

CARLOS HENRIQUES DA SILVA REZENDE

**INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E ERODIBILIDADE EM ÁREAS DE
PASTAGEM EM DIFERENTES DECLIVIDADES**

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

Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes

Coorientador: Demetrius David da Silva

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R467i
2020
Rezende, Carlos Henriques da Silva, 1991-
Infiltração de água no solo e erodibilidade em áreas de
pastagem em diferentes declividades / Carlos Henriques da Silva
Rezende. – Viçosa, MG, 2020.
78 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Solos - Erosão. 2. Solos - Conservação. 3. Chuvas -
Métodos de simulação. 4. Escoamento. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação
em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.45

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fatima Alves CRB6/2578

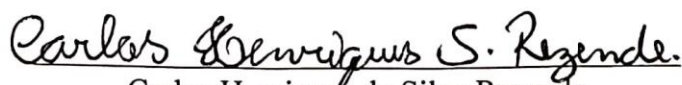
CARLOS HENRIQUES DA SILVA REZENDE

**INFILTRAÇÃO DE ÁGUA E ERODIBILIDADE DO SOLO EM ÁREAS DE
PASTAGENS COM DIFERENTES DECLIVIDADES**

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

APROVADA: 23 de dezembro de 2020.

Assentimento:


Carlos Henrique da Silva Rezende
Autor


Raphael Bragança Alves Fernandes
Orientador

A Deus, razão de minha fé.
À minha irmã Teresa Cristina.
A meus pais e amigos.
A todos que me inspiram,
Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Virgem Maria pela presença em cada etapa desta jornada.

À minha irmã Teresa Cristina pelo carinho e incentivo. A minha mãe Ailma pelas orações, paciência e sustento. Ao meu pai Antônio Carlos pela força e determinação de sempre. Aos meus padrinhos Célia e Claudiomiro pela alegria e cuidado de sempre. A todos os familiares e amigos que estiveram presentes e que me deram força neste caminho.

Aos meus amigos Lucas Borges, Renan Ferreira, Cássio Alvino, Roberto Lustosa, Suellen Santos e Vanessa Lima pela força, incentivo e sustento.

Aos estagiários Amanda Grabe, Enilton, João Victor, José Henrique e Ulisses por todo esforço, tempo e dedicação com este trabalho.

A todos os professores da UFV que contribuíram para meu crescimento acadêmico.

Aos professores Victor Hugo e Paulo Cecon pelo auxílio estatístico.

Aos colegas do laboratório de Física do Solo e do DPS: Karin, Fernanda, Amanda, Sandro, Aristides, Vanessa, Fábio e Felipe.

Aos funcionários do Laboratório de Física do Solo, Cláudio Brustolini e Evandro, pelo apoio, alegria e disponibilidade em ajudar. Ao funcionário do Laboratório de Fertilidade do Solo, Carlos Fonseca, pela descontração, disponibilidade e auxílio.

Ao Departamento de Solos e Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de crescimento, desenvolvimento e realização deste doutorado.

Aos funcionários da fazenda Cachoeirinha, em especial ao José Bira e José Braz por todo auxílio e dedicação nas etapas de campo. À professora Claudia Sampaio e ao Departamento de Zootecnia pela disponibilização de área para experimentação.

Ao professor Demétrius pela coorientação, disposição, disponibilidade, ensinamentos e oportunidade de trabalho.

Ao Professor Raphael Bragança pelo apoio incondicional em cada desafio enfrentado no desenvolvimento desta tese. Obrigado pela paciência, atenção, tempo, dedicação, profissionalismo e orientação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado e pelo suporte financeiro (Financial code 001).

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez”.

Thomas Edison

RESUMO

REZENDE, Carlos Henriques da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2020. **Infiltração de água no solo e erodibilidade em áreas de pastagem em diferentes declividades.** Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes. Coorientador: Demetrius David da Silva.

A infiltração é um processo fundamental para o ciclo hidrológico por determinar o armazenamento da água no solo e garantir a perenização e regularidade de nascentes e cursos d'água. Para sua determinação não existe um consenso sobre a melhor metodologia a ser usada. Estudos de campo são frequentemente realizados com infiltrômetro de anel e simuladores de chuva, mas com complexidade em sua execução. Além disso, o papel da declividade do terreno na taxa de infiltração de água no solo ainda é pouco claro, e poucos são os dados para regiões com relevo movimentado, como é o caso dos Mares de Morros do Brasil, onde destaca-se a classe de relevo fortemente ondulada e onde mais de 70 % da cobertura do solo é formada por pastagens. Nesse contexto, o presente estudo objetivou avaliar a infiltração da água no solo e a erodibilidade em áreas de pastagem em diferentes declividades do terreno e coberturas do solo. O estudo foi dividido em capítulos. No Capítulo I, o objetivo foi propor funções de pedotransferência para a estimativa da taxa de infiltração estável de água para os solos brasileiros com base na mineração de dados (*data mining*), e a partir de modelos de regressão linear e modelos de aprendizado de máquina (*machine learning*). No segundo capítulo, objetivou-se avaliar o efeito da declividade e da cobertura do solo sobre a estimativa da infiltração de água no solo em áreas de pastagem. No terceiro capítulo buscou-se avaliar a erodibilidade de um Latossolo em diferentes condições de umidade inicial, declividades e cobertura do solo, como estimadas pelo método tradicional de campo e com o ensaio de Inderbitzen. Os resultados obtidos indicaram que funções de pedotransferência são capazes de estimar a taxa de infiltração estável da água no solo quando essa é determinada com o uso do simulador de chuvas. A mesma capacidade preditiva foi obtida com modelos de aprendizado de máquina, em especial com o Random Forest, tanto para estimativas da variável determinada com simulador de chuvas, assim como com infiltrômetro de anel. Os dados de campo indicaram que a declividade do terreno não afetou a taxa de infiltração de água no solo, infiltração acumulada e o escoamento superficial acumulado. Por outro lado, a cobertura vegetal exerce papel fundamental na taxa de infiltração, sendo capaz de aumentá-la de 30 a 60 %. A mesma cobertura é capaz de reduzir a erodibilidade do solo a quase a metade do valor obtido para o

solo descoberto. O ensaio de Inderbitzen apresenta potencial a ser explorado em estudos de perdas de solo e proporciona resultados com relação aparentemente direta com os obtidos em ensaios de campo. Com o propósito orientativo e de se construir um futuro banco de dados, o presente estudo sugere a indicação da relação $\text{Fator K (campo)} = 10 \times \text{Fator K (Ensaio de Inderbitzen)}$ para uso em Latossolos.

Palavras-chave: Simulador de chuvas Perda de solo. Escoamento superficial.

ABSTRACT

REZENDE, Carlos Henriques da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2020. **Soil water infiltration and erodibility in pasture on diferente slopes**. Adviser: Raphael Bragança Alves Fernandes. Coadviser: Demetrius David da Silva.

Infiltration is a fundamental process for the hydrological cycle to determine water storage in the soil and ensure perennality and the regularity of springs and watercourses. There is no consensus on the best methodology to be used for the infiltration determination. Field studies are often carried out with ring infiltrometer and rain simulators, but both techniques are complex in their execution. Moreover, the role of slope in the water infiltration rate is still unclear, and there are little data for mountains regions, such as the Mares de Morros domain in Brazil, where most of the relief is heavily undulating, and pastures cover more than 70% of the lands. In this scenario, the present study aimed to evaluate soil water infiltration and erodibility in pasture areas in different terrain slopes and land cover. The study was divided into chapters. Chapter I aimed to propose pedotransfer functions to estimate the stable infiltration rate for Brazilian soils based on data mining and from linear regression models and machine learning models. In the second chapter, the objective was to evaluate the effect of slope and soil cover on estimating water infiltration in the soil in pasture areas. The third chapter aimed to evaluate the erodibility of an Oxisol under different conditions of initial soil moisture, slope and soil cover, as estimated by a traditional field method and with the Inderbitzen test. The results obtained indicated that pedotransfer functions can estimate the stable infiltration rate in the soil when this is determined using the rainfall simulator. The same predictive capacity was obtained with machine learning models, especially with Random Forest, using the rainfall simulator and the ring infiltrometer. Field data indicated that the slope did not affect the infiltration rate, accumulated infiltration and accumulated surface runoff. On the other hand, the cover plays a fundamental role in the infiltration rate, increasing this estimate from 30 to 60%. The same cover can reduce soil erodibility to almost half the value obtained for bare soil. The Inderbitzen test presents a potential for soil losses studies and provides results that are apparently and directly related to those obtained in field tests. To guide and build a future database for soil losses studies, we propose using the $K \text{ Factor (field)} = 10 \times K \text{ Factor (Inderbitzen Test)}$ relation for Oxisols.

Keywords: Rain simulator. Soil loss. Surface runoff.

SUMÁRIO

<i>I</i>	<i>INTRODUÇÃO GERAL</i>	11
	REFERÊNCIAS	15
	CAPÍTULO I	17
	TAXA DE INFILTRAÇÃO ESTÁVEL DA ÁGUA EM SOLOS BRASILEIROS: PREDIÇÃO POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA	18
1	INTRODUÇÃO	19
2	MATERIAL E MÉTODOS	20
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4	CONCLUSÕES	34
	REFERÊNCIAS	34
	CAPÍTULO II	37
	INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM SOLO CULTIVADO COM PASTAGEM EM DIFERENTES DECLIVIDADES	38
1	INTRODUÇÃO	39
2	MATERIAL E MÉTODOS	40
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	53
	CAPÍTULO III	57
	DETERMINAÇÃO DA ERODIBILIDADE DE UM LATOSSOLO COM CHUVA SIMULADA E COM O APARELHO DE INDERBITZEN	58
1	INTRODUÇÃO	59
2	MATERIAL E MÉTODOS	60
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	69
<i>II</i>	<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	72
	APÊNDICES	74
	Apêndice A – Lista das publicações utilizadas na mineração de dados do capítulo 1	74

I INTRODUÇÃO GERAL

Um dos processos hidrológicos mais importante para as bacias hidrográficas é sem dúvida a infiltração. Sem esta, seria impossível o armazenamento de água no solo e a perenização e regularidade de cursos d'água, ao passo que, cada evento pluviométrico poderia acarretar copiosas inundações.

O conceito de infiltração é bastante antigo. Neste processo histórico, merece destaque o nome de Bernard Palissy (1510-1590), que foi o primeiro autor a sugerir que as águas infiltradas no solo são a base para a formação de fontes e nascentes, tendo como origem as precipitações. O pensamento reinante até então era que os mananciais existentes no continente seriam abastecidos por reservatórios subterrâneos inesgotáveis e existentes a grandes profundidades. As ideias de Palissy somente foram confirmadas pelos estudos de Pierre Perrault (1608-1680), Edmé Mariotte (1620-1684) e Edmond Halley (1656-1742), que consagraram o que ficou conhecido como “teoria da infiltração”. Ao medir, durante três anos, a precipitação pluviométrica e o volume de escoamento de água na bacia do rio Sena até Burgundy, Perrault verificou que a lâmina média precipitada era aproximadamente seis vezes superior àquela encontrada na descarga do rio, comprovando a teoria da infiltração. Corroborando esses dados, Mariotte realizou medições no mesmo rio Sena, em Paris, por meio de flutuadores, acrescentando a observação de que as vazões das nascentes aumentavam por ocasião das chuvas. Já Halley desenvolveu seu estudo no Mar Mediterrâneo e demonstrou que a água do mar evaporada era suficiente para abastecer todas as nascentes e cursos de água que nele desaguam, justificando a manutenção de seu nível de água (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2014; CPRM/UFPE, 2000).

Com o passar do tempo, diversos estudos sobre infiltração foram desenvolvidos e seu conceito foi estabelecido como o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo a partir de precipitação natural ou artificial (ALVARENGA et al., 2011; POTT & DE MARIA, 2003), apresentando grande importância no ciclo hidrológico, destacando-se ações como recarga de aquíferos - indispensável para a regularização e perenização dos cursos d'água; garantia de água na zona radicular para culturas diversas; redução do escoamento superficial direto - reduzindo as perdas de água e solo e, portanto a erosão, evitando assim enormes prejuízos à agricultura e ao meio ambiente (MELLO & SILVA, 2013).

Diversos fatores influenciam a passagem de água da superfície para o interior do solo. Os mais frequentemente destacados são a condição inicial de umidade do solo, condições de cobertura da superfície, condutividade hidráulica saturada, distribuição do tamanho e volume

de poros, presença de horizontes estratificados, distância entre a frente de suprimento de água e a frente de umedecimento, textura e estrutura do solo, tipo de argila e teor de matéria orgânica do solo.

Algumas metodologias estão disponíveis para a determinação da infiltração de água no solo, contudo, ainda não existe um consenso bem estabelecido sobre a melhor técnica a ser utilizada (CUNHA et al., 2009). O desejável é que deva ser determinada por métodos simples e capazes de representar as condições em que se encontra o solo, buscando valores mais próximos do real, de forma a evitar o superdimensionamento de projetos agrícolas e desperdício de recursos hídricos (FIORIN, 2008).

Em estudos hidrológicos os equipamentos mais utilizados na determinação da infiltração são o infiltrômetro de anel e o simulador de chuvas. Essas e outras metodologias são aplicadas em regiões planas ou com leve declividade. Disto resulta grande dificuldade quando se pretende avaliar a infiltração em regiões com predomínio de áreas declivosas como na Zona da Mata Mineira. O trabalho de Faria (2015) demonstra que a declividade média da região das Matas de Minas é de 28%, sendo a maior parte do relevo (53%) classificada como fortemente ondulada. De um total de quase 2 milhões de hectares analisados, apenas 1,9 % se encontra na classe plana.

Ainda com respeito à importância das áreas declivosas e de se conseguir determinar nelas a infiltração da água no solo, há de se considerar que as regiões de cabeceiras são altamente importantes para a recarga e manutenção de aquíferos e cursos d'água. Neste sentido, estudos como o de Campos Pinto et al. (2016), destacam a importância da manutenção de boa infiltração em regiões íngremes de cabeceira para bacias hidrográficas da região da Mantiqueira, impactando positivamente a produção de água.

A raridade de estudos sobre infiltração de água pode ser entendida pelas dificuldades de trabalho ocasionadas por condições como: diversidade de fatores e suas diferentes combinações que afetam a determinação da infiltração; disponibilidade de água no local para os testes; aquisição, transporte e instalação de equipamentos; tempo requerido para os testes e mão de obra para operar os infiltrômetros. Entretanto, com a atual e crescente preocupação com a crise hídrica (COELHO et al., 2015a) e o melhor uso dos recursos hídricos, torna-se cada vez mais necessário a determinação da infiltração da água no solo em áreas declivosas e o melhor entendimento da influência do fator declividade frente aos demais fatores que influenciam a infiltração.

Como indicado, o processo de determinação da infiltração da água no solo é complexo e, muitas das vezes, inacessível para muitos estudos. Uma tentativa de se tentar estimar essa

variável que tem aumentado é o uso da modelagem de dados secundários, por meio de funções de pedotransferência e, mais recentemente, por modelos de aprendizado de máquina (*machine learning*). Essas técnicas têm se destacado em estudos recentes (Padarian et al., 2020) buscando alternativas mais simples para determinações que requerem maior dispêndio de tempo, energia e recursos. Parte desses estudos é efetuada com base no processo conhecido como mineração de dados (*data mining*), que basicamente é a construção de um banco de dados secundários que permita novas simulações e modelagens com o conjunto de informações coletadas.

As funções de pedotransferência são equações matemáticas que visam a predição de variáveis de difícil mensuração em laboratório ou campo. Este termo foi criado por Bouma (1989) com significado de “transformando dados que possuímos em dados que necessitamos” (BUDIMAN, 2003). Atualmente muitas áreas da ciência do solo utilizam essa ferramenta para estimar água disponível para plantas, parâmetros para a curva de retenção de água no solo, resistência do solo à penetração, condutividade hidráulica, fósforo disponível, pH, matéria orgânica do solo, dentre outros (NUNES, 2019; CAGLIARI, 2010; SILVA et al., 2008).

Os modelos de aprendizado de máquina são resultado de um sistema que pode modificar seu comportamento de forma autônoma tendo como base sua própria experiência. Inicialmente existe uma fase de aprendizado e treinamento para em seguida serem utilizados para realizar inferência em outros dados. A interferência humana é minimizada no processo de decisão. Dois modelos têm apresentado destaque em estudos hidrológicos por possuírem ampla aplicabilidade, elevada capacidade de relacionar múltiplas variáveis e elevada acurácia nas estimativas: *Support Vector Machine* (SVM) e *Random Forest* (RF) (GHORBANI et al., 2016; JURKOVIC et al., 2018).

Além do fenômeno da infiltração, em estudos de conservação do solo e água é importante a determinação da erodibilidade do solo. A erodibilidade do solo, ou fator K, é uma característica intrínseca de cada solo e reflete a facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas por um agente erosivo. Dentre as características do solo que afetam a erodibilidade, as principais são a estabilidade estrutural e a capacidade de infiltração. Ademais, estrutura, textura, permeabilidade, conteúdo de matéria orgânica, coesão entre partículas e constituição química e mineralógica são características do solo que se relacionam com sua suscetibilidade à erosão (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2014; BRADY e WEIL, 2012; TOMASI, 2015).

O experimento padrão para determinação da erodibilidade de um solo, proposto por Wischmeier e Smith (1978), deve ser realizado em parcelas padronizadas, de 22 m de comprimento, com 9 % de declividade, mantidas no campo sem cobertura vegetal e com

preparo convencional realizado no sentido morro abaixo por mais de dois anos. Além disso, depende de eventos de chuva naturais ou simulados. Portanto, a determinação da erodibilidade por meio do experimento padrão é de difícil execução e demanda elevados investimentos de recursos.

Diante do exposto, é fundamental a avaliação de novos métodos de determinação da erodibilidade do solo para se encontrar uma alternativa de maior confiabilidade e facilidade de execução. Para isso, deve ser avaliada a capacidade preditiva dos novos métodos e validados os resultados a partir da comparação com métodos tradicionalmente aceitos.

Um método alternativo direto de determinação da erodibilidade é o ensaio de Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961). O ensaio é realizado em um equipamento de mesmo nome, que consiste em um canal hidráulico no qual posiciona-se na parte superior uma fonte de água e na parte inferior recipientes que coletam a água e o solo retirado da amostra. O canal possui um orifício onde é posicionada a amostra de solo, coincidindo a superfície do solo com o fundo do canal. O equipamento permite o controle das variáveis: vazão e duração do escoamento; comprimento e inclinação da rampa; estrutura, compactação, umidade inicial e cobertura da amostra de solo.

O equipamento de Inderbitzen é muito usado na área de Geotecnia. Por ser um método de laboratório, permite maior controle das variáveis que influenciam o processo e, se comparado a outros métodos semelhantes, o ensaio de Inderbitzen é de mais fácil execução e menor custo de implementação (BASTOS et al, 2000).

Diante de todo o exposto, o presente estudo tem como objetivo geral determinar a infiltração da água no solo e a erodibilidade em áreas de pastagem com diferentes declividades e condições de cobertura do solo.

A tese é estruturada em capítulos, cada um com seu objetivo específico. No capítulo I, o objetivo foi, a partir de mineração de dados (*data mining*), propor funções de pedotransferência para a estimativa da taxa de infiltração estável de água para os solos brasileiros, partir de modelos de regressão linear e modelos de aprendizado de máquina (*machine learning*). No segundo capítulo objetivou-se avaliar o efeito da declividade e da cobertura do solo sobre a estimativa da infiltração de água no solo em áreas de pastagem. No terceiro capítulo buscou-se avaliar a erodibilidade de um Latossolo a partir de determinação efetuada pelo método tradicional de campo e com o ensaio de Inderbitzen.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, C. C.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R. Continuidade Espacial Da Condutividade Hidráulica Saturada Do Solo Na Bacia Hidrográfica Do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1745-1757, 2011.
- BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 251 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. Porto Alegre, v. 1, n. 1, p. 17–25, 2000.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 9ª ed. São Paulo: Ícone. 355p., 2014.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- CAGLIARI, JOICE. **Função de pedotransferência para estimar o fósforo remanescente em solos, utilizando rede neural artificial**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Geologia. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, p. 104. 2010.
- CAMPOS PINTO, L.; DE MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; OWENS, P. R.; CURI, N. Spatial prediction of soil-water transmissivity based on fuzzy logic in a Brazilian headwater watershed. **Catena**, v. 143, p. 26–34, 2016.
- COELHO, C.A.S., CARDOSO, D.H.F., FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, **Brazil. Theor. Appl. Climatol.** 2015a.
- CUNHA, J. L. X. L.; ALBUQUERQUE, A. W.; SILVA, C. A.; ARAÚJO, E. SANTOS JUNIOR, R. B. Velocidade de infiltração da água em um latossolo amarelo submetido ao sistema de manejo plantio direto. **Caatinga**, v.22, n.1, p.199-205, 2009.
- FARIA, M. M. **Distribuição espacial do café na região das matas de Minas**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015. 78p.
- FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. UFSM, 2008.
- GHORBANI, M. A. et al. A comparative study of artificial neural network (MLP, RBF) and support vector machine models for river flow prediction. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, p. 1–14, 2016.

