



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

JOÃO HENRIQUE CAVIGLIONE

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO UTILIZANDO ÍNDICE S

Londrina
2012

JOÃO HENRIQUE CAVIGLIONE

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO UTILIZANDO ÍNDICES

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina.

Orientador: Prof. Dr. João Tavares Filho.

Londrina
2012

Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da Universidade Estadual de Londrina.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

C383q	<p>Caviglione, João Henrique. Qualidade física do solo utilizando índice S / João Henrique Caviglione. – Londrina, 2012. 115 f.: il.</p> <p>Orientador: João Tavares Filho. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2012. Inclui bibliografia.</p> <p>1. Solos - Qualidade – Teses. 2. Física do solo – Teses. 3. Estrutura do solo – Teses. 4. Solos – Densidade – Teses. 5. Solos – Porosidade – Teses. I. Tavares Filho, João. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 631.43</p>
-------	---

JOÃO HENRIQUE CAVIGLIONE

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO UTILIZANDO ÍNDICE S

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Tavares Filho
UEL – Londrina - PR

Profa. Dra. Adriana Aparecida Ribon
UEG – Palmeira de Goiás - GO

Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena
UEM – Maringá - PR

Prof. Dr. Marcelo Marques Muller
Unicentro – Guarapuava - PR

Profa. Dra. Inês Cristina de Batista Fonseca
UEL – Londrina - PR

Londrina, 4 de junho de 2012.

Dedico primeiramente a Deus, autor e
consumador da fé, porque “sem Ele, nada
podemos fazer”.

A memória do meu filho Filipe, recolhido por
Deus em tenra idade, mas presente
diariamente em meu coração.

A minha esposa Silene, ajudadora idônea e fiel,
pelo constante apoio e oração incessante.

Meus filhos, Gabriel e Mateus, “homens de
Deus”, rumo à estatura do Varão Perfeito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida em Cristo, pela saúde, força, inspiração e misericórdia renovadas a cada manhã.

Ao IAPAR, pela oportunidade concedida por meio da licença e pelo apoio em todos os aspectos necessários para o desenvolvimento do curso.

À UEL e ao Departamento de Agronomia, pela oportunidade concedida de participar do programa de pós-graduação, pelas aulas e conhecimento adquiridos em cada aula e créditos cursados, por todas as oportunidades de ampliar o conhecimento e pelos outros aspectos necessários ao desenvolvimento do curso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Tavares Filho, não só pela orientação, mas também pela sua amizade, pela compreensão, conselhos e conhecimentos compartilhados para além da sala de aula.

À Prof. Dra. Inês Cristina de Batista Fonseca pela amizade, apoio, incentivo e conselho nos momentos difíceis, conhecimento compartilhado para além da sala de aula.

Ao Prof. Dr. Osmar Rodrigues Brito, pela amizade, apoio e pelas horas e conhecimento compartilhados muito além do laboratório ou sala de aula.

Aos demais professores do Departamento.

Aos colegas de trabalho e à Pesquisadora Dra. Graziela Moraes Cesário Barbosa e à Pesquisadora Dra. Diva de Souza Andrade pelo incentivo, apoio e motivação até mesmo antes do início do curso.

A Dra. Adriana Aparecida Ribon pela amizade, conselhos e apoio enquanto professora do Departamento de Geociências.

Aos funcionários, técnicos e demais profissionais tanto do IAPAR como da UEL por todo apoio e suporte durante o curso.

Aos colegas de curso pela convivência e amizade durante o curso.

Aos meus pais, e à minha família pela compreensão durante as horas de trabalho necessárias e pelas orações levadas à presença de Deus.

A todos os amigos e colegas que me apoiaram durante o desenvolvimento do curso de alguma forma, e que não foram citados nominalmente.

O aspecto mais triste da vida de hoje é que a ciência ganha em conhecimento mais rapidamente que a sociedade em sabedoria.

(Isaac Newton)

CAVIGLIONE, João Henrique. **Qualidade física do solo utilizando índice S**. 2012. 115 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

RESUMO

A capacidade de um solo de funcionar dentro dos limites de um ecossistema para sustentar a produtividade biológica, mantendo a qualidade ambiental e promovendo a saúde animal e vegetal, é a expressão da qualidade do solo, de acordo com Karlen et al. (1997). Uma abordagem da qualidade do solo procura identificar indicadores de ordem biológica, física ou química e, dentre os vários indicadores propostos para a qualidade física de solo, o índice S tem recebido destaque. As Funções de Pedotransferência que estimam as características de retenção de água podem ser pontuais e paramétricas. O objetivo geral desta tese, composta por dois artigos, foi avaliar o índice S como indicador de qualidade do solo e a utilização de funções de pedotransferência de retenção de água no solo, na obtenção do índice S no estado do Paraná. Amostras de solo foram coletadas nas camadas 0-0,1 e 0,1-0,2 m e sob dois manejos (floresta nativa e solo explorado). No artigo A, totalizaram 21 locais com solos argilosos e muito argilosos, enquanto no artigo B (36 locais), foram amostrados solos em todas as classes texturais. Determinou-se densidade do solo e de partículas, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, 6 pontos de umidade da curva de retenção, carbono orgânico, argila, areia, silte, estabilidade de agregados, diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados. Para cada condição, foi ajustada uma curva de retenção de umidade pelo modelo Mualem–Van Genuchten e o índice S calculado. No Artigo A, a diferença entre os dois manejos foi avaliada nos atributos físicos do solo e no índice S, assim como as correlações do índice S com os atributos. No artigo B, o índice S foi calculado pelas curvas ajustadas com pontos e os parâmetros estimados pelas Funções de Pedotransferência Tomasella para o modelo Mualem–Van Genuchten. A correlação entre o índice S observado e estimado foi avaliada pela regressão linear passando pela origem, pelo coeficiente de determinação, pelo coeficiente de regressão ($\beta=1$) e o índice de eficiência da modelagem (Nash e Sutcliffe). No artigo A, o teste de Wilcoxon mostrou diferença no índice S entre os manejos com a significância de 0,0015 na profundidade de 0 a 0,1 m e de menor que 0,0001 de 0,1 a 0,2 m. O coeficiente de correlação de Pearson entre o índice S e a densidade e macroporosidade foi de -0,826 e 0,760, respectivamente. No artigo B, a Função de Pedotransferência paramétrica de Tomasella obteve o melhor coeficiente de determinação; no entanto, todos os índices de eficiência foram negativos. O Índice S observado apresentou-se sensível como um indicador de qualidade física do solo e demonstrou correlação significativa com a porosidade total, densidade do solo, macroporosidade e teor de carbono orgânico. Entretanto, no estado do Paraná e nas condições avaliadas, foram encontradas restrições na estimativa do índice S, usando as Funções de Pedotransferência estudadas.

Palavras-chave: Curva de retenção de umidade. Critério de informação de Akaike. Estrutura do solo. Porosidade do solo. Mualem-Van Genuchten.

CAVIGLIONE, João Henrique. **Soil physical quality utilizing the Index S**. 2012. 115 f. Thesis (Doctoral in Agronomy) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

ABSTRACT

The capacity of a soil to function within ecosystem boundaries to sustain biological productivity, maintain environmental quality, and promote plant and animal health is the expression of soil quality, according to Karlen et al. (1997). One approach of soil quality seeks to identify biological, physical or chemical indicators, and within the several indicators proposed for the soil physical quality the index S has been highlighted. The pedotransfer functions to estimate the water retention characteristics can be punctual and parametric. The general objectives of this thesis, which is composed of two articles, was to evaluate the S index as an indicator of soil quality and the use of pedotransfer functions for soil water retention, in obtaining the S in the state of Paraná. Soil samples were collected in the layers 0-0.1 and 0.1-0.2 m and two soil management (native forest and soil explored). In the manuscript A, it was totalized 21 sites sampled with clay soils and clayey, while in manuscript B (36 locations), it was sampled soils in all textural classes. It were determined bulk density, particle density, macroporosity, microporosity, total porosity, 6 points of soil moisture on retention curve, organic carbon, clay, sand, silt, aggregate stability, mean weight diameter, geometric mean diameter, and aggregate stability. For each condition, it was adjusted a moisture retention curve by model Mualem-Van Genuchten and it was calculated the index S. In manuscript A, the difference between two management was assessed on soil physical attributes and the index S, as well as the correlations the index S with the attributes. In manuscript B, the index S was calculated by fitted curves with points and parameters estimated by pedotransfer functions of Tomasella for Van Genuchten-Mualem model. The correlation between the observed and estimated index S was evaluated by linear regression through the origin, the coefficient of determination, the regression coefficient ($\beta = 1$) and the modeling efficiency (Nash and Sutcliffe). In manuscript (A), the Wilcoxon Test showed differences in the index S between soil managements with significance of 0.0015 at depth of 0 to 0.1 and less than 0.0001 at 0.1 to 0.2 m layer. Pearson's correlation coefficient between the index S and bulk density and macroporosity was 0.826 and 0.760, respectively. In manuscript (B), the pedotransfer parametric function of Tomasella obtained the best coefficient of determination, however all indices of modeling efficiency were negative. The index S observed appeared as a sensitive indicator of soil physical quality and showed significant correlation with the total porosity, bulk density, macroporosity and organic carbon content. However, in the Paraná state and the evaluated conditions, we found restrictions to estimate of the index S using the pedotransfer functions studied.

Keywords: Moisture retention curve. Akaike Information Criterion. Soil structure. Soil porosity. Mualem-Van Genuchten.

LISTA DE FIGURAS

REVISÃO DE LITERATURA

- Figura 2.1** – Curva típica de retenção de água no solo, com o ponto P como ponto médio entre a umidade residual e saturada.33
- Figura 2.2** – Exemplo de Curva de retenção de água no solo (A) com o ponto de inflexão e CRA de solos com duas densidades diferentes (B), expressando a degradação física pelo índice S.....36

ARTIGO A: ÍNDICE S COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA EM SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ

- Figura 3.1** – Distribuição dos locais amostrados e as regiões morfo-fisiográficas do Estado49
- Figura 3.2** – Granulometria (teores de areia, silte e argila) das 84 condições amostradas distribuídas no triângulo textural do SiBCS50
- Figura 3.3** – Correlação em cada ponto amostrado (n=84) entre o índice S e a porosidade total (a); densidade do solo (b); macroporosidade (c); e carbono orgânico do solo (d).....57
- Figura 3.4** – Correlação entre o índice S e a densidade do solo, nos pontos amostrados (n=21) em: (a) solo de floresta na camada de 0 a 0,1 m; (b) solo de floresta na camada de 0,1 a 0,2 m; (c) solo explorado na camada de 0 a 0,1 m; (d) solo explorado na camada de 0,1 a 0,2 m59
- Figura 3.5** – Correlação entre o índice S e a porosidade total do solo, nos pontos amostrados (n=21) em: (a) solo de floresta na camada de 0 a 0,1 m; (b) solo de floresta na camada de 0,1 a 0,2 m; (c) solo explorado na camada de 0 a 0,1 m; (d) solo explorado na camada de 0,1 a 0,2 m60

ARTIGO B: FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA OBTENÇÃO DO ÍNDICE S

Figura 4.1 – Distribuição dos locais amostrados e as regiões morfo-fisiográficas do Estado do Paraná.....	69
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica das amostras agrupadas segundo a região morfo-fisiográfica do local amostrado, no triangulo textural do SiBCS e as classes texturais	70
Figura 4.3 – Fluxograma dos passos para obtenção do Índice S, pelas funções de pedotransferência e pelos dados amostrais.....	72
Figura 4.4 – Índices S dos dados observados (144 curvas), obtidos de duas formas de estimar a umidade residual (fixo em 0,01 - Obs_001 e estimado - Obs_est) e a análise de regressão.....	76
Figura 4.5 – Índices S dos dados estimados pela FPT de Tomasella et al. (2003) paramétrica (Tom_par) em relação aos observados (a) com umidade residual estimada (Obs_est) e (b) com umidade residual fixada (Obs_001) com as respectivas análises de regressão (144 curvas)	77
Figura 4.6 – Índices S dos dados estimados pela FPT de Tomasella et al. (2003) pontual com umidade residual estimada (Tom_est) em relação aos observados (a) com umidade residual estimada (Obs_est) e (b) com umidade residual fixada (Obs_001) com as respectivas análises de regressão (144 curvas)	78
Figura 4.7 – Índices S dos dados estimados pela FPT de Tomasella et al. (2003) pontual com umidade residual fixada (Tom_001) em relação aos observados (a) com umidade residual estimada (Obs_est) e (b) com umidade residual fixada (Obs_001) com as respectivas análises de regressão (144 curvas)	79

LISTA DE TABELAS

REVISÃO DE LITERATURA

Tabela 2.1 – Valores de densidade do solo e macroporosidade considerados como críticos para indicação de ocorrência de compactação em cada faixa de teor de argila no solo	26
Tabela 2.2 – Valores do potencial matricial do solo em quatro condições hídricas, expressos em diferentes unidades	27
Tabela 2.3 – Modelos de curva de retenção de água utilizados no SWRC®	30

ARTIGO A: ÍNDICE S COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA EM SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ

Tabela 3.1 – Características de cada local, além da condição de floresta nativa.	48
Tabela 3.2 – Tabela de interpretação do coeficiente de correlação de Pearson	53
Tabela 3.3 – Momentos estatísticos (média e erro padrão) dos atributos analisados, nas quatro condições	54
Tabela 3.4 – Índice S de cada local e em cada condição amostrada, média e erro padrão, Akaike Information Criterion – AIC médio e erro padrão, média do coeficiente de determinação, e o nível de significância do teste pareado de Wilcoxon	55
Tabela 3.5 – Coeficiente de correlação de Pearson entre o índice S e os atributos avaliado e os momentos estatísticos	56
Tabela 3.6 – Coeficiente de correlação de Pearson entre o Índice S e os atributos macroporosidade e carbono orgânico do solo, em cada condição amostrada (n=21).....	58

ARTIGO B: FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA OBTENÇÃO DO ÍNDICE S

Tabela 4.1 – Momentos estatísticos das análises físicas das 144 condições.....	69
Tabela 4.2 – Relação das curvas ajustadas para estimativa do índice S, em razão da FPT, do tipo de estimativa da umidade residual e simbologia adotada	73
Tabela 4.3 – Momentos estatísticos do coeficiente de determinação (R^2), do Akaike Information Criterion (AIC) e índice S das 144 curvas ajustadas aos dados observados e as FPT	75

APÊNDICE A: Relação das curvas ajustadas em cada local amostrado

Tabela a.1 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0 a 0,1 m, com umidade residual estimada e floresta nativa. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC).....	98
Tabela a.2 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0,1 a 0,2 m, com umidade residual estimada e floresta nativa. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC).....	100
Tabela a.3 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0 a 0,1 m, com umidade residual estimada em solo explorado com a cultura e manejo encontrado. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC).....	101
Tabela a.4 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0,1 a 0,2 m, com umidade residual estimada em solo explorado com a cultura e manejo encontrado. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC).....	102
Tabela a.5 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0 a 0,1 m, com umidade residual fixa em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em floresta nativa. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC).....	103
Tabela a.6 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0,1 a 0,2 m, com umidade residual fixa em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em floresta nativa. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC).....	104
Tabela a.7 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0 a 0,1 m, com umidade residual fixa em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em solo	

explorado com a cultura e manejo encontrado. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC)..... 105

Tabela a.8 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0,1 a 0,2 m, com umidade residual fixa em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em solo explorado com a cultura e manejo encontrado. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC)..... 106

ANEXO A: Relação das avaliações estatísticas de FPT

Tabela A.1 – Lista de abreviaturas utilizadas no anexo A..... 108

Tabela A.2 – Lista das estatísticas baseadas em diferença citadas por Donatelli et al. (2004) para avaliação de FPT 109

Tabela A.3 – Lista das estatísticas baseadas em correlação citadas por Donatelli et al. (2004) para avaliação de FPT 112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIC	Critério de Informação de Akaike
CRA	Curva de Retenção de Água no Solo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FPT	Função de Pedotransferência
NRCS	Natural Resources Conservation Service
RMSE	Root Mean Square Error
SIBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SSSA	Soil Science Society of America
SWRC	Soil Water Retention Curve - Software
USDA	United States Department of Agriculture
VGM	Mualem-Van Genuchten

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 QUALIDADE DO SOLO	19
2.1.1 Na História	19
2.1.2 Abordagens Sobre a Qualidade do Solo	21
2.1.3 Qualidade Física do Solo	22
2.2 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	26
2.2.1 Escala pF	27
2.2.2 Umidade Gravimétrica e Volumétrica	28
2.2.3 Ajuste da Curva e os Modelos Matemáticos	29
2.2.4 Modelo Van Genuchten	32
2.3 ÍNDICE S	34
2.4 FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA - FPT	39
2.4.1 Métodos de Desenvolvimento de FPT	39
2.4.2 Avaliações de FPT	40
2.4.3 Usos e Parâmetros Estimados	42
3 ARTIGO A: ÍNDICE S COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA EM SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ	45
INTRODUÇÃO	46
MATERIAL E MÉTODOS	47
AJUSTE DA CURVA	51
ANÁLISES ESTATÍSTICAS	52
RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	61
4 ARTIGO B: FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA OBTENÇÃO DO ÍNDICE S	65
INTRODUÇÃO	66
MATERIAL E MÉTODOS	67
CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO E O ÍNDICE S	70

AJUSTE DA CURVA.....	71
ANÁLISES ESTATÍSTICAS	73
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
CONCLUSÃO.....	80
REFERÊNCIAS.....	80
5 CONCLUSÕES GERAIS	85
REFERÊNCIAS.....	86
APÊNDICES	97
Apêndice A – Relação das curvas ajustadas em cada local amostrado.	98
ANEXOS	107
Anexo A – Relação das avaliações estatísticas de FPT	108
Anexo B – Funções de pedotransferência utilizadas no artigo B.....	113

1 INTRODUÇÃO

No passado, muitos pesquisadores enfrentaram verdadeiras cruzadas até a atual consciência de busca de qualidade do solo. Considerado como o pai da Conservação de Solos pelos americanos, Hugh H. Bennett redigiu frases que permanecem atuais, como exemplo: "Uma agricultura próspera e duradoura depende de um suprimento adequado de terra produtiva¹ [...]" (Bennett, 1959; tradução nossa).

