

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RENATO TEODORO DE LIMA

PEDOFUNÇÕES PARA ESTIMAR A PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DO SOLO  
SATURADO E ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE SOLOS DO PARANÁ

CURITIBA

2020

RENATO TEODORO DE LIMA

PEDOFUNÇÕES PARA ESTIMAR A PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DO SOLO  
SATURADO E ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE SOLOS DO PARANÁ

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias,  
Universidade Federal do Paraná, como requisito  
parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência  
do Solo.

Orientador: Prof. Robson André Armindo

Coorientador: Dr. Cezar Francisco Araujo Junior

CURITIBA

2020

Lima, Renato Teodoro de

Pedofunções para estimar a permeabilidade hidráulica do solo saturado e atributos físicos e químicos de solos do Paraná. / Renato Teodoro de Lima. - Curitiba, 2020.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Robson André Armindo.

Coorientador: Cezar Francisco Araujo Junior.

1. Solos - Permeabilidade - Paraná. 2. Solos - Características físicas. 3. Solos - Características químicas. 4. Plantio Direto. I. Armindo, Robson André. II. Araujo Junior, Cesar Francisco. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -  
40001016014P4

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **RENATO TEODORO DE LIMA** intitulada: **PEDOFUNÇÕES PARA ESTIMAR A PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO E ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE SOLOS DO PARANÁ**, sob orientação do Prof. Dr. ROBSON ANDRÉ ARMINDO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 21 de Dezembro de 2020.

Assinatura Eletrônica  
21/12/2020 17:48:23.0  
ROBSON ANDRÉ ARMINDO  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
21/12/2020 17:59:03.0  
JAIRO CALDERARI DE OLIVEIRA JUNIOR  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
21/12/2020 17:59:45.0  
LUÍS CARLOS TIMM  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS)

Assinatura Eletrônica  
21/12/2020 17:56:33.0  
MOACIR DE SOUZA DIAS JR  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS)

Assinatura Eletrônica  
22/12/2020 10:09:07.0  
ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA  
Avaliador Externo (FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - UNICAMP)

## DEDICATÓRIA

A minha madrinha (avó) Brígida Clarignan Bossa (*in memoriam*) por ser a grande incentivadora e base da minha educação.

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus pelo dom da vida e por proporcionar-me saúde e discernimento.
- A minha família: minha mãe Zenaide Bossa Lima pelo incansável apoio em minhas decisões. Ao meu Pai Ulisses Teodoro de Lima por sempre mostrar a importância da honestidade e respeito. Ao meu irmão Ricardo Teodoro de Lima por sempre me apoiar. A minha noiva Érica Suzuki pela paciência e compreensão ao longo deste desafio.
- Ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade em cursar o doutorado.
- Ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná) que permitiu o desenvolvimento da pesquisa em suas instalações e com apoio técnico.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Robson André Armindo, por acreditar no desenvolvimento deste trabalho, com sugestões, críticas e ideias e pela sua amizade e incentivo ao longo desta caminhada.
- Ao meu coorientador Pesquisador Dr. Cezar Francisco Araujo Junior pela amizade e colaboração fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.
- A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pelos ensinamentos, auxílio e contribuição neste trabalho.
- Ao pesquisador Dr. João Henrique Caviglione (*in memoriam*) da área de solos do IAPAR por realizar a programação da plataforma Arduino do permeâmetro de carga decrescente do ar.
- Ao pesquisador do IDR-Paraná Dr. Mario Miyazawa pelos ensinamentos e colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.
- Ao professor Dr. Vagner do Nascimento, grande incentivador do meu ingresso na pós-graduação.
- Ao professor Dr. Matheus Fonseca Durães, pela amizade e pela orientação no estágio docência.

–Aos amigos de pós-graduação em especial a Aline Mari Huf dos Reis, pela amizade, ensinamentos e auxílios prestados enquanto estive em Curitiba.

–Aos funcionários Auro Sebastião da Silva e Vilson Rozendo do Laboratório de Física do Solo do IDR-Paraná pelo auxílio nas análises e amizade.

–Aos colegas e amigos do IDR-Paraná Felipe Seiti Matsubara, Vinícius Ferrari Tissiano, Vinícius Cesar Sambatti e Paulo Santana pelo apoio, amizade e auxílio em análises.

## RESUMO

Buscando compreender a dinâmica da água e suas relações com as propriedades físico-hidráulicas e químicas do solo, neste trabalho, objetivou-se caracterizar físico-hidráulica e quimicamente alguns solos do Paraná como: Latossolos, Nitossolo, Cambissolo, Neossolo e Argissolo. Adicionalmente, objetivou-se desenvolver e avaliar funções de pedotransferência (PTFs) de estimativa da permeabilidade hidráulica de solos saturados ( $K_{sat}$ ) do estado do Paraná. Amostras de solo em sextuplicatas com estrutura preservada e não preservadas foram coletadas em cada local, nas regiões oeste (Latossolo Vermelho Distroférico típico, município de Santa Tereza do Oeste), norte-pioneiro (Nitossolo Vermelho Eutroférico típico, município de Leópolis), centro-oriental (Cambissolo Háptico Ta Distrófico, município de Ortigueira) norte central (Latossolo Vermelho Distroférico típico, município de Londrina) e noroeste (Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Neossolo Quartzarênico, município de Amaporã) paranaense em solos sob mata nativa e cultivados nos horizontes A e B. Os resultados encontrados demonstraram que as propriedades físico-hidráulicas e químicas dos solos avaliados apresentam comportamento distinto, sendo alteradas como o tipo de manejo. As PTFs desenvolvidas para a estimativa de  $K_{sat}$  em solos paranaenses apresentou desempenho satisfatório, tornando-se alternativas para estudos futuros relacionados a essa propriedade nos solos avaliados.

**Palavras-chave:** permeabilidade do solo ao ar, condutividade hidráulica; sistema plantio direto.



## ABSTRACT

Seeking to understand the dynamics of water and its relationship with the physical-hydraulic and chemical properties of the soil, this work aimed to characterize physically-hydraulically and chemically some soils from Paraná, such as: Oxisols, Afisols, Inceptisols, Etisols and Utisols. Additionally, the objective was to develop and evaluate pedotransfer functions (PTFs) to estimate the hydraulic permeability of saturated soils ( $K_{sat}$ ) in the state of Paraná. Soil samples from sextuplicates with preserved and non-preserved structures were collected at each location, in the western regions (Typical Latossolo Vermelho Distroférico, municipality of Santa Tereza do Oeste), northern pioneer (Nitossolo Vermelho Eutroférico typical, municipality of Leopólis), center- eastern (Cambissolo Háplico Ta Distrófico, municipality of Ortigueira) north central (Latossolo Vermelho Distroférico typical, municipality of Londrina) and northwest (Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico and Neossolo Quartzarênico, municipality of Amaporã) in Paraná in soils under native forest and cultivated in horizons A and B. The results found showed that the physical-hydraulic and chemical properties of the evaluated soils present different behavior, being altered as the type of management. The PTFs developed for the estimation of  $K_{sat}$  in soils from Paraná presented satisfactory performance, becoming alternatives for future studies related to this property in the evaluated soils.

**Keywords:** soil to air permeability, hydraulic conductivity, no-tillage syst

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

BC – Brooks e Corey (1964)

CRAS – Curva de retenção de água do solo

CXvd – CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico

GG – Groenevelt e Grant (2004)

ILP – Integração lavoura pecuária

$k, p$  – Parâmetros de ajuste da equação de Groenevelt e Grant

LVdf – LATOSSOLO VERMELHO Distroférico

NVe – NITOSSOLO VERMELHO Eutófico

PCZ – Ponto de carga zero

PTF – Funções de pedotransferência

SSD – Sistema de Semeadura Direta

VG – Van Genuchten (1980)

$\alpha, n, m$  – Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten

$\lambda$  – Parâmetro de ajuste do modelo de BB

$K(\theta)$  – Permeabilidade hidráulica do solo não saturado [ $\text{m s}^{-1}$ ]

AD – Argila dispersa em água [ $\text{dag kg}^{-1}$ ]

Al – Teor de alumínio [ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ]

Ca – Teor de cálcio [ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ]

CAD – Capacidade de água disponível [ $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ]

$h_b$  – pressão de borbulhamento na entrada de ar de BC [kPa]

$k$  – pressão de borbulhamento na entrada de ar de GG [kPa]

K – Teor de potássio [ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ]

$K_{ar}$  – Permeabilidade do solo ao ar [ $\text{m s}^{-1}$ ]

$K_{ear}$  – Permeabilidade específica do solo ao ar [ $\mu\text{m}^2$ ]

$K_{sat}$  – Permeabilidade hidráulica do solo saturado [ $\text{m s}^{-1}$ ]

ME – erro médio [ $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ]

Mg – Teor de magnésio [ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ]

MO – Matéria orgânica [%]

$r$  – coeficiente de correlação de Pearson

RMSE – raiz do erro quadrático médio [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$RP$  – Resistência do solo à penetração [MPa]

$T$  – Capacidade de troca de cátions [ $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ]

$\varepsilon$  – Porosidade efetiva [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$\varepsilon(-10 \text{ kPa})$  – Porosidade efetiva equilibrado no potencial de 10 kPa [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$\varepsilon(-100 \text{ kPa})$  – Porosidade efetiva equilibrado no potencial de 100 kPa [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$\varepsilon(-33 \text{ kPa})$  – Porosidade efetiva equilibrado no potencial de 33 kPa [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$\phi$  – Porosidade do solo [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$\theta_{CC}$  – Capacidade de campo [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$\theta_{PMP}$  – Ponto de murchamento permanente [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$\theta_r$  – Umidade volumétrica residual [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$\theta_s$  – Umidade volumétrica saturada [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$\rho_b$  – Densidade do solo [ $\text{kg dm}^{-3}$ ]

$\rho_p$  – Densidade das partículas do solo [ $\text{kg dm}^{-3}$ ]

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	12
<b>1. CAPÍTULO I. FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA E PROPRIEDADES FÍSICO- HIDRÁULICAS DE SOLOS - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA-</b> .....	15
1.1. Resumo .....	15
1.2. Abstract .....	16
1.3. Introdução .....	17
1.4. Fundamentação Teórica .....	18
1.5. Conclusões .....	25
Referências .....	25
<b>2. CAPÍTULO II. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE SOLOS SOB SISTEMA NATIVO E PLANTIO DIRETO EM QUATRO LOCAIS DO PARANÁ</b> ...	31
2.1. Resumo .....	31
2.2. Abstract .....	32
2.3. Introdução .....	33
2.4. Material e Métodos .....	34
2.5. Resultados e Discussão .....	43
2.6. Conclusões .....	55
Referências .....	55
<b>3. CAPÍTULO III. FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMAR A PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS SATURADOS DO PARANÁ</b> .....	63
3.1. Resumo .....	63
3.2. Abstract .....	64
3.3. Introdução .....	65
3.4. Material e Métodos .....	66
3.5. Resultados e Discussão .....	74
3.6. Conclusões .....	89
Referências .....	89
<b>CONCLUSÃO GERAL</b> .....	95
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	95
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	96
<b>APÊNDICE</b> .....	109

## INTRODUÇÃO GERAL

O estado do Paraná é um dos principais produtores de grãos e carnes do país com uso intensivo do solo. As condições climáticas transicionais entre os climas tropicais e subtropicais favorecem o cultivo da mesma área de duas até três vezes por ano. Assim, o uso intensivo do solo por meio da mecanização e de insumos tem proporcionado a degradação das funções edáficas do solo, ocasionando deformação da estrutura e redução da capacidade do solo conduzir água e ar. Ademais, os processos de compactação e erosão hídrica acelerada do solo tem sido observados nessas áreas de uso intensivo.

O sistema de plantio direto é considerado um sistema de agricultura conservacionista no qual as sementes são colocadas em um solo sem preparo, apenas por meio da abertura de uma fenda estreita, trincheira ou cova de largura e profundidade suficientes para a colocação e cobertura adequadas das sementes, mudas ou material propagante (Derpsch et al., 2014).

Nesse sistema de cultivo, o acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo para posterior incorporação biológica promove vantagens para o solo. Tais vantagens se dão pelo aumento no conteúdo de matéria orgânica, pela proteção da superfície do solo contra o impacto direto das gotas de chuva e pelo aumento das taxas de infiltração e de disponibilidade da água no solo, além da redução na amplitude térmica do solo (Derpsch et al., 2014). No entanto, a ausência de revolvimento do solo promove um aumento dos valores de densidade do solo e resistência do solo à penetração, intrínsecas ao sistema de cultivo.

Os solos, para serem considerados produtivos, devem reunir condições químicas, físicas e biológicas favoráveis para a produção econômica de determinadas culturas (Blanco-Canqui e Ruis, 2018). Cada classe de solo reúne um conjunto de atributos intrínsecos, resultados dos processos pedogenéticos, que permite uma utilização adequada de acordo com suas potencialidades e limitações, destacando-se, por exemplo, sua fertilidade, profundidade efetiva, capacidade de infiltração de água, resistência à erosão e compactação, entre outras. Muitos solos com bom potencial produtivo são manejados de forma inadequada gerando o surgimento de uma série de processos de degradação com repercussão econômica de largo alcance.

O solo é um meio heterogêneo com constantes mudanças, sendo que para melhor compreensão dessas propriedades, busca-se correlacioná-las com outras propriedades do solo como químicas, mineralógicas e físico-hidráulicas.

Os estudos da permeabilidade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) e da permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) são importantes, pois essas propriedades são ferramentas de caracterização da estrutura e tipo do solo. Infelizmente, registros de bancos de dados de  $K_{sat}$  e  $K_{ar}$  de solos do

estado do Paraná ainda são escassos. Tanto  $K_{sat}$  quanto  $K_{ar}$  apresentam significativa variabilidade espacial e temporal no solo, principalmente por serem fortemente relacionadas com a estrutura, sendo afetadas pela cobertura, manejo e intemperes climáticas que ocorrem sobre o solo (Poulsen et al., 2001; Bormann e Klaassen, 2008).

Dada a complexidade, tanto de levantamento a campo quanto dos inúmeros métodos e condições de contorno para a determinação da permeabilidade, alguns estudos buscam facilitar essa obtenção estimando seus valores por meio de funções de pedotransferência (PTFs). O desenvolvimento de PTFs depende da disponibilidade e da qualidade dos dados de entrada que são fatores cruciais nos estudos de modelagem. Entretanto, em países em desenvolvimento, as PTFs empírico-calibradas são limitadas devido à diversos fatores, como essa indisponibilidade de amplos bancos de dados (Santra e Das, 2008).

PTFs para estimativa de  $K_{sat}$  podem ser desenvolvidas por meio do levantamento das propriedades físico-hidráulicas e químicas de diferentes classes solos do estado do Paraná.

O objetivo no presente estudo foi caracterizar as propriedades físico-hidráulicas e químicas de solos do estado do Paraná em sistemas naturais e cultivados em plantio direto e desenvolver e avaliar PTFs para estimativa de  $K_{sat}$  desses solos. As análises e os resultados obtidos foram organizados e apresentados em três capítulos, descritos a seguir:

Capítulo 1 – Funções de pedotransferência e propriedades físico-hidráulicas de solos – Fundamentação Teórica;

Capítulo 2 – Caracterização física e química de solos sob sistema nativo e plantio direto em quatro locais do Paraná;

Capítulo 3 – Funções de pedotransferência para estimativa da permeabilidade hidráulica de solos saturados do Paraná.

## REFERÊNCIAS

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, p. 164–200, 2018.

BORMANN, H.; KLAASSEN, K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils. **Geoderma**, v. 145, n. 3–4, p. 295–302, 2008.

DERPSCH, R.; FRANZLUEBBERS, A. J.; DUIKER, S. W.; REICOSKY, D. C.; KOELLER, K.; FRIEDRICH, T.; STURNY, W. G.; SÁ, J. C.M.; WEISS, K. Why do we need to standardize no-tillage research? **Soil and Tillage Research**, v. 137, p. 16–22, 2014.

POULSEN, T. G.; IVERSEN, B. V.; YAMAGUCHI, T.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P. Spatial and temporal dynamics of air permeability in a constructed field. **Soil Science**, v. 166, n. 3, p. 153–162, 2001.

SANTRA, P.; DAS, B. S. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. **Geoderma**, v. 146, n. 3–4, p. 439–448, 2008.

## - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA -

### CAPÍTULO 1: FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA E PROPRIEDADES FÍSICO-HIDRÁULICAS DE SOLOS

#### RESUMO

A pura descrição física da interdependência entre as diversas propriedades físico-hidráulicas do solo é complexa, sendo a busca de correlações significativas entre essas propriedades uma alternativa para melhor compreensão dos processos que ocorrem nos solos. A permeabilidade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) estabelece a relação entre a densidade de fluxo de água e o gradiente hidráulico em condição de solo saturado, indicando a máxima permeabilidade desse meio poroso a passagem de água. A estrutura do solo é fundamental para manutenção dos fluxos de água que ocorrem no meio, sendo a matéria orgânica e íons, como cálcio, magnésio e potássio, fatores indiretos que podem alterá-la e, conseqüentemente, o fluxo de água. Alguns atributos dos solos são de difícil ou de onerosa medição, além de exigirem ampla amostragem, o que inviabiliza a análise em muitas situações. Buscando contornar essa situação, funções de pedotransferência (PTFs) foram desenvolvidas. PTFs são funções matemáticas utilizadas na estimativa de propriedades do solo de difícil mensuração por meio de outras propriedades medidas rotineiramente, de maior facilidade ou com menor custo. Atributos físicos-hidráulicos e químicos do solo podem se correlacionar significativamente com a variável  $K_{sat}$ , levando a melhor compreensão dos fatores que alteram essa variável. As PTFs para a estimativa de  $K_{sat}$  podem ser desenvolvidas com variáveis mais simples, como as frações texturais do solo, até variáveis mais complexas, como os parâmetros das equações das curvas de retenção e de permeabilidade hidráulica do solo, além dos tipos de argila. Assim, as PTFs são amplamente aplicadas em amplos estudos de modelagem hidrológica, de balanço hídrico, de fluxo de drenagem e de estimativa de produtividade das culturas agrícolas. Elas têm sido aplicadas também em análises de incerteza quanto à descrição da variabilidade espacial das propriedades físico-hidráulicas do solo.

**Palavras-chave:** Pedofunção, Funções transferidoras, condutividade hidráulica.



## - THEORETICAL FOUNDATION REVIEW -

### CHAPTER 1: PEDOTRANSFER FUNCTIONS AND PHYSICAL-HYDRAULIC PROPERTIES OF SOILS

#### ABSTRACT

The pure physical description of the interdependence amongst the physical-hydraulic properties of the soil is complex. The search for significant correlations amongst these properties is an alternative for a better understanding of the processes that occur in soils. The hydraulic permeability of the saturated soil ( $K_{sat}$ ) establishes the relationship between the water flow density and the hydraulic gradient in a saturated soil condition, indicating the maximum permeability of this porous medium to the water transport. The soil structure is fundamental for maintaining the water balance in the environment, where organic matter and ions, such as calcium, magnesium and potassium, are indirect factors that can alter it and consequently the water flow. Some soil properties are difficult or costly to measure and require extensive sampling, becoming impracticable in many situations. In order to circumvent this situation, the pedotransfer functions (PTFs) were developed. PTFs are mathematical functions used in the estimation of soil properties that are difficult to measure using other properties that are routinely measured, easier or less costly. Physical-hydraulic and chemical attributes of the soil can be related to the  $K_{sat}$  property, leading to a better understanding of the factors that alter this variable. PTFs for  $K_{sat}$  estimation can be developed with simpler variables, such as textural fractions of the soil, to more complex variables, such as the parameters of the equations of the water retention and permeability curves and the types of clay. Thus, PTFs are widely applied in extensive studies of hydrological modeling, water balance, drainage flow and productivity estimation of agricultural crops. Besides that, PTFs have been used in the uncertainty analysis of the spatial variability of the soil physical-hydraulic properties.

**Keywords:** Pedofunction, soil modelling, hydraulic conductivity.

### 1.3. INTRODUÇÃO

A pura descrição física da interdependência entre as diversas propriedades físico-hidráulicas do solo é complexa, sendo a busca de correlações significativas entre essas propriedades uma alternativa para melhor compreensão dos processos que ocorrem nos solos.

A constante de permeabilidade hidráulica foi definida por Henry Darcy em seu trabalho, no entanto sua definição também pode ser encontrada nas ciências agrárias como condutividade hidráulica. A fim de padronizar e facilitar a leitura ao longo do texto será utilizado o termo “permeabilidade hidráulica” do solo saturado ( $K_{sat}$ ).

A propriedade  $K_{sat}$  estabelece a relação entre a densidade de fluxo de água e o gradiente hidráulico em condição de solo saturado, indicando a máxima permeabilidade desse meio poroso a passagem de água. Sendo fortemente variável e dependente dos demais atributos do solo, essa propriedade é dependente da textura e estrutura do solo, sendo fundamental para descrição dos fluxos de água no meio poroso. Fatores indiretos que agem na estrutura do solo, como a matéria orgânica e íons de cálcio, magnésio e potássio, podem alterar o fluxo de água no solo.

A matéria orgânica é considerada como um dos principais agentes na agregação das partículas do solo. Consequentemente, alterações estruturais que promovam maior porosidade podem contribuir para elevações na infiltração de água e na variação do tamanho dos agregados do solo. Índices de agregação em solos tropicais podem ser atribuídos a variação no conteúdo de carbono orgânico (Castro Filho et al., 2002).

Além dos fatores indiretos que agem sobre a estrutura do solo, processos pedogenéticos podem alterar os valores de  $K_{sat}$ . Menores valores de  $K_{sat}$  foram observados para horizontes subsuperficiais, o que pode ser atribuído a característica de subsolos possuírem menor macroporosidade do que horizontes superficiais (Han et al., 2008).

A propriedade  $K_{sat}$  é indispensável para o entendimento do fluxo de gases, calor e solutos no solo, já que a umidade interfere no transporte de massa e energia nesse meio poroso. Ademais,  $K_{sat}$  é um indicador utilizado na avaliação das práticas de manejos e da qualidade física do solo. Sabe-se que a medição de  $K_{sat}$ , dentre os vários métodos existentes, é trabalhosa e demanda muito tempo, principalmente na medição de muitas amostras em permeâmetros ou na perfuração de vários poços ao longo da área de amostragem. Para facilitar, funções de pedotransferência (PTFs), que são funções matemáticas utilizadas na estimativa de propriedades do solo de difícil mensuração por meio de outras propriedades medidas rotineiramente, de maior facilidade ou com menor custo, são utilizadas como alternativa onde

a medição de  $K_{sat}$  é inapropriada. Neste trabalho, teve-se como objetivo ressaltar as implicações da propriedade  $K_{sat}$ , discutindo suas correlações com outros atributos do solo e sua obtenção por meio de funções de pedotransferência.

## 1.4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E IMPLICAÇÕES DA PERMEABILIDADE HIDRÁULICA

### 1.4.1. Permeabilidade hidráulica do solo saturado

O primeiro estudo do movimento de água em meios porosos foi realizado em colunas de areia saturadas com água por Darcy (1856), objetivando analisar a filtragem da água em temperatura ambiente e regime laminar de escoamento.

As medidas dos valores de  $K_{sat}$  podem ser realizadas em campo com permeâmetros, por ex., o de Guelph, ou em laboratório com permeâmetros de carga constante ou decrescente. Avaliando  $K_{sat}$  em laboratório via permeâmetros de carga constante e decrescente em amostras de Latossolos da região amazônica, Marques et al. (2008) observaram menores coeficientes de variação e desvio padrão de  $K_{sat}$  quando medido no permeâmetro de carga constante.

Os fluxos de água, solutos e substâncias químicas são dependentes de  $K_{sat}$  (Mesquita e Moraes, 2004). Além disso, a  $K_{sat}$  é frequentemente utilizada para avaliação de práticas de manejos no solo. Avaliando o tempo de adoção do sistema de semeadura direta (SSD) em um NITOSSOLO VERMELHO, Assis e Lanças (2005) observaram maiores valores de  $K_{sat}$  em uma mata nativa e em um SSD com 12 anos de implementação e menores valores no plantio convencional.

O movimento de água no solo pode ser analisado a partir de  $K_{sat}$  e dos parâmetros das equações da curva de retenção de água do solo (CRAS), onde se estima a função permeabilidade hidráulica do solo não saturado [ $K(\theta)$ ] (van Genuchten, 1980; Silva et al., 2020).

Técnicas de micromorfologia podem auxiliar sobre o entendimento do movimento de água no solo (Reis et al., 2019) Por meio de imagens micromorfológicas de um LATOSSOLO VERMELHO eutroférico, Souza et al. (2006) observaram diferenciações da geometria do espaço poroso, que interferiu nos valores de  $K_{sat}$ . De acordo com Gennaro et al. (2015), por possuírem maior detalhamento dos poros quanto à quantidade, ao tamanho e à forma, imagens digitalizadas 2-D são mais apropriadas para quantificar alterações causadas pelo manejo do que propriedades como a densidade e a macroporosidade do solo.

#### 1.4.2. Variáveis físico-hidráulicas e química do solo relacionadas com a permeabilidade hidráulica do solo

Para um melhor entendimento da constante  $K_{sat}$ , busca-se relacionar essa variável com outros atributos dos solos. Essa constante é altamente variável e dependente dos demais atributos, principalmente da textura, densidade do solo seco ( $\rho_b$ ), densidade das partículas ( $\rho_p$ ), porosidade total ( $\phi$ ), macro e microporosidade (Mesquita e Moraes, 2004).

Os valores de  $K_{sat}$  em grande parte não apresentam distribuição normal, sendo utilizada, em alguns casos, a transformação dos dados em logaritmo na base 10 para correlações com outras propriedades do solo.

Em solos arenosos do estado americano de Nebraska, Wang et al. (2009) não encontraram um padrão aparente entre a  $K_{sat}$  e a fração argila, enquanto para os conteúdos de areia e silte os autores verificaram correlações positiva e negativa, respectivamente. Em diferentes solos norte-americanos, Puckett et al. (1985) observaram uma relação exponencial de decaimento da  $K_{sat}$  com os aumentos dos conteúdos de argila. Já em solos tropicais, Ferreira et al. (1999) verificaram que o aumento do conteúdo de argila promoveu aumento na  $K_{sat}$ , enquanto o aumento da caulinita contribuiu para a redução.

Com o aumento nos valores de  $\rho_b$ , há redução da macroporosidade do solo e da conectividade entre os poros, portanto uma relação negativa entre os parâmetros  $K_{sat}$  e  $\rho_b$  pode ocorrer. A densidade do solo é uma propriedade constantemente relacionada com  $K_{sat}$  sendo, juntamente com a textura, uma das principais variáveis utilizadas no desenvolvimento de PTFs (Wösten et al., 2001).

A dispersão da argila (AD) pode acarretar na obstrução dos poros do solo e conseqüentemente na redução nos valores de  $K_{sat}$ . Práticas como calagem e aplicação de fertilizantes orgânicos, além da eletroquímica dos argilominerais do solo, atuam indiretamente na redução do valor de  $K_{sat}$ , devido a alteração nas cargas variáveis do solo promovendo a dispersão de argila (Roth e Pavan, 1991; Cherobim et al., 2018; Bennett et al., 2019).

A relação do sistema poroso dos solos com a  $K_{sat}$  é também constantemente analisada, visto que os poros são responsáveis pela transmissão de água e gases. No entanto, a dinâmica de como isso ocorre depende da geometria e da continuidade do sistema poroso. Em diferentes classes solos do estado de Minas Gerais, Ribeiro et al. (2007) observaram que a variação de  $K_{sat}$  foi diretamente proporcional a macroporosidade do solo (poros que retém água com diâmetro superior a 50 micrômetros).

Uma das principais propriedades físicas do solo para a estimativa de  $K_{sat}$  é a porosidade efetiva, definida como a porção da porosidade total que contribui mais para o fluxo saturado, por corresponder aos maiores poros do solo (Brooks e Corey, 1964). Assim, a porosidade efetiva é obtida subtraindo a porosidade total da umidade equilibrada em potenciais matriciais de -33 kPa (Ahuja et al., 1984) ou ainda no potencial do ponto de inflexão (Dexter e Bird, 2001) da curva de retenção água no solo conforme sugerido por Han et al. (2008).

A estrutura é fundamental para manutenção dos fluxos de água no solo. Alterações decorrentes de manejos incorretos, como o tráfego de máquinas em solos com umidade inadequada, causam aumento nos níveis de compactação do solo refletindo no aumento da  $\rho_b$  e da sua resistência do solo à penetração ( $RP$ ), reduzindo consequentemente o valor de  $K_{sat}$  (Keller et al., 2019).

Outra propriedade relacionada com  $K_{sat}$  é a permeabilidade específica ou intrínseca do solo ( $K_e$ ), que pode ser medida ao fluxo de água ( $K_{eag}$ ) ou ao fluxo de ar ( $K_{ear}$ ), uma vez que os poros destinam, respectivamente, o mesmo espaço para os fluxos de água e ar em condição de saturação desses fluidos. Em três de quatro classes de solos dinamarqueses, Iversen et al. (2001) encontraram correlações moderadas ( $0,50 < r < 0,70$ ) a forte ( $r > 0,70$ ) (More et al., 2017), entre  $\log(K_{sat})$  e  $\log(K_{ear})$  (medida no potencial matricial de -5 kPa). Em diferentes horizontes e manejos de solos dinamarqueses e noruegueses, Loll et al. (1999) também obtiveram correlações moderadas e forte entre  $\log(K_{sat})$  e  $\log(K_{ear})$ , medida em -10 kPa.

A relação da  $K_{sat}$  com os atributos químicos do solo é atribuída principalmente com AD. Em colunas de solos, Bolan et al. (1996) observaram que à medida que o  $pH$  do solo se aproximava do ponto de carga zero (PCZ), a carga líquida diminuía resultando na floculação das argilas e no aumento de  $K_{sat}$ . Já à medida que o  $pH$  se distanciava do PCZ, houve aumento da carga superficial líquida, resultando na dispersão da argila e redução de  $K_{sat}$ .

Apesar do alumínio ( $Al$ ) ser um elemento tóxico para plantas e gerar acidez para o solo, ele age de forma oposta na estrutura, fortalecendo a agregação entre as partículas de argila com matéria orgânica e, desta forma, beneficiando indiretamente a  $K_{sat}$ . Em um ensaio com colunas de solos, Shainberg et al. (1987) verificaram que com as amostras tratadas com 2,0 e 4,0  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$  de  $Al$  apresentaram maior  $K_{sat}$  em relação as amostras com 1,0 e 0  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-1}$  de  $Al$ .

Dentre os atributos químicos, o carbono orgânico ( $C$ ) ou matéria orgânica do solo tem sido frequentemente relacionado(s) com a constante  $K_{sat}$ . O carbono orgânico atua indiretamente na estrutura, podendo reduzir  $\rho_b$  e aumentar a macroporosidade do solo. A adição de matéria orgânica em formas de adubos, palha ou serragem pode incrementar a fração

volumétrica de ar e os espaços inter-agregados do solo, que são responsáveis pelo aumento da transmissão de água (Eusufzi e Fujii, 2012).

Contudo a matéria orgânica pode apresentar um efeito oposto, Nemes et al. (2005) salientam que os valores de  $K_{sat}$  são dependentes da qualidade da matéria orgânica pois ela pode obstruir os poros do solo. Já Ellerbrock et al. (2005) ressaltaram que a matéria orgânica apresenta baixa molhabilidade, reduzindo  $K_{sat}$ .

As bases cálcio ( $Ca$ ) e magnésio ( $Mg$ ) também apresentam uma ação de dispersão de da argila, que como apontado pode obstruir os poros naturais do solo e reduzir  $K_{sat}$ . Zhang e Norton (2002) observaram que acréscimos de  $Ca$  e  $Mg$  acarretam no aumento da AD e na redução de  $K_{sat}$ .

A calagem por meio da adição de calcário é uma das principais práticas corretivas da acidez do solo e fonte de  $Ca$  e  $Mg$ . Em colunas de solo com 25 cm de altura e 10 cm de diâmetro, preenchidas com amostras da camada de 0–20 cm de profundidade de um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa, Spera et al. (2008) observaram que  $K_{sat}$  decresceu com o aumento das doses de calcário. Os autores atribuíram este efeito à obstrução dos poros, principalmente dos macroporos devido a dispersão de argilas favorecida pela calagem. No entanto, os efeitos dispersivos da calagem podem ocorrer em curto prazo, pois em longo prazo pode favorecer a atividade de microrganismos, os quais degradam a matéria orgânica gerando agentes cimentantes como os polissacarídeos que contribuem para a agregação do solo (Castro Filho e Logan, 1991).

O íon  $K^+$  é um cátion monovalente e tem a característica de promover a dispersão das partículas de argila, assim como o sódio, provocando redução do espaço poroso do solo e, por sua vez, a permeabilidade (Uyeda et al., 2013)

#### 1.4.3. Funções de pedrotransferência para a permeabilidade hidráulica do solo saturado

Alguns atributos dos solos são de difícil obtenção ou de orenosa medição. Ademais, alguns deles exigem muitas amostras durante a determinação, inviabilizando a análise em algumas dessas situações.

Buscando contornar essa situação foram propostas as funções de pedotransferência (PTFs), que são funções matemáticas utilizadas na estimativa de propriedades do solo de difícil mensuração por meio de outras propriedades medidas rotineiramente, de maior facilidade ou com menor custo (McBratney et al., 2002; Silva et al., 2017a).

As PTFs empíricas são desenvolvidas para estimar parâmetros do modelo hidráulico a partir de propriedades facilmente medidas (Minasny et al., 2006). Já as PTFs fisicamente fundamentadas busca relacionar as variáveis a serem preditas ao mecanismo físico de causa e efeito (Mulazzani, 2016), como por exemplo o modelo de Arya e Paris (1981), que relaciona a curva granulométrica com a curva de retenção de água do solo.

A utilização das PTFs pode reduzir o esforço envolvido na amostragem do solo e na análise laboratorial, criando-se uma oportunidade para aumentar a densidade de informações que contribuam com os estudos de variabilidade do solo (van Alphen et al., 2001; Silva et al., 2017b). No entanto, PTFs empíricas que foram calibradas para solos de uma determinada região podem não ser apropriadas para outras regiões (Tomasella e Hodnett, 2004). A maioria das PTFs empíricas para predição da  $K_{sat}$  é baseada nas frações texturais do solo.

Os conteúdos de *argila* e *areia* de solos norte-americanos foram utilizados por Cosby et al. (1984) como variáveis preditoras de  $K_{sat}$ . Em outro estudo também com solos norte-americanos, Puckett et al. (1985) utilizaram somente o teor de *argila*, enquanto Julià et al. (2004) observaram em solos da Península Ibérica na Espanha que a fração *areia* foi a variável mais significativa para predição da  $K_{sat}$ .

A fim de melhorar as estimativas de  $K_{sat}$ , além das variáveis texturais, busca-se a inserção de variáveis relacionadas diretamente com a estrutura do solo (como  $\rho_b$ ) e indiretamente (como o conteúdo de carbono). Muitos fatores podem influenciar a estimativa de  $K_{sat}$ , de acordo com Zhang e Schaap (2019) preditores relevantes, incluindo a estrutura do solo e a utilização de novas técnicas estatísticas e modelos devem ser empregados para o desenvolvimento de PTFs. Para a predição de  $K_{sat}$  em solos europeus, Vereecken et al. (1990) utilizaram *argila*, *areia*, *matéria orgânica* e  $\rho_b$  como variáveis preditoras.

O modelo de Ahuja et al. (1984) é uma das principais PTFs para predição da  $K_{sat}$  relacionando a porosidade efetiva [ $\varepsilon$  (-33 kPa)] de forma potencial com a  $K_{sat}$ , sendo essa uma equação modificada de Kozeny-Carman. O melhor desempenho dessa PTF provavelmente se dá pela utilização de uma variável relacionada a rede de poros, ou seja, com a estrutura do solo (Zhang e Schaap, 2019).

Modificações do modelo de Ahuja et al. (1984) foram indicadas, principalmente no expoente da equação, de acordo com Ahuja et al. (1989). Valores próximos de 4,0 para o expoente deste modelo geraram boas estimativas de  $K_{sat}$  em solos norte-americanos. Outra sugestão foi realizada por Rawls et al. (1998), que inseriu o parâmetro  $\lambda$  do modelo da CRAS de Brooks e Corey (1964) (BC) no expoente (3- $\lambda$ ).