- INDERBITZEN, A. L. An erosion test for soils. **Materials Research & Standards**. Philadelphia, v.1, n.7, p. 553-554, 1961.
- JURKOVIC, Z. et al. A comparison of machine learning methods for cutting parameters prediction in high speed turning process. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 29, p. 1683–1693, 2018.
- LIMA, P. M. P.; BAHIA, V. G.; CURI, N et al. **Princípios de erodibilidade do solo**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 16, n.176, p. 38-43, 1992.
- MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia: Princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013. p. 163-247.
- NUNES, RÔMULO FÉLIX. **Funções de pedotransferência na caracterização da distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, p. 118, 2019.
- PADARIAN, J.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B. Machine learning and soil sciences: a review aided by machine learning tools. **Soil**, v.6, p35-52, 2020.
- POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 1, p. 19– 27, 2003.
- SILVA, A. P. et al. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 32, p. 1-10, 2008.
- WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 26, n. 5, p. 189 - 193, 1978.

CAPÍTULO I

TAXA DE INFILTRAÇÃO ESTÁVEL DA ÁGUA EM SOLOS BRASILEIROS: PREDIÇÃO POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA

RESUMO - A taxa de infiltração estável da água no solo é uma variável essencial para o planejamento de projetos hidroagrícolas, manejo de bacias hidrográficas, construção e manutenção de estradas rurais, além de possuir aplicações em área urbana. As metodologias para sua determinação apresentam alto requerimento de tempo e de número de repetições para proporcionar resultados confiáveis. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi prever a taxa de infiltração estável da água (Tie) para solos brasileiros a partir de funções de pedotransferência (FPT) e de modelos de aprendizado de máquina (AM) em estimativas efetuadas com infiltrômetro de anel e simulador de chuva. O banco de dados utilizado foi construído a partir de mineração de dados de literatura, usando dados de granulometria, densidade, porosidade e matéria orgânica do solo, bem como da intensidade de precipitação. O conjunto de dados foi avaliado com e sem a remoção de outliers. Os modelos de FPT consideraram os métodos Forward stepwise e Backward stepwise para a estimativa. Os modelos de AM testados foram: splines de regressão multivariada, linear, máquina de vetores de suporte, Cubist e Random Forest. Os resultados obtidos revelaram que as FPTs e os modelos de AM não foram capazes de prever com confiabilidade a Tie quando os valores foram obtidos com o infiltrômetro de anel. A modelagem efetuada indica que valores da Tie de solos brasileiros obtidos com simuladores de chuva podem ser estimados por FPTs ou pelo modelo Random Forest, com algum destaque para este último.

Palavras-chave: Velocidade de infiltração básica. *Machine learning*. *Data mining*.

1 INTRODUÇÃO

A compreensão da infiltração da água no solo é fundamental para o dimensionamento de projetos de irrigação, drenagem, dimensionamento de terraços e bacias de acumulação de águas pluviais, além de estar diretamente ligado ao controle do deflúvio superficial e, conseqüentemente, com os processos erosivos e com a conservação do solo e da água nas paisagens rurais (KLEIN & KLEIN, 2014).

Dentre os fatores que influenciam a infiltração da água no solo, destacam-se características da precipitação, do solo, da superfície do terreno e até mesmo do preparo e manejo ao qual o solo é submetido (BERTOL et al., 2013; BRANDÃO et al., 2012; PANACHUKI et al., 2011). O método escolhido para a determinação da infiltração da água no solo influencia marcadamente o resultado obtido, devendo ser interpretado considerando o procedimento selecionado (PRUSKI et al., 1997).

As metodologias mais utilizadas na determinação da infiltração da água em campo são as que utilizam o infiltrômetro de anel e o simulador de chuvas. O ensaio com anéis concêntricos proporciona valores superiores àqueles obtidos com chuva artificial, principalmente, por reduzir o efeito do selamento superficial quando da instalação do equipamento e por impor carga hidráulica na superfície do solo (POTT & DE MARIA, 2003).

Embora sejam metodologias consideradas simples, o uso dos anéis e dos simuladores exigem muito tempo e elevado número de repetições para proporcionar resultados representativos; equipamentos específicos para operação em campo; grande volume de água para os ensaios; transporte dos equipamentos e da água, além de mão de obra especializada (ALVARENGA et al., 2011). Desta forma, muitas vezes a infiltração da água no solo acaba sendo estimada de forma inadequada, elevando a margem de segurança nos projetos agrícolas que dependem de sua grandeza, o que, frequentemente, promove superdimensionamento de estruturas e estimativas (FIORIN, 2008).

Diante deste cenário, torna-se interessante o desenvolvimento de alternativas metodológicas que visem incrementar a exatidão e facilitar a obtenção de dados em termos de tempo e custo, e que proporcionem resultados representativos das condições in situ. Neste contexto, o uso de funções de pedotransferência (FPT) baseadas em modelos de regressão linear e modelos de aprendizado de máquina (AM) tem ganhado destaque mais recentemente. Esses termos são usados para descrever modelos preditivos de propriedades dos solos a partir de outras propriedades ou características que são mais facilmente medidas (BUDIMAN et al., 2003). Entretanto, um dos pré-requisitos e grande desafio para a obtenção de modelos mais

robustos é a existência de ampla base de dados com valores confiáveis. No presente estudo, o termo FPT é utilizado para se referir à sua forma mais tradicional, ou seja, FPTs baseadas em modelos de regressão linear. FPTs baseadas em modelos de AM serão referidas apenas como modelos de AM.

Uma das principais variáveis associadas à infiltração da água no solo é taxa de infiltração estável (Tie), termo que tem sido preferido à antiga Velocidade de Infiltração Básica (VIB), e que representa o volume constante de água que atravessa uma unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo (BRANDÃO et al., 2012; KLEIN, 2014; LIBARDI, 2018).

A Tie da água no solo é influenciada por propriedades físicas do solo, como textura, porosidade, densidade, condições de cobertura da superfície, além de características da precipitação. Todos esses dados podem ser mais facilmente coletados do que a Tie obtida diretamente em campo com o uso de anéis ou simulador de chuvas. Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi desenvolver funções de pedotransferência com base em regressão linear e modelos de aprendizado de máquina para a estimativa da Tie de alguns solos brasileiros a partir de mineração de dados da literatura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A mineração de dados para a proposição de funções de pedotransferência (FPTs) (modelos lineares) e de modelos de aprendizado de máquina (AM) foi realizada por meio de vasto processo de revisão de literatura, e que considerou periódicos, dissertações e teses, resumos de eventos científicos, boletins técnicos e outros documentos disponíveis na internet. O primeiro critério de escolha de estudos foi a abordagem de solos brasileiros. Na sequência, foram selecionados aqueles que dispunham de dados de taxa de infiltração estável da água no solo (Tie ou VIB) determinada em campo com o uso de infiltrômetro de anel e, ou com simulador de chuvas, e que apresentavam também dados de propriedades e características físicas dos solos, além dos teores de matéria orgânica.

Os dados obtidos na mineração de dados foram organizados em tabelas contendo os seguintes campos: classe de solo, metodologia utilizada de determinação da Tie ou VIB (infiltrômetro de anel ou simulador de chuvas), intensidade de precipitação, densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade do solo, teores de argila, silte e areia e teor de matéria orgânica do solo. À exceção da classe de solo e metodologia de avaliação da Tie ou VIB, os demais dados foram utilizados como variáveis preditoras para as funções de

pedotransferência e modelos de aprendizado de máquina, sendo suas unidades corrigidas para a mesma escala de valores, quando necessário.

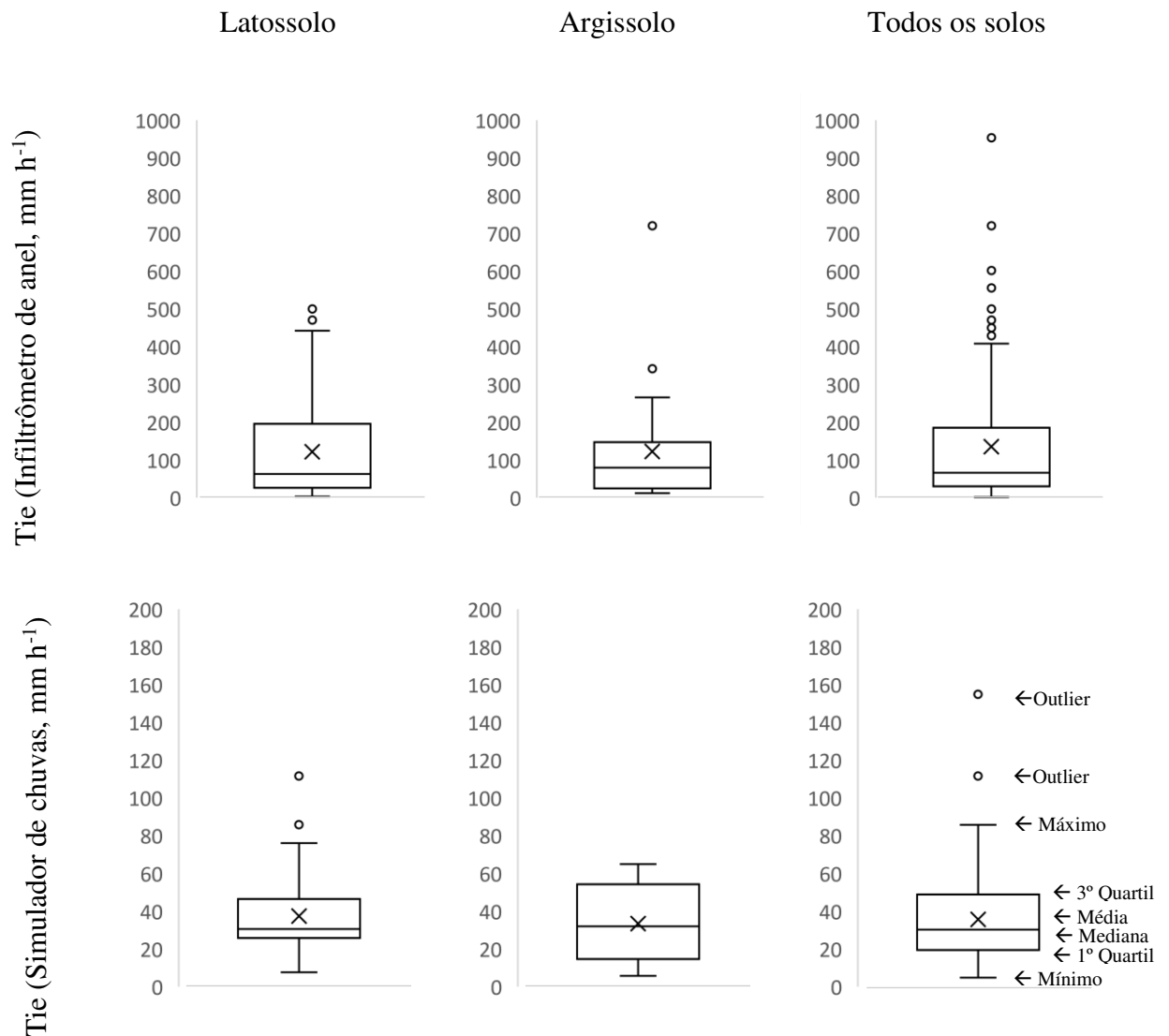
No registro dos dados coletados foi sempre considerada a camada mais superficial do solo disponível nos diferentes estudos. Dados para a profundidade de 0 a 0,10 m foram os mais disponíveis, estando em 54% dos estudos considerados. Em outros 33 e 13% dos estudos, os dados disponibilizados foram das camadas de 0 a 0,20 m e de 0 a 0,05 m de profundidade, respectivamente.

Ao todo, foram utilizados como fonte de dados 51 estudos (Material suplementar-apêndice A), que incluíram 33 artigos científicos e 18 dissertações ou teses e que foram realizados em 12 estados brasileiros (AL, BA, DF, MG, MT, MS, PR, RJ, RS, SC, SE e SP), entre os anos de 1983 e 2018. Os 51 estudos proporcionaram 236 dados de Tie, sendo 143 obtidos com infiltrômetro de anel e 93 com simulador de chuvas.

Em relação ao tipo de solo, os dados registrados no levantamento de dados foram obtidos em sete das 13 ordens de solos que compõem o Sistema Brasileira de Classificação de Solos: Latossolos (44%), Argissolos (20%), Cambissolos (13%), Nitossolos (12%), Neossolos (9,6%), Vertissolos (1%) e Chernossolos (0,4%). Dada a expressividade de dados disponíveis para Latossolos e Argissolos, que coincidem com as duas principais ordens de solos presentes no Brasil, as funções de pedotransferência (modelos lineares) foram testadas considerando três grupos de dados: os obtidos individualmente para cada uma dessas ordens e o obtido para todo o conjunto de dados. No caso dos modelos de aprendizado de máquina, esta opção não foi considerada pois implicaria na redução dos dados disponíveis para que os modelos pudessem ser processados, sendo, por isto, considerado o conjunto total de dados.

Como os dados de Tie apresentam grande variabilidade, o procedimento de análise testou o efeito da eliminação de outliers em cada conjunto de dados, sendo excluídos da análise aqueles que superavam 1,5 vezes o valor do desvio padrão em relação à média. Todos os conjuntos de dados foram analisados com e sem a remoção de outliers. Apenas no caso dos dados obtidos com simulador de chuvas em Argissolos não foram constatados outliers para remoção (Figura 1).

Figura 1 - Distribuição de dados de taxa de infiltração estável (Tie) obtidos por mineração de dados em Latossolos, Argilosos e no conjunto total de dados utilizados.



O passo seguinte na análise de cada conjunto de dados foi a avaliação da correlação de variáveis predictoras com a variável predita (Tie), considerando a remoção ou não dos outliers. Na sequência, foram gerados os modelos de pedotransferência e de aprendizado de máquina para cada conjunto de dados visando a estimativa da Tie. No caso das funções de pedotransferência (modelos lineares) foram utilizados os procedimentos de análise Forward stepwise e Backward stepwise, também com e sem a remoção dos outliers. No procedimento Forward stepwise, cada variável preditora é adicionada por vez, sendo a primeira aquela que apresenta maior correlação com a variável dependente. Na sequência, as demais variáveis são acrescentadas, sempre com avaliação do incremento da significância com a sua inclusão no

modelo. No procedimento Backward stepwise, parte-se do princípio que todas as variáveis preditoras compõem o modelo inicial, havendo retiradas individuais com avaliação da significância perdida com tal procedimento, eliminando-se ao final todas que são consideradas pouco explicativas. Todas as funções de pedotransferência (modelos de regressão linear múltipla) foram gerados no software STATISTICA 8.0. Não foi realizado o procedimento de validação cruzada para as FPTs de modelos lineares devido à simplicidade dos modelos desenvolvidos e ao relativamente elevado número de observações em comparação com o número de variáveis preditoras.

Todos os modelos de aprendizado de máquina foram desenvolvidos com o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019). O conjunto de dados foi processado inicialmente com a função *findcorrelation* - pacote *caret*, (KUHNS & JOHNSON, 2013) para a identificação de correlação entre variáveis preditoras.

Na análise de modelos de aprendizado de máquina, inicialmente foi realizado o procedimento *Recursive Feature Elimination* (RFE) do pacote *caret* (KUHNS & JOHNSON, 2013), buscando identificar o poder explicativo de cada preditor sobre a variável resposta a partir do método de seleção do tipo backward. As covariáveis menos explicativas foram eliminadas do conjunto de dados, de acordo com os critérios de importância dos próprios modelos. Foram testados os seguintes modelos de aprendizado de máquina: Splines de regressão multivariada (Earth), máquina de vetores de suporte (SVM), Cubist e Random Forest (RF).

A avaliação do desempenho dos modelos de aprendizado de máquina foi realizada por validação cruzada, operacionalizada pelo procedimento *Leave-One-Out* (mais utilizado quando a quantidade de dados disponíveis é uma limitação) das predições dos modelos que apresentaram o melhor ajuste.

A capacidade preditiva dos modelos gerados pelas funções de pedotransferência e pelos modelos de aprendizado de máquina foi avaliada pela estimativa dos seguintes indicadores estatísticos: erro médio (ME), raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), conforme equações (1.1) a (1.4), respectivamente.

$$ME = \frac{1}{n} \sum (\hat{x}_1 - x_i) \quad (1.1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |\hat{x}_1 - x_i| \quad (1.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\hat{x}_1 - x_i)^2}{n}} \quad (1.3)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum (x_i - \hat{x}_1)^2}{\sum (x_i - \bar{x}_i)^2} \right], \quad (1.4)$$

onde x_i representa os valores de taxa de infiltração estável encontrada na literatura, \hat{x}_i é o valor estimado pela função de pedotransferência ou pelo modelo de aprendizado de máquina testado, e n é o número de observações.

O erro médio (ME) representa o desvio médio entre valor observado e valor predito, permitindo a avaliação da superestimativa (valores positivos) ou subestimativa (valores negativos), sendo os valores próximos de zero mais preferíveis. O erro médio absoluto (MAE) é utilizado para avaliar a exatidão dos modelos. A raiz do erro quadrático médio (RMSE) é uma medida do erro da estimativa e pode ser usado para comparar o desempenho de diferentes funções de pedotransferência (CHAI & DRAXLER, 2014). O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) varia de negativo infinito a 1, sendo valores próximos à unidade indicativo de melhores ajustes. De acordo com Silva et al (2008), valores de NSE inferiores a 0,36 definem modelos inaceitáveis; de 0,36 e 0,75 modelos de desempenho aceitáveis e maiores que 0,75 são considerados bons.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De uma forma geral, não se verificaram muitas correlações individuais significativas entre as variáveis preditoras e a taxa de infiltração estável (Tie), mesmo com a remoção dos outliers (Tabela 1). Na comparação entre solos, nota-se que o conjunto dos Argissolos apresentou melhores coeficientes de correlação do que os Latossolos, classe que reúne uma maior gama de solos com características e propriedades diferentes.

Tabela 1 - Coeficientes de correlação da taxa de infiltração estável da água no solo (Tie) com a intensidade de precipitação e propriedades e características dos solos analisados

	Ip	MOS	Ds	Pt	Ma	Mi	Argila	Silte	Areia
----- Infiltrômetro de anel (com outliers) -----									
Latossolo	–	–	-0,13	0,14	0,09	0,07	0,10	0,05	-0,08
Argissolo	–	–	-0,37*	0,57*	0,55*	-0,35 ^Θ	-0,18	-0,44*	0,42*
Total	–	–	-0,32*	0,30*	0,32*	0,00	-0,01	0,12 ^Δ	-0,06
----- Infiltrômetro de anel (sem outliers) -----									
Latossolo	–	–	-0,08	0,09	0,06	0,01	0,14	0,17 ^Δ	-0,17 ^Δ
Argissolo	–	–	-0,24 ^Δ	0,21	-0,03	0,11	-0,08	-0,58*	0,47*
Total	–	–	-0,16 ^Θ	0,17*	0,18*	-0,07	0,05	0,01	0,05
----- Simulador de chuvas (com outliers) -----									
Latossolo	0,51*	-0,07	0,01	0,22	-0,02	0,03	-0,12	-0,05	-0,14
Argissolo	0,57*	0,34*	-0,12	0,08	-0,04	0,00	0,00	0,00	-0,57
Total	0,37*	-0,04 ^Δ	0,07	0,29	0,07*	0,07	-0,25	0,09*	-0,13
----- Simulador de chuvas (sem outliers) -----									
Latossolo	0,48*	-0,21	0,16	0,08	0,15	0,25	-0,05 ^Δ	-0,29*	0,15*
Total	0,49*	-0,06	0,09	0,08	0,10	0,18	-0,21 ^Δ	-0,04*	0,00

Ip: intensidade de precipitação; MOS: matéria orgânica do solo; Ds: densidade do solo; Pt: porosidade total; Ma: macroporosidade e Mi: microporosidade. coeficientes significativos a 5 (*), 10 (Θ) e 20% (Δ) de probabilidade.