Nesta época, as discussões sobre manejo de solo enfatizavam principalmente o controle da erosão e minimização dos efeitos de perda de solo na produtividade. A partir da década de 1990, a busca pela qualidade do solo se tornou o foco de discussões que evoluíram da preocupação sobre a perda de solo para a perda da qualidade do solo. Passaram a considerar as abordagens de qualidade ambiental e sustentabilidade agrícola. A qualidade do solo passou a ser entendida como "capacidade (de um solo) de exercer as suas funções".

Atualmente, é possível estabelecer três linhas de pensamento sobre as abordagens de qualidade do solo. A primeira linha procura identificar indicadores biológicos, físicos e químicos de qualidade do solo. A segunda considera a matéria orgânica do solo como o indicador ideal de qualidade do solo. Já a terceira linha analisa os processos no sistema solo-planta numa abordagem sistêmica.

A qualidade física é encontrada no solo que permite a infiltração, retenção e disponibilidade de água às plantas e cursos d'água, responde ao manejo e resiste à degradação, permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes das plantas e favorece o crescimento das raízes.

Indicadores da qualidade física de solo foram propostos tais como: textura, profundidade de solo e de raízes, estrutura, densidade, permeabilidade ao ar, infiltração de água, capacidade de retenção e armazenamento da água, conteúdo de água, resistência do solo à penetração, porosidade, condutividade hidráulica, estabilidade de agregados do solo, densidade relativa, intervalo hídrico ótimo e o parâmetro ou índice S.

A curva de retenção de água no solo descreve algumas das propriedades hídricas do solo e o modelo de Van Genuchten é a representação mais

¹ "A prosperous and enduring agriculture depends on an adequate supply of productive land [...]"

utilizada. O ponto característico da curva é o ponto de inflexão, com curvatura igual a zero e com duas características: posição e inclinação. A tangente à inclinação é o índice S, o qual foi proposto como indicador da qualidade física do solo com a intenção de ser facilmente mensurável sem ambiguidade e com a utilização de equipamentos de laboratório de física de solo padrão. A determinação mais conveniente do índice S necessita do ajuste da curva a uma função matemática.

A inclinação da curva de retenção de água, o índice S, resumiria: A maioria das propriedades físicas do solo e seu comportamento, que são governados pela estrutura do solo; a estrutura do solo na distribuição de tamanho dos poros; a avaliação da distribuição dos tamanhos dos poros pela curva de retenção de água; uma medida da estrutura do solo. Portanto, o índice S poderia ser usado como indicador da qualidade física do solo, como uma variável capaz de prever algumas propriedades físicas do solo e alguns aspectos do comportamento do solo.

O termo função de pedotransferência foi introduzido para definir as funções preditivas de características do solo que apresentam dificuldade de determinação, ou custo elevado, obtendo-as a partir de dados disponíveis. As primeiras funções de pedotransferência, e provavelmente ainda sejam as mais estudadas, foram desenvolvidas para estimar as propriedades hídricas do solo, tais como a condutividade hidráulica, a curva de retenção de água no solo, água disponível e pontos de tensão e umidade.

Considerando as variáveis preditas, podemos diferenciar dois grupos nas funções de Pedotransferência que estimam a retenção de água do solo, a saber: pontuais e paramétricas. As funções de pedotransferência paramétricas, normalmente utilizam o modelo Mualem–Van Genuchten e estimam os parâmetros da curva de retenção de água no solo. As pontuais estimam a umidade do solo em pontos de tensão específicos na curva de retenção. O critério de informação de Akaike – AIC vem sendo utilizado com muita frequência para a avaliação das funções de pedotransferência.

Portanto, espera-se que seja possível identificar a qualidade física do solo por meio da determinação do índice S, e que seja possível determiná-lo por meio de funções de pedotransferência. Dessa forma, além de reduzir as determinações de laboratórios que são demoradas e caras, permitir-se-á a avaliação do índice S para a utilização em trabalhos de campo.

Assim, o objetivo geral desta tese foi avaliar o índice S como indicador de qualidade do solo e a utilização de funções de pedotransferência de retenção de água no solo, na obtenção do índice S no estado do Paraná.

Esse objetivo se desdobrou em outros específicos, os quais foram: avaliar o índice S como indicador de qualidade física do solo; verificar os atributos físicos do solo que melhor explicam o índice S em condições de diversidade de solo; utilizar as funções de pedotransferência de estimativa de pontos de umidade e curvas de retenção para a obtenção do Índice S.

Para tanto, é apresentada uma revisão bibliográfica geral sobre os temas relacionados e em seguida dois artigos. No primeiro artigo, com o título “**Índice S como indicador de qualidade física em solos do estado do Paraná**”, foram avaliados somente solos argilosos e muito argilosos. Justifica-se pela possibilidade da fração granulométrica areia apresentar valores de índice S próximos a solos de boa qualidade estrutural aos solos, e buscou-se obter índices S que fossem diferenciados pelos manejos do solo. No segundo artigo, com o título “**Funções de pedotransferência na obtenção do índice S**”, foram incluídas todas as classes texturais, pois se buscou encontrar funções que permitissem obter o Índice S equivalente ao observado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 QUALIDADE DO SOLO

2.1.1 Na História

A qualidade do solo não é um tema recente e, segundo Lal (1999), sistemas de avaliação foram utilizados por culturas ancestrais, como na China e Índia. A avaliação indiana é baseada no conceito de preço relativo e continua sendo utilizada em áreas rurais para avaliação de solo. Carter et al. (1997) também citam escritos antigos de Columella ao império romano, com descrição e classificação detalhada do solo, destacando as virtudes e expondo os cuidados durante o cultivo.

Mais recentemente, Lowdermilk (1953, tradução nossa) afirma que: "Se o solo for destruído, então a nossa liberdade de escolha e ação desaparece, condenando as gerações presentes e futuras a privações e riscos desnecessários.²" No entanto, a discussão sobre a qualidade do solo aumentou a partir da década de 1990, quando passaram a considerar as abordagens de qualidade ambiental e sustentabilidade agrícola (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

Karlen et al. (2003) ressaltaram que nas décadas que antecederam a de 1990, as discussões sobre manejo de solo enfatizavam o controle da erosão e minimização dos efeitos de perda de solo na produtividade. Nessa época, buscando a sustentabilidade, o conceito de tolerância de perda de solo foi proposto e discutido (SCHERTZ, 1983; HALL; LOGAN; YOUNG, 1985). Karlen et al. (2003) reforçam ainda que os projetos que estudam a qualidade do solo não possuem fins em si próprios, mas constituem ferramentas para avaliar e entender os efeitos do manejo de solo no recurso específico do solo.

2.1.1.1 O conceito

Karlen et al. (1997) observaram divergências no conceito de qualidade do solo, da mesma forma que a definição de tolerância de perda de solo

² "If soil is destroyed, then our liberty of choice and action is gone, condemning this and future generations to needless privations and dangers".

também recebeu críticas e divergências (JOHNSON, 1987; SPAROVEK; DE MARIA, 2003; LI et al., 2009). Descrevem que enquanto para uns, o conceito de qualidade do solo parecia desnecessário, para outros, a quantificação seria impossível em razão das diferenças naturais existentes entre as ordens de solos e entre as séries.

Sojka e Upchurch (1999) e Letey et al. (2003) encontram-se entre os autores que questionam a definição de atributos e a utilização do conceito, argumentando que: “Os profissionais e cientistas do solo devem buscar a qualidade do manejo do solo antes do manejo da qualidade do Solo”. Na verdade, estas divergências não são excludentes e se completam, reforçando a afirmação de Araújo (2011) de que o conceito ainda se encontra em evolução, diferente da qualidade do ar e da água com padrões e regulamentações já definidos.

Para a Sociedade Americana de Ciência do Solo (Soil Science Society of America – SSSA), qualidade do solo é a: “Capacidade (de um solo) de funcionar”, e na versão expandida “Capacidade ou habilidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens” (FUNCK, 2008).

Contudo, outros autores também propuseram suas definições, não necessariamente contraditórias. Para Gregorich et al. (1994), a qualidade do solo poderia ser brevemente definida como uma medida resumida tanto da capacidade do solo para funcionar, como da sua eficácia relativa para um determinado uso específico. Letey et al. (2003) consideram que se trata das propriedades físicas, químicas e biológicas de um solo as quais afetam seu uso e ressaltam que uso é diferente de função, e que não seria possível quantificar a “capacidade de exercer a função”.

Segundo Hanks e Lewandowski (2003), o Serviço de conservação de recursos naturais (Natural resources conservation service – NRCS), do Departamento de agricultura americano (USDA), considera a qualidade do solo como sendo: A habilidade ou capacidade do solo para desempenhar certas funções, tais como: (1) Ciclagem efetiva de nutrientes, tornando-os disponíveis para as plantas enquanto minimiza a lixiviação e escoamento superficial; (2) minimização da erosão e o escoamento superficial e maximização da capacidade de retenção de água; (3) adsorver e filtrar o excesso de nutrientes, sedimentos e poluentes,

assegurando a qualidade nos cursos d'água; (4) fornecer um ambiente radicular saudável e habitat para diversidade de biota do solo; e (5) prover fundação estável para estruturas construídas pelo homem, que diferem dos padrões ideais para crescimento de plantas e hidrologia.

O glossário de termos da Sociedade Americana de Ciência do Solo (Soil Science Society of America – SSSA) diferencia a qualidade do solo (soil quality) de qualidades do solo (soil qualities), sendo definidos como:

Qualidades do solo - Atributos inerentes do solo que são inferidos de características do solo ou de observações indiretas. p. e. fertilidade, erodibilidade e compactabilidade.³

Qualidade do solo - A capacidade de um solo de funcionar dentro dos limites de um ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental, e promover a saúde animal e vegetal.⁴ (FUNCK, 2008, tradução nossa).

2.1.2 Abordagens Sobre a Qualidade do Solo

Vezzani e Mielniczuk (2009) descrevem que é possível estabelecer três linhas de pensamento sobre as abordagens de qualidade do solo:

- a. A primeira linha procura identificar quais os melhores indicadores de qualidade do solo, tanto de ordem biológica, física ou química.
- b. Os Pesquisadores que se coadunam na segunda linha consideram a matéria orgânica do solo como o indicador de qualidade do solo ideal.
- c. A terceira linha, alternativa, deixa de lado a busca de atributos indicadores e analisa os processos no sistema solo-planta, surgindo então uma abordagem sistêmica.

³ "Soil qualities - Inherent attributes of soil that are inferred from soil characteristics or indirect observations. e.g. compactability, erodibility, and fertility".

⁴ "Soil quality - The capacity of a soil to function within ecosystem boundaries to sustain biological productivity, maintain environmental quality, and promote plant and animal health".

2.1.3 Qualidade Física do Solo

A qualidade física é encontrada no solo que, segundo Reichert et al. (2003), permite a infiltração, retenção e disponibilidade de água às plantas e aos cursos d'água, responde ao manejo e resiste à degradação, permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes das plantas e permite o crescimento das raízes.

No contexto da primeira linha de abordagem de qualidade de solo, que procura identificar os melhores indicadores, tanto de ordem biológica, quanto de ordem física ou química, Vezzani e Mielniczuk (2009) recomendam que estes indicadores devessem se relacionar com cinco funções do solo: habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de água; habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de elementos químicos; promover e sustentar o desenvolvimento de raízes; manter um habitat biológico adequado e responder ao manejo, resistindo à degradação.

Vários parâmetros físicos já foram propostos como indicadores da qualidade física de solo e são citados por alguns autores (SCHOENHOLTZ; VAN MIEGROET; BURGER, 2000; GRIFFITHS et al., 2010) como, por exemplo: a textura, profundidade de solo e de raízes, avaliação visual da estrutura pelo método da vanga (BALL; BATEY; MUNKHOLM, 2007), densidade do solo; permeabilidade ao ar; infiltração de água no solo; capacidade de armazenamento e retenção de água; conteúdo de água no solo; resistência do solo à penetração; porosidade do solo; condutividade hidráulica e estabilidade de agregados do solo. Recentemente, outros indicadores foram propostos, tais como a densidade relativa (CARTER, 1990), o intervalo hídrico ótimo (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999) e o parâmetro ou índice S (DEXTER, 2004a).

2.1.3.1 Indicadores de qualidade física do solo

2.1.3.1.1 *Textura do solo*

A Sociedade brasileira de ciência do solo define textura do solo como a representação das proporções relativas das frações areia, silte e argila do

solo, descrita em classes (CURI et al., 1993). As classes silte e, principalmente, areia podem receber uma subdivisão de fina, média e grossa (HILLEL, 1982). O tamanho que divide cada classe depende do sistema e da classificação adotada. O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) classifica como fração argila as partículas menores que 0,002 mm; como fração silte, entre 0,05 e 0,002 mm; como fração areia fina, entre 0,2 e 0,05 mm; como fração areia grossa, entre 2 e 0,2 mm e de calhaus e cascalho as partículas maiores que 2 mm (SANTOS et al., 2005; SANTOS et al., 2006).

Os grupamentos ou classes texturais pelo SiBCS são: textura arenosa; média; argilosa; muito argilosa e siltosa. O SiBCS faz uma proposta para subgrupamentos texturais aplicados ao 5º nível (famílias). Essa proposta ainda está em discussão e a proposição é para seja a seguinte: textura muito arenosa; arenosa ou arenosa média; média leve; média ou média argilosa; média siltosa; siltosa; argilosa; muito argilosa.

Araújo et al. (2009) ordenaram três áreas indígenas classificadas como “terra boa” pela etnopedologia da cultura guarani, na região de Ubatuba, São Paulo. Comparando vários atributos físicos (densidade do solo, densidade de partículas, diâmetro médio ponderado, volume total de poros, argila, argila dispersa em água, areia, areia fina, areia grossa, silte e grau de floculação), químicos (pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} , H, P disponível, carbono orgânico, soma de bases, cap. de troca de cátions, saturação de base e saturação de Al^{3+}) e morfológicos, observaram que a textura foi o atributo que melhor ordenou as áreas estudadas de acordo com a classificação indígena, aproximando os conhecimentos pedológico e tradicional.

2.1.3.1.2 *Densidade do solo*

A densidade do solo seco, ou simplesmente densidade do solo, expressa a razão da massa de solo seca pelo volume, incluindo a distribuição dos espaços porosos. É relacionada com a densidade de partícula que expressa a fase sólida do solo, e a fase gasosa e/ou líquida (porosidade). É expressa em unidade de massa pelo volume (HILLEL, 1982).