Os parâmetros dos modelos de CRAS são frequentemente utilizados para estimativa da função permeabilidade hidráulica do solo não saturado  $[K(\theta)]$  e de  $K_{sat}$ . Assim, Guarracino (2007) utilizou o parâmetro  $\alpha$  do modelo de van Genuchten (1980) (VG) enquanto, Timlin et al. (1999) utilizou o parâmetro  $\lambda$  do modelo de BC para estimativa de  $K_{sat}$ .

Apesar do potencial dessas PTFs, os parâmetros das equações que descrevem a CRAS são questionáveis quando se utiliza medições da umidade volumétrica ( $\theta$ ) do solo em poucos potenciais matriciais ( $h$ ). Uma solução para isso pode ser a utilização de PTFs paramétricas calibradas com muitos dados de  $\theta(h)$  (Schaap et al., 2001; Silva et al., 2020), contudo, o grau de incerteza gerado por sucessivas estimativas deve ser investigado.

Uma relação linear entre  $\log(K_{sat})$  e  $\log(K_{ear})$  também pode ser utilizada como PTF para predição de  $K_{sat}$  (Loll et al. 1999; Iversen et al., 2001). De acordo com Loll et al. (1999), torna-se mais rápido realizar medidas de  $K_{ear}$  no potencial de -10 kPa [ $K_{ear}(-10\text{ kPa})$ ] do que proceder as medidas de  $K_{sat}$ . Kuncoro et al. (2014) relataram forte ( $r > 0,70$ ) (More et al., 2017), correlação entre  $\log([K_{ear}(-10\text{ kPa})])$  e  $\log(K_{sat})$ , os autores ainda hipotetizaram que o fluxo de ar, diferentemente do hidráulico, é restringido pela matéria orgânica. Em áreas que passaram por incêndios, Chief et al., (2008) avaliaram essa relação com medidas de  $K_{ear}$  realizadas *in situ* e também obtiveram correlações moderadas e forte com o  $\log(K_{sat})$ .

#### 1.4.4. Aplicabilidade das funções de pedrotransferência para a permeabilidade hidráulica solo saturado

Por meio de PTFs pode-se obter informações de propriedades físico-hidráulicas do solo à um custo relativamente baixo. Deste modo, modelos exploratórios a partir das contribuições das PTFs torna-se viável, como balanço hídrico do solo, modelos agrometeorológicos, avaliação de distintos cenários com mudanças de práticas de manejo do solo e da água, crescimento radicular das plantas e produtividade das culturas agrícolas (Nemes et al., 2006).

Avaliando os efeitos das estimativas das propriedades físico-hidráulicas do solo no balanço hídrico do solo, crescimento de raízes e na produtividade de 19 safras de três cereais (milho, trigo e cevada) e três leguminosas (soja, grão-de-bico e amendoim), Ma et al. (2009), observaram que em seis safras, as simulações do balanço hídrico do solo foram mais afetadas pela  $K_{sat}$  do que pela CRAS, enquanto o crescimento simulado das culturas foi afetado por ambos,  $K_{sat}$  e CRAS.

Em vários modelos de simulação do movimento de água no solo, como o DRAINMOD (Skaggs, 1991) que simula a drenagem do solo, ou ainda em modelos como o SWAP (Kroes et



al., 2008) e o AquaCrop (Raes et al., 2009) que podem simular o transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera, normalmente a variável  $K_{sat}$  é requerida como parâmetro de entrada nas simulações.

Avaliando o modelo DRAINMOD que utiliza a  $K_{sat}$  estimada por PTFs do ROSETTA (Schaap et al., 2001), Salazar et al. (2008) observaram que os valores de  $K_{sat}$  estimados apresentaram a mesma precisão dos valores medidos para simular o fluxo de drenagem em um solo de textura arenosa.

Buscando prever a produção de trigo de inverno com o modelo SWAP, utilizando PTFs para obtenção das propriedades físico-hidráulicas do solo, De Jong van Lier et al. (2015) observaram que o uso de PTFs para estimar  $K(\theta)$  dificilmente gera uma solução plena, já que as PTFs de estimativa de  $K_{sat}$  apresentaram moderada precisão ( $r \approx 0,54$ ) ( $0,50 < r < 0,70$ ) (More et al., 2017).

Avaliando o desempenho do modelo AquaCrop para previsão e produtividade da cultura do milho na região do semiárido brasileiro, Martins et al. (2018) aplicaram as propriedades físico-hidráulicas do solo derivadas de PTFs (Tomasella et al., 2003) e obtiveram simulações com o AquaCrop. As simulações explicaram pelo menos 74% da variabilidade da produtividade da cultura do milho.

Outra aplicabilidade das PTFs tem sido em estudos de variabilidade espacial das propriedades físico-hidráulicas do solo. Em solos arenosos da região Sudeste do Brasil, Silva et al. (2017) avaliaram o desempenho das PTFs dos modelos SPLINTEX (Prevedello e Loyola, 2002) e ROSETTA para estimativa da variabilidade espacial de algumas propriedades físico-hidráulicas do solo, como capacidade de água disponível (CAD), capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), ponto de murchamento permanente ( $\theta_{PMP}$ ), capacidade específica [ $C(\theta)$ ], permeabilidade hidráulica [ $K(\theta)$ ] e a difusividade hidráulica [ $D(\theta)$ ] do solo não saturado. Os autores observaram que o padrão espacial de valores discretos das funções  $K(\theta)$  e  $C(\theta)$  foi melhor estimado com o ROSETTA, quando comparados com os dados medidos, enquanto que o padrão espacial de CAD foi melhor estimado pelo modelo SPLINTEX. Os autores salientam ainda que os mapas simulados de  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$  e  $D(\theta)$  foram diferentes dos mapas gerados com os dados observados.

Com base no banco de dados global SoilGrids 250 m (Hengl et al., 2017) e por meio de PTFs, Turek et al. (2020) estimaram a constante  $K_{sat}$  com a PTF proposta por Ottoni et al. (2019) para solos brasileiros e encontram os maiores valores de  $K_{sat}$  na região do Cerrado e os menores na região Sul e na parte oeste da bacia amazônica brasileira.

## 1.5. CONCLUSÕES

A permeabilidade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) é uma propriedade fundamental na ciência do solo, atuando diretamente no cálculo dos fluxos de água em condições de solos saturados e não saturados. Contudo, sua aplicação também abrange estudos relacionados aos fluxos de gases e energia no solo, projetos de irrigação e drenagem e de avaliação da qualidade física do solo. Atributos físicos-hidráulicos e químicos do solo podem se relacionar com  $K_{sat}$ , aprimorando a compreensão dos fatores que alteram essa variável. Funções de pedotransferência (PTFs) visam estimar variáveis do solo, como  $K_{sat}$ , a partir de propriedades edáficas facilmente medidas ou disponíveis. As PTFs para a estimativa de  $K_{sat}$  podem ser originadas com variáveis mais simples, como as frações texturais do solo, até variáveis mais complexas, como os parâmetros das equações que descrevem as curvas de retenção ou de permeabilidade hidráulica do solo e os tipos de argila. A estimativa de  $K_{sat}$  por meio de PTFs pode ser aplicada em estudos amplos de modelagem hidrológica, balanço hídrico, drenagem e estimativa da produção de culturas agrícolas, além da aplicabilidade em estudos da variabilidade espacial do solo.

## REFERÊNCIAS

- AHUJA, L. R.; CASSEL, D. K.; BRUCE, R. R.; BARNES, B. B. Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. **Soil Science**, v. 148, n. 6, p. 404–411, 1989.
- AHUJA, L. R.; NANEY, J. W.; GREEN, R. E.; NIELSEN, D. R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science, Society of America Journal**, v. 48, n. 4, p. 699–702, 1984.
- ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 515–522, 2005.
- ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 6, p. 1023–1030, 1981.
- BENNETT, J. McL.; MARCHUK, A.; MARCHUK, S.; RAINE, S. R. Towards predicting the soil-specific threshold electrolyte concentration of soil as a reduction in saturated hydraulic conductivity: The role of clay net negative charge. **Geoderma**, v. 337, p. 122–131, 2019.

BOLAN, N. S.; SYERS, J. K.; ADEY, M. A.; SUMNER, E. Origin of the effect of pH on the saturated hydraulic conductivity of non-sodic soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, n. 9–10, p. 2265–2278, 1996.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic Properties of Porous media: Hydrology Papers**. Fort Collins: Colorado State University; 1964.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T. J. Liming effects on the stability and erodibility of some brazilian oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, p. 1407–1413, 1991.

CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; GUIMARÃES, M. de F.; FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under diferente soil management systems in a red latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, vol. 65, n. 1, p. 45–51, 2002.

CHEROBIM, V. F.; FAVARETTO, N.; MELO, V. F.; BARTH, G.; HUANG, C. Soil surface sealing by liquid dairy manure affects saturated hydraulic conductivity of Brazilian Oxisols. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 193–196, 2018.

CHIEF, K.; FERRÉ, T. P. A.; NIJSSEN, B. Correlation between air permeability and saturated hydraulic conductivity: Unburned and burned soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 6, p. 1501–1509, 2008.

COSBY, B. J.; HORNBERGER, G. M.; CLAPP, R. B.; GINN, T. R. Exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. **Water Resources Research**, v. 20, n. 6, p. 682–690, 1984.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**, v. 57, n. 4, p. 203–212, 2001.

ELLERBROCK, R. H.; GERKE, H. H.; BACHMANN, J.; GOEBEL, M. O. Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69–66, p. 57, 2005.

EUSUFZAI, M.; FUJII, K. Effect of organic matter amendment on hydraulic and pore characteristics of a clay loam soil. **Open Journal of Soil Science**, v. 2, n. 4, p. 372–381, 2012.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 515–524, 1999.

GENNARO, L. A.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. F. S.; COOPER, M.; CAMPOS, M. C. C. Estrutura dosolo sob feijão irrigado e diferentes manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 608–614, 2015.

GUARRACINO, L. Estimation of saturated hydraulic conductivity  $K_s$  from the van Genuchten shape parameter  $\alpha$ . **Water Resources Research**, v. 43, n. 11, p. 15–18, 2007.

HAN, H.; GIMÉNEZ, D.; LILLY, A. Textural averages of saturated soil hydraulic conductivity predicted from water retention data. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, n. 1–2, p. 121–128, July 2008.

HENGL, T.; DE JESUS, J. M.; HEUVELINK, G. B. M.; GONZALEZ, M. R.; KILIBARDA, M.; BLAGOTIĆ, A.; SHANGGUAN, W.; WRIGHT, M. N.; GENG, X.; BAUER-MARSCHALLINGER, B.; GUEVARA, M. A.; VARGAS, R.; MACMILLAN, R. A.; BATJES, N. H.; LEENAARS, J. G. B.; RIBEIRO, E.; WHEELER, I.; MANTEL, S.; KEMPEN, B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. **PLoS ONE**, v.12, n. 2, 2017.

IVERSEN, B. V.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; LOLL, P. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. **Soil Science**, v. 166, n. 10, p. 643–659, 2001.

JULIÀ, M. F.; MONREAL, T. E.; JIMÉNEZ, A. S. C.; MELÉNDEZ, E. G. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma**, v. 123, n. 3–4, p. 257–277, 2004.

KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, vol. 194, p. 104293, 2019.

KROES, J. G.; van DAM, J. C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R. F. A.; JACOBS, C. M. J. SWAP version 3.2. **Theory description and user manual**. Alterra Report 1649. Wageningen, 255 p.

KUNCORO, P. H.; KOGA, K.; SATTA, N.; MUTO, Y. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 172–179, 2014.

LOLL, P.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; RILEY, H. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: Application in stochastic water infiltration modeling. **Water Resources Research**, v. 35, n. 8, p. 2387–2400, 1999.

MA, L.; HOOGENBOOM, G.; SASEENDRAN, S. A.; BARTLING, P. N. S.; AHUJA, L. R.; GREEN, T. R. Effects of estimating soil hydraulic properties and root growth factor on soil water balance and crop production. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 572–583, 2009.

MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JUNIOR, O. F.; C., MARTINS. G. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 2, p. 193–206, 2008.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; GIAROLLA, A.; GAROFOLO, L. L.; SIQUEIRA JUNIOR, J. L.; PAOLICCHI, L. T. L. C.; PINTO, G. L. N. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, v. 160, p. 21–30, 2018.

McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v. 109, n. 1–2, p. 41–73, 2002.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; BRISTOW, K. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. **Geoderma**, v. 93, n. 3–4, p. 225–253, 2006.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 963–969, 2004.

MORE, D.; NOTS, W.; FLIGNER, M. **The Basic practice of Statistics**. 8<sup>th</sup> edition. W. H. Feeman, 2017.

MULAZZANI, R. P. **Desenvolvimento de pedotransferência física-empírica para Modelagem da retenção de água no solo**. 2016. 85 f. 2016 (Dissertação de Mestrado).

NEMES, A.; RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 4, p. 1330–1337, 2005.

NEMES, A.; WÖSTEN, J. H. M.; BOUMA, J.; VARALLYAY, G. **Soil water balance scenario studies using predicted soil hydraulic parameters**. Hydrological Processes. International Journal, v. 20, p. 1075–1094, 2006.

OTTONI, M. V.; OTTONI, FILHO, T. B.; LOPES-ASSAD, M. L.; ROTUNNO FILHO, O. C. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1345–1358, 2019.

PREVEDELLO C. L.; LOYOLA J. M. T. Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica. In: congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica. 2002, São Paulo. **Anais...**São Paulo: ABMS, 2002. P.467-472.

PUCKETT, W. E.; DANE, J. H.; HAJEK, B. F. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n. 4, p. 831–836, 1985.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438–447, 2009.

RAWLS, W. J.; GIMENEZ, D.; GROSSMAN, R. Use of soil texture, bulk density, and slope of the water retention curve to predict saturated hydraulic conductivity. **Transactions of the ASAE**, v. 41, n. 4, p. 983–988, 1998.

REIS, A. M.H.; ARMINDO, R. A.; PIRES, L. F. Physical assessment of a Haplohumox soil under integrated crop-livestock system. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. 104294, 2019.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 4, p. 1167–1175, 2007.

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 48, n. 3–4, p. 351–361, 1991.

SALAZAR, O.; WESSTRÖM, I.; JOEL, A. Evaluation of DRAINMOD using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 10, p. 1135–1143, 2008.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 163–176, 2001.

SHAINBERG, I.; SINGER, M. J.; JANITZKY, J. Effect of aluminum and iron oxides on hydraulic conductivity of sandy loam Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 1283–1287, 1987.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; BRITO, A. S.; SCHAAP, M. G. SPLINTEX: A physically-based pedotransfer function for modeling soil hydraulic functions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v. 174, p.261-272, 2017a.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; BRITO, A. S.; SCHAAP, M. G. An assessment of pedotransfer function performance for the estimation of spatial variability of key soil hydraulic properties. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 9, p. 1–10, 2017b.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; PREVEDELLO, C. L. Utilizing Splintex 2.0 for estimating the soil hydraulic conductivity curve measured with instantaneous profile method. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 1–8, 2020.

SKAGGS, R.W. Drainage. In: HANKS, J.; RITCHIE, J. T. Modeling Plant and Soil Systems. **Agronomy Monograph** n. 31. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, p. 205–243, 1991.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G. T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 3, p. 487–492, 2006.

SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; DOS SANTOS, H. P.; FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. especial, p. 2613–2620, 2008.

TIMLIN, D. J.; AHUJA, L. R.; PACHEPSKY, Y. A.; WILLIAMS, R. D.; GIMENEZ, D.; RAWLS, W. J. Use of Brooks-Corey parameters to improve estimates of saturated conductivity from effective porosity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 5, p. 1086–1092, 1999.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. Pedotransfer functions for tropical soils. In: PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. (Ed.). **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 415–429.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Ya.; CRESTANA, S.; RAWLS, W. J. Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 4, p. 1085–1092, 2003.

TUREK, M. E.; VAN LIER, Q.; ARMINDO, R. A. Estimation and mapping of field capacity in Brazilian soils. **Geoderma**, v. 376, p. 114557, 2020.

UYEDA, C. A.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; MEDEIROS, P. R. F.; DIAS, C. T. S. Influence of vinasse application in hydraulic conductivity of three soils. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, p. 689–698, 2013.

van ALPHEN, B. J.; BOOLTINK, H. W. G; BOUMA, J. Combining pedotransfer functions with physical measurements to improve the estimation of soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 103, n. 1–2, p. 133–147, 2001.

van GENUCHTEN, M. T. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

van LIER, Q.; WENDROTH, O.; VAN DAM, J. C. Prediction of winter wheat yield with the SWAP model using pedotransfer functions: An evaluation of sensitivity, parameterization and prediction accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 154, p. 29–42, 2015.

VEREecken, H.; MAES, J.; FEYEN, J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. **Soil Science**, v. 149, n. 1, p. 1–12, 1990.

WANG, T.; WEDIN, D.; ZLOTNIK, V. A. Field evidence of a negative correlation between saturated hydraulic conductivity and soil carbon in a sandy soil. **Water Resources Research**, v. 45, n. 7, 2009.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 123–150, 2001.

ZHANG, X. C.; NORTON, L. D. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. **Journal of Hydrology**, v. 260, p. 194–205, 2002.

ZHANG, Y.; SCHAAP, M. G. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1011–1030, 2019.

## CAPÍTULO 2: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DE SOLOS SOB SISTEMAS NATIVO E PLANTIO DIRETO EM QUATRO LOCAIS DO PARANÁ

### RESUMO

Além de aspectos de gênese dos solos, a antropização por meio da agricultura tem provocado alterações nas propriedades físico-hidráulicas e químicas dos solos por meio do uso de fertilizantes, máquinas agrícolas e defensivos agrícolas, além dos manejos propriamente empregados, como o sistema de semeadura direta, pastagem e outros. A substituição de sistemas naturais pelo uso agrícola acarretam em diversas alterações nos atributos do solo. O estado do Paraná é composto por diferentes formações geológicas que conseqüentemente formam diferentes classes de solos. Neste estudo teve-se como objetivo realizar a caracterização físico-hidráulica e química de diferentes classes de solos, que estão sob sistemas nativos e cultivados em quatro locais do estado do Paraná. Foram coletadas amostras de solo com estruturas deformadas e indeformadas dos horizontes A e B de diferentes classes de solos, em quatro localidades do Paraná sendo: Latossolo Vermelho Distroférico típico – município de Santa Tereza do Oeste; Nitossolo Vermelho Eutroférico – município de Leópolis; Cambissolo Háplico Ta Distrófico – município de Ortigueira e Latossolo Vermelho Distroférico típico – município de Londrina. As propriedades físico-hidráulicas do solo analisadas foram: textura, densidade das partículas, densidade do solo seco, argila dispersa em água, porosidade total, microporosidade, macroporosidade, resistência a penetração, permeabilidade específica do solo ao ar e permeabilidade hidráulica do solo saturado. Também foram analisadas as propriedades químicas: pH,  $\Delta$ pH, ponto de carga zero, alumínio, acidez potencial, carbono orgânico, fósforo, cálcio, magnésio, potássio, capacidade de troca de cátions e saturação por bases. Os solos avaliados apresentaram classe textural muito argilosa e franco-argilosa. A amplitude dos valores de  $K_{sat}$  foi de  $7,58 \cdot 10^{-8}$  a  $5,94 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ , no horizonte A e de  $1,21 \cdot 10^{-7}$  a  $7,28 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  no horizonte B. Os sistemas de cultivo, como sistemas de semeadura direta e integração lavoura-pecuária tenderam a reduzir a macroporosidade e as permeabilidades hidráulica e ao ar do solo, além de aumentar a densidade e a resistência a penetração do solo.

**Palavras-chave:** Permeabilidade específica do solo ao ar, permeabilidade hidráulica do solo saturado, ponto de carga zero – PCZ.



## CHAPTER 2: EXAMINING PHYSICAL AND CHEMICAL SOIL PROPERTIES IN PARANÁ STATE, SOUTHERN BRAZIL

### ABSTRACT

Beyond the aspects of soil genesis, the anthropization through agriculture has caused changes in the physical-hydraulic and chemical soil properties through the use of fertilizers, agricultural machinery, and agricultural pesticides as well as the used management systems, such as sowing and grazing. The Brazilian state of Paraná is composed of different geological formations yielding different soils. This study aimed to carry out the physical-hydraulic and chemical characterization of different soils, which are under native and cultivated systems at four locations in Paraná. Disturbed and undisturbed soil samples were collected from horizons A and B of different soil classes (Latosolo Vermelho Distroférico typical – municipality of Santa Tereza do Oeste; Nitossolo Vermelho Eutroférico - municipality of Leópolis; Cambisolo Háplico Ta Distrófico - municipality of Ortigueira, and Latossolo Vermelho Distroférico typical - municipality of Londrina). Texture, solid and bulk densities, clay dispersed in water, total porosity, microporosity, macroporosity, penetration resistance, and air and hydraulic permeability were analyzed as physical-hydraulic properties. Chemical properties such as pH,  $\Delta\text{pH}$ , zero charge point, aluminum, potential acidity, organic carbon, phosphorus, calcium, magnesium, potassium, cation exchange capacity, and base saturation were also analyzed. The found texture classes of the evaluated soils were very clayey and clay loam. The amplitude of the  $K_{sat}$  values ranged from  $7.58 \cdot 10^{-8}$  to  $5.94 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  in horizon A and from  $1.21 \cdot 10^{-7}$  to  $7.28 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  in horizon B. Cultivation systems, such as no-till and crop-livestock integration tended to reduce macroporosity and hydraulic and air permeabilities of the soil, increasing bulk density and resistance to soil penetration results.

**Keywords:** specific permeability of soil to air, hydraulic permeability of saturated soil, zero charge point - ZCP

### 2.3. INTRODUÇÃO

O comportamento físico-hidráulico e químico do solo em diferentes regiões e sob diferentes usos e manejos empregados é variável. Essa variação pode ser originada em função da formação geológica.

A região norte do estado do Paraná se encontra em grande parte sob a Formação Serra Geral, que é essencialmente constituída por basaltos (rochas básicas), o que resulta, na maioria das vezes, na formação de solos de textura argilosa (Medri et al., 2002; Trabaquini et al., 2010). A formação Serra Geral também se estende até a região oeste do Paraná, onde as principais classes de solos são LATOSSOLOS VERMELHOS Eutroféricos, LATOSSOLOS VERMELHOS Distroféricos e NITOSSOLOS VERMELHOS Eutroféricos, sendo predominante de textura argilosa.

Nas regiões norte e oeste do estado, o relevo pouco acidentado beneficiou a expansão da agricultura, principalmente para o cultivo de grãos. Em contrapartida, a região centro oriental apresenta relevos acidentados compostos de solos susceptíveis ao processo erosivo quando empregados manejos agrícolas que acentuam o processo de degradação (Sartori et al., 2005).

A região noroeste do Paraná apresenta solos de textura média ou arenosa com ocorrência de Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos (Regolíticos e Quartzarênicos), além de serem altamente suscetíveis aos processos erosivos, principalmente quando desprovidos de cobertura vegetal (Santos et al., 2007).

Além de aspectos de gênese dos solos, a antropização por meio da agricultura, tem provocado alterações, como uso de fertilizantes, máquinas agrícolas, defensivos agrícolas e propriamente os manejos empregados, como o sistema de semeadura direta, pastagem e outros. A substituição de sistemas naturais pelo uso agrícola tem acarretado em diversas alterações nos atributos do solo.

A permeabilidade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) estabelece a relação entre a densidade de fluxo de água e o gradiente hidráulico. O conhecimento dela é importante para descrição do transporte de água e constituintes dissolvidos ou suspensos no solo, no cálculo do transporte e recarga de águas subterrâneas e na quantificação das trocas entre o solo e a atmosfera (Zhang e Schaap, 2019).

Avaliando alguns solos da região sul do Brasil, Holthusen et al. (2018) observaram redução da permeabilidade do solo ao ar em um sistema de semeadura direta quando comparado à mata. Os autores verificaram ainda que essas alterações acentuam-se principalmente em solos

de textura argilosa, ressaltando medidas preventivas como o enchimento de pneus de máquinas agrícolas e o tráfego de máquinas em faixas de umidades adequadas.

Embora, o termo semeadura direta as vezes seja usado como sinônimo de plantio direto, ele está cada vez mais se referindo a colocação de sementes diretamente no solo sem preparo. Alguns equipamentos de semeadura direta, especialmente os utilizados na Europa, causam excessivo revolvimento do solo na semeadura, queimando ou misturando os resíduos culturais com o solo (Derpsch et al., 2014).

Apesar destas considerações a respeito do uso do termo semeadura direta, neste texto o termo será utilizado para designar as áreas cultivadas uma vez que entendeu-se ser mais apropriado para áreas sob o cultivo de grãos.

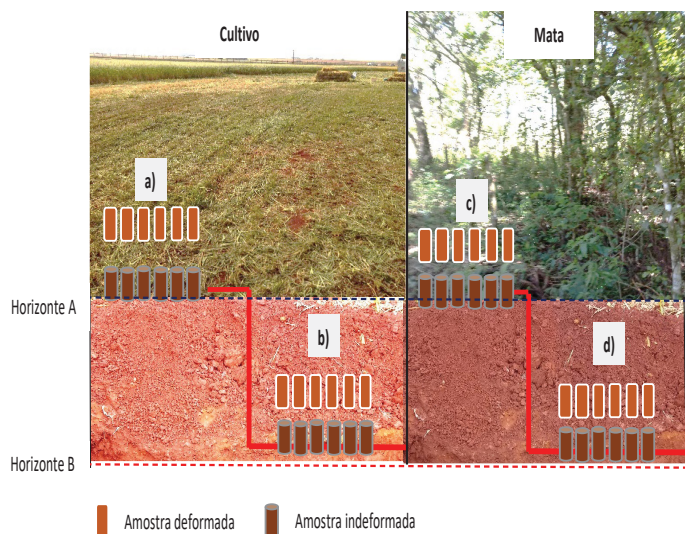
Sistemas nativos tendem a acumular mais carbono orgânico no solo devido à pouca mobilização do solo, baixa oscilação de temperatura e atividade microbiológica constante. Comparando diferentes sistemas de uso do solo, Zagatto et al. (2019) observaram que os sistemas naturais apresentam maior diversidade de microrganismos no solo do que os sistemas agrícolas, devido ao maior conteúdo de carbono orgânico.

Diante desse contexto, o objetivo com esse trabalho foi realizar a caracterização físico-hidráulica e química de diferentes solos, que estão sob sistemas nativos e cultivados, de quatro locais do estado do Paraná.

## **2.4. MATERIAL E MÉTODOS**

### *Processo amostral*

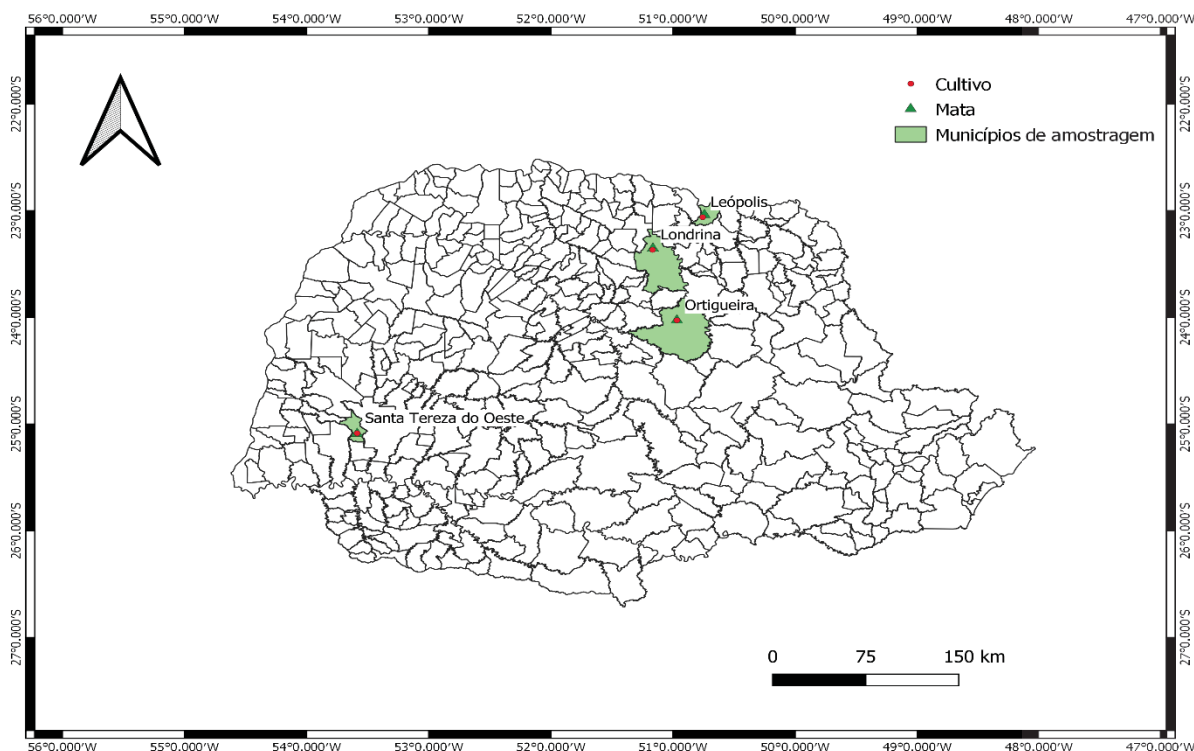
As amostragens de solos deste estudo foram realizadas em quatro locais do Paraná (Figura 2). Em ambos os locais de amostragem foram coletadas 24 amostras para as análises físico-hidráulicas e químicas, sendo coletadas nos horizontes A e B dos solos. Em cada local de amostragem foram realizadas amostragens em campo cultivados e em mata próxima ao cultivo. Para cada sistema (mata e cultivo) foram coletadas seis amostras em cada horizonte (A e B), totalizando 24 amostras respectivamente (Figura 1).



**Figura 1.** Esquema amostral realizado em solos de diferentes regiões do estado do Paraná. a) 6 amostras de solo sob cultivo no horizonte A; b) 6 amostras de solo sob cultivo no horizonte B; c) 6 amostras de solo sob mata, no horizonte A; e d) 6 amostras de solo sob mata no horizonte B.

#### *Localização e caracterização geomorfológica dos pontos amostrais*

O município de Santa Tereza do Oeste está localizado na região oeste do Paraná, no Terceiro Planalto Paranaense. As sub-unidades morfoesculturais do município são compreendidas pelo Planalto de Cascavel (amostragem), Planalto do Baixo Iguaçu e Planalto do São Francisco. Leopólis, município localizado na região norte-pioneiro do Paraná, sob o Terceiro Planalto Paranaense, com as sub-unidade morfoesculturais: Planalto de Londrina (amostragem) e Planalto do Médio Paranapanema. Localizado na região centro oriental, o município de Ortigueira encontra-se no Segundo Planalto Paranaense, suas sub-unidades morfoesculturais são compostas pelo Planalto de Ortigueira (amostragem), Planalto de Santo Antônio da Platina e Planaltos Residuais da Formação Teresina (Figura 2).



**Figura 2.** Mapa do estado do Paraná com os respectivos locais de amostragem.

Na região norte-central e no Terceiro Planalto Paranaense do estado está o município de Londrina, compreendido pelas sub-unidade morfoesculturais: Planalto de Londrina (amostragem), Planalto de Maringá e Planalto de Foz de areia (MINEROPAR, 2006).

#### *Classes de solos*

As classes de solos foram classificadas de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBC (Santos et al., 2018) e com o Soil Taxonomy System (STAFF, 2014). Sendo um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico/Oxisol em Santa Tereza do Oeste (LVdf–Santa Tereza do Oeste), NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico/Utisol em Leópolis (NVe–Leópolis), CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distroférico/Inceptisol em Ortigueira (CXvd–Ortigueira) e LATOSSOLO VERMELHO Distroférico/Oxisol em Londrina (LVdf–Londrina).

#### *Caracterização climatológica dos locais de amostragem*

O estado do Paraná está situado em uma região de transição climática, passando de um clima subtropical com invernos mais amenos ao Norte para uma condição que se aproxima dos

climas temperados ao Sul, onde os invernos são mais severos e a estação de crescimento das plantas é mais bem definida (IAPAR, 2020a).

De acordo com a classificação pelo método de Köeppen o estado apresenta duas classificações, uma Cfa – subtropical; temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida. E outro Cfb – temperado propriamente dito; temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C, com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22 °C e sem estação seca definida (Caviglione et al., 2000). Em todos os locais de amostragem a classificação de Köeppen foi Cfa, com exceção de Ortigueira que apresenta uma transição entre Cfa/Cfb.

Em Santa Tereza do Oeste, a amostragem foi realizada em setembro de 2019, após a retirada dos animais na fase de pastagem, na estação de pesquisa do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná IAPAR-EMATER a uma altitude de 755 m com médias anuais entre 20 a 21 °C de temperatura e 1.800 a 2.000 mm de precipitação pluvial (Nitsche et al., 2019).

A amostragem em Leópolis foi realizada em uma propriedade rural particular a uma altitude de 451 m com médias anuais de temperatura entre 22 a 23 °C (Nitsche et al., 2019) e 1.380,10 mm de precipitação pluvial (Lima, 2019).

No município de Ortigueira a amostragem também foi realizada em uma propriedade rural particular a uma altitude de 866 m com médias anuais entre 19 a 20 °C de temperatura e 1.600 a 1800 mm de precipitação pluvial (Nitsche et al., 2019).

Em Londrina, a amostragem foi realizada na estação de pesquisa do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná IAPAR-EMATER a uma altitude de 582 m com médias anuais de 21,2 °C de temperatura e 1.632 mm de precipitação pluvial (IAPAR, 2020b).

#### *Uso e manejo dos solos avaliados*

O LATOSSOLO VERMELHO Distroférico em Santa Tereza do Oeste, encontra-se sob o Sistema de Integração-Lavoura-Pecuária (ILP) com aveia preta (cultivar Iapar Ibioporã 61) e centeio (cultivar IPR 89), no inverno (ambas as culturas com densidade de semeadura de 30 kg de sementes viáveis por hectare) e soja no verão.

- i) para pulverização da área utilizou-se um pulverizador Jacto<sup>®</sup>, modelo Condor AMI4 com tanque de 600 L e barras de 12 m de comprimento.
- ii) Distribuidor de adubos Cremasco 90, com largura de trabalho de 12 m.
- iii) Colheita dos grãos por meio de uma colhedora automotriz, New Holland<sup>®</sup>, modelo TC 57.

Em Leopólis o NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico, é cultivado sob o sistema de semeadura direta (SSD), com soja no verão e milho segunda safra no inverno desde do ano de 2010. O CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico de Ortigueira também é cultivado sob SSD, com soja no verão e trigo no inverno.

Em Londrina, o LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico é cultivado sob o sistema de semeadura direta desde 2003, com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) - cultivar Iapar Ibiporã 61 - no inverno e soja e milho alternadamente nas safras de verão até o ano de 2014. A partir do outono/inverno de 2014, a área utilizada para a amostragem de solo foi cultivada com milho segunda safra (milho safrinha) e soja no verão, que é o sistema de produção predominante na região norte central do estado do Paraná.

Para a safra 2019/2020, a semeadura da cultura da soja foi realizada em 04 de outubro de 2019 em um experimento de rotação de culturas. A amostragem de solo foi realizada em 20 de novembro de 2019, 47 dias após a semeadura da cultura da soja.

Para o manejo da área em Londrina utilizaram-se os seguintes maquinários:

- iv) na operação de semeadura da culturas da soja, utilizou-se uma semeadora-adubadora Kuhn<sup>®</sup>, modelo PM PG 900 com carga estática de 4.160 kg de nove linhas espaçadas de 45 cm, com haste sulcadora com espessura de 2 cm a qual foi tracionada por um trator agrícola Massey Ferguson<sup>®</sup>, modelo 297, 4 x 2 com tração dianteira auxiliar – TDA, com 120 cv de potência nominal no motor (88,3 kW), com pneus dianteiros 14.9–24 (38 cm de largura) e pneus traseiros 18.4–34 (largura 47 cm) com carga estática total de 8.150 kg.
- v) na operação de semeadura das culturas de outono/inverno, utilizou-se a semeadora-adubadora Semeato<sup>®</sup>, modelo 11/13 com carga estática de 4.160 kg de treze linhas espaçadas de 17 cm, com disco duplo foi tracionada por um trator agrícola New Holland<sup>®</sup>, modelo TL 75 E, 4 x 2 com tração dianteira auxiliar – TDA, de 78 cv de potência nominal no motor (57 kW), com pneus dianteiros 12.4–24 (32 cm de largura) e pneus traseiros 18.4–30 (largura 47 cm) com carga estática total de 7.430 kg.
- vi) para pulverização da área utilizou-se um pulverizador Jacto<sup>®</sup>, modelo Condor AMI4 com tanque de 600 L e barras de 12 m de comprimento.

