; PHILIP, 1957, 1969). Alinhado a isso, modelos de estimativa da infiltração vertical considerando dados de infiltração obtidos com infiltrômetros de anéis assumem pouco ou nenhum efeito da umidade antecedente na Tie (FATEHNIA; TAWFIQ; YE, 2016; REYNOLDS; ELRICK, 1990; STEWART; ABOU NAJM, 2018). Experimentalmente, porém, o trabalho de Císlerová et al., (1988) foi um dos primeiros a demonstrar relação inversamente proporcional entre Tie e umidade antecedente. Em outro estudo, Liu et al. (2019) verificaram que, embora a umidade antecedente afete predominantemente a infiltração nos seus estágios iniciais, há efeito na Tie. Paralelamente, outros autores sugeriram mais investigação a respeito dessa relação (BOENO et al., 2021; RAUBER et al., 2021; WEI et al., 2022), que parece ser intrínseca à medição pontual com infiltrômetros e dependente da permeabilidade da superfície do solo, do método e do tempo de medição. Para avançar nessa abordagem, porém, nos tópicos a seguir será devidamente discutido como é a relação teórica da umidade antecedente com as variáveis da infiltração. Além disso, serão exploradas as condições de contorno utilizadas para definição da Tie.

#### 6.3.1 A base física na modelagem da infiltração pontual

A infiltração de água no solo é um processo de interface solo-atmosfera cuja taxa representa a facilidade com que determinada quantidade de água (V) entra na superfície do solo por unidade de área (A) e tempo (T). A lei de infiltração expressa a taxa do processo “*i*” (L T<sup>-1</sup>) no tempo (T). Por exemplo, dado que o solo está inicialmente seco e que a precipitação é maior que a infiltração potencial (ou que há carga hidráulica constante sobre o solo), *i* é máximo no início do processo e tende assintoticamente a um valor mínimo constante. Com base na relação de *i* com o tempo, a infiltração acumulada “*I*” (L) é dada por integração,  $I = \int_{t_1}^{t_2} i dt$ .

A equação da continuidade para movimento de água no solo estabelece que a diferenciação instantânea do conteúdo de água no tempo ( $\partial\theta/\partial t$ ) é igual e oposta à diferenciação instantânea da densidade de fluxo no espaço ( $\partial q/\partial x$ ) (eq. 1). Considerando, por exemplo, a dimensão vertical do perfil de solo, a infiltração aumenta o conteúdo de água no solo;

consequentemente, enquanto não houver saturação do perfil do solo, a diferenciação do conteúdo de água no tempo é maior que zero ( $\partial\theta/\partial t > 0$ ) e a diferenciação espacial da densidade de fluxo menor que zero ( $\partial q/\partial x < 0$ ):

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial x} \quad (1)$$

em que  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de água no solo ( $L^3 L^{-3}$ ),  $t$  o tempo (T),  $q$  a densidade de fluxo ou taxa de infiltração ( $L T^{-1}$ ) e  $x$  o espaço em uma dimensão (L).

O membro  $q$  da equação da continuidade pode ser determinado por modelos de base física de movimento de água no solo, como o de Darcy para fluxo saturado (eq. 2) e de Darcy-Buckingham para fluxo não saturado (eq. 3). Nesse último, é estabelecida uma função condutividade hidráulica  $K(\theta)$ , mas se torna igual ao modelo 2 em condição de solo saturado, pois  $K(\theta_s) = K_{sat}$ . De acordo com os experimentos de Darcy,  $K_{sat}$  ( $L T^{-1}$ ) é uma grandeza que representa a facilidade com que a água atravessa um meio poroso saturado em uma direção; indica a permeabilidade do meio à água. É a razão entre a densidade de fluxo ( $q$ ) e gradiente hidráulico entre dois pontos,  $K_{sat} = q/(\partial\Psi_t/\partial x)$ :

$$i = q = -K_{sat} * \frac{\partial\Psi_t}{\partial x} \quad (2)$$

$$i = q = -K(\theta) * \frac{\partial\Psi_t}{\partial x} \quad (3)$$

onde  $\partial\Psi_t$  é a diferenciação ou variação total de energia potencial entre dois pontos no perfil do solo (L), e  $\partial x$  a distância entre dois pontos no perfil do solo ou profundidade da frente de umedecimento (L).

Considerando movimento de água em única direção,  $\partial\Psi_t/\partial x$  entre dois pontos também pode ser desdobrada de acordo com os diferentes potenciais atuantes (eq. 4):

$$\frac{\partial\Psi_t}{\partial x} = \frac{\partial\Psi_g}{\partial x} + \frac{\partial\Psi_p}{\partial x} + \frac{\partial\Psi_m}{\partial x} \quad (4)$$

em que  $\Psi_g$  é potencial gravitacional (L),  $\Psi_p$  o potencial de pressão (L) e  $\Psi_m$  o potencial matricial (L). Com base nisso, a equação de fluxo em uma única direção e para meio homogêneo também pode ser descrita como proposto por Richards (eq. 5):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial \Psi_p}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] \quad (5)$$

em que  $\cos \alpha$  representa  $\partial \Psi_g / \partial x$  entre dois pontos de referência no perfil (onde  $\alpha$  é o ângulo formado entre dois pontos em relação ao eixo vertical), o que para fluxo vertical ( $\cos (0)$ ) é igual a 1.

Com base na equação de Darcy, Green-Ampt (1911) estabeleceram que durante o processo de infiltração, dado que o suprimento de água na superfície do solo é maior que a taxa de infiltração, a frente de umedecimento avança uniformemente e saturando o solo, com variação abrupta do conteúdo de água entre a zona saturada e não saturada. Isso representa uma simplificação para possibilitar a solução analítica do processo, mas que é improvável experimentalmente (LIBARDI, 2018). A solução numérica é realizada por integração, com a equação de fluxo apresentada na forma discreta ( $\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = -\frac{\Delta q}{\Delta x}$ ), ou seja, em que  $\Delta q$  e  $\Delta \theta$  são determinados via discretização do espaço (x) e do tempo (t). A mudança abrupta no conteúdo de água entre a zona saturada e não saturada ocorreria porque, devido à baixa condutividade hidráulica da zona ainda não saturada, necessitaria um gradiente hidráulico expressivo, com aumento suficientemente grande na umidade do solo, para a água avançar no perfil (HILLEL, 2004). É mais coerente fisicamente, porém, considerar uma mudança gradual no conteúdo de água, na magnitude da densidade de fluxo e no potencial matricial entre a zona saturada e não saturada. Isso implica, porém, na necessidade de operacionalização matemática avançada para discretização detalhada do espaço-tempo e devida consideração do fluxo não saturado na frente de umedecimento, com  $K(\theta)$ . Nesse sentido, modelos como Hydrus (ŠIMŮNEK et al., 2018) são amplamente utilizados para modelar com base física fluxos de água no solo.

Considerando infiltração em coluna vertical com estrutura homogênea no espaço e no tempo,  $i$  é máximo no início do processo porque  $\Delta x$  é mínimo, e diminui na medida que  $\Delta x$  aumenta e que conseqüentemente o gradiente hidráulico diminui e tende à unidade. Com base nos modelos de base física, portanto, a lei de infiltração é explicada pela relação de  $i$  com  $\Delta x$ ;  $\Delta \Psi_m$  e  $\Delta \Psi_p$  são constantes enquanto houver aumento no conteúdo de água no tempo. Com a saturação do perfil do solo ou com  $\Delta x$  suficientemente grande,  $\Delta \Psi_m / \Delta x$  e  $\Delta \Psi_p / \Delta x$  se aproximam de zero e  $q$  passa a ser numericamente igual à  $K_{sat}$ , em que  $\Delta \theta / \Delta t = 0$  e  $\Delta q / \Delta x = 0$ , atingindo-se a taxa de infiltração estável (HILLEL, 2004). Com base nos modelos de predição física da infiltração pontual, portanto, assume-se que menor umidade antecedente aumenta o gradiente hidráulico inicial, aumenta a taxa de infiltração inicial, aumenta o tempo para o



gradiente hidráulico chegar à unidade e conseqüentemente aumenta a infiltração acumulada. A taxa de infiltração estável, porém, não seria afetada.

Embora a necessidade de estrutura homogênea para adequação experimental às premissas dos modelos de base física de infiltração, o efeito da estratificação do solo quanto à permeabilidade no fluxo vertical efetivo ( $q$ ) pode ser determinado de acordo com a equação de Darcy para  $N$  camadas (eq. 6):

$$q = \frac{\Delta\Psi t}{\left[ \frac{dz_1}{K_1} + \frac{dz_2}{K_2} + \frac{dz_3}{K_3} + \dots + \frac{z_n}{K_n} \right]} \quad (6)$$

em que  $\Delta\Psi t$  é a variação no potencial total de água entre as duas extremidades do perfil ( $L$ ),  $dz$  é a espessura ( $L$ ) e  $K$  a condutividade hidráulica de cada camada pedogenética ou influenciada pelo manejo ( $L T^{-1}$ ).  $q$  é uma função de  $dz$  e  $K$ , mas que tende à condutividade hidráulica da camada mais limitante, como a do horizonte Bt do Argissolo ou da crosta superficial.

### 6.3.2 Explorando a relação da infiltração com as condições de medição

Embora a medição da infiltração com infiltrômetros possibilite a obtenção de uma taxa de infiltração estável, possivelmente não garante as condições de contorno utilizadas para definição da Tie, como estrutura do meio homogênea no espaço e no tempo e fluxo unicamente vertical (HILLEL, 2004). O fluxo lateral na infiltração medida com infiltrômetros (BOENO et al., 2021) pode ser potencializado quando a frente de umedecimento atinge camadas subsuperficiais menos permeáveis que as superficiais, especialmente se (i) a umidade antecedente estiver suficientemente baixa e/ou (ii) a permeabilidade superficial for suficientemente alta. Paralelamente, o tempo de medição com infiltrômetros (2 a 3 h) é possivelmente insuficiente para incorporar na Tie o impedimento hidráulico por camadas profundas.

Estudar a relação da umidade antecedente com a infiltração é um desafio operacional. No espaço e no tempo, além da umidade antecedente, tem-se a influência de fatores dinâmicos, como quantidade e tipologia de raízes formando ou ocupando poros (BODNER et al., 2008; CUI et al., 2019; LIU et al., 2019). Além disso, a sazonalidade influencia a intensidade e frequência de ciclos de umedecimento e secamento e conseqüentemente variáveis relacionadas à macroporosidade e ao fluxo de água no solo (BODNER et al., 2013; CASTIGLIONI et al., 2018). Esses fatores possivelmente confundem a relação da umidade com a infiltração e tem

limitado uma discussão mais conclusiva nos estudos já realizados em experimentos *in situ*, especialmente em condições tropicais (RAUBER et al., 2021). Além da necessidade de mais experimentação, realizando testes em diferentes épocas e condições contrastantes de umidade antecedente, é importante estabelecer nesses estudos variação expressiva na umidade antecedente em intervalo de tempo relativamente pequeno, consequentemente anulando o efeito da sazonalidade na infiltração. Além disso, a manutenção de pontos fixos de avaliação permitiria isolar melhor o efeito da variabilidade espacial entre diferentes datas de avaliação. Compreender como e quanto a *Tie* é influenciada pela umidade antecedente gerará implicações importantes como delimitações das condições de umidade ou de métodos mais adequados para caracterizar a curva de infiltração vertical e consequentemente incorporar as respectivas variáveis em modelos hidrológicos.

A hipótese é que a taxa de infiltração estável apresenta relação inversamente proporcional com umidade antecedente do solo, e que essa relação depende da permeabilidade da superfície do solo, do método de medição e do tempo de medição.

O objetivo foi analisar como é a relação da taxa de infiltração estável de água no solo com a umidade antecedente, com a permeabilidade superficial do solo, com o método de medição e com o tempo de medição.

## 6.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.4.1 Local de estudo e delineamento experimental

O experimento foi conduzido na área do departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, RS (29°43'11''S 53°42'12''W, altitude 86 m, distanciado aproximadamente 150 m do experimento do capítulo II). O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto (SANTOS et al., 2018) e como Ultisol (SOIL SURVEY STAFF, 2014). O relevo do entorno é suave ondulado. No local do experimento, a declividade é 6%. O material de origem dos solos locais é sedimentar (siltito argiloso). Os principais minerais são a caulinita (predominante), vermiculita, goethita e hematita (PEDRON et al., 2018). A precipitação anual média é 1700 mm (dados de 1961 a 2022 extraídos de banco de dados da estação do INMET, localizada a 1600 m do experimento). O clima local é Cfa segundo classificação de Köppen.

O experimento foi implantado em 2021, em área representativa de plantio direto (~20 anos) em que havia consórcio de aveia (*Avena sativa*), azevém (*Lolium multiflorum*) e nabo

(*Raphanus sativum*) no inverno, e soja (*Glycine max*) ou milho (*Zea mays*) no verão (Figura 1). O experimento foi planejado para haver os seguintes fatores de estudo: (i) condições de umidade antecedente à avaliação da infiltração pontual; (ii) condições estruturais de solo (plantio direto – PD, e plantio direto com subsolagem – Sub); (iii) métodos de medição da infiltração (duplo anel concêntrico e infiltrômetro de Cornell); e (iv) tempo de duração dos testes de infiltração (1 h para Cornell e de 2- 48 h para duplo anel).

Para delimitar as duas condições estruturais do solo, a área de 30 x 20 m (600 m<sup>2</sup>) do experimento foi inicialmente dividida em duas (Figura 1). Posteriormente, uma das partes foi subsolada (Figura 1), em 30/04/2021, quando o solo apresentava consistência friável, com umidade de 0,09 g g<sup>-1</sup> nas camadas 0-10 e 10-20 cm e de 0,10 g g<sup>-1</sup> na camada de 20-30 cm. Para obter intensa mobilização do solo e promover expressivo aumento da permeabilidade à água na camada subsolada, a subsolagem foi realizada em um sentido e, posteriormente, no sentido transversal à primeira, utilizando-se um subsolador com 5 hastes, operando até a profundidade de ~ 40 cm.

Figura 1 - a) subsolagem em dois sentidos (30/04/2021); b) contraste entre área com plantio direto (à esquerda) e área subsolada (à direita); c) infiltrômetro de duplo anel automatizado; d) infiltrômetro de Cornell automatizado; e) disposição dos pontos de infiltração numa mesma condição estrutural de solo na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 6.4.2 Monitoramento da umidade do solo

Nas duas condições estruturais de solo, a umidade do solo foi monitorada continuamente com sensores FDR (*Frequency Domain Reflectometer*), modelo CS616, comprimento de hastes de 30 cm (Figura 2). Trincheiras foram abertas e em três locais de cada uma das duas condições de solo as sondas CS616 foram inseridas horizontalmente nas profundidades 2,5; 7,5; 15; 30 e 50 cm (Figura 2). Essas profundidades representaram o centro de camadas morfologicamente homogêneas, nas quais o armazenamento (*Arm*) de água foi determinado (eq. 7).

$$Arm = (\theta_{i_1} * dz_1) + (\theta_{i_2} * dz_2) + \dots (\theta_{i_n} * dz_n) \quad (7)$$

em que  $\theta_i$  representa a umidade do solo no centro da camada ( $L^3L^{-3}$ ) e  $dz$  a espessura de cada camada de solo ( $L$ ). Os índices 1, 2, ... n representam as camadas de solo do topo para a base do perfil de solo.

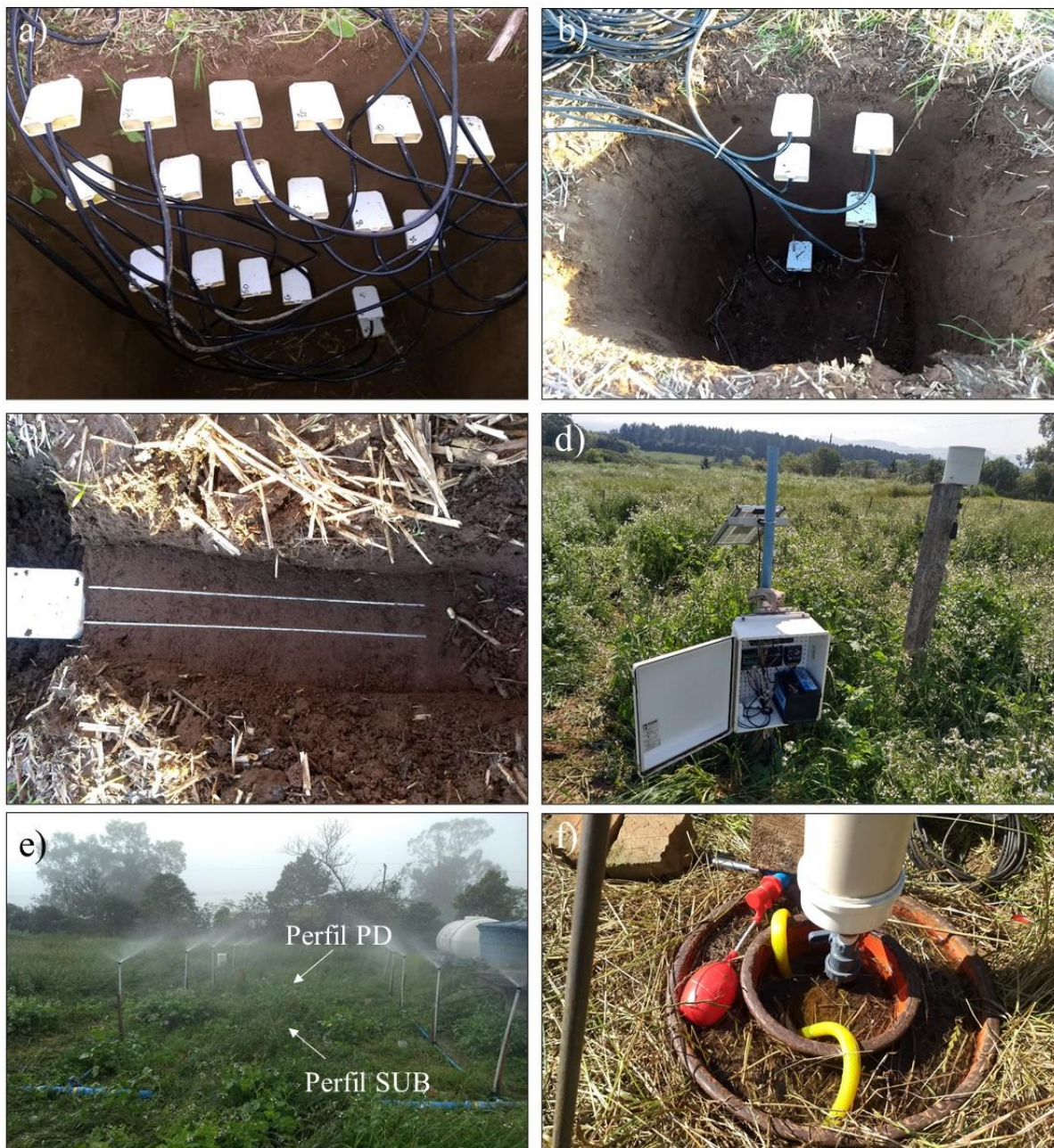
Adicionalmente, em um quarto ponto em cada condição de solo, 18 sondas foram instaladas nas profundidades 0,625; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5; 21; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 56,25; 70 (horizonte E); e 85 cm (horizonte Bt) (Figura 2). A maior discretização do perfil nesse ponto serviu para haver maior controle do avanço da frente de umedecimento nos testes de infiltração realizados sob as sondas (discutido a seguir). Após a instalação das sondas, as camadas de solo foram cuidadosamente realocadas no perfil na mesma sequência que foram retiradas. Cada camada foi compactada para restabelecer seu grau de compactação original. As sondas foram ligadas a um datalogger CR1000 e a um multiplexador AM16/32 (Figura 2). O intervalo de tempo entre dois registros de umidade ( $\Delta t$ ) foi condicionado na programação pela equação 8:

$$\Delta t = \begin{cases} 1 \text{ h}, & ip = 0 \\ 1 \text{ min}, & ip > 0 \end{cases} \quad (8)$$

em que  $ip$  é a intensidade de precipitação pluviométrica ( $L T^{-1}$ ).