A densidade apresenta variação em relação à textura do solo, sofre influência da compactação do solo, pelo trânsito de máquinas e equipamentos e pelo

manejo (ARAÚJO, 2011). Pode ser obtida pelo método do anel volumétrico ou pelo método do torrão impermeabilizado (CLAESSEN et al., 1997). Reinert, Reichert e Silva (2001), analisando dados experimentais e resultados de literatura, propõem os valores críticos de densidade do solo em relação à textura, caracterizando o solo como compactado, densidades superiores a $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ em solos argilosos (teor de argila maior que 550 g g^{-1}), maiores que $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ em solos de textura média (argila entre 200 e 550 g g^{-1}) e maiores que $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ em solos arenosos (argila menor que 200 g g^{-1}).

Araújo, Tormena e Silva (2004) analisaram a densidade do solo entre as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico e compararam o efeito da floresta nativa e de 20 anos de preparo convencional. Observaram que, na camada de 0 a 0,2 m, a densidade do solo nas áreas cultivadas foi de cerca $1,70 \text{ Mg m}^{-3}$ maior que a densidade encontrada nas áreas com floresta nativa, com cerca de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$.

No entanto, Logsdon e Karlen (2004) estudaram a densidade do solo como indicador de qualidade, durante os primeiros 5 anos após a conversão para plantio direto em 3 microbacias (entre 30 e 43 ha) mantidas pelo Serviço de Pesquisa do Departamento de Agricultura Americano (US Dep.of Agriculture-USDA, Agricultural Research Service-ARS). Observaram que na utilização da densidade do solo em um índice de qualidade de solo, o fator crítico é a determinação no momento oportuno, pois observaram, em alguns momentos transitórios, densidades de solo elevadas que não interferiram na produtividade. Eles atribuem que a continuidade da macroporosidade tenha permitido o crescimento de raiz mesmo na presença de densidades transitórias maiores.

2.1.3.1.3 Porosidade

A porosidade total do solo é altamente relacionada com a densidade do solo, é um índice do volume de poros do solo, e segundo Hillel (1982), geralmente se encontra entre $0,3$ a $0,6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Em laboratório pode ser obtida pela relação entre a densidade de partículas e a densidade do solo (método indireto), ou pelo método direto, com uma amostra indeformada (anel volumétrico). Neste caso,

pela relação entre a massa (ou volume) d'água de uma amostra saturada e o volume do anel (CLAESSEN et al., 1997).

A porosidade total pode ser dividida em macroporosidade e microporosidade e pode ainda ser considerada a mesoporosidade como uma classe intermediária. A separação entre a macroporosidade e microporosidade é pela tensão de referência de 60 ou 100 cm de coluna d'água, respectivamente 6 ou 10 kPa (aproximadamente). A massa de água desde a saturação até a umidade nesta tensão em relação ao volume do anel fornece a macroporosidade. A microporosidade é dada pela massa de água retida na amostra a partir desta tensão (até peso seco) pelo volume.

Dexter e Richard (2009a) descrevem duas principais formas pelas quais a macroporosidade pode ser produzida. A macroporosidade produzida pelo preparo convencional de solo é desorganizada e irregular, e normalmente se reduz com o tempo e a chuva. Em contrapartida, os "bioporos" são produzidos por raízes ou túneis de minhoca, são essencialmente lineares e com pouca conectividade, dificilmente formando uma rede.

Ainda podem ser consideradas as porosidades estrutural e textural. A porosidade textural ocorre entre as partículas primárias do solo, portanto, é dependente da textura do solo e da granulometria. Também é chamada de matricial e ocorre em poros com altas tensões de retenção de água (500 kPa). A porosidade estrutural depende da microestrutura do solo, da agregação e micro fraturas ou poros planos do solo. Entretanto, as duas porosidades são influenciadas pelo conteúdo de matéria orgânica do solo (DEXTER; RICHARD, 2009b).

Segundo Baver, Gardner e Gardner (1972), os valores críticos se encontram abaixo dos valores compreendidos entre 0,10 e 0,16 m³ m⁻³. Devido à relação existente entre a densidade do solo, textura e a porosidade, Michelin (2005) estabelece valores críticos de macroporosidade, como indicação de compactação, para 7 faixas distintas de teores de argila (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Valores de densidade do solo e macroporosidade considerados como críticos para indicação de ocorrência de compactação em cada faixa de teor de argila no solo

Teor de argila (g kg ⁻¹)	Densidade do solo (Mg m ⁻³)	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)
Abaixo de 200	1,60	0,10
200 a 300	1,55	0,10
300 a 400	1,50	0,08
400 a 500	1,45	0,08
500 a 600	1,40	0,06
600 a 700	1,35	0,06
Acima de 700	1,30	0,06

Fonte: Michelin (2005)

Cortez et al. (2011) trabalharam em um Argissolo Amarelo distrófico típico, com teores de argila entre 90 a 180 g kg⁻¹, com cinco tipos de preparo de solo que foram: sem preparo, com escarificador e três preparos com grades com variação na profundidade e tamanho. Observaram que a porosidade total foi significativamente maior no tratamento “sem preparo”, somente na camada de 0 a 0,1 m (superficial). Tormena et al. (2007), trabalhando em Latossolo Vermelho distroférico, com 870 g kg⁻¹ de argila, analisaram a variação temporal de propriedades do solo em plantio direto, plantio direto com escarificação a cada 4 e 2 anos. Observaram alteração da porosidade devido ao tráfego de máquinas e equipamentos.

2.1.3.1.4 Curva de retenção de água no solo e índice S

A curva de retenção de água no solo e índice S são tratados nos itens 2.2 e 2.3, respectivamente.

2.2 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A água no solo é retida por uma força que depende, dentre outros fatores, da distância entre as fases sólida e líquida (solução do solo). Em outras palavras, da espessura do filme líquido que cobre as partículas do solo, em seus poros, onde atuam as forças de adsorção e capilaridade (LIBARDI, 2005). A energia para remover esta água ou o seu estado energético é definida por uma tensão, e pode ser dada pela energia potencial da água entre dois pontos verticais. Este

potencial de água no solo ou potencial matricial da água é a tensão ou sucção necessária para remover a água. Também define a absorção de água pelas plantas, podendo interferir na evapotranspiração (HANKS; ASHCROFT, 1980).

A condição hídrica de um solo é definida pelo potencial de água no solo, como se observa na Tabela 2.2. Essa, apresenta o potencial de água em 4 condições e os respectivos valores apresentados no sistema internacional e outras 5 unidades diferentes. Os valores não são absolutos e podem sofrer pequenas alterações entre autores ou tipos de solo. O solo saturado foi considerado com a tensão de 1 cm de coluna de água (cca), pois na prática apresenta pequenos valores negativos (HANKS; ASHCROFT, 1980).

O potencial de água no solo pode ser expresso em unidade de energia por massa ou por volume de água, respectivamente, joules kg^{-1} e kPa (HILLEL, 1982). Os valores do potencial (ψ ou ψ) são negativos e podem ser expressos em tensão de água no solo (ψ), que são positivos (LIBARDI, 2005).

Tabela 2.2 – Valores do potencial matricial do solo em quatro condições hídricas, expressos em diferentes unidades

Condição hídrica do solo	Unidade do potencial mátrico em várias unidades					
	kPa (ou J kg^{-1})	cca	hPa	Atm	pF	Ergs s^{-1}
Saturação (aproximada)	-0,098	-1	-0,98	$-1 \cdot 10^{-3}$	0	-980
Capacidade de campo (aproximada)	-9,8	-100	-98	-0,1	2,0	$-9,8 \cdot 10^4$
P. de murcha permanente	-1470	$-1,5 \cdot 10^4$	$-1,47 \cdot 10^4$	-14,9	4,2	$-1,47 \cdot 10^7$
Seca ao ar (UR 85%)	$-2,16 \cdot 10^4$	$-2,2 \cdot 10^5$	$-2,16 \cdot 10^5$	-218	5,4	$-2,16 \cdot 10^8$

Fonte: Adaptado de Hanks e Ashcroft (1980). Unidades: kPa (quiloPascal), J kg^{-1} (joule por quilograma), cca (cm de coluna de água), hPa (hectoPascal), Atm (atmosfera), pF (log de cca), Ergs g^{-1} (ergs por grama).

2.2.1 Escala pF

A escala pF, presente na Tabela 2.2, foi proposta por Schofield (1935) com o nome de “suction”, em que o “p” é o indicativo de logaritmo com a mesma analogia da escala de acidez de Sørensen (pH). Já “F” indica a diferença de energia livre (“free”), medida na escala da força gravitacional, expressa na equação 2.1 (SCHOFIELD, 1935).

$$pF \equiv \log_{10} h \quad (2.1)$$

Em que:

h - tensão cca (centímetros de coluna de água).

Schofield (1935) alega que a escala logarítmica de pF apresenta vantagens, uma vez que permite representar em um único gráfico toda a gama de tensões, desde alguns cms (solo próximo ao saturado) com pF próximo a zero, até mais de 10 quilômetros (solo seco ao ar, com umidade relativa ar em cerca de 50%) com pF=6. Os solos secos em estufa se aproximam de pF≈7, que representa o extremo da escala proposta (SCHOFIELD, 1935; GROENEVELT; GRANT, 2004).

2.2.2 Umidade Gravimétrica e Volumétrica

Embora o potencial de água no solo controle a condição hídrica do solo (Tabela 2.2) e a entrada de água na planta, a mensuração direta do potencial, trata-se de tarefa complexa, a qual depende de tensiômetros. A forma mais comum e simples é a avaliação do conteúdo de água no solo, ou simplesmente umidade do solo. É avaliada pela relação direta entre a quantidade de água em razão da quantidade de solo, que pode ser em função da massa (peso) ou do volume, conforme equação 2.2 (LIBARDI, 2005).

$$U_{\text{gravimétrica}} = M_a / M_s$$

$$\theta_{\text{volumétrica}} = \begin{cases} V_a / V_t \\ V_a / (V_s + V_a + V_{ar}) \end{cases} \quad (2.2)$$

Em que:

$U_{\text{gravimétrica}}$ = umidade gravimétrica (base em massa);

$\theta_{\text{volumétrica}}$ = umidade volumétrica (base em volume);

M_a = massa de água;

M_s = massa de solo;

V_a = volume de água (ou massa, densidade da água = 1);

V_t = volume total (anel volumétrico);

V_s = volume de solo;

V_a = volume de água;

V_{ar} = volume de ar da amostra.

A relação entre a umidade gravimétrica (U) e volumétrica (θ) é estabelecida em função da densidade do solo (ρ_s) e da água (ρ_a), caso seja considerada diferente de 1, expressa pela equação 2.3 (LIBARDI, 2005).

$$\theta = U \times \left(\frac{\rho_s}{\rho_a} \right) \quad (2.3)$$

O conteúdo de água no solo pode expressar diferentes condições hídricas, pois a umidade gravimétrica ou volumétrica do solo é influenciada por vários atributos do solo, como textura, densidade, carbono orgânico, porosidade, tipo e composição da fração argila. Portanto, a relação entre o potencial de água no solo (ψ) e o seu conteúdo é característica individual, sendo representada por uma função que é denominada curva característica de retenção da água no solo (BARBOUR, 1998), curva de retenção de água no solo ou simplesmente curva de retenção (LIBARDI, 2005).

Foram desenvolvidas muitas funções matemáticas empíricas tentando representar a curva de retenção de água no solo. Entretanto, Kastanek e Nielsen (2001) relatavam que, até então, as funções empíricas ainda eram usadas para ajustar as curvas de retenção de água no solo porque ainda não foram desenvolvidas expressões matemáticas teóricas capazes de representar adequadamente essa relação físico-hídrica.

2.2.3 Ajuste da Curva e os Modelos Matemáticos

Buscando o melhor ajuste da curva de retenção de água – CRA, Dourado-Neto et al. (2000) desenvolveram o software SWRC, que estima os parâmetros da CRA, por meio de interações sucessivas. O SWRC realiza o ajuste de doze modelos diferentes de curva de retenção que foram reunidos e são apresentados na Tabela 2.3, com algumas características e a equação que define

cada modelo. Além desses modelos, outros continuam sendo avaliados e desenvolvidos.

Rossi e Nimmo (1994) desenvolveram modelos para representar desde a umidade saturada até umidades abaixo de 1500 kPa. Trabalharam com dois modelos, o primeiro combinava funções logarítmicas e de potência, enquanto o segundo utilizava somatórios e foi chamado pelos autores como modelo de soma. Avaliaram os modelos em 7 conjuntos de dados de solo com teores de argila variando de 51 a 468 g kg⁻¹, disponíveis em literatura. Segundo os autores, os modelos se mostraram práticos e realistas desde a saturação até pontos com umidade muito baixa.

Prunty e Casey (2002), utilizando o que os autores chamam de “funções flexíveis”, geraram a CRA a partir de dados de literatura, e compararam com algumas abordagens disponíveis. A raiz quadrada do erro quadrático médio (root mean square error – RMSE) obtida pelo modelo utilizando as funções flexíveis foi melhor que os ajustes obtidos pelos modelos de Brooks e Corey-1964 e de Van Genuchten-1980.

Tabela 2.3 – Modelos de curva de retenção de água utilizados no SWRC[®]

Modelo ou Autor-ano	Modelo $\theta = f(\psi)$	Restrição	M.original $\psi = f(\theta)$
Exponencial	$\theta = -\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{\psi}{\alpha}\right)$	$\begin{cases} \beta > 0 \\ 0 < \psi < \alpha \end{cases}$	$\psi = \alpha e^{-\beta\theta}$
Potência	$\theta = (\psi/\alpha)^{\frac{1}{\beta}}$	$\psi > 0$	$\psi = \alpha e^{-\beta}$
Visser-1966	$\psi = \frac{\alpha(f-\theta)^\beta}{\theta^m}$	$f = \theta_s$	$\psi = \frac{\alpha(f-\theta)^\beta}{\theta^m}$
Farrel e Larson-1972	$\theta = \theta_s$ $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[1 - \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{\psi}{\psi_{crit}}\right)\right]$	$\psi < \psi_{crit}$ $\psi \geq \psi_{crit}$	$\psi = \psi_{crit} e^{\alpha \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)\right]}$
Simmons et al.-1979	$\theta = \phi + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{\psi}{\alpha} + 1\right)$	$\beta < 0$	$\psi = \alpha \left[e^{\beta(\theta - \phi)} - 1\right]$
Libardi et al.-1979	$\theta = \theta_s + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{\psi}{\alpha} + 1\right)$	$\beta < 0$	$\psi = \alpha \left[e^{\beta(\theta - \theta_s)} - 1\right]$
Campbell-1974	$\theta = \theta_s$	$\psi < \psi_e$	$\psi = \psi_e \left(\theta_s / \theta\right)^\lambda$
Gardner-1958	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) e^{\frac{\gamma\psi}{2} \left(1 + \frac{\gamma\psi}{2}\right)^{\frac{2}{m+2}}}$	$\psi \geq 0$	
Brooks e Corey-1964	$\theta = \theta_s$	$0 \leq \psi < \frac{1}{\alpha}$	

	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(\alpha\psi)^\lambda}$	$\psi \leq \frac{1}{\alpha}$
	$\theta = \theta_e$	$0 \leq \psi < \psi_e$
Rogowski-1971	$\theta = \theta_r + \frac{\theta_{15} - \theta_e}{\ln(\psi_{15} - \psi_e + 1)} \ln(\psi_{15} - \psi_e + 1)$	$\psi \leq \psi_e$
Van Genuchten-1980	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$	$\psi \geq 0$
Driessen-1986	$\theta = \theta_s \psi^{-\gamma \cdot \ln(\psi)}$	$\psi \geq 1$

Fonte: Dourado-Neto et al., (2000)

Parâmetros: α , β , λ , γ , m , n = constantes, θ = conteúdo d'água no solo, Ψ = potencial de água no solo

Kastanek e Nielsen (2001) utilizaram a interpolação cúbica de spline, para gerar um modelo de CRA e compararam com os modelos de Brooks e Corey-1964 e Van Genuchten-1980, com dados de solos disponíveis na literatura. Concluíram que este método proporcionou uma representação adicional da CRA. Wesseling et al. (2008) também utilizaram interpolação cúbica de spline, gerando modelo de CRA e curva de condutividade hidráulica. Utilizaram dados de solos da Holanda do banco de dados Priapus. Consideraram que a aproximação por spline descreveu muito bem as relações hidrológicas.