- vii) Distribuidor de adubos Cremasco 90, com largura de trabalho de 12 m.
- viii) Colheita dos grãos por meio de uma colhedora automotriz, New Holland®, modelo TC 5090.

#### *Análise das propriedades físico-hidráulicas dos solos*

As amostras com estruturas preservada foram coletadas com o auxílio de um extrator mecânico projetado na Área de Engenharia Agrícola do Instituto Agrônomo do Paraná IAPAR (Araujo, 2007). Os anéis metálicos utilizados possuem dimensões de 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura.

Após as coletas, as amostras com estruturas preservadas foram vedadas em ambas as extremidades com tampas plásticas específicas com a finalidade de evitar alteração da umidade de coleta e da estrutura. Em seguida, os cilindros contendo as amostras de solo foram acondicionados em maletas de alumínio almofadadas para o transporte até o Laboratório de Física do Solo do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná IAPAR-EMATER em Londrina.

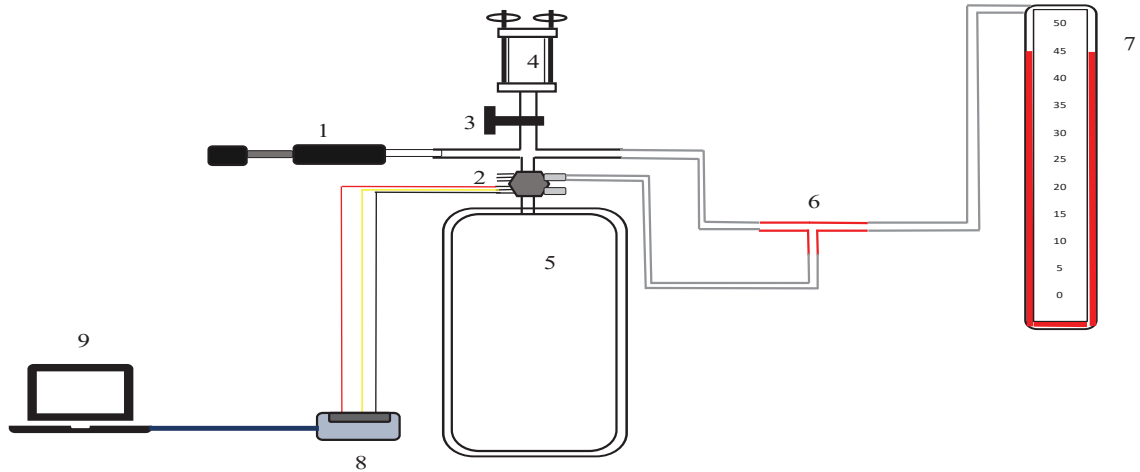
A análise textural foi realizada pelo método da pipeta (Day, 1965) utilizando hidróxido de sódio (NaOH - 0,1 mol L<sup>-1</sup>) como dispersante químico. A dispersão mecânica foi realizada com a adição de 20 g de areia grossa e agitação mecânica lenta durante 16 h (Grohmann e Raij, 1977) em agitador do tipo reciprocante com 180 ciclos/min (Miyazawa e Barbosa, 2011). A argila dispersa em água (AD) foi determinada sem a utilização do hidróxido de sódio e o tempo de agitação mecânica de 2 h.

As amostras com estruturas preservadas foram lentamente saturadas e, posteriormente, submetidas aos potenciais matriciais de -2, -4, -6, -8 e -10 kPa em mesa de sucção e de -33, -100, -500 e -1.500 kPa em extratores de Richards, até que atingissem equilíbrio para que a massa de solo úmido fosse determinada. A densidade das partículas do solo ( $\rho_p$ ) foi determinada pelo método do balão volumétrico com álcool etílico absoluto P.A. mínimo 99,5 °GL (Blake e Hartge, 1986).

Para determinação da permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ), foi utilizado o método da pressão decrescente em amostras indeformadas (Kirkham, 1946). O permeâmetro utilizado nas medidas de  $K_{ar}$  foi desenvolvido com um cilindro de aço (gás Clorodifluormetano) com volume de 0,0112 m<sup>3</sup> (11,20 L), dispositivo para aplicação e alívio de pressão, suporte cilíndrico (adaptador) para inserção da amostra indeformada e uma saída para os sistemas de coleta dos dados automatizada e manual (coluna de água). O reservatório de aço foi revestido com lã de



vidro e acondicionado em um recipiente (balde) com tampa, para evitar variações térmicas (Figura 3).



**Figura 3.** Diagrama esquemático do permeâmetro, constituído por: 1: bomba de ar; 2: transdutor de pressão; 3: válvula de controle de fluxo; 4: compartimento de alocação da amostra de solo; 5: reservatório de ar; 6: conexão entre a coluna de água e transdutor de pressão; 7: coluna de água; 8: plataforma Arduino; 9: microcomputador para processamento de dados.

O sistema automatizado de coleta dos dados de tempo e pressão utiliza um transdutor de pressão diferencial modelo MPX 5010 – DP. O transdutor de pressão foi interligado a uma placa Arduino Uno Rev3 R3 Atmega328. A programação foi realizada na plataforma Arduino IDE, programado para realizar leitura a cada variação de 0,0490333 kPa. A obtenção dos dados também pode ser realizada por meio de um sistema manual para registrar o tempo e o decaimento da pressão no interior do reservatório. Para isso, uma régua de coluna de água foi adaptada ao permeâmetro medindo o decréscimo da pressão no interior do reservatório, um cronômetro ou filmagem podem medir a variação de tempo.

A partir do conjunto de dados de pressão ( $p$ ) e tempo ( $t$ ) foi realizada uma regressão linear entre o logaritmo natural da pressão e o tempo, posteriormente a permeabilidade ao ar da amostra ( $m^2$ ,  $cm^2$  ou  $\mu m^2$ ) foi isolada a partir da inclinação  $S$  da reta de ajuste.

$$\ln(P) = St + \ln(|p|) \quad (1)$$

$$K_{ar} = \frac{\mu LV}{AP_a} |S| \quad (2)$$

em que,  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade dinâmica do ar variando entre (0,00001827 N· s<sup>-1</sup> m<sup>2</sup> a 20,9°C à 0,00001856 N· s<sup>-1</sup> m<sup>2</sup> a 26,9°C),  $V$  é volume do reservatório (m<sup>3</sup>).  $P_a$  é a pressão do ar atmosférico (101200 Pa a 20°C),  $L$  é o comprimento da amostra (m),  $A$  é a seção transversal da amostra (m<sup>2</sup>) e  $S$  é o módulo da declividade da reta definida pela eq.(4). A eq. (5) foi utilizada para os cálculos da permeabilidade do solo ao ar das amostras do presente estudo.

As medidas de permeabilidade ao ar foram realizadas em amostras equilibradas nos potenciais de -10 e -33 kPa, que foram previamente pesadas. A permeabilidade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) foi determinada utilizando-se um permeômetro de carga constante (Figura 4).



**Figura 4.** Permeômetro de carga constante (a). Amostra com estrutura preservada com carga constante de 2 cm de água e proveta para coleta do volume percolado (b).

As amostras com estrutura preservada que passaram por medições em vários potenciais matriciais foram ressaturadas lentamente. Depois da ressaturação, acoplou-se um cilindro de 2 cm de altura e de mesmo diâmetro da amostra, mantendo-se nele carga hidráulica constante. Para determinação de  $K_{sat}$  foram realizadas leituras do volume percolado em provetas previamente calibradas com o tempo cronometrado, sendo utilizado o valor referente a vazão percolada constante, admitindo-se atingida a condição de equilíbrio hidrodinâmico.

O cálculo  $K_{sat}$  foi realizado por:

$$K_{sat} = \frac{V}{\left[ S \cdot t \cdot \left( \frac{\Delta H}{\Delta z} \right) \right]} \quad (3)$$

em que  $V$  é o volume de água coletado (mL),  $S$  é área da secção transversal da amostra cilíndrica ( $m^2$ ),  $t$  é o tempo cronometrado (s) e  $\Delta H$  e  $\Delta z$  são, respectivamente, a diferença de potencial hidráulico e a diferença de altura (m) entre as extremidades da amostra.

Depois da determinação de  $K_{sat}$  as amostras foram submetidas novamente ao equilíbrio nos potenciais matriciais de -10 e -33 kPa. Atingido o equilíbrio, realizou-se o ensaio de resistência do solo à penetração (RP) no centro das amostras de solo com estrutura indeformada, utilizando-se para isso um penetrômetro portátil com haste de 50 mm de comprimento e diâmetro da base de 6,3 mm. Os valores registrados em  $kgf\ cm^{-2}$  pelo penetrômetro foram transformados em MPa.

Para a determinação da densidade do solo ( $\rho_b$ ), as amostras foram conduzidas para a estufa a 105 – 110 °C durante 48 h para a obtenção da massa de solo seco e posterior cálculo (Grossman e Reinsh, 2002).

A porosidade total do solo ( $\phi$ ), a microporosidade (*Micro*) e a macroporosidade (*Macro*), poros que retém água com diâmetro maior que 50  $\mu m$  (Vomocil, 1965; Flint e Flint, 2002) foram calculadas com as seguintes equações:

$$\phi = 1 - \left( \frac{\rho_b}{\rho_p} \right) \quad (4)$$

$$micro = \theta(-6kPa) \quad (5)$$

$$macro = \phi - micro \quad (6)$$

#### *Análise dos atributos químicos do solo*

As amostras deformadas coletadas em sextuplicata em cada horizonte e uso foram armazenadas em saco plástico, devidamente identificadas e encaminhadas para o Laboratório de Solos e Tecido Vegetal do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná IAPAR-EMATER - Londrina, PR, onde foram secas em estufa com circulação forçada a 65 °C, tamizadas em peneiras com malha de 2 mm para a determinação de:  $P$  (Mehlich); carbono orgânico total pelo

método da combustão via úmida (Walkley e Black, 1934);  $pH$  ( $CaCl_2$ );  $K$  (Mehlich);  $Ca$ ;  $Mg$ ;  $H+Al$ ; Soma de Bases; Saturação por Bases e Saturação por Alumínio (Pavan et al., 1992).

Os valores de  $pH$  em água e o  $pH$  em  $KCl$  (cloreto de potássio) foram determinados para estimativa do ponto de carga zero – PCZ. A partir desses valores foram estimados  $\Delta pH$  (Mekaru e Uehara, 1972) e o PCZ, proposta por Keng e Uehara (1974):

$$\Delta pH (mol L^{-1}) = pH(KCl) - pH(H_2O) \quad (7)$$

$$PCZ = 2pH(KCl) - pH(H_2O) \quad (8)$$

### *Análise da estatística descritiva*

A análise estatística constou dos dados de 24 amostras de local de amostragem, coletadas, nos horizontes A e B, de sistemas de cultivo e de mata, que foram avaliados estatisticamente pelo confronto de médias, duas a duas, pelo teste t de *Student* a 5% de probabilidade, por meio de planilha eletrônica EXCEL.

Os dados de  $K_{sat}$  e  $K_{ear}$  foram transformados em  $\log(K_{sat} + 1,5)$  e  $\log(K_{ear} + 1)$  para a análise estatística, a fim de normalizar os dados e reduzir o coeficiente de variação, porém os valores apresentados nas discussões estão na escala numérica.

## **2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### 2.5.1. Caracterização dos solos

Os resultados de textura (teores de argila, silte e areia), bem como da densidade de partículas encontra-se apresentados na Tabela 1. Os teores de argila variaram de 27 dag  $kg^{-1}$  do CXd-Ortigueira a 88 dag  $kg^{-1}$  no LVdf-Londrina no horizonte A. Já os teores de argila no horizonte B variaram de 32 dag  $kg^{-1}$  CXvd-Ortigueira a 91 dag  $kg^{-1}$  do NVe-Leópolis.

A classe textural encontrada para os latossolos de Londrina e Santa Tereza do Oeste e o NVe-Leópolis foi muito argilosa em ambos horizontes e usos avaliados. Já o CXvd-Ortigueira possui textura franco-argilo-arenosa. De acordo com Rocha et al. (2018), os solos da região oeste do estado do Paraná em grande parte são predominantes de textura argilosa. Além das principais classes de solos da região serem LATOSSOLOS VERMELHOS Eutroféricos, LATOSSOLOS VERMELHOS Distroféricos e NITOSSOLOS VERMELHOS Eutroféricos. Na morfoescultura do Planalto de Londrina ocorrem Nitossolos de textura argilosa, associados ao relevo com baixa declividade (Santos et al., 2007). A formação geológica do município de

Londrina dá-se sob a formação Serra Geral, que é essencialmente constituída por basaltos (rochas básicas) resultando, na maioria das vezes, na formação de solos argilosos (Medri et al., 2002; Trabaquini et al., 2010).

Os Latossolos da região apresentam valores de  $\rho_p$  entre 2,7 a 3,0 kg dm<sup>-3</sup> (Ghidin et al., 2006; Magalhães et al., 2017). Observa-se valores médios de  $\rho_p$  abaixo dos citados, isso provavelmente decorre do alto conteúdo de carbono presente, principalmente em amostras provenientes da mata (Blanco-Canqui et al., 2006) e dos menores teores de quartzo e altos teores de hematita no material de basalto do ILP (Cunha et al., 2005; Araujo et al., 2017).

**Tabela 1.** Frações texturais e densidade das partículas dos solos avaliados em suas respectivas classes e horizontes.

Local <sup>1</sup>	Cultivo	Classe de solo	Horizonte	Argila	Silte	Areia	$\rho_p$
				.....dag kg <sup>-1</sup> .....			kg dm <sup>-3</sup>
Santa Tereza do Oeste	Mata	LVdf	A	80	12	8	2,69
			B	77	11	12	2,69
	ILP		A	84	13	3	2,60
			B	87	12	1	2,72
Leópolis	Mata	NVe	A	72	11	17	2,77
			B	76	10	14	2,87
	SSD		A	73	12	15	2,93
			B	91	4	5	2,89
Ortigueira	Mata	CXvd	A	27	25	48	2,51
			B	33	25	42	2,59
	SSD		A	35	20	45	2,56
			B	32	22	46	2,45
Londrina	Mata	LVdf	A	86	8	6	2,93
			B	86	8	6	2,98
	SSD		A	88	8	4	2,89
			B	88	9	3	2,94

<sup>1</sup>Média de 6 repetições por horizonte e cultivo em cada classe de solo.

Referente ao valores médios de  $\rho_p$  do NVe–Leópolis-PR, Domingos et al. (2009), observaram em um NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico latossólico valores entre 2,98 a 3,11 kg dm<sup>-3</sup> para a profundidade de 0-20 cm e entre 3,02 a 3,04 kg dm<sup>-3</sup> na camada de 0,20-

0,40 m. Os valores médios da  $\rho_p$  encontrados em ambos os horizontes do NVe–Leópolis foram semelhantes aos anteriormente citados.

Os valores de  $\rho_p$  do CXvd–Ortigueira estiveram entre 2,51 a 2,59 kg dm<sup>-3</sup>. O atributo  $\rho_p$  é inerente ao solo e dependente do material de origem de formação. Em dois Cambissolos, Skorupa et al. (2017) observaram que o valor de  $\rho_p$  do solo de origem de gnaiss foi ligeiramente superior comparado ao solo de origem de xisto, atribuindo ao maior conteúdo de carbono orgânico na composição deste último.

Os valores da  $\rho_p$  do LVdf–Londrina, apresentaram-se maiores no horizonte A, em um mesmo solo e local De Faria e Caramori (1986), observaram valores  $\rho_p$  similares aos do presente estudo, ressaltando que menores valores de  $\rho_p$  na camada superficial, desses solos, provavelmente se devem ao maior conteúdo de matéria orgânica e menores teores de silte e areia na camada

#### 2.5.2. Atributos físicos-hidráulicos

A variável  $\rho_b$  do LVdf–Santa Tereza do Oeste demonstra em seus valores médios, que somente no horizonte B do sistema cultivado (ILP) que os valores foram considerados limitantes para desenvolvimento e crescimento de raízes, sendo considerada para este solo uma densidade do solo restritiva ao crescimento de plantas de 1,1 kg dm<sup>-3</sup> (Araujo-Junior et al., 2015) (Tabela 2).

Já os valores médios da variável  $\rho_b$  em ambos horizontes e sistemas (mata e cultivo) do NVe–Leópolis demonstraram não haver limitações físicas para o desenvolvimento e crescimento de raízes, sendo consideradas para os horizontes A e B em solo semelhante densidades do solo críticas de 1,56 e 1,48 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente (Rodrigues, 2019).

No CXvd–Ortigueira (somente no sistema de mata) não houve limitação física para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas em ambos os horizontes. Para este solo foram consideradas para ambos os horizontes A e B as densidades críticas de 1,21 e 1,34 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Somente o valor médio de  $\rho_b$  do sistema cultivado do horizonte A superou a densidade crítica ao desenvolvimento radicular das culturas, que está em torno de 1,25 kg dm<sup>-3</sup> (Araujo-Junior e Miyazawa, 2012) para o LVdf–Londrina.

Em grande parte dos solos analisados os valores de  $\rho_b$  dos sistemas de cultivo foram significativamente superiores dos encontrados no sistema de mata. Alterações de  $\rho_b$  na camada

superficial de sistemas cultivados como SSD são comuns e oriundas do tráfego de máquinas e do não-revolvimento do solo (Vieira e Muzilli, 1984).

**Tabela 2.** Valores médios das variáveis físico-hidráulicas de sistemas de mata e cultivo dos horizontes A e B das classes de solos avaliadas no estado do Paraná.

Variáveis <sup>(1)</sup>	Horizonte A							
	Classes de solos							
	LVdf-STO		NVe-LEO		CXvd-ORT		LVdf-LDR	
	Mata	ILP	Mata	SSD	Mata	SSD	Mata	SSD
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	0,61 b	0,88 a	1,11 b	1,36 a	1,21 a	1,37 a	0,97 b	1,31 a
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	6 a	11 a	29 a	27 a	7 b	10 a	34 a	31 b
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,717 a	0,652 b	0,633 a	0,536 b	0,517 a	0,464 a	0,669 a	0,547 b
<i>Micro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,220 a	0,219 a	0,416 a	0,324 b	0,411 b	0,446 a	0,373 b	0,442 a
<i>Macro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,497 a	0,433 a	0,217 a	0,212 a	0,106 a	0,018 b	0,296 a	0,105 b
<i>RP</i> (-10 kPa), MPa	0,73 a	0,48 a	1,00 a	1,73 a	1,56 b	2,22 a	0,99 b	2,03 a
<i>RP</i> (-33 kPa), MPa	0,86 a	0,76 a	1,24 b	2,03 a	2,09 a	2,40 a	1,24 b	2,03 a
$K_{ear}$ (-10 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	23,76 a	26,60 a	21,95 a	3,80 b	4,05 a	0,59 b	61,62 a	2,64 b
$K_{ear}$ (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	19,07 a	20,11 a	23,46 a	8,14 b	3,99 a	1,31 b	70,32 a	3,74 b

Variáveis <sup>(1)</sup>	Horizonte B							
	Classes de solos							
	LVdf-STO		NVe-LEO		CXvd-ORT		LVdf-LDR	
	Mata	ILP	Mata	SSD	Mata	SSD	Mata	SSD
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	0,57 b	1,15 a	1,14 b	1,47 a	1,16 b	1,44 a	1,02 a	1,02 a
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	7 a	4 a	38 a	34 a	15 a	8 b	17 a	1 b
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,739 a	0,566 b	0,602 a	0,491 b	0,554 a	0,423 b	0,658 a	0,652 a
<i>Micro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,275 a	0,072 b	0,373 a	0,334 b	0,388 a	0,393 a	0,411 b	0,468 a
<i>Macro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,464 a	0,494 a	0,229 a	0,157 b	0,166 a	0,030 b	0,246 a	0,184 b
<i>RP</i> (-10 kPa), MPa	0,56 b	2,29 a	1,195 b	2,35 a	1,30 a	1,75 a	0,94 a	0,90 a
<i>RP</i> (-33 kPa), MPa	0,85 b	2,43 a	1,387 b	2,41 a	1,99 b	2,35 a	1,39 b	2,41 a
$K_{ear}$ (-10 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	43,03 a	4,88 b	15,45 a	0,51 b	11,08 a	1,82 b	17,73 a	12,08 a
$K_{ear}$ (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	30,43 a	4,67 b	18,30 a	1,66 b	27,53 a	2,95 b	20,59 a	16,89 a

<sup>(1)</sup> média de 6 observações seguidas da mesma letra, na linha dentro de cada classe de solo, não se diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade. <sup>(2)</sup> dados transformados em  $\log(K_{ear} + 1)$ .

Mudanças significativas na argila dispersa em água (AD) entre os sistemas (mata e cultivo) foram observadas em ambos os horizontes do CXvd–Ortigueira e LVdf–Londrina. A localização CXvd–Ortigueira dá-se em uma região acidentada e composta de solos susceptíveis ao processo erosivo, além de alguns manejos agrícolas empregados que podem acentuar o processo de degradação (Sartori et al., 2005). O revolvimento e a correção do solo podem promover o aumento da AD, provocando entupimentos dos macroporos e a redução da estabilidade dos agregados (Roth e Pavan, 1991; Auler et al., 2017), acelerando assim os processos de degradação do solo.

Os valores de AD foram significativamente superiores na mata em relação ao cultivado (SSD) em ambos os horizontes do LVdf–Londrina. Tais resultados podem ser advindos do maior conteúdo de carbono orgânico no solo sob mata, que altera as cargas elétricas e o *pH* do solo (Benites e Mendonça, 1998). Em diferentes Latossolos de uma topossequência do estado

do Paraná, Ghidin et al. (2006) atribuíram a baixa AD dos solos avaliados ao baixo conteúdo de carbono orgânico.

O sistema poroso dos solos avaliados demonstrou que a porosidade total ( $\phi$ ) foi significativamente superior no sistema de mata em relação ao cultivado, com exceção do CXvd–Ortigueira no horizonte A e LVdf–Londrina no horizonte B, que não apresentaram mudanças significativas dos valores de  $\phi$  entre os sistemas.

Os Latossolos argilosos, como os LVdf de Santa Tereza do Oeste e de Londrina, apresentaram particularmente semelhanças à solos arenosos. Segundo Oliveira et al. (2004), a distribuição de poros por tamanho nos Latossolos é caracterizada por apresentar predominantemente duas classes de poros distintos: a primeira, relacionada àqueles grandes, que promovem rápida drenagem interna do solo; e a segunda, a poros pequenos, nos quais a água é retida com alta energia, caracterizando-a como água higroscópica.

Com relação a microporosidade, observa-se no horizonte A da classe de solo LVdf–Santa Tereza do Oeste que os valores não se diferiram entre os manejos (mata e cultivo), já no horizonte B foi observada maior microporosidade no sistema sob mata. Para a classe de solo NVe–Leópolis, em ambos os horizontes analisados, o sistema de mata apresentou valores de microporosidade significativamente superiores aos encontrados em solo cultivado. Na classe de solo CXvd–Ortigueira, somente no horizonte A, foi constatada diferença significativa dos valores de microporosidade, onde o sistema cultivado apresentou valores superiores ao da mata. Para a classe de solo LVdf–Londrina, para ambos os horizontes analisados, os valores de microporosidade foram superiores no sistema cultivado em relação a mata.

A adoção de sistemas de cultivos como ILP e SSD causa alterações no sistema poroso do solo alterando principalmente os macroporos. Avaliando a qualidade física de um LATOSSOLO BRUNO distrófico, Pott et al. (2017) observaram que sistemas cultivados com pinus (*Pinus taeda*) e área de mata apresentaram os menores valores de microporosidade e maiores valores de macroporosidade em relação ao sistemas de pastagem nativa e ILP.

Não foram verificadas diferenças significativas entre os valores de macroporosidade nos sistemas mata e cultivo em ambos os horizontes da classe de solo LVdf–Santa Tereza do Oeste e no horizonte A da classe de solo NVe–Leópolis. Nas demais classes solos e horizontes (A e B) observou-se que os valores de macroporosidade foram significativamente superiores no sistema de mata em relação ao solo cultivado.

Avaliando três sistemas de manejo: plantio convencional, SSD e mata de um NITOSSOLO VERMELHO de textura argilosa, Albuquerque et al. (2001) observaram não



haver diferença significativa na microporosidade entre esses sistemas, porém observaram decréscimo da macroporosidade (Mata > Plantio convencional > SSD) indicando que os macroporos são mais sujeitos a mudanças impostas pelo manejo do que os microporos.

O tempo de adoção de sistemas de cultivos como o SSD também pode interferir no sistema poroso do solo. Em um CAMBISSOLO HÁPLICO, Luciano et al. (2010) avaliando o tempo de adoção do SSD (um, dois e cinco anos) em relação a mata, constataram a alteração do sistema poroso com a adoção do SSD, acentuando-se principalmente nos primeiros anos com posterior estabilização depois de cinco anos de adoção do SSD.

A resistência do solo à penetração do solo (*RP*) depende da condição coesiva do solo, que diminui à medida que o conteúdo de água do solo aumenta, sendo a umidade a variável independente dominante na variação de *RP* (Mapfumo e Chanasyk, 1998). As medidas de *RP* normalmente apresentam grande variabilidade. Avaliando a variação temporal da resistência do solo à penetração de um Latossolo argiloso, Genro Junior et al. (2004) observaram grande variação temporal da variável, a qual foi associada à variação da umidade do solo.

A resistência do solo a penetração do solo medida em amostras equilibradas no potencial matricial de -10 kPa [*RP*(-10 kPa)] demonstrou com seus valores médios que não houve diferença significativa entre os sistemas (mata e cultivo) no horizonte A das seguintes classes de solos: LVdf–Santa Tereza do Oeste e NVe–Leópolis, além das classes de solos: CXvd–Ortigueira e LVdf–Londrina no horizonte B. Nas demais classes de solos e horizontes o sistema de cultivo apresentou valores de *RP*(-10 kPa) significativamente superiores ao sistema de mata.

Para a *RP*(-33 kPa) o sistema de cultivo apresentou maiores valores de *RP* que o sistema de mata no horizonte A do NVe–Leópolis e LVdf–Londrina. Já para o horizonte B, em todas as classes de solos, o sistema cultivado apresentou valores de *RP* significativamente superiores ao sistema nativo.

Esses resultados corroboram com a hipótese de que sistemas antropizados com o ILP e SSD tendem a elevar os valores de *RP*, principalmente pelo intenso tráfego de máquinas que ocorre nesses sistemas. Avaliando diferentes usos de um CAMBISSOLO HÁPLICO Tb, Iori et al. (2012) observaram o que o solo sob mata nativa apresentou menor resistência a penetração, salientando que o uso desse solo com cultivo de banana, pastagem degradada e sistema silvipastoril apresentou maior *RP*, promovendo a compactação do solo.

Além dos sistemas de cultivo que podem alterar os valores da *RP*, fatores como o conteúdo de carbono orgânico, densidade, textura, mineralogia e umidade do solo também

influenciam na  $RP$ . Principalmente no horizonte B das classes de solos avaliadas o baixo conteúdo de carbono orgânico e os altos valores de  $\rho_b$  podem ter contribuído para os maiores valores de  $RP$  (Oliveira et al., 2007; Dalchiavon et al., 2014).

Em sistemas como SSD o intenso tráfego de máquinas e a baixa mobilização do solo geram limites distintos de  $RP$ , a depender do manejo, cultura e tipo de solo. Avaliando os limites críticos da  $RP$  de LATOSSOLO VERMELHO Distroférico da Região de Londrina, De Mores et al. (2014) observaram em sistema SSD com rotação de culturas (tremoço branco (*Lupinus albus* L.) ou nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) / milho (*Zea mays* L.) e aveia branca (*Avena strigosa* Schreb.) na rotação inverno / verão, respectivamente) estabelecido há 24 anos que os valores críticos nesta condição ficavam entre 2,0 e 3,5 MPa.

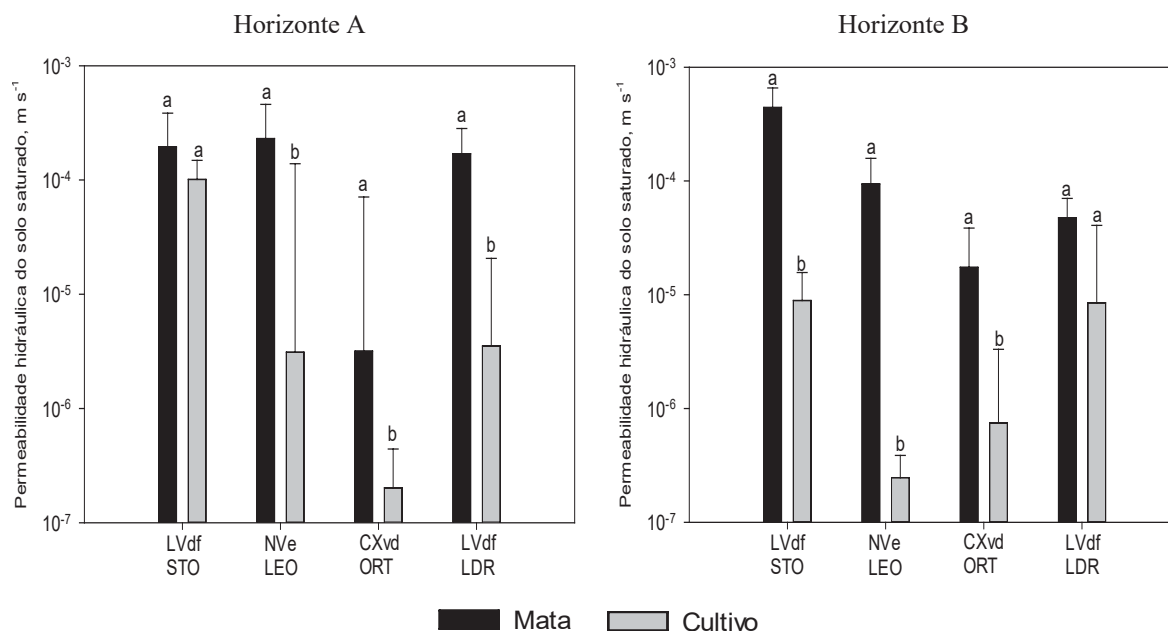
A permeabilidade específica do solo ao ar é uma propriedade sensível que permite verificar as alterações causadas no sistema poroso do solo por manejos adotados (Fish e Koppi, 1994). Pela análise estatística constatou-se, em ambos os potenciais matriciais (-10 e -33 kPa) e em todas as classes de solos e horizontes avaliados, que o sistema sob mata apresentou valores de  $K_{ear}$  significativamente superiores aos sistemas cultivados. Exceções para a o horizonte A da classe de solo LVdf–Santa Tereza do Oeste e para o horizonte B da classe de solo LVdf–Londrina, que não apresentaram diferença significativa nos valores de  $K_{ear}$  entre os sistemas.

Sistemas integrados de produção com o ILP podem ser benéficos a qualidade física do solo, como verificado por Moreira et al. (2012) em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico de Campo Mourão-PR, os quais constataram que os valores de  $K_{ear}$  não atingiram valores críticos depois de oito anos de implementação do sistema ILP.

A adoção de sistemas de cultivo como SSD proporcionou reduções nos valores de  $K_{ear}$  comparados à mata. Isso pode estar relacionado com as alterações exercidas por máquinas agrícolas, que podem provocar uma aproximação das partículas sólidas, causando o aumento da densidade, redução do espaço poroso e conseqüentemente a redução da  $K_{ear}$ . Avaliando alguns solos da região sul do Brasil, Holthusen et al. (2018) observaram redução da  $K_{ear}$  no SSD comparado à mata, essas alterações acentuam-se principalmente em solos de textura argilosa, ressaltando medidas preventivas para esses solos como a inflação dos pneus de máquinas agrícolas e o tráfego de máquinas em faixas de umidades adequadas.

Pela análise estatística observa-se que o sistema de mata proporcionou valores do  $\log(K_{sat})$  significativamente superiores aos sistemas de cultivos. Os sistemas (mata e cultivo) não se diferiram significativamente no horizonte A da classe de solo LVdf–Santa Tereza do

Oeste e no horizonte B do LVdf–Londrina (Figura 5). A amplitude dos valores de  $K_{sat}$  no horizonte A foi de  $7,58 \cdot 10^{-8}$  a  $5,94 \cdot 10^{-4}$  m s<sup>-1</sup>, ocorrendo respectivamente no SSD do CXvd–Ortigueira e na mata do NVe–Leópolis.



**Figura 5.** Valores médios da permeabilidade hidráulica do solo saturado de sistemas de mata e cultivo dos horizontes A e B das classes de solos avaliadas no estado do Paraná. \*Média de 6 observações seguidas da mesma letra, nas barras dentro de cada classe de solo, não se diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

A amplitude dos valores de  $K_{sat}$  no horizonte B no SSD do NVe–Leópolis e na mata do LVdf–Santa Tereza do Oeste foi de  $1,21 \cdot 10^{-7}$  a  $7,28 \cdot 10^{-4}$  m s<sup>-1</sup>, respectivamente. O horizonte B de alguns Latossolos mesmo quando muito argilosos, podem apresentar grande permeabilidade, em decorrência da estrutura granular muito pequena e muito bem expressada (Resende et al. 1997; Ferreira et al., 1999). Segundo De Oliveira et al. (2013), o efeito da estrutura torna possível que um solo argiloso possa expor valores de permeabilidade hidráulica semelhantes aos dos solos arenosos.

Sistemas nativos podem melhorar a estrutura do solo, reduzindo a densidade e aumentando a atividade biológica, além de favorecer o abundante crescimento de raízes, propiciando maiores valores de  $K_{sat}$  em relação à sistemas antropizados (Hao et al., 2019; Assis e Lanças, 2005).

O tempo de adoção de sistemas de cultivos como o SSD pode influenciar nos valores de  $K_{sat}$ . Assis e Lanças (2005) observaram maiores valores  $K_{sat}$  na mata e em SSD com 12 anos de

implementação em um NITOSSOLO VERMELHO, enquanto no plantio convencional foram encontrados os menores valores de  $K_{sat}$ . Isso pondera que manejos de revolvimento do solo são prejudiciais ao fluxo de água no solo.

### 2.5.3. Atributos químicos

Os resultados comparativos dos atributos químicos das classes de solos avaliadas indicam que os valores médios dos  $pH$  ( $CaCl_2$ ),  $pH$  ( $KCl$ ) e  $pH$  ( $H_2O$ ) tiveram comportamentos análogos entre as classes de solo e horizontes (Tabela 3).

No horizonte A as classes de solos LVdf–Santa Tereza do Oeste e LVdf–Londrina apresentaram valores de  $pH$  significativamente superiores nos sistemas de cultivo (ILP e SSD) em relação ao sistema de mata. O solo sob mata tende a apresentar valores de  $pH$  mais ácidos, pois não recebe corretivos e fertilizantes, sendo também a matéria orgânica uma fonte natural para acidificação do solo (Pavan e Oliveira 1997).

Já nas classes de solos NVe–Leópolis e CXvd–Ortigueira os valores de  $pH$  foram superiores no sistema de mata. Esses resultados se estendem também para o horizonte B, com exceção da classe de solo CXvd–Ortigueira em que seus valores de  $pH$  não se diferiram significativamente entre os sistemas mata e cultivo. O cultivo constante de soja no verão e possíveis fertilizações amoniacais na cultura de inverno no SSD podem acidificar o solo, visto que o cultivo de leguminosas como a soja tendem a liberar  $H^+$  para solução do solo (Marschner, 1995) e fertilizantes amoniacais pode liberar prótons durante a nitrificação do amônio (Blevins et al., 1977; Franchini et al., 2000).

Em todas as classes de solos, horizontes e sistemas (mata e cultivos) os valores de  $\Delta pH$  foram negativos, indicando solos com predomínio de cargas negativas. Pela análise comparativa entre mata e cultivo, no horizonte A das classes de solos avaliadas, observa-se que os sistemas de cultivos (ILP e SSD) apresentaram valores de  $\Delta pH$  mais negativos que o sistema de mata. Já no horizonte B (somente na classe de solo CXvd–Ortigueira) ocorreu diferença significativa nos valores  $\Delta pH$ , com o predomínio maior de cargas negativas sob o sistema de mata.

A matéria orgânica não é a única condicionante para o aumento de cargas negativas no solo, minerais de argila como a caulinita também contribuem (Van Raij, 1973), podendo este mineral estar mais presente no solo sob os sistemas de cultivo (ILP ou SSD), condicionando a valores mais negativos ao  $\Delta pH$  principalmente no horizonte A.