Muitas das relações entre as variáveis preditoras e a Tie não revelaram concordância direta ou inversa de valores. A intensidade de precipitação (Ip), presente apenas em trabalhos com simulador de chuvas, sempre apresentou coeficientes de correlação positivo. Até determinado valor, espera-se essa relação direta uma vez que mais água está disponível para ser infiltrada no solo, o que demonstra a importância do conhecimento do histórico pluviométrico regional para a melhor definição da intensidade de precipitação a ser considerada quando da utilização das FPTs.

A porosidade total (Pt) exibiu correlação positiva com os valores de Tie, enquanto a microporosidade (Mi) parece não influenciar a infiltração da água no solo. A relação direta da porosidade com a infiltração é compreensível e ainda coerente com a correlação dos valores de Tie com os de macroporosidade (Ma), uma vez que são esses poros os principais responsáveis pela movimentação de água no perfil do solo. Correlação negativa entre macroporosidade e Tie apenas foi verificada para coeficientes próximos de zero.

De maneira geral, a densidade do solo (Ds) foi associada negativamente com a infiltração de água em quase todos os conjuntos de dados avaliados, reflexo da esperada redução da porosidade do solo, em especial da macroporosidade quando se verifica compactação de solos agrícolas (BARBOSA et al., 2020; FRAMESQUI et al., 2020; KOPPE, 2014).

De modo geral, as variáveis referentes a textura não apresentaram associações evidentes com a taxa de infiltração estável nos diferentes conjuntos de dados avaliados. No entanto, o teor de silte e areia apresentaram valores de correlação relativamente altos no caso dos Argissolos com uso do infiltrômetro de anel. Nestes casos, os teores de silte e areia apresentaram valores negativos e positivos de correlação, respectivamente. Estes comportamentos podem estar associados ao fato de altos teores de silte promoverem certa redução dos macroporos, o que pode resultar na redução da Tie da água no solo. Assim, justifica-se os valores negativos e positivos de correlação observados para os teores de silte e areia, respectivamente.

As funções de pedotransferência (modelos lineares) geradas a partir da mineração de dados de trabalhos científicos indicam modelos com maior capacidade preditiva quando se utiliza o simulador de chuvas na determinação da Tie da água no solo (Figura 2). Este método é considerado mais realista para a estimativa da Tie, muito embora o mais usado seja o do infiltrômetro de anel, pelo menor requerimento de tempo, energia e equipamentos (LIMA & SILANS, 1999).

Esse melhor desempenho das estimativas efetuadas com simuladores de chuvas coincide com maiores coeficientes de determinação (Tabela 2) e menores erros de estimativa, como indicado pelo MAE e RMSE, conferindo, dessa forma, maior capacidade preditiva dos modelos (Figura 2). Disto resulta a possibilidade de estimativa da Tie obtida por simulador de chuva a partir de propriedades e características do solo mais fáceis de serem determinadas, incluindo ainda a intensidade de precipitação. Corroborando com estes resultados, Fiorin (2008) encontrou funções de pedotransferência satisfatórias para a estimativa dos parâmetros dos modelos de infiltração de Kostiakov e Horton para alguns solos da região de Santa Maria (RS). Dashtaki, et al. (2015) também encontraram estimativas razoáveis para a predição de parâmetros de modelos de infiltração, com indicadores de confiabilidade estatística um pouco melhores do que os encontrados neste trabalho.

Rahmati et al. (2018) estabeleceram a primeira tentativa de criação de modelos de pedotransferência utilizando um banco mundial de dados, com informações de 54 países, incluindo o Brasil. Alguns modelos complexos foram encontrados e considerados aceitáveis, com valores de RMSE próximos aos apresentados para os melhores modelos do presente estudo (Tabela 3).

Tabela 2 - Funções de pedotransferência geradas para a estimativa da taxa de infiltração estável (Tie) determinada com infiltrômetro de anel e simulador de chuvas para diferentes grupos de solos com e sem a eliminação de outliers

Funções de pedotransferência	
----- Infiltrômetro de anel (com outliers) -----	
Latossolo	Tie = -65,1.Ds +255,1.Pt -171,9.Ma -270,9.Mi +239,2.Arg +158,7.Sil +191,9.Are (R ² =0,02)
Argissolo	Tie = -153,0.Ds +3105,7.Pt -2215,0.Ma -2684,0.Mi +187,0.Arg -345,5.Sil +83,6.Are (R ² =0,50)
Total	Tie = -125,8.Ds +366,7.Pt +116,4.Ma -301,5.Mi +222,9.Arg +178,6.Sil +194,7.Are (R ² =0,15)
----- Infiltrômetro de anel (sem outliers) -----	
Latossolo	Tie = -15,9.Ds +458,5.Pt -481,0.Ma -657,8.Mi +193,7.Arg +330,9.Sil +138,0.Are (R ² =0,06)
Argissolo	Tie = -392,9*.Ds -642,5*.Ma -381,5 ^Δ .Mi +780,0*.Arg +445,9*.Sil +943,2*.Are (R ² =0,64)
Total	Tie = -9,9.Ds +123,4.Pt +108,7.Ma -68,7.Mi +74,7.Arg -8,3.Sil +49,9.Are (R ² =0,07)
----- Simulador de chuvas (com outliers) -----	
Latossolo	Tie = 0,35*.Ip+86,1 [⊙] .Ds -290,9*.Pt +368,5*.Ma +311,3 ^Δ .Mi -85,5.Arg -42,4 ^Δ .Sil -140,7 [⊙] .Are -71,0 [⊙] .Mos (R ² =0,52)
Argissolo	Tie = 0,54 ^Δ .Ip +26,0.Ds -148,0.Pt +149,0.Ma +104,9.Mi +69,5.Sil -12,0.Are -102,0.Mos (R ² =0,49)
Total	Tie = 0,57*.Ip-32,7 [⊙] .Ds -279,0*.Pt +250,0*.Ma +282,5*.Mi +47,8*.Arg +12,0.Sil +56,3.Are [⊙] -18,4.Mos (R ² =0,44)
----- Simulador de chuvas (sem outliers) -----	
Latossolo	Tie = 0,3*.Ip +15,3.Ds -58,3.Pt +65,9.Ma +28,8.Mi +17,2.Arg -19,0.Sil -21,7.Are +3,8.Mos (R ² =0,35)
Total	Tie = 0,57*.Ip -18,8.Ds -142,5*.Pt +105,0*.Ma +129,0*.Mi +35,5 [⊙] .Arg +3.Sil +30,8.Are +0,6.Mos (R ² =0,35)

Ip: intensidade de precipitação; Mos: teor de matéria orgânica do solo; Ds: densidade do solo; Pt: porosidade total; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade. Coeficiente de determinação ajustado (R²) e coeficientes significativos a 5 (*), 10 (⊙) e 20% (Δ) de probabilidade.

Figura 2 - Avaliação da capacidade preditiva de funções de pedotransferência (modelos lineares) da taxa de infiltração estável (Tie) determinada com infiltrômetro de anel e simulador de chuvas para diferentes grupos de solos e com e sem a eliminação de outliers.

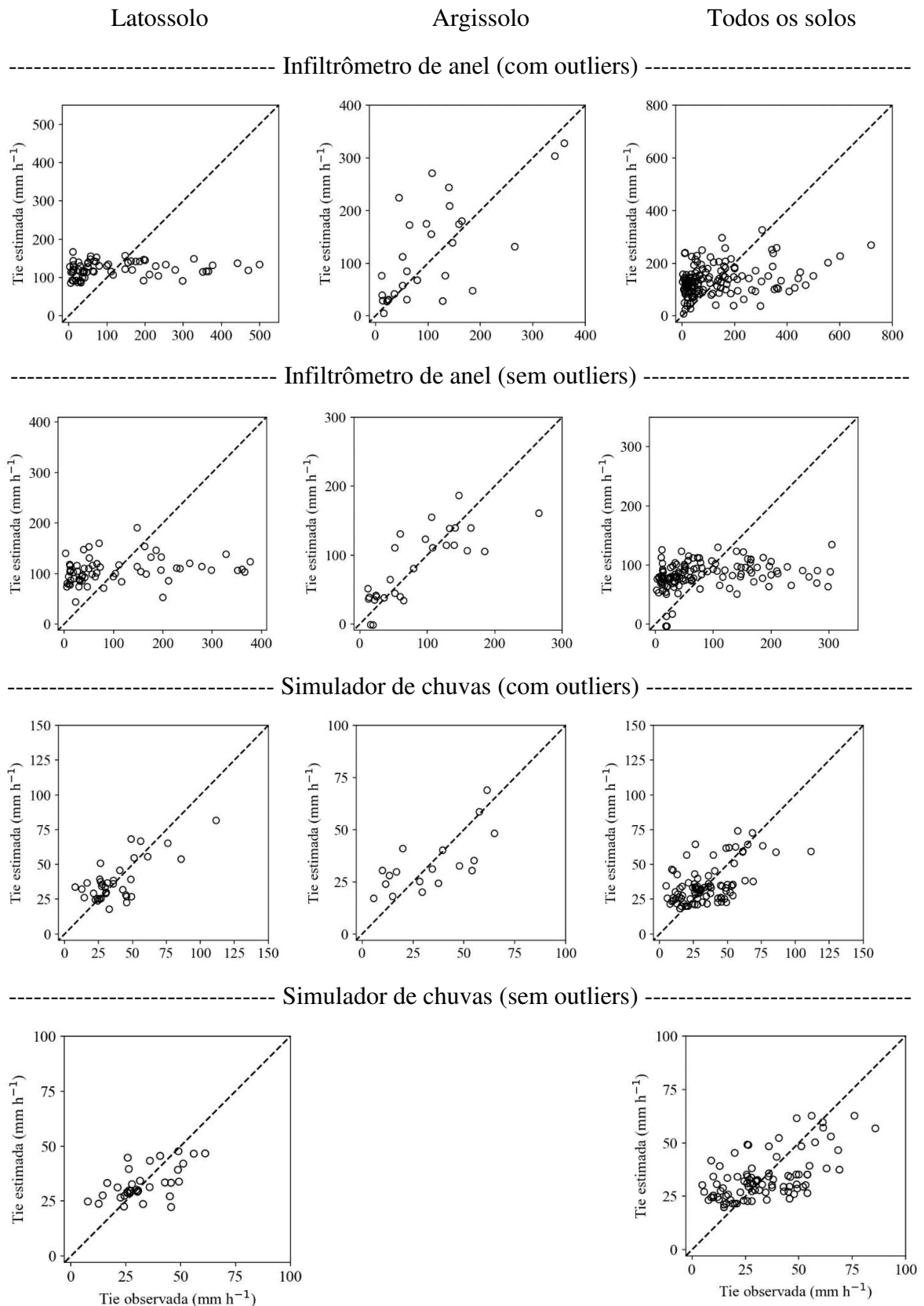


Tabela 3 – Avaliação da capacidade preditiva das funções de pedotransferência e de modelos de aprendizado de máquina na estimativa da taxa de infiltração estável

	Funções de pedotransferência						Modelo	Aprendizado de máquina					
	CV	R ²	NSE	ME	RMSE	MAE		CV	R ²	NSE	ME	RMSE	MAE
	%		----- mm h ⁻¹ -----					%		----- mm h ⁻¹ -----			
----- Infiltrômetro de anel (com outliers) -----													
Latossolo	106	0,02	0,02	-0,06	127	102	Earth	70	0,20	0,19	4,93	150,93	109
Argissolo	117	0,50	0,50	0,00	100	64	SVM	75	0,21	0,18	32,91	151,94	97
Total	116	0,15	0,15	-0,07	144	107	Cubist	67	0,06	-0,02	20,69	169,34	112
							RF	70	0,19	0,17	0,20	152,38	105
----- Infiltrômetro de anel (sem outliers) -----													
Latossolo	101	0,06	0,06	-0,10	103	83	Earth	70	0,12	0,19	4,93	75,67	109
Argissolo	77	0,64	0,64	0,00	38	29	SVM	74	0,09	0,18	30,84	71,61	97
Total	93	0,07	0,07	0,51	75	60	Cubist	67	0,00	-0,02	20,69	77,77	112
							RF	70	0,18	0,17	0,20	65,65	105
----- Simulador de chuvas (com outliers) -----													
Latossolo	55	0,52	0,52	-0,03	14	11	Earth	45	0,37	0,33	1,19	14,21	10
Argissolo	59	0,49	0,49	0,00	14	12	SVM	40	0,33	0,34	0,97	14,46	10
Total	65	0,44	0,43	-0,09	17	13	Cubist	39	0,47	0,47	-0,18	12,60	9
							RF	43	0,52	0,51	0,16	12,03	9
----- Simulador de chuvas (sem outliers) -----													
Latossolo	39	0,35	0,35	-0,01	10	8	Earth	45	0,37	0,32	1,25	14,21	11
Total	53	0,35	0,35	-0,02	14	12	SVM	42	0,36	0,29	1,30	14,00	10
							Cubist	39	0,47	0,46	-0,28	12,55	9
							RF	44	0,52	0,51	0,24	12,07	9

CV: coeficiente de variação; R²: coeficiente de determinação; NSE: coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH, SUTCLIFFE,1970); ME: erro médio; RMSE: raiz do erro quadrático médio; MAE: erro médio absoluto; Modelos de aprendizado de máquina avaliados: Splines de regressão multivariada (Earth), máquina de vetores de suporte (SVM), Cubist e Random Forest (RF).

A remoção de outliers incrementa a capacidade preditiva dos modelos de estimativa da Tie, principalmente quando o erro da estimativa pelo MAE e RMSE é considerado (Tabela 3). Considerando este estimador, os ganhos em termos de capacidade preditiva são maiores quando se considera a avaliação pelo infiltrômetro de anel. Esse mesmo efeito é menor quando se utiliza o simulador de chuvas, dada a maior precisão deste método.

Em todos os modelos gerados foram utilizados os dados de densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e teores de argila, silte e areia. A matéria orgânica do solo foi removida na avaliação com o infiltrômetro de anel, a porosidade total não foi incluída no modelo dos Argissolos para o infiltrômetro de anel sem outliers, e o teor de argila não integrou o modelo do Argissolos no simulador de chuvas com todos os dados.

A baixa capacidade preditiva associada às estimativas efetuadas com o uso do infiltrômetro de anel é confirmada ainda pela ausência de coeficientes significativos nos modelos obtidos (Tabela 2), salvo para a equação sem outliers dos Argissolos. A presença de ao menos um coeficiente significativo nos modelos foi sempre associado a maiores valores de R^2 e menores valores de MAE e RMSE, critério recomendado por Dharumarajan et al. (2019) na escolha de funções de pedotransferência.

As piores estimativas das FPT estabelecidas com o uso do infiltrômetro de anel são associadas a erros inerentes à própria execução do método e pela alta variabilidade espacial (ALVARENGA et al., 2011). Embora seja um método mais simples de determinação da Tie, se comparado ao do simulador de chuvas, os dados obtidos corroboram a necessidade do incremento de repetições quando os anéis concêntricos forem utilizados (COELHO et al., 2000). A menor variabilidade entre repetições e a menor dispersão de dados quando se usa o simulador de chuvas são as razões que se supõe contribuir para que os valores de Tie sejam melhor preditos (Figura 1).

A menor disponibilidade de dados de campo de determinação da Tie com a utilização do simulador de chuvas em comparação com o infiltrômetro de anel pode parecer, em um primeiro momento, um grande entrave para a obtenção de funções de pedotransferência. Entretanto, caso sejam considerados a maior confiabilidade dos dados gerados em campo com a chuva simulada, tem-se melhor estimativa da Tie quando funções de pedotransferência considerarem o método do simulador. Vale ainda destacar que, para os dados obtidos com simulador de chuvas, houve um ligeiro ganho de desempenho das funções de pedotransferência (Tabela 3) quando se gerou funções específicas para Latossolos e Argissolos.

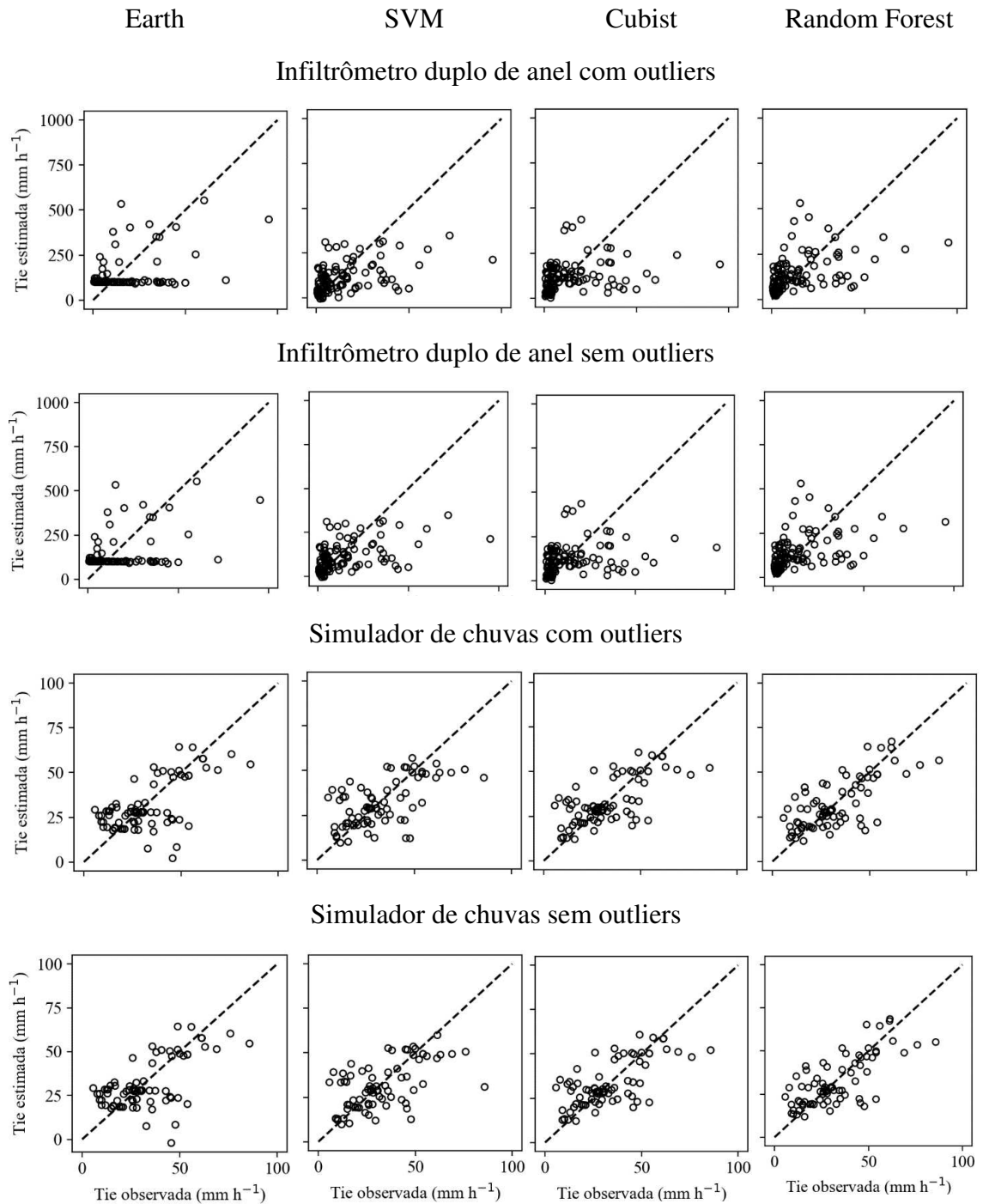
O erro médio (ME) avaliado para as FPT não se mostrou muito adequado para diferenciar a capacidade preditiva dos modelos avaliados. Salvo para um dos grupos avaliados,

os valores de ME foram próximos a zero, indicando a princípio, uma adequada estimativa dos modelos, o que não se confirmou pelos demais indicadores avaliados. Isto confirma a recomendação da não utilização de forma isolada deste indicador para a avaliação da capacidade preditiva de modelos (CHAI & DRAXLER, 2014).