Figura 2 - a) perfil de monitoramento de umidade com 18 sondas FDR CS616; b) perfil de monitoramento da umidade com 5 sondas FDR CS616; c) corte transversal do solo sob uma sonda inserida no solo, demonstrado que as hastes permaneceram equidistantes; d) caixa com bateria 12 V e datalogger e multiplexador para registro de dados; e) sistema de irrigação alocado paralelamente aos perfis de monitoramento de umidade para realização de testes de precipitação simulada; e) sistema com boias reguladoras de nível e sifões para manutenção de carga hidráulica constante sobre os anéis de infiltração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.4.3 Sondas FDR: Calibração e validação

O princípio de funcionamento do sensor FDR é a capacitância, em que o solo atua como o meio dielétrico de um capacitor ligado a um circuito LC (indutor-capacitor); desse circuito

é obtida a frequência (F) do oscilador, que pode ser determinada por  $F = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ . Contudo, o sensor registra o período (T), que é o inverso da frequência do oscilador,  $T = 1/F$ . Aumento na umidade do solo aumenta a constante dielétrica (permissividade elétrica) e a capacitância do meio; conseqüentemente, diminui a frequência do oscilador e aumenta o período. Com base nisso, o fabricante da sonda capacitiva fornece uma equação de calibração que relaciona o período com a umidade volumétrica do solo, mas que representa uma relação geral e que pode não descrever bem a variação da umidade volumétrica para determinados tipos de solo ou profundidades no perfil. As sondas de monitoramento da umidade, portanto, foram calibradas para as camadas 0-10, 10-30, 30-60 cm, horizonte E e Horizonte Bt do solo de estudo e os ajustes posteriormente devidamente validados.

Para calibração, foram realizados os seguintes procedimentos: (i) em laboratório, solo das diferentes camadas foi acomodado em tubos de PVC de 10 cm de diâmetro e aproximadamente 40 cm de altura; (ii) as sondas foram instaladas verticalmente nessas colunas; (iii) o solo foi saturado por capilaridade durante uma semana, aproximadamente; (iv) no tempo, a cada um a dois dias, era quantificada a massa do conjunto solo/coluna/sonda, para posterior quantificação direta da umidade volumétrica, e paralelamente eram anotados os valores de período registrados pelas sondas; (v) ajustes quadráticos entre período e umidade volumétrica foram realizados para cada camada (Tabela 1).

Após a calibração, a validação dos ajustes foi realizada a campo. Para isso, em datas com condições contrastantes de umidade foram coletadas amostras para quantificação direta da umidade gravimétrica. Posteriormente, a umidade volumétrica ( $\Theta$ ) foi obtida pela multiplicação entre umidade gravimétrica ( $Ug$ ) e densidade ( $Ds$ ) de cada camada obtida em cada condição de manejo ( $\Theta = Ug * Ds$ ). Por fim, foi analisado o alinhamento entre umidade volumétrica observada e umidade volumétrica estimada pelas sondas instaladas na área, utilizando os ajustes obtidos na calibração (Figura 3).

Percebe-se que para o horizonte A do solo (0-60 cm) e valores médios a baixos de umidade do solo, há um alinhamento na estimativa da umidade entre a equação proposta e a equação sugerida pelo fabricante (Figura 3). Por outro lado, há um desalinhamento importante na estimativa da umidade entre as equações para valores altos de umidade e próximos do ponto de saturação (Figura 3). Para solo quase saturado, por exemplo, há subestimativa da umidade real ao utilizar a equação sugerida pelo fabricante. Logo, isso justifica a necessidade de calibração e utilização das equações ajustadas para as condições locais. Para o horizonte Bt, inclusive, houve desalinhamento entre a equação proposta e a equação sugerida pelo fabricante para todas as faixas de umidade do solo, provavelmente em função da textura mais argilosa

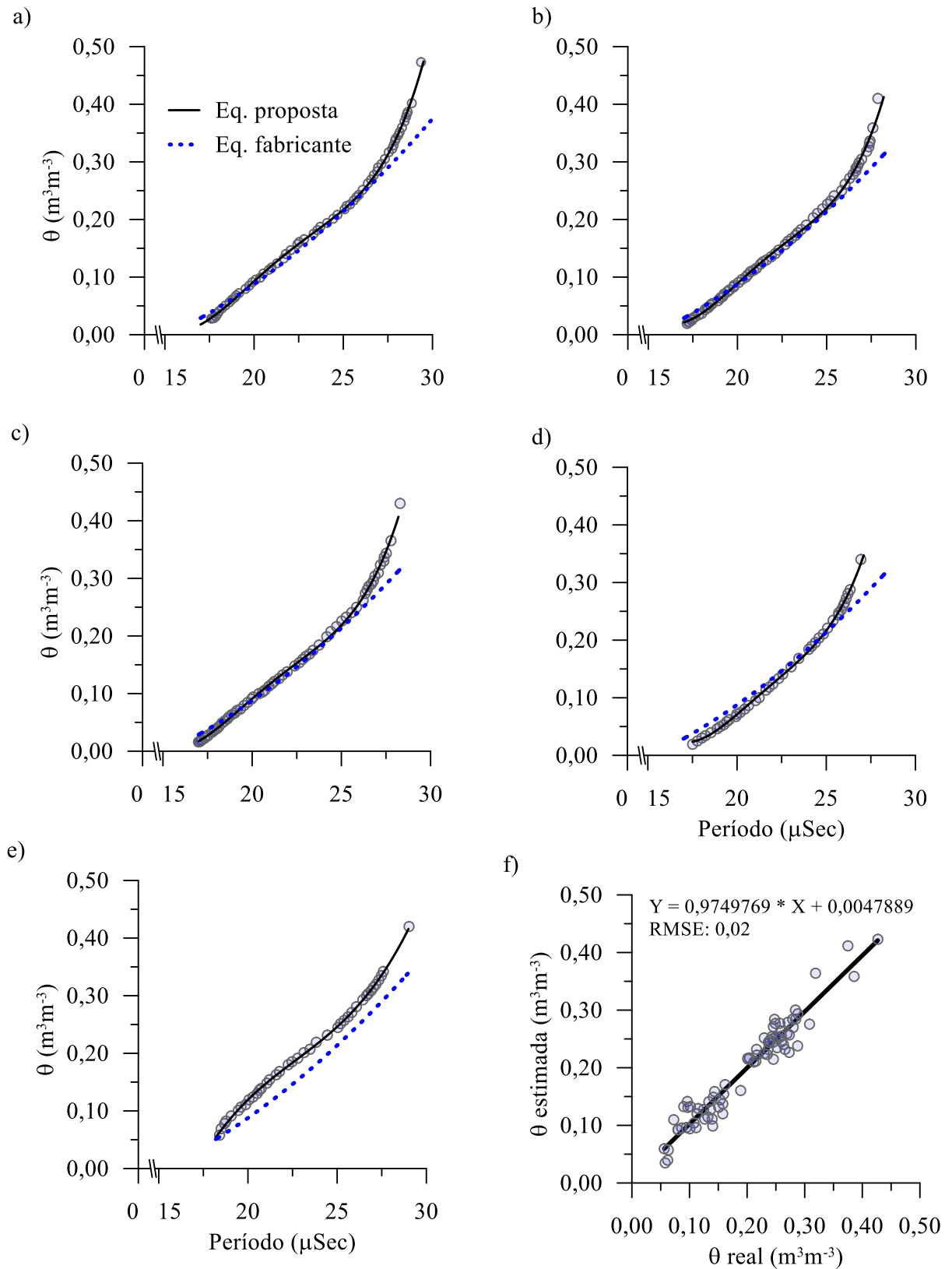
desse horizonte (Figura 3). O resíduo entre valores estimados e observados de umidade na etapa de validação ( $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) foi considerado baixo e aleatório (Figura 3). Logo, a validação dos ajustes foi satisfatória.

Tabela 1 - Calibração das sondas de monitoramento de conteúdo de água do solo. Relação entre período ( $\mu\text{Sec}$ ) registrado pela sonda FDR e umidade volumétrica ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ) correspondente.

| Camada<br>(cm) | Intersecção | X       | Coeficientes   |                |                | p       | R <sup>2</sup> | Erro<br>padrão |
|----------------|-------------|---------|----------------|----------------|----------------|---------|----------------|----------------|
|                |             |         | X <sup>2</sup> | X <sup>3</sup> | X <sup>4</sup> |         |                |                |
| 0 - 10         | 9,946       | -1,9460 | 0,13960        | -0,0043560     | 0,00005060     | 2,2E-16 | 0,999          | 0,003          |
| 10 - 30        | 14,870      | -2,8720 | 0,20480        | -0,0063990     | 0,00007461     | 2,2E-16 | 0,997          | 0,006          |
| 30 - 60        | 9,865       | -1,9710 | 0,14450        | -0,0046240     | 0,00005517     | 2,2E-16 | 0,999          | 0,004          |
| E (60-80)      | 18,940      | -3,5980 | 0,25380        | -0,0078920     | 0,00009194     | 2,2E-16 | 0,999          | 0,003          |
| Bt (80+)       | -4,114      | 0,5221  | -0,02197       | 0,0003227      | -              | 2,2E-16 | 0,999          | 0,002          |

p: valor p de significância. Modelo da sonda: CS616. Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3 - Ajustes de calibração das sondas de monitoramento de conteúdo de água do solo para diferentes camadas de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico, com respectiva validação.



Eq proposta é a equação de ajuste obtida na calibração; Eq fabricante é a equação fornecida pelo fabricante. a) camada 0-10 cm; b) camada 10-30 cm; c) camada 30-60 cm; d) Horizonte E; e) horizonte Bt; f) relação entre umidade real e estimada pelas equações propostas (validação). Fonte: Elaborado pelo autor.



#### 6.4.4 Determinação da infiltração

Em diferentes condições de umidade antecedente, a infiltração de água foi determinada com infiltrômetro de Cornell e duplo anel concêntrico nas duas condições estruturais de solo (Figuras 1). Em cada combinação de condição de solo, umidade antecedente e método de medição, dez determinações da infiltração foram realizadas. Os locais de medição foram demarcados de modo a terem afastamento equidistante (3 m), e as sucessivas medições em diferentes condições de umidade antecedente foram feitas sempre nos mesmos locais demarcados. Não houve tráfego de máquinas sobre a área durante o período de estudo (04/2021 a 02/2023). A cultura de inverno (aveia/azevém) era semeada a lanço e a de verão (soja) em linha (espaçamento de 45 cm), ambas implantadas manualmente.

Os testes de infiltração com duplo anel concêntrico (seguindo BOUWER, 1986) duraram 2h e foram realizados com carga constante de 3 cm, seguindo medição automática a cada 1 s descrita no Capítulo I. Os anéis externos (diâmetro de 40 cm e altura de 10 cm) e internos (diâmetro de 20 cm e altura de 15 cm) foram inseridos no solo até uma profundidade de 5 e 7,5 cm, respectivamente. As medições de infiltração consideradas foram de intervalos de 2 a 3 min no início (0-10 min) e de 10 min no restante do teste. Aos dados de taxa de infiltração medidos foram ajustados os modelos de Horton (1941), Kostiakov (1932) e de Philip (1957) (equações 9 a 11, respectivamente). Além disso, extraiu-se de cada repetição a taxa de infiltração estável (média dos últimos dois a três valores estáveis).

$$i = if + (ii - if)exp^{-Kt} \quad (9)$$

onde  $i$  é a taxa de infiltração instantânea,  $ii$  e  $if$  são as taxas de infiltração inicial e final ajustadas, respectivamente,  $K$  é um parâmetro de ajuste que reflete como é o decaimento da curva de infiltração, e  $t$  é o tempo;

$$i = kt^{-a} \quad (10)$$

onde  $k$  e  $a$  são parâmetros de ajuste (puramente empíricos);

$$i = 0,5St^{-0,5} + Ksat \quad (11)$$

onde  $S$  é a sortividade do solo e  $K_{sat}$  é um parâmetro que reflete a condutividade hidráulica do solo saturado, ambos ajustados.

Os testes de infiltração com infiltrômetro de Cornell (ES; SCHINDELBECK, 2003; OGDEN; VAN ES; SHINDELBECK, 1997; SERATTO et al., 2019) duraram aproximadamente 1 h, que correspondeu ao tempo de esgotamento da água do infiltrômetro sob taxa de aplicação de  $\sim 300 \text{ mm h}^{-1}$ . Os anéis de 25 cm de diâmetro e 15 cm de altura foram inseridos no solo até 7,5 cm de profundidade. Para este método também se utilizou o procedimento automático de obtenção de dados de infiltração a cada 1 s, conforme descrito no capítulo I. As leituras consideradas de taxa de aplicação de água e de escoamento superficial, porém, foram de intervalos de 3 min. A taxa de infiltração foi calculada pela diferença entre a taxa de adição de água e a taxa de escoamento superficial. O modelo de Alves e Cabeda (1999) (eq. 12) foi então ajustado aos dados de taxa de infiltração medidos. A taxa de infiltração estável foi atribuída à média dos últimos três valores estáveis de taxa de infiltração.

$$i = \begin{cases} ip & t \leq temp \\ (ip - Tie)x \left(\frac{temp}{t}\right)^b + Tie & t > temp \end{cases} \quad (12)$$

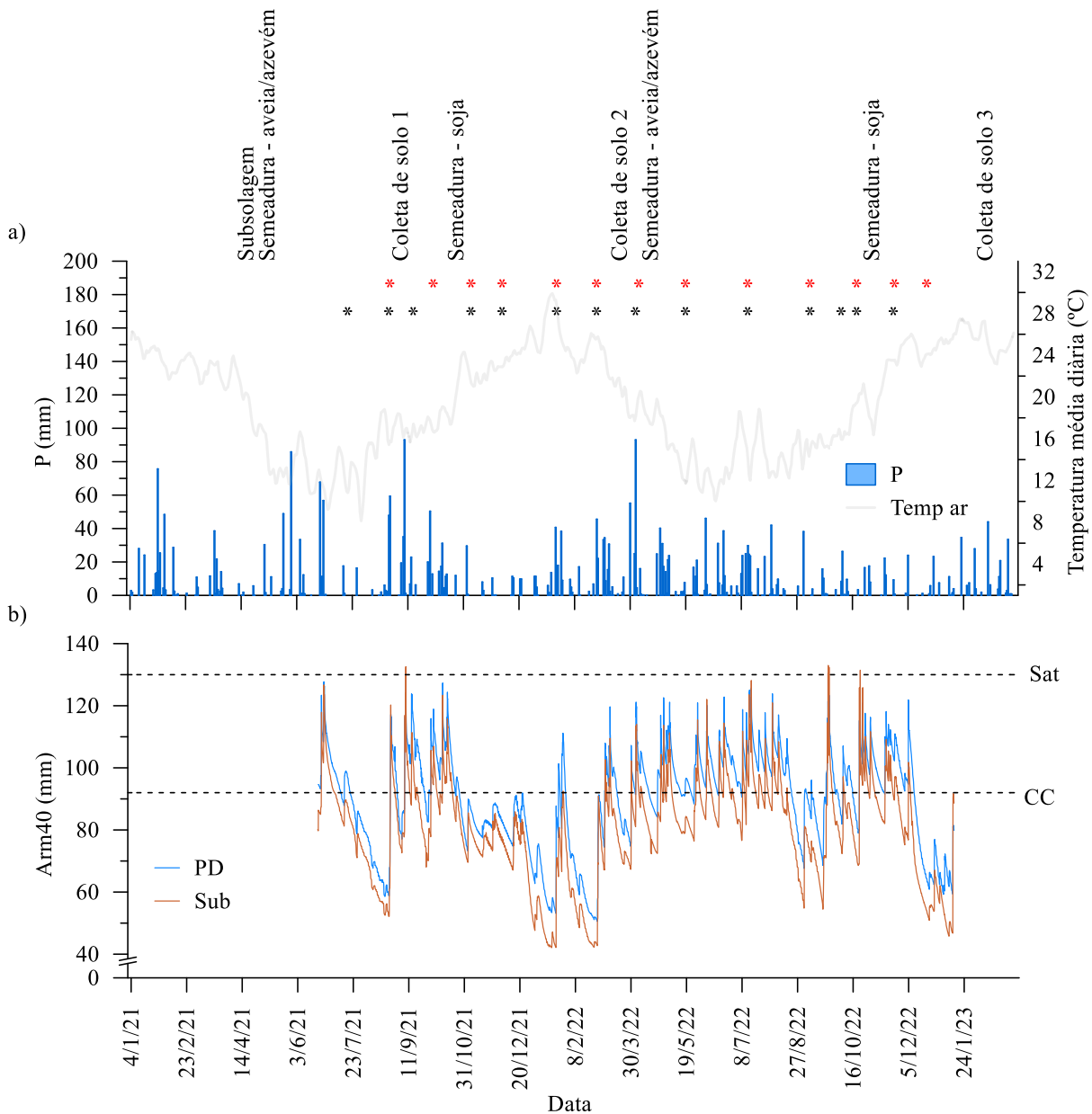
onde  $ip$  é a taxa de adição de água,  $Tie$  é a taxa de infiltração estável,  $temp$  é o tempo para empoçamento,  $t$  é o tempo e  $b$  o parâmetro de ajuste.