**Tabela 3.** Valores médios das variáveis químicas de sistemas de mata e cultivo dos horizontes A e B das classes de solos avaliadas no estado do Paraná.

Variáveis <sup>(1)</sup>	Horizonte A							
	Classes de solos							
	LVdf-STO		NVe-LEO		CXvd-ORT		LVdf-LDR	
	Mata	ILP	Mata	SSD	Mata	SSD	Mata	SSD
<i>pH</i> (CaCl <sub>2</sub> )	4,6 b	5,1 a	6,9 a	5,6 b	4,4 a	4,0 b	4,0 b	4,9 a
$\Delta pH$	-0,8 a	-0,7 a	-0,7 a	-0,9 b	-0,8 a	-1,0 b	-0,6 a	-0,8 b
PCZ	3,7 b	4,2 a	5,9 a	4,3 b	3,4 a	2,8 b	3,2 b	3,9 a
<i>Al</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,14 a	0,07 b	0,00 a	0,00 a	0,31 b	3,34 a	1,57 a	0,07 b
<i>H+Al</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	11,18 a	6,64 b	2,55 b	5,03 a	7,41 b	11,43 a	9,15 a	5,13 b
<i>C</i> (g dm <sup>-3</sup> )	76,01 a	39,64 b	37,99 a	22,79 b	23,07 a	11,50 b	17,70 a	13,56 b
<i>P</i> (mg dm <sup>-3</sup> )	4,1 b	54,6 a	32,5 a	58,5 a	10,48 a	2,1 b	1,9 b	30,1 a
<i>Ca</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,28 a	6,75 a	21,64 a	15,50 b	4,77 a	2,14 b	1,86 b	4,74 a
<i>Mg</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,41 a	1,26 a	4,24 a	3,44 b	0,94 a	0,67 a	0,59 b	2,50 a
<i>K</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,36 a	0,48 a	1,32 a	1,52 a	0,31 a	0,17 b	0,21 a	0,28 a
<i>T</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	17,23 a	15,13 a	29,76 a	25,49 b	13,43 a	14,41 a	11,80 b	12,64 a

Variáveis <sup>(1)</sup>	Horizonte B							
	Classes de solos							
	LVdf-STO		NVe-LEO		CXvd-ORT		LVdf-LDR	
	Mata	ILP	Mata	SSD	Mata	SSD	Mata	SSD
<i>pH</i> (CaCl <sub>2</sub> )	4,5 b	5,2 a	6,4 a	5,7 b	4,2 a	4,3 a	4,3 b	4,5 a
$\Delta pH$	-0,8 a	-0,7 a	-1,0 a	-1,0 a	-1,0 b	-0,6 a	-0,7 a	-0,8 a
PCZ	3,6 b	4,3 a	4,9 a	4,2 b	3,0 b	3,5 a	3,5 a	3,4 a
<i>Al</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,11 a	0,01 b	0,00 a	0,00 a	2,39 a	0,90 b	0,83 a	0,62 a
<i>H+Al</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	11,52 a	4,34 b	3,27 b	3,87 a	8,31 a	8,45 a	6,86 a	6,53 a
<i>C</i> (g dm <sup>-3</sup> )	46,54 a	9,63 b	16,61 a	5,51 b	7,76 b	28,25 a	11,43 a	7,01 b
<i>P</i> (mg dm <sup>-3</sup> )	2,3 a	0,7 b	8,1 a	2,7 b	1,7 b	4,7 a	1,7 b	3,9 a
<i>Ca</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,65 b	1,47 a	16,13 a	10,76 b	2,61 a	4,77 a	2,06 b	2,33 a
<i>Mg</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,37 b	1,25 a	4,73 a	3,33 b	0,79 b	1,91 a	0,72 b	1,31 a
<i>K</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,11 a	0,09 a	0,64 a	0,12 b	0,13 b	0,42 a	0,06 a	0,07 a
<i>T</i> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	12,65 a	7,15 b	24,76 a	17,87 b	11,84 b	15,55 a	9,69 b	10,23 a

<sup>(1)</sup> média de 6 observações seguidas da mesma letra, na linha dentro de cada classe de solo, não se diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Em relação ao ponto de carga zero (PCZ) observa-se que no horizonte A da classe dos Latossolos, LVdf–Santa Tereza do Oeste e LVdf–Londrina maiores valores do PCZ sob os sistemas cultivados. Em grande parte, os Latossolos apresentam partículas com carga superficial negativa. Avaliando 19 Latossolos brasileiros, Silva et al. (1996) observaram que 18 apresentavam carga superficial negativa ( $pH > PCZ$ ), destacando o grau de intemperismo dessa classe solo e sua mineralogia que contribuem para os resultados. A redução do PCZ na mata é oriunda do maior conteúdo de carbono orgânico, que pode estar ligado aos argilominerais que diminuem a carga do solo para resultar em aumentos das cargas negativas (Van Raij, 1973).

O comportamento dos teores de alumínio (*Al*) e da acidez potencial (*H+Al*) das classes de solos avaliadas demonstrou reduções significativas nos teores de *Al* e *H+Al* sob sistema cultivado (ILP) da classe LVdf–Santa Tereza do Oeste em ambos os horizontes. Isso se deve ao uso do calcário no sistema ILP para a correção da acidez do solo.

Os teores de  $Al$  foram nulos em ambos horizontes e sistemas (mata e cultivo) da classe de solo NVe–Leópolis. Contudo, o sistema de cultivo (SSD) desta classe de solo apresentou maiores valores de  $H+Al$  que o sistema de mata. Possivelmente reflexo dos cultivos de soja (leguminosas) no SSD como anteriormente discutido no  $pH$ .

No horizonte A da classe de solo CXvd–Ortigueira houve um comportamento peculiar, isso pois o sistema de cultivo (SSD) apresentou maiores conteúdos de  $Al^{3+}$  e  $H+Al$  que o sistema de mata, ressaltando que o SSD recebe correção (calcário) que tende a reduzir  $Al^{3+}$  e a acidez potencial. Características como horizonte A pouco profundo, relevo acidentado, suscetibilidade a erosão e acúmulo de carbono orgânico podem explicar tais resultados.

Para a classe de solo LVdf–Londrina as práticas como calagem no sistema de cultivo (SSD) contribuíram para a redução do  $Al^{3+}$  e da  $H+Al$  somente no horizonte A. Normalmente a calagem é realizada sem incorporação física no SSD, sendo assim seus efeitos na redução da acidez do solo tendem a se concentrarem nas camadas superficiais do solo. De acordo com Calegari et al. (2013), a calagem superficial em SSD se torna viável somente quando a acidez do solo e a toxicidade do alumínio na subsuperfície forem previamente eliminadas.

Os conteúdos de carbono orgânico ( $C$ ) das classes de solos avaliadas apresentaram resultados análogos na análise comparativa entre os sistemas de cultivo e mata. Isso pode evidenciar que o sistema de mata apresentou valores de  $C$  significativamente superiores aos sistemas cultivados em ambos os horizontes. Sistemas nativos tendem a acumular mais  $C$  devido à pouca mobilização do solo, baixa oscilação de temperatura e atividade microbiológica constante. Comparando diferentes sistemas de uso do solo, Zagatto et al. (2019) observaram que sistemas naturais apresentam maior diversidade de microrganismos no solo do que sistemas agrícolas, devido ao maior conteúdo de  $C$ .

Na classe de solo CXvd–Ortigueira, os conteúdos de  $C$  da mata foram significativamente inferiores ao sistema de cultivo (SSD) somente no horizonte B. O clima ameno da região e o tempo de adoção do SSD podem influenciar no acúmulo de  $C$  no solo (Muzilli, 2002).

Os conteúdos de fósforo ( $P$ ) tiveram comportamentos distintos entre os horizontes analisados. No horizonte A das classes de solos observou-se uma tendência de maiores conteúdos de  $P$  nos sistemas cultivados (ILP e SSD) sob os sistemas de mata. No horizonte B das classes de solos CXvd–Ortigueira e LVdf–Londrina o comportamento dos teores de  $P$  foram semelhantes ao do horizonte A. Contudo, o horizonte B do sistema de mata nas classes de solos LVdf–Santa Tereza do Oeste e NVe–Leópolis apresentou teores de  $P$

significativamente superiores aos sistemas cultivados. No horizonte A destes solos, o inverso ocorreu.

O elemento *P* possui baixa mobilidade no solo, podendo ocorrer seu acúmulo na superfície do solo, principalmente em sistemas antropizados como o ILP e SSD, onde ocorre a adição de fertilizantes fosfatados. Em um sistema de ILP Diel et al. (2014) observaram que os teores de *P* são maiores em áreas cultivadas com grãos e em camadas superficiais. Já em maiores profundidades sistemas nativos normalmente tendem a acumular mais *P* (Conte et al., 2002; Zhang et al., 2014).

Nas classes de solos avaliadas, as bases cálcio (*Ca*) e magnésio (*Mg*) tiveram comportamento semelhantes entre os horizontes dos sistemas (mata e cultivo). No horizonte A do LVdf–Santa Tereza do Oeste as bases *Ca* e *Mg* não se diferiram entre os sistemas, já no horizonte B destas classes de solo o sistema cultivado (ILP) foi que apresentou maiores conteúdos de *Ca* e *Mg*.

A ciclagem de nutrientes no sistema ILP é eficaz em bases como *Ca* e *Mg*. Martins et al. (2014) relatam que áreas com pastejo de animais apresentaram teores de *Ca* e *Mg* superiores a áreas que não receberam pastejo. Também em sistema ILP, Assmann et al. (2017) observaram que a liberação de *Ca* e *Mg* dos resíduos de plantas e animais é maior comparadas as áreas não pastejadas. Esses resultados se intensificam principalmente na subsuperfície do solo.

Em ambos os horizontes da classe de solo NVe–Leópolis foram verificados maiores conteúdo das bases *Ca* e *Mg* sob o sistema de mata. Esse resultado não era esperado, visto que o SSD tem manejos de calagem e fertilização. No entanto, os Nitossolos argilosos normalmente apresentam alta fertilidade natural (Carmo e Val, 2013).

Para a classe de solo CXvd–Ortigueira os maiores conteúdos de *Ca* foram observados no horizonte A do sistema de mata, enquanto os conteúdos de *Mg* foram significativamente superiores no horizonte B desta classe de solo sob o sistema cultivado. Avaliando os atributos químicos de um CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico sob diferentes usos, Portugal et al. (2008) observaram teores baixos de nutrientes (*Ca* e *Mg*) em área cultivada com laranja (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) em relação a mata, atribuindo ao fato da exportação pelos frutos e à perda por erosão devido ao declive. O sistema cultivado (SSD) da classe de solo LVdf–Londrina apresentou os maiores conteúdos das bases *Ca* e *Mg* em ambos os horizontes avaliados.

Apesar dos sistemas cultivados (ILP e SSD) receberem fertilizantes potássicos, os conteúdos de *K* foram superiores sob o sistema cultivado (SSD) no horizonte B da classe de solo CXvd–Ortigueira. Isso pode ser decorrência do *K* ser monovalente, acarretando em maior

suscetibilidade a lixiviação. Assim, o elemento *K* pode ser aplicado via fertilizante no SSD, sendo lixiviado ao longo do perfil do solo (Werle et al., 2008).

No horizonte A da classe de solo CXvd–Ortigueira e no horizonte B do NVe–Leópolis o sistema sob mata foi o que apresentou valores significativamente superiores ao sistema cultivado. Esse resultado pode ser decorrência da serrapilheira, visto que o nutriente se encontra na forma iônica, desprendendo-se dos resíduos pela lavagem da água das chuvas (Vital et al., 2004).

Nas demais classes de solos os conteúdos de *K* não se diferiram entre os sistemas (mata e cultivo). Os solos derivados do basalto normalmente apresentam uma reserva de *K* que é disponibilizada para solo (Silva et al., 1995), além também do constante aporte vegetal deixados em ambos os sistemas.

Nos horizontes A e B do NVe–Leópolis e apenas no horizonte B do LVdf–Santa Tereza do Oeste os valores da capacidade de troca de cátions (*T*) foram significativamente superiores no sistema de mata. Já em ambos os horizontes do LVdf–Londrina e no horizonte B do CXvd–Ortigueira os valores de *T* foram superiores sob o sistema cultivado (SSD). A capacidade de troca de cátions (*T*) dos solos tropicais, que são altamente intemperizados, é dependente do carbono orgânico (Verdade, 1956; Sidiras e Pavan, 1985; Ciotta et al., 2003).

## 2.6. CONCLUSÕES

Os solos avaliados Latossolos de Londrina e Santa Tereza do Oeste e o Nitossolo de Leópolis apresentaram classe textural muito argilosa, e o Cambissolo de Ortigueira textura franco-argilosa-arenosa.

Sistemas de cultivo como sistemas de semeadura direta e integração lavoura-pecuária, tenderam a reduzir a macroporosidade e as permeabilidades do solo ao fluxo de água e ar, além de aumentar a densidade e a resistência do solo a penetração. Todas as classes de solos avaliadas, em ambos os horizontes apresentaram carga superficial negativa das partículas. Somente o solo CXvd–Ortigueira, os conteúdos de carbono orgânico foram superiores no sistema de cultivo quando comparados aos sistemas de mata nativa.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 717–723, 2001.



ARAÚJO-JUNIOR, C. F.; MIYAZAWA, M. Funções de pedotransferência para a curva de compactação de seis Latossolos do Estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, Londrina 2012. **Resumos...** Londrina-PR: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola.

ARAÚJO-JUNIOR, C. F.; OLIVEIRA, E.; CARVALHO, E. A. Comportamento mecânico de um Latossolo sob sistema integração lavoura-pecuária com consórcio de culturas em semeadura direta. In: IV REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO, Cascavel, 2015. **Resumos...** Curitiba-PR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/ Núcleo Estadual do Paraná.

ARAÚJO, M. A.; ZINN, Y. L.; LAL, R. Soil parent material, texture and oxide contents have little effect on soil organic carbon retention in tropical highlands. **Geoderma**, v. 300, p. 1–10, 2017.

ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 515–522, 2005.

ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; COSTA, S. E. V. G. A.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CARVALHO, P. C. F.; DA SILVA, F. D.; COSTA, A. A. Calcium and magnesium released from residues in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1–13, 2017.

AULER, A. C.; PIRES, L. F.; DOS SANTOS, J. A. B.; CAIRES, E. F.; BORGES, J. A. R.; GIAROLA, N. F. B. Effects of surface-applied and soil-incorporated lime on some physical attributes of a dystrodept soil. **Soil Use and Management**, v. 33, n. 1, p. 129–140, 2017.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 215–221, 1998.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods**. 2nd. ed. Madison: Wisconsin, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 363- 375. (Agronomy Series, 5).

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; POST, W. M.; IZAURRALDE, C.; SHIPITALO, M. J. Organic Carbon Influences on Soil Particle Density and Rheological Properties. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 70, no. 4, p. 1407–1414, 2006.

BLEVINS, R. L.; THOMAS, G. W.; CORNELIUS, P. L. Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. **Agronomy Journal**, v. 69, n. 3, p. 383–386, 1977.

CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W. L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONET, S.; GUIMARÃES, M. F.; DOS SANTOS, D. R. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32–39, 2013.

CALEGARI, M. R.; HAYAKAWA, E. H.; LIMBERGER, L. Descrição geral do estado do Paraná. In: BERTOL, O. J.; COLOZZI FILHO, A.; BARBOSA, G. M. C.; dos SANTOS, J. B.;

GUIMARÃES, M. F. **Manual de manejo e conservação do solo e da água para o estado do Paraná**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Estadual do Paraná, Curitiba, p 8–14, 2019.

CARMO, D. A. B.; VAL, B. H. P. Classificação dos Neossolos e Nitossolos quanto a natureza física, químicas e morfológicas. **FAZU em Revista**, n. 10, p. 17–26, 2013.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; Oliveira, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, vol. 33, n. 6, p. 1161–1164, 2003.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 925–930, 2002.

CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 29, p. 81–90, 2005.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M.; BEM, E. A. D. Inter-relações da produtividade de cana soca com a resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo. **Revista Ceres**, v. 61, n. 2, p. 255–264, 2014.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.545–566.

DE FARIA, R. T.; CARAMORI, P. H. Caracterização físico-hídrica de um latossolo roxo distrófico do município de Londrina, PR. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 21, n. 12, p. 1303–1311, 1986.

DE MORES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; DA SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 288–298, 2014.

DE OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; ROSSETTI, K. V.; FERRAUDO, A. S.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. S.; BÁRBARO JÚNIOR, L. S. Qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho submetido à compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 604–612, 2013.

DERPSCH, R.; FRANZLUEBBERS, A. J.; DUIKER, S. W.; REICOSKY, D. C.; KOELLER, K.; FRIEDRICH, T.; STURNY, W. G.; SÁ, J. C.M.; WEISS, K. Why do we need to standardize no-tillage research? **Soil and Tillage Research**, v. 137, p. 16–22, 2014.

DIEL, D.; BEHLING, M.; FARIAS NETO, A. L.; ISERNHAGEN, E. C. C. Distribuição horizontal e vertical de fósforo em sistemas de cultivos exclusivos de soja e de integração lavoura-pecuária- floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 8, p. 639–647, 2014.

DOMINGOS, M. M. M.; GASPARETTO, N. V. L.; NAKASHIMA, P.; RALISCH, R.; TAVARES-FILHO, J. Estrutura de um Nitossolo Vermelho Latossólico eutroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e floresta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 33, no. 6, p. 1517–1524, 2009.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 515–524, 1999.

FISH, A. N.; KOPPI, A. J. The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, v. 63, n. 3–4, p. 255–264, 1994.

FLINT, L. E.; FLINT, A. Porosity. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 4. p. 680–683.

FRANCHINI, J. C.; BORKET, C. M.; FERREIRA, M. M.; GAUDÊNCIO, C. A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 459–467, 2000.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 477–484, 2004.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; COSTA LIMA, J. M. J. Topossequências de latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II - Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 307–319, 2006.

GROHMANN, F.; VAN RAIJ, B. Dispersão mecânica e pré-tratamento para análise granulométrica de Latossolos argilosos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 52–53, 1977.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H., TOPP, G.C. (Eds.), **Methods of Soil Analysis: Part 4**. Physical Methods. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI, p. 201–225, 2002.

HAO, M.; ZHANG, J.; MENG, M.; CHEN, H. Y. H.; GUO, X.; LIU, S.; YE, L. Impacts of changes in vegetation on saturated hydraulic conductivity of soil in subtropical forests. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2019.

HOLTHUSEN, D.; BRANDT, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**, vol. 177, p. 113–124, 2018.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Zoneamento Agrícola .Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1043>>. Acesso em: 17set. 2020a.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Médias históricas em estações do IAPAR. Disponível em: [http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias\\_Historicas/Londrina.htm](http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Londrina.htm)>. Acesso em: 17set. 2020b.

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; DA SILVA, R. B. Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, p. 185–195, 2012.

KENG, J. C. W.; UEHARA, G. Chemistry, mineralogy, and taxonomy of Oxisols and Ultisols. In: **Proc Soil Crop Sci Soc Fla.** p. 119–126, 1974.

KIRKHAM, D. Field Method for Determination of Air Permeability of Soil in its Undisturbed State. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 11, p. 93–99, 1946.

LIMA, R. T. Caracterização e distribuição da precipitação no município de Leópolis, PR. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 13, n. 2, p. 178–186, 2019.

LUCIANO, R. V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; KURTZ, C.; FAYAD, J. A. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 9, n. 1, p. 9–19, 2010.

MAGALHÃES, V. L.; CUNHA, J. E.; NÓBREGA, M. T. Dinâmica físico-hídrica de um sistema pedológico Latossolo-Nitossolo. **Mercator**, v. 16, p. 1–19, 2017.

MAPFUMO, E.; CHANASYK, D. S. Guidelines for safe trafficking and cultivation, and resistance-density-moisture relations of three disturbed soils from Alberta. **Soil and Tillage Research**, v. 46, p. 193–202, 1998.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 Ed. San Diego, Academic Press, 902p. 1995.

MARTINS, A. P.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T. R.; BALERINI, F.; CECAGNO, D.; CARVALHO, P. C. F. Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop-livestock system under different grazing intensities. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 195, p. 18–28, 2014.

MEDRI, M. E.; BIANCHINI, E.; SHIBATTA, O. A.; PIMENTA, J. A. Síntese geológica da bacia do rio Tibagi In: PINESE, J. P. P. **A Bacia do Tibagi**. Câmara Brasileira do Livro, Londrina, 2002. p 21-30.

MEKARU, T.; UEHARA, G. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 36, n. 2, p. 296–300, 1972.

MINEROPAR. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 63 p. 2006.

MIYAZAWA, M.; BARBOSA, G. M. C. Efeitos da agitação mecânica e matéria orgânica na análise granulométrica do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 680–685, 2011.

MOREIRA, W. H.; BETIOLI JUNIOR, E.; PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; COSTA, A. T.; FRANCO, H. H. S. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico em Sistema de Integração Lavoura-Pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 389–400, 2012.

MUZILLI, O. Manejo da matéria orgânica no sistema plantio direto: a experiência no Estado do Paraná. **Informações Agrônomicas**, n. 100, p. 6–10, 2002.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da SILVA; PINTO, F. D. **Atlas climático do Estado do Paraná**. Londrina: Instituto Agrônomico do Paraná, 2019.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um latossolo vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 28, no. 2, p. 327–336, 2004.

OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; MELLO, C. R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 265–270, 2007

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. D.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade (IAPAR Circular, 76)**. Londrina: Instituto Agrônomico do Paraná, 1992.

PAVAN, M.A.; OLIVEIRA, E.L. **Manejo da acidez do solo. (IAPAR Circular, 95)**. Londrina: Instituto Agrônomico do Paraná, 1997.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; DA COSTA, L. M.; DOS SANTOS, B. C. M. Atributos químicos e físicos de um Cambissolo Háplico Tb Distrófico sob diferentes usos na zona da mata Mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 32, n. 1, p. 249–258, 2008.

POTT, C. A.; ZERBIELLI, L. C.; MARTINS, P. J.; GARDIN, E.; GARCIA, M. L. Qualidade física do solo em sistemas florestais, pecuários e integrados de produção. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 10, n. 2, p. 53–60, 2017.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 2.Ed. Viçosa, NEPUT, 367p. 1997.

ROCHA, A. S.; NÓBREGA, M. T.; CUNHA, J. E. As unidades de paisagem, as vertentes características e os sistemas pedológicos na bacia hidrográfica do Paraná 3. **Ateliê Geográfico**, v. 12, n. 1, p. 51–70, 2018.

RODRIGUES, E. J. **Profundidade do sistema radicular e extração de água do solo na cultura do milho safrinha**. 2019. 79 f. 2019 (Dissertação de Mestrado).

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 48, n. 3–4, p. 351–361, 1991.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5 Ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2018.

SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALLI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA, J. M. F. Mapeamento da vulnerabilidade geoambiental do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 4, p. 812–820, 2007.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005

SIDIRAS, N.; PAVAN, M. A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, n. 3, p.249–254, 1985.

SILVA, D. N.; MEURER, E. J.; KÄMPF, N.; BORKERT, C. M. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, n. 3, p. 433–439, 1995.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; DE SÁ, J. J. G.; MARQUES, M.; GUILHERME, L. R. G.; DE LIMA, J. M. Ponto de efeito salino nulo e suas relações com propriedades mineralógicas e químicas de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 9, p. 663–671, 1996.

SKORUPA, A. L. A.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; TASSINARI, D.; PINTO, L. C.; ZINN, YURI L.; CURI, N. Similar soils but different soil-forming factors: Converging evolution of Inceptisols in Brazil. **Pedosphere**, v. 27, n. 4, p. 747–757, 2017.

TRABAQUINI, K.; MIGLIORANZA, E.; DE FRANÇA, V.; PEREIRA NETO, O. C. Uso da geotecnologia para caracterizar os cafezais no município de Londrina-PR, em relação à altimetria, declividade e tipo de solo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1136–1147, 2010.

van RAIJ, B. Determinação do ponto de carga zero em solos. **Bragantia**, v. 32, p. 337–347, 1973.

VERDADE, F. C. Influência da matéria orgânica na capacidade de troca de cátions do solo. **Bragantia**, v. 15, n. 4, p. 35–42, 1956.

VIEIRA, M. J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 7, p. 873–882, 1984.

VITAL, A. R. T.; GUERRINI, I. A.; FRANKEN, W. K.; FONSECA, R. C. B. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 793–800, 2004.

VOMOCIL, J. A. Porosity. In: BLAKE, C. A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2297–2305, 2008.

ZAGATTO, M. R. G.; ZANÃO JUNIOR, L. A.; PEREIRA, A. P. A.; ESTRADA-BONILLA, G.; CARDOSO, E. J. B. N. Soil mesofauna in consolidated land use systems: How management affects soil and litter invertebrates. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 2, p. 165–171, 2019.

ZHANG, S.; HUFFMAN, T.; ZHANG, X.; LIU, W.; LIU, Z. Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: a case study of soil available phosphorus and total phosphorus. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 11, p. 1775–1789, 2014.

ZHANG, Y.; SCHAAP, M. G. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1011–1030, 2019.

### CAPÍTULO 3: FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMAR A PERMEABILIDADE HIDRÁULICA DE SOLOS SATURADOS DO PARANÁ

#### RESUMO

O coeficiente  $K_{sat}$  é altamente variável e dependente dos demais atributos do solo. A estrutura é fundamental para manutenção do fluxo de água no solo, sendo que fatores indiretos como a matéria orgânica e os íons cálcio, magnésio e potássio podem alterá-la e, conseqüentemente, o fluxo de água. A aplicação das funções de pedotransferência (PTFs) pode ser uma alternativa para estimar  $K_{sat}$ . Essas PTFs podem ser empiricamente formuladas com atributos físico-hidráulicos do solo ou com outros dados facilmente disponíveis. Contudo, o registro de um banco de dados de solos do estado do Paraná composto de  $K_{sat}$  ainda é escasso. O objetivo neste trabalho foi desenvolver e avaliar PTFs para estimar  $K_{sat}$  de solos do Paraná. Com base nos resultados encontrados, houve redução de  $K_{sat}$  com acréscimos do teor de argila e da densidade do solo, sendo esse resultado mais expressivo no horizonte B das classes de solos de textura muito argilosa. As PTFs baseadas em variáveis estruturais do solo, como carbono orgânico, densidade, macroporosidade, resistência do solo à penetração e porosidade efetiva foram mais eficientes na predição de  $K_{sat}$  que as PTFs texturais. As PTFs geradas para o horizonte A dos solos de textura muito argilosa foram mais eficientes que as PTFs geradas especificamente para cada classe de solo. Para o horizonte B o desempenho das PTFs foi oposto ao encontrado para o horizonte A.

**Palavras-chave:** Condutividade hidráulica, permeâmetro de carga constante, solos tropicais.



### CHAPTER 3: PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR PREDICTING THE HYDRAULIC PERMEABILITY OF THE SATURATED SOILS OF PARANÁ

#### ABSTRACT

The  $K_{sat}$  coefficient is highly variable and dependent on other soil attributes. The structure is fundamental for maintaining water flows in the soil, since indirect factors that act on it, such as organic matter and ions (calcium, magnesium, and potassium) can alter it and, consequently, the water flux. The application of pedotransfer functions (PTFs) is an alternative to estimate  $K_{sat}$  and are usually empirical models developed with other physical properties or easily available data. However, a database of soils from the state of Paraná with measured  $K_{sat}$  data is still scarce. This work aimed to develop and evaluate PTFs to estimate  $K_{sat}$  of soils in the state of Paraná. A reduction in  $K_{sat}$  as function of increases in the clay content and soil density was found. This result was more expressive in the B horizons of the clayey soils. PTFs based on structural soil variables such as organic carbon, bulk density, macroporosity, resistance to penetration, and effective porosity performed better in the  $K_{sat}$  prediction than textural PTFs. The PTFs generated for horizon A of the clayey soils were more efficient than the PTFs generated specifically for each soil class. The prediction of PTFs for horizon B had the opposite performance than the one found for horizon A.

**Keywords:** Hydraulic conductivity, constant head permeameter, tropical soils.

### 3.1. INTRODUÇÃO

O primeiro estudo do movimento de água em meios porosos foi realizado em colunas de areia saturadas com água em regime laminar e a temperatura ambiente (Darcy, 1856). A constante de permeabilidade, ou condutividade, hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) estabelece a relação entre a densidade de fluxo e o gradiente hidráulico em condição de solo saturado, indicando a máxima permeabilidade desse meio poroso a passagem de água.

O coeficiente  $K_{sat}$  é altamente variável e dependente dos demais atributos do solo (Gonçalves-Maduro et al., 2020), sendo a estrutura fundamental para manutenção dos fluxos de água. Fatores que agem indiretamente na estrutura do solo, como a matéria orgânica e íons (cálcio, magnésio e potássio), podem modificá-la e, conseqüentemente, o balanço de água no solo.

Há diversas metodologias de campo ou laboratório para determinação de  $K_{sat}$ , mas em muitos casos, torna-se inviável realizar os experimentos em grande escala. Assim, a aplicação das funções de pedotransfêrência (PTFs) é uma alternativa para estimar essa constante. A maioria das PTFs para predição de  $K_{sat}$  é baseada em modelos empíricos que utilizam-se de outros atributos físicos facilmente mensuráveis ou disponíveis (Zhang e Schaap, 2019). Contudo, essas PTFs empíricas, especificamente calibradas para solos de uma determinada região, podem não ser apropriadas para outras regiões (Tomasella e Hodnett, 2004) gerando estimativas fora do esperado.

Em princípio as PTFs para  $K_{sat}$  podem ser desenvolvidas utilizando apenas variáveis texturais do solo (*argila, silte e areia*). Assim, Cosby et al. (1984) utilizaram como variáveis preditoras de  $K_{sat}$  os conteúdos de argila e areia de solos norte-americanos. Também para solos norte-americanos, Puckett et al. (1985) utilizaram somente o teor de argila, enquanto Julià et al. (2004) observaram que a fração areia foi a variável mais significativa para predição de  $K_{sat}$  em solos da Península Ibérica na Espanha.

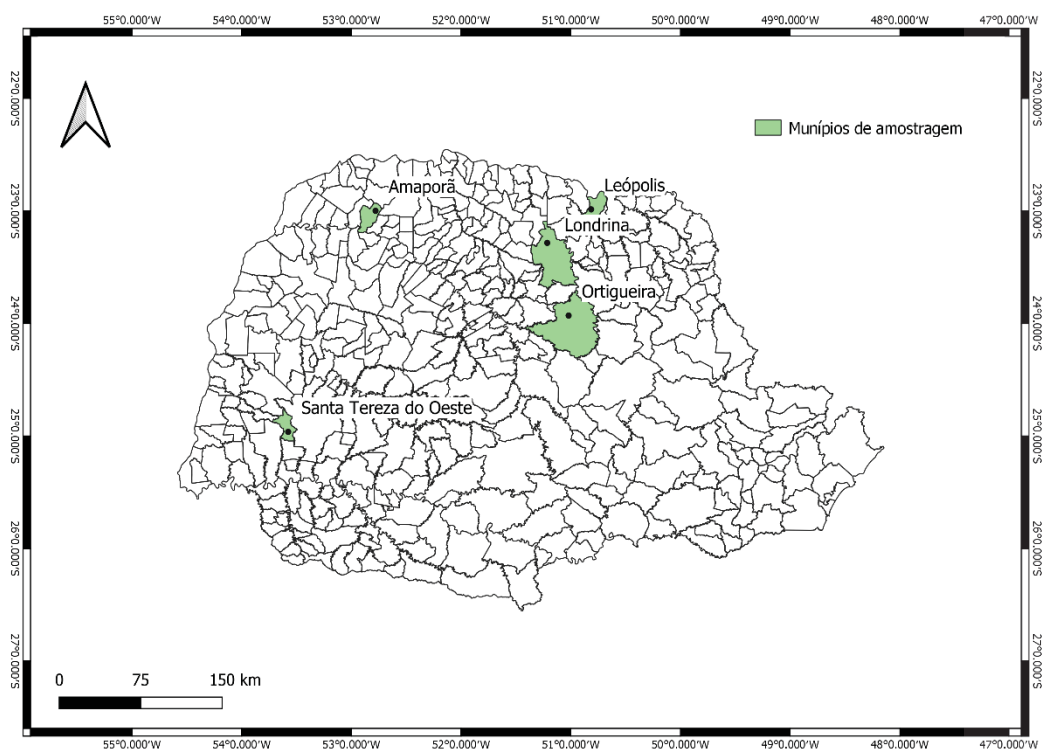
A inserção de variáveis relacionadas diretamente com a estrutura do solo (como macroporosidade, porosidade efetiva, densidade do solo, resistência do solo à penetração e  $K_{ear}$ ) ou ainda as indiretamente relacionadas (como carbono orgânico) pode melhorar o desempenho de predição das PTFs. O modelo de Ahuja et al. (1984) é uma das principais PTFs para predição de  $K_{sat}$ , que é potencialmente relacionada a porosidade efetiva [ $\varepsilon(-33\text{ kPa})$ ]. De acordo com Zhang e Schaap (2019), o melhor desempenho dessa PTF provavelmente se dá pela utilização de uma variável relacionada a rede de poros, ou seja, com a estrutura do solo.

O registro de um banco de dados de solos do estado do Paraná que inclui a variável  $K_{sat}$  ainda é escasso. Assim, a utilização de PTFs elaboradas para outras regiões, países e continentes (Schaap et al., 2001) ou fisicamente fundamentadas (Silva et al., 2020) é comumente realizada podendo auxiliar no manejo do solo e da água. Neste contexto, teve-se como objetivo desenvolver e avaliar PTFs empíricas e específicas para estimativa de  $K_{sat}$  solos de cinco diferentes regiões do estado do Paraná.

### 3.2. MATERIAL E MÉTODOS

#### *Processo amostral*

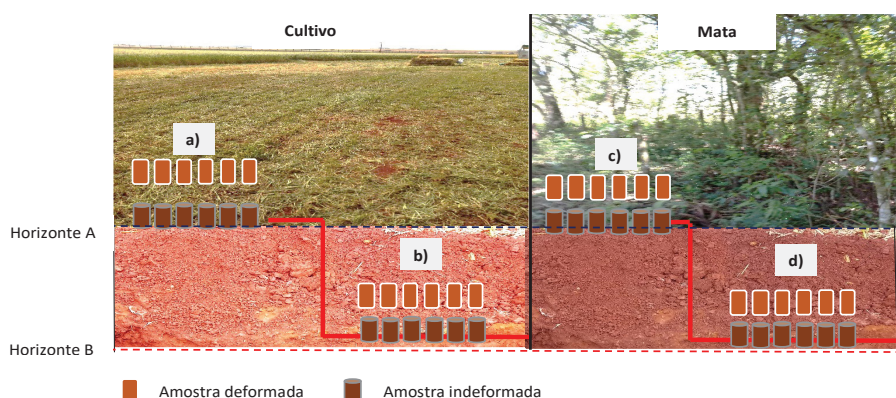
Amostras de solos com estruturas indeformadas e deformadas foram coletadas em cinco locais geograficamente distintos do estado do Paraná (Figura 1).



**Figura 1.** Municípios no estado do Paraná onde foram realizadas a amostragem de solo.

Em cada local o uso dos solos foi classificado como cultivado e de mata, sendo os horizontes subdivididos em superficiais (A) e profundos (B ou C). Para cada horizonte em seu respectivo uso foram coletadas 6 amostras indeformadas e deformadas, totalizando 24 amostras para cada local (Figura 2).

As amostras de solo com estrutura indeformadas foram coletadas com o auxílio de um extrator mecânico projetado na área de Engenharia Agrícola do IAPAR (Araujo, 2007). Foram utilizados anéis metálicos com dimensões de 5 cm de diâmetro e de altura. A coleta das amostras de solo deformadas foi realizada adjacente aos locais onde foram coletadas as indeformadas e em seguida armazenadas em saco plástico, sendo devidamente identificadas.