Groenevelt e Grant (2004) apresentaram um novo modelo para a CRA para solucionar o que os autores denominam de “problema com umidade residual”. Este ocorre quando os modelos normalmente utilizados, após o ajuste, fornecem estimativas não realistas da umidade residual, apresentando valores negativos ou positivos muito grandes. O modelo foi avaliado com dados, disponíveis na literatura, de 9 solos diferentes, com texturas desde arenosa (duna) à argilosa e foi considerado ajustado nas tensões mais altas.

Yang e Lu (2012) desenvolveram um modelo baseado na relação geométrica e mecânica das ligações entre líquido e partículas esféricas, para prever a CRA. Analisaram o modelo frente a alterações de densidade e umidade e concluíram que ele seria aplicável também a solos coesivos além de arenosos.

Recentemente, o desenvolvimento dos modelos de CRA tem buscado os modelos bimodais, que possuem dois pontos de inflexão e apresentam melhor suporte das teorias do comportamento da água em espaços porosos em relação aos unimodais, que são mais empíricos (CORNELIS et al., 2005). Os

modelos bimodais permitem fazer distinção entre a porosidade textural e estrutural do solo, devido aos dois pontos de inflexão presentes (DEXTER et al., 2008).

Omuto (2009) descreveu um modelo biexponencial de CRA com base na teoria poro-espaço para as porosidades estrutural e textural. Comparou com os modelos de Van Genuchten-1980, Brooks e Corey-1964, Campbell-1974, Gardner-1958, Groenevelt e Grant-2004. Afirma que além de superar as limitações (umidade residual; limitações geográficas; empirismo), obteve um melhor ajuste que os outros modelos. Segundo o autor, os parâmetros apresentaram significado físico e mostrando-se útil para o ajuste da CRA em diferentes condições físicas de solo.

Carducci et al. (2011) modelaram a retenção de água no solo pelo modelo de Mualem-Van Genuchten-1980 adaptado para um modelo bimodal, o qual denominaram “Duplo Van Genuchten”, permitindo identificar duas classes de poros contrastantes, os estruturais e texturais. Utilizaram tensões de 10 kPa até 300.000 kPa. Obtiveram um bom ajuste do modelo e alto poder de predição.

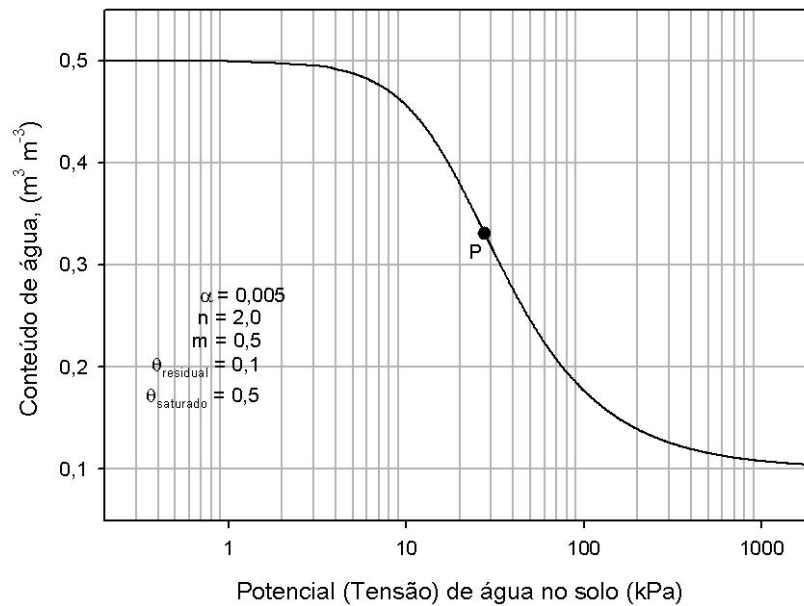
Entretanto, o modelo van Genuchten (1980) ainda é um dos modelos de CRA mais utilizados, devido a suas características, aplicabilidade (ROSSI; NIMMO, 1994; DEXTER, 2004a; VEREECKEN et al., 2010; CARDUCCI et al., 2011) e trabalhos desenvolvidos.

2.2.4 Modelo Van Genuchten

Quando Van Genuchten (1980) apresentou seu modelo, descreveu-o como “uma nova e relativamente simples equação para a curva de retenção de água no solo⁵ [...]”. As propriedades hidráulicas da curva de retenção de água no solo e da condutividade hidráulica não saturada do solo são descritas neste modelo. Este descreve uma curva em formato “S”, cuja inclinação se aproxima de zero quando a umidade se aproxima da residual ou saturada (Figura 2.1).

⁵ "A new and relatively simple equation for the soil-water content-pressure head curve [...]".

Figura 2.1 – Curva típica de retenção de água no solo, com o ponto P como ponto médio entre a umidade residual e saturada



Fonte: Adaptado de Van Genuchten (1980).

A Figura 2.1 foi apresentada por Van Genuchten (1980) e mostra o ponto P, que é o ponto médio entre as umidades residual e saturada. A função de Van Genuchten (1980), que descreve o conteúdo de água no solo em relação à tensão de água, é dada pela equação 2.4 e nesta, Van Genuchten (1980) recomenda manter a relação de Mualem, que restringe $m=1-1/n$.

$$\theta_h = \theta_{res} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_{res})}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^m} \quad (2.4)$$

em que:

θ_h = umidade do solo na tensão “h”;

θ_{res} = umidade residual;

θ_{sat} = umidade saturada;

α , n , m = parâmetros estimados (durante o ajuste da curva).

2.3 ÍNDICE S

Dexter (2004a) argumentou que a qualidade física do solo se manifesta de vários modos com os sintomas: infiltração de água deficiente; escoamento superficial, perda da estrutura original, dificuldade de enraizamento e dificuldade nas operações mecânicas. Possui, ainda, grandes efeitos sobre os processos químicos e biológicos do solo. Propõe um índice para qualidade física do solo, denominado de Índice S, com a intenção de ser facilmente mensurável sem ambiguidade e com a utilização de equipamentos de laboratório de física de solo padrão.

Dexter (2004b) identificou o valor de $S = 0,035$ como o limite entre solos com boa e pobre qualidade estrutural. Dexter e Czyz (2007) acrescentaram dois outros limites, nos quais a qualidade estrutural do solo seria considerada muito pobre quando o índice S for inferior a 0,02, e ótima ou muito boa quando o índice S for superior a 0,05.

Durante o processo de perda de água no solo, primeiro os poros maiores são extasiados e, depois, progressivamente os menores. A dimensão de poro pode ser determinada pela equação 2.5, em qualquer potencial de água. O menisco de água formado em um poro cilíndrico é dado por:

$$a = -\frac{2\sigma}{\psi} \quad (2.5)$$

em que:

a = raios de um poro cilíndrico

ψ = potencial de água

σ = tensão superficial do menisco d'água.

Em poros planos, a largura "t" do poro é dada por:

$$t = -\frac{\sigma}{\psi} \quad (2.6)$$

Dexter (2004a) afirma que o ponto característico da CRA é o ponto de inflexão, com curvatura igual a zero. Este ponto possui duas características: a

posição (umidade e tensão) e a inclinação. O índice S é definido como a tangente da inclinação da CRA no seu ponto de inflexão, quando a curvatura é zero ou se alterna de convexa para côncava. É uma indicação da extensão da porosidade do solo que se concentra em torno de uma estreita faixa de tamanho, que é diretamente relacionado com a microestrutura do solo, o tamanho e continuidade da porosidade (DEXTER, 2004a).

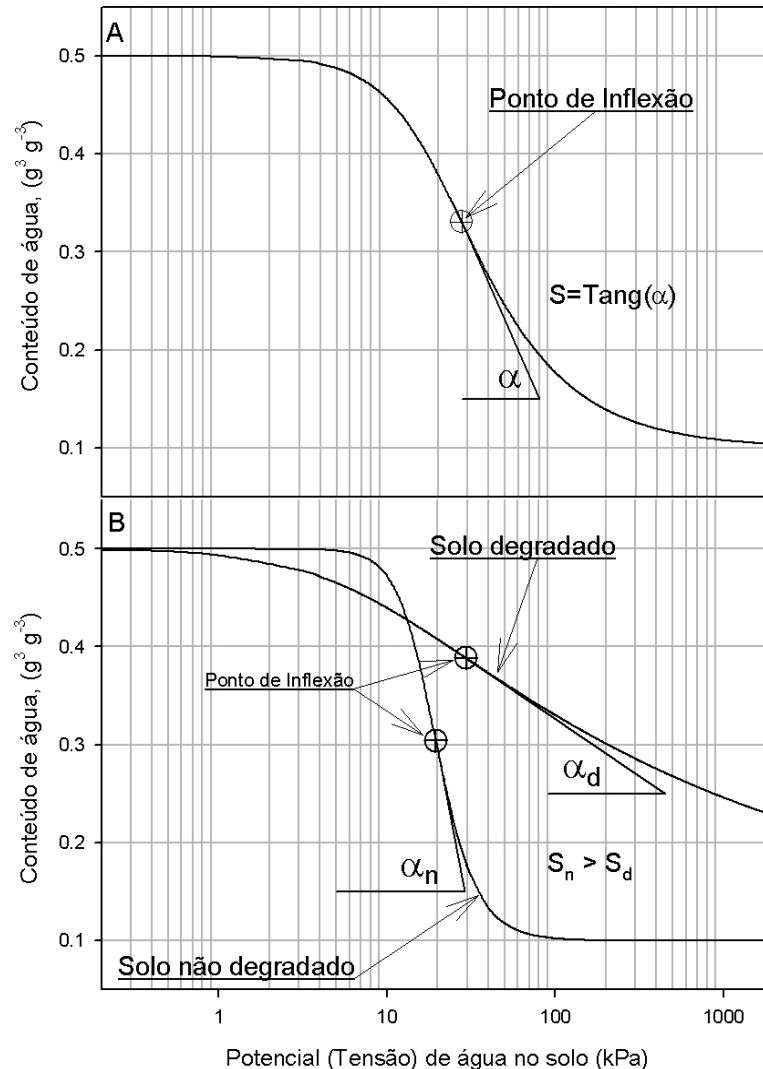
Dexter e Czyz (2007) expõem que a teoria sobre o índice S poderia ser resumida em que: (a) a maioria das propriedades físicas do solo e comportamento são governados pela estrutura do solo; (b) a estrutura do solo se reflete na distribuição de tamanho dos poros; (c) a distribuição dos tamanhos dos poros pode ser avaliada pela CRA; (d) a inclinação, índice S, da CRA é uma medida da estrutura do solo, portanto; (e) o índice S pode ser usado como indicador de qualidade física do solo, como uma variável capaz de prever algumas propriedades físicas do solo e alguns aspectos do comportamento do solo.

A Figura 2.2 mostra um exemplo de uma curva típica de retenção de água no solo com a localização do ponto de inflexão (A) e as curvas de solos de mesma textura com densidades diferentes (B). A inclinação diferente ente os pontos de inflexão reflete o estado de degradação da qualidade física dos solos pela densidade.

A porosidade estrutural compreende as fissuras e microfissuras, orifícios biológicos, em que a macroestrutura é afetada. A inclinação da curva no ponto de inflexão, índice S, seria atribuída na maior parte à porosidade “microestrutural” (DEXTER, 2004a).

Dexter (2004a) descreve que a drenagem da água desde a saturação até o ponto de inflexão seria principalmente realizada pela porosidade estrutural e depois, pela porosidade textural. Quando a porosidade estrutural é comprometida, por exemplo, pela compactação, a CRA é alterada, afetando o ponto de inflexão e a sua inclinação.

Figura 2.2 – Exemplo de Curva de retenção de água no solo (A) com o ponto de inflexão e CRA de solos com duas densidades diferentes (B), expressando a degradação física pelo índice S



Fonte: Adaptado de Dexter (2004a).

Dexter (2004a) apresentou duas formas de determinação do índice S. A primeira é medida manualmente num gráfico traçado com os pontos de umidade do solo e tensão de água. A segunda necessita do ajuste da curva a uma função matemática, na qual a derivada de segunda ordem desta curva fornece o ponto de inflexão da curva. Os parâmetros da curva ajustada permitem a obtenção da inclinação neste ponto e, segundo Dexter (2004a), é a determinação mais conveniente.

O índice S foi proposto por Dexter (2004a) como indicador de qualidade física do solo e, para o modelo de CRA de Van Genuchten (1980), obteve na derivada de segunda ordem a equação 2.7.

$$S = -n(\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \cdot \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-[1+m]} \quad (2.7)$$

em que:

S = Índice S;

θ_{res} = umidade residual;

θ_{sat} = umidade saturada;

n, m = parâmetros estimados (durante o ajuste da curva).

No entanto, quando considera a restrição de $m=1-1/n$, a obtenção do índice S pelo modelo Mualem-Van Genuchten (VGM) utiliza a equação 2.8, em que os parâmetros utilizados nas equações 2.7 e 2.8 são os mesmos da equação 2.4. Apesar do índice S ser negativo, Dexter (2004a) recomenda utilizar o modulo do valor.

$$S = -n(\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \cdot \left[\frac{2 \cdot n - 1}{n - 1} \right]^{\left[\frac{1}{n} - 2 \right]} \quad (2.8)$$

em que:

S = Índice S;

θ_{res} = umidade residual;

θ_{sat} = umidade saturada;

n = parâmetros estimados (durante o ajuste da curva).

Santos et al. (2011) compararam as camadas identificadas como compactadas e não compactadas, em Latossolo Vermelho, com densidades entre 1,27 e 1,03 Mg m⁻³, teores de argila de 485 a 549 g kg⁻¹, respectivamente. Determinaram a CRA com 10 pontos, determinados pelo método da centrífuga (REATTO et al., 2008). Estimaram o diâmetro do poro equivalente no ponto de inflexão, utilizando a lei de Jurin (BRUAND; PROST, 1987) e as equações de Kelvin (TESSIER; LAJUDIE; PETIT, 1992). Estimaram o índice S pela equação proposta por Dexter (2004a) e por outras formas. Concluíram que o cálculo do índice S foi matematicamente e fisicamente consistente.

Li et al. (2011) trabalharam com 6 de 13 tratamentos de um ensaio de 26 anos de duração na Austrália. Os tratamentos escolhidos representavam uma variação do tipo de preparo (plantio direto, convencional) e manejo da palha (queima

e retenção) com rotação de trigo e tremoço e um tratamento com tráfego de máquinas. Coletaram 4 amostras indeformadas na profundidade de 0 a 0,05 m. Determinaram as seguintes avaliações: densidade do solo, carbono orgânico, estabilidade de agregados, resistência tênsil dos agregados e a umidade nas tensões de 2, 5, 10, 50, 100, 500 e 1.500 kPa para o ajuste da CRA. Estimaram o índice S utilizando a CRA ajustada ao modelo de Groenevelt e Grant (2004) e não no modelo de Van Genuchten (1980). Li et al. (2011) confirmaram, ainda, o efeito deletério da compactação pelo tráfego de máquinas na qualidade do solo. Observaram que o índice S correlacionou-se bem com os parâmetros físicos analisados. Portanto, parece adequado como índice global da qualidade física do solo. No entanto, recomendam que pesquisas futuras devam também estudar os tamanhos e funções dos poros maiores.

Trabalhando em Latossolo distroférico, com 800 g kg^{-1} de argila, Tormena e Silva (2002) observaram que o parâmetro n do modelo VGM foi sensível às variações da densidade, e que a θ_{sat} e n poderiam ser descritos nos termos da densidade do solo. Estas observações reforçam a correlação encontrada entre a densidade do solo com o índice S, uma vez que este é estimado pela equação 2.8, a qual é baseada nos parâmetros θ_{sat} , θ_{res} e n do modelo VGM.

Pereira et al. (2011) trabalharam com Latossolo Vermelho sob semeadura convencional e diferentes variações de semeadura direta. Analisaram a densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado (dos agregados), produtividade e determinaram também o índice S, nas camadas de 0 a 0,05 m, 0,05 a 0,1 m, 0,1 a 0,15 m e 0,15 a 0,2 m. Os autores descrevem que não foram observadas correlações significativas da correlação entre indicadores da qualidade do solo e produtividade. Também não foram relatadas diferenças estatísticas do índice S nos sistemas de semeadura avaliados, muito embora nenhum tratamento tenha apresentado índice S inferior a 0,035. Somente encontraram correlação significativa do índice S, com a densidade do solo.