Os modelos de aprendizado de máquina testados apresentaram resultados distintos de R^2 , NSE, ME, MAE e RMSE (Tabela 3). Para a metodologia do infiltrômetro de anel, o modelo Cubist apresentou o pior desempenho de predição da Tie em comparação aos demais modelos. Por outro lado, os modelos Earth, SVM e RF apresentaram valores de R^2 , ME e RMSE semelhantes entre si quando os outliers foram considerados. Quando os outliers são removidos, todos os modelos apresentaram valores de RMSE reduzidos a praticamente à metade. Entretanto, o poder explicativo dos resultados preditos (R^2) também foi reduzido, indicando que a redução dos valores de RMSE pode estar associada apenas à redução da magnitude média dos valores observados, obtida pela retirada de valores extremos (Figura 1), e não, necessariamente, a um real ganho de poder preditivo. O modelo RF foi o de melhor desempenho entre os modelos testados após a retirada de outliers, apresentando melhores valores de R^2 , ME, MAE e RMSE, muito embora nenhum dos modelos testados conseguiu estimar de forma confiável a Tie da água no solo (com e sem remoção de outliers) a partir de dados de características e propriedades do solo, dados os baixos poder explicativos ($\leq 0,21$) e os erros estimados, o que pode gerar resultados discrepantes e grosseiros (Figura 3).

Os modelos testados foram mais adequados para estimar os valores de Tie quando o simulador de chuvas foi usado. Não se verificou grandes diferenças de desempenho nos modelos avaliados antes e após a remoção de outliers. Os modelos Earth e SVM foram os menos confiáveis, por apresentarem os menores valores de R^2 e os maiores erros ME, MAE e RMSE (Tabela 3). Os modelos Cubist e RF foram os de melhor desempenho, com uma ligeira vantagem para o RF.

Figura 3 – Gráficos de dispersão entre valores observados de taxa de infiltração estável (Tie) e estimados por modelos de aprendizado de máquina, com infiltrômetro de anel e simulador de chuvas



Na presença de outliers, os modelos de aprendizado de máquina não superaram as funções de pedotransferência na predição dos valores de Tie a partir de variáveis do solo em relação ao obtido com o infiltrômetro de anel. Neste cenário, o valor de RMSE para o conjunto total de dados foi de 144,00 mm h⁻¹, enquanto o menor valor obtido pelos modelos de aprendizado de máquina foi de 150,93 mm h⁻¹. No entanto, os semelhantes erros ME e RMSE dos modelos de aprendizado de máquina e funções de pedotransferência indicam uma baixa assertividade dos valores preditos. Quando se removeram os outliers, o modelo RF foi o de melhor desempenho em comparação com as funções de pedotransferência. Portanto, o uso dos modelos de aprendizado de máquina testados não superou a capacidade preditiva das equações de pedotransferência obtidas por meio de regressão linear múltipla em todos os casos avaliados.

Quando os dados primários foram obtidos com simulador de chuvas, alguns modelos superaram o desempenho das funções de pedotransferência, com destaque para o Cubist e RF, pelo maior R² e menor MAE e RMSE. No entanto, diferentemente das funções de pedotransferência baseadas em modelos de regressão linear, os modelos de aprendizado de máquina apresentam maior complexidade e demandam maior poder de processamento computacional.

De modo geral, o modelo RF apresentou as melhores estimativas dos valores de Tie quando estimados pelo simulador de chuvas, estando também entre as melhores opções para estimar a Tie obtida a partir de infiltrômetro de anel. Este modelo tem obtido destaque em estudos hidrológicos nos últimos anos (PAPACHARALAMPOUS et al., 2019).

A pequena quantidade de dados analisados neste trabalho foi uma limitação importante para o desenvolvimento de modelos de estimativa da Tie mais eficientes e confiáveis. Espera-se que com o passar do tempo e a expectativa do incremento ao acesso a bases de dados do tipo open data para solos brasileiros espera-se ser possível gerar equações de melhor desempenho para a estimativa da taxa de infiltração estável.

O propósito do presente estudo pioneiro não é eliminar a determinação da Tie em campo, mas sim facilitar a obtenção de estimativas que possam direcionar trabalhos mais gerais e que necessitem desses valores de maneira mais simples e rápida. Destaca-se que valores mais confiáveis de Tie somente podem ser gerados em ensaios diretos de campo, sendo recomendado o uso preferencial do simulador de chuvas para este objetivo.

4 CONCLUSÕES

A taxa de infiltração estável da água no solo determinada com o uso do simulador de chuvas pode ser estimada por funções de pedotransferência que consideram variáveis do solo, sendo a capacidade preditiva aumentada quando se aplicam equações específicas por classe de solo. Esta mesma capacidade preditiva não é conseguida para dados de taxa de infiltração estável obtidos por meio do uso de infiltrômetro de anel.

Metodologias mais complexas baseadas em modelos de aprendizado de máquina nem sempre são capazes de incrementar a capacidade preditiva da taxa de infiltração estável a partir de variáveis do solo. Nas condições do presente estudo, o uso desses modelos não é eficiente na predição quando os dados de taxa de infiltração são obtidos com o infiltrômetro de anel. Entretanto, quando obtidos com simulador de chuvas, o desempenho dos modelos de aprendizado de máquina é mais satisfatório, com destaque para o Random Forest.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1745-1757, 2011.
- BARBOSA, T. C. S. et al. Qualidade física do solo em áreas sob manejo agroecológico e convencional. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 48899-48909, 2020.
- BERTOL. et al. Water erosion in no-tillage monoculture and intercropped systems along contours lines. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 521-528, 2013.
- BRANDÃO, V.S. et al. **Infiltração da Água no Solo**. Viçosa: UFV, 2012. 120 p.
- BUDIMAN, M. et al. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo - Rio de Janeiro**, Embrapa Solos, n. 45, 50 p., 2003.
- CHAI, T.; DRAXLER, R.R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, p. 1247-1250, 2014.
- COELHO, R.D.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. Infiltração da água no solo: parte I infiltrômetro de anéis versus infiltrômetro de aspersores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p. 137-141, 2000.

- DASHTAKI, S.G.; HOMAEE, M.; LOISKANDL, L. Towards using pedotransfer functions for estimating infiltration parameters. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, p. 1477-1488, 2015.
- DHARUMARAJAN, S. et al. Pedotransfer functions for predicting soil hydraulic properties in semi-arid regions of Karnataka Plateau, India. **Current Science**, v. 116, p. 1237-1246, 2019.
- FRAMESQUI, V.P. et al. Avaliação de parâmetros físicos do solo como potenciais causadores do mau desenvolvimento da soja [*Glycine Max* (L.) Merrill] em área comercial sob solo de textura muito argilosa. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 91819-91831, 2020.
- FIORIN, T.T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. UFSM, 2008. 97p (Tese de Doutorado).
- KLEIN, V.A. **Física do solo**. 3ª ed. Passo Fundo: Editora Universidade de Passo Fundo, 263p., 2014.
- KLEIN, C.; KLEIN, V.A. Influência do manejo do solo na infiltração de água. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, p. 3915-3925, 2014.
- KOPPE, E. **Atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo**. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. UFSM, 2014. 76 p. (Dissertação de mestrado).
- KUHN, M.; JOHNSON, K. **Applied Predictive Modeling**. New York: Springer, 2013.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 3ª. Editora da Universidade de São Paulo, 2018. 352p.
- LIMA, C.A.G.; SILANS, A.P de. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p. 2311-20, 1999.
- PANACHUKI E, et al. Perdas de solo e água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1777-1785, 2011.
- PAPACHARALAMPOUS, G.; TYRALIS, H.; KOUTSOYIANNIS, D. Comparison of stochastic and machine learning methods for multi-step ahead forecasting of hydrological processes. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 33, p. 481–514, 2019.
- POTT, C.A.; DE MARIA, I.C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 19– 27, 2003.
- PRUSKI, F. F. et al. Infiltração da água num Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p. 77-84, 1997.
- RAHMATI, M.; WEIHERMÜLLER, L.; VEREECKEN, H. Development and Analysis of Soil Water Infiltration Global Database. **Earth System Science Data**, v. 10, p. 1237-1263, 2018.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. 2010. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <<https://www.rproject.org/>>. Acesso em: 06 dez. 2019.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. & COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p. 258-265, 2008.

CAPÍTULO II

INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM SOLO CULTIVADO COM PASTAGEM EM DIFERENTES DECLIVIDADES

RESUMO - A infiltração é o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo, sendo de extrema importância na recarga e manutenção de cursos d'água. Em áreas declivosas, como a região dos Mares de Morros, a avaliação da infiltração de água no solo é um desafio devido à predominância de áreas declivosas. Nessas regiões da região centro-sul do Brasil predomina a cobertura da pastagem em cerca de 70 % do território. Diante disso, o objetivo deste capítulo foi avaliar o efeito da cobertura vegetal e da declividade do terreno sobre a infiltração de água no solo utilizando um simulador de chuvas em um experimento de campo. A área estava coberta com pastagem braquiária (*Braquiaria decumbens*) e nela foram avaliadas a infiltração de água no solo em quatro declividades do solo (8, 26, 36 e 54 %) e duas situações de cobertura (solo coberto com pastagem e solo exposto), com três repetições. Quatro eventos de chuva simulada foram aplicados em cada parcela, com intervalo de 24 h e intensidade de 60 mm h⁻¹. Os resultados permitem observar que houve redução volume de água infiltrado com a realização de novos eventos pluviométricos. Além disso, o tempo para início do escoamento superficial foi superior no primeiro evento em relação aos eventos subsequentes. A proteção exercida pela pastagem na superfície do solo proporcionou maior taxa de infiltração em comparação ao solo descoberto. A pastagem também promoveu incremento da taxa de infiltração estável no primeiro evento de chuva. Não se verificaram efeito de interação entre os fatores declividade e cobertura do solo sobre os valores de infiltração e escoamento superficial em cada um dos eventos avaliados. A pastagem apresentou maior infiltração da água no solo e menor escoamento superficial em comparação ao solo exposto nos quatro eventos avaliados. Os valores de perda de solo foram reduzidos com a cobertura vegetal, mas não foram afetados pela declividade. Os resultados permitiram concluir que o efeito da cobertura vegetal na infiltração de água no solo é preponderante em relação à declividade. Enquanto a declividade não afeta essa característica do solo, a cobertura vegetal é capaz de aumentar de 30 a 60 % a taxa de infiltração.

Palavras chave: Simulador de chuvas. Escoamento superficial. Perda de solo.

1 INTRODUÇÃO

A infiltração de água no solo é definida como o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo a partir de precipitação natural ou artificial (BRANDÃO et al. 2012; ALVARENGA et al. 2011; POTT & DE MARIA, 2003). Sua determinação em campo é frequentemente realizada por infiltrômetro de anel e simuladores de chuva.

O infiltrômetro de anel consiste em dois anéis que são instalados no solo de forma concêntrica. É um dos equipamentos mais utilizados em campo, por apresentar vantagens como facilidade de construção e transporte, ser barato e requerer pequeno volume de água na determinação. As principais desvantagens são a deformação da estrutura do solo decorrente da cravação dos anéis (destruindo o encrostamento superficial); a pequena área coberta pelos anéis, o que pode gerar pequena representatividade; além da esperada superestimativa da infiltração devido à carga hidráulica presente na superfície do solo.

Já os simuladores de chuva são equipamentos capazes de simular uma chuva natural e, portanto, são mais adequados para trabalhos de irrigação. Apresenta como grande vantagem a eliminação da dependência de eventos pluviométricos naturais para estudos, além de não interferir no selamento superficial e não impor carga hidráulica sobre o solo por ocasião das determinações. Como desvantagens pode-se citar o custo elevado de aquisição; a exigência de elevado volume de água em campo; o transporte e o requerimento de instalação difíceis; além do fato de que a chuva simulada pode vir a não reproduzir fielmente a chuva natural. Além disso, valores de infiltração encontrados pela metodologia do anel e do simulador são naturalmente diferentes, sendo encontradas relações de 7 a 13 vezes na literatura (BRANDÃO et al., 2012; SIDIRAS & ROTH, 1984).

Essas e demais metodologias para a determinação da infiltração da água no solo são aplicadas para regiões planas. Por outro lado, existe um grande desafio para se determinar a infiltração em regiões que predominam áreas declivosas, como é o caso dos Mares de Morro da Zona da Mata Mineira, onde a maior parte do relevo pertence à classe fortemente ondulada. Essas localidades são ainda muito importantes para a recarga e manutenção de cursos d'água, ainda mais em tempos em que a crise hídrica tem assombrado as áreas urbanas de regiões de boa precipitação anual total.

A escassez de estudos sobre a infiltração de água em solos com declividade acentuada pode ser compreendida pelas dificuldades de trabalho que estas áreas impõem. Dentre essas dificuldades, destacam-se a disponibilidade de água no local para os testes; aquisição, transporte e instalação de equipamentos; necessidade de repetições, mão de obra especializada e elevado

tempo gasto para simulação das chuvas. Isto decorre da inviabilidade da utilização nessas áreas de metodologias convencionais como a do duplo anel concêntrico.

A grande representatividade de áreas íngremes na Zona da Mata Mineira justifica a relevância de estudos de infiltração nessas áreas, que são contribuintes de duas importantes bacias hidrográficas nacionais, a do Rio Doce e a do Rio Paraíba do Sul. Na Zona da Mata de Minas Gerais também é dominante a cobertura da pastagem, ocupando cerca de 70% do território (INAES, 2015). Neste contexto, conciliar a execução deste trabalho em áreas declivosas e cobertas por pastagem pode apresentar relevante contribuição para estudos hidrológicos na região, bem como vir a orientar futuras tomadas de decisão acerca de políticas públicas direcionadas a incrementar a produção de água. A validação de uma proposta metodológica que atenda a situações declivosas também pode ser relevante pois pode servir como referência para possíveis metodologias futuras.

Diante do exposto, o objetivo deste capítulo é avaliar o efeito da cobertura vegetal e da declividade do terreno sobre a infiltração de água no solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A infiltração da água no solo de áreas de pastagem foi avaliada por meio de um experimento com simulador de chuvas, realizado na Fazenda de Gado de Corte da Universidade Federal de Viçosa (UFV), localizada nas coordenadas geográficas 20°44' S e 42°46' O. O experimento foi realizado entre os meses de agosto a setembro de 2019, época coincidente com o final da estação seca na região e período em que não se verificou precipitação natural. O clima da região é classificado como do tipo Cwb, tropical úmido com inverno seco e verão chuvoso, de acordo com a classificação de Köppen. A pluviosidade média anual na região é de 1.289 mm, concentrada entre os meses de outubro a fevereiro, e com temperatura média anual de 19° C (INMET, 2018).

A pastagem do local era composta por capim braquiária (*Brachiaria decumbens*) em variados estágios de cobertura.

Os tratamentos foram constituídos pela combinação de quatro declividades e duas situações de cobertura do solo, solo coberto e solo descoberto, com três repetições. A unidade experimental foi formada por parcelas construídas de placas de aço galvanizado, com dimensões 1,0 m x 0,7 m, e de 0,15 m de altura. As placas foram fixadas a uma profundidade de 0,10 m, permanecendo cerca de 0,05 m expostos acima do solo para evitar interferências de fatores externos (Figura 1A). Cada declividade recebeu seis parcelas, totalizando 24 unidades

experimentais. Na parte inferior de cada parcela foi posicionada uma calha coletora para recolher o escoamento superficial (Figura 1B).

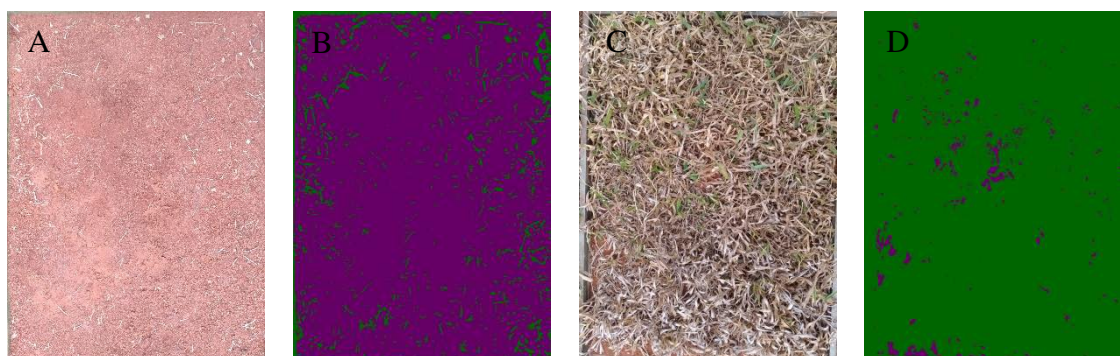
As declividades avaliadas (8, 26, 36 e 54 %) na paisagem buscaram representar as classes de relevo mais comum na região: suave ondulado (3 – 8 %), fortemente ondulado (20 – 45 %) e montanhoso (45 – 75 %) (EMBRAPA, 2013).

O solo descoberto foi obtido pela remoção da pastagem com tesoura de poda, rente à superfície do solo. O solo coberto foi formado pela própria pastagem do local, que apresentava-se cobrindo grande parte do solo: 68% de cobertura (declividade de 8%), 90% (declividade de 26%), 83 % (declividade de 36%) e 70% (declividade de 54 %). A quantificação da cobertura do solo pela pastagem foi estimada a partir de fotografias tomadas da superfície das parcelas antes da primeira chuva simulada. Estas imagens foram processadas pelo software SISCOB[®] (Figura 2) (EMBRAPA, 2010).

Figura 1. Parcelas de aço galvanizado em processo de instalação no solo (A) e detalhe da calha coletora de escoamento superficial (B).



Figura 2. Fotografias das parcelas experimentais sem (A) e com cobertura (C) e imagens processadas no software SISCOB[®] para parcelas sem (B) e com cobertura (D).



A área do experimento foi escolhida por oferecer a diversidade desejada de declividades, pela facilidade de acesso à água e pela dominância de Latossolo, a que representa a principal classe de solo da região.

O simulador de chuvas utilizado foi desenvolvido por Alves Sobrinho et al. (2002), e tem como característica principal o fato de ser facilmente transportado e por possuir suporte ajustável para condições de locais não plano, permitindo assim adaptações às diferentes declividades do relevo (Figura 3A). O simulador apresenta características adequadas e semelhantes à da chuva natural quanto ao diâmetro médio de gotas (entre 1 e 3 mm), velocidade de impacto da gota no solo (entre 6 e 7 m s⁻¹), relação entre energia cinética de chuva natural e simulada superior a 75% e área de aplicação da chuva superior a 0,5 m² (ALVES SOBRINHO, 2002). A chuva simulada foi proporcionada por dois bicos Veejet 80.150, operados na pressão de 35,6 kPa. A intensidade de precipitação foi mantida constante durante todas as simulações no campo. Após ajustes e testes em laboratório, a distribuição das gotas de chuva foi considerada adequada pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC = 85%). Nas laterais do simulador, foi instalada uma lona plástica para minimizar perdas da lâmina precipitada (Figura 3B).

A intensidade de precipitação utilizada no simulador de chuva foi definida pela equação de chuvas intensas para o município de Viçosa – MG, considerando tempo de duração de 30 min (FREITAS et al., 2001). A intensidade adotada foi de 60 mm h⁻¹, valor equivalente à uma precipitação recorrente todos os anos na região (período de retorno de um ano).

Em cada parcela experimental foram aplicados quatro eventos pluviométricos sucessivos, a cada 24 h. O volume escoado foi recolhido em recipientes graduados.

Nos primeiros 40 min após o início do escoamento superficial, as coletas de volumes foram efetuadas durante 1 min, alternados por 3 min de intervalo. Após este tempo, a coleta a cada minuto foi alternada com tempos de espera de 6 min. O volume coletado contendo água e sedimentos foi imediatamente passado por peneira de 0,074 mm de abertura (200 mesh). O material recolhido na peneira foi direcionado para a secagem em estufa para estimativa da perda de solo. A suspensão que atravessou a peneira foi homogeneizada e uma alíquota foi retirada para estimativa de sólidos presentes após secagem em estufa.

A conclusão de cada evento pluviométrico foi a estabilização das leituras do escoamento superficial. Isto foi caracterizado quando se obteve o mesmo volume coletado durante três a cinco medições consecutivas, sendo respeitado o limite de 2 h de ensaio.

Figura 3. Simulador de chuvas instalado em área íngreme (A) e detalhe da lona plástica colocada para redução de perdas da lâmina precipitada (B).