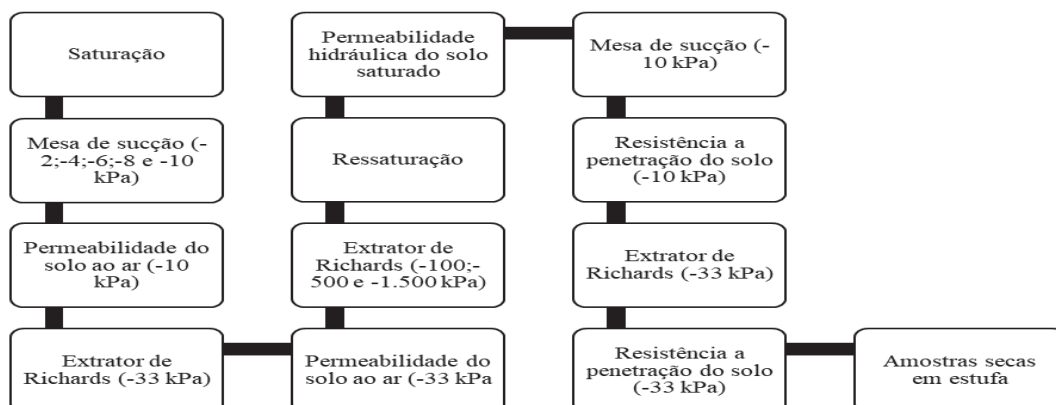
**Figura 2.** Esquema amostral das 24 amostras realizadas em diferentes regiões do estado do Paraná: a) 6 amostras de solo sob cultivo no horizonte A; b) 6 amostras de solo sob cultivo no horizonte B; c) 6 amostras de solo sob mata no horizonte A e d) 6 amostras de solo sob mata no horizonte B.

### *Descrição e caracterização dos solos*

Os solos foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (Santos et al., 2018) tendo como horizonte diagnóstico o horizonte B ou C. A classe textural dos solos variou entre muito argilosa, franco-argilosa, franco-argilo-arenosa e areia-francosa (Tabela 1).

### *Condução das análises físico-hidráulicas*

As amostras indeformadas foram cuidadosamente preparadas, depois de levadas ao laboratório, de tal modo que os volumes correspondessem ao volume interno do anel. Em seguida, na parte inferior dos anéis, colocou-se um tecido do tipo *voil* envolto por um látex, previamente pesados. As análises físico-hidráulicas realizadas nas amostras indeformadas seguiram a rotina descrita no fluxograma da Figura 3.



**Figura 3.** Fluxograma das etapas do processo analítico de medição das propriedades físico-hidráulicas nas amostras indeformadas do solo.

**Tabela 1.** Classificação dos solos e das classes texturais de diferentes regiões do estado do Paraná.

Município	Uso	Classe de solo	Textura
Santa Tereza do Oeste	Mata ILP	LATOSSOLO VERMELHO Distroférico	Muito argilosa
Leópolis	Mata SSD	NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico	Muito argilosa
Ortigueira	Mata SSD	CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico	Franco-argilosa Franco-argilo-arenosa
Londrina	Mata SSD	LATOSSOLO VERMELHO Distroférico	Muito argilosa
Amaporã	Mata Pastagem	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO <sup>(1)</sup> ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico	Areia francosa Franco-argilo-arenosa

<sup>(1)</sup>Horizonte C

### *Análise dos atributos físico-hidráulicos e químicos do solo*

A densidade das partículas do solo ( $\rho_p$ ) foi determinada pelo método do balão (Blake e Hartge, 1986). Já a análise textural foi realizada pelo método da pipeta (Day, 1965) utilizando-se hidróxido de sódio (NaOH - 0,1 mol L<sup>-1</sup>) como dispersante químico; a dispersão mecânica foi realizada com a adição de 20 g de areia grossa e agitação lenta durante 16 h (Grohmann e Rajj, 1977) em agitador do tipo reciprocante com 180 ciclos/min (Miyazawa e Barbosa, 2011).

A argila dispersa em água (AD) foi determinada pelo mesmo procedimento da análise textural, no entanto ela foi excetuada sem a utilização da areia grossa e do hidróxido de sódio, além da agitação durante 2 h (Araujo-Junior et al., 2020).

Para a determinação da densidade do solo seco ( $\rho_b$ ) as amostras com estrutura indeformada foram conduzidas para a estufa a 105 – 110 °C durante 48 h para a obtenção da massa de solo seco e posterior cálculo (Grossman e Reinsh, 2002). A porosidade total do solo ( $\phi$ ), a microporosidade (Micro) e a macroporosidade (Macro) (Vomocil, 1965; Flint e Flint, 2002) foram calculadas da forma:

$$\phi = 1 - \left( \frac{\rho_b}{\rho_p} \right) \quad (1)$$

$$micro = \theta(-6kPa) \quad (2)$$

$$macro = \phi - micro \quad (3)$$

em que  $\phi$  é a porosidade total do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\rho_b$  é a densidade do solo seco ( $\text{kg dm}^{-3}$ ),  $\rho_p$  é a densidade das partículas do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ),  $micro$  é a microporosidade ( $\text{cm}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\theta(-6kPa)$  é a umidade volumétrica do solo correspondente ao potencial matricial de -6 kPa ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $macro$  é a macroporosidade ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ).

A partir das eq. (1), a porosidade efetiva do solo ( $\varepsilon$ ) foi calculada para três potenciais matriciais, segundo Ahuja et al. (1984), por:

$$\varepsilon(-10kPa) = \phi - \theta(-10kPa) \quad (4)$$

$$\varepsilon(-33kPa) = \phi - \theta(-33kPa) \quad (5)$$

$$\varepsilon(-100kPa) = \phi - \theta(-100kPa) \quad (6)$$

em que  $\varepsilon(-10 kPa)$ ,  $\varepsilon(-33kPa)$  e  $\varepsilon(-100 kPa)$  são as porosidades efetivas ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) equilibradas nos respectivos potenciais matriciais de -10, -33 e -100 kPa,  $\phi$  é a porosidade total do solo calculada pela eq. (1), ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta(-10 kPa)$ ,  $\theta(-33 kPa)$  e  $\theta(-100 kPa)$  são as umidades volumétricas correspondentes aos potenciais matriciais do solo de -10 kPa, -33 kPa e -100 kPa ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ).

As amostras de solo com estruturas indeformadas foram hidraulicamente equilibradas aos potenciais matriciais de -10 e -33 kPa. Depois de atingirem o equilíbrio em ambos os

potenciais foi realizado o ensaio de resistência do solo à penetração do solo (RP) no centro das amostras, utilizando-se para isso um penetrômetro portátil com haste de 50 mm de comprimento e diâmetro da base de 6,3 mm. Os valores de compressão registrados em  $\text{kgf cm}^{-2}$  pelo penetrômetro foram transformados em MPa.

Para determinação da permeabilidade do solo ao ar ( $K_{ar}$ ) foi utilizado o método da pressão decrescente em amostras indeformadas (Kirkham, 1946). As medidas de permeabilidade específica do solo ao ar ( $K_{ear}$ ) foram realizadas em amostras equilibradas nos potenciais de -10 e -33 kPa, que foram previamente pesadas.

A permeabilidade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) foi determinada utilizando-se um permeâmetro de carga constante. As amostras com estrutura indeformada que anteriormente foram equilibradas em vários potenciais matriciais foram ressaturadas lentamente. Após a saturação foi acoplado um cilindro de 2 cm de altura e diâmetro igual ao da amostra, para a manutenção da carga hidráulica constante.

Para a construção da curva de retenção de água do solo (CRAS), as amostras com estruturas indeformadas foram lentamente saturadas por capilaridade e, posteriormente, submetidas aos potenciais matriciais ( $h$ ) de -2, -4, -6, -8 e -10 kPa em mesa de sucção e -33, -100, -500 e -1.500 kPa em extratores de Richards até que atingissem equilíbrio determinando-se os valores de  $\theta(h)$ . O valor da porosidade total do solo ( $\phi$ ) foi admitido como  $\theta(0 \text{ kPa})$ , finalizando assim o conjunto de valores  $\theta(h)$  para serem ajustados às equações da CRAS de van Genuchten (1980), com a restrição de Mualem (1976), Brooks e Corey (1964) e Groenevelt e Grant (2004):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^{1-1/n}} \quad (7)$$

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_s, & |h| \leq h_b \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{h_b}{|h|}\right)^\lambda, & |h| > h_b \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{k}{|h|} \right)^p \right] \right\} \quad (9)$$

em que  $\theta$  é a umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) em função do potencial matricial da água ( $h$ , kPa),  $\theta_s$  e  $\theta_r$  são, respectivamente, as umidades volumétricas na saturação e residual do solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $h_b$  e  $k$  são parâmetros relacionados a pressão de borbulhamento na entrada de ar (kPa),  $\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ),  $n$ ,  $\lambda$  e  $p$  são demais parâmetros empíricos de ajuste das equações. Para o ajuste das eqs. (7, 8 e 9) foi utilizada a técnica da minimização da soma dos quadrados dos desvios por meio do suplemento *Solver* do EXCEL®.

As amostras de solo com estrutura deformada coletadas foram secas em estufa com circulação forçada a 65 °C e peneiradas com malha de 2 mm para a determinação dos elementos  $P$  (Mehlich),  $C$  pelo método da combustão via úmida (Walkley e Black, 1934),  $pH$  ( $\text{CaCl}_2$ ),  $K$  (Mehlich),  $Ca$ ,  $Mg$ ,  $H+Al$ , soma de bases, saturação por bases e saturação por alumínio (Pavan et al., 1992).

Foram determinados o  $pH$  em água e o  $pH$  em  $\text{KCl}$  (cloreto de potássio). A partir desses valores foram estimados  $\Delta pH$  (Mekaru e Uehara, 1972) e  $PCZ$  (Keng e Uehara, 1974), conforme:

$$\Delta pH = pH(KCl) - pH(H_2O) \quad (10)$$

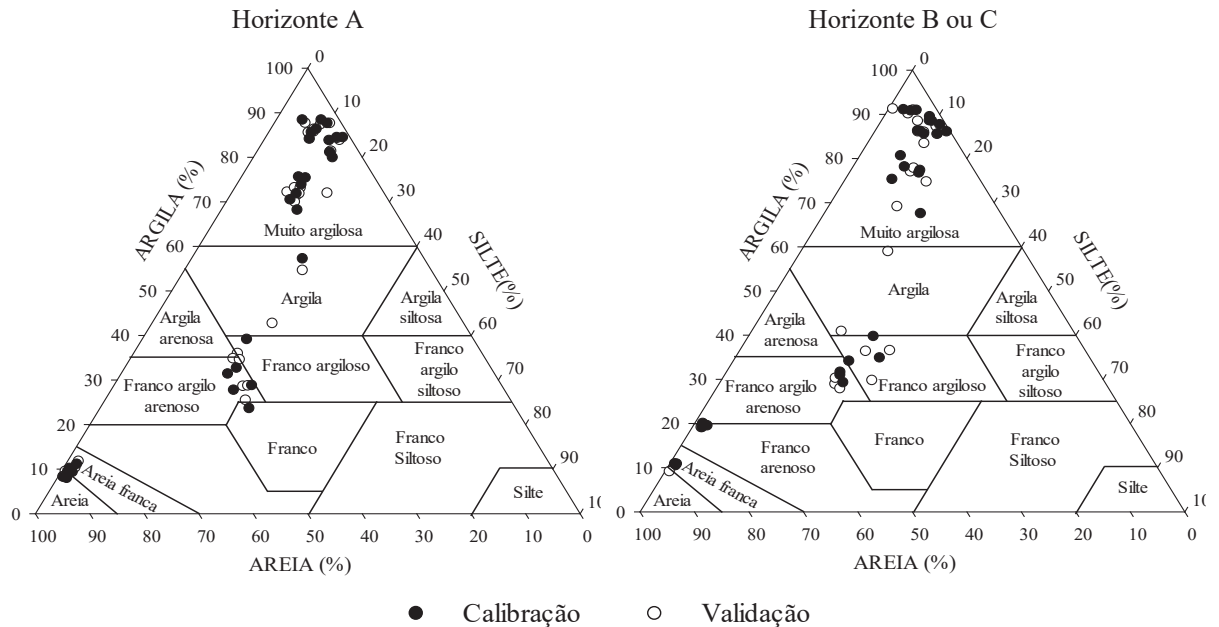
$$PCZ = 2pH(KCl) - pH(H_2O) \quad (11)$$

#### *Desenvolvimento das funções de pedotransferência*

Foram desenvolvidas PTFs específicas para estimar  $K_{sat}$  para cada solo e seus respectivos horizontes, sendo denominada de PTF – classe de solo, utilizando-se 12 pontos amostrais. Também foram desenvolvidas PTFs para a classe textural muito argilosa, denominada de PTF – classe textural com 36 pontos amostrais.

Em ambas PTFs desenvolvidas utilizaram-se 50% dos dados para o processo de calibração e 50% para a validação. Para a seleção dos pontos amostrais que compuseram os dados para calibração e validação teve-se como base a disposição dos dados de acordo com suas respectivas frações texturais (*argila, silte e areia*) (Figura 4).





**Figura 4.** Distribuição dos pontos de calibração e validação no triângulo textural de diferentes classes de solos do estado do Paraná.

Com base nas variáveis disponíveis, 28 PTFs foram desenvolvidas e calibradas para estimativa de  $K_{sat}$ . Essas PTFs foram subdivididas em 10 grupos, onde cada grupo é representado por um conjunto de variáveis.

As PTFs da literatura e desenvolvidas foram numericamente identificadas (ID) de acordo com seu grupo. A unidade de estimativa de  $K_{sat}$  foi padronizada em  $m\ s^{-1}$  ou apresentada na forma  $\log(K_{sat})$ . Os métodos de regressão utilizados para gerar as PTFs foram o de minimização dos quadrados dos desvios e *stepwise* a fim de gerar modelos lineares e não lineares (Tabela 2).

#### *Avaliação e processo de validação das PTFs*

Sendo que geralmente os valores de  $K_{sat}$  seguem distribuição lognormal, os dados foram convertidos em logaritmos de base 10 [ $\log(K_{sat})$ ]. A partir daí índices estatísticos para a quantificação dos erros sistemáticos das PTFs foram utilizados, aplicando-se o erro médio (ME) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{est_i} - Y_{obs_i}) \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{est_i} - Y_{obs_i})^2} \quad (13)$$

em que ME é o erro médio ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), RMSE é a raiz do erro quadrático médio ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ),  $N$  é o número de observações,  $Y_{est_i}$  é o  $i$ -ésimo valor estimado ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e  $Y_{obs_i}$  o  $i$ -ésimo valor medido ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

O ME expressa o grau de exatidão do modelo e sua tendência de superestimar ( $ME > 0$ ), ou de subestimar ( $ME < 0$ ), os resultados em relação ao padrão observado. O RMSE também expressa a exatidão dos resultados, contudo os valores são sempre positivos. Os erros aleatórios foram avaliados pela correlação de Pearson ( $r$ ), sendo a raiz quadrada do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O valor de  $r$  é também relacionado à precisão das estimativas das PTFs, sendo maior a precisão quanto mais próximo de 1 for o resultado. Tendo como base o critério sugerido por More et al. (2017), o coeficiente de correlação  $r$  foi classificado como muito fraco ( $r < 0,30$ ), fraco ( $0,30 < r < 0,50$ ), moderado ( $0,50 < r < 0,70$ ) e forte ( $r > 0,70$ ).

Os valores de  $r$ , RMSE e ME foram utilizados para avaliação do desempenho nos processos de calibração e validação das PTFs. Valores de RMSE e ME que se aproximam da nulidade e valores de  $r$  que se aproximam da unidade indicam alto desempenho. Com base nos menores valores de RMSE da validação selecionaram-se as PTFs que apresentaram maior exatidão em cada grupo.

O conjunto de PTFs selecionado foi disposto graficamente apresentando uma ordem crescente dos valores de RMSE, acompanhados dos valores de ME e  $r$ . Em seguida, em cada solo ou classe textural foi selecionada do conjunto a PTF de maior exatidão, sendo essa disposta em gráfico 1:1 com os valores medidos e estimados e intervalo de confiança (IC) à 95 %.

**Tabela 2.** Descrição dos grupos de PTFs com suas identificações e equações para estimativa da permeabilidade hidráulica do solo saturado.

Grupo	Nomenclatura	ID	Tipo	Equações
1	Cosby et al. (1984)	1.1	Textural	$K_{sat} = A \cdot 10^{(-B+C \cdot \text{Areia} - D \cdot \text{Argila})}$
	Puckett et al. (1985)	1.2		$K_{sat} = A \cdot e^{(-B \cdot \text{Argila})}$
	Juliá et al. (2004)	1.3		$K_{sat} = A \cdot e^{(-B \cdot \text{Areia})}$

	PTF – LM <sup>ST</sup> - Textura	1.4		$\log(K_{sat}) = A + B \text{ Argila} + C \text{ Silte} + D \text{ Areia}$
2	PTF – L- $\rho_p$	2.1	Textura/ $\rho_p$	$\log(K_{sat}) = A + B \cdot \rho_p$
3	PTF – L- $\rho_b$ Jabro (1992)	3.1	Textural/ $\rho_p/\rho_b$	$\log(K_{sat}) = A + B \cdot \rho_b$
		3.2		$\log(K_{sat}) = A + B \log(\text{Silte}) + C \log(\text{Argila}) + D \rho_b$
4	PTF – L-C Vereecken et al. (1990)	4.1	Carbono orgânico	$\log(K_{sat}) = A + B \cdot \log(C)$
		4.2		$\log(K_{sat}) = A + B \log(\text{Argila}) + C \log(\text{Areia}) + D \log(\text{MO}) + E \rho_b$
5	PTF – LM <sup>ST</sup> - Química	5.1	Química	$\log(K_{sat}) = A + B \cdot \text{AQ1} + C \cdot \text{AQ2} + D \cdot \text{AQ3}$
6	PTF – LM <sup>ST</sup> - Física PTF – L- Macro PTF – L-RP <sub>10</sub> kPa PTF – L-RP <sub>33</sub> kPa Bolan et al. (1996)	6.1	Física/Estrutural	$\log(K_{sat}) = A + B \cdot \text{AF1} + C \cdot \text{AF2} + D \cdot \text{AF3}$
		6.2		$\log(K_{sat}) = A + B \cdot \text{Macro}$
		6.3		$\log(K_{sat}) = A + B \cdot \log(\text{RP}_{10\text{kPa}})$
		6.4		$\log(K_{sat}) = A + B \cdot \log(\text{RP}_{33\text{kPa}})$
		6.5		$K_{sat} = A \cdot e^{(B \cdot AD)}$
7	Ahuja et al. (1989)	7.1	Porosidade efetiva	$K_{sat} = A \cdot \epsilon_{10}^B$
		7.2		$K_{sat} = A \cdot \epsilon_{33}^B$
		7.3		$K_{sat} = A \cdot \epsilon_{100}^B$
8	Rawls et al. (1998)	8.1	Porosidade efetiva/Paramétrica	$K_{sat} = A \cdot \epsilon_{10}^{3-\lambda}$
		8.2		$K_{sat} = A \cdot \epsilon_{33}^{3-\lambda}$
		8.3		$K_{sat} = A \cdot \epsilon_{100}^{3-\lambda}$
	Guarracino (2007)	8.4		$K_{sat} = A \cdot \phi \cdot \alpha^2$
	Timlin et al. (1999)	8.5		$K_{sat} = A \cdot 10^{B \cdot \lambda} \cdot \epsilon_{33}^C$
9	PTF – LM <sup>ST</sup> - VG PTF – LM <sup>ST</sup> - BC PTF – LM <sup>ST</sup> - GG	9.1	Paramétrica	$\log(K_{sat}) = A + B\theta_s + C\theta_r + D \log(\alpha) + E(n)$
		9.2		$\log(K_{sat}) = A + B\theta_s + C\theta_r + D \log(h_b) + E\lambda$
		9.3		$\log(K_{sat}) = A + B\theta_s + C\theta_r + D \log(k) + E(p)$
10	PTF – L-K <sub>ear-10</sub> kPa PTF – L-K <sub>ear-33</sub> kPa	10.1	Relação $K_{ear}/K_{sat}$	$\log(K_{sat}) = A + B \cdot \log(K_{ear10})$
		10.2		$\log(K_{sat}) = A + B \cdot \log(K_{ear33})$

LM<sup>ST</sup>: regressão linear múltipla pelo método stepwise; L: regressão linear simples; A, B, C, D e E: parâmetros de ajustes dos modelos; AQ1, AQ2 e AQ3: atributos químicos; AF1, AF2 e AF3: atributos físicos; log: logaritmo na base 10; MO: % de matéria orgânica.

### 3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### *Avaliação e seleção das PTFs*

No horizonte A das classes de solos avaliadas (Tabela 3) as PTFs do grupo 1 que apresentaram melhores exatidões foram as PTFs com ID: 1.1; 1.2 e 1.3. Nas classes de solos CXvd–Ortigueira e LVdf–Londrina, as PTFs com ID: 1.2 ( $r = 0,92$ ) e 1.1 ( $r = 0,83$ ) apresentaram maior precisão e forte correlação. A PTF proposta por meio de uma regressão linear pelo método *stepwise* (PTF - ID:1.4) não compôs esse grupo. Em um banco de dados de

solos brasileiros e europeus Ottoni et al. (2019), observaram que a PTF linear com base nas frações texturais do solo apresentaram o pior desempenho em relação à outros modelos não lineares.

**Tabela 3.** PTFs ajustadas para  $K_{sat}$  que apresentaram melhor desempenho dos grupos 1 ao 5 nos horizontes A das classes de solos avaliadas no estado do Paraná.

Grupo	Classe de Solo	ID	PTFs	RMSE	ME	$r$
1	LVdf-STO	1.1	$K_{sat} = 5,340 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{(-0,600+0,001 \cdot Areia-0,001 \cdot Argila)}$	0,17	0,04	0,30 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	1.2	$K_{sat} = 2,451 \cdot 10^{-5} \cdot e^{(-1,794 \cdot 10^{-4} \cdot Argila)}$	0,98	0,00	0,00 <sup>**</sup>
	CXvd-ORT	1.2	$K_{sat} = 13,716 \cdot e^{(-0,512 \cdot Argila)}$	0,38	-0,01	0,92 <sup>*</sup>
	LVdf-LDR	1.1	$K_{sat} = 0,002 \cdot 10^{(2,535+0,021 \cdot Areia-0,050 \cdot Argila)}$	1,26	0,72	0,83 <sup>*</sup>
	RQ/PVAd-AMA	1.3	$K_{sat} = 4,495 \cdot 10^{-24} \cdot e^{(0,490 \cdot Areia)}$	0,40	-0,01	0,65 <sup>ns</sup>
	Muito Argilosa	1.1	$K_{sat} = 4,278 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{(-0,585+0,001 \cdot Areia-0,001 \cdot Argila)}$	1,08	0,48	0,23 <sup>ns</sup>
2	LVdf-STO	2.1	$\log(K_{sat}) = -3,195 - 3,300 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_p$	0,15	0,00	0,55 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	2.1	$\log(K_{sat}) = -31,502 - 0,013 \cdot \rho_p$	0,48	-0,03	0,87 <sup>*</sup>
	CXvd-ORT	2.1	$\log(K_{sat}) = -21,526 - 0,011 \cdot \rho_p$	0,93	0,00	0,24 <sup>ns</sup>
	LVdf-LDR	2.1	$\log(K_{sat}) = -94,593 - 0,031 \cdot \rho_p$	0,94	0,00	0,60 <sup>ns</sup>
	RQ/PVAd-AMA	2.1	$\log(K_{sat}) = -96,656 + 0,036 \cdot \rho_p$	0,42	0,00	0,61 <sup>ns</sup>
	Muito Argilosa	2.1	$\log(K_{sat}) = -1,375 + 0,001 \cdot \rho_p$	0,88	0,00	0,41 <sup>ns</sup>
3	LVdf-STO	3.1	$\log(K_{sat}) = -3,591 - 4,740 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_b$	0,15	0,00	0,55 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	3.2	$\log(K_{sat}) = -81,639 + 4,130 \cdot \log(Silte) + 42,973 \cdot \log(Argila) - 0,006 \cdot \rho_b$	0,18	0,00	0,98 <sup>**</sup>
	CXvd-ORT	3.2	$\log(K_{sat}) = 29,789 - 7,760 \log(Silte) - 14,085 \log(Argila) - 0,003 \rho_b$	0,05	0,00	1,00 <sup>**</sup>
	LVdf-LDR	3.1	$\log(K_{sat}) = 2,133 + 0,006 \rho_b$	0,55	0,00	0,88 <sup>*</sup>
	RQ/PVAd-AMA	3.1	$\log(K_{sat}) = 0,901 - 0,003 \rho_b$	0,33	0,00	0,79 <sup>ns</sup>
	Muito Argilosa	3.2	$\log(K_{sat}) = 0,644 - 2,404 \log(Silte) + 1,319 \log(Argila) - 0,004 \rho_b$	0,57	0,00	0,81 <sup>**</sup>
4	LVdf-STO	4.1	$\log(K_{sat}) = -5,027 + 0,610 \cdot \log(C)$	0,14	0,00	0,64 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	4.2	$\log(K_{sat}) = -13,093 + 13,509 \log(Argila) - 9,479 \log(Areia) + 2,537 \log(MO) - 0,006 \rho_b$	0,11	0,00	0,99 <sup>**</sup>
	CXvd-ORT	4.1	$\log(K_{sat}) = -9,980 + 3,386 \cdot \log(C)$	0,82	0,00	0,52 <sup>ns</sup>
	LVdf-LDR		$\log(K_{sat}) = -305,482 + 158,626 \log(Argila) + 3,188 \log(Areia) + 0,216 \log(MO) - 0,008 \rho_b$	0,24	0,00	0,98 <sup>**</sup>
	RQ/PVAd-AMA	-	-	-	-	-
	Muito Argilosa	4.2	$\log(K_{sat}) = -30,714 + 14,861 \log(Argila) + 2,227 \log(Areia) + 0,491 \log(MO) - 0,004 \rho_b$	0,43	0,00	0,90 <sup>**</sup>
5	LVdf-STO	-	-	-	-	-
	NVe-LEO	5.1	$\log(K_{sat}) = -16,744 + 1,797 \cdot pH(H_2O)$	0,26	0,00	0,96 <sup>**</sup>
	CXvd-ORT	5.1	$\log(K_{sat}) = -6,990 + 0,153 \cdot P$	0,32	0,00	0,94 <sup>**</sup>
	LVdf-LDR	5.1	$\log(K_{sat}) = -1,244 + 16,311 \cdot K$	0,54	0,00	0,89 <sup>*</sup>
	RQ/PVAd-AMA	-	-	-	-	-
	Muito Argilosa	-	-	-	-	-

\* e \*\*, valores significativos aos níveis de probabilidade de 0,05 e 0,01 respectivamente; <sup>ns</sup> valores não significativos pelo teste F.

Em relação ao grupo 2 há apenas a PTF-ID-2.1 com maior exatidão para o LVdf–Santa Tereza do Oeste, onde foram obtidos os menores valores de RMSE na calibração, enquanto que para o solo LVdf–Londrina encontraram-se os maiores valores e, portanto, a menor exatidão. Apesar da variável  $\rho_p$  ser pouco utilizada em PTFs, por ser uma característica do solo, ela pode ter influência sobre os valores de  $K_{sat}$  (Mesquita e Moraes, 2004).

No grupo 3, onde há PTFs que foram baseadas principalmente em  $\rho_b$ , a PTF-ID-3.2 (RMSE = 0,05, ME = 0,00 e  $r = 1,00$ ) do solo CXvd–Ortigueira apresentou maior exatidão e precisão nos dados de calibração dentre todas as PTFs apresentadas no horizonte A das classes de solos avaliadas. Essa PTF foi calibrada com base no modelo de Jabro (1992). Avaliando o modelo com seus parâmetros na forma original, em um banco de dados composto por 19.480 amostras de solos norte-americanos, Ghanbarian et al. (2017) relataram RMSE = 1,08 e ME = 0,57.

Duas PTFs foram propostas para o grupo 4, sendo que os solos LVdf–Santa Tereza do Oeste e CXvd–Ortigueira a PTF-ID-4.1 apresentaram maior exatidão, havendo aumento nos valores de  $K_{sat}$  com o acréscimo de  $C$ . As demais classes tiveram a PTF-ID-4.2 com maior exatidão na estimativa. O modelo foi proposto por Vereecken et al. (1990), que foi originalmente calibrado para solos europeus para estimar a constante  $K_{sat}$  utilizando como variáveis preditoras: *argila*, *areia*,  $MO$  e  $\rho_b$ . Este modelo apresentou maior precisão em relação a PTF-ID-4.1 com índices de correlação classificados como forte. Possivelmente tal fato se deve ao modelo possuir mais variáveis de entrada.

Os conteúdos de  $C$  ou de  $MO$  do solo tem sido constantemente inseridos como variáveis de entrada em PTFs para predição de  $K_{sat}$  (Vereecken et al., 1990; Jabro, 1992; Wösten et al., 1999). A qualidade da matéria orgânica pode afetar  $K_{sat}$ , obstruindo poros do solo (Nemes et al., 2005).

O grupo 5 foi composto por apenas uma PTF (PTF-ID-5.1), no entanto foi possível realizar seu desenvolvimento apenas para as classes de solos onde houve variáveis químicas significativas. Essa PTF apresentou a maior exatidão e precisão para o solo NVe–Leópolis, entre as classes avaliadas, onde os acréscimos nos valores de  $pH$  ( $H_2O$ ) promoveram aumentos nos valores de  $K_{sat}$ .

Entretanto, principalmente em solos cultivados, o uso da calagem pode acelerar o processo de dispersão de argila, aumentando a camada dupla difusa e reduzindo o conteúdo de  $C$  do solo, conseqüentemente assim reduzindo  $K_{sat}$  (Spera et al., 2008). Porém, a ação dos

corretivos da acidez do solo em longo prazo pode favorecer a atividade de microrganismos os quais degradam a matéria orgânica, que passa a produzir agentes cimentantes como os polissacarídeos contribuindo para a agregação do solo (Castro Filho e Logan, 1991).

Na classe de solo CXvd–Ortigueira os conteúdos de  $P$  influenciaram de forma positiva os valores de  $K_{sat}$ . Avaliando os efeitos do carvão vegetal e de fertilizantes fosfatados em solos egípcios, Ibrahim et al. (2019) observaram aumentos nos valores de  $K_{sat}$  com a aplicação conjunta desses tratamentos. Em dois solos do estado de Minas Gerais, Silva et al. (2003) constaram que a aplicação de fosfato, tornou os solos mais sujeitos à compactação.

Para o solo LVdf–Londrina a PTF-5.1 apresentou menor exatidão e precisão entre as classes de solos avaliadas. Nesse solo os incrementos nos valores  $K$  proporcionaram uma redução em  $K_{sat}$ . O íon  $K^+$ , por se tratar de um cátion monovalente, tem a característica de promover a dispersão das partículas de argila, assim como o sódio, provocando redução do espaço poroso do solo e, por sua vez, sua permeabilidade (Uyeda et al., 2013).

Em relação ao horizonte A dos solos avaliados, o grupo 6 foi composto por PTFs com variáveis físicas relacionadas a estrutura do solo (Tabela 4). Em três das seis classes de solos avaliadas a PTF-ID-6.2 foi a de maior exatidão, sendo obtida por regressão linear e tendo a macroporosidade como variável independente. A maior precisão deste grupo também foi observada na PTF-ID-6.2 ( $r = 0,90$ ) no solo NVe–Leópolis. Avaliando o desempenho de PTFs para estimativa do  $\log(K_{sat})$  em solos do estado norte-americano do Kentucky, Zhang et al. (2019) observaram que as PTFs foram significativamente melhoradas com a inclusão da macroporosidade (poros com diâmetro  $> 75 \mu\text{m}$ ) como um preditor.

O grupo 7 é composto de três PTFs baseadas no modelo de Ahuja et al. (1984) que relacionam a porosidade efetiva do solo ( $\varepsilon$ ) de forma potencial com os valores de  $K_{sat}$ . Nos solos NVe–Leópolis, CXvd–Ortigueira e LVdf–Londrina, a PTF-ID-7.3 foi a de maior exatidão e apresentou precisão forte ( $r = 0,89, 0,93$  e  $0,94$ ). Para o solo RQ/PVAd–Amaporã, e a classe de textura muito argilosa, a PTF-ID-7.2 foi a que apresentou maior exatidão, com suas precisões (correlações) sendo consideradas fortes ( $r = 0,74$  e  $0,85$ ). A PTF-ID-7.1 se destacou com maior exatidão apenas na classe de solo LVdf–Santa Tereza do Oeste, no entanto ela apresentou a menor precisão entre as PTFs do grupo apresentando fraca correlação aos dados medidos ( $r = 0,46$ ).

Utilizando um banco de dados de solos brasileiros, Tomasella e Hodnett (1997) recalibraram o modelo de Ahuja et al. (1984) e obtiveram bons resultados na estimativa de  $K_{sat}$ . Os autores destacam ainda que a recalibração do modelo aprimorou os resultados em relação a

utilização dos parâmetros originais, visto que o modelo de Ahuja et al. (1984) foi ajustado para solos norte-americanos.

**Tabela 4.** PTFs ajustadas para  $K_{sat}$  que apresentaram melhor desempenho dos grupos 6 ao 10 nos horizontes A das classes de solos avaliadas no estado do Paraná.

Grupo	Classe de Solo	ID	PTFs	RMSE	ME	$r$
6	LVdf-STO	6.2	$\log(K_{sat}) = -4,367 + 2,238 \cdot Macro$	0,16	0,00	0,44 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	6.2	$\log(K_{sat}) = -6,430 + 11,894 \cdot Macro$	0,43	0,00	0,90*
	CXvd-ORT	6.5	$\log(K_{sat}) = -0,007 \cdot e^{(-1,013 \cdot AD)}$	0,59	-0,01	0,78 <sup>ns</sup>
	LVdf-LDR	6.3	$\log(K_{sat}) = -3,921 - 5,770 \log[RP(-10kPa)]$	0,72	0,00	0,79 <sup>ns</sup>
	RQ/PVAd-AMA	6.2	$\log(K_{sat}) = -5,118 + 4,083 \cdot Macro$	0,31	0,00	0,81 <sup>ns</sup>
	Muito Argilosa	6.1	$\log(K_{sat}) = -4,448 - 0,001\rho_b + 8,062Macro$	0,48	0,00	0,87**
7	LVdf-STO	7.1	$K_{sat} = 0,001 \cdot \varepsilon_{10}^{1,425}$	0,16	0,00	0,46 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	7.3	$K_{sat} = 0,012 \cdot \varepsilon_{100}^{3,885}$	0,44	0,00	0,89*
	CXvd-ORT	7.3	$K_{sat} = 0,001 \cdot \varepsilon_{100}^{3,580}$	0,35	0,02	0,93**
	LVdf-LDR	7.3	$K_{sat} = 0,170 \cdot \varepsilon_{100}^{6,500}$	0,40	0,00	0,94**
	RQ/PVAd-AMA	7.2	$K_{sat} = 0,001 \cdot \varepsilon_{33}^{2,251}$	0,36	0,01	0,74 <sup>ns</sup>
	Muito Argilosa	7.2	$K_{sat} = 0,011 \cdot \varepsilon_{33}^{3,794}$	0,51	0,00	0,85**
8	LVdf-STO	8.5	$K_{sat} = 2,079 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{0,367 \cdot \lambda} \cdot \varepsilon_{33}^{0,503}$	0,18	0,03	0,17 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	8.2	$K_{sat} = 0,005 \cdot \varepsilon_{33}^{3-\lambda}$	0,54	0,27	0,88*
	CXvd-ORT	8.2	$K_{sat} = 0,001 \cdot \varepsilon_{33}^{3-\lambda}$	0,38	0,10	0,93**
	LVdf-LDR	8.5	$K_{sat} = 1,826 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{0,316 \cdot \lambda} \cdot \varepsilon_{33}^{0,516}$	1,08	0,65	0,96**
	RQ/PVAd-AMA	8.5	$K_{sat} = 1,186 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{0,235 \cdot \lambda} \cdot \varepsilon_{33}^{0,644}$	0,50	0,12	0,46 <sup>ns</sup>
	Muito Argilosa	8.1	$K_{sat} = 0,009 \cdot \varepsilon_{10}^{3-\lambda}$	0,72	0,46	0,82**
9	LVdf-STO	-	-	-	-	-
	NVe-LEO	9.1	$\log(K_{sat}) = -14,325 + 16,500 \cdot \theta_s$	0,38	0,00	0,92**
	CXvd-ORT	9.2	$\log(K_{sat}) = -12,390 + 13,195 \cdot \theta_s$	0,14	0,00	0,99**
	LVdf-LDR	9.3	$\log(K_{sat}) = -7,970 + 5,390 \cdot (p)$	0,43	0,00	0,93**
	RQ/PVAd-AMA	9.1	$\log(K_{sat}) = -3,685 + 1,485 \cdot \log(\alpha)$	0,23	0,00	0,90*
	Muito Argilosa	9.2	$\log(K_{sat}) = -6,614 + 5,157 \cdot \lambda$	0,50	0,00	0,85**
10	LVdf-STO	10.1	$\log(K_{sat}) = -4,878 + 0,706 \cdot \log(K_{ear10})$	0,16	0,00	0,42 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	10.2	$\log(K_{sat}) = -5,556 + 1,385 \cdot \log(K_{ear33})$	0,38	0,00	0,92**
	CXvd-ORT	10.1	$\log(K_{sat}) = -6,857 + 2,238 \cdot \log(K_{ear10})$	0,51	0,00	0,84*
	LVdf-LDR	10.2	$\log(K_{sat}) = -6,560 + 1,568 \cdot \log(K_{ear33})$	0,11	0,00	0,99**
	RQ/PVAd-AMA	10.1	$\log(K_{sat}) = -5,260 + 0,711 \cdot \log(K_{ear10})$	0,24	0,00	0,89*
	Muito Argilosa	10.2	$\log(K_{sat}) = -5,867 + 1,391 \cdot \log(K_{ear33})$	0,44	0,00	0,89**

\* e \*\*, valores significativos aos níveis de probabilidade de 0,05 e 0,01 respectivamente; <sup>ns</sup> valores não significativos pelo teste F.