Em ambas as condições de solo, os testes de infiltração foram realizados em 13 (Cornell) e 14 (duplo anel) condições de umidade antecedente, no período de 08/2021 a 01/2023 (Figura 4). O grau de saturação da camada 0-40 cm antecedente aos testes de infiltração variou de 40 a 100 %, o que representa ampla variação de umidade em torno da capacidade de campo, cujo correspondente grau de saturação é de  $\sim 70\%$ . O tempo médio entre as medições em diferentes condições de umidade foi de 38 ( $\pm 11$ ) dias para duplo anel e de 40 ( $\pm 7$ ) dias para Cornell (Figura 4). A temperatura do ar e a precipitação pluviométrica durante o período experimental também foram monitoradas (Figura 4). A precipitação natural anual foi de 1420 mm no ano de 2021 e de 1536 mm no ano de 2022 (chuva anual abaixo da média, 1700 mm). Além disso, a irregularidade na distribuição da precipitação (por exemplo, escassez hídrica especialmente entre 10/201 e 03/2023) contribuiu para obtenção de variáveis de infiltração numa amplitude grande de condições de umidade antecedente.

Devido à baixa frequência de eventos de precipitação natural capazes de saturar o solo, irrigação foi utilizada em uma das datas de avaliação (21/09/2022) para que a infiltração

pudesse ser medida sob solo próximo à saturação. A área total de cada condição de solo foi inicialmente saturada e imediatamente foram realizados os testes de infiltração.

Figura 4 - a) temperatura média diária do ar (Temp ar) (média móvel de dez dias) e precipitação acumulada de cada evento de chuva natural (P) durante o período experimental; b) armazenamento de água na camada 0-40 cm (Arm40) em plantio direto (PD) e plantio direto subsolado (Sub).



Asterisco em vermelho e em preto se referem às datas de avaliação da infiltração com infiltrômetro de Cornell e duplo anel, respectivamente, para estabelecer uma relação entre umidade antecedente e taxa de infiltração estável para cada método e condição estrutural de solo. Sat e CC se referem ao armazenamento na camada 0-40 cm na condição de solo saturado e de capacidade de campo, respectivamente. Os dados de precipitação e temperatura foram obtidos de estação meteorológica do INMET distanciada aproximadamente 1600 m do experimento. Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 6.4.5 Taxa de infiltração após ampliação do tempo de medição

Para analisar a resposta da taxa de infiltração ao se prolongar o tempo de medição para além de 2 h (tempo máximo das medições descritas anteriormente), testes de infiltração com duração de 48 h foram realizados com duplo anel concêntrico em cada condição de solo (instalação dos anéis e carga hidráulica descritas anteriormente). Os testes foram realizados em 01/10/2021 e 19/04/2022, com três a cinco repetições. Na primeira e segunda data de avaliação, a umidade antecedente do solo expressa pelo armazenamento na camada 0-40 cm estava acima (12%) e abaixo (13%) da capacidade de campo, respectivamente. A taxa de infiltração foi medida manualmente a intervalos de aproximadamente 2 min no início do teste (0-10 min), a cada 10 min até 2 h de duração do teste, e a cada 10 min das 23-24 h e das 47-48 h. O efeito da ampliação do tempo de medição foi analisado comparando-se as taxas de infiltração determinadas às 2, 24 e 48 h.

Em cada data de avaliação e condição de solo, uma das repetições foi alocada onde haviam sido instalados os sensores FDR de monitoramento da umidade com alta discretização (18 sondas). Nesses pontos, os intervalos de tempo de leitura da infiltração após 2 h foram menores que nos demais pontos. As leituras foram mais discretizadas para se detectar melhor a relação entre a taxa de infiltração e avanço da frente de umedecimento monitorada com os sensores FDR que estavam instalados abaixo da projeção dos anéis e monitoravam o conteúdo de água a cada minuto.

Para manutenção da carga hidráulica nos anéis de infiltração nos intervalos de tempo em que a infiltração não estava sendo monitorada, boias reguladoras de nível foram utilizadas no anel externo, conectadas por mangueira a reservatório de água de aproximadamente 10000 litros na cota mais alta do terreno. Um sifão foi utilizado para transferir água do anel externo ao anel interno, mantendo assim o mesmo nível de água nos dois (Figura 2).

#### **6.4.6 Umedecimento adicional do solo com irrigação**

Para isolar o efeito da umidade antecedente na Tie perante possíveis efeitos sazonais autocorrelacionados, após a avaliação da infiltração sob umidade antecedente abaixo da capacidade de campo (21/10/2022), molhamento intermitente do solo em área total com sistema de irrigação (em intervalos de até dois dias) foi realizado com concomitante avaliação da Tie. O objetivo foi analisar se mudança expressiva na umidade antecedente em curto espaço de tempo alteraria a Tie. Para isso, os seguintes procedimentos foram realizados: (i) realizados testes iniciais de infiltração em cinco pontos em cada condição de manejo, com 2 h de duração,

em que um ponto em cada condição de manejo foi alocado sob o perfil de monitoramento de umidade com alta discretização (18 sondas); (ii) imediatamente após a finalização dos testes, a área total do experimento foi submetida à irrigação por 3,3 horas, precipitação acumulada de ~155 mm; (iii) a infiltração foi novamente avaliada imediatamente após a irrigação, nos mesmos pontos, durante aproximadamente 1 h; (iv) nas datas 22 e 24/10/2022 a infiltração foi novamente avaliada, com umedecimento prévio do solo na área total com o sistema de irrigação por 1 h; (v) no dia 26/10/2022 a infiltração foi novamente avaliada, com umedecimento do solo em área total posteriormente à finalização dos testes; e finalmente (vi) a infiltração foi avaliada em 28/10/2022 sem irrigação prévia ou posterior. A umidade do solo abaixo (perfis de alta discretização) e ao lado (demais perfis de umidade) dos anéis de infiltração foi monitorada a cada 1 min durante o período.

#### **6.4.7 Determinação de propriedades físicas do solo**

A condutividade hidráulica de solo saturado e densidade do solo e distribuição de poros foram determinadas (conforme metodologia descrita em Teixeira et al., 2017) nas datas 16/09/2021, 01/04/2022 e 24/02/2023, o que correspondeu a 4,6, 11,2 e 22,2 meses após a subsolagem, respectivamente. Anéis de aço inox com diâmetro de 6 cm e altura de 4 cm foram utilizados para a coleta de amostras com estrutura preservada nas camadas 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, utilizando dez repetições distribuídas em dois perfis de solo abertos em cada tratamento. Adicionalmente, na data 16/09/2021, 20 amostras por horizonte (E, Bt1 e Bt2) foram coletadas em perfil de solo representativo da área, desconsiderando o efeito das condições de solo; o objetivo foi caracterizar as características físico hídricas dos horizontes pedogenéticos subsuperficiais.

Em laboratório, todas as amostras foram saturadas por capilaridade e submetidas a avaliação da condutividade hidráulica de solo saturado sob carga hidráulica constante de 2 cm. Posteriormente, as amostras foram submetidas a tensões de 1, 6 e 10 kPa em mesa de tensão de areia (REINERT; REICHERT, 2006) e de 100 kPa em câmara de pressão de Richards, para determinação da distribuição de poros. Por fim, as amostras foram secas em estufa por 48 h. A porosidade total foi determinada pela relação entre densidade do solo e de partículas ( $2,61 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Com a condutividade hidráulica de solo saturado de cada camada e condição de manejo, a condutividade hidráulica vertical efetiva de perfil saturado ( $K_{ef}$ ) foi determinada de acordo com a equação de Darcy para N camadas (eq. 13)

$$K_{ef} = \frac{Z}{\left[ \frac{dz_1}{K_1} + \frac{dz_2}{K_2} + \frac{dz_3}{K_3} + \dots + \frac{dz_n}{K_n} \right]} \quad (13)$$

em que  $Z$  é a profundidade do perfil (L),  $dz$  é a espessura (L) e  $K$  ( $L T^{-1}$ ) é a condutividade hidráulica de solo saturado de cada camada representada pelos índices 1, 2, ..., n.

#### 6.4.8 Biomassa sobre o solo

A biomassa sobre o solo foi quantificada para caracterizar as condições de solo e relacionar variáveis da cobertura com a infiltração. Durante o período vegetativo, de florescimento pleno e de maturação fisiológica das culturas de inverno (aveia e azevém) e de verão (soja), a biomassa vegetal acima do nível do solo foi retirada em cinco pontos aleatórios de 0,25 m<sup>2</sup> em cada condição de solo. A biomassa foi estratificada em biomassa da parte aérea das plantas e em biomassa morta acomodada sobre o solo (resíduos). O material foi seco em estufa a 60 °C por 72 horas para quantificação da matéria seca. Para correlacionar as variáveis da biomassa com as variáveis da infiltração obtidas nas diferentes datas (Figura 1), foi realizada interpolação linear das variáveis da biomassa entre dois períodos de avaliação.

#### 6.4.9 Análise estatística

Correlação de Pearson entre todas as variáveis do estudo foi inicialmente realizada para estudar as relações entre variáveis ou parâmetros da umidade, da cobertura e da infiltração bem como detectar qual variável representando a umidade do solo antecedente aos testes de infiltração melhor estaria correlacionada com a taxa de infiltração estável,  $T_{ie}$ . Os resultados indicaram melhor correlação entre  $T_{ie}$  e armazenamento de água da camada 0-40 cm (Arm40). Posteriormente, análise de regressão linear  $T_{ie} = f(\text{Arm40})$  foi realizada para cada manejo e método de medição da infiltração. O efeito de ampliação do tempo de medição (2, 24 e 48 h) na  $T_{ie}$  medida com duplo anel foi analisado com a ANOVA seguida de comparação de médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para cada data e condição de solo. Para analisar o efeito do período de avaliação da  $T_{ie}$  concomitante ao molhamento adicional do solo com irrigação, ANOVA seguida de comparação de médias foi realizada para cada condição de manejo. Além disso, a influência de variáveis da umidade em diferentes estágios da infiltração (taxa de infiltração média nos intervalos 0-10, 10-30, 30-60, 60-90 e 90-120 min) foi analisada via ANOVA seguida de regressão linear. O efeito da condição estrutural de solo na biomassa de plantas em cada data

de avaliação foi analisado via ANOVA seguida de comparação de médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

## 6.5 RESULTADOS

### 6.5.1 Características hidrológicas do solo

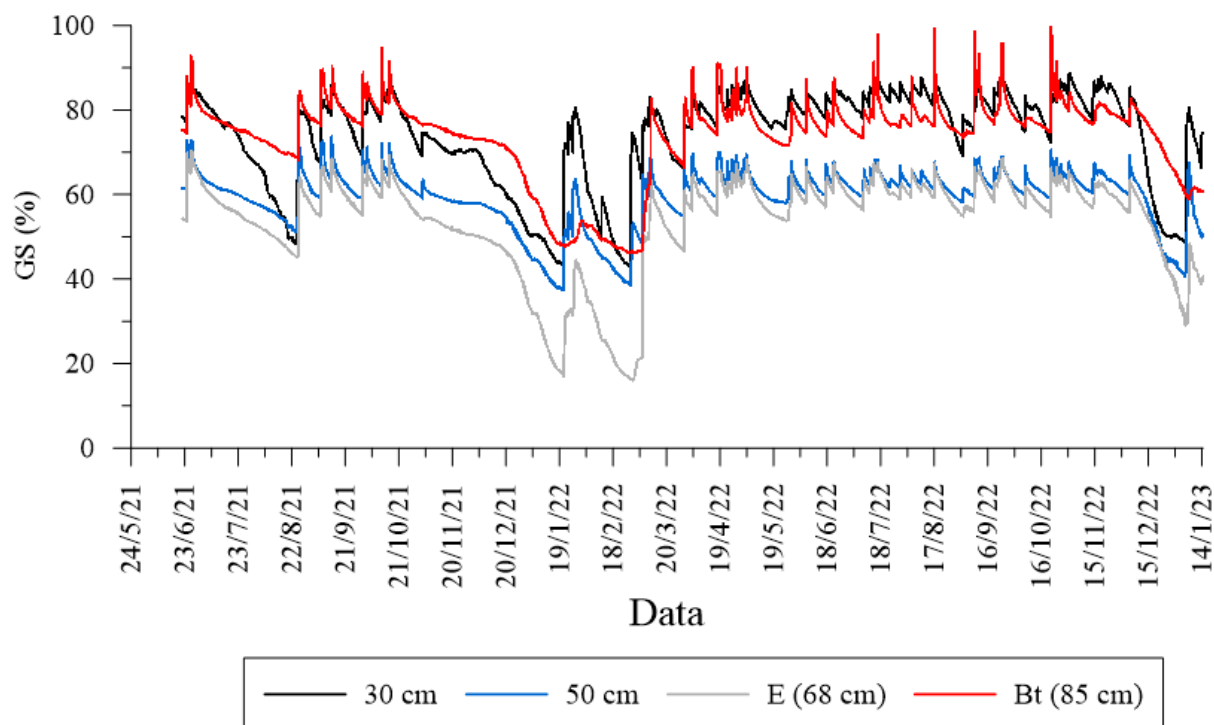
Assim como verificado no experimento com plantas de cobertura (capítulo II), o solo apresentou permeabilidade relativamente baixa à água, com condutividade hidráulica vertical efetiva de perfil saturado de 10 a 15  $\text{mm h}^{-1}$ . Paralelamente, considerando os quatro grupos hidrológicos de solos (escala de A a D) utilizados para estimativa da chuva excedente pelo método da curva número adaptado para o Brasil (SARTORI; LOMBARDI NETO; GENOVEZ, 2005b, 2005a), o solo de estudo se enquadra no grupo C. O grupo A representa solos com baixo potencial ao escoamento superficial, enquanto o grupo D solos com alto potencial ao escoamento superficial. As principais características que determinam o risco relativamente alto ao escoamento superficial neste solo são a baixa permeabilidade e o grau de saturação elevado das camadas 20-40 cm e horizonte Bt (Tabela 2; Figura 5).

Tabela 2 - Características físico-hídricas do solo de estudo (Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abráptico).

| Horizonte | Camada<br>cm | Total | Areia  |                            | Silte | Argila | Ksat <sup>(1)</sup> |                           |
|-----------|--------------|-------|--------|----------------------------|-------|--------|---------------------|---------------------------|
|           |              |       | Grossa | Fina<br>g kg <sup>-1</sup> |       |        | PD                  | Sub<br>mm h <sup>-1</sup> |
| Ap        | 0 - 10       | 648   | 239    | 409                        | 262   | 90     | 134                 | 218                       |
| A1        | 5 - 20       | 624   | 230    | 394                        | 268   | 108    | 21                  | 191                       |
|           | 20 - 40      |       |        |                            |       |        | 4                   | 11                        |
| A2        | 40 - 60      | 586   | 176    | 410                        | 293   | 121    | 29                  | 30                        |
| E         | 60 - 80      | 604   | 164    | 440                        | 241   | 55     | 35 <sup>(2)</sup>   |                           |
| Bt1       | 80 - 90      | 525   | 144    | 381                        | 247   | 128    | 8 <sup>(2)</sup>    |                           |
| Bt2       | 90+          | 417   | 128    | 289                        | 290   | 293    | 15 <sup>(2)</sup>   |                           |

Ksat: Condutividade hidráulica de solo saturado (média das três datas de coleta). Distribuição granulométrica determinada pelo método da pipeta. <sup>(1)</sup> PD - plantio direto; Sub - plantio direto com subsolagem. <sup>(2)</sup> Valores médios em cada horizonte pedogenético. Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 - Grau de saturação do solo (GS) no tempo em diferentes profundidades de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto de longo prazo.