Finalizado o evento pluviométrico, amostras de solo foram coletadas dentro da parcela nas profundidades 0 - 0,10 e 0,10 – 0,20 m, com auxílio de um trado de rosca de 0,0190 m de diâmetro. O orifício do trado foi preenchido com solo obtido na área externa da parcela. Essas amostras foram destinadas ao laboratório para a determinação da umidade pelo método termogravimétrico. Esta mesma operação de retirada de amostras para a estimativa da umidade do solo foi efetuada antes da aplicação da chuva simulada.

A taxa de infiltração de água no solo foi obtida pela diferença entre a intensidade de precipitação da chuva simulada e a taxa de saída do escoamento superficial.

Finalizado todos os ensaios, o solo de cada parcela foi amostrado para fins da caracterização física. Ao lado de cada parcela foi coletado um bloco de 0,20 x 0,20 x 0,20 m, que foi destinado à avaliação da resistência tênsil e textura do solo. Dentro da parcela, quatro amostras indeformadas foram coletadas nas profundidades 0 a 0,05; 0,05 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, e destinadas para as análises de microporosidade e densidade do solo. Com esses valores, calculou-se a porosidade total e a macroporosidade. A análise granulométrica da camada de 0

a 0,20 m apresentou 58 % de argila, 10 % de silte e 32 % de areia, sendo o solo classificado como de textura Argilosa. Não se observaram diferenças significativas nas análises de caracterização física realizada nos locais onde foram implantados nos diferentes tratamentos (Tabela 1). Como a remoção de pastagem em superfície foi efetuada artificialmente e logo antes da imposição dos tratamentos, também não se verificou diferenças entre área com e sem cobertura vegetal.

O experimento foi conduzido em parcelas subdivididas, com três repetições. O primeiro fator (parcela) foi formado por quatro níveis de declividades (8, 26, 36 e 54%). O segundo fator (subparcela) foi formado por dois níveis de cobertura do solo (com e sem cobertura). Os dados foram submetidos à análise de variância para cada um dos eventos de chuva simulada, seguida da comparação entre médios pelo teste *post-hoc* Tukey ($p < 0,10$). O efeito do fator declividade também foi testado por meio de análise de regressão. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019) utilizando-se o pacote ExpDes (FERREIRA et al., 2014).

Tabela 1. Caracterização física do solo da área experimental

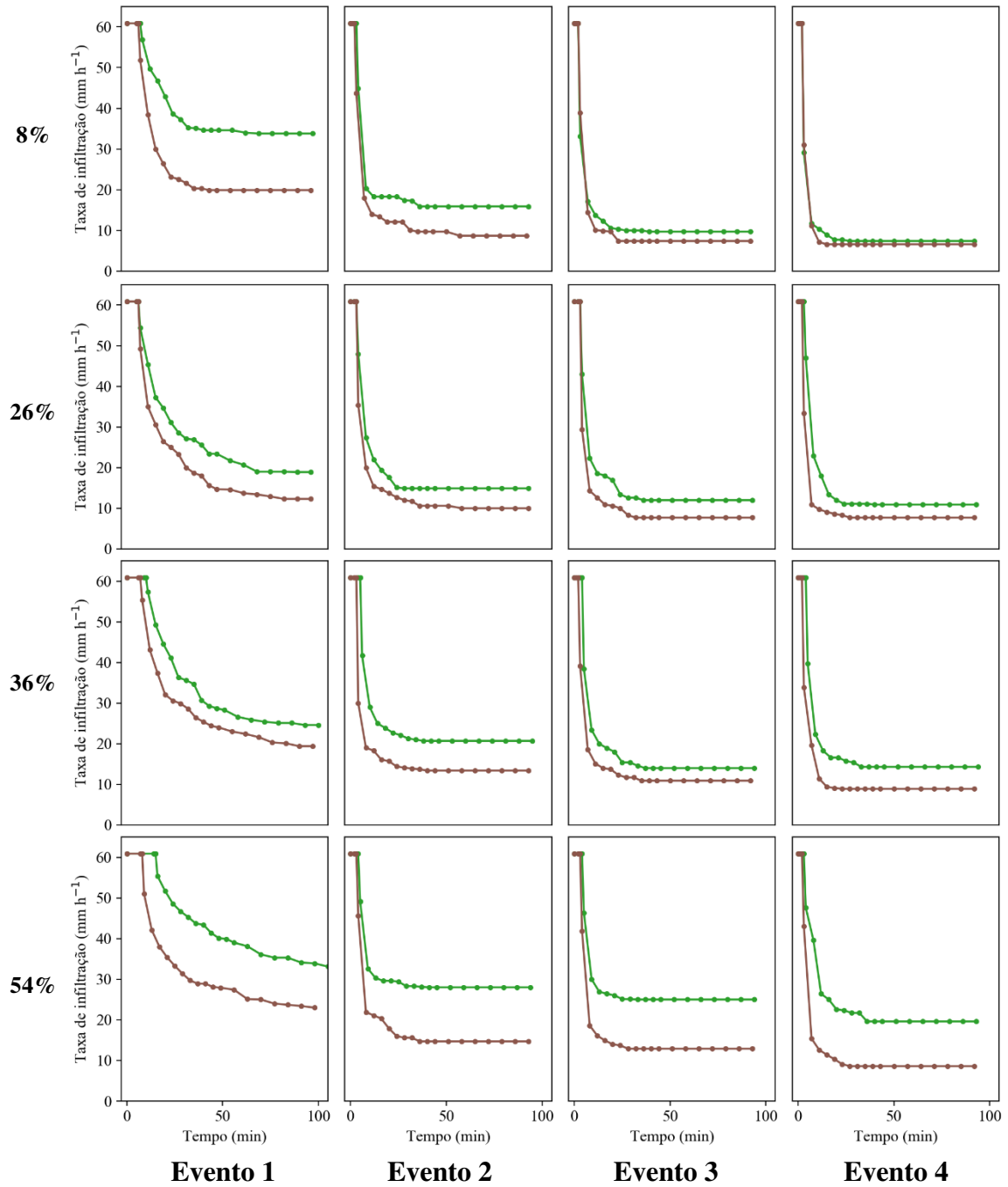
Profundidade ----- cm -----	Ds --- kg dm ⁻³ ---	Rt ---- kPa ----	Pt ----- m ⁻³ m ⁻³ -----	Ma ----- m ⁻³ m ⁻³ -----	Mi
0 - 5	1,24 ± 0,06	53,8 ± 12,7	0,53 ± 0,03	0,11 ± 0,06	0,42 ± 0,04
5 - 10	1,24 ± 0,03	52,4 ± 11,3	0,52 ± 0,01	0,11 ± 0,02	0,41 ± 0,01
10 - 20	1,18 ± 0,04	54,4 ± 13,1	0,55 ± 0,01	0,14 ± 0,02	0,41 ± 0,01

Ds: Densidade do solo, Rt: Resistência tênsil, Pt: Porosidade total, Ma: Macroporosidade, Mi: Microporosidade. Análises realizadas conforme Teixeira et al. (2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A taxa de infiltração da água no solo nos quatro eventos pluviométricos simulados e sucessivos encontram-se na Figura 4. Percebe-se que a taxa de infiltração ao longo das simulações apresentou padrão desuniforme para os diferentes tratamentos, sugerindo o efeito da declividade e da cobertura do solo. Além disso, pode-se observar uma redução do volume de água infiltrado com a repetição dos eventos pluviométricos devido à formação do encrostamento superficial, como também observado por Pruski et al. (1997), Magunda et al. (1997), Silva (2007) e Zonta et al. (2012). Poucas alterações na macroporosidade são capazes de causar redução considerável na condutividade hidráulica desta camada superficial (Silva & Kato, 1997), o que explica a redução da taxa de infiltração.

Figura 4. Infiltração de água em solo exposto e com cobertura de pastagem em quatro eventos sucessivos de chuva simulada, em função do tempo e em diferentes declividades do terreno.



A avaliação dos gráficos destaca a maior taxa de infiltração ao longo das precipitações nas áreas de pastagem em relação ao solo descoberto. Isto mais uma vez acentua o efeito da cobertura do solo para uma boa infiltração de água no perfil. A presença da pastagem protege a superfície contra o selamento, protegendo os agregados do impacto direto das gotas de chuva, e aumenta a rugosidade superficial, que por sua vez aumenta o tempo de oportunidade para que a água infiltre (VOLK et al 2004; STRECK & COGO, 2003). A preparação do tratamento de solo descoberto foi efetuada algumas horas antes da primeira chuva simulada, com a remoção de toda a vegetação presente. Mesmo com tão pouco tempo, a ausência da proteção reduziu as taxas de infiltração de água, pelo desenvolvimento do selamento superficial causado pelo impacto direto das gotas da chuva simulada na superfície do solo, promovendo quebra de agregados, movimento de partículas finas com conseqüente entupimento de poros e a compactação da camada superficial (Brandão et al., 2012). Situação semelhante foi observada por Oliveira (2000), ao avaliar a infiltração de água no solo com chuva simulada de intensidade próxima a deste trabalho (70 mm h^{-1}) em solo exposto e cultivado com milho, mucuna e vegetação espontânea. Os maiores valores de infiltração foram encontrados para as culturas que apresentaram maior cobertura do solo (mucuna e vegetação espontânea).

A importância da manutenção da cobertura do solo para a infiltração de água é amplamente enfatizada na literatura devido aos resultados sempre superiores quando comparados com áreas sem cobertura ou de culturas que cobrem pouco o solo (SILVA & KATO, 1998; SILVA et al., 2001). Outros estudos como os de Almeida et al. (2018) comprovam que a infiltração de água no solo é mais influenciada pela cobertura vegetal do que do tipo de preparo do solo.

Os dados obtidos destacam a importância da manutenção da cobertura do solo para a recarga hidrológica (BIAS et al., 2012). Mesmo um solo com grande presença de raízes e boa agregação, situação comum nas áreas de pastagens, tem a infiltração de água prejudicada na remoção da cobertura. Isso demonstra que o efeito da proteção superficial é maior que a estruturação do solo, visto que não houve diferença estatística para propriedades físicas deste solo.

O tempo necessário para o início do escoamento superficial foi variável entre os eventos pluviométricos simulados (Tabela 2). No primeiro evento, um tempo maior foi requerido para o início do escoamento superficial, que foi reduzido nos eventos subsequentes. A redução do tempo de início de início do escoamento nos eventos 2, 3 e 4 devem-se ao aumento da umidade inicial do solo. Além disso, nas parcelas cobertas com pastagem o tempo para o início do escoamento superficial foi maior, com exceção da declividade 26 %.

2. Tempo de início do escoamento superficial e tempo para se atingir a Tie após início da aplicação da chuva simulada em áreas de pastagem e de solo exposto em diferentes declividades.

Declividade %	Cobertura	Tempo para início do escoamento superficial				Tempo para se Alcançar a Tie			
		Ev 1	Ev 2	Ev 3	Ev 4	Ev 1	Ev 2	Ev 3	Ev 4
		----- min -----				----- min -----			
8	Solo exposto	6	2	2	2	37	41	19	14
8	Pastagem	8	3	2	2	58	25	27	18
26	Solo exposto	6	3	3	2	66	43	25	23
26	Pastagem	6	3	3	3	75	24	31	28
36	Solo exposto	7	3	2	2	76	33	30	19
36	Pastagem	10	5	4	4	66	34	29	29
54	Solo exposto	8	3	3	2	72	23	25	19
54	Pastagem	15	4	4	3	102	36	26	27
	Solo exposto	-	-	-	-	69	32	27	19 b
	Pastagem	-	-	-	-				26 a

Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,10$)

No primeiro, terceiro e quarto evento de chuva simulada, observou-se interação significativa entre os fatores declividade e cobertura do solo para o tempo de início do escoamento superficial. O modelo de regressão linear apresentou coeficientes significativos e foi capaz de explicar cerca 70, 88 e 65 % dos resultados quando a pastagem cobria o solo. Para as parcelas com solo exposto as médias de declividade não apresentaram diferença significativa ($p < 0,10$). Ao se avaliar o fator cobertura dentro do fator declividade, para o evento 1, os níveis de cobertura são considerados estatisticamente diferentes, com exceção da declividade 26 %. No segundo evento simulado não aconteceu efeito da interação entre cobertura e declividade, entretanto, o teste de médias indicou diferenças entre os níveis de cobertura do solo.

O tempo de simulação pluviométrica até a estabilização da Tie também não foi afetado pelos tratamentos nos diferentes eventos avaliados, salvo para o fator cobertura no quarto evento. Neste, o tempo para se atingir a Tie foi maior na pastagem (26 min) em comparação com o solo exposto (19 min), mais uma vez destacando a importância da cobertura que garante infiltração máxima por mais tempo.

Não se verificou efeito da interação significativa entre a declividade do terreno e a cobertura do solo sobre os valores de Tie. A função da declividade na infiltração de água no solo é considerada confusa e resultados conflitantes têm sido observado na literatura. Em revisão sobre o papel da declividade na infiltração de água no solo, Morbidelli et al. (2018) destacam que os dados obtidos em uma série de estudos que não chegam a estabelecer uma

relação clara entre essas duas variáveis, havendo resultados conflitantes deste efeito. Este é o caso do estudo de Chaplot & Le Bissonais (2000), que não verificaram efeito de declividade, enquanto Sharma et al. (1983) observaram que o aumento da declividade reduz a taxa de infiltração de água no solo. Os autores da revisão finalizam com a recomendação de que estudos de campo são mais adequados para o estudo do efeito da declividade do que aqueles simulados em laboratório. Estudos no Brasil que avaliem o efeito da declividade sobre a infiltração de água no solo em condições de campo são escassos, o que impede comparações com as classes de solos nacionais. O fato de se utilizar no presente estudo parcelas pequenas (0,70 x 1,0 m) pode ter afetado a interação esperada entre os fatores avaliados, tendo em vista que o escoamento superficial gerado era rapidamente coletado em um comprimento de rampa reduzido. Desta forma, o escoamento não percorria uma distância que pudesse proporcionar efeito sobre a infiltração estável.

A cobertura do solo foi determinante na definição dos valores de Tie (Tabela 3). Houve aumento dos valores de Tie em todos os eventos pluviométricos, evidenciando o papel da vegetação na recarga hidrológica e na redução do potencial erosivo do escoamento superficial (ALLIAUME et al., 2017; ENGEL et al., 2009). Os valores de Tie foram reduzidos à medida que novos eventos foram simulados, sendo este efeito maior no solo exposto do que na pastagem. A redução da Tie no solo descoberto entre o primeiro e quarto evento foi de 57 %, enquanto na pastagem foi de 50 %. O maior efeito no solo descoberto pode ser associado ao selamento superficial proporcionado pela chuva simulada (BRANDÃO et al., 2012). Algo semelhante, mas em menor intensidade pode ter acontecido na área de pastagem, uma vez que a forrageira não cobria 100 % do solo. A cobertura variou entre declividades, entre 68 e 90 % de cobertura.

Em termos proporcionais, houve ganho de infiltração na presença da cobertura do solo pela pastagem, da mesma forma do que o observado por Panachuki et al. (2011). Neste estudo, os valores de Tie nos eventos pluviométricos para a pastagem foram 29 %, 58 %, 65 % e 83 % maiores do que no solo descoberto, quando se considera do primeiro ao quarto evento simulado, respectivamente. Por sua vez, Zonta et al. (2012) observaram redução média de 75% para a taxa de infiltração estável ao comparar parcelas sem e com cobertura vegetal.

Os dados sugerem o efeito preponderante da cobertura sobre a declividade no aumento da infiltração da água no solo. Ainda que extrapolações deste resultado devam ser tomadas com cuidado, o dado reforça a necessidade de um manejo do solo que mantenha o solo coberto durante todo o ano.

Tabela 3. Taxa de infiltração estável (Tie) obtida em quatro eventos de chuva simulada em áreas de pastagem e de solo exposto em diferentes declividades.

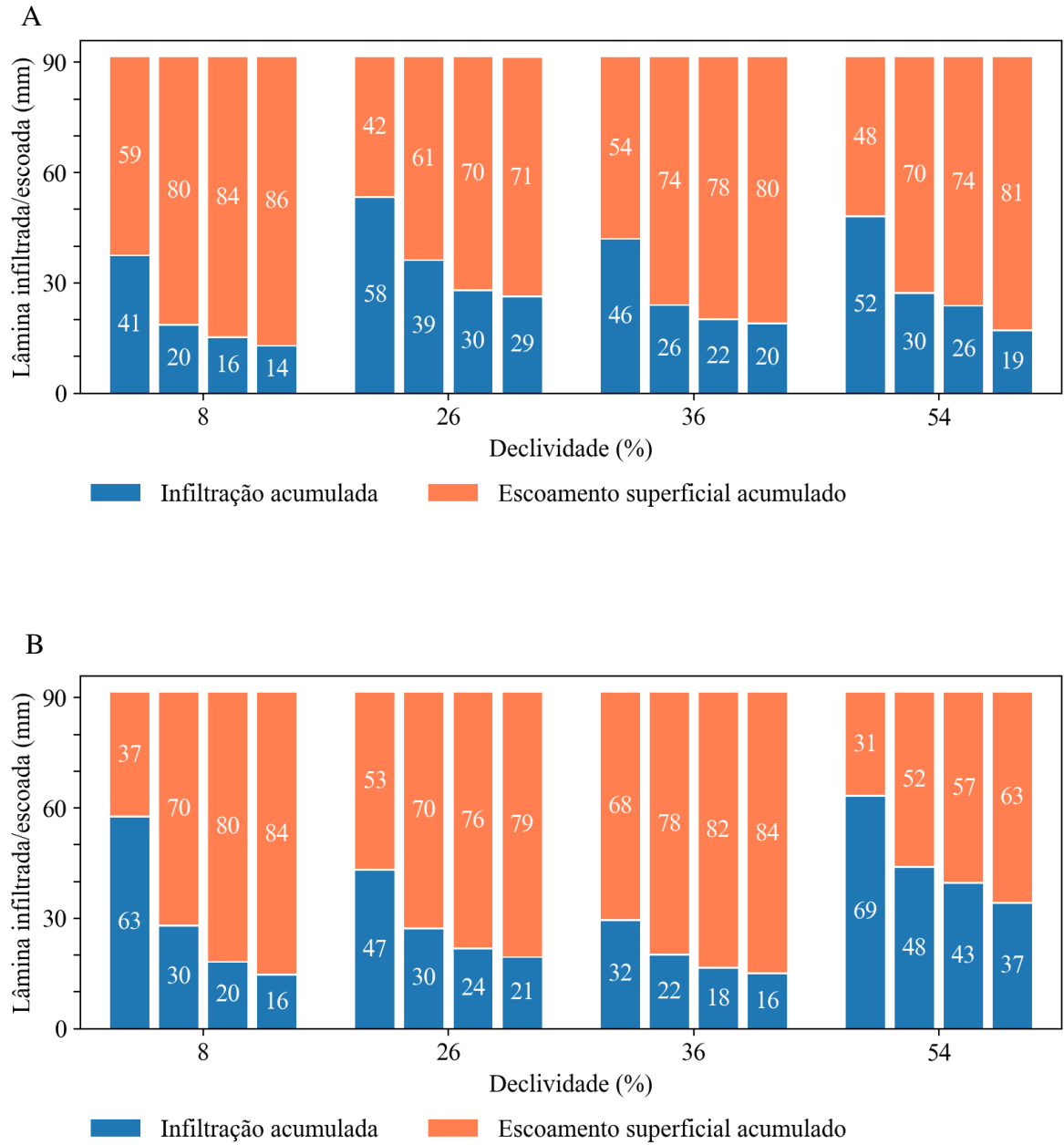
Declividade %	Cobertura	Tie			
		Evento 1	Evento 2	Evento 3	Evento 4
		----- mm h ⁻¹ -----			
8	Solo exposto	19,2	8,4	7,2	6,3
8	Pastagem	32,8	15,5	9,5	7,2
26	Solo exposto	11,8	9,6	7,4	7,5
26	Pastagem	18,3	14,4	11,6	10,5
36	Solo exposto	18,8	13	9,7	8,6
36	Pastagem	24	20,2	14,4	13,9
54	Solo exposto	22,7	14,5	12,7	8,5
54	Pastagem	31,5	26,6	23,7	18,6
Solo exposto		18,1 b	11,4 b	9,3 b	7,7 b
Pastagem		26,7 a	19,2 a	14,8 a	12,6 a

Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si pelo Teste Tukey ($p < 0,10$)

Os valores de taxa de infiltração estável encontradas neste trabalho são semelhantes aos encontrados na literatura. Alguns trabalhos com chuva simulada em pastagem resultaram em valores parecidos: 10 a 30 mm h⁻¹ em Viçosa, MG (Zonta et al., 2012) e 13,9 a 38 mm h⁻¹ em Seropédica, RJ (Almeida et al., 2018). Em áreas de sistemas conservacionistas, a taxa de infiltração estável apresenta valores pouco mais superiores como 23 a 52 mm h⁻¹ (Panachuki et al., 2011), e 26,49 mm h⁻¹ para o sistema plantio direto e 99,99 mm h⁻¹ para plantio direto escarificado (Pinheiro et al., 2009). Esses últimos autores constatam, por sua vez, que áreas de pastagem apresentam menor infiltração quando comparado com cultivos conservacionistas e mata nativa. Essa situação é mais preocupante em pastagens degradadas, mas ainda assim indicam a necessidade de se avaliar caso a caso se a cobertura da pastagem é a melhor indicação para se obter ganhos de infiltração de água no solo.