2.4 FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA - FPT

As funções de pedotransferência foram chamadas assim pela primeira vez por Bouma (1989), cuja crença era de que um dos grandes desafios da ciência do solo era “traduzir os dados que possuímos, em dados que necessitamos”. Argumentava que a subutilização dos levantamentos de solos era devida, em parte, pela falta de informações complexas. Normalmente, os levantamentos de solos convencionais determinam somente as informações mais simples; no entanto, a utilização de modelos, tais como o balanço hídrico, depende de informações complexas.

O termo função de pedotransferência foi introduzido por Bouma (1989) para definir as funções preditivas de características do solo que apresentam dificuldade de determinação, ou custo elevado, obtendo-as a partir de dados disponíveis. Naturalmente, iniciativas em obter funções preditivas de características complexas já eram utilizadas antes da proposição do termo (PIDGEON, 1972; DE JONG; LOEBEL, 1982).

2.4.1 Métodos de Desenvolvimento de FPT

Inicialmente, o desenvolvimento de funções de pedotransferência, ou a busca de relações empíricas, era baseado nas regressões estatísticas. Antes da proposta de Bouma (1989), De Jong e Loebel (1982) estudaram as relações empíricas dos componentes do solo com a retenção de água nas pressões de 33,3 kPa e 1500 kPa. Utilizaram procedimentos de regressão linear múltipla e avaliaram pelo teste F e pelo coeficiente de determinação (R^2).

Com o desenvolvimento da tecnologia da informação, as redes neurais artificiais passaram a ser utilizadas no desenvolvimento de FPT. Pachepsky, Timlin e Varallyay (1996) exploraram as aplicações das redes neurais na estimativa da retenção de água no solo. Compararam com o desempenho das regressões utilizadas no mesmo propósito, pois buscavam conhecer a utilidade das redes neurais como ferramentas de interpolação de propriedades hidráulicas do solo.

Outros autores também avaliaram o uso das redes neurais artificiais para o desenvolvimento de FPT para estimar as propriedades hidráulicas do solo

(SCHAAP; BOUTEN, 1996; TAMARI; WOSTEN; RUIZSUAREZ, 1996), e nos anos seguintes, outros trabalhos com redes neurais continuaram sendo publicados (SCHAAP; LEIJ, 1998; KOEKKOEK; BOOLTINK, 1999). Minasny, Mcbratney e Bristow (1999) compararam a utilização de redes neurais com as regressões linear múltipla e não-linear estendida, no desenvolvimento de FPT.

Pachepsky e schaap (2004) citam que as redes neurais artificiais estavam se tornando uma ferramenta comum para modelagem. No entanto, citam outros métodos como o “Group Method of Data Handling - GMDH”, que combinaria as vantagens da análise de regressão e das redes neurais artificiais. Outro método de desenvolvimento é a “Regression Trees Modeling - RTM”, que é uma técnica exploratória sobre a estrutura dos dados (PACHEPSKY; SCHAAP, 2004).

Segundo Pachepsky et al. (2004), tanto GMDH quanto RTM constroem os modelos incrementando a complexidade progressivamente. Entretanto, necessitam de procedimento conhecido como “Cross-validation”, para impedir que o modelo em desenvolvimento alcance uma complexidade elevada que comprometeria as previsões. Basicamente, consiste em dividir o conjunto de dados em subconjuntos de desenvolvimento e de teste. Para o procedimento de Cross-validation, quatro técnicas foram citadas, são elas: “K-fold”; “Leave-one-out”; “Jackknife” e “Delete – d” (PACHEPSKY; SCHAAP, 2004).

Twarakavi, Simunek e Schaap (2009) desenvolveram FPT para parâmetros hidráulicos do solo utilizando a Máquina de Vetores de Suporte (Support Vector Machines). Trata-se de uma metodologia baseada na teoria da aprendizagem estatística (Statistical Learning Theory), uma técnica de reconhecimento de padrões.

2.4.2 Avaliações de FPT

A primeira avaliação das FPT é durante o desenvolvimento, em que a FPT é submetida a um conjunto de dados semelhantes aos do desenvolvimento. É semelhante à técnica de “Cross-validation” citada no item 2.4.1. Desde o desenvolvimento das primeiras FPTs, o recurso de um conjunto de dados para teste já era utilizado (DE JONG; LOEBEL, 1982).

Inicialmente, por se tratar basicamente de uma regressão, foram avaliadas pelo coeficiente de determinação (R^2) e coeficientes estatísticos como o

teste F e análise de variância. Pidgeon (1972), De Jong e Loebel (1982) analisaram, dessa forma, as relações empíricas que encontraram. Posteriormente, coeficientes e critérios diferentes começaram a ser empregados em avaliações. É o caso do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970), que seria chamado de “Modeling efficiency” por Donatelli et al. (2004).

Donatelli et al. (2004) listam 36 índices estatísticos baseados em diferença e 13 estatísticas baseadas em correlação (anexo 1). Discutem como índices avaliadores de acurácia a utilização do Relative root mean square error – RRMSE e do Modeling efficiency – EF. Como avaliador da correção, cita o uso do “r”, que é um coeficiente derivado do coeficiente de correlação de Pearson.

Embora não tenha sido citado por Donatelli et al., (2004) o Critério de informação de Akaike – AIC – vem sendo utilizado com muita frequência, por vários autores, para avaliação da FPT (MINASNY; MCBRATNEY, 2002; BORGESSEN; SCHAAP, 2005; CORNELIS et al., 2005; BORGESSEN et al., 2008; SANTRA; DAS, 2008; ABBASI et al., 2011; HADZICK et al., 2011).

2.4.2.1 Critério de informação de Akaike

Akaike (1974) revisou os procedimentos clássicos da máxima verossimilhança e introduziu o critério, que inicialmente recebeu o nome de “um critério de informação”. Atualmente é denominado como o critério de Akaike, critério de informação de Akaike ou somente AIC (Akaike information criterion). Trata-se de um critério para avaliar a qualidade do ajuste de um modelo e a equação 2.9 foi originalmente apresentada por Akaike (1974) para estimá-lo.

$$AIC = (-2) \cdot \log(ML) + 2(k) \quad (2.9)$$

Em que:

ML = máxima verossimilhança (Maximum Likelihood)

k = número de parâmetros ajustados independentemente para o modelo.

O AIC é uma ferramenta para a seleção de modelos; não é um teste de hipóteses, não há significância e nem valor-p. Dado um conjunto de dados e vários modelos concorrentes, pode-se classificá-los de acordo com o seu AIC. Os

modelos que apresentarem menores valores de AIC serão considerados melhores (POETER; ANDERSON, 2005).

2.4.2.1.1 *Interpretação do AIC*

O AIC não pode qualificar um determinado modelo como bom ou ruim, mas distingue entre dois ou mais modelos, qual é o melhor. Se todos os modelos forem ruins, o AIC diferenciará os melhores entre vários (EMILIANO, 2009). Quando a diferença entre o AIC de um modelo e o melhor modelo (menor AIC) for inferior a 2 indica que os modelos são muito bons e próximos. Quando se encontra entre 4 e 7, a sustentação empírica do modelo é pequena e essencialmente nenhuma, se maior que 10 (BURNHAM; ANDERSON, 2004).

2.4.3 Usos e Parâmetros Estimados

As primeiras FPT foram desenvolvidas para estimar as propriedades hidráulicas do solo (PIDGEON, 1972; DE JONG; LOEBEL, 1982), e provavelmente ainda sejam as propriedades mais estudadas por meio de FPT (WEYNANTS; VEREECKEN; JAVAUX, 2009; VEREECKEN et al., 2010).

Considerando as variáveis preditas, podemos diferenciar dois grupos nas FPT que estimam a CRA, que são: as pontuais e paramétricas. As FPT paramétricas estimam os parâmetros da CRA, que normalmente utilizam o modelo Mualem–Van Genuchten - VGM (VAN GENUCHTEN, 1980). As pontuais estimam a umidade do solo em pontos de tensão específicos na CRA (VEREECKEN et al., 2010).

No entanto, as FPT não são exclusividade das propriedades hidráulicas. Também foram desenvolvidas FPT para estimar outros atributos físicos, tais como: resistência do solo à penetração (FIDALSKI; TORMENA, 2007; ALMEIDA et al., 2008; SILVA et al., 2008); densidade do solo (BENITES et al., 2007; HOLLIS; HANNAM; BELLAMY, 2012); resistividade elétrica (HADZICK et al., 2011); parâmetros do teste de Proctor (ÁLVAREZ et al., 2010) e modelagem de perda de solo por erosão (FLANAGAN; PACHEPSKY; RAWLS, 2004).

As FPT foram envolvidas em estudos de outras características e processos do solo, tais como: transporte de nutrientes (VAN DER SALM et al., 2012); adsorção e transporte de soluto (MINASNY et al., 2004); estimativa de fósforo remanescente (CAGLIARI; VERONEZ; ALVES, 2011); cadeia de mineralização do nitrogênio (HEUMANN; RINGE; BOTTCHEER, 2011); movimento de pesticidas no solo (TIKTAK; HENDRIKS; BOESTEN, 2012); adsorção de herbicidas (isoproturon) em solo (MOEYS; BERGHEAUD; COQUET, 2011).

As FPT também estão sendo utilizadas na integração com dados topográficos (PALLADINO; ROMANO; SANTINI, 2005), em estimativas espaciais baseada em atributos do terreno (ROMANO et al., 2004; NEBEL et al., 2010; MOTAGHIAN; MOHAMMADI, 2011), em conjunto com sensoriamento remoto (JANA; MOHANTY, 2011) e também nos estudos e desenvolvimento do mapeamento digital do solo (MCBRATNEY; MENDONÇA SANTOS; MINASNY, 2003; SANCHEZ et al., 2009).

Salmo 8

¹ O SENHOR, Senhor nosso, quão admirável é o teu nome em toda a terra, pois puseste a tua glória sobre os céus!

² Tu ordenaste força da boca das crianças e dos que mamam, por causa dos teus inimigos, para fazer calar ao inimigo e ao vingador.

³ Quando vejo os teus céus, obra dos teus dedos, a lua e as estrelas que preparaste;

⁴ Que é o homem mortal para que te lembres dele? e o filho do homem, para que o visites?

⁵ Pois pouco menor o fizeste do que os anjos, e de glória e de honra o coroaste.

⁶ Fazes com que ele tenha domínio sobre as obras das tuas mãos; tudo puseste debaixo de seus pés:

⁷ Todas as ovelhas e bois, assim como os animais do campo,

⁸ As aves dos céus, e os peixes do mar, e tudo o que passa pelas veredas dos mares.

⁹ O SENHOR, Senhor nosso, quão admirável é o teu nome sobre toda a terra!

Versão: Almeida revisada.

3 ARTIGO A

ÍNDICE S COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA EM SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ

Resumo: A partir da década de 1990, a discussão sobre a qualidade do solo aumentou com as abordagens de qualidade ambiental e sustentabilidade agrícola. Uma das abordagens da qualidade do solo procura identificar indicadores de ordem biológica, física ou química e, entre os vários indicadores propostos para a qualidade física de solo, o índice S tem recebido destaque. Os objetivos deste trabalho foi validar a sensibilidade do índice S como indicador de qualidade física do solo e verificar a correlação do índice S com alguns atributos físicos do solo, em condições de campo na diversidade de algumas ordens de solo do estado do Paraná. Amostras de solos foram coletadas em 21 locais de solos argilosos e muito argilosos, nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, sob duas condições (floresta nativa e solo explorado) e determinaram-se 8 atributos físicos do solo. Para cada condição foi ajustada uma curva de retenção de água pelo modelo Mualem–Van Genuchten e, assim, foi calculado o índice S. O teste de Wilcoxon mostrou diferença no índice S entre os manejos com a significância de 0,0015 na camada de 0 a 0,1 m e menor que 0,0001 de 0,1 a 0,2 m. O coeficiente de correlação de Pearson entre o índice S e a densidade e macroporosidade foi de -0,826 e 0,760, respectivamente. O Índice S observado mostrou ser um indicador de qualidade física do solo sensível e apresentou correlação significativa com a porosidade total, densidade do solo, macroporosidade e teor de carbono orgânico.

Palavras-chave: Curva de retenção de umidade. Estrutura do solo. Porosidade do solo. Mualem-Van Genuchten.

Abstract: From the 1990s, the discussion about the soil quality increased with the approaches of environmental quality and agricultural sustainability. One of the approaches of soil quality seeks to identify biological, physical or chemical indicators, and among the several indicators proposed for the soil physical quality the index S has been highlighted. The objectives of this paper were to validate the sensitivity of index S as an indicator of soil physical quality and to verify the correlation of the index S with some physical properties of the soil, under field conditions in the diversity of some soil Orders of the state of Parana. Soil samples were collected from 21 sites with textures of clay and clayey, at layers of 0 to 0.10 and 0.10 to 0.20 m and on two conditions (native forest and soil explored) and it were determined 13 soil physical parameters. For each condition, it was adjusted a water retention curve by model Mualem-Van Genuchten and it was calculated the index S. The Wilcoxon Test showed differences in the index S between soil managements with significance of 0.0015 at the layer of 0 to 0.1 m and less than 0.0001 in 0.1 to 0.2 m. Pearson's correlation coefficients between the index S and bulk density and macroporosity were -0.826 and 0.760, respectively. The observed S index seem to be sensitive as an indicator of soil physical quality and significantly correlation with the total porosity, bulk density, macroporosity and organic carbon content.

Keywords: Moisture retention curve. Soil structure. Soil porosity. Mualem-Van Genuchten.

Introdução

A qualidade do solo é a “Habilidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens”, segundo a Sociedade Americana de Ciência do Solo (KARLEN et al., 1997). Uma das linhas que discute a qualidade do solo procura identificar quais seriam os melhores indicadores, tanto de ordem biológica, física ou química (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

Recentemente, novos indicadores físicos foram propostos, tais como a densidade relativa (CARTER, 1990), o intervalo hídrico ótimo (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999) e o índice S, que é proposto por Dexter (2004a). O índice S é definido como a tangente da inclinação da CRA no seu ponto de inflexão. É uma indicação da extensão em que a porosidade do solo se concentra em torno de uma estreita faixa de tamanho, que é diretamente relacionada com a microestrutura do solo, com o tamanho e com a continuidade da porosidade (DEXTER, 2004a).

Dexter e Czyz (2007) expõem que a teoria sobre o índice S poderia ser resumida, em que: (a) a maioria das propriedades físicas do solo e comportamento são governados pela estrutura do solo; (b) a estrutura do solo se reflete na distribuição de tamanho dos poros; (c) a distribuição dos tamanhos dos poros pode ser avaliada pela CRA; (d) a inclinação, índice S, da CRA é uma medida da estrutura do solo, portanto; (e) o índice S pode ser usado como indicador de qualidade física do solo, como uma variável capaz de prever algumas propriedades físicas do solo e alguns aspectos do comportamento do solo.

Dexter (2004a) apresentou duas formas de determinar o índice S. A primeira é medida manualmente em um gráfico traçado com os pontos de umidade do solo e tensão de água. A segunda necessita do ajuste da curva a uma função matemática, na qual a derivada de segunda ordem desta curva fornece o ponto de inflexão da curva. Os parâmetros da curva ajustada permitem a obtenção da inclinação neste ponto e, segundo Dexter (2004), é a determinação mais conveniente.

Dexter (2004b) identificou o valor de $S = 0,035$ como o limite entre solos com boa e pobre qualidade estrutural. Dexter e Czyz (2007) acrescentaram dois outros limites, nos quais a qualidade estrutural do solo seria considerada muito pobre quando o índice S for inferior a 0,02, e ótima ou muito boa quando o índice S for superior a 0,05.

O objetivo do estudo foi o de avaliar a sensibilidade do Índice S como indicador de qualidade física do solo e verificar a correlação do índice S com alguns atributos físicos do solo, em condições de campo na diversidade de alguns solos do estado do Paraná.

Material e Métodos

Foram coletadas amostras em 21 locais no estado do Paraná, em duas camadas (0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m) e sob duas condições de manejo. A primeira condição foi em floresta nativa e natural; a segunda foi em solo explorado, sob manejo e lavoura com representatividade na região e próxima da primeira. O solo de floresta foi adotado e considerado como referência de qualidade superior ao explorado, ainda que o manejo fosse adequado. Cada local amostrado possuía manejo próprio, definido pelo proprietário da cada área. A Tabela 0.1 apresenta as características de latitude, altitude, cultura e forma do plantio em cada local amostrado. Ainda são apresentados os resultados médios dos teores de argila e carbono orgânico (CO) entre as duas camadas e os manejos (floresta e solo explorado).