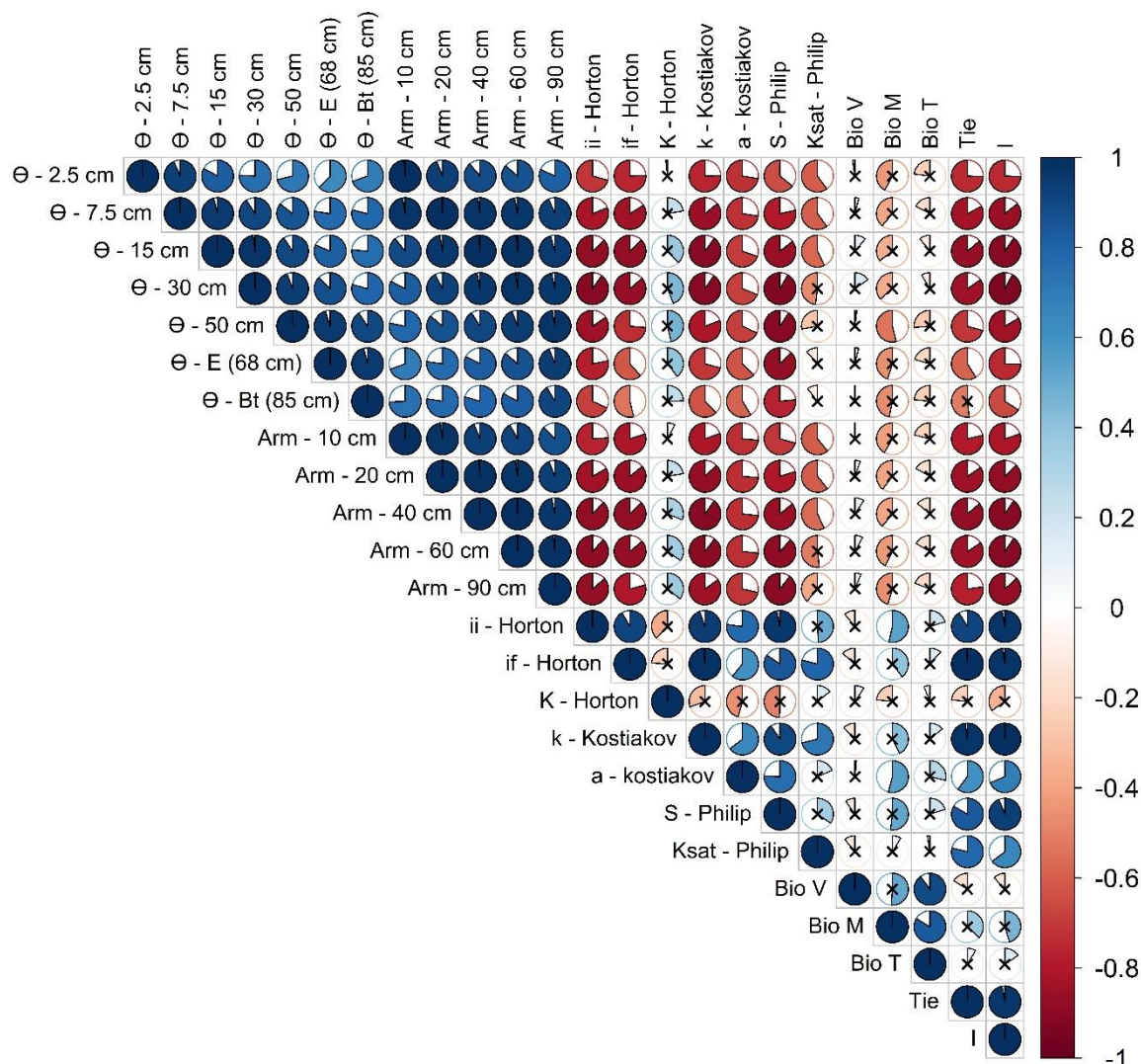
Para determinação do grau de saturação (GS) utilizou-se  $GS = \left( \frac{\theta_s - \theta}{\theta_s} \right) * 100$ , em que  $\theta$  é a umidade volumétrica do solo. Consideramos  $\theta_s$  como sendo a porosidade total determinada para as diferentes profundidades. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.5.2 Relações da taxa de infiltração estável com umidade antecedente

Para ambos os métodos de medição e condições estruturais de solo houve correlação negativa entre taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ) e variáveis relacionadas com conteúdo de água no solo (umidade volumétrica e armazenamento) (Figuras 6 a 9). Contudo, a variável que melhor se correlacionou com  $T_{ie}$  foi armazenamento na camada de 0-40 cm (Arm40). A umidade antecedente no horizonte Bt não apresentou correlação significativa com  $T_{ie}$  (Figuras 6 a 9). Com relação aos parâmetros da curva de infiltração obtidos com duplo anel, a umidade antecedente se correlacionou negativamente com: infiltração inicial ( $I_i$ ) e final ( $I_f$ ) de Horton; parâmetros  $k$  e  $a$  de Kostiakov; e parâmetros  $S$  e  $K_{sat}$  de Philip (Figuras 6 e 7). Por outro lado, o parâmetro  $b$  de Alves e Cabeda (curvas obtidas com Cornell) se correlacionou positivamente com umidade antecedente na área de plantio direto (Figura 8). Além disso, a relação entre variáveis da umidade com variáveis e parâmetros da infiltração foi maior para o método do duplo anel que para Cornell e maior para a área de plantio direto que para plantio direto com subsolagem (Figuras 6 a 9).



Figura 6 - Correlação de Pearson entre variáveis da umidade do solo, de cobertura vegetal e parâmetros e variáveis da infiltração de água obtidas com duplo anel concêntrico em área de plantio direto.

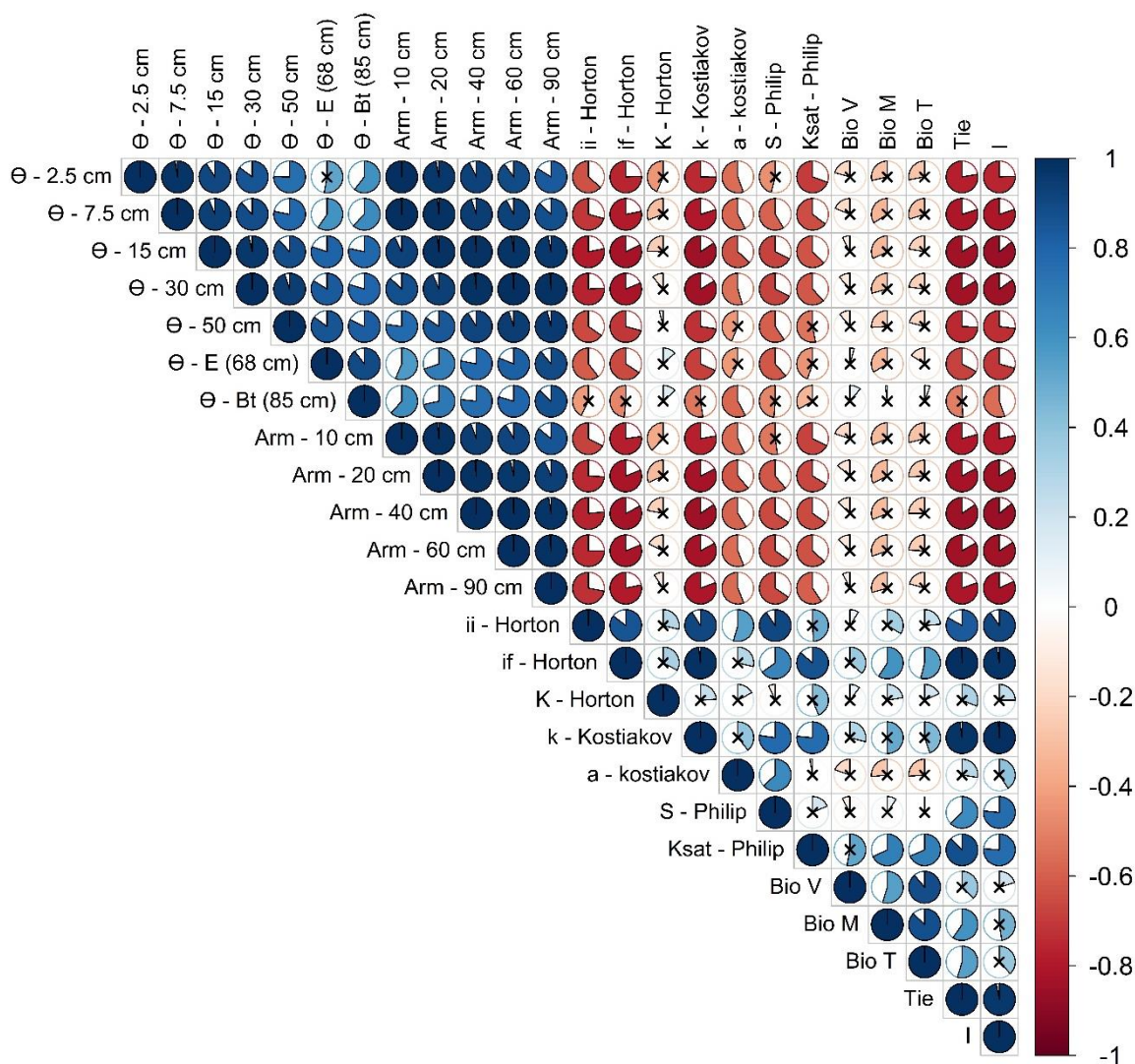


A presença de asterisco indica correlação não significativa. Bio V: Biomassa seca da parte aérea; Bio M: Biomassa seca morta e acomodada sobre o solo (resíduos); Bio T: biomassa seca total sobre o solo; Arm: Armazenamento de água desde a superfície do solo (mm);  $\Theta$  é a umidade volumétrica nas diferentes profundidades ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ); Tie: Taxa de infiltração estável observada; I: infiltração acumulada observada; ii, if, K, k, a, S e Ksat são parâmetros da curva de infiltração de água (eq. 9 a 11). Fonte: Elaborado pelo autor.

Para uma mesma condição estrutural de solo e método de medição da infiltração, a biomassa de plantas não apresentou correlação importante com as variáveis da infiltração (Figuras 6 a 9). No entanto, a biomassa de plantas no florescimento da soja foi maior no tratamento com subsolagem que no plantio direto nos dois anos de condução do estudo (teste de Tukey,  $p < 0,05$ ); em média, a biomassa de plantas no florescimento da soja foi de  $5,9 \text{ Mg ha}^{-1}$  no plantio direto e de  $8,2 \text{ Mg ha}^{-1}$  no plantio direto com subsolagem. No florescimento das espécies de inverno e nas demais épocas de avaliação, por outro lado, não houve efeito significativo da condição de solo na biomassa de plantas. Em média, o aporte de biomassa no

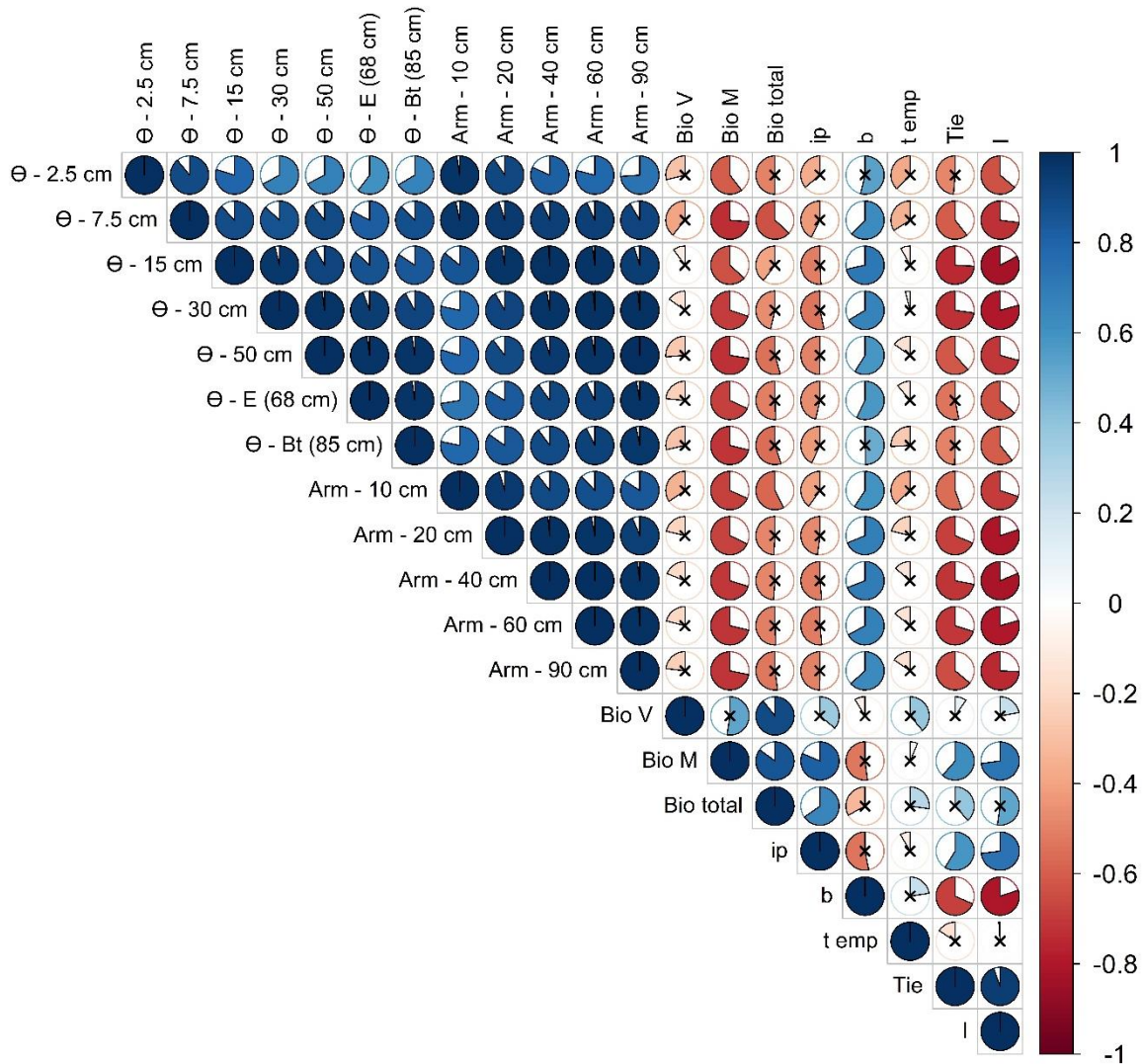
inverno foi de  $4,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ , e a subsolagem incrementou em 38% o aporte anual de biomassa em relação ao plantio direto.

Figura 7 - Correlação de Pearson entre variáveis da umidade do solo, de cobertura e parâmetros e variáveis da infiltração de água obtidas com duplo anel concêntrico em área de plantio direto com subsolagem.



A presença de asterisco indica correlação não significativa. Bio V: Biomassa seca da parte aérea; Bio M: Biomassa seca morta e acomodada sobre o solo (resíduos); Bio T: biomassa seca total sobre o solo; Arm: Armazenamento de água desde a superfície do solo (mm);  $\Theta$  é a umidade volumétrica nas diferentes profundidades ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ); Tie: Taxa de infiltração estável observada; I: infiltração acumulada observada; ii, if, K, k, a, S e Ksat são parâmetros da curva de infiltração de água (eq. 9 a 11). Fonte: Elaborado pelo autor.

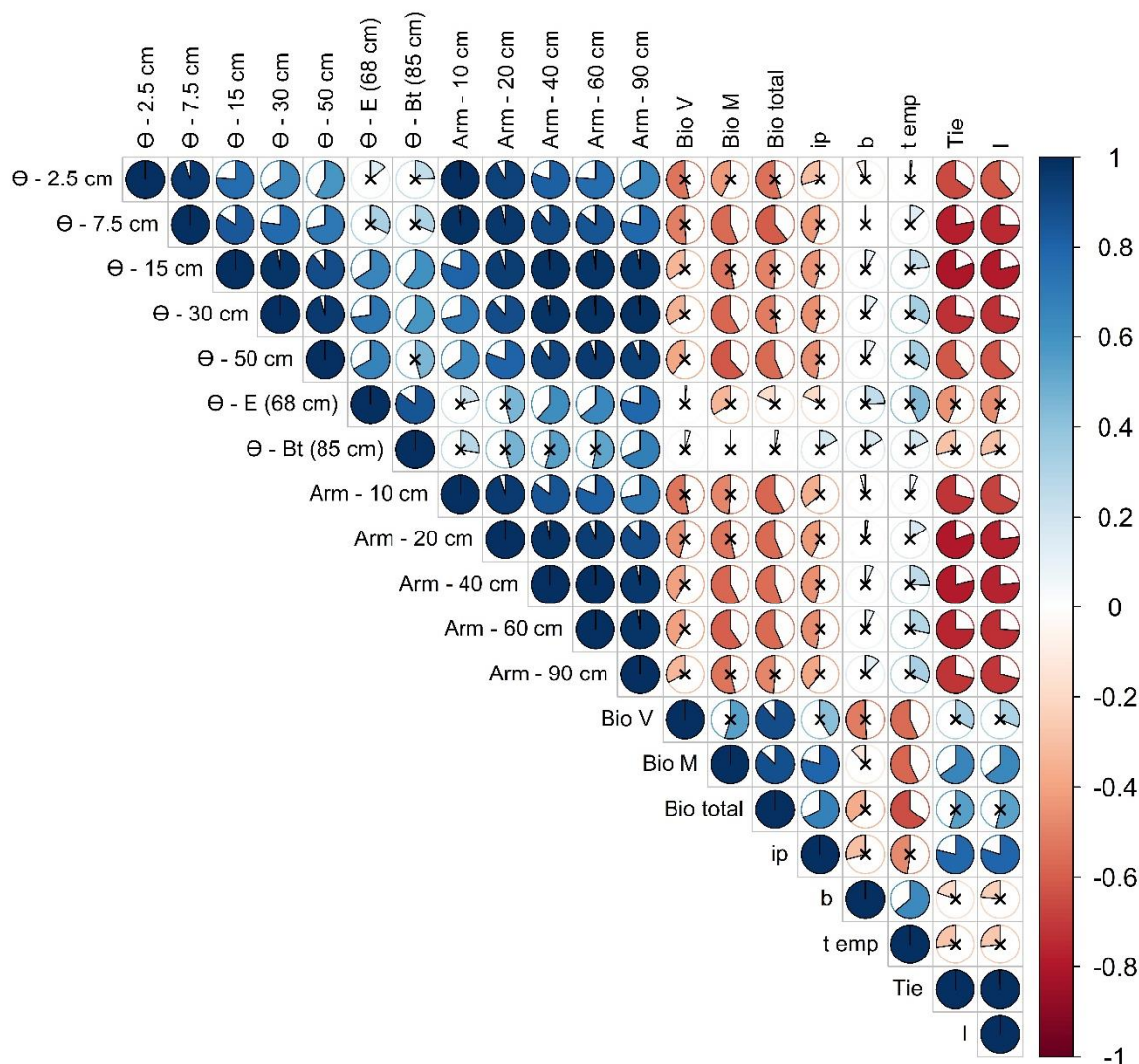
Figura 8 - Correlação de Pearson entre variáveis da umidade do solo, de cobertura e parâmetros e variáveis da infiltração de água medida com infiltrômetro de Cornell em área de plantio direto.