A infiltração e o escoamento superficial acumulado durante cada simulação de chuva encontram-se nas Figura 5A e 5B. Para fins de comparação, os valores foram ajustados para o mesmo tempo de duração de 90 min de precipitação, correspondendo a uma lâmina de 90 mm. Não se verificaram efeitos de interação entre declividade e cobertura sobre os valores de infiltração e escoamento superficial em cada um dos eventos avaliados. Por sua vez, a pastagem apresentou maior infiltração da água no solo e menor escoamento superficial em comparação ao solo exposto, nos quatro eventos avaliados.

Figura 5. Infiltração acumulada, escoamento superficial acumulado e percentagem da precipitação infiltrada/escoada para os eventos 1, 2, 3 e 4 nas parcelas com solo exposto (A) e pastagem (B).

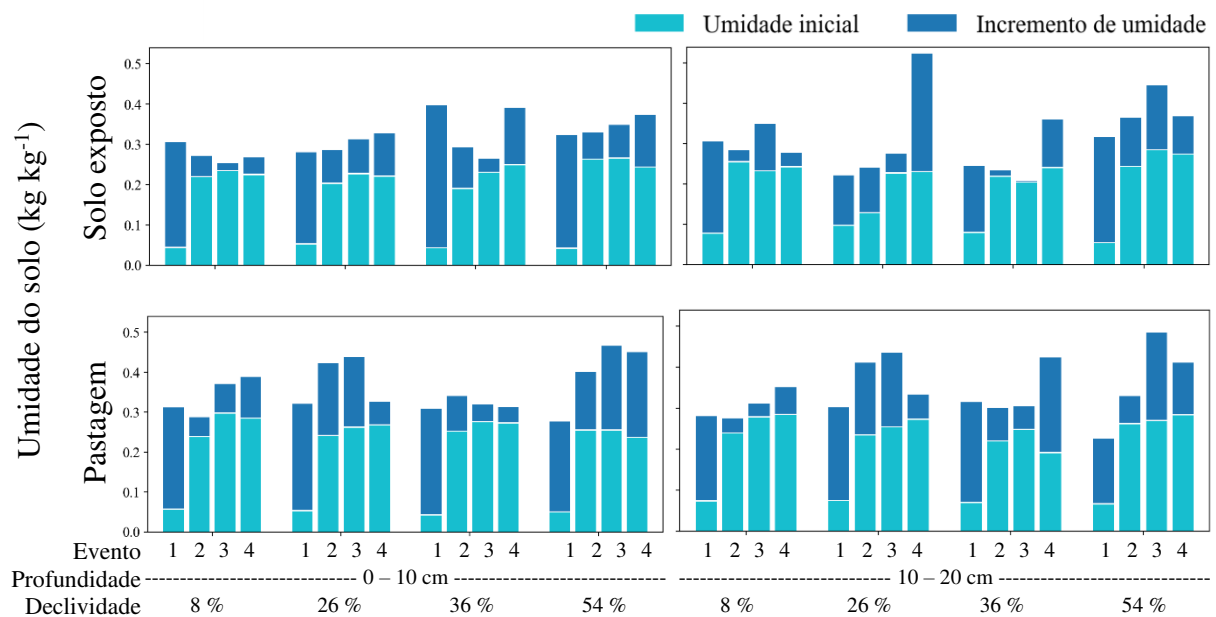


De maneira geral, a infiltração acumulada da água no solo foi reduzida com o decorrer das simulações (eventos) para todas as declividades, conforme também observado por Pruski et al. (1997) e Zonta et al. (2012). No caso do escoamento superficial acumulado, o efeito foi inverso. Os valores de infiltração e escoamento acumulados foram transformados em porcentagem da precipitação para buscar refletir qual o destino da lâmina aplicada. É perceptível nesta avaliação acumulada que, com o decorrer das chuvas sucessivas simulações, ocorre redução no percentual de água infiltrada e que tem potencial para contribuir com o armazenamento de água no solo e a recarga de aquíferos.

A variação da umidade do solo com a aplicação dos eventos de chuva simulada é apresentada na Figura 6. Como os eventos simulados foram realizados na época seca do ano, a umidade inicial antes do início do primeiro evento estava inferior ao valor correspondente do ponto de murcha permanente do solo ($\theta_{PMP} = 0,21 \text{ kg kg}^{-1}$). A mesma figura representa o incremento da umidade no solo até o momento em que a simulação pluviométrica foi finalizada.

Os resultados indicaram não haver efeito de declividade e cobertura do solo sobre o conteúdo de água no solo inicial e sobre o incremento da umidade com as simulações pluviométricas. A umidade média inicial foi de $0,04 \text{ kg kg}^{-1}$ (0-10 cm) e $0,07 \text{ kg kg}^{-1}$ (10-20 cm), enquanto a média do incremento no primeiro evento foi de $0,27 \text{ kg kg}^{-1}$ (0-10 cm) e $0,21 \text{ kg kg}^{-1}$ (10-20 cm). Nos três eventos pluviométricos seguintes, o incremento de umidade no solo foi de $0,10 \text{ kg kg}^{-1}$ (0-10 cm) e $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$ (10-20 cm).

Figura 6. Umidade inicial e incremento de umidade para os eventos 1, 2, 3 e 4 nas profundidades 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m para as parcelas com solo exposto e cobertas com pastagem.



O valor do conteúdo de água no solo ao final dos quatro eventos diários e simultâneos de chuva (umidade inicial + incremento de umidade) foi de 0,32 kg kg⁻¹ (0-10 cm) e 0,28 kg kg⁻¹ (10-20 cm). Alguns valores não superam o conteúdo de água no solo na capacidade de campo ($\theta_{CC} = 0,34$ kg kg⁻¹). Este resultado não era esperado, uma vez que a umidade final foi obtida tão logo se cessou a aplicação da chuva simulada, momento em que se esperava umidade no solo mais próximo da capacidade máxima de armazenamento. Este valor, em termos teóricos, corresponde à porosidade total do solo (Pt) que, na média é 0,53 m³ m⁻³ (Tabela 1). Considerando a densidade do solo média de 1,21 kg dm⁻³ (Tabela 1), teríamos uma umidade teórica retida quando do preenchimento total de poros de 0,44 m³ m⁻³, valor longe de ser atingido mesmo depois dos quatro eventos sucessivos simulados.

As perdas de solo carregadas pelo escoamento superficial nas diferentes declividades e coberturas encontram-se na Tabela 4. Os resultados foram afetados apenas pelo fator cobertura do solo, que reduziu em 4,1; 6,6; 7,6; 9,6 vezes o carregamento de partículas sólidas nos eventos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Mais uma vez destaca-se o papel da cobertura vegetal sobre a proteção do solo contra os efeitos erosivos da chuva.

Tabela 4. Perda de solo para quatro eventos de chuva simulada de 60 mm h⁻¹ em diferentes declividades de área de pastagens na Zona da Mata de Minas Gerais

Declividade %	Cobertura	Perda de Solo			
		Evento 1	Evento 2	Evento 3	Evento 4
		----- t ha ⁻¹ -----			
8	Solo exposto	-(1)	-	-	-
8	Pastagem	1,82	2,61	2,95	1,79
26	Solo exposto	4,07	6,16	4,33	4,60
26	Pastagem	0,37	0,55	0,35	0,33
36	Solo exposto	4,46	3,23	5,11	4,58
36	Pastagem	1,13	0,85	0,81	0,69
54	Solo exposto	4,47	4,15	4,31	5,54
54	Pastagem	1,42	0,84	0,88	0,70
Solo exposto		4,33a	4,51a	4,58a	4,91a
Pastagem		1,19b	1,21b	1,25b	0,88b

Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si pelo Teste Tukey (p<0,10)

(1) Dados não coletados

Os valores de perda de solo das parcelas sem cobertura vegetal são inferiores aos considerados adequados para como perda de solo tolerável ($12 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para o solo estudado (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2014). Contudo, os valores estabelecidos por estes autores são em $\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e as chuvas simuladas representam apenas, aproximadamente, 28 % da lâmina anual precipitada na região do experimento. Ao transformar estes valores em médias anuais e lâmina anual precipitada, os números ultrapassam, os limites toleráveis. Essa ausência de cobertura vegetal pode impactar negativamente nas perdas de solo de diversas culturas agrícolas, que frequentemente superam os limites toleráveis, em função do uso e manejo inadequados adotados com vistas à uma boa conservação do solo (PRUSKI, 2013).

Os resultados obtidos de perda de solo observados aproximam-se dos valores obtidos por Mori et al. (2009), ao simular chuvas de 60 mm h^{-1} em Latossolo Vermelho Amarelo sob plantio direto do Paraná (valores de 0,8 a $1,4 \text{ t ha}^{-1}$). Entretanto, cabe destacar que esses resultados foram obtidos em declividades mais amenas do que a do presente estudo e, desta forma, indicam uma proteção potencial da pastagem maior do que a da palhada nas áreas de plantio direto.

4 CONCLUSÕES

A cobertura vegetal exerce papel preponderante sobre a declividade na infiltração a água no solo. Enquanto a declividade não afeta essa característica, a cobertura vegetal é capaz de aumentar de 30 a 60 % a taxa de infiltração.

REFERÊNCIAS

- ALLIAUME, F.; ROSSING, W. A. H.; TITTONELL, P.; DOGLIOTTI, S. Modelling soil tillage and mulching effects on soil water dynamics in raised-bed vegetable rotations. **European Journal of Agronomy**, v. 82, p. 268-281, 2017.
- ALMEIDA, W. S.; PANACHUKI, E.; OLIVEIRA, P. T. S.; MENEZES, R. S.; ALVES SOBRINHO, T.; CARVALHO, D. F. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 130-138, 2018.
- ALVARENGA, C. C.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R. Continuidade Espacial Da Condutividade Hidráulica Saturada Do Solo Na Bacia Hidrográfica Do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1745-1757, 2011.

- ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P. A.; PRUSKI, F. F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, 2002.
- BIAS, E. S.; PIVELLO, L.; GUEDES, S. C.; ROCH, K. C. Análise da eficiência da vegetação no controle do escoamento superficial: uma aplicação na bacia hidrográfica do rio São Bartolomeu, DF. **Geociências**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 411-429, 2012.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 9ª ed. São Paulo: Ícone. 355p., 2014.
- BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração da Água no Solo**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 120p., 2012.
- CHAPLOT, V.; Le BISSONNAIS, Y. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 25, n. 2, p. 145–153, 2000.
- DIMANCHE, P. H.; HOOGMOED, W. B. Soil tillage and water infiltration in semi-arid Morocco: the role of surface and sub-surface soil conditions. **Soil and Tillage Research**. v 66, p. 13-21, 2002.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. rev. amp. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.
- ENGEL, F. L.; BERTOL, I.; RITTER, S. R.; PAZ GONZALEZ, A.; PAZ FERREIRO, J.; VIDAL VAZQUEZ, E. Soil erosion under simulated rainfall in relation to phenological stages of soybeans and tillage methods in Lages, SC, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p. 216-221, 2009.
- FERREIRA, E.; CAVALCANTI, P.; NOGUEIRA, D. ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. **Applied Mathematics**, v.5, n. 19, p. 2952-2958, 2014. Doi: 10.4236/am.2014.519280.
- FREITAS, A. J.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; PINTO, F. A.; PEREIRA, S. B.; GOMES FILHO, R. R.; TEIXEIRA, A. **Equações de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 65p, 2001.
- INSTITUTO ANTÔNIO ERNESTO DE SALVO - INAES. **Estado da arte das pastagens em Minas Gerais**. Belo Horizonte: INAES, 2015.
- MAGUNDA, M. K.; LARSON, W. E.; LINDEN, D. R.; NATER, E. A. Changes in microrelief and their effects on infiltration and erosion during simulated rainfall. **Soil Technology**, v. 10, p. 57-67, 1997.
- MORBIDELLI, R.; SALTALIPPI, C.; FLAMMINI, A.; GOVINDARAJU, R. S. Role of slope on infiltration: A review. **Journal of Hydrology**, v. 557, p. 878-886, 2018.

- MORI, H. F.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; DIECKOW, J.; SANTOS, W. L. Perda de água, solo e fósforo com aplicação de dejetos líquidos bovinos em Latossolo sob plantio direto e com chuva simulada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 189-198, 2009.
- PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n.5, 2011.
- PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água no solo sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Revista Ambiente e Água**, v. 4, n.2, p. 188-199, 2009.
- POTT, C. A.; DE MARIA, I. C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 19-27, 2003.
- PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 240p. 2013.
- PRUSKI, F. F.; VENDRAME, V.; OLIVEIRA, E. F.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, P. A.; WERLANG, L.; CARVALHO, L. T. Infiltração de água num Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 77-84, 1997.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. 2010. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <<https://www.rproject.org/>>. Acesso em: 06 dez. 2019.
- SHARMA, K.; SINGH, H.; PAREEK, O. Rain water infiltration into a bar loamy sand. **Hydrological Sciences Journal**, v. 28, p. 417-424, 1983.
- SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Medições de infiltração com infiltrômetros e simulador de chuvas em Latossolo Roxo Distrófico, Paraná, sob vários tipos de cobertura do solo e sistemas de preparo. Londrina, PR: Instituto Agronômico do Paraná, 13 p. 1984.
- SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 213-220, 1997.
- SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; AMORIM, R. S. S. Escoamento superficial para diferentes intensidades de chuva e porcentagens de cobertura num Podzólico Vermelho-Amarelo com preparo e cultivo em contornos. **Engenharia Agrícola**, v. 21, n. 1, p. 12-22, 2001.
- SILVA, L. C.; KATO, E. Avaliação de modelos para a previsão da infiltração de água em solos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 7, p. 1149-1158, 1998.

SILVA, L. L. Fitting infiltration equations to centre-pivot irrigation data in a Mediterranean soil. **Agricultural Water Management**, v. 94, p. 83-92, 2007

STRECK, E. V.; COGO, N. P. Reconsolidation of the soil surface after tillage discontinuity, with and without cultivation, related to erosion and its prediction with RUSLE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 141-152, 2003.

VOLK, L. B. S; COGO, N. P.; STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 763-774, 2004.

ZONTA, J. H.; MATINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; SANTOS, M. R. Efeito da aplicação sucessiva de precipitações pluviais com diferentes perfis na taxa de infiltração de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 377-388, 2012.

CAPÍTULO III

DETERMINAÇÃO DA ERODIBILIDADE DE UM LATOSSOLO COM CHUVA SIMULADA E COM O APARELHO DE INDERBITZEN

RESUMO - A erodibilidade é uma característica intrínseca do solo e reflete sua suscetibilidade à erosão. Como depende de diferentes propriedades edáficas, a erodibilidade é de complexa determinação pelo método padrão de campo, demandando elevado investimento de recursos e tempo. O ensaio de Inderbitzen é um método alternativo para determinação da erodibilidade do solo muito usado na área da Geotecnia. Assim, estudos que contemplem dados de campo e de laboratório são interessantes por estabelecer comparação e maior confiabilidade e avaliação da capacidade preditiva ao aparelho de Inderbitzen. O objetivo deste capítulo foi avaliar a erodibilidade de um Latossolo em diferentes condições de umidade inicial, declividades e cobertura do solo, como estimadas pelo método tradicional de campo e com o ensaio de Inderbitzen. Um experimento de campo foi conduzido com quatro eventos de chuva, com intervalo de 24 h e intensidade de 60 mm h^{-1} em parcelas distribuídas em cinco declividades do solo (8, 18, 26, 36 e 54 %) e duas situações de cobertura (solo coberto com pastagem e solo exposto), com três repetições. Estas mesmas condições foram aplicadas para ensaios no equipamento de Inderbitzen, com quatro diferentes conteúdos de umidade inicial nas amostras indeformadas. Os resultados obtidos indicaram que a cobertura do solo é capaz de reduzir a erodibilidade do solo a quase a metade do valor obtido para o solo descoberto. A umidade inicial do solo em campo afeta os valores obtidos de erodibilidade. O ensaio de Inderbitzen apresenta potencial a ser explorado em estudos de perdas de solo e proporciona resultados com relação aparentemente direta com os obtidos em ensaios de campo. Com o propósito orientativo e de se construir um futuro banco de dados, o presente estudo sugere a indicação da relação $\text{Fator K (campo)} = 10 \times \text{Fator K (Ensaio de Inderbitzen)}$ para uso em Latossolos.

Palavras chave: Perda de solo. Declividade. Tensão cisalhante.

1 INTRODUÇÃO

O termo erodibilidade do solo refere-se à quantidade de solo desprendido por unidade de área, tempo e tensão aplicada quando este estiver sob condições de escoamento superficial (KOETZ, 2003). É uma característica indicada na Equação Universal de Perda de Solo (USLE) como o fator K, sendo intrínseco de cada solo e dependente de propriedades como capacidade de infiltração, estrutura, textura, permeabilidade, coesão entre as partículas, conteúdo de matéria orgânica e constituição química e mineralógica do solo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2014; BRADY & WEIL, 2012; TOMASI, 2015).

O fator K é um valor quantitativo obtido pela inclinação da curva ajustada entre a perda de solo por unidade de índice de erosividade da chuva (EI30). Esta curva é conseguida por um experimento padrão proposto por Wischmeier e Smith (1978), no qual o preparo convencional do solo no sentido morro abaixo é realizado em parcelas padronizadas (22 m de comprimento e 9 % de declividade) mantidas sem cobertura vegetal por mais de 2 anos (STEPHAN, 2010; PRUSKI, 2009).

Estes experimentos para a estimativa do fator K em campo são caros, demorados, e exigem equipamentos não muito simples para simular as chuvas quando não se fica dependente de eventos naturais. Adicionalmente é um procedimento no qual é difícil isolar o efeito de outros fatores que afetam o resultado. No intuito de facilitar essa estimativa, algumas alternativas buscam estimar a erodibilidade do solo de maneira mais simples, o que inclui uso de formas diretas de avaliação, ou mesmo indiretas, como é o caso da utilização de nomogramas (WISCHMEIER et al., 1971). Em tese, estes métodos apresentam as vantagens de ser de mais fácil execução e permitir maior controle sobre fatores de variação nos ensaios.

Alguns estudos têm indicado que os métodos indiretos não apresentam boa correlação com o valor de erodibilidade obtido por métodos diretos, como já observado para Latossolos brasileiros (LIMA et al., 1992; SILVA et al., 2000). Disto resulta certa preferência por métodos diretos de avaliação da erodibilidade. Uma das possibilidades de método direto é o que utiliza o aparelho de Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961), ainda pouco usando na ciência do solo, mas que já teve uma indicação de apresentar boa correlação com resultados de erodibilidade obtidas pelo método de campo para solos com alta erodibilidade (BASTOS, 1999).

O equipamento de Inderbitzen é constituído de um canal hidráulico no qual é posicionado uma fonte de água na parte superior e recipientes que coletam a água e as partículas de solo desprendidas da amostra na parte inferior. As amostras são posicionadas em um orifício próximo do final da rampa, coincidindo a superfície do solo com o fundo do canal. O

equipamento permite ainda o controle da vazão e duração do escoamento; comprimento e inclinação da rampa; estrutura, compactação, umidade inicial e cobertura da amostra de solo. (STEPHAN, 2010).

Diante do exposto, o objetivo deste capítulo foi avaliar a erodibilidade de um Latossolo em diferentes condições de umidade inicial, declividades e cobertura do solo, como estimadas pelo método tradicional de campo e com o ensaio de Inderbitzen.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para fins de comparação, a erodibilidade em campo (*in situ*) foi determinada na Fazenda de Gado de Corte da Universidade Federal de Viçosa (UFV), coordenadas geográficas 20°44' S e 42°46' O. O clima da região é do tipo Cwb, tropical úmido com inverno seco e verão chuvoso, de acordo com a classificação de Koppen. A pluviosidade média anual é de 1.289 mm, com temperatura média anual de 19° C (INMET, 2018). A área experimental era formada por pastagem do capim braquiariinha (*Brachiaria decumbens*), estabelecida em Latossolo Vermelho Amarelo em diferentes situações de declividade.