No grupo 8 as PTFs baseadas no modelo de Rawls et al. (1998) apresentaram maiores exatidões para os solos NVe–Leópolis (PTF-ID-8.2), CXvd–Ortigueira (PTF-ID-8.2) e de

textura muito argilosa (PTF-ID-8.1). A precisão dessas PTFs variou de acordo com o índice de correlação sendo classificadas como fortes ( $r = 0,88, 0,93$  e  $0,82$ ). Nas demais classes de solos a PTF-ID-8.5 foi a de maior exatidão, no entanto a precisão desta PTF teve uma grande amplitude, classificada como muito fraca no solo LVdf–Santa Tereza do Oeste ( $r = 0,17$ ) e forte no LVdf–Londrina ( $r = 0,96$ ). Esta PTF é baseada no modelo de Timlin et al. (1999), que observaram que a inclusão do parâmetro  $\lambda$  da equação de BC melhorou as predições de  $K_{sat}$  em relação à quando utilizaram somente a porosidade efetiva.

As PTFs do grupo 9 foram desenvolvidas utilizando os parâmetros dos modelos da CRAS. Apesar de alguns parâmetros não possuírem significado físico, os mesmos foram importantes para predição da  $K_{sat}$ . Observou-se para o solo CXvd–Ortigueira que a PTF-ID-9.2 (RMSE = 0,14, ME = 0,00 e  $r = 0,99$ ) proporcionou a maior exatidão e precisão deste grupo de PTFs.

Utilizando os valores de  $K_{ear}$  medidos em dois potenciais matriciais (-10 e -33 kPa), observa-se que nas classes de solos LVdf–Santa Tereza do Oeste, CXvd–Ortigueira e RQ/PVAd–Amaporã que a PTF-ID-10.1 foi a que apresentou a melhor exatidão na estimativa de  $K_{sat}$ . A menor precisão neste grupo ocorreu com a PTF-ID-10.1 ( $r = 0,42$ ) para o solo LVdf–Santa Tereza do Oeste, já para os demais solos a precisão foi classificada como forte. Iversen et al. (2001) encontraram correlações variando de muito fraca a forte, entre o  $\log(K_{sat})$  e o  $\log(K_{ear})$  medida no potencial matricial de -5 kPa. Em diferentes horizontes e manejos de classes de solos dinamarqueses e noruegueses, Loll et al. (1999) obtiveram correlações moderadas a forte entre  $\log(K_{sat})$  e  $\log(K_{ear})$  medida em -10 kPa.

No horizonte B das classes de solos avaliadas neste estudo, observa-se que na estimativa dos valores de  $K_{sat}$  (Tabela 5) por meio das frações texturais (argila, silte e areia) a PTF-ID-1.4 (RMSE = 0,12, ME = 0,00 e  $r = 0,97$ ) para o solo RQ/PVAd–Amaporã apresentou a maior exatidão e precisão nos dados calibração do grupo 1 de PTFs. Nessa PTF os incrementos nos conteúdos de argila causaram uma redução do  $\log(K_{sat})$  devido ao fato, principalmente, do Argissolo apresentar um incremento natural de argila em seu horizonte Bt.

Em medidas de campo de  $K_{sat}$  em diferentes solos dos estados do Rio de Janeiro e Santa Catarina, Bielschowsky et al. (2012) observaram, principalmente em um Argissolo, que acréscimos das frações de argila e silte do solo resultaram em menores valores de  $K_{sat}$  e um maior CV.

Composta de apenas uma PTF o grupo 2 indicou que os acréscimos nos valores  $\rho_p$  reduziram  $K_{sat}$ . Em horizontes mais profundos dos solos, os valores de  $\rho_p$  tendem a ser mais



constantes, por não haver influência principalmente do carbono orgânico. A redução nos valores de  $\rho_p$  reflete na redução da porosidade total para uma mesma densidade do solo, podendo assim influenciar nos valores de  $K_{sat}$ .

**Tabela 5.** PTFs ajustadas para  $K_{sat}$  que apresentaram melhor desempenho dos grupos 1 ao 5 nos horizontes B das classes de solos avaliadas no estado do Paraná.

Grupo	Classe de Solo	ID	PTFs	RMSE	ME	$r$
1	LVdf-STO	1.2	$K_{sat} = 0,007 \cdot e^{(-0,062 \cdot Argila)}$	0,59	0,00	0,63 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	1.2	$K_{sat} = 1,100 \cdot 10^7 e^{(-0,342 \cdot Argila)}$	0,42	0,05	0,95**
	CXvd-ORT	1.1	$K_{sat} = 2,346 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{(-1,580+0,002 \cdot Areia-0,004 \cdot Argila)}$	0,87	0,48	0,17 <sup>ns</sup>
	LVdf-LDR	1.3	$K_{sat} = 5,927 \cdot 10^{-6} \cdot e^{(0,267 \cdot Areia)}$	0,63	0,00	0,28 <sup>ns</sup>
	RQ/PVAd-AMA	1.4	$\log(K_{sat}) = -3,036 - 0,096 \cdot Argila$	0,12	0,00	0,97**
	Muito Argilosa	1.4	$\log(K_{sat}) = -7,042 - 0,227 \cdot Silte$	0,57	0,00	0,85**
2	LVdf-STO	2.1	$\log(K_{sat}) = -0,351 - 0,002 \cdot \rho_p$	0,55	0,00	0,69 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	2.1	$\log(K_{sat}) = 55,596 - 0,021 \cdot \rho_p$	1,06	0,00	0,61 <sup>ns</sup>
	CXvd-ORT	2.1	$\log(K_{sat}) = -26,439 - 0,008 \cdot \rho_p$	0,29	0,00	0,92**
	LVdf-LDR	2.1	$\log(K_{sat}) = -81,978 - 0,026 \cdot \rho_p$	0,51	0,00	0,62 <sup>ns</sup>
	RQ/PVAd-AMA	2.1	$\log(K_{sat}) = -0,339 - 0,002 \cdot \rho_p$	0,47	0,00	0,02 <sup>ns</sup>
	Muito Argilosa	2.1	$\log(K_{sat}) = -0,476 - 0,002 \cdot \rho_p$	0,94	0,00	0,47*
3	LVdf-STO	3.1	$\log(K_{sat}) = -2,381 - 0,002 \cdot \rho_p$	0,39	0,10	0,87*
	NVe-LEO	3.2	$\log(K_{sat}) = 10,109 + 0,058 \cdot \log(Silte) - 3,903 \cdot \log(Argila) - 0,006 \cdot \rho_b$	0,17	0,00	0,99**
	CXvd-ORT	3.1	$\log(K_{sat}) = -1,570 - 0,006 \cdot \rho_b$	0,40	0,00	0,84**
	LVdf-LDR	3.1	$\log(K_{sat}) = 5,823 - 0,010 \cdot \rho_b$	0,55	0,00	0,55 <sup>ns</sup>
	RQ/PVAd-AMA	3.2	$\log(K_{sat}) = 20,579 + 2,752 \cdot \log(Silte) - 7,338 \cdot \log(Argila) - 0,011 \cdot \rho_b$	0,02	0,00	1,00**
	Muito Argilosa	3.2	$\log(K_{sat}) = 5,139 + 1,430 \cdot \log(Silte) + 0,681 \cdot \log(Argila) - 0,002 \cdot \rho_b$	0,57	0,00	0,85**
4	LVdf-STO	4.1	$\log(K_{sat}) = -5,959 - 1,346 \cdot \log(C)$	0,52	0,00	0,73 <sup>ns</sup>
	NVe-LEO	4.1	$\log(K_{sat}) = -10,257 + 5,028 \cdot \log(C)$	0,39	0,00	0,96**
	CXvd-ORT	4.1	$\log(K_{sat}) = -3,160 + 2,186 \cdot \log(C)$	0,27	0,00	0,93**
	LVdf-LDR	4.1	$\log(K_{sat}) = -7,344 + 2,756 \cdot \log(C)$	0,53	0,00	0,57 <sup>ns</sup>
	RQ/PVAd-AMA	-	-	-	-	-
	Muito Argilosa	4.2	$\log(K_{sat}) = -27,178 + 12,246 \log(Argila) + 0,130 \log(Areia) + 3,635 \log(MO) - 0,002 \rho_b$	0,52	0,00	0,88**
5	LVdf-STO	5.1	$\log(K_{sat}) = -3,129 - 0,045 \cdot V(\%)$	0,25	0,01	0,94**
	NVe-LEO	5.1	$\log(K_{sat}) = -13,274 + 0,236C - 5,551\Delta pH$	0,16	0,00	0,99**
	CXvd-ORT	5.1	$\log(K_{sat}) = -8,315 - 3,188 \cdot \Delta pH$	0,13	0,00	0,98**
	LVdf-LDR	-	-	-	-	-
	RQ/PVAd-AMA	-	-	-	-	-
	Muito Argilosa	5.1	$\log(K_{sat}) = -5,701 + 0,157 \cdot (H + Al)$	0,94	0,00	0,47*

\* e \*\*, valores significativos aos níveis de probabilidade de 0,05 e 0,01 respectivamente; <sup>ns</sup> valores não significativos pelo teste F.

No grupo 3 das classes de solos do horizonte B a PTF-ID-3.2 (RMSE = 0,02, ME = 0,00 e  $r = 1,00$ ) do solo RQ/PVAd–Amaporã apresentou a maior exatidão e precisão dos dados de calibração entre todas as PTFs avaliadas neste horizonte. O aumento da  $\rho_b$  em horizontes mais profundos é característico pelo adensamento dos horizontes superficiais, podendo haver uma redução em  $K_{sat}$ . Bathke e Cassel (1991) associaram a redução da  $K_{sat}$  ao longo do perfil de diferentes solos ao aumento dos valores de  $\rho_b$  e  $\phi$ , teor de argila e redução da macroporosidade.

A PTF-ID-4.1 foi a principal em cinco das seis classes de solos avaliadas ao longo do grupo 4. Somente no solo LVdf–Santa Tereza do Oeste que os conteúdos de  $C$  refletiram de forma negativa nos valores de  $K_{sat}$ . A matéria orgânica é inversamente correlacionada com  $K_{sat}$ , podendo elevá-la por meio da melhoria da agregação do solo, ou reduzindo, devido a uma baixa molhabilidade derivada da presença de matéria orgânica (Ellerbrock et al., 2005).

A variável química  $\Delta pH$  do grupo 5 para o horizonte B dos solos avaliados integrou a PTF-ID-5.1 dos solos NVe–Leópolis e CXvd–Ortigueira como variável independente. Com o distanciamento entre  $\Delta pH$  e PCZ prevalecerem as forças de repulsão sobre as de aproximação das partículas, resultando em menor grau de floculação. Em um Latossolo argiloso de Londrina, Araujo-Junior et al. (2020) observaram um aumento da dispersão da argila quando o solo se tornou mais eletronegativo.

As variáveis *macro*,  $AD$ ,  $RP(-10\text{ kPa})$  e  $RP(-33\text{ kPa})$  integraram as principais PTFs do grupo 6 do horizonte B das classes de avaliadas (Tabela 6). A macroporosidade interconectada é um caminho preferencial ao fluxo de água no perfil do solo, devido especialmente a força gravitacional (Soares et al., 2020).

Quanto a  $AD$ , a redução dos valores de  $K_{sat}$  está relacionada a obstrução dos poros do solo, devido à dispersão de argilas (Spera et al., 2008). Práticas como a calagem e a aplicação de fertilizantes orgânicos, além da eletroquímica dos argilominerais do solo, atuam indiretamente na redução da  $K_{sat}$ , devido a alteração nas cargas variáveis do solo que promove a dispersão de argila (Roth e Pavan, 1991; Cherobim et al., 2018; Bennett et al., 2019).

Já o aumento dos níveis de compactação do solo refletem no aumento de  $\rho_b$  e  $RP$  e, consequentemente, causam redução em  $K_{sat}$  (Keller et al., 2019). Avaliando a compactação de dois Latossolos, Millan et al. (2014) observaram que com o aumento do índice de compactação do solo houve redução nos valores de  $K_{sat}$  e macroporosidade.

**Tabela 6.** PTFs ajustadas para  $K_{sat}$  que apresentaram melhor desempenho dos grupos 6 ao 10 nos horizontes B das classes de solos avaliadas no estado do Paraná.

Grupo	Classe de Solo	ID	PTFs	RMSE	ME	$r$
6	LVdf-STO	6.2	$\log(K_{sat}) = -5,325 + 7,000 \cdot Macro$	0,36	0,00	0,88**
	NVe-LEO	6.2	$\log(K_{sat}) = -7,039 + 15,872 \cdot Macro$	0,20	0,00	0,99**
	CXvd-ORT	6.2	$\log(K_{sat}) = -6,812 + 12,746 \cdot Macro$	0,37	0,00	0,86*
	LVdf-LDR	6.5	$K_{sat} = 7,903 \cdot 10^{-6} \cdot e^{(0,083 \cdot AD)}$	0,52	0,00	0,61 <sup>ns</sup>
	RQ/PVAd-AMA	6.4	$\log(K_{sat}) = -2,425 - 2,425 \log[RP(-33kPa)]$	0,28	0,00	0,80 <sup>ns</sup>
	Muito Argilosa	6.3	$\log(K_{sat}) = -4,591 - 2,330 \log[RP(-10kPa)]$	0,82	0,00	0,64**
7	LVdf-STO	7.2	$K_{sat} = 0,036 \cdot \varepsilon_{33}^{4,324}$	0,42	0,00	0,83*
	NVe-LEO	7.3	$K_{sat} = 0,007 \cdot \varepsilon_{100}^{3,342}$	0,19	0,00	0,99**
	CXvd-ORT	7.3	$K_{sat} = 4,003 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon_{100}^{2,949}$	0,29	-0,03	0,92**
	LVdf-LDR	7.1	$K_{sat} = 4,701 \cdot \varepsilon_{10}^{8,709}$	0,21	0,00	0,95**
	RQ/PVAd-AMA	7.2	$K_{sat} = 15,300 \cdot \varepsilon_{33}^{9,574}$	0,08	0,00	0,99**
	Muito Argilosa	7.3	$K_{sat} = 0,002 \cdot \varepsilon_{100}^{2,992}$	0,56	-0,01	0,85**
8	LVdf-STO	8.4	$K_{sat} = 3,645 \cdot 10^{-4} \cdot \phi \cdot \alpha^2$	0,32	-0,06	0,91*
	NVe-LEO	8.2	$K_{sat} = 0,006 \cdot \varepsilon_{33}^{3,\lambda}$	0,35	0,28	0,99**
	CXvd-ORT	8.5	$K_{sat} = 1,365 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{0,914 \cdot \lambda} \cdot \varepsilon_{33}^{1,877}$	0,25	0,00	0,94**
	LVdf-LDR	8.5	$K_{sat} = 2,126 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{0,383 \cdot \lambda} \cdot \varepsilon_{33}^{1,308}$	0,57	0,30	0,87*
	RQ/PVAd-AMA	8.5	$K_{sat} = 7,728 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{2,047 \cdot \lambda} \cdot \varepsilon_{33}^{5,485}$	0,10	0,06	0,99**
	Muito Argilosa	8.2	$K_{sat} = 0,002 \cdot \varepsilon_{33}^{3,\lambda}$	0,53	0,07	0,88**
9	LVdf-STO	9.3	$\log(K_{sat}) = -5,852 - 7,566\theta_r - 1,919 \log(k)$	0,06	0,00	1,00**
	NVe-LEO	9.1	$\log(K_{sat}) = -24,332 + 33,216 \cdot \theta_s$	0,18	0,00	0,99**
	CXvd-ORT	9.2	$\log(K_{sat}) = -7,141 + 14,321 \cdot \lambda$	0,23	0,00	0,95**
	LVdf-LDR	-	-	-	-	-
	RQ/PVAd-AMA	9.3	$\log(K_{sat}) = -2,849 + 16,398 \cdot \theta_r$	0,05	0,00	0,99**
	Muito Argilosa	9.3	$\log(K_{sat}) = -10,774 + 7,367\theta_s + 2,327p$	0,43	0,00	0,92**
10	LVdf-STO	10.2	$\log(K_{sat}) = -6,184 + 1,926 \cdot \log(K_{ear33})$	0,22	0,00	0,96**
	NVe-LEO	10.2	$\log(K_{sat}) = -5,984 + 1,213 \cdot \log(K_{ear33})$	0,81	0,00	0,80 <sup>ns</sup>
	CXvd-ORT	10.1	$\log(K_{sat}) = -6,237 + 1,439 \cdot \log(K_{ear10})$	0,45	0,00	0,79 <sup>ns</sup>
	LVdf-LDR	10.2	$\log(K_{sat}) = -5,455 + 0,881 \cdot \log(K_{ear33})$	0,25	0,00	0,92**
	RQ/PVAd-AMA	10.1	$\log(K_{sat}) = -6,872 + 1,953 \cdot \log(K_{ear10})$	0,19	0,00	0,91*
	Muito Argilosa	10.2	$\log(K_{sat}) = -5,759 + 1,267 \cdot \log(K_{ear33})$	0,59	0,00	0,84**

\* e \*\*, valores significativos aos níveis de probabilidade de 0,05 e 0,01 respectivamente; <sup>ns</sup> valores não significativos pelo teste F.

No grupo 7 utilizando os valores da porosidade efetiva medida em diferentes potencias matriciais, observa-se que a precisão dessas PTFs foi classificada como forte ( $0,83 < r < 0,99$ ). A PTF-ID-7.2 (RMSE = 0,08, ME = 0,00 e  $r = 0,99$ ) para o solo RQ/PVAd–Amaporã apresentou a maior exatidão e precisão entre todas as classes de solos neste grupo de PTFs. Em um conjunto de solos europeus e brasileiros, Ottoni et al. (2019) avaliaram diferentes PTFs e constataram maior efetividade na PTF que utilizou a  $\varepsilon(-33 kPa)$ .

A inserção dos parâmetros da CRAS em PTFs para estimar os valores de  $K_{sat}$  resultaram em diferentes PTFs dos grupos 8 e 9. Rawls et al. (1998) redefiniu o expoente  $(3-\lambda)$  do modelo de Ahuja et al. (1984) podendo-se atribuir um sentido físico ao parâmetro  $\lambda$  do modelo de BC de índice de distribuição de tamanho de poro. Enquanto Guarracino (2007) utilizou o parâmetro  $\alpha$  em um modelo quadrático para estimativa de  $K_{sat}$ .

Por fim, no grupo 10 utilizando a medida de  $K_{ear}$  em dois potenciais matriciais observa-se que a utilização da PTF-ID-10.2 apresentou-se superior a PTF-ID-10.1 em quatro classes de solos. De acordo com Loll et al. (1999), a predição do  $\log(K_{sat})$  por meio do  $\log[K_{ear}(-10\text{ kPa})]$  é uma ferramenta útil e com boa precisão. Os autores testaram esse modelo em solos dinamarqueses e noruegueses obtendo bom desempenho, quando estabeleceram um modelo para cada solo e também para todo o conjunto de dados que incluíram 1.614 amostras.

#### *Desempenho das PTFs*

O ranqueamento das PTFs foi realizado com base na exatidão de acordo com os valores de RMSE e ME. Observa-se que as PTFs fundamentadas em variáveis físicas relacionadas a estrutura do solo (grupo 6) tiveram a melhor exatidão para os solos LVdf–Santa Tereza do Oeste, LVdf–Londrina e RQ/PVAd–Amaporã (Tabela 7). Para os solos NVe–Leópolis, CXvd–Ortigueira e de textura muito argilosa as PTFs com ID: 8.2; 4.1 e 7.2 foram as que apresentaram maior exatidão.

Pelo desempenho das PTFs verifica-se que as baseadas em características do solo como textura e  $\rho_p$  (grupos 1 e 2) tiveram em grande parte a pior precisão e exatidão na validação das PTFs para estimar  $K_{sat}$  dos solos avaliados. Em uma ampla revisão sobre as PTFs para estimar  $K_{sat}$ , Zhang e Schaap (2019) sugeriram além de método e protocolos consistentes para medidas, que a seleção de preditores relevantes como estrutura do solo deve ser incluída no desenvolvimento das PTFs.

A PTF-ID-6.2 (RMSE = 0,15 e ME = 0,03) para o solo RQ/PVAd–Amaporã e a PTF-ID-6.3 (RMSE = 0,57; ME = -0,23) para a classe LVdf–Londrina apresentaram, respectivamente, a maior e menor exatidão. Quanto ao ranqueamento da precisão, observou-se precisão muito fraca ( $r = 0,25$ ) para as PTFs avaliadas para o solo LVdf–Santa Tereza do Oeste, nos demais solos a precisão foi forte ( $0,87 < r < 0,98$ ). Para um banco de dados de solos alemães, Tietje e Hennings (1996) observaram que as PTFs para estimar  $K_{sat}$  foram mais imprecisas em solos de textura argilosa e mais precisas em arenosos.

**Tabela 7.** Ranqueamento das PTFs de acordo com os valores de RMSE e seus respectivos valores de ME e  $r$  para permeabilidade hidráulica do solo saturado do horizonte A das classes de solos.

Erros	LVdf- Santa Tereza do Oeste									
	PTFs									
	6.2	7.1	8.5	1.1	10.1	3.1	2.1	4.1	6.2	
RMSE	0,26	0,27	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,26	
ME	-0,07	-0,04	0,01	-0,17	-0,18	-0,20	-0,24	-0,26	-0,07	
$r$	0,25 <sup>ns</sup>	-0,18 <sup>ns</sup>	-0,57 <sup>ns</sup>	-0,21 <sup>ns</sup>	-0,63 <sup>ns</sup>	-0,21 <sup>ns</sup>	-0,10 <sup>ns</sup>	-0,14 <sup>ns</sup>	0,25 <sup>ns</sup>	
	NVe - Leopólis									
	PTFs									
	8.2	7.3	10.2	9.1	6.2	3.2	4.2	5.1	1.2	2.1
RMSE	0,49	0,51	0,56	0,56	0,60	0,62	0,90	1,09	1,27	1,47
ME	0,06	-0,18	0,29	-0,26	-0,09	-0,08	0,01	-0,22	-0,16	0,01
$r$	0,97 <sup>**</sup>	0,96 <sup>**</sup>	0,98 <sup>**</sup>	0,92 <sup>**</sup>	0,88 <sup>*</sup>	0,88 <sup>*</sup>	0,81 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>
	CXvd - Ortigueira									
	PTFs									
	4.1	7.3	8.2	5.1	6.5	10.1	3.2	2.1	9.2	1.2
RMSE	0,23	0,42	0,45	0,46	0,47	0,49	0,51	0,60	0,61	0,79
ME	0,17	0,14	0,16	-0,08	0,42	-0,44	0,29	0,38	0,01	0,50
$r$	0,98 <sup>**</sup>	0,89 <sup>*</sup>	0,87 <sup>*</sup>	0,80 <sup>ns</sup>	0,98 <sup>**</sup>	0,96 <sup>**</sup>	0,83 <sup>*</sup>	0,90 <sup>*</sup>	0,65 <sup>ns</sup>	0,83 <sup>*</sup>
	LVdf - Londrina									
	PTFs									
	6.3	3.1	8.5	7.3	4.2	10.2	1.1	9.3	5.1	2.1
RMSE	0,57	0,64	0,67	0,73	0,84	0,89	0,91	1,18	1,71	2,13
ME	-0,23	-0,43	0,19	-0,25	-0,40	-0,55	0,31	-0,90	-1,12	0,02
$r$	0,87 <sup>*</sup>	0,92 <sup>**</sup>	0,91 <sup>ns</sup>	0,86 <sup>*</sup>	0,63 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>**</sup>	0,37 <sup>ns</sup>	0,66 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>
	RQ/PVAd - Amaporã									
	PTFs									
	6.2	7.2	9.1	10.1	3.1	1.3	8.5	2.1		
RMSE	0,15	0,22	0,22	0,22	0,26	0,33	0,37	0,76		
ME	0,03	0,01	0,13	0,09	0,13	-0,03	0,11	-0,59		
$r$	0,97 <sup>**</sup>	0,91 <sup>*</sup>	0,95 <sup>**</sup>	0,92 <sup>**</sup>	0,94 <sup>**</sup>	0,88 <sup>*</sup>	0,80 <sup>ns</sup>	0,50 <sup>ns</sup>		
	Classe muito argilosa									
	PTFs									
	7.2	10.2	8.1	6.1	4.2	3.2	9.2	2.1	1.1	
RMSE	0,46	0,52	0,56	0,58	0,66	0,67	0,85	0,95	0,99	
ME	-0,11	-0,14	0,34	-0,04	-0,22	-0,23	-0,21	-0,31	0,22	
$r$	0,89 <sup>**</sup>	0,86 <sup>**</sup>	0,89 <sup>**</sup>	0,85 <sup>**</sup>	0,79 <sup>**</sup>	0,77 <sup>**</sup>	0,68 <sup>**</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	

RMSE:  $\log(K_{\text{sat}} \text{ m s}^{-1})$ ; \* e \*\*, valores significativos aos níveis de probabilidade de 0,05 e 0,01 respectivamente; <sup>ns</sup> valores não significativos pelo teste F.

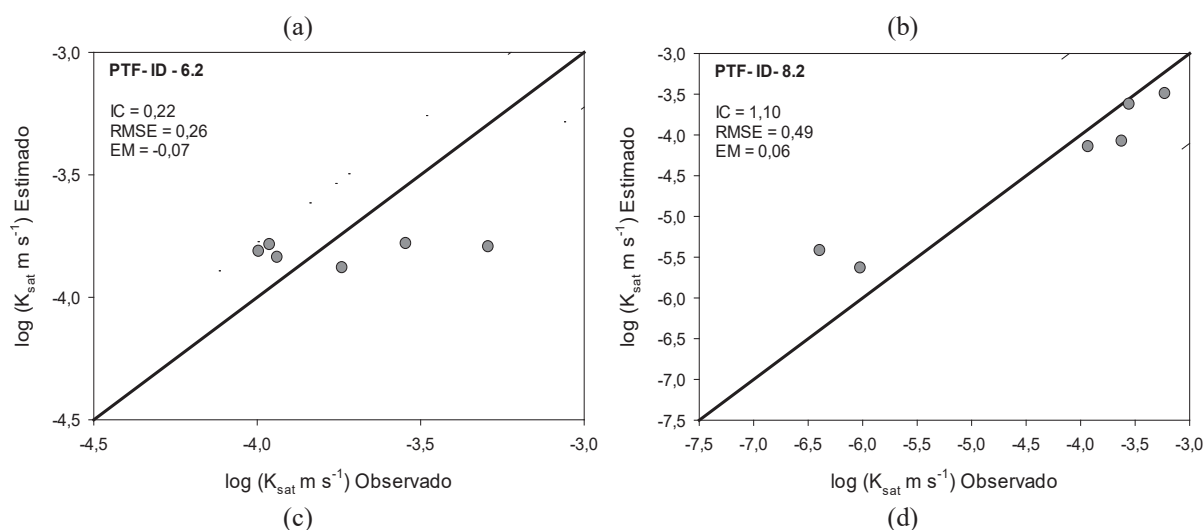
Comparando o desempenho das PTFs geradas para a classe de solo de textura muito argilosa com as PTFs geradas individualmente, observa-se que a PTF-ID-7.2 (RMSE = 0,46; ME = -0,11;  $r$  = 0,89) da classe muito argilosa, apresentou menor exatidão, porém maior precisão que a PTF-ID-6.2 (RMSE = 0,26, ME = -0,07 e  $r$  = 0,25) do LVdf-Santa Tereza do Oeste. Já em relação a PTF-ID-8.2 (RMSE = 0,49, ME = 0,06 e  $r$  = 0,97) do NVe-Leópolis e a PTF-ID-6.3 (RMSE = 0,57, ME = -0,23 e  $r$  = 0,87) do LVdf-Londrina, a PTF gerada da classe de textura muito argilosa foi mais exata e apresentou precisão semelhante quando usada a nessas classes de solos.

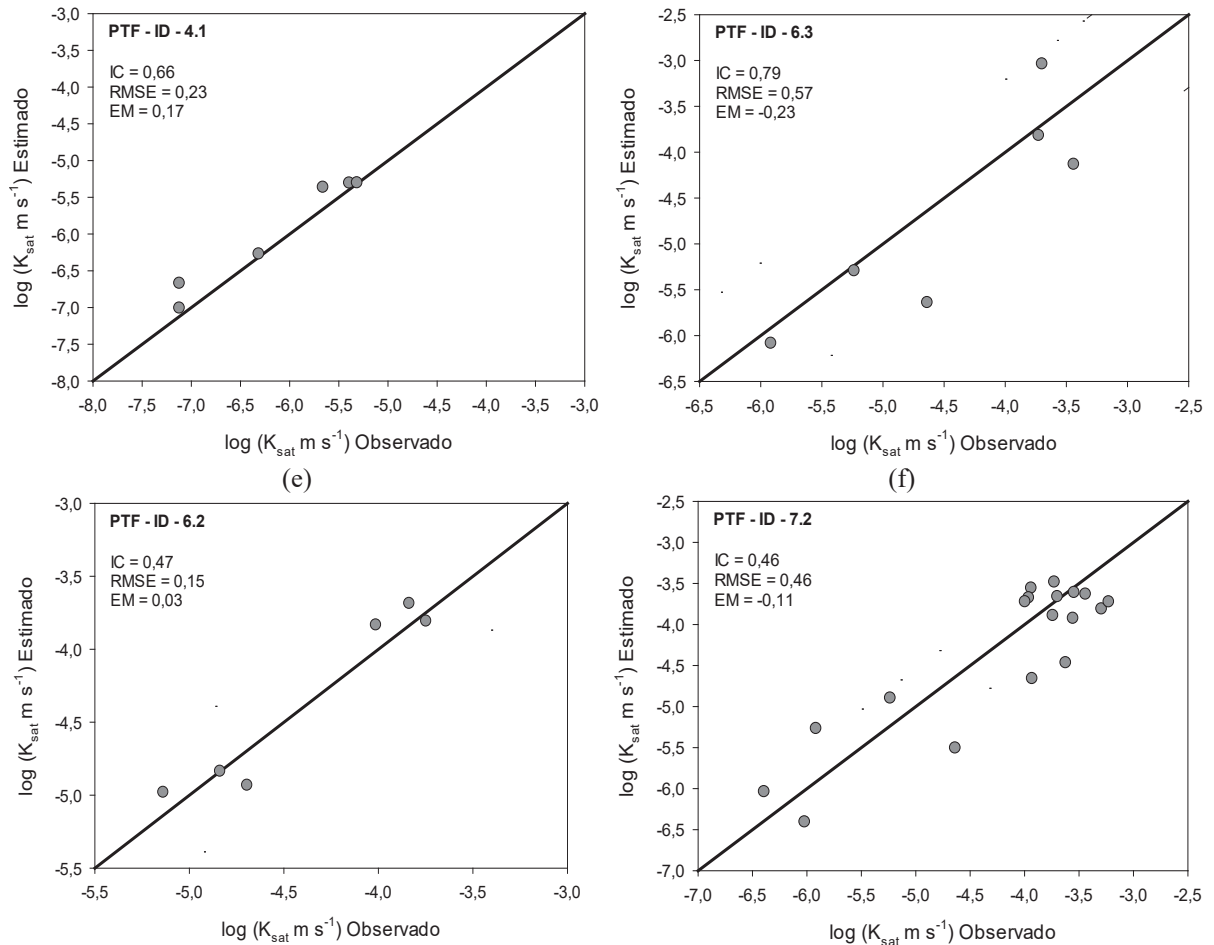
Portanto de modo geral, para o horizonte A das classes de solos avaliadas, sugere-se a utilização das PTFs desenvolvidas para o conjunto de solos de textura muito argilosa. Um banco de dados hidráulicos do solo poderia ser subdividido em grupos mais uniformes trazendo a vantagem de haver uma possível correlação desses dados com outras propriedades do solo. Essa subdivisão traria mais consistência dentro de grupos de solos que têm processos de fluxo semelhantes (Wösten et al., 2001). Puckett et al. (1985) recomendam o desenvolvimento de PTFs em áreas em que os solos tenham a mineralogia e gênese semelhantes.

As comparações das medidas de  $K_{sat}$  e suas respectivas estimativas nos dados de validação obtidas com as PTFs que apresentaram o melhor desempenho no horizonte A das diferentes classes de solos do estado do Paraná, indicam que nas classes LVdf–Santa Tereza do Oeste, LVdf–Londrina e muito argilosa houve uma tendência de subestimar os valores de  $K_{sat}$  (Figura 5).

A precisão muito fraca ( $r = 0,25$ ) da PTF-ID-6.2 do LVdf–Santa Tereza do Oeste é confirmada pelo acentuado distanciamento dos pontos plotados na reta 1:1 do intervalo de confiança.

Com um intervalo de confiança de 95% observam-se, principalmente em algumas classes de solos de textura mais argilosa, alguns pontos mais destoantes deste intervalo, fato que ocorreu pelos diferentes usos do solo (mata e cultivo), sendo uma das causas da variância dos resultados preditos.





**Figura 5.** Desempenho das melhores PTFs na predição de  $K_{sat}$  do horizonte A dos solos avaliados: (a) LVdf–Santa Tereza do Oeste; (b) NVe–Leópolis; (c) CXvd–Ortigueira; (d) LVdf–Londrina; (e) RQ/PVAd–Amaporã; e (f) classe muito argilosa.

No horizonte B ou C das classes de solos avaliadas a análise das PTFs na estimativa dos valores de  $K_{sat}$  revelou (Tabela 8) que em torno de 83% das PTFs ranqueadas com o melhor desempenho utilizaram-se de variáveis diretamente ou indiretamente relacionadas a estrutura do solo (Tabela 8).

A precisão das PTFs melhor ranqueadas foi classificada como forte ( $r = 0,89$  a  $0,98$ ). Cerca de 67% das PTFs de menor precisão valeram-se de variáveis texturais (argila, silte e areia) e  $\rho_p$ .

As PTFs do grupo 10 apresentaram o melhor desempenho para os solos CXvd–Ortigueira e LVdf–Londrina. Essas PTFs utilizam como variável independente o valor de  $K_{ear}$ , sendo essa uma variável mais facilmente medida que  $K_{sat}$ .

**Tabela 8.** Ranqueamento das PTFs de acordo com os valores de RMSE e seus respectivos valores de ME e  $r$  para permeabilidade hidráulica do solo saturado do horizonte B das classes de solos.