A presença de asterisco indica correlação não significativa. Bio V: Biomassa seca da parte aérea; Bio M: Biomassa seca morta e acomodada sobre o solo (resíduos); Bio T: biomassa seca total sobre o solo; Tie: Taxa de infiltração estável observada; I: infiltração acumulada; Arm: armazenamento de água desde a superfície do solo (mm);  $\Theta$  é a umidade volumétrica nas diferentes profundidades ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ); b e t emp (tempo para empocamento) são parâmetros da curva de infiltração (eq. 12); ip é a taxa de precipitação. Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 9 - Correlação de Pearson entre variáveis da umidade do solo, de cobertura e parâmetros e variáveis da infiltração de água medida com infiltrômetro de Cornell em área de plantio direto com subsolagem.

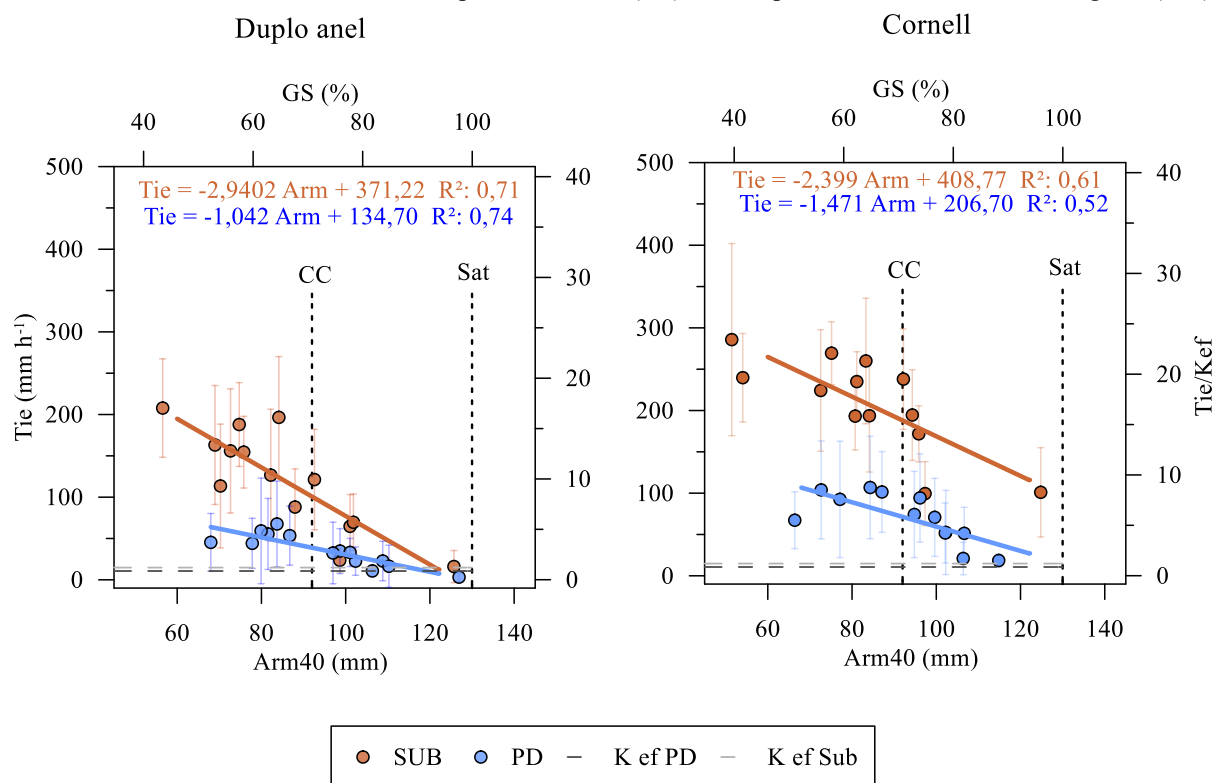


A presença de asterisco indica correlação não significativa. Bio V: Biomassa seca da parte aérea; Bio M: Biomassa seca morta e acomodada sobre o solo (resíduos); Bio T: biomassa seca total sobre o solo; Tie: Taxa de infiltração estável observada; I: infiltração acumulada; Arm: armazenamento de água desde a superfície do solo (mm);  $\Theta$  é a umidade volumétrica nas diferentes profundidades ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ); b e t emp (tempo para empoçamento) são parâmetros da curva de infiltração (eq. 12); ip é a taxa de precipitação. Fonte: Elaborado pelo autor.

Houve ajuste linear significativo entre Tie e Arm40 (Figura 10), cujo coeficiente angular depende da permeabilidade superficial e do método de medição (Figura 10). A Tie foi três vezes maior no tratamento com subsolagem comparativamente ao plantio direto e duas vezes maior quando determinada com Cornell comparativamente ao duplo anel (Figura 10). Contudo, o efeito do método e da permeabilidade superficial na Tie diminuiu com o aumento de Arm40. Com umidade antecedente próxima à saturação e, especialmente sob avaliação com duplo anel concêntrico, a Tie tendeu a valores mínimos e semelhantes entre os dois manejos, próximos numericamente à  $K_{ef}$  do perfil do solo, que sofreu pouco efeito do manejo ou época de

avaliação (Figura 10). Assim, a Tie foi menor nos períodos do ano em que o solo permaneceu mais úmido por mais tempo (Figura 3).

Figura 10 - Relação entre umidade antecedente e taxa de infiltração estável (Tie) medida com duplo anel e infiltrômetro de Cornell em área de plantio direto (PD) e de plantio direto com subsolagem (Sub).

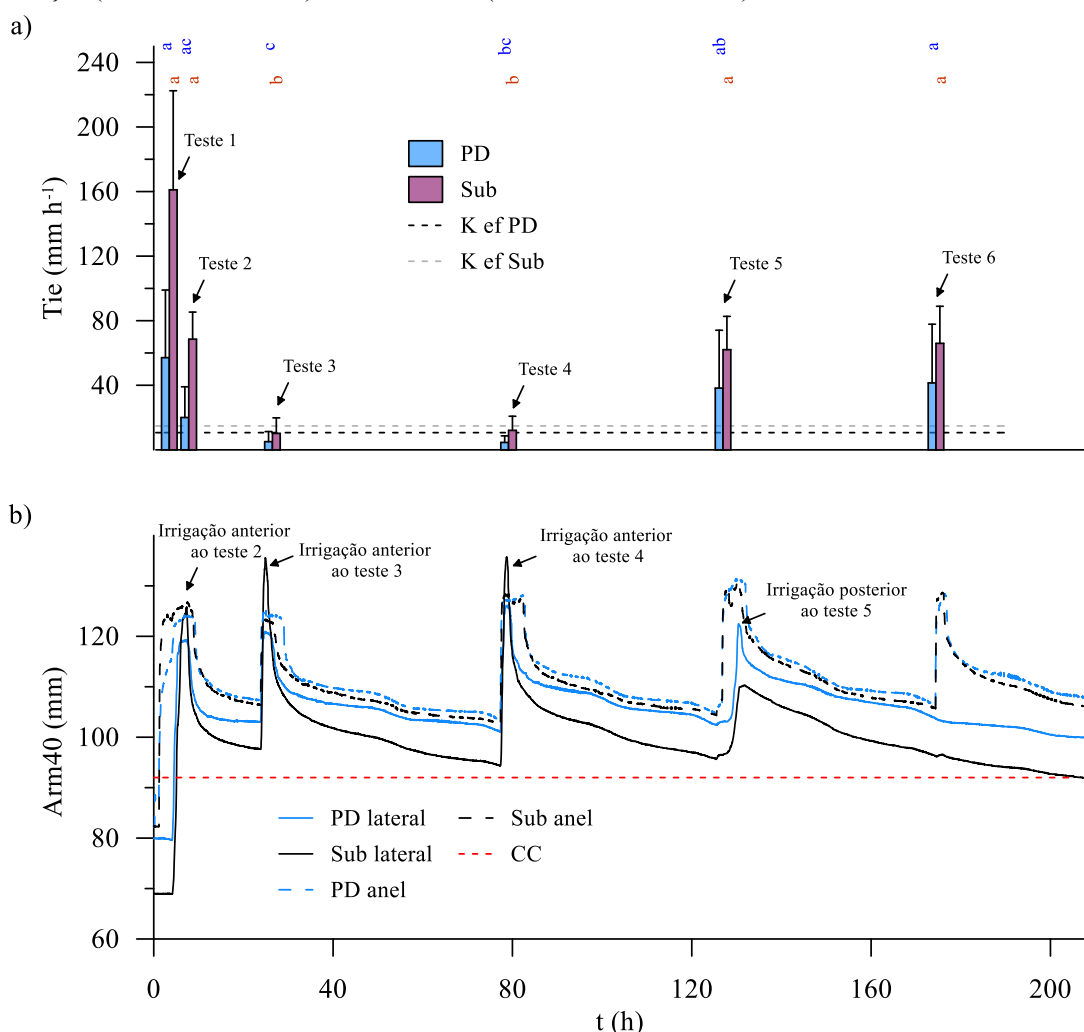


Cada ponto no gráfico representa a média de dez repetições. Arm40: Armazenamento na camada 0-40 cm previamente aos testes de infiltração; Kef: condutividade hidráulica vertical efetiva de perfil saturado determinada com Equação (13); Sat e CC se referem ao armazenamento na camada 0-40 cm na condição de solo saturado e de capacidade de campo, respectivamente; GS: Grau de saturação efetiva da camada 0-40 cm. As barras de erro representam o desvio padrão (variabilidade espacial da infiltração). Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos testes de infiltração iniciados sob umidade antecedente abaixo da capacidade de campo (Figura 11), o molhamento abaixo e ao lado dos pontos de infiltração com irrigação em área total diminuiu a Tie (Figura 11); a taxa de infiltração aproximou-se numericamente da Kef com a saturação do solo abaixo e ao lado dos pontos de infiltração (Figura 11). Por exemplo, considerando uma Tie inicial de 57 mm h<sup>-1</sup> no plantio direto e de 160 mm h<sup>-1</sup> no plantio direto com subsolagem (Figura 11) - que coincidiu com um Arm40 inicial de 70 a 85 mm - o primeiro molhamento adicional do solo com sistema de irrigação reduziu a Tie para 20 mm h<sup>-1</sup> no plantio direto e para 68 mm h<sup>-1</sup> no plantio direto com subsolagem (Figura 11). O segundo molhamento do solo com irrigação fez a Tie subsequente em ambos os tratamentos se aproximar numericamente da Kef (~12 a 15 mm h<sup>-1</sup>). Após o terceiro umedecimento do solo com o sistema de irrigação a Tie manteve-se numericamente igual à Kef (Figura 11). Posteriormente, na quinta

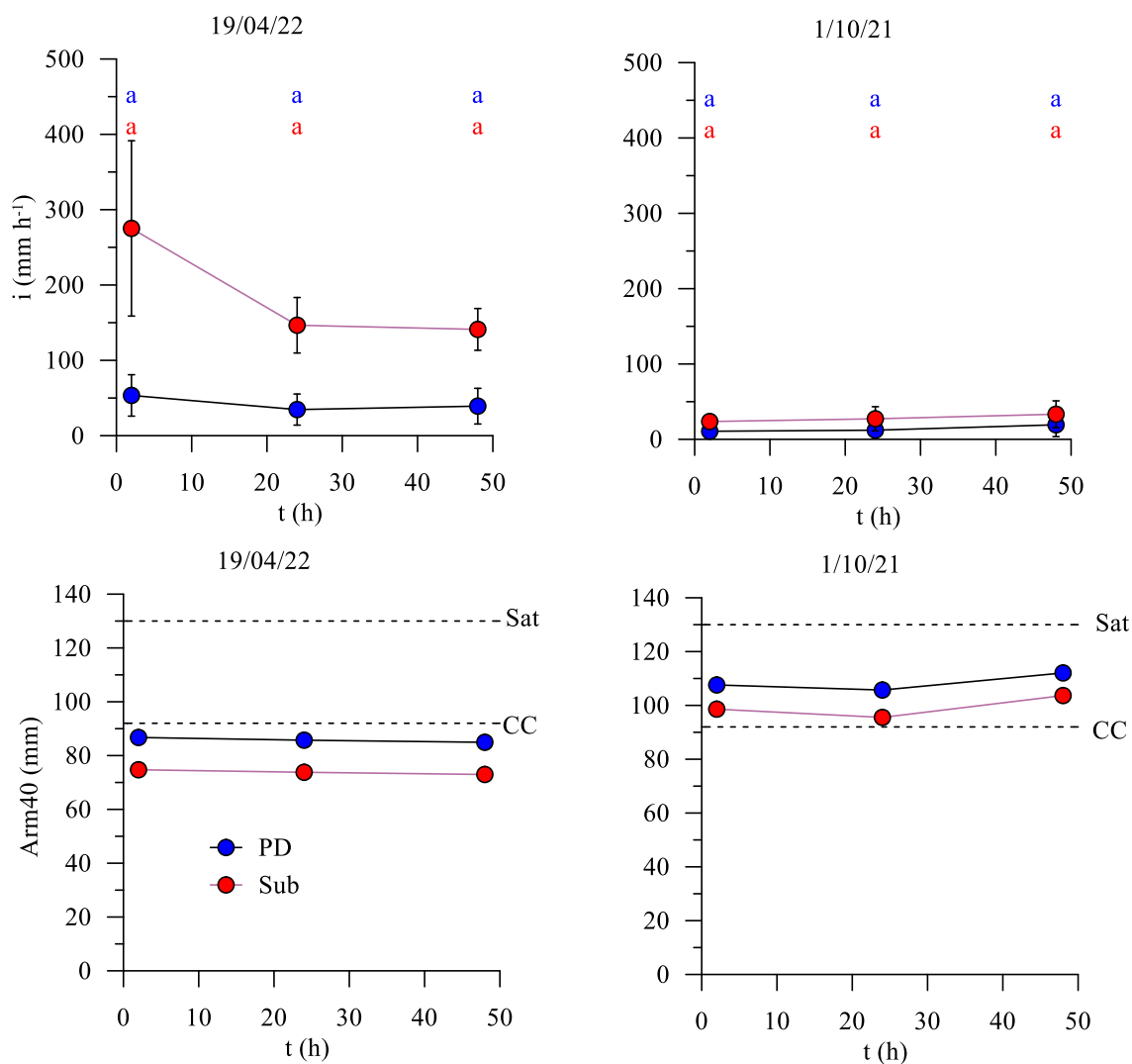
avaliação da infiltração na Figura 11 - que correspondeu aproximadamente 130 h desde a primeira avaliação, e em que não foi realizado umedecimento previamente à avaliação - a Tie foi de  $38 \text{ mm h}^{-1}$  no plantio direto e de  $62 \text{ mm h}^{-1}$  no plantio direto com subsolagem. Isso demonstra que há mudanças expressivas na taxa de infiltração de água (diminuição ou aumento) com mudanças importantes na umidade antecedente em curto espaço de tempo (Figura 7). Por outro lado, para uma mesma umidade inicial (acima ou abaixo da capacidade de campo), a ampliação no tempo de teste de 2h para 24 e 48h (Figura 12) não fez a Tie tender numericamente à Kef, embora tenha sido suficiente para o fluxo vertical atingir camadas subsuperficiais pouco permeáveis, como a camada 20-40 cm e o horizonte Bt (Figura 13).

Figura 11 - a) Taxa de infiltração estável (Tie) determinada com duplo anel concêntrico em área de plantio direto (PD) e de plantio direto com subsolagem (Sub) após vários ciclos de incremento na umidade do solo por sistema de irrigação; b) armazenamento de água na camada 0-40 cm (Arm40) determinada abaixo da projeção dos anéis de infiltração (PD anel e Sub anel) e ao lado deles (PD lateral e Sub lateral).



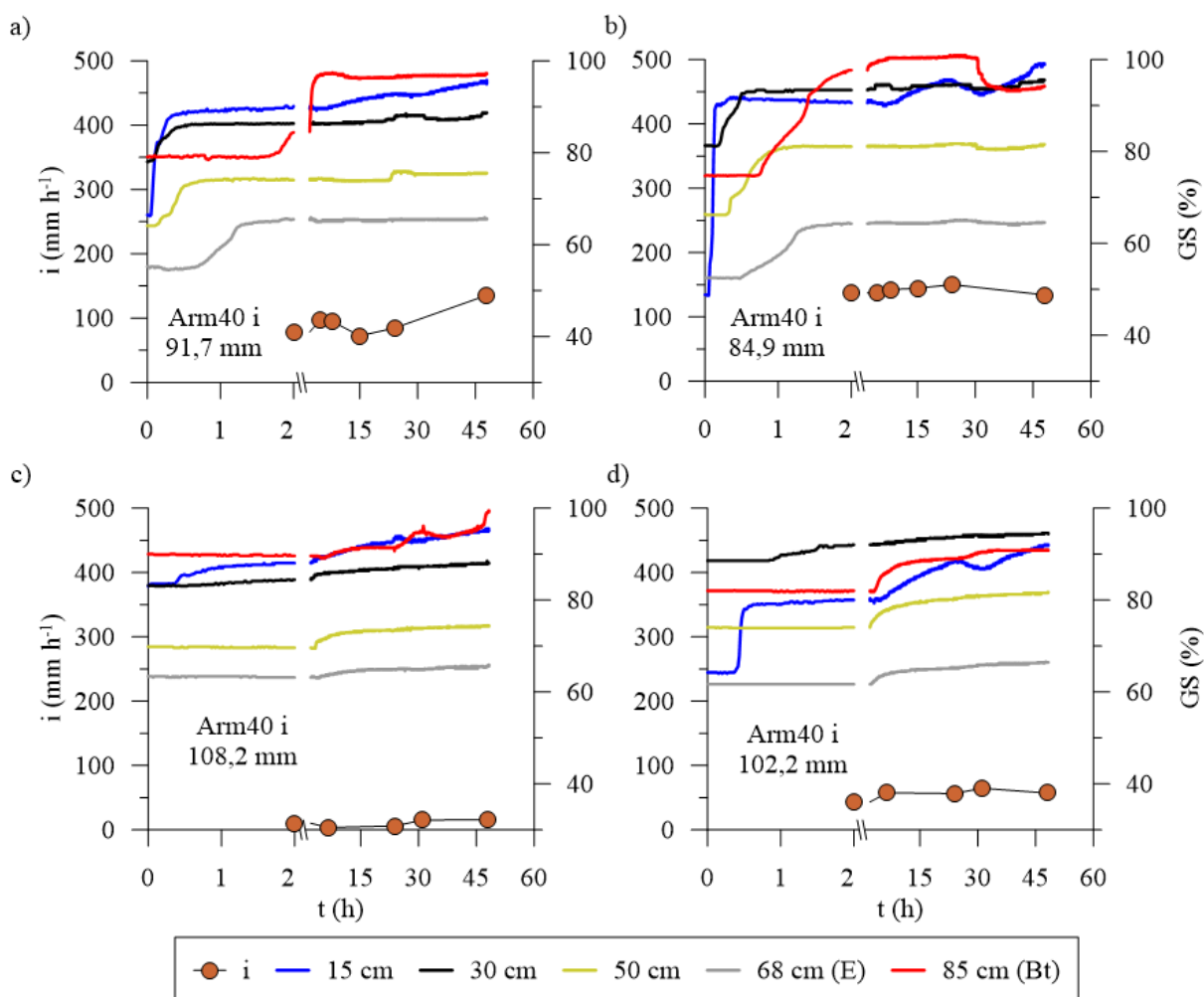
Kef: Condutividade hidráulica vertical efetiva de perfil saturado determinada com Equação (13); Sat e CC se referem ao armazenamento na camada 0-40 cm na condição de solo saturado e de capacidade de campo, respectivamente. Em cada condição de manejo (PD e Sub), médias de Tie com letras distintas diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras de erro no gráfico (a) representam o desvio padrão. Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Taxa de infiltração de água no solo ( $i$ ) determinada com duplo anel concêntrico às 2, 24 e 48 h após início do teste nas duas condições de solo (plantio direto - PD e plantio direto com subsolagem - Sub) e em duas datas.