No terreno foram selecionadas cinco posições em diferentes declividades para representar o relevo da região da Zona da Mata de Minas Gerais. Desta forma, foram escolhidas as declividades de 8, 18, 26, 36 e 54 %, objetivando representar as classes de relevo: suave ondulado (0 – 8%), ondulado (8 – 20%), fortemente ondulado (20 a 45%) e montanhoso (45 a 75%) (EMBRAPA, 2013). Seis parcelas de chapa de aço galvanizado de dimensões 1,0 x 0,7 x 0,15 m foram cravadas em cada uma das inclinações. Para a avaliação do efeito da cobertura do solo proporcionado pela forrageira, em metade das parcelas o capim foi completamente e manualmente removido.

Um infiltrômetro de aspersão desenvolvido por Alves Sobrinho et al. (2002) (Figura 1 A) foi utilizado para simular quatro eventos pluviométricos sucessivos em cada parcela experimental. A intensidade de precipitação foi constante e de 60 mm h⁻¹, com intervalo de 24 horas entre as precipitações. Em cada parcela foi acoplado uma calha condutora que direcionou o escoamento superficial para um recipiente graduado (Figura 1 B). Em intervalos de três minutos, o escoamento era coletado por um minuto e passado em peneira de 0,074 mm de abertura (200 mesh). O material coletado (solo e água) foi direcionado para secagem em estufa de circulação de ar a 100 °C por 48 horas. Com a determinação da massa de solo perdida no decorrer do tempo de simulação das chuvas e da energia cinética dos eventos pluviométricos foi possível calcular o valor de erodibilidade (BERTOL et al., 2006; COGO, 1981).

Figura 1. Infiltrômetro de aspersão utilizado para simular chuvas artificiais (A) e detalhe de calha coletora de escoamento superficial (B).



Para a determinação da umidade do solo antes de cada simulação de chuvas foram coletadas amostra composta deformada nas profundidades 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m. Utilizou-se um trado de rosca para que a interferência na parcela fosse mínima/minimizada e o orifício gerado foi tampado com solo da porção anexa externa à parcela.

Na mesma área onde foi realizado o experimento de campo também foram coletadas amostras indeformadas em anéis cilíndricos coletores, de diâmetro interno de 143 mm e altura de 39 mm. Martelo pedológico e faca foram usados para a remoção do solo ao redor do anel e para facilitar o corte basal e retirada da amostra. Em seguida, a faca foi utilizada para modelar cuidadosamente as laterais do solo e fazer com que o anel coletor se encaixasse (Figura 2). As amostras foram embaladas com plástico filme e papel de jornal e identificadas para o transporte até o laboratório.

Para a determinação da erodibilidade em laboratório foi utilizado o Inderbitzen, equipamento disponibilizada pelo Laboratório de Geotecnia Ambiental, do Departamento de Engenharia Civil da UFV (Figura 3). O equipamento possui um sistema articulado que permite variar a inclinação da rampa entre 0° e 60°. As cinco declividades utilizadas em laboratório foram as mesmas das parcelas instaladas em campo e com o mesmo objetivo de representar a variação verificada na paisagem. A vazão da lâmina de água foi mantida constante em 3 L min⁻¹ em todos os ensaios realizados (STEPHAN, 2010; BASTOS, 1999).

Figura 2. Procedimentos realizados em campo para a coleta das amostras indeformadas sem e com cobertura da pastagem.



Figura 3. Detalhes do equipamento de Inderbitzen utilizado na determinação da erodibilidade.



O experimento de laboratório considerou a avaliação de quatro diferentes conteúdos de água inicial nas amostras antes do início do ensaio de erodibilidade e duas condições de cobertura (pastagem e solo exposto), com quatro repetições, totalizando 160 ensaios/amostras. As umidades iniciais avaliadas foram: solo “seco” ($0,17 \text{ kg kg}^{-1}$), solo úmido 1 ($0,30 \text{ kg kg}^{-1}$), solo úmido 2 ($0,38 \text{ kg kg}^{-1}$) e solo saturado ($0,44 \text{ kg kg}^{-1}$). Para cada amostra de solo coletada em campo foi realizado um único ensaio de Inderbitzen.

A rampa do aparelho de Inderbitzen foi ajustada com um clinômetro digital para o estabelecimento das declividades previstas. Antes do início dos ensaios, a superfície da rampa era limpa com álcool para a remoção de substâncias gordurosas no escoamento superficial. Um recipiente coletor, precedido de uma peneira de $0,074 \text{ mm}$ de abertura (200 mesh), foi posicionado no fim da rampa para a coleta das partículas de solo carreadas. Nos intervalos 1, 5, 10 e 20 minutos, o material presente na peneira era transferido para um recipiente e direcionado para secagem em estufa de circulação de ar ($100 - 105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 horas). A massa de partículas de solo que atravessou a peneira de $0,074 \text{ mm}$ foi estimada a partir de uma alíquota coletada da suspensão representativa de todo o escoamento gerado pelo ensaio, após vigorosa agitação.

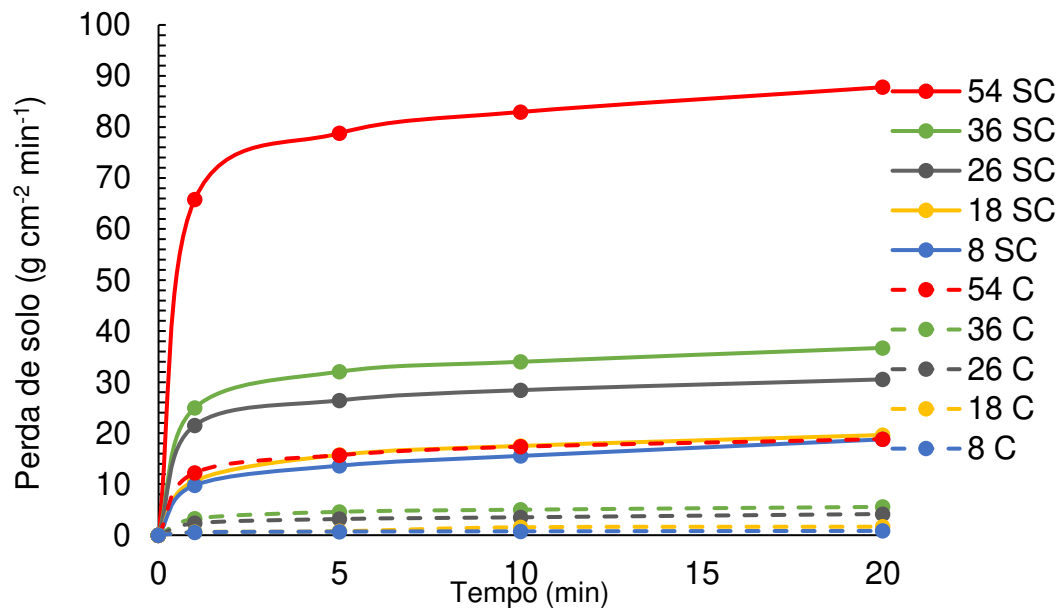
Os resultados de erodibilidade, tensão crítica e perda de solo foram analisados segundo um delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial 2×4 , considerando duas coberturas do solo e as quatro umidades iniciais. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a 5% de significância. O efeito quantitativo da umidade inicial das amostras também foi testado por análise de regressão. Os valores de erodibilidade encontrados no campo e por meio do aparelho de Inderbitzen foram comparados por um teste t bilateral para duas amostras independentes a 5 % de significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de perda de solo acumulada ao longo do tempo de ensaio no equipamento de Inderbitzen (Figura 4) ilustram o efeito da declividade imposta na rampa de escoamento superficial e o efeito da cobertura exercida pela pastagem. Os valores de perda de solo foram crescentes de acordo com o aumento das inclinações para amostras nas duas condições de cobertura. O efeito protetivo da cobertura de pastagem é evidente, sendo diagnosticada redução de perda de solo de 23, 11, 7, 6 e 5 vezes nas declividades de 8, 18, 26, 36 e 54%, respectivamente. Os dados refletem a importância da cobertura do solo para fazer frente aos fatores erosivos como o da tensão cisalhante proporcionada pelo escoamento superficial causado por precipitação. A cobertura permanente da pastagem, associada à ausência de

superlotação ou a outros processos de degradação e ao sistema radicular denso e profundo, são características que conferem à essa cultura que predomina em cerca de 100 milhões de hectares no país, frequentes baixas taxas de erosão, ainda que estudos de conservação do solo nessas áreas sejam escassos (SPAROVECK et al., 2007).

Figura 4. Valores médios de perda de solo acumulada em função do tempo no ensaio de Inderbitzen para as declividades 8% (8), 18 % (18), 36 % (36) e 54 % (54) em amostras sem (SC) e com (C) cobertura de pastagem.



A simples presença da pastagem não é uma garantia de proteção do solo, uma vez que algumas áreas degradadas podem não oferecer a esperada cobertura vegetal. Perdas expressivas de solo em áreas de pastagem degradadas podem ser verificadas com o manejo inadequado, como observado por Ribeiro et al. (2013), ao avaliarem as perdas com o equipamento de Inderbitzen.

Outra observação interessante derivada dos dados é que o aumento da declividade reduz o efeito protetivo da pastagem. Desta forma, nota-se redução de 4,6 vezes da proteção com a pastagem, quando se comparam as perdas nas declividades 54 e 8%. Desta forma, pode-se inferir que apenas a cobertura pode não ser suficiente em maiores declividades, sendo necessárias a utilização de práticas de conservação do solo e água.

O efeito de declividade da rampa no Inderbitzen foi menos pronunciado nas amostras cobertas, enfatizando mais uma vez a importância de uma boa cobertura do solo principalmente em áreas declivosas. Isto corrobora o verificado por Nacinovic et al. (2014), que demonstraram

que a cobertura do solo com pastagem e florestas plantada e nativa foram eficazes no controle da erosão e *runoff* em comparação ao cultivo convencional de olerícolas, em estudo realizado em uma área montanhosa do Rio de Janeiro. A cobertura permanente da pastagem protege o solo do desprendimento de partículas causado pelas chuvas e escorrimento, enquanto o sistema radicular fasciculado aumenta a resistência do solo à erosão, por proporcionar melhor agregação e aumenta a porosidade do solo.

Em todos os ensaios realizados em laboratório verificou-se rápida perda de solo no início dos testes, logo no primeiro minuto, seguido de uma tendência de estabilização. A mesma situação foi verificada por Silva et al (2016) ao testarem diferentes vazões (3,0; 4,5; 6,0 e 7,5 L min⁻¹) em duas inclinações da rampa (17,6 % e 32,5 %) no aparelho de Inderbitzen. Os autores observaram que, além da perda de solo aumentar com o aumento da vazão, em todas as vazões avaliadas, a maior fração de perdas foi identificada no primeiro minuto de ensaio.

Os resultados de erodibilidade e tensão cisalhante crítica em laboratório foram influenciados ($p < 0,05$) apenas pela presença ou ausência de cobertura crítica, não sendo afetados pela umidade inicial do solo (Tabela 1). De forma coerente com o esperado, a presença da cobertura vegetal reduziu a erodibilidade do solo e aumentou a tensão cisalhante crítica. A erodibilidade com a cobertura reduziu a quase a metade do valor observado em solo exposto, enquanto a tensão cisalhante crítica foi incrementada em 26 % na presença da pastagem. O efeito neste caso é exclusivo da cobertura, uma vez que a mesma somente foi removida antes dos ensaios. Desta forma, a amostra aqui considerada como solo exposto, tem em seu interior a contribuição agregante das raízes que não foram removidas da amostra.

O aumento no valor de tensão cisalhante crítica para a área coberta confirma a expectativa de que a pastagem confere ao solo maior resistência frente à ação do escoamento superficial.

Tabela 1. Variáveis associadas à erodibilidade de solo em função da presença e ausência de cobertura de pastagem e mensurada pelos ensaios de Inderbitzen e de campo

Cobertura	Ensaio de Inderbitzen		Ensaio de campo	
	Erodibilidade	Tensão cisalhante crítica	Erodibilidade	Perda de solo
	g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	Pa	Mg ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹	Mg ha ⁻¹
Solo exposto	0,007 a	0,257 b	0,064 a	0,923 a
Pastagem	0,004 b	0,325 a	0,041 b	0,517 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$).

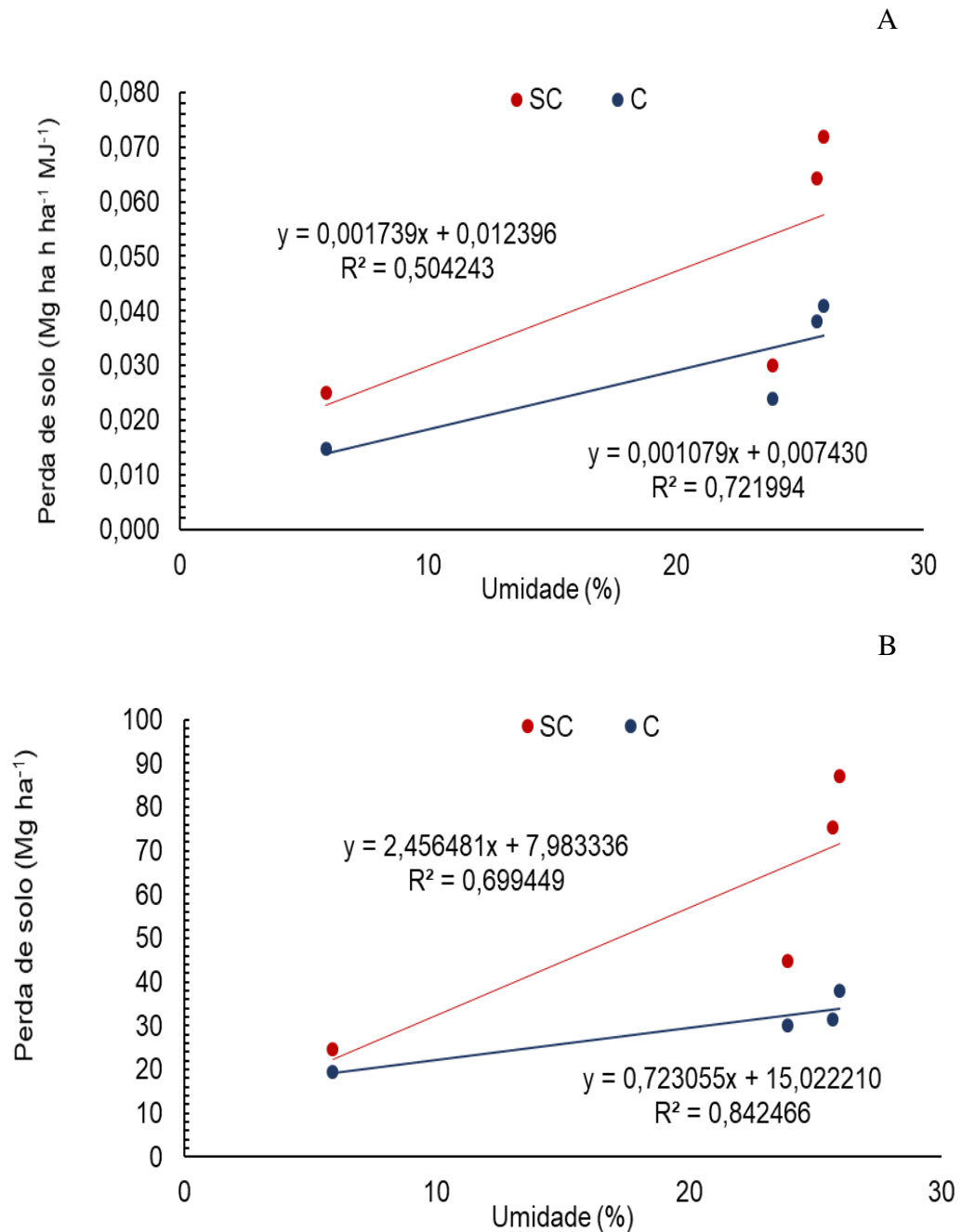
O solo da área experimental, independentemente da presença ou ausência de cobertura, pode ser considerado como pouco medianamente erodível, segundo a classificação proposta para ensaios de Inderbitzen por Bastos (1999). Segundo esta classificação, os solos são classificados como altamente erodíveis ($K > 0,1 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$), medianamente erodíveis ($0,001 < K < 0,1 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$) e pouco erodíveis ($K < 0,001 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$). Esta baixa erodibilidade pode ser associada com a classe dos Latossolos que, geralmente, apresentam maior resistência à erosão em comparação com outros tipos de solos. A baixa erodibilidade dos Latossolos são associadas às suas características mineralógicas e de estrutura granular e forte, que conferem a eles boa macroporosidade, elevada infiltração e boa permeabilidade (FENDRICH et al., 1997; SILVA et al., 2011; TOMAZONI & GUIMARÃES, 2005).

A avaliação da erodibilidade em condições de campo com o uso de chuvas simuladas também indicou maior erodibilidade do solo quando exposto (Tabela 1). A presença da cobertura reduziu os valores de erodibilidade em quase 60 %, novamente reforçando o papel da cobertura do solo na sua proteção e conservação, assim como indicado pelo ensaio de Inderbitzen.

A umidade inicial também afetou isoladamente os resultados da erodibilidade do solo em campo (Figura 5a). Os dados indicam que a erodibilidade do solo, independentemente da cobertura, aumenta com a umidade inicial do solo na taxa média de 0,12 % para cada incremento de 1 % na umidade base gravimétrica do solo. Em termos práticos, não parece ser esta taxa algo considerável, situação que pode encontrar justificativa novamente na alta estabilidade da estrutura dos Latossolos.

No que se refere à perda de solo mensuradas a campo, os dados novamente confirmam o papel protetor da cobertura do solo (Tabela 1). Este fator é capaz de reduzir em quase 80 % a perda de partículas de solo nas parcelas cobertas. A umidade inicial do solo também afetou os valores de perda de solo em campo (Figura 5b). A perda de solo aumenta com o aumento da umidade inicial, principalmente na área de solo exposto. Neste tratamento, o incremento de 1 % na umidade inicial leva ao aumento de $2,33 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto que na área de solo coberto, o aumento é de $0,79 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Figura 5. Efeito da umidade inicial na erodibilidade e perda de solo em função da presença e ausência de cobertura de pastagem em ensaios de campo com chuva simulada

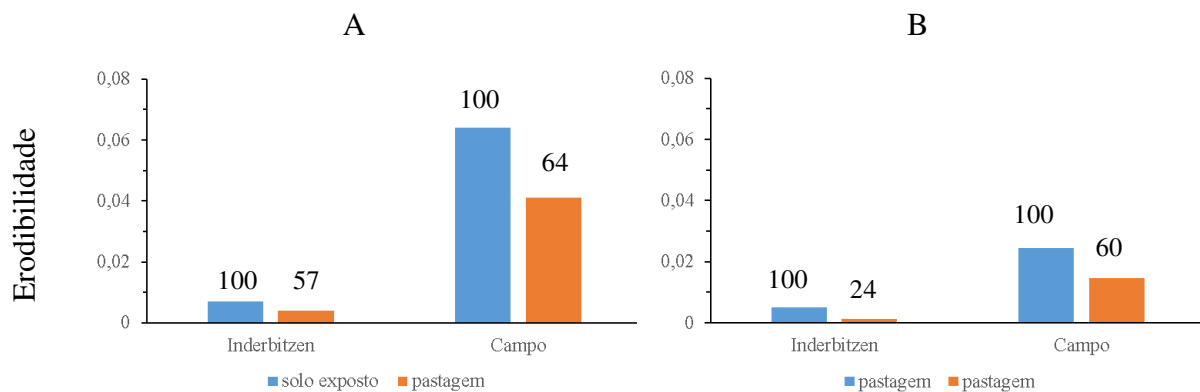


A comparação dos valores mensurados de erodibilidade estimados pelo ensaio de Inderbitzen e de campo é dificultada pela existência 60 leituras de campo e das 16 determinações de laboratório para cada cobertura. Desta forma, optou-se por apresentar os valores médios em função de duas situações de umidade inicial do solo. No primeiro caso, tem-se a comparação considerando todas as umidades avaliadas (Figura 6a) e, no segundo caso,

apenas com o solo na condição mais seca (Figura 6b). A justificativa para a análise na condição do solo mais seco é porque a umidade inicial afetou os valores estimados de erodibilidade de campo, mas não no laboratório.