Foram coletadas em solos argilosos e muito argilosos, ou seja, com teores de argila superiores a 350 g kg^{-1} e 600 g kg^{-1} , respectivamente (SANTOS et al., 2006). Solos com baixos teores de argila possuem tendência de apresentar elevados valores de S . Segundo Dexter (2004a), o que dificultaria a diferenciação da qualidade em razão do manejo. Os locais amostrados (Tabela 0.1) caracterizaram-se pela ocorrência de Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf); Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef); Latossolo Vermelho Distrófico (LVd); Latossolo Bruno Distrófico (LBd); Nitossolo Vermelho Eutroférico (NVef); Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico Latossólico (PVad); Cambissolo Húmico Alumínico (CHa) e Cambissolo Flúvico Tb Distrófico (CYbd). A Figura 0.1 mostra os 21 locais amostrados no

estado do Paraná, que totalizaram 84 condições (21 locais, 2 camadas e 2 manejos) e a delimitação das regiões morfo-fisiográficas.

Tabela 0.1 – Características de cada local, além da condição de floresta nativa

Município	Solo	Latitude	Altitude (m)	Cultura	Plantio	Argila ¹ (g kg ⁻¹)	CO ¹ (g kg ⁻¹)
Apucarana	LVdf	23° 37'S	785	Soja	Direto	705 ±18	26,0 ±2,8
Bandeirantes	LVef	23° 06'S	412	Milho	Conv.	570 ±07	18,0 ±4,6
Cambará	LVef	23° 00'S	452	Milho	Direto	635 ±18	19,3 ±2,8
Campo Mourão	LVdf	23° 59'S	540	Soja	Conv.	748 ±07	26,8 ±5,9
Cascavel	LVdf	24° 53'S	648	Milho	Direto	760 ±15	26,5 ±2,4
Guarapuava	LBd	25° 23'S	1.045	Soja	Direto	695 ±15	27,8 ±1,9
Guaraqueçaba	PVAd	25° 14'S	19	Mandioca	Conv.	565 ±17	20,6 ±5,7
Lapa	LVd	25° 47'S	908	Milho	Conv.	410 ±26	28,5 ±5,8
Laranjeiras do Sul	LVdf	25° 19'S	810	Milho	Conv.	743 ±06	29,6 ±2,4
Londrina	LVef	23° 21'S	584	Milho	Conv.	775 ±08	19,2 ±3,1
Mauá da Serra	LVdf	23° 54'S	1.017	Milho	Conv.	710 ±11	23,3 ±2,4
Morretes	CYbd	25° 30'S	47	Palme. real	Conv.	403 ±16	24,9 ±4,3
Nova Cantu	LVdf	24° 40'S	471	Milho	Conv.	708 ±11	22,9 ±2,9
Palmas	CHa	26° 27'S	1.092	Milho	Direto	668 ±06	32,3 ±1,9
Palotina	NVef	24° 18'S	302	Soja	Direto	615 ±22	18,0 ±3,9
Pato Branco	LVdf	26° 07'S	740	Milho	Direto	783 ±15	26,8 ±2,8
Planalto	NVef	25° 44'S	406	Milho	Conv.	360 ±06	18,8 ±3,9
Ponta Grossa	LVd	25° 09'S	865	Milho	Conv.	750 ±11	29,6 ±3,9
Quedas do Iguaçu	LVdf	25° 27'S	576	Soja	Conv.	785 ±06	29,9 ±2,3
Santa Helena	NVef	24° 53'S	251	Milho	Direto	735 ±36	19,4 ±3,5
S.Miguel do Iguaçu	NVef	25° 11'S	306	Milho	Conv.	648 ±19	20,9 ±4,8

Fonte: Autor 1

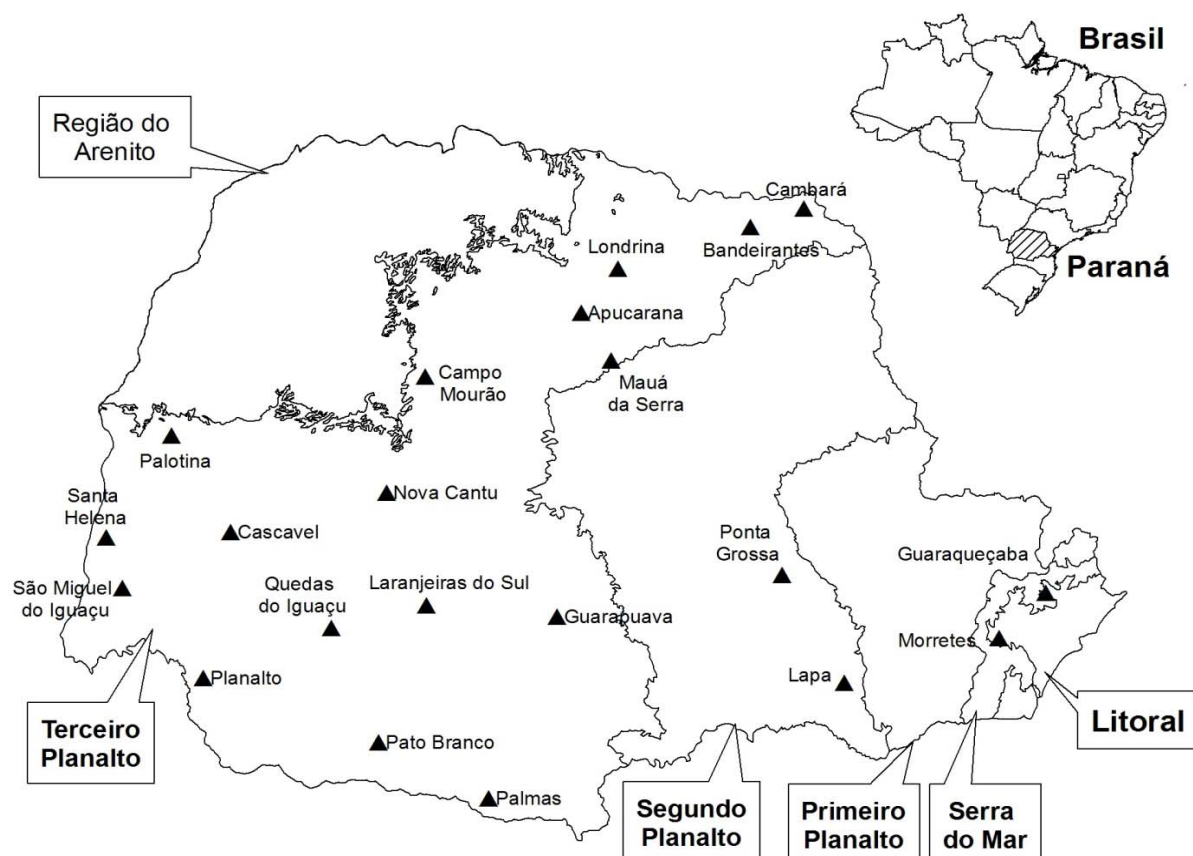
Os teores de argila e carbono orgânico (CO) são média (e erro padrão da média) entre as duas camadas e os dois manejos.

Em cada condição (manejo e local), foram coletadas amostras indeformadas em triplicada, aleatórias e em distância que não comprometesse a independência ou a representatividade das coletas. Os anéis coletados, com volume de 99,37 cm³ em aço, foram cravados verticalmente no solo, por meio de um amostrador/extrator que permitiu coletar os anéis das duas camadas no mesmo ponto, perfazendo um total de 252 amostras simples. Também foram coletadas amostras deformadas para outras determinações físicas e do carbono orgânico.

Pelo anel volumétrico foram determinadas a densidade do solo (Ds) e a umidade gravimétrica nas tensões (potencial mátrico) de 6; 30; 100; 300; 500 e 1500 kPa em mesa de tensão e/ou câmara de pressão de Richards, para ajuste à curva de retenção de água (CRA) no solo. Foram determinados os teores de

carbono orgânico (CO) do solo, pelo método Walkley-Black, com a oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio (CLAESSEN et al., 1997).

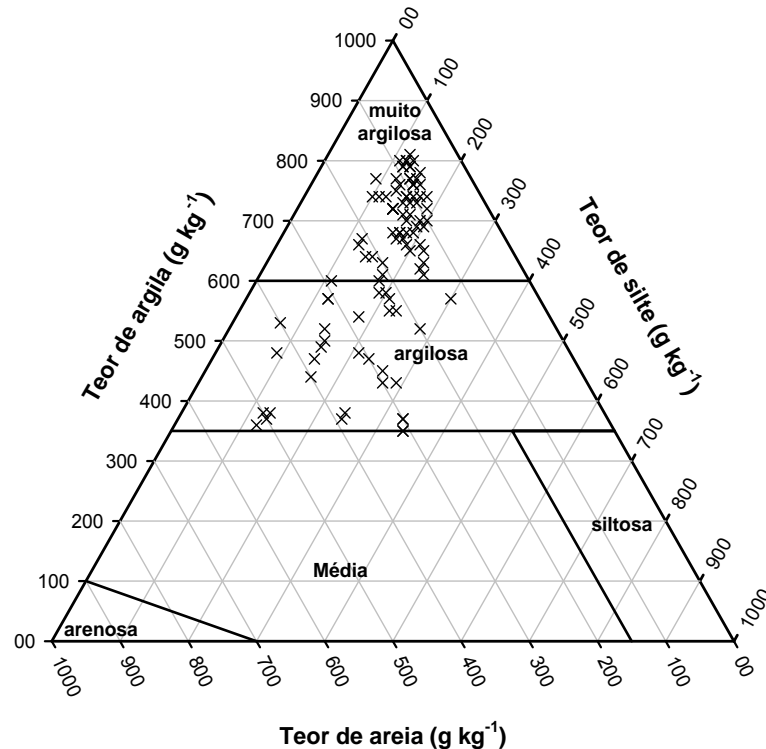
Figura 0.1 – Distribuição dos locais amostrados e as regiões morfo-fisiográficas do Estado



Fonte: Autor

A macroporosidade (MacroP), a microporosidade (MicroP) e a porosidade total (PoT) foram determinadas pelo método da EMBRAPA, e a densidade de partícula foi determinada pelo método do balão volumétrico (CLAESSEN et al., 1997). Os teores de argila, areia e silte foram determinados pelo método da pipeta com agitação lenta, na presença de NaOH como dispersante (CLAESSEN et al., 1997). A Figura 0.2 apresenta a granulometria (teores de argila, areia e silte) de cada uma das 84 condições distribuídas no triângulo textural do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (SANTOS et al., 2006).

Figura 0.2 – Granulometria (teores de areia, silte e argila) das 84 condições amostradas distribuídas no triângulo textural do SiBCS



Fonte: Adaptado de SANTOS et al. (2006).

Dexter (2004a) e Vereecken (2010) afirmam que provavelmente o modelo mais utilizado para descrever a CRA seja o de Mualem–Van Genuchten (VGM). Portanto, para o ajuste da CRA, foi adotado o modelo VGM, descrito pela equação 0.1 (VAN GENUCHTEN, 1980). Van Genuchten (1980) recomenda manter a restrição de Mualem, na qual $m=1-1/n$.

$$\theta_h = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \cdot \left[1 + (\alpha \cdot h)^n\right]^{-m} + \theta_{\text{res}} \quad (0.1)$$

em que :

θ_h = conteúdo de água no solo na tensão h ;

θ_{sat} = umidade do solo saturada;

θ_{res} = umidade residual;

m , n e α = parâmetros.

O índice S foi proposto por Dexter (2004a) como indicador de qualidade física do solo. É descrito como a tangente da inclinação da CRA no ponto de inflexão desta. Quando se adota o modelo VGM e se considera a restrição de Mualem, o índice S pode ser obtido pela equação 0.2 (DEXTER, 2004a), em que os parâmetros utilizados são os mesmos da equação 0.1. Apesar do índice S ser negativo, Dexter (2004a) recomenda utilizar o módulo do valor.

$$S = -n(\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \cdot \left[\frac{2 \cdot n - 1}{n - 1} \right]^{\left[\frac{1}{n} - 2 \right]} \quad (0.2)$$

em que :

S = índice S proposto por Dexter (2004a);

θ_{sat} = umidade do solo saturada;

θ_{res} = umidade residual;

n = parâmetro do modelo VGM.

Ajuste da Curva

Os valores determinados de umidade do solo e tensão nas amostras foram ajustados à CRA baseada no modelo VGM, utilizando o software SWRC e considerando-se a restrição de Mualem ($m=1-1/n$). O SWRC foi desenvolvido por Dourado-Neto et al. (2000) e realiza o ajuste por iterações sucessivas a partir de parâmetros inicialmente preestabelecidos do modelo (α , n, m, umidade saturada). A umidade residual foi fixada em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, em razão dos resultados obtidos por Weynants, Vereecken e Javaux (2009) e Al Majou, Bruand e Duval (2008).

O ajuste de cada uma das 252 curvas foi avaliado pelos coeficientes estatísticos calculados pelo SWRC durante o ajuste, em seguida, a forma gráfica de cada curva foi avaliada visualmente em relação aos dados observados. O ajuste foi repetido, com a introdução de parâmetros iniciais diferentes até que as avaliações estatísticas e visual revelassem a curva com menor desvio dos pontos. Os parâmetros do modelo VGM, ajustados pelos dados observados, foram introduzidos na equação 0.2 e obteve-se o índice S, para a curva ajustada de cada condição de manejo, local e camada.

Análises Estatísticas

Inicialmente, cada curva ajustada foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2), Akaike Information Criterion – AIC e nível de significância (p-valor) da análise de variância da regressão, calculados pelo SWRC. O índice AIC (equação 0.3) é um critério utilizado para discriminar modelos, é afetado pelo número de parâmetros.

$$AIC = (-2) \cdot \log(ML) + 2(k) \quad (0.3)$$

em que:

AIC = Akaike Information Criterion;

ML = máxima verossimilhança (Maximum Likelihood);

k = número de parâmetros ajustados.

Poeter e Anderson (2005) descrevem que, entre dois modelos, aquele que possui melhor ajuste apresentará o AIC de menor valor. Quando a diferença entre AIC de um modelo e o AIC do melhor (menor AIC) for inferior a 2 indica que os modelos são muito bons e próximos. Quando se encontra entre 4 e 7, a sustentação empírica é pequena e essencialmente nenhuma se maior que 10 (BURNHAM; ANDERSON, 2004). Com base nessas avaliações, foi selecionada uma curva de cada triplicata de cada condição de manejo, local e camada.

O teste de Wilcoxon foi utilizado para verificar a diferença nos atributos avaliados entre as condições de floresta nativa e manejo, para cada camada. A capacidade do índice S em diferenciar a qualidade física do solo nas condições de floresta nativa e manejo, também foi avaliada pelo teste pareado de Wilcoxon, no qual a hipótese H_0 assume que o índice $S_{\text{floresta}} = S_{\text{manejo}}$ e $H_1: S_{\text{floresta}} > S_{\text{manejo}}$ para cada uma das condições. Foi adotado teste unilateral considerando que o índice S identificasse a qualidade de solo de floresta superior ao solo explorado.

Para essas avaliações, foi utilizado o software estatístico Bioestat® 5.0, disponível para download no site www.mamiraua.org.br (Instituto Mamirauá). A análise de correlação entre o índice S e os atributos físicos do solo foi avaliada pelo coeficiente de correlação de Pearson e pelo nível de significância (p-valor). Lira (2004) sugeriu que a interpretação do coeficiente poderia obedecer aos critérios da

Tabela **0.2**, pois varia entre -1 e 1. Entretanto, em amostras numerosas, mesmo os coeficientes próximos a zero podem se apresentar significativos, conforme cita Cargnelutti Filho et al. (2010).

Tabela 0.2 – Tabela de interpretação do coeficiente de correlação de Pearson

Coeficiente de Pearson (r)	Interpretação
Valores negativos	Correlação inversa
Valores positivos	Correlação direta
0,90 a 1,00*	Indica uma correlação muito forte
0,60 a 0,90*	Indica uma forte correlação
0,30 a 0,60*	Indica correlação moderada
0,60 a 0,30*	Fraca correlação

Fonte: Lira (2004).