Arm40: Armazenamento de água na camada 0-40 cm lateral aos pontos de infiltração; Sat e CC se referem ao armazenamento na camada 0-40 cm na condição de solo saturado e de capacidade de campo, respectivamente. Para cada condição de manejo e data, médias com letras distintas diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). A barra de erro nos gráficos de infiltração se refere ao desvio padrão. Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Taxa de infiltração de água ( $i$ ) determinada com duplo anel concêntrico e umidade do solo ( $\Theta$ ) no decorrer dos testes de infiltração de longa duração (até 48 h) em solo sob plantio direto (a, c) e plantio direto com subsolagem (b, d).



Arm40i: Armazenamento inicial na camada 0-40 cm; GS: Grau de saturação. Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6.6 DISCUSSÃO

### 6.6.1 Efeito da umidade antecedente

O decréscimo importante da Tie com o aumento na umidade antecedente (Figura 10) demonstra que a medição da infiltração com infiltrômetros não garante as condições de contorno utilizadas para definição da Tie, especialmente estrutura homogênea e fluxo unicamente vertical. Além disso, a magnitude de influência da umidade na Tie neste estudo foi maior que a verificada experimentalmente por outros autores. Por exemplo, para solo siltoso, na China, Cui et al. (2019) verificaram que a Tie foi influenciada predominantemente pela quantidade de raízes finas e sofreu pouco impacto da umidade antecedente. Para determinação



da infiltração, os autores utilizaram um método de fonte de água com distribuição linear sobre o solo, que consiste na medição da infiltração de acordo com o avanço do escoamento superficial no terreno, com auxílio de câmera digital; foi considerada taxa estável o fluxo após 75 min de teste. Em trabalho realizado em Cambissolo Húmico, em área de pastagem natural de altitude no Sul do Brasil, foi verificada correlação de apenas -0,39 entre umidade gravimétrica antecedente (camada 0-20 cm) e *Tie* medida com duplo anel (RAUBER et al., 2021). Possivelmente, a demarcação de pontos fixos de avaliação da infiltração neste estudo possibilitou isolar melhor o efeito da umidade perante demais fatores que nos demais trabalhos reportados. Os coeficientes de determinação (0,52 a 0,74) da relação entre umidade inicial e *Tie* neste trabalho (Figura 10) demonstram que, para um mesmo método e condição de solo, a grande parte da variabilidade temporal da *Tie* é explicada pela umidade antecedente.

Aumento na taxa de infiltração inicial e na infiltração acumulada em decorrência da diminuição da umidade antecedente é esperado devido ao aumento no gradiente hidráulico inicial (CUI et al., 2019; LIU et al., 2019; WEI et al., 2022; YANG; ZHANG; PAN, 2020). Isso é corroborado pelo maior coeficiente angular (em módulo) da umidade antecedente com as taxas de infiltração iniciais do que com *Tie* (Tabelas 3 e 4). Por exemplo, para duplo anel e área de plantio direto, o coeficiente angular da relação entre taxa de infiltração e *Arm*40 foi -4,64 para o estágio inicial da curva de infiltração (0-10 min) e de -1,04 para o estágio final (*Tie*) (Tabela 3); isso corresponde uma diferença de 4,5 vezes. Além disso, a sortividade (parâmetro S-Philip) aumentou com a diminuição da umidade antecedente (Figuras 6 e 7). No decorrer do processo de infiltração, diminui a influência da umidade antecedente nas variáveis da infiltração, especialmente para as medições realizadas com duplo anel (Tabelas 3 e 4), o que também corrobora com demais autores (LIU et al., 2019). Mesmo assim, chama atenção o expressivo efeito da umidade inicial na *Tie* (Figura 10; Tabelas 3 e 4). Por exemplo, para duplo anel e área subsolada, na menor umidade antecedente (grau de saturação de ~40%), a *Tie* correspondente foi ~15 vezes maior que a *Tie* avaliada sob perfil saturado (Figura 10). Este estudo demonstra que há claramente um deslocamento numérico completo da curva de infiltração conforme a umidade inicial é alterada; maior umidade antecedente diminui a taxa de infiltração de todos os estágios do processo (Figuras 6 a 9).

Tabela 3 - Coeficientes angulares (Coef) de ajustes lineares entre variáveis da infiltração e variáveis de conteúdo de água no solo para testes realizados com duplo anel concêntrico em diferentes condições de manejo.

| Variável preditora | Tie                           |     | i10    |     | i30    |     | i60    |     | i90    |     | i120   |     | I      |     |
|--------------------|-------------------------------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
|                    | Coef                          | sig | Coef   | sig | Coef   | sig | Coef   | sig | Coef   | sig | Coef   | sig | Coef   | sig |
| Plantio direto     |                               |     |        |     |        |     |        |     |        |     |        |     |        |     |
| Arm10              | -2,76                         | *** | -11,38 | *** | -5,34  | *** | -3,68  | *** | -2,72  | *** | -2,93  | *** | -8,34  | *** |
| Arm20              | -1,61                         | *** | -6,90  | *** | -3,21  | *** | -2,20  | *** | -1,59  | *** | -1,71  | *** | -4,97  | *** |
| Arm40              | -1,04                         | *** | -4,64  | *** | -2,15  | *** | -1,44  | *** | -1,04  | *** | -1,09  | *** | -3,27  | *** |
| Arm60              | -0,82                         | *** | -3,81  | *** | -1,76  | *** | -1,16  | *** | -0,83  | *** | -0,86  | *** | -2,64  | *** |
| Arm90              | -0,50                         | *** | -2,52  | *** | -1,15  | *** | -0,73  | *** | -0,52  | *** | -0,52  | *** | -1,69  | *** |
| Θ-2,5              | -209                          | *** | -841   | *** | -394   | *** | -275   | *** | -206   | *** | -223   | *** | -624   | *** |
| Θ-7,5              | -367                          | *** | -1570  | *** | -737   | *** | -500   | *** | -364   | *** | -387   | *** | -1133  | *** |
| Θ-15               | -341                          | *** | -1512  | *** | -700   | *** | -474   | *** | -336   | *** | -359   | *** | -1069  | *** |
| Θ-30               | -532                          | *** | -2523  | *** | -1157  | *** | -754   | *** | -537   | *** | -548   | *** | -1726  | *** |
| Θ-50               | -669                          | *** | -3622  | *** | -1653  | *** | -1007  | *** | -720   | *** | -676   | *** | -2356  | *** |
| Θ-E                | -346                          | **  | -2096  | *** | -944   | *** | -548   | *** | -383   | *** | -347   | **  | -1303  | *** |
| Θ-Bt               | -231                          | **  | -1390  | *** | -633   | *** | -368   | *** | -252   | **  | -237   | **  | -871   | *** |
| -                  | Plantio direto com subsolagem |     |        |     |        |     |        |     |        |     |        |     |        |     |
| Arm10              | -10,61                        | *** | -31,02 | *** | -17,31 | **  | -11,87 | *** | -10,54 | *** | -10,87 | *** | -26,10 | *** |
| Arm20              | -5,56                         | *** | -17,31 | *** | -9,65  | *** | -6,36  | *** | -5,53  | *** | -5,70  | *** | -13,97 | *** |
| Arm40              | -2,94                         | *** | -9,37  | *** | -5,25  | *** | -3,38  | *** | -2,92  | *** | -2,99  | *** | -7,42  | *** |
| Arm60              | -2,22                         | *** | -7,05  | *** | -3,99  | *** | -2,54  | *** | -2,18  | *** | -2,24  | *** | -5,57  | *** |
| Arm90              | -1,61                         | *** | -5,28  | *** | -2,97  | *** | -1,87  | *** | -1,58  | *** | -1,63  | *** | -4,10  | *** |
| Θ-2,5              | -976                          | *** | -2721  | **  | -1485  | **  | -1063  | *** | -970   | *** | -989   | *** | -2369  | *** |
| Θ-7,5              | -1130                         | *** | -3472  | *** | -1979  | *** | -1301  | *** | -1121  | *** | -1172  | *** | -2820  | *** |
| Θ-15               | -1081                         | *** | -3558  | *** | -1981  | *** | -1264  | *** | -1078  | *** | -1110  | *** | -2773  | *** |
| Θ-30               | -1166                         | *** | -3802  | *** | -2141  | *** | -1344  | *** | -1157  | *** | -1173  | *** | -2953  | *** |
| Θ-50               | -1564                         | *** | -4936  | *** | -2896  | *** | -1763  | *** | -1490  | *** | -1550  | *** | -3843  | *** |
| Θ-E                | -1463                         | *** | -5204  | *** | -2855  | **  | -1743  | *** | -1430  | **  | -1477  | *** | -3835  | *** |
| Θ-Bt               | -946                          | **  | -3502  | **  | -1919  | *   | -1164  | **  | -900   | *   | -926   | **  | -2576  | **  |

Tie é a taxa de infiltração estável ( $\text{mm h}^{-1}$ ), e i10, i30, i60, i90 e i120 é a taxa de infiltração média verificada nos intervalos 0-10; 10-30; 30-60; 60-90; e 90-120 min, respectivamente ( $\text{mm h}^{-1}$ ); I é a infiltração acumulada (mm); Arm representa o armazenamento (mm) desde a superfície do solo até cada profundidade indicada, enquanto  $\Theta$  é a umidade volumétrica nas diferentes profundidades ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ). O número após os símbolos Arm e  $\Theta$  indicam a camada ou profundidade, em cm. Sig é a significância: \*\*\*( $p<0,0001$ ); \*\*( $p<0,001$ ); \* ( $p<0,05$ ). Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Coeficientes angulares (Coef) de ajustes lineares entre variáveis da infiltração e variáveis de conteúdo de água no solo para testes realizados com infiltrômetro de Cornell em diferentes condições de manejo.

| Variável preditora            | Tie   |     | i10    |     | i30   |     | i60   |     | I     |     |
|-------------------------------|-------|-----|--------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
|                               | Coef  | sig | Coef   | sig | Coef  | sig | Coef  | sig | Coef  | sig |
| Plantio direto                |       |     |        |     |       |     |       |     |       |     |
| Arm10                         | -4,56 | *   | -11,09 | **  | -8,69 | *** | -5,08 | **  | -7,35 | *** |
| Arm20                         | -2,49 | **  | -5,43  | **  | -4,36 | *** | -2,65 | **  | -3,73 | *** |
| Arm40                         | -1,47 | **  | -3,11  | *** | -2,49 | *** | -1,52 | **  | -2,13 | *** |
| Arm60                         | -1,09 | **  | -2,34  | **  | -1,87 | *** | -1,12 | **  | -1,59 | *** |
| Arm90                         | -0,62 | **  | -1,39  | **  | -1,09 | *** | -0,64 | **  | -0,92 | *** |
| Θ-2,5                         | -357  | *   | -914   | **  | -713  | *** | -415  | *   | -600  | **  |
| Θ-7,5                         | -529  | *   | -1221  | **  | -961  | *** | -565  | **  | -817  | *** |
| Θ-15                          | -453  | **  | -924   | *** | -754  | *** | -468  | *** | -649  | *** |
| Θ-30                          | -650  | **  | -1323  | **  | -1059 | *** | -651  | **  | -907  | *** |
| Θ-50                          | -780  | **  | -1767  | **  | -1369 | *** | -783  | **  | -1150 | *** |
| Θ-E                           | -411  | *   | -986   | **  | -763  | *** | -417  | *   | -633  | **  |
| Θ-Bt                          | -323  | *   | -819   | **  | -613  | *** | -335  | *   | -507  | **  |
| Plantio direto com subsolagem |       |     |        |     |       |     |       |     |       |     |
| Arm10                         | -8,17 | **  | -7,03  | **  | -7,70 | **  | -8,19 | **  | -7,91 | **  |
| Arm20                         | -4,84 | *** | -4,24  | **  | -4,67 | *** | -4,89 | *** | -4,77 | *** |
| Arm40                         | -2,40 | *** | -2,11  | **  | -2,36 | *** | -2,45 | *** | -2,40 | *** |
| Arm60                         | -1,68 | *** | -1,48  | **  | -1,68 | **  | -1,72 | *** | -1,69 | **  |
| Arm90                         | -1,28 | **  | -1,13  | **  | -1,30 | **  | -1,33 | *** | -1,30 | **  |
| Θ-2,5                         | -637  | **  | -547   | *   | -590  | **  | -634  | **  | -609  | **  |
| Θ-7,5                         | -1053 | *** | -908   | **  | -1013 | **  | -1064 | *** | -1036 | **  |
| Θ-15                          | -930  | *** | -827   | **  | -917  | *** | -948  | *** | -929  | *** |
| Θ-30                          | -848  | **  | -748   | **  | -852  | **  | -874  | *** | -858  | **  |
| Θ-50                          | -953  | **  | -855   | *   | -1001 | **  | -998  | **  | -990  | **  |
| Θ-E                           | -883  | *   | -744   |     | -954  | *   | -952  | *   | -944  | *   |
| Θ-Bt                          | -478  |     | -422   |     | -511  |     | -517  |     | -500  |     |

Tie é a taxa de infiltração estável ( $\text{mm h}^{-1}$ ), e i10, i30, e i60 é a taxa de infiltração média verificada nos intervalos 0-10; 10-30; e 30-60 min respectivamente ( $\text{mm h}^{-1}$ ); I é a infiltração acumulada (mm); Arm representa o armazenamento (mm) desde a superfície do solo, enquanto  $\Theta$  é a umidade volumétrica nas diferentes profundidades ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ). O número após os símbolos Arm e  $\Theta$  indicam a camada ou profundidade, em cm. Sig é a significância: \*\*\*( $p < 0,0001$ ); \*\*( $p < 0,001$ ); \* ( $p < 0,05$ ).

A mudança expressiva na umidade do solo entre as diferentes épocas do ano (Figura 3) altera de forma importante as variáveis da infiltração de água no solo medidas com infiltrômetros (Figura 10). Segundo autores (BODNER et al., 2013; CASTIGLIONI et al., 2018), porém, de forma autocorrelacionada com os diferentes padrões de umidade do solo influenciados pela sazonalidade, pode haver mudanças na estrutura do solo que impactam parâmetros hidráulicos do solo. Por exemplo, no inverno, além da maior umidade, a velocidade dos ciclos de umedecimento e secamento é menor, o que pode influenciar o arranjo do sistema poroso e conseqüentemente a infiltração. Contudo, o expressivo decréscimo da Tie com o molhamento adicional do solo com sistema de irrigação (Figura 11) reflete que, para uma

mesma época, a umidade antecedente altera de forma importante a infiltração. Paralelamente, a densidade e distribuição de poros (discutido a seguir, Figuras 14 e 15) não sofreu um efeito importante da época de avaliação. Talvez devido ao grau de compactação relativamente alto do solo de estudo, sobretudo em 20 - 40 cm, não houve mudanças sazonais importantes da estrutura do solo que poderiam confundir a relação da umidade inicial com a *Tie*.

A desprezível redução da taxa de infiltração com a ampliação no tempo de teste com duplo anel (2 h para 24 e 48 h) (Figura 12) - especialmente nos pontos de alta infiltração (como área subsolada em 19/04/22) - sugere que o principal “gargalo” da infiltração pontual medida com infiltrômetros é o componente lateral do fluxo se a umidade inicial estiver suficientemente baixa e/ou a permeabilidade superficial suficientemente alta (Figura 12). Por exemplo, em perfil de solo com camadas superficiais mais permeáveis à água que as subsuperficiais, quando o fluxo vertical na infiltração medida com infiltrômetros atinge as camadas mais restritivas (como a de 20-40 cm), a existência de uma maior permeabilidade no sentido lateral que vertical potencializa o fluxo lateral se o gradiente hidráulico lateral - determinado especialmente pela umidade antecedente (potencial matricial) - for suficientemente alto. Por outro lado, isso possivelmente seria minimizado sob existência de crosta superficial ou fluxo em coluna vertical.