Com são duas metodologias diferentes, inclusive em suas unidades, não se esperava concordância de valores de erodibilidade nas duas determinações, entretanto, nota-se uma relação lógica nas estimativas em termos percentuais quando se compara a determinação da erodibilidade na presença e ausência de cobertura. Quando todas as umidades são consideradas, em ambas as metodologias, a erodibilidade cai para algo em torno de 60 % do valor estimado no solo descoberto (Figura 6a). Como houve efeito da umidade inicial sobre a erodibilidade na avaliação de campo, uma nova comparação foi efetuada entre as metodologias padronizando-se para a condição mais seca do solo, que corresponde ao primeiro evento simulado de campo e a primeira coleta no ensaio de Inderbitzen. Nesta comparação (Figura 6 b), a capacidade protetiva da pastagem é confirmada e novamente nota-se redução da erodibilidade para os 60 % do solo descoberto. Na avaliação do ensaio de Inderbitzen, por sua vez, esse efeito é maior ainda, com a redução atingindo 24 % da erodibilidade do solo exposto.

Figura 6 – Erodibilidade do solo exposto e coberto com pastagem estimado pelo ensaio de Inderbitzen (laboratório) e por chuva simulada (campo)



Valor médio obtido considerando todas as umidades iniciais (A) e somente a condição mais seca (B). Erodibilidade pelo ensaio de Inderbitzen em $\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e, pelo método de campo, em $\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

Uma proposta de validação e correlação dos valores da erodibilidade obtida com o ensaio de Inderbitzen para poder substituir a estimativa efetuada em condições de campo dependeria da análise de um número maior de tipos de solos. Esta situação ideal enfrenta as dificuldades operacionais e de requerimento de tempo e recursos dos ensaios de campo, mas pode ser buscada no longo prazo. Desta forma, e mais com o propósito orientativo e de se construir um futuro banco de dados, o presente estudo sugere a indicação da relação Fator K (campo) = 10 x Fator K (Ensaio de Inderbitzen) para uso em Latossolos, considerando as unidades $\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ para o ensaio de laboratório e $\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para o procedimento de campo.

A confirmação desta relação em futuros estudos pode ser um diferencial nos estudos de perda de solos e sua modelagem, uma vez que o procedimento do ensaio de Inderbitzen é mais facilmente exequível do que o de campo.

4 CONCLUSÕES

A cobertura do solo é capaz de reduzir a erodibilidade do solo a quase a metade do valor obtido para o solo descoberto.

O ensaio de Inderbitzen apresenta potencial a ser explorado em estudos de perdas de solo e proporciona resultados com relação aparentemente direta com os obtidos em ensaios de campo.

REFERÊNCIAS

ALVES SOBRINHO, T. FERREIRA, P. A.; PRUSKI, F. F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, 2002.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 251 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D. & AMARAL, A.J. Erodibilidade de um Cambissolo Húmico alumínico léptico, determinada sob chuva natural entre 1989 e 1998 em Lages (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.465-471, 2002.

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 9. ed. São Paulo: Ícone, 2014. 355p.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- COGO, N.P. **Effect of residue cover, tillage induced roughness, and slope length on erosion and related parameters**. West Lafayette, Purdue University, 1981. 346p. (Tese de Doutorado).
- INDERBITZEN, A. L. An erosion test for soils. *Materials Research & Standards*. Philadelphia, v.1, n.7, p. 553-554, 1961
- FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M.; GARCIAS, C. M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 4. ed. Curitiba: Editora Universitária Champagnat, 1997.
- Koetz, M. **Métodos para a determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo em estradas não pavimentadas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.
- LIMA, P. M. P.; BAHIA, V. G.; CURI, N et al. **Princípios de erodibilidade do solo**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 16, n.176, p. 38-43, 1992.
- NACINOVIC, M. G. G., MAHLER, C. F. & AVELAR, A. S. Soil erosion as a function of different agricultural land use in Rio de Janeiro. **Soil & Tillage Research**. V. 144, p. 164-173, 2014.
- PRUSKI, F.F. Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. In: PRUSKI, F.F., ed. **Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2 ed. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2009. p.41-74.
- RIBEIRO, A. I., GONZALEZ, L. F., LONGO, R. M., DE MEDEIROS, G. A., ROSA, A. H., LOURENÇO, R. W. & Fengler, F. H. Soil erodibility assessment in a pasture and forest remnant using the Inderbitzen device. **Agronomical Institute of Campinas, IAC, Brazil**. V.170, P. 50-55, 2013.
- SILVA, M. A. da; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; OLIVEIRA, A. H.; LIMA, G. C.; CURI, N.; LEITE, F. P. **Erodibilidade de Latossolos no Vale do Rio Doce, Região Centro-leste do Estado de Minas Gerais**. In: Congresso brasileiro de ciência do solo, 33., 2011, Uberlândia. Anais... Uberlândia, SBCS, 2011.
- SPAROVEK, G., CORRECHEL, V. & PEREIRA BARRETTO, A. G. O. Dimensão dos impactos causados pela erosão nas pastagens brasileiras. **Science Agrícola**. v.64, n.1, p.77-82, 2007.

STEPHAN, A. M. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen**. 2010. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

TOMASI, L. F. **Ensaio de Inderbitzen para avaliação da erodibilidade dos solos e rochas: aplicação nas regiões de Santa Maria, São Francisco de Assis e Porto Alegre/RS**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na Bacia do Rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 57, n. 3, p. 235-244, 2005.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 26, n. 5, p. 189 - 193, 1971.

II CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos com infiltração da água no solo e erodibilidade são sempre um grande desafio em estudos hidrológicos. A complexidade envolvida nos procedimentos de determinação nos ensaios de campo dificulta a obtenção de valores de grande utilidade para estudos com impactos no manejo e conservação do solo e da água. Outra situação frequentemente encontrada é a ausência de informações para áreas declivosas no que se refere à infiltração da água no solo, uma vez que a maior parte dos estudos se concentra em relevo plano. Esta é a realidade de grande parte da região centro-sul do Brasil, área coberta em sua ampla maioria, por pastagens.

Diante deste cenário, o presente estudo objetivou avaliar alternativas metodológicas baseadas em *data mining* e *machine learning* para buscar estimar a infiltração de água no solo para solos brasileiros. Os resultados obtidos revelaram o potencial das funções de pedotransferência, e em especial dos modelos de aprendizado de máquina para esta tarefa, com destaque para o modelo Random Forest. A falta de uma estrutura de *open data* na ciência brasileira dificulta este tipo de estudos, e iniciativas para a composição deste tipo de repositório seria de grande valia para diferentes tipos de estudos. A se considerar que grande parte dos estudos são efetuados com recursos públicos, esta deveria ser uma obrigação dos pesquisadores, como já começa a acontecer em outros países do mundo. Obviamente que tal obrigação de criar e manter um banco de dados não deve cair sobre os pesquisadores, mas as agências e sociedades científicas deveriam capitanear este processo em nosso país.

Este mesmo estudo também procurou avaliar o efeito da declividade e da cobertura do solo sobre a estimativa da infiltração de água no solo. Este esforço hercúleo de um experimento de campo indicou que a declividade do terreno não afeta a taxa de infiltração de água no solo, infiltração acumulada e o escoamento superficial acumulado. Por outro lado, os dados mais uma vez confirmam o papel da cobertura do solo no incremento da taxa de infiltração e na redução da erodibilidade. Em termos quantitativos, este incremento na infiltração foi de 30 a 60 % nos diferentes eventos simulados e sucessivos avaliados. Destaca-se ainda que a cobertura e a qualidade da pastagem utilizada neste experimento são superior a realidade atual das pastagens na Zona da Mata Mineira. Sendo assim, os resultados encontrados neste trabalho podem ser considerados superiores aos demais campos. Sobre a erodibilidade, a cobertura reduziu a quase a metade do valor obtido na condição de solo descoberto.

E, finalmente, e com foco na busca de alternativas para as determinações de erodibilidade em campo, este estudo avaliou o ensaio de laboratório de Inderbitzen. Este

procedimento alternativo mostrou ter potencial a ser explorado em estudos de avaliação da erodibilidade e perdas de solo. O estudo chega a arriscar propor, de forma intencionalmente orientativa e provocativa, uma relação entre a erodibilidade de campo e a obtida pelo ensaio de Inderbitzen para uso em Latossolos. Mesmo sabendo das limitações envolvidas, das diferentes escalas e unidades, o objetivo desta provocação é incentivar novos estudos com diferentes solos e ser a semente um futuro banco de dados do tipo *open data*, que uma vez constituído terá grande e relevante para os estudos de conservação de água e solo no Brasil.

APÊNDICES

Apêndice A – Lista das publicações utilizadas na mineração de dados do capítulo 1

N	Ano	Fonte	Título	Autores
1	1983	Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira	Caracterização física do solo submetido a práticas de manejo em pomar de laranja baianinha	Fernando Luiz Dutra Cintra, Ygor Da Silva Coelho, Almir Pinto Da Cunha Sobrinho E Orlando Sampaio Passos
2	1996	Revista Brasileira De Ciência Do Solo	Influência do método na determinação da velocidade de infiltração	L. T. De L. Brito, B. T. Loureffio, W. Deniculi, M. M. Ramos & J. M. Soares
3	1996	Dissertação UFRGS	Infiltração de água em um Latossolo, sob chuva de alta intensidade, em diferentes sistemas de manejo	Amauri Antunes Barcelos
4	1996	Dissertação UFPR	Avaliação de algumas características físicas de um Cambissolo submetido a três sistemas de manejo com tração animal	Nilvânia Aparecida De Mello
5	1999	Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental	Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis	Édio Luiz Da Costa, Antônio Marciano Da Silva, Alberto Colombo & Agostinho R. De Abreu
6	1999	Pesquisa Agropecuária Brasileira	Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo	Luís Eduardo De Oliveira Sales, Mozart Martins Ferreira, Marcelo Silva De Oliveira E Nilton Curi
7	2001	Revista Scientia Agricola	Propriedades físicas de um Cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo	Ildegardis Bertol, Josué Fernando Beutler, Dirceu Leite, Odair Batistela
8	2003	Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental	Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional	Teodorico Alves Sobrinho, Antônio C. T. Vitorino, Luiz C. F. De Souza, Manoel C. Gonçalves & Daniel F. De Carvalho
9	2003	Revista Brasileira De Ciência Do Solo	Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica	C. A. Pott & I. C. De Maria
10	2005	Revista Engenharia Agrícola	Atributos físicos, químicos e erosão entressulcos sob chuva simulada, em sistemas de plantio direto e convencional	Cristiane G. Da Silva, Teodorico Alves Sobrinho, Antonio C. T. Vitorino, Daniel F. De Carvalho
11	2005	Revista Irriga	Avaliação da taxa de infiltração de água em um Latossolo Vermelho submetido a dois sistemas de manejo	Antonio Angelotti Netto; Edemo João Fernandes

12	2006	Revista Acta Scientiae	Avaliação da infiltração de água no solo, em sistema de integração agricultura-pecuária, com uso de infiltrômetro de aspersão portátil	Elói Panachuki, Teodorico Alves Sobrinho, Antônio Carlos Tadeu Vitorino, Daniel Fonseca De Carvalho e Mário Artemio Urchei
13	2006	Revista Brasileira De Ciência Do Solo	Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas	Viviane dos Santos Brandão, Demetrius David da Silva, Hugo Alberto Ruiz, Fernando Falco Pruski, Carlos Ernesto G.R. Schaefer, Mauro Aparecido Martinez; Sady Júnior Martins da Costa de Menezes
14	2008	Dissertação UFAL	Velocidade de infiltração da água em Latossolo amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo	Jorge Luiz Xavier
15	2008	Dissertação UFSM	Infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do planalto do Rio Grande do Sul	Sidinei Leandro Klöckner Stürmer
16	2008	Tese UFSM	Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções	Tatiana Tasquetto Fiorin
17	2009	Revista Bragantia	Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho sob cultivo do arroz de terras altas em diferentes manejos do solo e água	Karina Marie Kamimura, Marlene Cristina Alves, Orivaldo Arf, Flávio Ferreira Da Silva Binotti
18	2009	Revista Caatinga	Velocidade de infiltração da água em um Latossolo Amarelo submetido ao sistema de manejo plantio direto	Jorge Luiz Xavier Lins Cunha, Abel Washington Albuquerque, Cícero Alexandre Silva, Eliene De Araújo, Ronaldo Bernardino Dos Santos Junior
19	2009	Dissertação UFRGS	Caracterização física e química de um Argissolo em área de citricultura orgânica com diferentes manejos da cobertura vegetal do solo	Rogério Pietrzacka
20	2009	Dissertação UDESC	Atributos físicos e químicos de um Cambissolo húmico sob dois sistemas de manejo após doze anos de cultivo	Andreia Patricia Andrade
21	2010	Revista Engenharia Agrícola	Infiltração de água no solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de colheita e modelos de ajustes de equações de filtração	Bruno A. Tomasini, Antonio C. T. Vitorino, Marcos V. Garbiate, Cristiano M. A. De Souza, Teodorico A. Sobrinho
22	2010	Dissertação UFMT	Estimativa da infiltração da água no solo utilizando o modelo de Green-Ampt	George Luiz De Lima
23	2011	Revista Brasileira De Ciência Do Solo	Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo vermelho sob sistemas de manejo	Elói Panachuki, Ildegardis Bertol, Teodorico Alves Sobrinho, Paulo Tarso Sanches De Oliveira & Dulce Buchala Bicca

24	2011	Revista Ciência Rural	Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação	Andreia Kusumota Boninii, Deonir Secco, Reginaldo Ferreira Santos, Dalvan José Reinert, José Miguel Reichert
25	2011	Revista Agropecuária Científica No Semi-Árido	Velocidade de infiltração da água em um Latossolo Amarelo submetido ao sistema de cultivo mínimo	Jorge Luiz Xavier Lins Cunha, Cícero Alexandre Silva, Maria Eliani Holanda Coelho, Larissa De Oliveira Fontes, Marcio Gledson Oliveira Da Silva, Ítalo Nunes Silva
26	2012	Revista Irriga	Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo	Fernanda Coelho Gonçalves & Maria Helena Moraes
27	2013	Revista Em Agronegócios E Meio Ambiente	Determinação da velocidade de infiltração básica de água em dois solos do noroeste do estado do Paraná	Jefferson Vieira José, Roberto Rezende, Patricia Angélica Alves Marques, Paulo Sérgio Lourenço De Freitas, Daniel Soares Alves
28	2014	Revista Brasileira De Ciência Do Solo	Water infiltration in an Ultisol after cultivation of common bean	Maria Aparecida Do Nascimento Dos Santos, Elói Panachuki, Teodorico Alves Sobrinho, Paulo Tarso Sanches De Oliveira & Dulce Buchala Bicca Rodrigues
29	2014	Revista De Ciências Agroveterinárias	Variáveis hidrológicas e fósforo solúvel na enxurrada em duas formas de semeadura direta com aplicação de dejetos suíno	Fabrizio Tondello Barbosa, Ildegardis Bertol, André Júlio Do Amaral E Romeu De Souza Werner
30	2014	Revista Caatinga	Modeling of water infiltration in soil cultivated with eucalyptus and pasture	André Quintão de Almeida, Aristides Ribeiro, Yasmin Paiva Rody, Welliam Chaves Monteiro Da Silva, Fernando Palha Leite
31	2014	Revista Agrogeoambiental	Velocidade de infiltração básica de água como indicador da qualidade porosa do solo	Myashiro Fortes de Souza, Raphael Maia Aveiro Cessa, Elizeu Luiz Brachtvogel, Fábio Régis de Souza, Elói Panachuki, Igor Junior Hoppen Varão, Jeyssa Santino Costa, Markondes Lacerda Araújo, Patrícia Simone Kranz Caçol
32	2014	Dissertação UFSM	Variação da infiltração devido a alterações de uso do solo: estudo de caso de implementação de floresta em Bioma Pampa	Calinca Barão de Avila
33	2014	Dissertação UDESC	Atributos do solo e produção de biomassa vegetal em sistemas de manejo de campo nativo no Planalto Catarinense	Romeu de Souza Werner
34	2014	Revista Brasileira De Agricultura Irrigada	Características físico-hídricas de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo	Nelmício Furtado Da Silva, Fernando Nobre Cunha, Renato Campos De Oliveira, Fernando Rodrigues Cabral Filho; Marconi Batista Teixeira, José Joaquim Carvalho

35	2014	Dissertação UFSE	Estimativa da velocidade de infiltração básica (Vib) nos solos da sub-bacia do Rio Siriri-SE utilizando o modelo de Horton, Kostiaikov-Lewis e Philip	Halley Matos Tavares Santos
36	2015	Revista Brasileira De Ciência Do Solo	Water infiltration in two cultivated soils in Southern Brazil	Ildegardis Bertol, Fabrício Tondello Barbosa, Camilo Bertol, Rodrigo Vieira Luciano
37	2015	Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental	Water erosion and soil water infiltration in different stages of corn development and tillage systems	Daniel F. De Carvalho, Eliete N. Eduardo, Wilk S. De Almeida, Lucas A. F. Santos & Teodorico Alves Sobrinho
38	2015	Tese UDESC	Cobertura e rugosidade da superfície na proposição de indicadores de qualidade de um Cambissolo húmico relacionados ao controle da erosão hídrica	Júlio César Ramos
39	2015	Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental	Water infiltration rate in yellow Latosol under different soil management systems	Jorge L. X. L. Cunha, Maria E. H. Coelho, Abel W. De Albuquerque, Cicero A. Silva, Antônio B. Da Silva Júnior & Islan D. E. De Carvalho
40	2015	Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental	Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo	Débora C. Marchini, Tseng C. Ling, Marlene C. Alves, Silvio Crestana, Sebastião N. Souto Filho & Otton G. De Arruda
41	2015	Dissertação UFRRJ	Erosão hídrica e infiltração de água no solo em sistemas de cultivo, sob chuva simulada	Wilk Sampaio de Almeida
42	2016	Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental	Modeling of soil water infiltration with rainfall simulator in different agricultural systems	Thais E. M. Dos Santos, Edivan R. De Souza & Abelardo A. A. Montenegro
43	2016	Revista Cerne	Organic matter and physical-hydric quality of an Oxisol under eucalypt planting and abandoned pasture	Jonas Elias Castro Da Rocha, Alberto Bentes Brasil Neto, Norberto Cornejo Noronha, Marcos André Piedade Gama, Eduardo Jorge Macklouf Carvalho, Arystides Resendesilva, Cassio Rafael Costa Dos Santos
44	2016	Trabalho De Conclusão De Curso UFFS	Atributos físicos de um Latossolo Vermelho da área experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus de Erechim	Patrícia Elena Muller
45	2017	Soil & Tillage Research	Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration	Wilk Sampaio De Almeida, Elói Panachuki, Paulo Tarso Sanches De Oliveira, Roniedison Da Silva Menezes, Teodorico Alves Sobrinho, Daniel Fonseca De Carvalho

46	2017	Revista Ciências Agrárias	Study of soil physical properties and water infiltration rates in different types of land use	Kristiana Fiorentin Dos Santos; Fabrício Tondello Barbosa; Ildegardis Bertol; Romeu De Souza Werner; Neuro Hilton Wolschick; Josie Moraes Mota
47	2017	Dissertação UFB	Capacidade de infiltração de "barraginhas" em dois solos do Distrito Federal	Heloisa Do Espírito Santo Carvalho
48	2017	Dissertação UFSM	Infiltração de água no solo condicionada pelo uso de plantas de cobertura	Micael Stolben Mallmann
49	2018	Revista Agroecossistemas	Matéria orgânica e atributos físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo	Alberto Bentes Brasil Neto, Cássio Rafael Costa Dos Santos, Norberto Cornejo Noronha, Marcos André Piedade Gama, Eduardo Jorge Maklouf Carvalho, Arystides Resende Silva, Iandra Victória Pinto Guimarães, Pedro Ítalo Almeida De Souza
50	2018	Tese UFSM	Escoamento superficial e infiltração de água no solo em sistema plantio direto com "vertical mulching"	Robson Ilha
51	2018	Dissertação UENP	Infiltração da água em solos sob diferente uso	Eduardo Henrique Ribeiro Rodrigues