Erros	LVdf- Santa Tereza do Oeste									
	PTFs									
	7.2	5.1	9.3	8.4	10.2	6.2	3.1	4.1	2.1	1.2
RMSE	0,19	0,23	0,25	0,26	0,28	0,30	0,37	0,55	0,62	0,71
ME	0,07	0,05	0,15	0,11	-0,12	0,26	0,18	0,04	0,00	0,00
$r$	0,98**	0,98**	0,98**	1,00**	0,98**	0,99**	0,99**	0,96**	0,93**	0,89*
	NVe - Leópolis									
	PTFs									
	3.2	7.3	6.2	1.2	4.1	9.1	8.2	10.2	5.1	2.1
RMSE	0,26	0,32	0,32	0,40	0,42	0,51	0,55	0,67	0,87	1,28
ME	0,11	0,16	-0,05	0,01	0,09	-0,12	0,32	0,07	0,29	-0,81
$r$	0,98**	0,97**	0,96**	0,95**	0,94**	0,92**	0,95**	0,83*	0,89*	-0,25 <sup>ns</sup>
	CXvd - Ortigueira									
	PTFs									
	10.1	9.2	8.5	3.1	7.3	6.2	2.1	4.1	5.1	1.1
RMSE	0,38	0,56	0,58	0,64	0,66	0,70	0,74	0,78	0,79	0,82
ME	0,07	-0,15	-0,38	-0,36	-0,49	-0,20	-0,36	-0,46	-0,55	-0,03
$r$	0,89*	0,82*	0,85*	0,88*	0,85*	0,82*	0,62 <sup>ns</sup>	0,64 <sup>ns</sup>	0,73 <sup>ns</sup>	-0,38 <sup>ns</sup>
	LVdf - Londrina									
	PTFs									
	10.2	6.5	1.3	4.1	8.5	2.1	3.1	7.1		
RMSE	0,24	0,27	0,38	0,39	0,61	0,74	0,79	1,12		
ME	0,13	-0,09	0,00	0,05	0,34	0,19	0,03	0,04		
$r$	0,98**	0,77 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	-0,28 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>	-0,39 <sup>ns</sup>	-0,27 <sup>ns</sup>		
	RQ/PVAd - Amaporã									
	PTFs									
	1.4	9.3	6.4	10.1	8.5	7.2	2.1	3.2		
RMSE	0,12	0,13	0,17	0,23	0,24	0,29	0,44	0,55		
ME	-0,07	-0,05	0,04	-0,15	0,14	0,15	-0,04	0,18		
$r$	0,98**	0,97**	0,96**	0,93**	0,93**	0,83*	0,54 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>		
	Classe muito argilosa									
	PTFs									
	9.3	4.2	3.2	7.3	10.2	8.2	6.3	1.4	5.1	2.1
RMSE	0,44	0,51	0,52	0,52	0,55	0,57	0,62	0,67	0,82	0,90
ME	0,01	0,22	0,12	0,10	0,07	0,14	0,16	-0,01	0,21	0,10
$r$	0,90**	0,90**	0,88**	0,86**	0,84**	0,87**	0,82**	0,75**	0,64**	0,48*

RMSE:  $\log(K_{sat} \text{ m s}^{-1})$ ; \* e \*\*, valores significativos aos níveis de probabilidade de 0,05 e 0,01 respectivamente; <sup>ns</sup> valores não significativos pelo teste F.

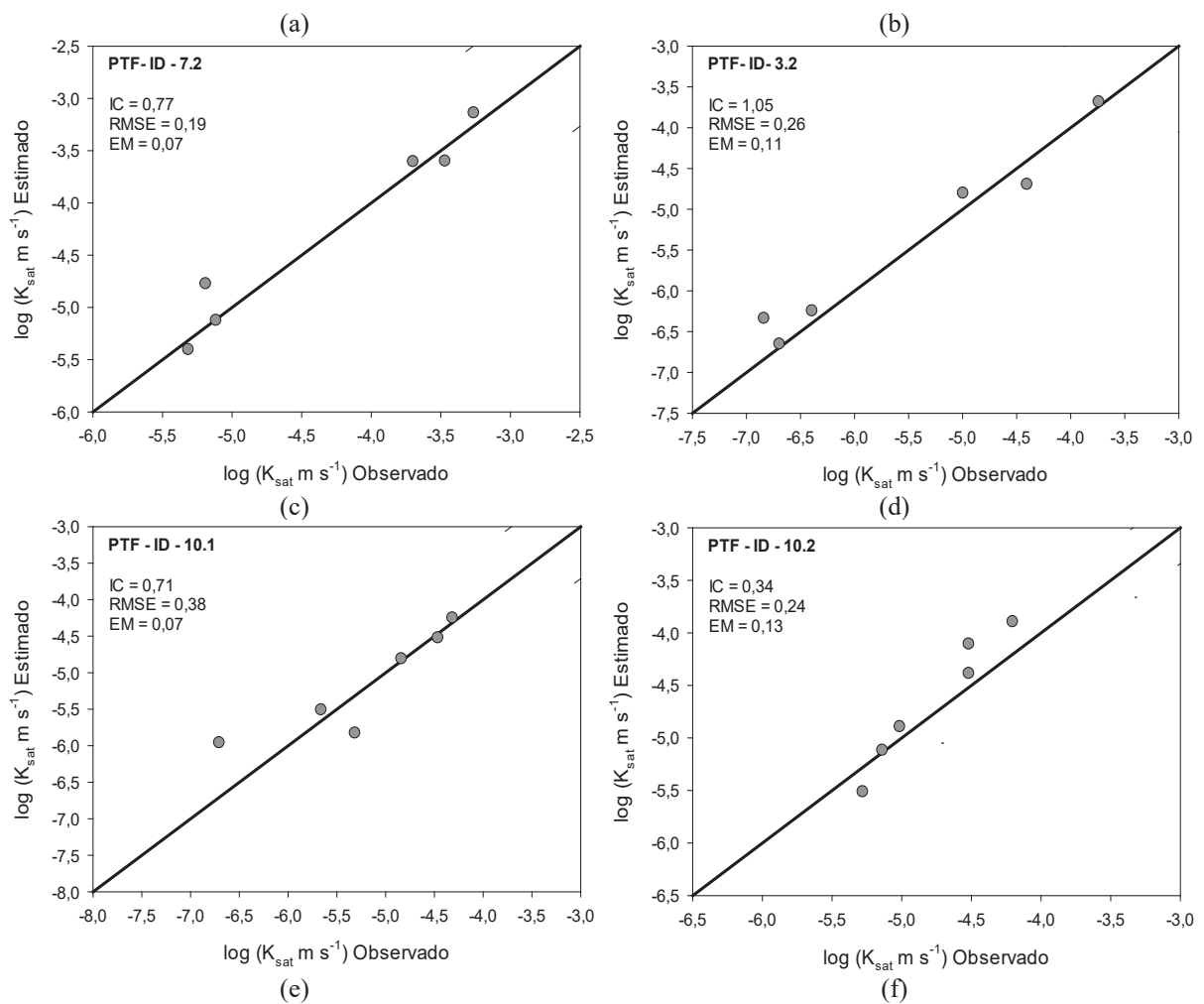
Para as classes de solos RQ/PVAd–Amaporã e de textura muito argilosa foram observados os menores e maiores valores de RMSE, respectivamente. Assim como ocorreu no horizonte A, pode-se inferir que a PTF de  $K_{sat}$  pode gerar resultados mais exatos em solos de textura arenosa.

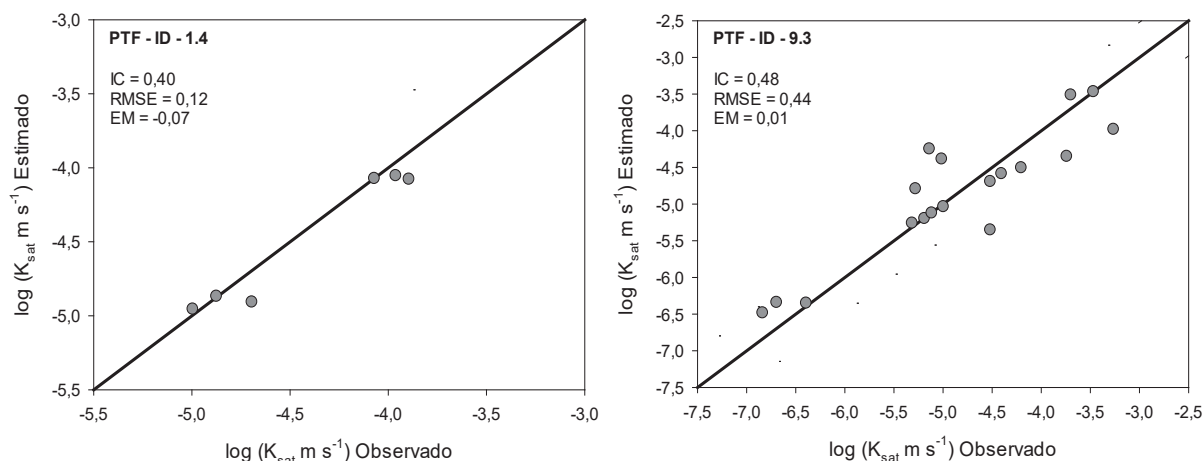
Altos valores de RMSE foram encontrados para a classe de textura muito argilosa do horizonte B, dentre as classes avaliadas. Deste modo, a análise individual das PTFs das classes de solos LVdf–Santa Tereza do Oeste, NVe–Leópolis e LVdf–Londrina mostrou-se que essas PTFs são mais aplicáveis do que as PTFs da classe de textura muito argilosa.



O horizonte B ou C normalmente apresentam menor variação dos atributos físicos e químicos, no entanto cada classe de solo possui um horizonte B ou C característico, sendo inclusive tratados como horizontes diagnósticos na classificação dos solos. Deste modo em horizontes mais profundos sugere-se a utilização de especificamente PTFs desenvolvidas para cada classe de solo.

Observa-se que os dados foram subestimados somente para a classe muito argilosa, fato ocorrido principalmente nos dados originados da mata (Figura 6). Principalmente para o LVdf-Santa Tereza do Oeste a precisão das PTFs foi melhorada em relação ao horizonte A, tal fato se confirma pela análise da PTF de melhor desempenho (PTF-ID-7.2) em que os dados estimados de  $K_{sat}$  ficaram mais próximos da linha 1:1, além de estarem todos dentro do intervalo de confiança.





**Figura 6.** Desempenho das melhores PTFs na predição de  $K_{sat}$  do horizonte B das classes de solos avaliadas: (a) LVdf–Santa Tereza do Oeste; (b) NVe–Leópolis; (c) CXvd–Ortigueira; (d) LVdf–Londrina; (e) RQ/PVAd–Amaporã; e (f) classe muito argilosa.

### 3.6. CONCLUSÕES

Para as condições em que o trabalho foi realizado e para os solos avaliados as PTFs desenvolvidas e aprimoradas baseadas em variáveis estruturais do solo como carbono orgânico, densidade do solo, macroporosidade, resistência do solo à penetração e porosidade efetiva foram mais eficientes na estimativa de  $K_{sat}$  que as PTFs texturais. A predição de  $K_{sat}$  foi mais precisa na classe de solo RQ/PVAd–Amaporã em ambos os horizontes avaliadas. No horizonte A, a utilização das PTFs geradas da classe de solo de textura muito argilosa teve desempenho superior as PTFs desenvolvidas especificamente para as classes de solos: NVe–Leópolis e LVdf–Londrina. Para o horizonte B, as PTFs geradas especificamente para cada classe do solo tiveram desempenho superior as PTFs desenvolvidas para classe textural muito argilosa.

### REFERÊNCIAS

AHUJA, L. R.; CASSEL, D. K.; BRUCE, R. R.; BARNES, B. B. Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. **Soil Science**, v. 148, n. 6, p. 404–411, 1989.

AHUJA, L. R.; NANEY, J. W.; GREEN, R. E.; NIELSEN, D. R. Macroporosity to Characterize Spatial Variability of Hydraulic Conductivity and Effects of Land Management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 4, p. 699–702, 1984.

ARAUJO-JUNIOR, C. F.; SAMBATTI, V. C.; ALMEIDA JUNIOR, J. H. V.; YAMADA, H. H. **Soil electrochemical and physical properties in coffee crops in the State of Paraná, Brazil**. Coffee. Intech Open. 2020. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>.

BATHKE, G. R.; CASSEL, D. K. Anisotropic Variation of Profile Characteristics and Saturated Hydraulic Conductivity in an Ultisol Landscape. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 2, p. 333, 1991.

BENNETT, J. McL.; MARCHUK, A.; MARCHUK, S.; RAINE, S. R. Towards predicting the soil-specific threshold electrolyte concentration of soil as a reduction in saturated hydraulic conductivity: The role of clay net negative charge. **Geoderma**, v. 337, p. 122–131, 2019.

BIELSCHOWSKY, C.; BARBOSA, A. C.; ALVES, L.; SILVA JUNIOR, G. C. Determinação da condutividade hidráulica saturada de campo em solos com diferentes texturas utilizando o método do permeâmetro IAC. **Cadernos de Estudo Geoambientais**, v. 3, n. 1, p. 44–55, 2012.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods**. 2nd. Ed. Madison: Wisconsin, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 363- 375. (Agronomy Series, 5). 1986.

BOLAN, N. S.; SYERS, J. K.; ADEY, M. A.; SUMNER, E. Origin of the effect of pH on the saturated hydraulic conductivity of non-sodic soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, n. 9–10, p. 2265–2278, 1996.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic Properties of Porous media: Hydrology Papers**. Fort Collins: Colorado State University; 1964.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T. J. Liming effects on the stability and erodibility of some brazilian oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, p. 1407 –1413, 1991.

CHEROBIM, V. F.; FAVARETTO, N.; MELO, V. F.; BARTH, G.; HUANG, C. Soil surface sealing by liquid dairy manure affects saturated hydraulic conductivity of Brazilian Oxisols. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 193–196, 2018.

COSBY, B. J.; HORNBERGER, G. M.; CLAPP, R. B.; GINN, T. R. Exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. **Water Resources Research**, v. 20, n. 6, p. 682–690, 1984.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.545–566.

ELLERBROCK, R. H.; GERKE, H. H.; BACHMANN, J.; GOEBEL, M. O. Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 1, p. 57–66, 2005.

FLINT, L. E.; FLINT, A. Porosity. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 4. p. 680-683.

GHANBARIAN, B.; TASLIMITEHRANI, V.; PACHEPSKY, Y. A. Accuracy of sample dimension-dependent pedotransfer functions in estimation of soil saturated hydraulic conductivity. **Catena**, v. 149, p. 374–380, 2017.

GONÇALVES-MADURO, L.; ARMINDO, R. A.; TUREK, M. E.; WENDROTH, O. Soil water and fuel permeability of a Cambisol in southern Brazil and its spatial behavior: A case study. **Vadose Zone Journal**, v. 19, n. 1, p. 1–12, 2020.

GROENEVELT, P. H.; GRANT, C. D. A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water contents. **European Journal of Soil Science**, v. 55, n. 3, p. 479–485, 2004.

GROHMANN, F.; VAN RAIJ, B. Dispersão mecânica e pré-tratamento para análise granulométrica de Latossolos argilosos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 52–53, 1977.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H., TOPP, G.C. (Eds.), **Methods of Soil Analysis: Part 4**. Physical Methods. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI, p. 201–225, 2002

GUARRACINO, L. Estimation of saturated hydraulic conductivity  $K_s$  from the van Genuchten shape parameter  $\alpha$ . **Water Resources Research**, v. 43, n. 11, p. 15–18, 2007.

IBRAHIM, M.; MAHMOUD, E.; GAD, L.; KHADER, A. Effects of biochar and phosphorus fertilizer rates on soil physical properties and wheat yield on clay textured soil in middle Nile Delta of Egypt. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, n. 21, p. 2756–2766, 2019.

IVERSEN, B. V.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; LOLL, P. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. **Soil Science**, v. 166, n. 10, p. 643–659, 2001.

JABRO, J. D. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 35, n. 2, p. 557–560, 1992.

JULIÀ, M. F.; MONREAL, T. E.; JIMÉNEZ, A. S. C.; MELÉNDEZ, E. G. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma**, v. 123, n. 3–4, p. 257–277, 2004.

KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 194, 2019.

KENG, J. C. W.; UEHARA, G. Chemistry, mineralogy, and taxonomy of Oxisols and Ultisols. In: **Proc Soil Crop Sci Soc Fla**. p. 119–126, 1974.

KIRKHAM, D. Field Method for Determination of Air Permeability of Soil in its Undisturbed State. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 11, p. 93–99, 1946.

LOLL, P.; MOLDRUP, P.; SHJØNNING, P.; RILEY, H. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: Application in stochastic water infiltration modeling. **Water Resources Research**, v. 35, n. 8, p. 2387–2400, 1999.

MEKARU, T.; UEHARA, G. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. **American Society of Agronomy**, v. 36, n. 2, p. 296–300, 1972.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 963–969, 2004.

MILLAN, E. R.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; DA COSTA, L. M. Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolos artificialmente compactados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1003–1009, 2014.

MIYAZAWA, M.; BARBOSA, G. M. C. Efeitos da agitação mecânica e matéria orgânica na análise granulométrica do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 680–685, 2011.

MORE, D.; NOTS, W.; FLIGNER, M. **The Basic practice of Statistics**. 8<sup>th</sup> edition. W. H. Feeman, 2017.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water resources research**, v. 12, n. 3, p. 513–522, 1976.

NEMES, A.; RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A. Influence of Organic Matter on the Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 4, p. 1330–1337, 2005.

OTTONI, M. V.; OTTONI, FILHO, T. B.; LOPES-ASSAD, M. L.; ROTUNNO FILHO, O. C. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1345–1358, 2019.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. D.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade (IAPAR Circular, 76)**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 1992.

PUCKETT, W. E.; DANE, J. H.; HAJEK, B. F. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n. 4, p. 831–836, 1985.

RAWLS, W. J.; GIMENEZ, D.; GROSSMAN, R. Use of soil texture, bulk density, and slope of the water retention curve to predict saturated hydraulic conductivity. **Transactions of the ASAE**, v. 41, n. 4, p. 983–988, 1998.

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 48, n. 3–4, p. 351–361, 1991.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de;

OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5 ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2018.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 163–176, 2001.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; PREVEDELLO, C. L. Utilizing Splintex 2.0 for estimating the soil hydraulic conductivity curve measured with instantaneous profile method. **Soil & Tillage Research**, v. 204, p. 1–8, 2020.

SILVA, R. B.; LIMA, J. M.; DIAS JUNIOR, M. S. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 219–226, 2003.

SOARES, M. F.; CENTENO, L. N.; TIMM, L. C.; MELLO, C. R.; KAISER, D. R.; BESKOW, S. Identifying covariates to assess the spatial variability of saturated soil hydraulic conductivity using robust cokriging at the watershed scale. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 2020.

SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; DOS SANTOS, H. P.; FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. especial, p. 2613–2620, 2008.

TIETJE, O.; HENNINGS, V. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. **Geoderma**, v. 69, n. 1–2, p. 71–84, 1996.

TIMLIN, D. J.; AHUJA, L. R.; PACHEPSKY, Y. A.; WILLIAMS, R. D.; GIMENEZ, D.; RAWLS, W. J. Use of Brooks-Corey Parameters to Improve Estimates of Saturated Conductivity from Effective Porosity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 5, p. 1086–1092, 1999.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. Pedotransfer functions for tropical soils. In: PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. (Ed.). **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 415–429.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soils using soil-water retention data. **Soil Science**, v. 162, n. 10, p. 703–712, 1997.

UYEDA, C. A.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; MEDEIROS, P. R. F.; DIAS, C. T. S. Influence of vinasse application in hydraulic conductivity of three soils. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, p. 689–698, 2013.

van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

VERECKEN, H.; MAES, J.; FEYEN, J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. **Soil Science**, v. 149, n. 1, p. 1–12, 1990.

VOMOCIL, J. A. Porosity. In: BLAKE, C. A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. Armstrong an examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934.

WÖSTEN, J. H. M.; LILLY, A.; NEMES, A.; LE BAS, C. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, v. 90, n. 3–4, p. 169–185, 1999.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Ya. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 123–150, 2001.

ZHANG, X.; ZHU, J.; WENDROTH, O.; MATOCHA, C.; EDWARDS, D. Effect of Macroporosity on Pedotransfer Function Estimates at the Field Scale. **Vadose Zone Journal**, v. 18, n. 1, p. 1–15, 2019.

ZHANG, Y.; SCHAAP, M. G. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1011–1030, 2019.

## CONCLUSÃO GERAL

As classes dos solos avaliadas neste estudo estão dentre as classes de principal ocorrência no estado Paraná. Sistemas de cultivos tendem a alterar as propriedades físicas proporcionando a redução da macroporosidade e das permeabilidades do solo ao fluxo de água e ar, além de aumentar a densidade e a resistência a penetração do solo. Com relação as propriedades químicas, os sistemas de cultivo avaliados tendem a proporcionar aumento nos teores das bases, como cálcio, magnésio e potássio, além de reduzir a acidez do solo.

Atributos físicos-hidráulicos e químicos do solo correlacionaram-se com a permeabilidade hidráulica do solo saturado, melhorando a compreensão dos fatores que alteram essa variável e auxiliando no desenvolvimento de PTFs.

A estimativa de  $K_{sat}$  por meio de PTFs desenvolvidas a partir de variáveis estruturais foi mais eficiente que as PTFs texturais. Grande parte da imprecisão das PTFs foi oriunda dos diferentes usos do solo (cultivo e mata). As PTFs desenvolvidas para solos com maiores teores de areia proporcionaram maior eficiência para estimar os valores de  $K_{sat}$ .

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sugere-se que as PTFs desenvolvidas e calibradas neste estudo sejam aplicadas em estudos futuros aumentando-se o banco de dados utilizado para atualizações do desempenho de predição das PTFs.



## REFERÊNCIAS

- AHUJA, L. R.; CASSEL, D. K.; BRUCE, R. R.; BARNES, B. B. Evaluation of spatial distribution of hydraulic conductivity using effective porosity data. **Soil Science**, v. 148, n. 6, p. 404–411, 1989.
- AHUJA, L. R.; NANEY, J. W.; GREEN, R. E.; NIELSEN, D. R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 4, p. 699–702, 1984.
- ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 717–723, 2001.
- ARAUJO, M. A.; ZINN, Y. L.; LAL, R. Soil parent material, texture and oxide contents have little effect on soil organic carbon retention in tropical highlands. **Geoderma**, v. 300, p. 1–10, 2017.
- ARAUJO-JUNIOR, C. F.; MIYAZAWA, M. Funções de pedotransferência para a curva de compactação de seis Latossolos do Estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, Londrina 2012. **Resumos...** Londrina-PR: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola.
- ARAUJO-JUNIOR, C. F.; OLIVEIRA, E.; CARVALHO, E. A. Comportamento mecânico de um Latossolo sob sistema integração lavoura-pecuária com consórcio de culturas em semeadura direta. In: IV REUNIÃO PARANAENSE DE CIÊNCIA DO SOLO, Cascavel, 2015. **Resumos...** Curitiba-PR: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/ Núcleo Estadual do Paraná.
- ARAUJO-JUNIOR, C. F.; SAMBATTI, V. C.; ALMEIDA JUNIOR, J. H. V.; YAMADA, H. H. **Soil electrochemical and physical properties in coffee crops in the State of Paraná, Brazil**. Coffee. Intech Open. 2020. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>.
- ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 6, p. 1023–1030, 1981.
- ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 515–522, 2005.
- ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; COSTA, S. E. V. G. A.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CARVALHO, P. C. F.; DA SILVA, F. D.; COSTA, A. A. Calcium and magnesium released from residues in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1–13, 2017.
- AULER, A. C.; PIRES, L. F.; DOS SANTOS, J. A. B.; CAIRES, E. F.; BORGES, J. A. R.; GIAROLA, N. F. B. Effects of surface-applied and soil-incorporated lime on some physical attributes of a dystropept soil. **Soil Use and Management**, v. 33, n. 1, p. 129–140, 2017.

BATHKE, G. R.; CASSEL, D. K. Anisotropic Variation of Profile Characteristics and Saturated Hydraulic Conductivity in an Ultisol Landscape. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 2, p. 333, 1991.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 215–221, 1998.

BENNETT, J. McL.; MARCHUK, A.; MARCHUK, S.; RAINE, S. R. Towards predicting the soil-specific threshold electrolyte concentration of soil as a reduction in saturated hydraulic conductivity: The role of clay net negative charge. **Geoderma**, v. 337, p. 122–131, 2019.

BIELSCHOWSKY, C.; BARBOSA, A. C.; ALVES, L.; SILVA JUNIOR, G. C. Determinação da condutividade hidráulica saturada de campo em solos com diferentes texturas utilizando o método do permeâmetro IAC. **Cadernos de Estudo Geoambientais**, v. 3, n. 1, p. 44–55, 2012.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd. ed.** Madison: Wisconsin, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 363- 375. (Agronomy Series, 5).

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; POST, W. M.; IZAURRALDE, C.; SHIPITALO, M. J. Organic Carbon Influences on Soil Particle Density and Rheological Properties. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 70, no. 4, p. 1407–1414, 2006.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, p. 164–200, 2018.

BLEVINS, R. L.; THOMAS, G. W.; CORNELIUS, P. L. Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. **Agronomy Journal**, v. 69, n. 3, p. 383–386, 1977.

BOLAN, N. S.; SYERS, J. K.; ADEY, M. A.; SUMNER, E. Origin of the effect of pH on the saturated hydraulic conductivity of non-sodic soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, n. 9–10, p. 2265–2278, 1996.

BORMANN, H.; KLAASSEN, K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils. **Geoderma**, v. 145, n. 3–4, p. 295–302, 2008.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic Properties of Porous media: Hydrology Papers.** Fort Collins: Colorado State University; 1964.

CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W. L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONET, S.; GUIMARÃES, M. F.; DOS SANTOS, D. R. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32–39, 2013.

CALEGARI, M. R.; HAYAKAWA, E. H.; LIMBERGER, L. Descrição geral do estado do Paraná. In: BERTOL, O. J.; COLOZZI FILHO, A.; BARBOSA, G. M. C.; dos SANTOS, J. B.;

GUIMARÃES, M. F. **Manual de manejo e conservação do solo e da água para o estado do Paraná**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Estadual do Paraná, Curitiba, p 8–14, 2019.

CARMO, D. A. B.; VAL, B. H. P. Classificação dos Neossolos e Nitossolos quanto a natureza física, químicas e morfológicas. **FAZU em Revista**, n. 10, p. 17–26, 2013.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T. J. Liming effects on the stability and erodibility of some brazilian oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, p. 1407–1413, 1991.

CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; GUIMARÃES, M. de F.; FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under diferente soil management systems in a red latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, vol. 65, n. 1, p. 45–51, 2002.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; Oliveira, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000.

CHEROBIM, V. F.; FAVARETTO, N.; MELO, V. F.; BARTH, G.; HUANG, C. Soil surface sealing by liquid dairy manure affects saturated hydraulic conductivity of Brazilian Oxisols. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 193–196, 2018.

CHIEF, K.; FERRÉ, T. P. A.; NIJSSEN, B. Correlation between air permeability and saturated hydraulic conductivity: Unburned and burned soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 6, p. 1501–1509, 2008.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, vol. 33, n. 6, p. 1161–1164, 2003.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 925–930, 2002.

COSBY, B. J.; HORNBERGER, G. M.; CLAPP, R. B.; GINN, T. R. Exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. **Water Resources Research**, v. 20, n. 6, p. 682–690, 1984.

CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 29, p. 81–90, 2005.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M.; BEM, E. A. D. Inter-relações da produtividade de cana soca com a resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo. **Revista Ceres**, v. 61, n. 2, p. 255–264, 2014.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.545–566.

DE FARIA, R. T.; CARAMORI, P. H. Caracterização físico-hídrica de um latossolo roxo distrófico do município de Londrina, PR. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 21, n. 12, p. 1303–1311, 1986.

DE MORES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; DA SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 288–298, 2014.

DE OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; ROSSETTI, K. V.; FERRAUDO, A. S.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. S.; BÁRBARO JÚNIOR, L. S. Qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho submetido à compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 604–612, 2013.

DERPSCH, R.; FRANZLUEBBERS, A. J.; DUIKER, S. W.; REICOSKY, D. C.; KOELLER, K.; FRIEDRICH, T.; STURNY, W. G.; SÁ, J. C.M.; WEISS, K. Why do we need to standardize no-tillage research? **Soil and Tillage Research**, v. 137, p. 16–22, 2014.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**, v. 57, n. 4, p. 203–212, 2001.

DIEL, D.; BEHLING, M.; FARIAS NETO, A. L.; ISERNHAGEN, E. C. C. Distribuição horizontal e vertical de fósforo em sistemas de cultivos exclusivos de soja e de integração lavoura-pecuária- floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 8, p. 639–647, 2014.

DOMINGOS, M. M. M.; GASPARETTO, N. V. L.; NAKASHIMA, P.; RALISCH, R.; TAVARES-FILHO, J. Estrutura de um Nitossolo Vermelho Latossólico eutroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e floresta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 33, no. 6, p. 1517–1524, 2009.

ELLERBROCK, R. H.; GERKE, H. H.; BACHMANN, J.; GOEBEL, M. O. Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69–66, p. 57, 2005.

EUSUFZAI, M.; FUJII, K. Effect of organic matter amendment on hydraulic and pore characteristics of a clay loam soil. **Open Journal of Soil Science**, v. 2, n. 4, p. 372–381, 2012.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 515–524, 1999.

FISH, A. N.; KOPPI, A. J. The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, v. 63, n. 3–4, p. 255–264, 1994.

FLINT, L. E.; FLINT, A. Porosity. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. v. 4. p. 680–683.

FRANCHINI, J. C.; BORKET, C. M.; FERREIRA, M. M.; GAUDÊNCIO, C. A. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 459–467, 2000.

GENNARO, L. A.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. F. S.; COOPER, M.; CAMPOS, M. C. C. Estrutura dosolo sob feijão irrigado e diferentes manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 608–614, 2015.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 477–484, 2004.

GHANBARIAN, B.; TASLIMITEHRANI, V.; PACHEPSKY, Y. A. Accuracy of sample dimension-dependent pedotransfer functions in estimation of soil saturated hydraulic conductivity. **Catena**, v. 149, p. 374–380, 2017.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; COSTA LIMA, J. M. J. Topossequências de latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II - Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 307–319, 2006.

GONÇALVES-MADURO, L.; ARMINDO, R. A.; TUREK, M. E.; WENDROTH, O. Soil water and fuel permeability of a Cambisol in southern Brazil and its spatial behavior: A case study. **Vadose Zone Journal**, v. 19, n. 1, p. 1–12, 2020.

GROENEVELT, P. H.; GRANT, C. D. A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water contents. **European Journal of Soil Science**, v. 55, n. 3, p. 479–485, 2004.

GROHMANN, F.; VAN RAIJ, B. Dispersão mecânica e pré-tratamento para análise granulométrica de Latossolos argilosos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 52–53, 1977.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H., TOPP, G.C. (Eds.), **Methods of Soil Analysis: Part 4**. Physical Methods. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI, p. 201–225, 2002.

GUARRACINO, L. Estimation of saturated hydraulic conductivity  $K_s$  from the van Genuchten shape parameter  $\alpha$ . **Water Resources Research**, v. 43, n. 11, p. 15–18, 2007.

HAN, H.; GIMÉNEZ, D.; LILLY, A. Textural averages of saturated soil hydraulic conductivity predicted from water retention data. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, n. 1–2, p. 121–128, July 2008.

HAO, M.; ZHANG, J.; MENG, M.; CHEN, H. Y. H.; GUO, X.; LIU, S.; YE, L. Impacts of changes in vegetation on saturated hydraulic conductivity of soil in subtropical forests. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2019.

HENGL, T.; DE JESUS, J. M.; HEUVELINK, G. B. M.; GONZALEZ, M. R.; KILIBARDA, M.; BLAGOTIĆ, A.; SHANGGUAN, W.; WRIGHT, M. N.; GENG, X.; BAUER-MARSCHALLINGER, B.; GUEVARA, M. A.; VARGAS, R.; MACMILLAN, R. A.; BATJES, N. H.; LEENAARS, J. G. B.; RIBEIRO, E.; WHEELER, I.; MANTEL, S.;

KEMPEN, B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. **PLoS ONE**, v.12, n. 2, 2017.

HOLTHUSEN, D.; BRANDT, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**, vol. 177, p. 113–124, 2018.

IBRAHIM, M.; MAHMOUD, E.; GAD, L.; KHADER, A. Effects of biochar and phosphorus fertilizer rates on soil physical properties and wheat yield on clay textured soil in middle Nile Delta of Egypt. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, n. 21, p. 2756–2766, 2019.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Médias históricas em estações do IAPAR. Disponível em: [http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias\\_Historicas/Londrina.htm](http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Londrina.htm). Acesso em: 17set. 2020b.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Zoneamento Agrícola .Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1043>. Acesso em: 17set. 2020a.

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; DA SILVA, R. B. Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, p. 185–195, 2012.

IVERSEN, B. V.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; LOLL, P. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. **Soil Science**, v. 166, n. 10, p. 643–659, 2001.

JABRO, J. D. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 35, n. 2, p. 557–560, 1992.

JULIÀ, M. F.; MONREAL, T. E.; JIMÉNEZ, A. S. C.; MELÉNDEZ, E. G. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. **Geoderma**, v. 123, n. 3–4, p. 257–277, 2004.

KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, vol. 194, p. 104293, 2019.

KENG, J. C. W.; UEHARA, G. Chemistry, mineralogy, and taxonomy of Oxisols and Ultisol s. In: **Proc Soil Crop Sci Soc Fla**. p. 119–126, 1974.

KIRKHAM, D. Field Method for Determination of Air Permeability of Soil in its Undisturbed State. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 11, p. 93–99, 1946.

KROES, J. G.; van DAM, J. C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R. F. A.; JACOBS, C. M. J. SWAP version 3.2. **Theory description and user manual**. Alterra Report 1649. Wageningen, 255 p.

- KUNCORO, P. H.; KOGA, K.; SATTA, N.; MUTO, Y. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 172–179, 2014.
- LIMA, R. T. Caracterização e distribuição da precipitação no município de Leopólis, PR. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 13, n. 2, p. 178–186, 2019.
- LOLL, P.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; RILEY, H. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: Application in stochastic water infiltration modeling. **Water Resources Research**, v. 35, n. 8, p. 2387–2400, 1999.
- LUCIANO, R. V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; KURTZ, C.; FAYAD, J. A. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 9, n. 1, p. 9–19, 2010.
- MA, L.; HOOGENBOOM, G.; SASEENDRAN, S. A.; BARTLING, P. N. S.; AHUJA, L. R.; GREEN, T. R. Effects of estimating soil hydraulic properties and root growth factor on soil water balance and crop production. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 572–583, 2009.
- MAGALHÃES, V. L.; CUNHA, J. E.; NÓBREGA, M. T. Dinâmica físico-hídrica de um sistema pedológico Latossolo-Nitossolo. **Mercator**, v. 16, p. 1–19, 2017.
- MAPFUMO, E.; CHANASYK, D. S. Guidelines for safe trafficking and cultivation, and resistance-density-moisture relations of three disturbed soils from Alberta. **Soil and Tillage Research**, v. 46, p. 193–202, 1998.
- MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JUNIOR, O. F.; C., MARTINS. G. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 2, p. 193–206, 2008.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 Ed. San Diego, Academic Press, 902p. 1995.
- MARTINS, A. P.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T. R.; BALERINI, F.; CECAGNO, D.; CARVALHO, P. C. F. Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop-livestock system under different grazing intensities. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 195, p. 18–28, 2014.
- MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; ALVALÁ, R. C. S.; GIAROLLA, A.; GAROFOLO, L. L.; SIQUEIRA JUNIOR, J. L.; PAOLICCHI, L. T. L. C.; PINTO, G. L. N. Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. **Agricultural Systems**, v. 160, p. 21–30, 2018.
- McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v. 109, n. 1–2, p. 41–73, 2002.

MEDRI, M. E.; BIANCHINI, E.; SHIBATTA, O. A.; PIMENTA, J. A. Síntese geológica da bacia do rio Tibagi In: PINESE, J. P. P. **A Bacia do Tibagi**. Câmara Brasileira do Livro, Londrina, 2002. p 21-30.

MEKARU, T.; UEHARA, G. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 36, n. 2, p. 296–300, 1972.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 963–969, 2004.

MILLAN, E. R.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; DA COSTA, L. M. Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolos artificialmente compactados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1003–1009, 2014.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; BRISTOW, K. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. **Geoderma**, v. 93, n. 3–4, p. 225–253, 2006.

MINEROPAR. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 63 p. 2006.

MIYAZAWA, M.; BARBOSA, G. M. C. Efeitos da agitação mecânica e matéria orgânica na análise granulométrica do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 680–685, 2011.

MORE, D.; NOTS, W.; FLIGNER, M. **The Basic practice of Statistics**. 8<sup>th</sup> edition. W. H. Feeman, 2017.

MOREIRA, W. H.; BETIOLI JUNIOR, E.; PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; COSTA, A. T.; FRANCO, H. H. S. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico em Sistema de Integração Lavoura-Pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 389–400, 2012.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water resources research**, v. 12, n. 3, p. 513–522, 1976.

MULAZZANI, R. P. **Desenvolvimento de pedotransferência física-empírica para Modelagem da retenção de água no solo**. 2016. 85 f. 2016 (Dissertação de Mestrado).