A umidade antecedente nas profundidades 7,5 a 15 cm influenciou mais (maior coeficiente angular, em módulo) as variáveis da infiltração que a umidade antecedente na profundidade 2,5 cm (Tabelas 3 e 4). Paralelamente, a profundidade de 15 cm foi a que apresentou a maior correlação entre umidade antecedente e *Tie* (Figuras 6 a 7). Logo, isso parece confirmar que a maior magnitude da infiltração lateral ocorre sobre a camada 20-40 cm (mais restritiva que as camadas subjacentes). Por outro lado, para condição de solo inicialmente saturado ou quase saturado, a *Tie* tendeu numericamente à  $K_{ef}$ , especialmente quando medida com duplo anel, o que sugere que a infiltração lateral é minimizada ou desprezível nessas condições, devido ao baixo gradiente hidráulico lateral. Para o mesmo solo e área experimental deste estudo, autores (BOENO et al., 2021) estimaram que a infiltração lateral pode representar 90% do fluxo total quando medido com duplo anel na superfície do solo e sob umidade antecedente na capacidade de campo.

### **6.6.2 Efeito da umidade condicionado pela permeabilidade superficial**

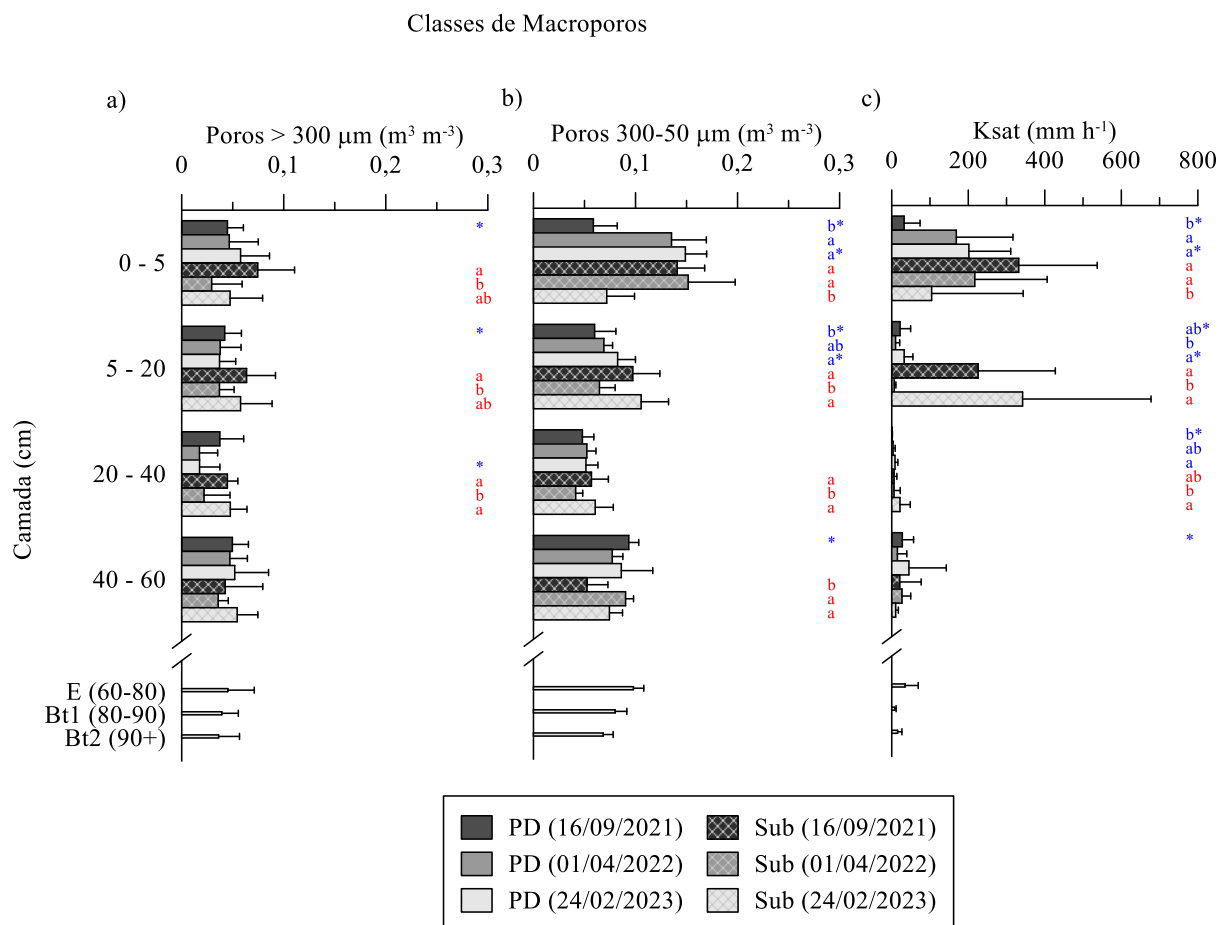
Menor umidade antecedente aumentou a amplitude de diferença na *Tie* entre as condições estruturais de solo (Figura 10), o que demonstra que o fluxo é mais proporcional à

permeabilidade das camadas superficiais na medida que a umidade inicial diminui. A subsolagem, por exemplo, aumentou em cerca de 10 vezes a permeabilidade da camada 5-20 cm (Tabela 2; Figura 14), o que possivelmente potencializa a infiltração lateral. Outros autores (LEWIS et al., 2021) também verificaram forte relação da infiltração pontual (medida com duplo anel e infiltrômetro de Cornell) com condutividade hidráulica de solo saturado da superfície do solo.

A melhoria da permeabilidade do solo à água pela subsolagem decorre do aumento da quantidade de macroporos (Figuras 14 e 15), especialmente os com tamanho entre 300-50  $\mu\text{m}$ . Além disso, houve efeito residual da subsolagem na macroporosidade e principalmente na condutividade hidráulica de solo saturado (Figuras 14 e 15) até o final do período de estudo, o que manteve o efeito na infiltração durante todo o período de estudo. A magnitude de diferença na Tie entre os tratamentos com e sem subsolagem dependeu predominantemente da umidade antecedente (Figura 6).

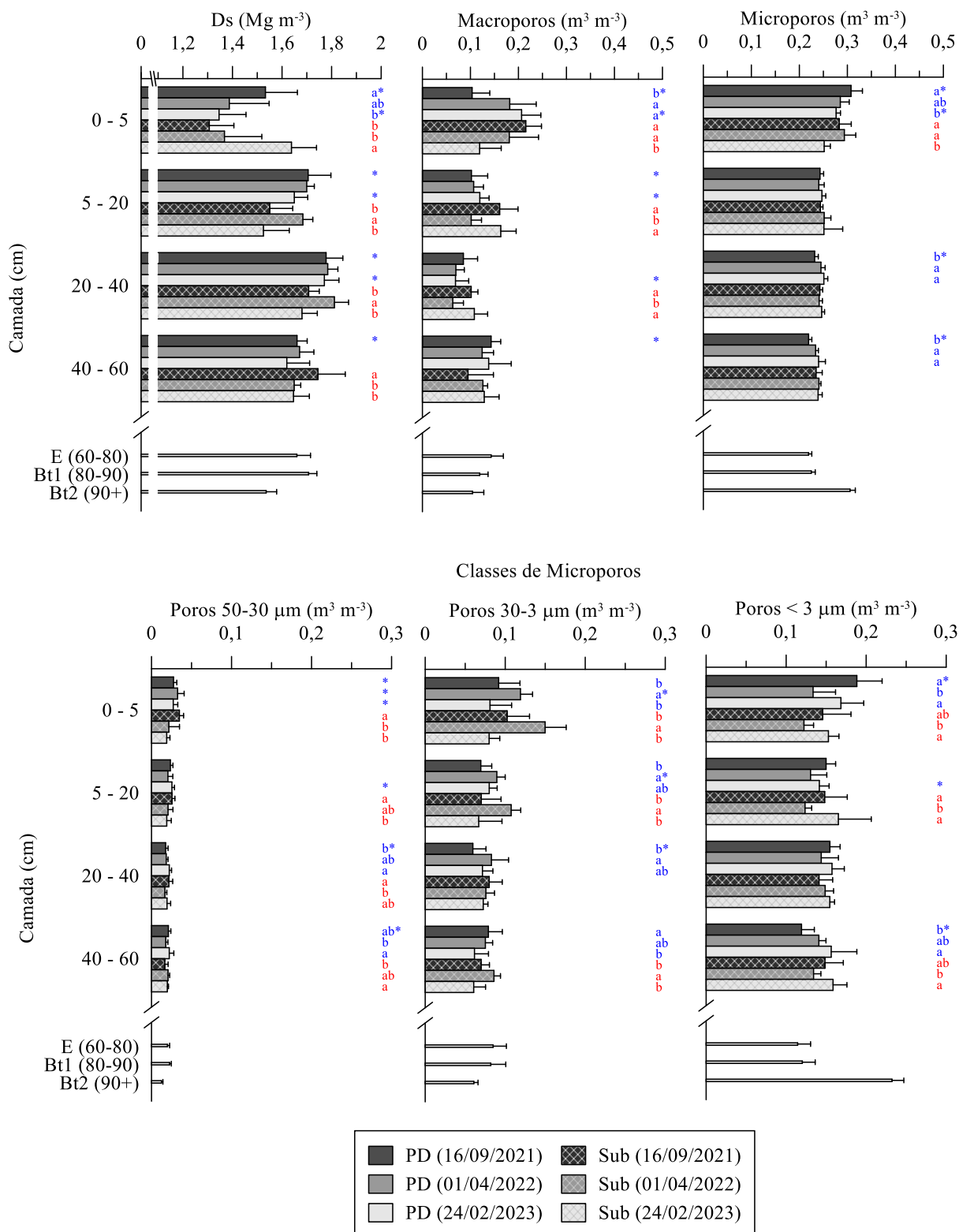
O efeito residual relativamente alto da subsolagem na estrutura do solo (Figuras 14 e 15) pode ter ocorrido por: (i) efeito do tipo do solo; (ii) subsolagem em dois sentidos (elevado grau de mobilização); e/ou (iii) a área ter permanecido sem tráfego de máquinas durante o experimento, assim evitando compactação. Na segunda data de avaliação das propriedades físicas houve pouca diferença entre os manejos na densidade e distribuição de poros (Figuras 14 e 15), provavelmente porque a coleta em área subsolada por vezes ocorrer preferencialmente nos locais menos mobilizados (KAISER et al., 2009). Além disso, o efeito residual da mobilização do solo é dependente da variável resposta; é relativamente baixo para densidade e porosidade (até 6 meses) e relativamente alto para propriedades de fluxo (até 24 meses) (DRESCHER et al., 2016). De qualquer forma, as medidas de infiltração (Figura 6) e a dinâmica temporal do armazenamento de água no solo (Figura 3) (menor armazenamento na condição com subsolagem) expressaram um efeito residual da subsolagem de no mínimo 20 meses.

Figura 14 - Quantidade de poros em duas classes de macroporos (a, b) e condutividade hidráulica de solo saturado (Ksat) (c), em diferentes camadas, condições de manejo e épocas de avaliação.



PD: plantio direto; Sub: Plantio direto com Subsolação. Para cada camada e condição de manejo, médias com letras diferentes diferem as épocas de avaliação pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). A presença de asterisco indica diferença entre as condições de manejo para cada camada e época de avaliação pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Para os horizontes E, Bt1 e Bt2, estão apresentadas as médias de cada variável, desconsiderando o efeito do manejo e da época. A barra de erro se refere ao desvio padrão. Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Densidade (Ds) e distribuição de poros em diferentes camadas, condições de manejo e épocas de avaliação.



PD: plantio direto; Sub: Plantio direto com Subsolação. Para cada camada e condição de manejo, médias com letras diferentes diferem as épocas de avaliação pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). A presença de asterisco indica diferença entre as condições de manejo para cada camada e época de avaliação pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Para os horizontes E, Bt1 e Bt2, estão apresentadas as médias de cada variável, desconsiderando o efeito do manejo e da época. A barra de erro se refere ao desvio padrão. Fonte: Elaborado pelo autor.

### 6.6.3 Efeito da umidade condicionado pelo método de medição

A maior tendência de fluxo lateral na infiltração medida com Cornell (devido ao anel único) se sobrepôs à maior tendência de fluxo tridimensional no duplo anel (devido a maior carga hidráulica sobre o solo) (Figura 10). Contudo, se (i) se anulou o fluxo lateral para anel único utilizando equações (REYNOLDS; ELRICK, 1990; STEWART; ABOU NAJM, 2018), e (ii) assumido que a infiltração medida com duplo anel é vertical e não requer ajuste, a condutividade hidráulica de solo saturado estimada seria similar entre os métodos, assim corroborando com Lewis et al. (2021). Por outro lado, Zwirnes et al. (2013) verificaram maior Tie quando medida com duplo anel em comparação à medida com Cornell. De qualquer forma, para ambas as metodologias, a Tie média é expressivamente maior que a Kef. Na capacidade de campo, por exemplo, condição na qual estudos recentes estudaram a infiltração com infiltrômetros em condições tropicais (BOENO et al., 2021; RAUBER et al., 2021) a relação da Tie com a Kef (Tie/Kef) nas áreas com plantio direto e plantio direto com subsolagem é de  $\sim 3,5$  e  $\sim 8$ , respectivamente (Figura 10); isso extrapola a capacidade de estimativa da infiltração vertical utilizando modelos para anular o fluxo lateral, que requerem meio homogêneo para serem devidamente aplicados. Coincidentemente, a relação entre condutividade hidráulica vertical efetiva de solo saturado para 0-20 cm com condutividade hidráulica vertical efetiva de perfil saturado (0-150 cm), foi de 2,8 para plantio direto e de 9,9 para plantio direto com subsolagem. Por outro lado, o aumento da umidade antecedente aumenta a eficiência do anel externo em controlar o fluxo lateral na infiltração medida com duplo anel (Figura 10), o que demonstra um efeito importante do método para caracterizar adequadamente a infiltração vertical, especialmente na área com subsolagem.

### 6.6.4 Efeito da umidade condicionado pelo tempo de medição

Em geral, a duração de 2 h dos testes com duplo anel foi suficiente para o fluxo atingir 20-40 cm (Figura 13), camada mais restritiva do perfil ao fluxo da água com base na condutividade hidráulica de solo saturado. Tempo de teste de até 5 h foi suficiente para o fluxo atingir o horizonte Bt nos pontos com taxa de infiltração moderada a alta (Figura 13). Possivelmente, algum tipo de fluxo preferencial via macroporos (NIMMO, 2021) contribuiu para o avanço relativamente rápido da frente de umedecimento (Figura 13); ao mesmo tempo, não ocorreu saturação do solo com a infiltração pontual, especialmente nas camadas subjacentes à de 20-40 cm (Figura 13), possivelmente por decorrência da grande resistência hidráulica dessa



camada ao fluxo. De qualquer forma, mesmo aumentando o tempo de teste de 2 h para 24 e 48 h, a taxa de infiltração não tendeu à  $K_{ef}$  nos pontos com infiltração relativamente alta (Figura 12), indicando não haver dissipação suficiente do gradiente de energia lateral para o fluxo tender à condutividade hidráulica vertical efetiva de perfil saturado (Figura 12). Ao mesmo tempo, sob umidade antecedente suficientemente baixa, não é possível incorporar na  $T_{ie}$  obtida com duplo anel a limitação de permeabilidade de camadas profundas.

## 6.7 CONCLUSÕES

A taxa de infiltração estável de água no solo medida com infiltrômetros diminui com o aumento da umidade antecedente do solo. Além disso, a influência da umidade antecedente na taxa de infiltração estável depende da permeabilidade das camadas superficiais e do método de medição. Por outro lado, ampliação no tempo de teste com duplo anel de 2 h para 48 h não incorpora na taxa de infiltração estável a resistência hidráulica de camadas profundas.

A umidade antecedente do solo, especialmente na camada de 0-40 cm, é uma condicionante importante da taxa de infiltração estável obtida com infiltrômetros, portanto requer ser devidamente caracterizada para complementar os dados de infiltração pontual obtidos experimentalmente.

Em solo estratificado quanto à permeabilidade à água, é necessário perfil de solo inicialmente saturado ou quase saturado para caracterizar experimentalmente a infiltração vertical com infiltrômetros. Não havendo essa condição, o fluxo de água em solo saturado e em única direção é melhor expressado pela condutividade hidráulica vertical efetiva para perfil saturado determinada com equação de Darcy para  $N$  camadas.

A subsolagem aumenta a permeabilidade à água da superfície do solo, mas não influencia a infiltração vertical sob solo inicialmente saturado.

O método do duplo anel é mais apropriado que o de Cornell para determinar infiltração vertical, especialmente se a permeabilidade da superfície do solo for suficientemente alta, como em áreas de plantio direto escarificadas ou subsoladas.

## REFERÊNCIAS

ALVES, M. C.; CABEDA, M. S. V. Infiltração de água em um podzólico vermelho-escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 753–761, 1999.

- BODNER, G. et al. Natural and management-induced dynamics of hydraulic conductivity along a cover-cropped field slope. **Geoderma**, v. 146, n. 1–2, p. 317–325, 2008.
- BODNER, G. et al. Environmental and management influences on temporal variability of near saturated soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 204–205, p. 120–129, 2013.
- BOENO, D. et al. Estimating lateral flow in double ring infiltrometer measurements. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, p. 1–12, 2021.
- BOUWER, H. Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. v. 9p. 825–844.
- CASTIGLIONI, M. G. et al. Seasonal variation of soil aggregate stability, porosity and infiltration during a crop sequence under no tillage. **Terra Latinoamericana**, v. 36, n. 3, p. 199–206, 2018.
- CÍSLEROVÁ, M.; ŠIMŮNEK, J.; VOGEL, T. Changes of steady-state infiltration rates in recurrent ponding infiltration experiments. **Journal of Hydrology**, v. 104, n. 1–4, p. 1–16, 1988.
- CUI, Z. et al. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils. **Journal of Hydrology**, v. 578, p. 124023, 2019.
- DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, p. 159–168, 2016.
- ES, H. VAN; SCHINDELBECK, R. Field Procedures and Data Analysis for the Cornell Sprinkle Infiltrometer. In: [s.l.] Cornell University. College of Agriculture and Life Sciences. Department of Crop and Soil Sciences Research Series R03-01, 2003.
- FATEHNIA, M.; TAWFIQ, K.; YE, M. Estimation of saturated hydraulic conductivity from double-ring infiltrometer measurements. **European Journal of Soil Science**, v. 67, n. 2, p. 135–147, 2016.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Elsevier, 2004.
- HORTON, R. E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 5, p. 399–417, 1941.
- KAISER, D. R. et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 4, p. 845–855, 2009.
- KOSTIAKOV, A. N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. **Soviet Soil Science**, v. 14, p. 17–21, 1932.
- LEWIS, J. D. et al. Comparison of cornell sprinkle infiltrometer and double-ring infiltrometer methods for measuring steady infiltration Rate. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 2021.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 3. ed. [s.l.] Edusp, 2018.
- LIU, Y. et al. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. **Catena**, v. 182, n. January 2018, 2019.