* Valores em módulo, pois o coeficiente de Pearson pode assumir valores negativos e positivos.

A correlação entre o índice S e os atributos do solo foram avaliados pelo coeficiente de correlação de Pearson, de duas formas. Na primeira, foi determinado sem distinguir as condições de manejo e camada. Nesse caso, consideraram-se os coeficientes maiores que 0,5 (em módulo) como significativos, em virtude da possibilidade dos coeficientes próximos a zero (com pouca correlação) apresentarem significância devido à 84 observações (CARGNELUTTI FILHO et al., 2010). As correlações que se mostraram significativas nesta avaliação foram selecionadas para a seguinte. Na segunda, as condições (manejo e camada) foram analisadas separadamente e a significância foi obtida pelo p-valor da análise de correlação de Pearson.

Resultados e Discussão

A Tabela 0.3 apresenta os momentos estatísticos (média e o erro padrão) das análises de: teor de areia, teor de silte, teor de argila, densidade do solo, carbono orgânico (CO), porosidade total (PoT), macroporosidade (MacroP), microporosidade (MicroP), nas quatro condições amostradas. Ainda apresenta o resultado do teste pareado de Wilcoxon de cada atributo entre os manejos de cada camada.

Os teores médios de argila variaram de $641 \pm 28,7 \text{ g kg}^{-1}$ a $670 \pm 28,0 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente na superfície (0 a 0,1 m) da floresta e subsuperfície (0,1 a

0,2) do solo explorado. No entanto, não foi encontrada diferença estatística entre os manejos na mesma camada para os teores de argila, ou mesmo para os teores de areia ou silte. Os teores de areia variaram entre $179 \pm 22,5 \text{ g kg}^{-1}$ e $170 \pm 21,6 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto os de silte oscilaram entre $180 \pm 13,0 \text{ g kg}^{-1}$ e $161 \pm 10,8 \text{ g kg}^{-1}$.

Tabela 0.3 – Momentos estatísticos (média e erro padrão) dos atributos analisados, nas quatro condições

Atributo	Condição amostrada (n=21)					
	0 a 0,1 m		0,1 a 0,2 m			
	Floresta nativa	Solo explorado	Floresta nativa	Solo explorado		
Areia (g kg^{-1})	$179 \pm 22,5$	ns	$174 \pm 22,5$	$175 \pm 23,2$	ns	$170 \pm 21,6$
Silte (g kg^{-1})	$180 \pm 13,0$	ns	$177 \pm 11,4$	$163 \pm 12,3$	ns	$161 \pm 10,8$
Argila (g kg^{-1})	$641 \pm 28,7$	ns	$650 \pm 28,4$	$662 \pm 29,1$	ns	$670 \pm 28,0$
Ds (Mg m^{-3})	$0,96 \pm 0,011$	**	$1,15 \pm 0,038$	$1,05 \pm 0,028$	**	$1,24 \pm 0,029$
CO (g dm^{-3})	$32,8 \pm 1,14$	**	$23,7 \pm 1,32$	$22,8 \pm 1,31$	**	$17,7 \pm 1,29$
PoT ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	$0,65 \pm 0,005$	**	$0,59 \pm 0,013$	$0,63 \pm 0,011$	**	$0,56 \pm 0,009$
MicroP ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	$0,39 \pm 0,012$	**	$0,44 \pm 0,013$	$0,42 \pm 0,013$	**	$0,45 \pm 0,010$
MacroP ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	$0,26 \pm 0,016$	**	$0,14 \pm 0,016$	$0,21 \pm 0,018$	**	$0,10 \pm 0,009$

Fonte: Autor

Ds, densidade do solo; DMP, diâmetro médio ponderado; DMG, diâmetro médio geométrico; IEA, índice de estabilidade de agregados; CO, Carbono orgânico do solo; PoT, porosidade total; MicroP, microporosidade; MacroP, macroporosidade; ns, não significativo; (**) diferença significativa com 1%; (*) diferença significativa com 5%.

Diferença significativa dos teores de carbono orgânico entre solo de floresta e explorado com plantio direto e convencional também foi encontrada por Calegari et al. (2006). Eles trabalharam em Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso, em duas localidades. Em plantio direto tradicionalmente realizado pelo agricultor, descreveram valores de $21,6$ e $23,0 \text{ g dm}^{-3}$, para solo de floresta de $27,6$ e $29,4 \text{ g dm}^{-3}$ na camada de 0 a 0,1 m. Enquanto, na camada de 0,1 a 0,2, a diferença foi observada em uma das localidades, relatando os valores de $21,4$ e $21,8 \text{ g dm}^{-3}$ para solo de floresta e de $18,4$ e $18,6 \text{ g dm}^{-3}$ para solo em plantio direto.

A Tabela 0.4 contém os valores de índice S obtidos em cada condição e local amostrado e a síntese das informações do ajuste das CRA, apresentando os valores médios e erro padrão do índice S e do valor AIC, mas também a média do coeficiente de determinação (R^2). Observa-se que o ajuste das curvas apresentou coeficiente de determinação médio superior a 0,99 e AIC entre -13,8 e -18,6, valores que expressam um bom ajuste obtido pelas curvas. Os valores

marcados com (*) ultrapassaram o valor de 0,035, identificado por Dexter (2004b), como o limite entre solos com boa e pobre qualidade estrutural.

Tabela 0.4 – Índice S de cada local e em cada condição amostrada, média e erro padrão, Akaike Information Criterion – AIC médio e erro padrão, média do coeficiente de determinação, e o nível de significância do teste pareado de Wilcoxon

Local	Condição amostrada			
	0 a 0,1m		0,1 a 0,2m	
	Floresta nativa	Solo explorado	Floresta nativa	Solo explorado
Apucarana	0,033	* 0,036	* 0,039	0,022
Bandeirantes	* 0,035	0,016	0,013	0,012
Cambará	* 0,038	0,020	* 0,044	0,018
Campo Mourão	0,034	* 0,050	* 0,046	0,017
Cascavel	* 0,042	0,034	0,026	0,018
Guarapuava	* 0,045	* 0,037	0,027	0,025
Guaraqueçaba	0,027	0,022	0,017	0,019
Lapa	* 0,043	0,018	0,024	0,015
Laranjeiras do Sul	* 0,045	* 0,035	0,031	0,024
Londrina	0,033	0,025	* 0,037	0,023
Mauá da Serra	0,018	0,021	* 0,042	0,010
Morretes	* 0,045	0,027	0,025	0,019
Nova Cantu	* 0,044	* 0,036	* 0,047	0,029
Palmas	0,032	0,032	* 0,035	0,025
Palotina	0,027	0,015	0,020	0,012
Pato Branco	0,028	0,027	* 0,035	0,017
Planalto	* 0,043	0,025	* 0,041	0,017
Ponta Grossa	0,031	0,032	0,026	0,015
Quedas do Iguaçu	* 0,038	0,022	0,034	0,024
Santa Helena	0,033	0,028	0,031	0,015
São Miguel do Iguaçu	0,030	0,013	0,014	0,017
Média	0,036	0,027	0,031	0,016
±Erro padrão	±0,0016	±0,002	±0,0022	±0,0011
AIC médio ±E.P.	-13,8 ±0,77	-17,3 ±0,86	-15,1 ±0,85	-18,6 ±0,65
Coef. Determ. (médio)	0,9929	0,9943	0,9930	0,9933
P-Valor (Wilcoxon)		0,0015 **		<0,0001 **

Fonte: Autor

* Os valores identificados com boa qualidade estrutural, segundo o critério de Dexter (2004b), valor de $S \geq 0,035$.

Machado et al. (2008) também registraram redução dos teores de carbono e aumento da densidade do solo em relação ao solo de floresta nativa. Foram comparadas com áreas com mais de 20 anos de manejo com pastagens e lavoura em preparo convencional, em Latossolo Vermelho distrófico de textura média. Centurion et al. (2007) descreveram aumento semelhante na microporosidade entre floresta nativa e cultivo de cana de açúcar em Latossolo

Vermelho distroférico caulínítico-oxídico – LVdf (teores de Fe_2O_3 entre 180 g kg^{-1} a 360 g kg^{-1} , com predomínio de caulinita e $K_i > 0,75$ e $K_r \leq 0,75$) segundo o SiBCS (SANTOS et al., 2006).

O resultado do teste de Wilcoxon (Tabela 0.4), na forma do p-valor, indica que o índice S nos solos em condição de floresta foi estatisticamente superior ao com significância de 1% nas duas camadas. No entanto, a diferenciação do manejo pelo índice S foi mais pronunciada na camada de 0,1 a 0,2 m que de 0 a 0,1 m. O índice S dos solos de floresta foi maior, separando-o dos solos explorados, mesmo diante da diversidade dos solos amostrados e das condições dos locais de manejo. Com os resultados do índice S nas comparações entre os manejos, pode-se confirmar o potencial de S em identificar as variações na qualidade física do solo.

O resultado do coeficiente de correlação de Pearson entre o índice S e os atributos avaliados de todas as condições encontra-se na Tabela 0.5, bem como os momentos estatísticos. A correlação com o índice S apresentou o coeficiente de Pearson superior a 0,5 (em módulo) para os seguintes atributos em ordem decrescente: PoT (0,836), Ds (-0,826), MacroP (0,760) e CO (0,583). Somente o atributo MicroP apresentou coeficiente de Pearson inferior a 0,5.

Tabela 0.5 – Coeficiente de correlação de Pearson entre o índice S e os atributos avaliados e os momentos estatísticos

Atributo	Pearson	Média (n=84)	Mínimo	Máximo
Areia (g kg^{-1})	-0,133 (ns)	$174 \pm 11,0$	70	520
Silte (g kg^{-1})	0,091 (ns)	$170 \pm 5,9$	90	340
Argila (g kg^{-1})	0,066 (ns)	$656 \pm 14,1$	350	810
PoT ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,836 (*)	$0,60 \pm 0,006$	0,47	0,69
MicroP ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	-0,367 (ns)	$0,42 \pm 0,007$	0,31	0,56
MacroP ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,760 (*)	$0,18 \pm 0,010$	0,04	0,37
Ds (Mg m^{-3})	-0,826 (*)	$1,10 \pm 0,018$	0,91	1,49
CO (g dm^{-3})	0,583 (*)	$24,2 \pm 0,86$	8,0	45,9

Fonte: Autor

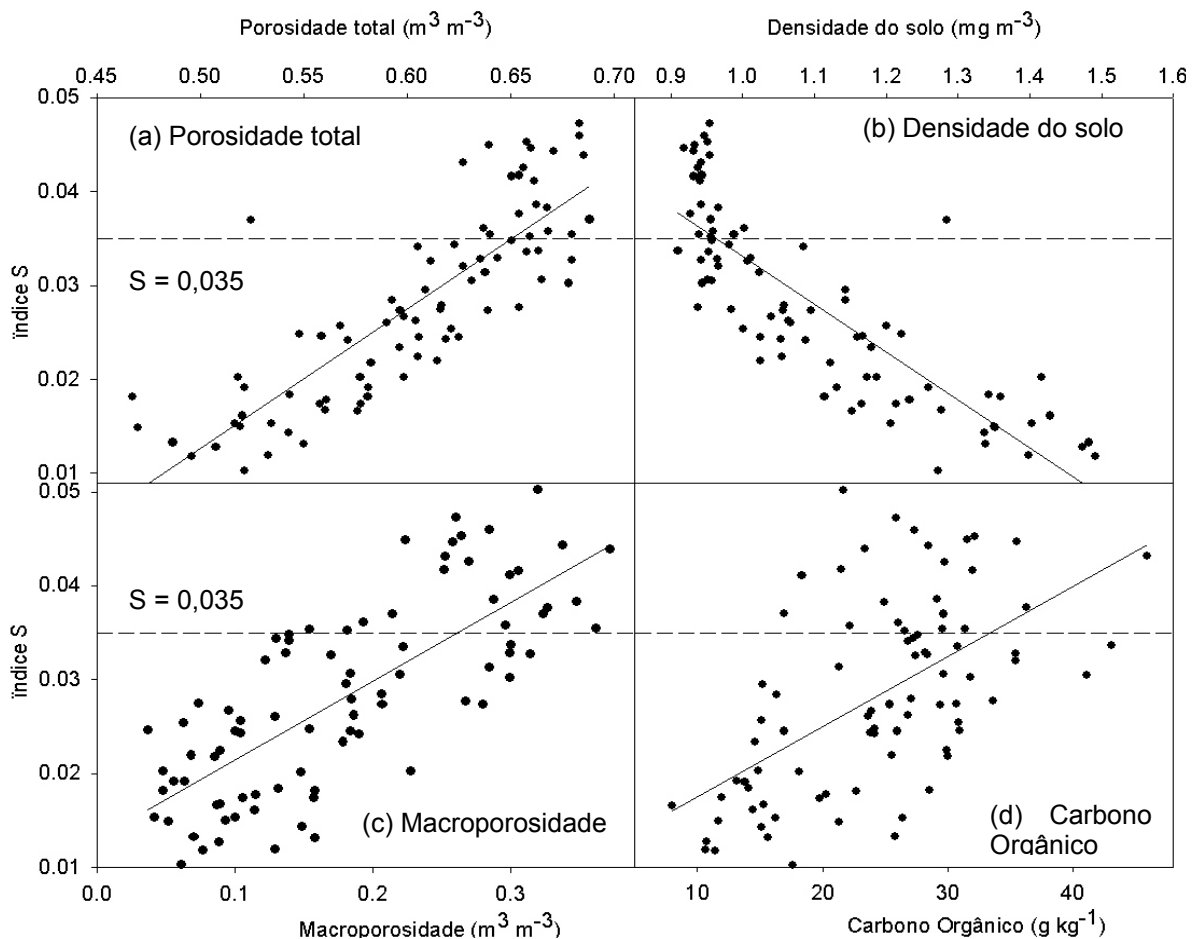
PoT, porosidade total; MicroP, microporosidade; MacroP, macroporosidade; Ds, densidade do solo; CO, Carbono orgânico do solo; (ns), não significativo com o coeficiente de Pearson $< 0,5$; (*) coeficiente de Pearson $< 0,5$.

Mesmo com valores entre 70 e 520 g kg^{-1} para teor de areia; 90 e 340 g kg^{-1} para teor de silte e 350 e 810 g kg^{-1} para teor argila, estes apresentaram coeficiente de Pearson menor que 0,5 (Tabela 0.5). Semelhante aos resultados de Streck et al. (2008) em que o índice S não sofreu influência dos teores de argila ou

argila dispersa em água. Streck et al. (2008) desenvolveram o trabalho em sete Latossolos de textura muito argilosa até média nos estados do Sul do Brasil e compararam o solo de floresta/campo nativo e plantio direto.

A Figura 0.3 mostra os gráficos dos pontos, correlacionando o índice S e a porosidade total (a); densidade do solo (b); macroporosidade (c); e carbono orgânico do solo. Apesar de não ter sido realizada análise de regressão, também foi ilustrada a reta de melhor ajuste entre os atributos citados.

Figura 0.3 – Correlação em cada ponto amostrado (n=84) entre o índice S e a porosidade total (a); densidade do solo (b); macroporosidade (c); e carbono orgânico do solo (d)



Fonte: Autor

O coeficiente de Pearson da correlação entre a microporosidade e o índice S foi inferior a 0,5 (Tabela 0.5). Este resultado, associado com a ausência de correlação do índice S com as frações granulométricas, vem reforçar a relação da microporosidade com a porosidade textural (DEXTER; RICHARD, 2009b).

Os atributos da Tabela 0.5 com coeficiente de Pearson maior que 0,5 foram selecionados e analisados, distinguindo-se as diferentes condições de camada e manejo amostrados. As correlações da MacroP e do CO não foram estatisticamente significativos em pelo menos uma das condições e o coeficiente de Pearson é mostrado na Tabela 0.6. A Figura 0.4 apresenta a distribuição dos pontos em cada um das condições amostradas e a reta de tendência da densidade do solo (Ds), a Figura 0.5 apresenta a porosidade total (PoT). As figuras ainda mostram os coeficientes de Pearson de cada um das condições amostradas.