MUZILLI, O. Manejo da matéria orgânica no sistema plantio direto: a experiência no Estado do Paraná. **Informações Agronômicas**, n. 100, p. 6–10, 2002.

NEMES, A.; RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 4, p. 1330–1337, 2005.

NEMES, A.; WÖSTEN, J. H. M.; BOUMA, J.; VARALLYAY, G. **Soil water balance scenario studies using predicted soil hydraulic parameters**. Hydrological Processes. International Journal, v. 20, p. 1075–1094, 2006.



NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da SILVA; PINTO, F. D. **Atlas climático do Estado do Paraná**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 2019.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um latossolo vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 28, no. 2, p. 327–336, 2004.

OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; MELLO, C. R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 265–270, 2007

OTTONI, M. V.; OTTONI, FILHO, T. B.; LOPES-ASSAD, M. L.; ROTUNNO FILHO, O. C. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1345–1358, 2019.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. D.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade (IAPAR Circular, 76)**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 1992.

PAVAN, M.A.; OLIVEIRA, E.L. **Manejo da acidez do solo. (IAPAR Circular, 95)**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 1997.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; DA COSTA, L. M.; DOS SANTOS, B. C. M. Atributos químicos e físicos de um Cambissolo Háplico Tb Distrófico sob diferentes usos na zona da mata Mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 32, n. 1, p. 249–258, 2008.

POTT, C. A.; ZERBIELLI, L. C.; MARTINS, P. J.; GARDIN, E.; GARCIA, M. L. Qualidade física do solo em sistemas florestais, pecuários e integrados de produção. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 10, n. 2, p. 53–60, 2017.

POULSEN, T. G.; IVERSEN, B. V.; YAMAGUCHI, T.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P. Spatial and temporal dynamics of air permeability in a constructed field. **Soil Science**, v. 166, n. 3, p. 153–162, 2001.

PREVEDELLO C. L.; LOYOLA J. M. T. Modelo para estimar as propriedades hidráulicas de meios porosos a partir da curva granulométrica. In: congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica. 2002, São Paulo. **Anais...São Paulo: ABMS, 2002. P.467-472.**

PUCKETT, W. E.; DANE, J. H.; HAJEK, B. F. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n. 4, p. 831–836, 1985.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438–447, 2009.

RAWLS, W. J.; GIMENEZ, D.; GROSSMAN, R. Use of soil texture, bulk density, and slope of the water retention curve to predict saturated hydraulic conductivity. **Transactions of the ASAE**, v. 41, n. 4, p. 983–988, 1998.

REIS, A. M.H.; ARMINDO, R. A.; PIRES, L. F. Physical assessment of a Haplohumox soil under integrated crop-livestock system. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. 104294, 2019.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 2.Ed. Viçosa, NEPUT, 367p. 1997.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 4, p. 1167–1175, 2007.

ROCHA, A. S.; NÓBREGA, M. T.; CUNHA, J. E. As unidades de paisagem, as vertentes características e os sistemas pedológicos na bacia hidrográfica do Paraná 3. **Ateliê Geográfico**, v. 12, n. 1, p. 51–70, 2018.

RODRIGUES, E. J. **Profundidade do sistema radicular e extração de água do solo na cultura do milho safrinha**. 2019. 79 f. 2019 (Dissertação de Mestrado).

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 48, n. 3–4, p. 351–361, 1991.

SALAZAR, O.; WESSTRÖM, I.; JOEL, A. Evaluation of DRAINMOD using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 10, p. 1135–1143, 2008.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5 Ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2018.

SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALLI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA, J. M. F. Mapeamento da vulnerabilidade geoambiental do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 4, p. 812–820, 2007.

SANTRA, P.; DAS, B. S. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. **Geoderma**, v. 146, n. 3–4, p. 439–448, 2008.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; VAN GENUCHTEN, M. T. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 163–176, 2001.

SHAINBERG, I.; SINGER, M. J.; JANITZKY, J. Effect of aluminum and iron oxides on hydraulic conductivity of sandy loam Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 1283–1287, 1987.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M. A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, n. 3, p.249–254, 1985.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; BRITO, A. S.; SCHAAP, M. G. SPLINTEX: A physically-based pedotransfer function for modeling soil hydraulic functions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam v. 174, p.261-272, 2017a.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; BRITO, A. S.; SCHAAP, M. G. An assessment of pedotransfer function performance for the estimation of spatial variability of key soil hydraulic properties. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 9, p. 1–10, 2017b.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A.; PREVEDELLO, C. L. Utilizing Splintex 2.0 for estimating the soil hydraulic conductivity curve measured with instantaneous profile method. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 1–8, 2020.

SILVA, D. N.; MEURER, E. J.; KÄMPF, N.; BORKERT, C. M. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, n. 3, p. 433–439, 1995.

SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; DE SÁ, J. J. G.; MARQUES, M.; GUILHERME, L. R. G.; DE LIMA, J. M. Ponto de efeito salino nulo e suas relações com propriedades mineralógicas e químicas de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 9, p. 663–671, 1996.

SILVA, R. B.; LIMA, J. M.; DIAS JUNIOR, M. S. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 219–226, 2003.

SKAGGS, R.W. Drainage. In: HANKS, J.; RITCHIE, J. T. Modeling Plant and Soil Systems. **Agronomy Monograph** n. 31. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, p. 205–243, 1991.

SKORUPA, A. L. A.; SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; TASSINARI, D.; PINTO, L. C.; ZINN, YURI L.; CURTI, N. Similar soils but different soil-forming factors: Converging evolution of Inceptisols in Brazil. **Pedosphere**, v. 27, n. 4, p. 747–757, 2017.

SOARES, M. F.; CENTENO, L. N.; TIMM, L. C.; MELLO, C. R.; KAISER, D. R.; BESKOW, S. Identifying covariates to assess the spatial variability of saturated soil hydraulic conductivity using robust cokriging at the watershed scale. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 2020.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G. T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 3, p. 487–492, 2006.

SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; DOS SANTOS, H. P.; FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. especial, p. 2613–2620, 2008.

TIETJE, O.; HENNINGS, V. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. **Geoderma**, v. 69, n. 1–2, p. 71–84, 1996.

TIMLIN, D. J.; AHUJA, L. R.; PACHEPSKY, Y. A.; WILLIAMS, R. D.; GIMENEZ, D.; RAWLS, W. J. Use of Brooks-Corey parameters to improve estimates of saturated conductivity from effective porosity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 5, p. 1086–1092, 1999.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soils using soil-water retention data. **Soil Science**, v. 162, n. 10, p. 703–712, 1997.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. Pedotransfer functions for tropical soils. In: PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. (Ed.). **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 415–429.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Ya.; CRESTANA, S.; RAWLS, W. J. Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 4, p. 1085–1092, 2003.

TRABAQUINI, K.; MIGLIORANZA, E.; DE FRANÇA, V.; PEREIRA NETO, O. C. Uso da geotecnologia para caracterizar os cafezais no município de Londrina-PR, em relação à altimetria, declividade e tipo de solo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1136–1147, 2010.

TUREK, M. E.; VAN LIER, Q.; ARMINDO, R. A. Estimation and mapping of field capacity in Brazilian soils. **Geoderma**, v. 376, p. 114557, 2020.

UYEDA, C. A.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; MEDEIROS, P. R. F.; DIAS, C. T. S. Influence of vinasse application in hydraulic conductivity of three soils. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, p. 689–698, 2013.

Van ALPHEN, B. J.; BOOLTINK, H. W. G.; BOUMA, J. Combining pedotransfer functions with physical measurements to improve the estimation of soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 103, n. 1–2, p. 133–147, 2001.

Van GENUCHTEN, M. T. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

Van LIER, Q.; WENDROTH, O.; VAN DAM, J. C. Prediction of winter wheat yield with the SWAP model using pedotransfer functions: An evaluation of sensitivity, parameterization and prediction accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 154, p. 29–42, 2015.

Van RAIJ, B. Determinação do ponto de carga zero em solos. **Bragantia**, v. 32, p. 337–347, 1973.

VERDADE, F. C. Influência da matéria orgânica na capacidade de troca de cátions do solo. **Bragantia**, v. 15, n. 4, p. 35–42, 1956.

VERECKEN, H.; MAES, J.; FEYEN, J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. **Soil Science**, v. 149, n. 1, p. 1–12, 1990.

VIEIRA, M. J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 7, p. 873–882, 1984.

VITAL, A. R. T.; GUERRINI, I. A.; FRANKEN, W. K.; FONSECA, R. C. B. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 793–800, 2004.

VOMOCIL, J. A. Porosity. In: BLAKE, C. A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934.

WANG, T.; WEDIN, D.; ZLOTNIK, V. A. Field evidence of a negative correlation between saturated hydraulic conductivity and soil carbon in a sandy soil. **Water Resources Research**, v. 45, n. 7, 2009.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2297–2305, 2008.

WÖSTEN, J. H. M.; LILLY, A.; NEMES, A.; LE BAS, C. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, v. 90, n. 3–4, p. 169–185, 1999.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 123–150, 2001.

ZAGATTO, M. R. G.; ZANÃO JUNIOR, L. A.; PEREIRA, A. P. A.; ESTRADA-BONILLA, G.; CARDOSO, E. J. B. N. Soil mesofauna in consolidated land use systems: How management affects soil and litter invertebrates. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 2, p. 165–171, 2019.

ZHANG, S.; HUFFMAN, T.; ZHANG, X.; LIU, W.; LIU, Z. Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: a case study of soil available phosphorus and total phosphorus. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 11, p. 1775–1789, 2014.

ZHANG, X. C.; NORTON, L. D. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. **Journal of Hydrology**, v. 260, p. 194–205, 2002.

ZHANG, X.; ZHU, J.; WENDROTH, O.; MATOCHA, C.; EDWARDS, D. Effect of Macroporosity on Pedotransfer Function Estimates at the Field Scale. **Vadose Zone Journal**, v. 18, n. 1, p. 1–15, 2019.

ZHANG, Y.; SCHAAP, M. G. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1011–1030, 2019.

## APÊNDICES

**Tabela 1.** Correlação de Pearson das variáveis físico-hidráulicas e químicas com a permeabilidade hidráulica do solo saturado dos horizontes A dos solos avaliados.

Variáveis <sup>1</sup>	LVdf	NVe	CXvd	LVdf	RQ/PVAd
	Santa Tereza do Oeste	Leópolis	Ortigueira	Londrina	Amaporã
Argila (dag kg <sup>-1</sup> )	-0,333	0,000	-0,916*	-0,749	-0,542
Silte (dag kg <sup>-1</sup> )	0,506	-0,522	0,859*	-0,545	-0,714
Areia (dag kg <sup>-1</sup> )	0,277	0,474	0,939**	0,824*	0,652
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	-0,551	-0,958**	-0,988**	-0,884*	-0,788
$\rho_p$ (kg dm <sup>-3</sup> )	-0,548	-0,872*	-0,238	0,600	0,607
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	-0,459	0,842*	-0,782	0,429	0,083
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,500	0,922**	0,981**	0,883*	0,813*
Micro (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,177	-0,644	-0,900*	-0,899*	-0,774
Macro (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,437	0,898*	0,993**	0,895*	0,811
RP(-10 kPa), MPa	0,569	-0,746	-0,961**	-0,834*	-0,761
RP(-33 kPa), MPa	0,562	-0,942**	-0,939**	-0,801	-0,857*
$K_{ear}$ (10 kPa), $\mu\text{m}^2$	0,415	0,905*	0,842*	0,987**	0,888*
$K_{ear}$ (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$	0,304	0,923**	0,702	0,996**	0,863*
pH (CaCl <sub>2</sub> )	-0,119	0,912*	0,688	-0,708	
pH (KCl)	-0,137	0,937**	0,688	-0,717	
pH (H <sub>2</sub> O)	-0,118	0,964**	0,733	-0,756	
$\Delta\text{pH}$	-0,068	0,309	0,445	0,759	
PCZ	-0,140	0,884*	0,641	-0,612	
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,166	0,000	-0,703	0,821*	
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,354	-0,851*	-0,762	0,762	
C (g dm <sup>-3</sup> )	0,573	0,593	0,497	0,764	
P (mg dm <sup>-3</sup> )	-0,597	-0,611	0,940**	-0,734	
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,038	0,825*	0,622	-0,768	
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,438	0,497	-0,014	-0,835*	
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,328	-0,384	0,061	-0,889*	
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,139	0,674	0,511	-0,799	
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,666	0,457	-0,881*	-0,771	
V (%)	-0,133	0,841*	0,642	-0,784	

<sup>1</sup>n= 6 amostras do horizonte A; \* e \*\*, significativos aos níveis de probabilidade de 0,05 e 0,01 respectivamente

**Tabela 2.** Correlação de Pearson das variáveis físico-hidráulica e químicas com a permeabilidade hidráulica do solo saturado dos horizontes B dos solos avaliados.

Variáveis <sup>1</sup>	LVdf	NVe	CXvd	LVdf	RQ/PVAd
	Santa Tereza do Oeste	Leópolis	Ortigueira	Londrina	Amaporã
Argila (dag kg <sup>-1</sup> )	-0,631	-0,949**	-0,302	-0,417	-0,967**
Silte (dag kg <sup>-1</sup> )	0,883*	0,949**	0,380	0,131	-0,775
Areia (dag kg <sup>-1</sup> )	0,583	0,845*	-0,001	0,275	0,959**
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	-0,870*	-0,990**	-0,836*	-0,547	0,917*
$\rho_p$ (kg dm <sup>-3</sup> )	-0,689	-0,613	0,918**	0,621	-0,021
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	0,146	0,104	0,725	0,608	-0,963**
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,897*	0,971**	0,796	0,634	-0,868*
Micro (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	-0,111	-0,931**	-0,370	-0,881*	-0,987**
Macro (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,882*	0,989**	0,863*	0,932**	0,991**
RP(-10 kPa), MPa	-0,801	-0,986**	-0,315	-0,597	-0,304
RP(-33 kPa), MPa	-0,778	-0,980**	-0,686	-0,691	-0,850*
$K_{ear}(-10 \text{ kPa})$ , $\mu\text{m}^2$	0,975**	0,968**	0,794	0,943**	0,915*
$K_{ear}(-33 \text{ kPa})$ , $\mu\text{m}^2$	0,958**	0,795	0,947**	0,924**	0,880*
pH (CaCl <sub>2</sub> )	-0,858*	0,837*	-0,499	-0,344	
pH (KCl)	-0,840*	0,857*	-0,593	-0,531	
pH (H <sub>2</sub> O)	-0,750	0,901*	0,247	-0,675	
$\Delta\text{pH}$	-0,217	0,173	-0,985**	0,762	
PCZ	-0,843*	0,797	-0,874*	0,207	
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,607	0,000	0,590	0,355	
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,797	-0,836*	0,051	0,065	
C (g dm <sup>-3</sup> )	0,442	0,931**	-0,915*	0,607	
P (mg dm <sup>-3</sup> )	0,425	0,819*	-0,723	-0,653	
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0,922**	0,765	-0,690	-0,185	
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0,853*	0,706	-0,771	-0,541	
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0,708	0,603	-0,898*	0,163	
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	-0,933**	0,739	-0,733	-0,373	
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,683	0,740	-0,823*	-0,692	
V (%)	-0,943**	0,762	-0,572	-0,280	

<sup>1</sup>n= 6 amostras do horizonte B; \* e \*\*, significativos aos níveis de probabilidade de 0,05 e 0,01 respectivamente.

**Tabela 3.** Correlação de Pearson dos parâmetros dos modelos da CRAS com a permeabilidade hidráulica do solo saturado dos horizontes A e B dos solos avaliados.

Variáveis <sup>1</sup>	LVdf	NVe	CXvd	LVdf	PVAd/LAd
	Santa Tereza do Oeste	Leópolis	Ortigueira	Londrina	Amaporã
	Horizonte A				
$\theta_s$ (VG)	0,443	0,921**	0,982**	0,882*	0,764
$\theta_r$ (VG)	0,371	0,728	0,382	-0,714	-0,611
$\log(\alpha)$	0,433	0,492	0,968**	-0,969**	0,898*
n	-0,450	0,857*	0,591	0,930**	-0,179
$\theta_s$ (BC)	0,441	0,922**	0,989**	0,883*	0,786
$\theta_r$ (BC)	0,577	0,734	0,836*	-0,684	-0,143
$\log(hb)$	0,457	0,362	0,945**	-0,973**	0,952**
$\lambda$	-0,010	0,889*	0,930**	0,930**	0,228
$\theta_s$ (GG)	0,445	0,921**	0,979**	0,882*	0,782
$\theta_r$ (GG)	0,398	0,248	0,316	-0,866*	-0,619
$\log(k)$	-0,344	-0,795	-0,817*	-0,891*	-0,795
p	-0,425	0,831*	0,401	0,930**	-0,107
	Horizonte B				
$\theta_s$ (VG)	0,781	0,991**	0,830*	0,661	-0,861*
$\theta_r$ (VG)	0,689	0,539	0,889*	-0,654	-0,994**
$\log(\alpha)$	0,902*	-0,982**	-0,386	-0,061	0,528
n	0,631	0,957**	0,922**	0,608	0,985**
$\theta_s$ (BC)	0,786	0,991**	0,840*	0,634	-0,868*
$\theta_r$ (BC)	0,843*	0,527	0,742	-0,570	-0,994**
$\log(hb)$	0,876*	-0,983**	-0,075	-0,117	-0,907*
$\lambda$	0,985**	0,968**	0,948**	0,704	0,983**
$\theta_s$ (GG)	0,783	0,991**	0,836*	0,651	-0,866*
$\theta_r$ (GG)	0,680	0,305	-0,226	-0,805	-0,994**
$\log(k)$	-0,932**	-0,418	-0,849*	-0,458	-0,955**
p	0,540	0,958**	0,935**	0,551	0,985**

<sup>1</sup>n= 6 amostras dos horizontes A e B respectivamente; \* e \*\*, significativos aos níveis de probabilidade de 0,05 e 0,01 respectivamente.



**Tabela 4.** Análise descritiva dos atributos físico-hidráulicos dos horizontes A e B de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico sob mata e Sistema de Integração-Lavoura-Pecuária em Santa Tereza do Oeste – PR.

Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
Horizonte - A						
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	0,744	0,817	0,946	0,453	0,181	24,30
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	8	10	13	2	4	47,76
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,684	0,675	0,760	0,624	0,046	6,76
<i>Micro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,219	0,227	0,262	0,126	0,040	18,23
<i>Macro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,465	0,437	0,618	0,410	0,061	13,11
<i>RP</i> (-10 kPa), MPa	0,61	0,51	1,22	0,32	0,28	46,56
<i>RP</i> (-33 kPa), MPa	0,81	0,77	1,22	0,51	0,22	27,11
<i>K<sub>ear</sub></i> (-10 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	22,25	21,37	31,06	16,63	0,08	5,94
<i>K<sub>ear</sub></i> (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	18,24	18,07	23,80	12,21	0,09	6,37
<i>K<sub>sat</sub></i> (m s <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$5,09 \cdot 10^{-4}$	$6,27 \cdot 10^{-5}$	$3,58 \cdot 10^{-5}$	0,02
Horizonte - B						
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	0,860	0,905	1,195	0,423	0,308	35,74
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	5	4	15	0	4	70,18
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,653	0,642	0,771	0,548	0,093	14,19
<i>Micro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,173	0,153	0,354	0,043	0,114	65,48
<i>Macro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,479	0,494	0,529	0,417	0,036	7,45
<i>RP</i> (-10 kPa), MPa	1,42	1,79	2,37	0,19	0,94	66,20
<i>RP</i> (-33 kPa), MPa	1,64	1,99	2,50	0,45	0,88	53,30
<i>K<sub>ear</sub></i> (-10 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	21,17	12,99	50,52	1,47	0,49	43,17
<i>K<sub>ear</sub></i> (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	15,35	12,90	32,64	1,79	0,43	41,22
<i>K<sub>sat</sub></i> (m s <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>	$2,15 \cdot 10^{-4}$	$6,95 \cdot 10^{-5}$	$7,28 \cdot 10^{-4}$	$4,85 \cdot 10^{-6}$	$7,72 \cdot 10^{-5}$	0,04

<sup>(1)</sup>dados transformados em  $\log(K_{sat} + 1,5)$  e <sup>(2)</sup> dados transformados em  $\log(K_{ear} + 1)$ .

**Tabela 5.** Análise descritiva dos atributos físico-hidráulicos dos horizontes A e B de um NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico, sob mata e Sistema de Semeadura Direta em Leópolis – PR.

Variáveis	Horizonte A					
	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	1,186	1,151	1,488	0,822	0,216	18,23
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	28	28	31	22	3	10,44
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,585	0,601	0,681	0,493	0,065	11,05
<i>Micro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,370	0,386	0,464	0,299	0,054	14,62
<i>Macro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,214	0,214	0,262	0,173	0,029	13,56
<i>RP</i> (-10 kPa), MPa	1,37	1,15	2,50	0,45	0,69	50,50
<i>RP</i> (-33 kPa), MPa	1,63	1,67	2,37	0,70	0,56	34,52
$K_{ear}$ (-10 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	12,69	15,13	28,32	0,62	0,56	63,69
$K_{ear}$ (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	14,80	14,83	33,06	0,74	0,54	56,15
$K_{sat}$ (m s <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$5,94 \cdot 10^{-4}$	$4,04 \cdot 10^{-7}$	$5,37 \cdot 10^{-5}$	0,03
Variáveis	Horizonte B					
	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	1,306	1,328	1,494	1,054	0,179	13,67
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	36	36	41	31	3	8,47
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,547	0,537	0,636	0,483	0,060	11,06
<i>Micro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,354	0,350	0,389	0,322	0,022	6,32
<i>Macro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,193	0,188	0,247	0,145	0,040	20,56
<i>RP</i> (-10 kPa), MPa	1,80	2,2	2,5	0,4	0,72	40,89
<i>RP</i> (-33 kPa), MPa	1,90	2,2	2,5	1,0	0,65	34,23
$K_{ear}$ (-10 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	7,90	3,00	22,15	0,13	0,56	83,84
$K_{ear}$ (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	9,80	5,95	30,12	0,10	0,55	70,33
$K_{sat}$ (m s <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>	$4,72 \cdot 10^{-5}$	$5,25 \cdot 10^{-6}$	$1,82 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-7}$	$1,89 \cdot 10^{-5}$	0,01

<sup>(1)</sup> dados transformados em  $\log(K_{sat} + 1,5)$  e <sup>(2)</sup> dados transformados em  $\log(K_{ear} + 1)$ .

**Tabela 6.** Análise descritiva dos atributos físico-hidráulicos dos horizontes A e B de um CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico, sob mata e Sistema de Semeadura Direta em Ortigueira – PR.

Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
Horizonte - A						
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	1,292	1,321	1,441	0,897	0,140	10,85
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	8	8	11	6	2	23,49
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,490	0,480	0,646	0,428	0,054	11,09
<i>Micro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,429	0,432	0,462	0,364	0,027	6,39
<i>Macro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,062	0,031	0,282	0,004	0,076	123,55
<i>RP</i> (-10 kPa), MPa	1,89	2,05	2,37	0,32	0,58	30,93
<i>RP</i> (-33 kPa), MPa	2,25	2,37	2,50	1,09	0,38	16,88
$K_{ear}$ (-10 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	2,28	1,23	16,34	0,10	0,33	94,25
$K_{ear}$ (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	2,60	2,20	5,78	0,14	0,26	52,81
$K_{sat}$ (m s <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$7,58 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	0,01
Horizonte - B						
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	1,298	1,282	1,546	1,005	0,165	12,71
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	11	10	17	6	4	34,06
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,489	0,494	0,611	0,382	0,075	15,31
<i>Micro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,391	0,394	0,418	0,358	0,018	4,66
<i>Macro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,098	0,093	0,241	$9,640 \cdot 10^{-6}$	0,077	78,81
<i>RP</i> (-10 kPa), MPa	1,53	1,73	2,37	0,57	0,56	36,65
<i>RP</i> (-33 kPa), MPa	2,17	2,24	2,50	1,47	0,31	14,38
$K_{ear}$ (-10 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	6,36	3,24	24,06	0,46	0,37	52,58
$K_{ear}$ (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	14,95	6,71	81,74	0,78	0,47	50,62
$K_{sat}$ (m s <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$4,85 \cdot 10^{-6}$	$4,85 \cdot 10^{-5}$	$1,97 \cdot 10^{-7}$	$4,50 \cdot 10^{-6}$	0,01

<sup>(1)</sup> dados transformados em  $\log(K_{sat} + 1,5)$  e <sup>(2)</sup> dados transformados em  $\log(K_{ear} + 1)$ .

**Tabela 7.** Análise descritiva dos atributos físico-hidráulicos dos horizontes A e B de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, sob mata e Sistema de Semeadura Direta em Londrina – PR.

Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
Horizonte - A						
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	1,139	1,145	1,378	0,915	0,184	16,17
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	33	33	38	29	2	6,68
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,608	0,602	0,688	0,527	0,066	10,82
<i>Micro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,407	0,418	0,459	0,296	0,046	11,39
<i>Macro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,200	0,191	0,345	0,073	0,105	52,18
<i>RP</i> (-10 kPa), MPa	1,51	1,47	2,37	0,70	0,58	38,37
<i>RP</i> (-33 kPa), MPa	1,63	1,67	2,37	0,70	0,56	34,52
$K_{ear}$ (-10 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	31,92	22,22	91,77	0,23	0,74	67,42
$K_{ear}$ (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	36,94	26,39	103,65	0,55	0,74	63,37
$K_{sat}$ (m s <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$6,77 \cdot 10^{-5}$	$3,64 \cdot 10^{-4}$	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$3,29 \cdot 10^{-5}$	0,02
Horizonte - B						
$\rho_b$ (kg dm <sup>-3</sup> )	1,021	1,023	1,126	0,947	0,047	4,60
AD (dag kg <sup>-1</sup> )	9	1	27	0	11	129,32
$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,655	0,654	0,678	0,616	0,017	2,54
<i>Micro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,440	0,428	0,494	0,385	0,035	8,03
<i>Macro</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,215	0,235	0,276	0,122	0,047	21,94
<i>RP</i> (-10 kPa), MPa	0,92	0,96	1,22	0,57	0,23	24,86
<i>RP</i> (-33 kPa), MPa	1,90	2,24	2,50	0,96	0,65	34,23
$K_{ear}$ (-10 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	14,71	7,15	54,21	0,22	0,59	67,72
$K_{ear}$ (-33 kPa), $\mu\text{m}^2$ <sup>(2)</sup>	18,35	9,39	59,29	0,60	0,57	57,59
$K_{sat}$ (m s <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>	$3,14 \cdot 10^{-5}$	$3,03 \cdot 10^{-5}$	$7,28 \cdot 10^{-5}$	$2,18 \cdot 10^{-6}$	$7,72 \cdot 10^{-6}$	0,01

<sup>(1)</sup> dados transformados em  $\log(K_{sat} + 1,5)$  e <sup>(2)</sup> dados transformados em  $\log(K_{ear} + 1)$ .

**Tabela 8.** Análise descritiva das variáveis químicas de uma mata e de um Sistema de Integração-Lavoura-Pecuária dos horizontes A e B de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, de Santa Tereza do Oeste – PR.

Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
	Horizonte - A					
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,9	4,8	5,5	4,3	0,4	8,27
pH (KCl)	4,7	4,6	5,3	4,2	0,4	7,90
pH (H <sub>2</sub> O)	5,4	5,5	5,9	4,9	0,3	6,27
ΔpH	-0,7	-0,7	-0,6	-0,9	0,1	-15,70
PCZ	3,9	3,8	4,7	3,4	0,4	10,93
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,60	0,19	2,48	0,00	0,90	149,19
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,91	8,35	14,07	4,96	3,20	35,87
C (g dm <sup>-3</sup> )	57,83	43,09	102,20	37,24	25,74	44,51
P (mg dm <sup>-3</sup> )	29,4	24,9	68,2	2,6	27,1	92,17
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,52	6,15	8,62	1,77	2,61	47,31
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,34	1,27	2,63	0,37	0,72	54,10
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,42	0,37	0,98	0,12	0,27	64,41
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,27	7,74	11,78	2,38	3,29	45,31
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	16,18	15,41	21,29	14,54	1,93	11,96
V%	44,84	48,50	67,53	14,46	19,24	42,92
Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
	Horizonte - B					
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,9	4,8	5,4	4,3	0,4	8,55
pH (KCl)	4,7	4,6	5,2	4,2	0,4	7,57
pH (H <sub>2</sub> O)	5,4	5,3	5,9	5,0	0,3	6,24
ΔpH	-0,7	-0,8	-0,5	-0,9	0,1	-15,70
PCZ	4,0	4,0	4,6	3,4	0,4	10,22
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,56	0,34	2,33	0,00	0,72	127,94
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,93	7,33	15,16	3,97	3,99	50,28
C (g dm <sup>-3</sup> )	28,09	18,60	114,40	8,53	29,75	105,92
P (mg dm <sup>-3</sup> )	1,5	1,1	5,5	0,6	1,4	95,04
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,06	1,23	1,67	0,32	0,52	48,84
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,81	0,68	1,48	0,16	0,53	65,45
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,10	0,10	0,25	0,03	0,06	59,73
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,97	2,01	3,08	0,53	1,02	51,99
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	9,90	9,04	16,98	6,93	3,25	32,87
V%	24,00	22,38	43,28	4,49	16,65	69,38

**Tabela 9.** Análise descritiva das variáveis químicas de uma mata e de um Sistema de Semeadura Direta dos horizontes A e B de um NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico, de Leopólis – PR.

Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
	Horizonte - A					
pH (CaCl <sub>2</sub> )	6,3	6,4	7,1	5,2	0,7	11,47
pH (KCl)	5,9	6,1	6,9	4,8	0,8	12,69
pH (H <sub>2</sub> O)	6,7	6,8	7,5	5,8	0,6	9,38
ΔpH	-0,8	-0,8	-0,5	-1,0	0,2	-20,78
PCZ	5,1	5,3	6,4	3,8	0,9	17,38
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,79	3,31	6,20	2,03	1,45	38,23
C (g dm <sup>-3</sup> )	30,39	25,30	74,17	18,62	14,87	48,94
P (mg dm <sup>-3</sup> )	45,5	34,8	117,2	11,4	36,3	79,74
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	18,57	18,06	31,37	11,45	4,82	25,95
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,84	3,70	5,10	2,83	0,66	17,26
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,42	1,35	2,05	0,81	0,42	29,80
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	23,00	23,70	28,25	15,63	3,51	15,26
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	27,62	26,97	38,09	21,83	3,95	14,31
V%	85,49	87,77	94,67	71,59	7,06	8,26
Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
	Horizonte - B					
pH (CaCl <sub>2</sub> )	6,1	6,1	6,8	5,4	0,5	7,52
pH (KCl)	5,5	5,6	6,3	4,9	0,4	7,95
pH (H <sub>2</sub> O)	6,5	6,6	7,1	5,9	0,4	6,43
ΔpH	-1,0	-1,0	-0,8	-1,2	0,1	-12,47
PCZ	4,6	4,6	5,5	3,8	0,5	10,79
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,57	3,68	3,97	2,73	0,40	11,17
C (g dm <sup>-3</sup> )	11,06	9,04	21,85	4,94	6,38	57,68
P (mg dm <sup>-3</sup> )	5,4	3,6	14,0	1,8	4,0	74,47
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	13,44	11,86	25,75	10,35	4,61	34,28
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,03	3,78	6,70	2,79	1,07	26,62
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,38	0,22	1,65	0,10	0,44	115,66
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	17,85	15,95	30,57	13,82	5,41	30,33
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	21,31	19,38	33,74	17,23	5,17	24,25
V%	82,86	82,34	90,64	77,69	4,49	5,42

**Tabela 10.** Análise descritiva das variáveis químicas de uma mata e de um Sistema de Semeadura Direta dos horizontes A e B de um CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico, de Ortigueira – PR.

Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
	Horizonte - A					
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,2	4,2	4,6	3,8	0,3	6,51
pH (KCl)	4,0	4,0	4,4	3,6	0,3	6,84
pH (H <sub>2</sub> O)	4,9	4,9	5,1	4,6	0,2	3,75
ΔpH	-0,9	-0,9	-0,7	-1,1	0,1	-15,14
PCZ	3,1	3,1	3,7	2,6	0,4	12,53
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,83	1,31	4,14	0,13	1,66	90,88
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	9,42	9,40	13,06	6,20	2,26	24,02
C (g dm <sup>-3</sup> )	17,28	18,97	25,01	7,55	6,62	38,27
P (mg dm <sup>-3</sup> )	6,3	4,1	17,5	1,4	5,3	84,80
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,46	3,89	5,17	1,27	1,49	43,12
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,80	0,78	1,43	0,32	0,32	39,84
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,24	0,22	0,44	0,10	0,10	44,17
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,50	5,23	6,53	1,94	1,80	40,08
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	13,92	13,98	15,43	11,94	0,94	6,74
V <sup>o</sup> %	32,70	36,03	48,07	12,93	13,79	42,17
Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
	Horizonte - B					
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,3	4,2	4,8	3,9	0,3	7,25
pH (KCl)	4,0	4,0	4,6	3,7	0,3	7,42
pH (H <sub>2</sub> O)	4,9	4,9	5,2	4,4	0,3	6,06
ΔpH	-0,8	-0,8	-0,5	-1,1	0,2	-25,00
PCZ	3,2	3,0	4,0	2,8	0,4	12,94
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,64	1,44	4,60	0,07	1,43	87,18
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,38	8,05	13,06	4,60	2,62	31,22
C (g dm <sup>-3</sup> )	18,00	13,44	41,37	5,76	12,24	68,01
P (mg dm <sup>-3</sup> )	3,2	2,4	10,0	1,3	2,5	77,38
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,69	3,08	7,97	1,52	2,10	56,79
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,35	0,96	3,04	0,49	0,88	65,02
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,27	0,15	0,59	0,10	0,20	74,18
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,32	4,28	11,54	2,13	3,13	58,85
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	13,70	13,91	19,29	9,72	2,80	20,46
V <sup>o</sup> %	37,97	35,86	66,11	16,06	17,53	46,18

**Tabela 11.** Análise descritiva das variáveis químicas de uma mata e de um Sistema de Semeadura Direta dos horizontes A e B de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, de Londrina – PR.

Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
	Horizonte - A					
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,4	4,4	5,3	3,8	0,5	12,10
pH (KCl)	4,2	4,2	5,1	3,7	0,5	11,54
pH (H <sub>2</sub> O)	4,9	4,9	5,9	4,2	0,6	12,40
ΔpH	-0,7	-0,8	-0,5	-0,9	0,1	-20,87
PCZ	3,5	3,5	4,3	3,0	0,4	10,80
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,82	0,58	2,17	0,00	0,87	106,71
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,14	7,06	10,45	3,97	2,24	31,39
C (g dm <sup>-3</sup> )	15,63	14,67	18,50	12,70	2,35	15,05
P (mg dm <sup>-3</sup> )	16,0	4,7	64,9	1,2	20,3	126,92
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,30	3,47	5,90	1,15	1,64	49,73
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,54	1,42	3,16	0,41	1,04	67,28
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,24	0,24	0,38	0,14	0,07	30,37
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,08	5,15	9,33	1,80	2,71	53,27
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	12,22	12,23	13,30	11,08	0,70	5,71
V <sup>o</sup> %	40,86	42,56	70,15	14,69	20,26	49,58
Variáveis	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	DP	CV (%)
	Horizonte - B					
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,4	4,4	4,6	4,2	0,1	2,89
pH (KCl)	4,2	4,2	4,3	4,0	0,1	2,31
pH (H <sub>2</sub> O)	4,9	5,0	5,1	4,6	0,2	3,42
ΔpH	-0,7	-0,8	-0,6	-0,9	0,1	-13,43
PCZ	3,4	3,4	3,7	3,3	0,1	2,89
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,72	0,71	0,98	0,37	0,20	27,39
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,69	6,68	7,20	5,76	0,41	6,19
C (g dm <sup>-3</sup> )	9,22	9,03	13,12	6,03	2,44	26,51
P (mg dm <sup>-3</sup> )	2,8	2,5	4,6	1,3	1,3	44,69
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,19	2,20	2,67	1,77	0,29	13,30
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,01	1,01	1,43	0,53	0,32	31,90
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,06	0,05	0,10	0,05	0,02	25,71
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,27	3,40	4,06	2,37	0,56	17,14
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	9,96	9,84	10,58	9,57	0,35	3,53
V <sup>o</sup> %	32,70	33,90	41,34	24,76	4,98	15,22