- NIMMO, J. R. The processes of preferential flow in the unsaturated zone. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 1, p. 1–27, 2021.
- OGDEN, C. B.; VAN ES, H. M.; SHINDELBECK, R. Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 61, p. 1041–1043, 1997.
- PEDRON, F. DE A. et al. Clay mineralogy of subtropical soils under long-term organic fertilization in no-tillage systems. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 42, p. 1–14, 2018.
- PHILIP, J. R. **The theory of infiltration: 5- The influence of initial water content.** **Soil Science**, 1957.
- PHILIP, J. R. **Theory of Infiltration.** [s.l.] ACADEMIC PRESS, INC., 1969. v. 5
- RAUBER, L. R. et al. Soil physical properties in a natural highland grassland in southern Brazil subjected to a range of grazing heights. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 319, n. May, 2021.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, v. 36, p. 1931–1935, 2006.
- REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Poned Infiltration From a Single Ring: I. Analysis of Steady Flow. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 5, p. 1233–1241, 1990.
- SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005a.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19–29, 2005b.
- SERATTO, C. D. et al. **Infiltrômetro de aspersão de Cornell aperfeiçoado: aspectos construtivos, operacionais e de manutenção.** Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2019. v. 1
- ŠIMŮNEK, J. et al. **The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3.** Riverside, California, USA Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 2018.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy - Soil Survey Staff, twelfth edition.** Washington D.C: US Department of Agriculture, 2014.
- STEWART, R. D.; ABOU NAJM, M. R. A Comprehensive Model for Single Ring Infiltration II: Estimating Field-Saturated Hydraulic Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 3, p. 558–567, 2018.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2017.

WEI, L. et al. Experimental Investigation of Relationship between Infiltration Rate and Soil Moisture under Rainfall Conditions. **Water (Switzerland)**, v. 14, n. 9, 2022.

YANG, M.; ZHANG, Y.; PAN, X. Improving the Horton infiltration equation by considering soil moisture variation. **Journal of Hydrology**, v. 586, n. January, p. 124864, 2020.

ZWIRTES, A. L. et al. Utilização do infiltrômetro de cornell e dos anéis concêntricos para determinação da infiltração de água em um Latossolo Vermelho. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 3489–3500, 2013.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposição de sistemas automáticos para obtenção de dados de infiltração pontual (capítulo I) possibilitou a obtenção de um banco de dados robusto para relacionar a infiltração com vários fatores, e configura uma contribuição tecnológica deste trabalho. Além disso, relações dinâmicas da infiltração de água no solo com condições de manejo, umidade e escalas foram devidamente estabelecidas e desdobradas (capítulos II e III). Os resultados deste trabalho podem contribuir para planejamentos conservacionistas de solo e água para as escalas estudadas. Contudo, dúvidas permanecem no sentido de compreender como alguns fatores influenciam a infiltração. Portanto, mais estudos necessitam ser desenvolvidos para aprofundar a abordagem. O efeito da escala, no entanto, deve ser devidamente considerado nos trabalhos subsequentes. Este trabalho sugere que a simplificação do processo de infiltração de água no solo ao focar em única escala (ponto ou parcela/encosta) gera perda de informação e torna a compreensão dos processos hidrológicos de superfície mais empírica.

Chamou a atenção em ambos os trabalhos experimentais (capítulos II e III) o efeito expressivo da umidade antecedente do solo nas variáveis da infiltração pontual medidas com infiltrômetros. Logo, tendo em vista a relevância hidrológica da infiltração, este trabalho demonstra a importância de padronizar a umidade inicial do solo para devidamente caracterizar suas variáveis com infiltrômetros, especialmente a taxa de infiltração estável. Por exemplo, a desconsideração do efeito da umidade antecedente pode mascarar o efeito do manejo ou do método de medição na taxa de infiltração estável; além disso, pode alterar o grupo hidrológico no qual o solo se enquadra. A taxa de infiltração estável medida com infiltrômetros e sob umidade antecedente suficientemente baixa, é expressivamente maior que a infiltração vertical, o que pode implicar em subdimensionamento de obras de contenção do escoamento superficial decorrentes. Por outro lado, há evidências fortes, em ambos os estudos (Capítulos II e III), que sob solo inicialmente quase saturado a infiltração vertical é adequadamente caracterizada por infiltrômetros; nessas condições, a taxa de infiltração estável se aproximou da condutividade hidráulica vertical efetiva de perfil saturado. Paralelamente, parece ser intrínseco à medição com infiltrômetros a existência de uma relação significativa entre umidade antecedente e taxa de infiltração estável.

A complexidade nos processos hidrológicos de superfície decorrentes da interação e integralização dos fatores controladores tornam a estimativa da infiltração aparente da parcela ou encosta um desafio. Inclusive, devido à grande incerteza na caracterização das variáveis da

infiltração pontual, parece haver uma tendência geral na literatura em focar a atenção nas escalas de encosta ou bacia. Contudo, este estudo sugere que, para solo inicialmente saturado, as medidas da infiltração entre as escalas (taxa de infiltração estável no ponto; taxa de infiltração mínima aparente na parcela) se alinham. A pequena diferença numérica entre as escalas (taxa de infiltração mínima aparente maior que taxa de infiltração estável) pode ser considerada desprezível ou uma “margem de segurança” para implicações das medições da infiltração com infiltrômetros, como terraceamento. Além disso, o efeito da escala é mais relevante para infiltração acumulada que para taxa de infiltração estável.

Há uma limitação experimental para atender condição de solo inicialmente saturado ou quase saturado para avaliação da infiltração com infiltrômetros. Em solos bem drenados, as camadas superficiais drenam rapidamente após as chuvas. Conseqüentemente, há pouco tempo hábil entre o final das chuvas e a avaliação da infiltração sob solo quase saturado. Nesse sentido, o molhamento inicial do solo com irrigação parece ser uma estratégia válida. Inclusive, isso pode ser objeto de outros estudos. Estudar, por exemplo, qual é o raio de molhamento do solo suficientemente grande para a avaliação da infiltração posterior com infiltrômetros representar um fluxo predominantemente vertical. Paralelamente, simulações com Hydrus 3D provavelmente ajudariam a explicar melhor como menor umidade antecedente influencia a taxa de infiltração estável medida com infiltrômetros.

A grande atenuação do escoamento superficial pelas plantas de cobertura pode contribuir para o aumento na sustentabilidade dos agroecossistemas e para gestão mais eficiente de recursos hídricos na bacia hidrográfica. O aumento na infiltração pelas plantas, além de influenciar positivamente no aproveitamento da água chuva e conseqüentemente atenuar o impacto de estiagens e gerar ganhos produtivos e econômicos relevantes na escala da encosta, minimiza impactos econômicos, ecológicos e sociais do excesso de chuvas, como erosão, degradação dos recursos hídricos e enchentes. Possivelmente, a depender das características de cada bacia hidrográfica, estratégias de aumento da infiltração são as que mais fazem sentido na mitigação de eventos extremos (especialmente excesso de chuvas), pois concentram a atenção onde os processos de degradação iniciam e distribuem os benefícios econômicos, ecológicos e sociais decorrentes de forma uniforme na bacia hidrográfica.

Estudos futuros poderiam explorar o efeito de padrões de chuvas anuais contrastantes na capacidade das plantas de cobertura testadas em atenuar escoamento superficial. O ano monitorado neste estudo foi representativo de “La Niña”. Logo, anos com de “El Niño” podem alterar o efeito das espécies na atenuação do escoamento superficial. A compreensão disso possivelmente contribuiria para planejamentos conservacionistas. Por exemplo, os eventos mais

extremos de precipitação, para os quais as estruturas de contenção da chuva excedente são geralmente dimensionadas, são mais frequentes em anos de “El Niño”. No entanto, haveria necessidade de monitoramento contínuo e a longo prazo para possibilitar adequada amostragem de padrões de chuva contrastantes para estudos dessa natureza, o que requer elevado esforço experimental. O monitoramento da umidade do solo em mais profundidades em cada tratamento, bem como a determinação da curva de retenção de água para as diferentes camadas e condições de cobertura, colaboraria para explorar melhor o efeito das espécies nos padrões de umidade do solo e de como isso afeta a infiltração. Paralelamente, os dados poderiam ser utilizados para analisar se modelos hidrológicos de base física como *Hydrus* e *Lisem* apresentam capacidade em prever as variáveis hidrológicas para diferentes padrões de chuva e condição de umidade antecedente em cada condição de cobertura.

O monitoramento da umidade do solo em tempo real em várias profundidades do solo durante testes de infiltração (capítulo III) é uma das originalidades deste estudo que possivelmente pode direcionar novos estudos. Chamou a atenção, por exemplo, o avanço relativamente rápido da frente de umedecimento no perfil e a saturação apenas parcial de camadas subsuperficiais. Estudos futuros poderiam explorar melhor variáveis da infiltração com o monitoramento da variação no armazenamento de água no perfil. Isso possivelmente contribuiria para avançar na compreensão física da infiltração e redistribuição de água na escala de perfil.

Conclui-se, de forma geral, que a infiltração de água no solo apresenta relações dinâmicas com condições de manejo, com a escala de medição (pontual e parcela) e principalmente com a umidade antecedente. Embora a infiltração seja resultante da interação de vários fatores controladores no espaço e no tempo, a umidade antecedente é uma grande condicionante dos demais fatores e que deve ser devidamente considerada. A diminuição na umidade antecedente amplia as interações e parece tornar a compreensão do processo mais complexa. Por outro lado, sob solo inicialmente quase saturado, as variáveis da infiltração, especialmente a taxa de infiltração estável, dependem pouco do método de medição, da condição de cobertura, da permeabilidade da superfície do solo e da escala de medição; são influenciadas predominantemente por características do solo.

## REFERÊNCIAS

- AJMAL, M. et al. Runoff Estimation Using the NRCS Slope-Adjusted Curve Number in Mountainous Watersheds. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 142, n. 4, p. 1–12, 2016.
- ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 717–723, 2001.
- ALMEIDA, W. S. et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. September 2017, p. 130–138, 2018.
- ALVES, G. J. et al. Assessment of the soil conservation service–curve number method performance in a tropical oxisol watershed. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 74, n. 5, p. 500–512, 2019.
- ANACHE, J. A. A. et al. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. **Catena**, v. 152, p. 29–39, 2017.
- ASSOULINE, S. Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. **Water Resources Research**, v. 49, n. 4, 2013.
- BERTOL, I. et al. Water infiltration in two cultivated soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 2, p. 583–588, 2015.
- BOUWER, H. Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. v. 9p. 825–844.
- CHEN, T. et al. Modeling the effects of topography and slope gradient of an artificially formed slope on runoff, sediment yield, water and soil loss of sandy soil. **Catena**, v. 212, n. January, p. 106060, 2022.
- CLOTHIER, B. E.; WHITE, I. Measurement of Sorptivity and Soil Water Diffusivity in the Field. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 2, p. 241–245, 1981.
- CUI, Z. et al. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils. **Journal of Hydrology**, v. 578, p. 124023, 2019.
- DEUSCHLE, D. et al. Erosion and hydrological response in no-tillage subjected to crop rotation intensification in southern Brazil. **Geoderma**, v. 340, p. 157–163, 2019.
- DUNNE, T. Relation of field studies and modeling in the prediction of storm runoff. **Journal of Hydrology**, v. 65, p. 25–48, 1983.
- DUNNE, T.; BLACK, R. D. Partial Area Contributions to Storm Runoff in a Small New England Watershed. **Water Resources Research**, v. 6, n. 5, p. 1296–1311, 1970.
- ELA, S. D.; GUPTA, S. C.; RAWLS, W. J. Macropore and Surface Seal Interactions Affecting Water Infiltration into Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 714–721, 1992.
- ES, H. VAN; SCHINDELBECK, R. Field Procedures and Data Analysis for the Cornell Sprinkle Infiltrometer. In: [s.l.] Cornell University. College of Agriculture and Life Sciences. Department of Crop and Soil Sciences Research Series R03-01, 2003.



- FAILACHE, M. F.; ZUQUETTE, L. V. Soil water infiltration under different land use conditions: In situ tests and modelin. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, 2021.
- FEPAM. Diretriz técnica referente ao descarte e ao reúso de efluentes líquidos no âmbito do estado do Rio Grande do Sul. **FEPAM**, 2019.
- GHESTEM, M.; SIDLE, R. C.; STOKES, A. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability. **BioScience**, v. 61, n. 11, p. 869–879, 2011.
- HAGHNAZARI, F.; SHAHGHOLI, H.; FEIZI, M. Factors affecting the infiltration of agricultural soils : review. **International Journal of Agronomy and Agricultural Research**, v. 6, n. 5, p. 21–35, 2015.
- HARUNA, S. I. et al. In situ infiltration as influenced by cover crop and tillage management. **Soil and Water Conservation Society**, v. 73, n. 2, p. 164–172, 2018.
- HAWKINS, R. H.; CUNDY, T. W. Steady-State Analysis of Infiltration and Overland Flow for Spatially-Varied Hillslopes. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 23, n. 2, p. 251–256, 1987.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Elsevier, 2004.
- HUANG, J.; WU, P.; ZHAO, X. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. **Catena**, v. 104, p. 93–102, 2013.
- IPCC. Synthesis Report of the Ippc Sixth Assessment Report (Ar6). n. 2, p. 85, 2023.
- KOPPE, E. et al. Soil water infiltration evaluation from punctual to hillslope scales. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 4, 2022.
- LAL, M. et al. Improved Curve Number Estimation in SWAT by Reflecting the Effect of Rainfall Intensity on Runoff Generation. **Hydrogeology Journal**, v. 25, n. 1, p. 151–167, 2017.
- LAL, M.; MISHRA, S. K.; PANDEY, A. Physical verification of the effect of land features and antecedent moisture on runoff curve number. **Catena**, v. 133, p. 318–327, 2015.
- LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos de um argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1333–1342, 2010.
- LING, L. et al. A calibrated, watershed-specific SCS-CN method: Application to Wangjiaqiao watershed in the three Gorges Area, China. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 1, 2020.
- LIPIEC, J. et al. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 2, p. 210–220, 2006.
- LIU, Y. et al. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. **Catena**, v. 182, n. January 2018, 2019.
- LOIZEAU, S. et al. Water infiltration in an aquifer recharge basin affected by temperature and air entrapment. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 65, n. 3, p. 222–233, 2017.
- LONDERO, A. L. et al. Quantifying the impact of no-till on runoff in southern Brazil at hillslope and catchment scales. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 3, p. 1–15, 2021.

- MATULA, S. The influence of tillage treatments on water infiltration into soil profile. **Plant, Soil and Environment**, v. 49, n. 7, p. 298–306, 2003.
- MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. Hidrologia de superfície relacionada ao manejo e à conservação do solo e da água. In: **Manejo do solo**. 2015.
- OGDEN, C. B.; VAN ES, H. M.; SHINDELBECK, R. Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 61, p. 1041–1043, 1997.
- PANACHUKI, E. et al. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, n. 1, p. 1777–1785, 2011.
- PRUSKI, F. F. et al. Model to Design Level Terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 123, n. 1, p. 8–12, 1997.
- RAHMATI, M. et al. Development and analysis of the Soil Water Infiltration Global database. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 3, p. 1237–1263, 2018.
- RAO, K. P. C. et al. Rainfall infiltration and runoff from an Alfisol in semi-arid tropical India. II. Tilled systems. **Soil and Tillage Research**, v. 48, n. 1–2, p. 61–69, 1998.
- RAUBER, L. R. et al. Soil physical properties in a natural highland grassland in southern Brazil subjected to a range of grazing heights. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 319, n. May, 2021.
- RENARD, K. G. et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service**, v. 703, 1996.
- REPULLO-RUIBÉRRIZ DE TORRES, M. A. et al. Efficiency of four different seeded plants and native vegetation as cover crops in the control of soil and carbon losses by water erosion in olive orchards. **Land Degradation and Development**, v. 29, n. 8, p. 2278–2290, 2018.
- ROCKSTRÖM, J. et al. Managing water in rainfed agriculture-The need for a paradigm shift. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, p. 543–550, 2010.
- ROSE, C. W. **An Introduction to the Environmental Physics of Soil, Water and Watersheds**. [s.l.] Cambridge University Pres, 2004.
- SANTOS, M. A. DO N. DOS et al. Water Infiltration in an Ultisol After Cultivation of Common Bean. **Bras. Ci. Solo**, v. 38, n. 1, p. 1612–1620, 2014.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005a.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19–29, 2005b.
- SCHWÄRZEL, K.; PUNZEL, J. Hood Infiltrimeter-A New Type of Tension Infiltrimeter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 5, p. 1438–1447, 2007.
- SCS. Hydrology, national engineering handbook. In: **Department of Agriculture**. washington: [s.n.]. p. 762. 1972.

SERATTO, C. D. et al. **Infiltrômetro de aspersão de Cornell aperfeiçoado: aspectos construtivos, operacionais e de manutenção**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2019. v. 1

SHI, W. et al. Revised runoff curve number for runoff prediction in the Loess Plateau of China. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 10, 2021.

SOIL MOISTURE CORP. **Guelph Permeameter (2800). Operating Instructions**. Santa Barbara, 93130: [s.n.]. 2012.

TAROLLI, P.; CAVALLI, M.; MASIN, R. High-resolution morphologic characterization of conservation agriculture. **Catena**, v. 172, n. August, p. 846–856, 2019.

WANG, Z. et al. Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. **Water Resources Research**, v. 34, n. 2, p. 213–222, 1998.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses - a guide to conservation planning. **U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service**, n. 537, 1978.