Tabela 0.6 – Coeficiente de correlação de Pearson entre o Índice S e os atributos macroporosidade e carbono orgânico do solo, em cada condição amostrada (n=21)

Atributos	Condição amostrada (Índice S)			
	Floresta nativa		Solo explorado	
	0 a 0,1m	0,1 a 0,2 m	0 a 0,1 m	0,1 a 0,2 m
MacroP	0,399 ns	0,663 **	0,821 **	0,474 *
CO	0,135 ns	0,481 *	0,328 ns	0,467 *

Fonte: Autor

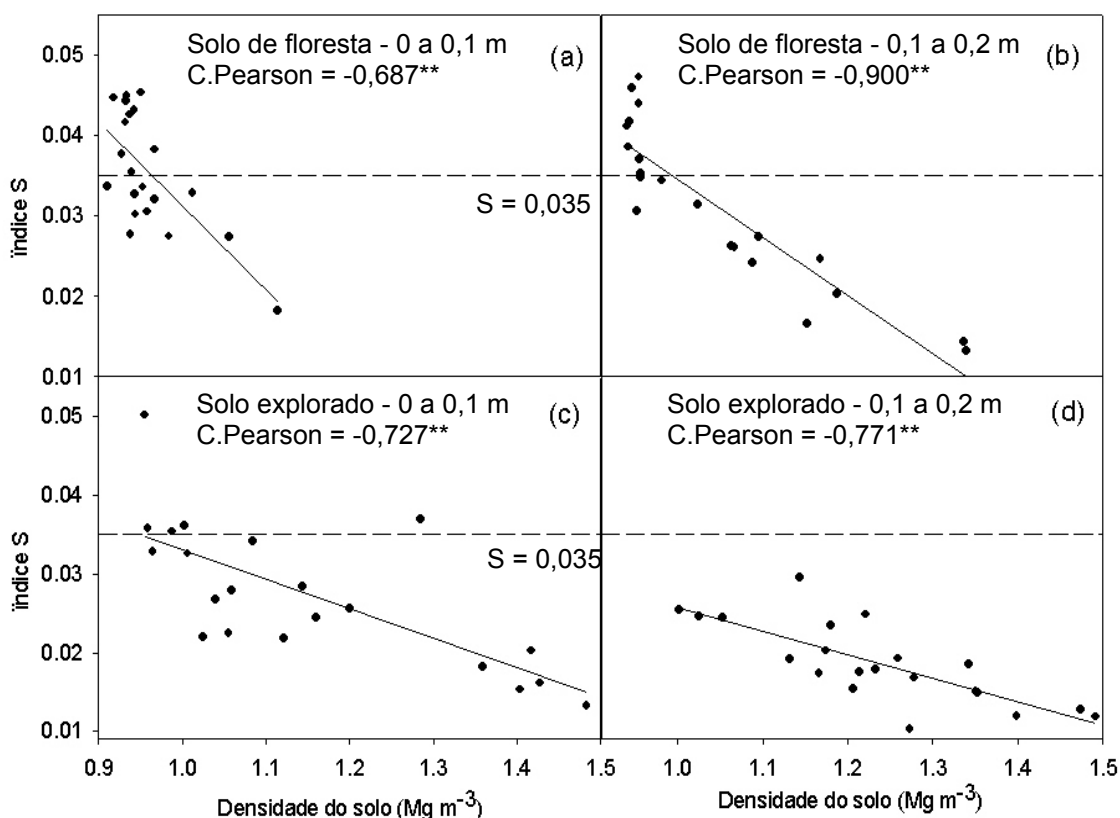
A densidade do solo e a porosidade total são os dois atributos com os maiores coeficientes de correlação de Pearson, esta correlação se manteve forte quando as condições amostradas foram analisadas separadamente, o que confirma a teoria sobre o índice S (DEXTER, 2004a). A Figura 0.4 mostra o gráfico da correlação entre o índice S e a densidade do solo nas quatro condições amostradas: solo de floresta de 0 a 0,1 m - (a); solo de floresta de 0,1 a 0,2 m - (b); solo explorado de 0 a 0,1 m - (c); solo explorado de 0,1 a 0,2 m - (d).

A densidade apresentou uma correlação negativa enquanto a PoT foi positiva e ambas apresentaram correlação forte e muito forte em todas as condições, na classificação proposta por Lira (2004) na Tabela 0.2. Nesses atributos, somente a PoT em solo de floresta de 0 a 0,1 m apresentou correlação moderada (C. Pearson = 0,462). O coeficiente Pearson oscilou entre 0,916 e 0,462 para a PoT (Figura 0.4) e entre -0,687 e -0,900 para a densidade (Figura 0.5).

Andrade e Stone (2009) estudaram vários solos da região do Cerrado com classes texturais desde arenosa a muito argilosa. Também concluíram que o índice S foi altamente correlacionado com a densidade do solo, porosidade total e macroporosidade. Obtiveram regressões com coeficientes de determinação

(R^2) entre 0,66** e 0,51** para densidade do solo, entre 0,64** e 0,50** para porosidade total e entre 0,60** e 0,40** para macroporosidade.

Figura 0.4 – Correlação entre o índice S e a densidade do solo, nos pontos amostrados (n=21) em: (a) solo de floresta na camada de 0 a 0,1 m; (b) solo de floresta na camada de 0,1 a 0,2 m; (c) solo explorado na camada de 0 a 0,1 m; (d) solo explorado na camada de 0,1 a 0,2 m



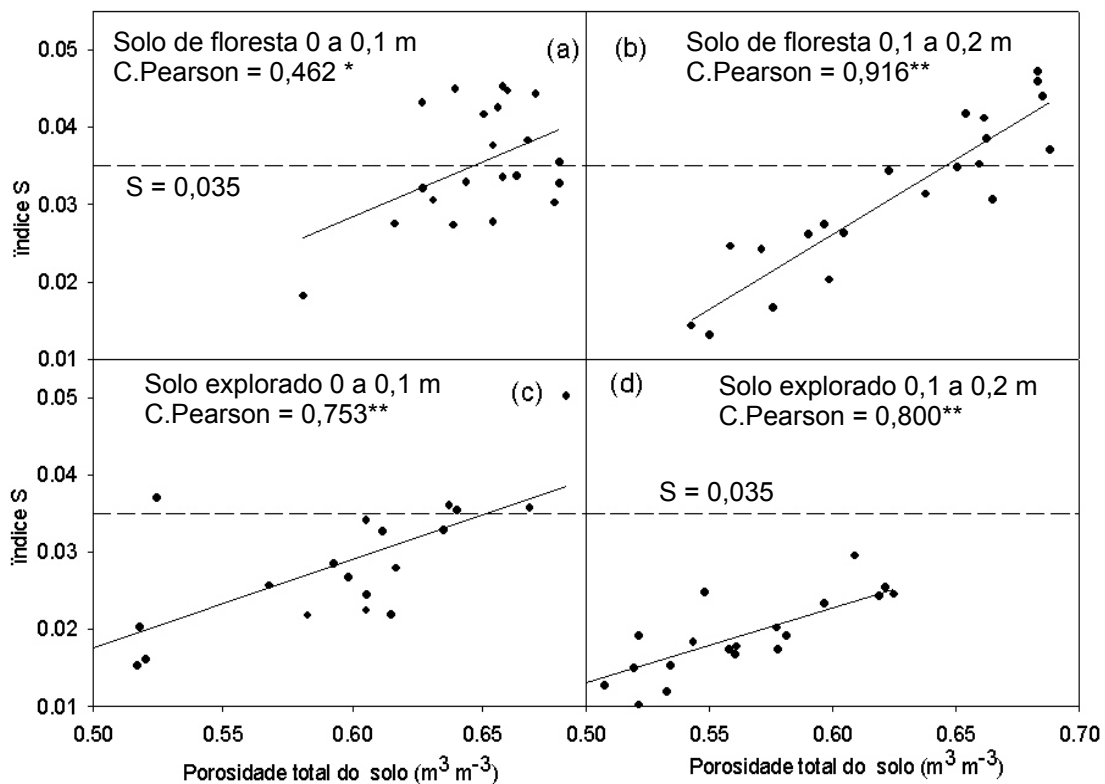
Fonte: Autor

A Figura 0.5 apresenta a correlação entre o índice S e a PoT, na forma de gráfico para as quatro condições amostradas: solo de floresta na camada de 0 a 0,1 m - (a); solo de floresta na camada de 0,1 a 0,2 m - (b); solo explorado na camada de 0 a 0,1 m - (c); solo explorado na camada de 0,1 a 0,2 m - (d). Apesar de não ter sido realizada análise de regressão, também foi ilustrada a reta de ajuste entre os atributos tanto na Figura 0.4 como na Figura 0.5.

A teoria do índice S (DEXTER, 2004a) confirma a correlação do índice S com a porosidade total, a macroporosidade e a densidade, pois estaria avaliando a porosidade estrutural e a funcionalidade dos poros com a conectividade da microestrutura do solo.

Tormena e Silva (2002) não trabalharam com o índice S diretamente, mas avaliaram a sensibilidade dos parâmetros do modelo VGM com a densidade. O índice S é estimado pela equação 0.2 que necessita dos parâmetros θ_{sat} , θ_{res} e n do modelo VGM. Observaram que o parâmetro n do modelo VGM foi sensível às variações da densidade de um Latossolo distroférico, com 800 g kg^{-1} de argila. Para Tormena e Silva (2002) a θ_{sat} e n poderiam ser descritas nos termos da densidade do solo e reforçam a correlação encontrada entre a densidade do solo e o índice S.

Figura 0.5 – Correlação entre o índice S e a porosidade total do solo, nos pontos amostrados ($n=21$) em: (a) solo de floresta na camada de 0 a 0,1 m; (b) solo de floresta na camada de 0,1 a 0,2 m; (c) solo explorado na camada de 0 a 0,1 m; (d) solo explorado na camada de 0,1 a 0,2 m



Fonte: Autor.

Acréscimos na densidade do solo e redução da porosidade total e da macroporosidade também foram descritos por Araújo, Tormena e Silva (2004), em um Latossolo Vermelho distroférico, quando a floresta estacional decidual original foi substituída por manejo que alternava entre preparo convencional e cultivo mínimo por cerca de 20 anos.

Conclusão

O Índice S apresentou-se sensível como indicador de qualidade física do solo e demonstrou correlação significativa com a porosidade total e densidade do solo, a macroporosidade, teor de carbono orgânico, nas condições amostradas.

Referências

AL MAJOU, H.; BRUAND, A.; DUVAL, O. The use of in situ volumetric water content at field capacity to improve the prediction of soil water retention properties. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 88, n. 4, p. 533-541, aug. 2008.

ANDRADE, R. D. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 382-388, jul./ago. 2009.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 8, p. 337-345, mar./abr. 2004.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference - understanding AIC and BIC in model selection. **Sociological Methods & Research**, v. 33, n. 2, p. 261-304, nov. 2004.

CALEGARI, A.; CASTRO FILHO, C.; TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. D. F. Melhoria da agregação do solo através do sistema plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 27, n. 2, p. 147-158, abr./jun. 2006.

CARGNELUTTI FILHO, A.; TOEBE, M.; BURIN, C.; SILVEIRA, T. R. D.; CASAROTTO, G. Tamanho de amostra para estimação do coeficiente de correlação linear de Pearson entre caracteres de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 12, p. 1363-1371, dez. 2010.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 70, n. 3, p. 425-433, aug. 1990.

CENTURION, J. F.; FREDDI, O. D. S.; ARATANI, R. G.; METZNER, A. F. M.; BEUTLER, A. N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 199-209, mar./abr. 2007.

CLAESSEN, M. E. C.; BARRETO, W. D. O.; PAULA, J. L. D.; DUARTE, M. N. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

DEXTER, A. R. Soil physical quality - Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3/4, p. 201-214, June 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality - Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v. 120, n. 3/4, p. 227-239, June 2004b.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A. Applications of S-THEORY in the study of soil physical degradation and its consequences. **Land Degradation & Development**, v. 18, n. 4, p. 369-381, July/August 2007.

DEXTER, A. R.; RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. **Soil & Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 113-118, April 2009b.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 191-192, jan./mar. 2000.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4-10, Jan./Feb. 1997.

LIRA, S. A. **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. 2004. 196 p. Dissertação (Mestrado em Métodos numéricos em engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 495-502, Mar./Abr. 2008.

POETER, E.; ANDERSON, D. Multimodel ranking and inference in ground water modeling. **Ground Water**, v. 43, n. 4, p. 597-605, July 2005.

SANTOS, H. G. D.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. D.; OLIVEIRA, V. Á. D.; OLIVEIRA, J. B. D.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. esp., p. 2603-2612, out./dez. 2008.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 305-314, mar./abr. 2002.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. D.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil & Tillage Research**, v. 52, n. 3/4, p. 223-232, Oct. 1999.

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, Sep. 1980.

VERECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. Using pedotransfer functions to estimate the Van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 4, p. 795-820, nov. 2010.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743-755, Jul./Ago. 2009.

WEYNANTS, M.; VERECKEN, H.; JAVAUX, M. Revisiting Vereecken pedotransfer functions: Introducing a closed-form hydraulic model. **Vadose Zone Journal**, v. 8, n. 1, p. 86-95, Feb. 2009.

Amazing Grace!

Amazing grace! How sweet the sound
 That saved a wretch like me!
 I once was lost, but now am found,
 Was blind, but now I see.
 'Twas grace that taught my heart to fear,
 And grace my fears relieved;
 How precious did that grace appear,
 The hour I first believed!

Through many dangers, toils and snares,
 I have already come;
 'Tis grace has brought me safe thus far,
 And grace will lead me home.
 The LORD has promised good to me,
 His word my hope secures;
 He will my shield and portion be,
 As long as life endures.

Yes, when this flesh and heart shall fail,
 And mortal life shall cease,
 I shall possess, within the veil,
 A life of joy and peace.

The earth shall soon dissolve like snow,
 The sun forbear to shine;
 But GOD, who called me here below,
 Will be for ever mine

John Newton, Olney Hymns
 (London: W. Oliver, 1779)

4 ARTIGO B

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA OBTENÇÃO DO ÍNDICE S

Resumo: Um grande desafio na ciência do solo é, segundo Bouma, “traduzir os dados que possuímos em dados que necessitamos”. Para tanto, são propostas funções de pedotransferência, e quando estimam as características de retenção de água, podem ser pontuais ou paramétricas. Vários indicadores foram propostos para a qualidade física de solo e Dexter propõe o índice S em 2004. O objetivo foi avaliar a utilização de funções de pedotransferência para retenção de água no solo, para determinar o índice S em condições de campo na diversidade de solos do estado do Paraná. Amostras de solos foram coletadas de 36 locais com as texturas variando de arenosa a muito argilosa, nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m e em duas condições (floresta nativa e solo explorado). Determinaram-se o conteúdo d’água em 6 potenciais mátricos, porosidade, macroporosidade, microporosidade, densidade do solo, densidade de partícula e teores de argila, areia e silte. Foi ajustada uma curva de retenção de água pelo modelo Mualem–Van Genuchten e o índice S calculado. O índice S foi estimado das curvas de retenção de água obtidas pela função de pedotransferência de Tomasella (pontual e paramétrica). Embora o coeficiente de determinação tenha variado entre 0,759 a 0,895, o índice de eficiência da modelagem foi negativo e o coeficiente de regressão entre observado e predito foi diferente de 1 em todas as comparações. Nas condições de campo e diversidade de solos do estado do Paraná, foram encontradas restrições na estimativa do índice S usando as Funções de Pedotransferência avaliadas.

Palavras-chave: Curva de retenção de umidade. Critério de informação de Akaike. Estrutura do solo. Porosidade do solo. Mualem-Van Genuchten.

Abstract: The huge challenge for soil science is, according Bouma, "translate data we have to data we need". For this, were proposed the pedotransfer functions, and when estimating the water retention characteristics, could be punctual or parametric. Several indicators were proposed for the physical quality of soil and Dexter proposed the S index in 2004. The objective was to assess the use of pedotransfer functions for soil water retention to determinate the S index under field conditions in the diversity of soils of Paraná state. Soil samples were collected from 36 sites with textures ranging from sandy to heavy clay at layers of 0 to 0.10 and 0.10 to 0.20 m and on two conditions (native forest and soil explored). It were determined the content of water in six matric potential, porosity, macroporosity, microporosity, bulk density, particle density and contents of clay, sand and silt. It were adjusted a water retention curve by Van Genuchten-Mualem model and the index S was calculated. The S index was estimated from water retention curves obtained by the pedotransfer function of Tomasella (point and parametric). Although the coefficient of determination varied between 0.759 to 0.895, the modeling efficiency was negative and the regression coefficient between observed and predicted was higher than 1 in all comparisons. In field conditions and soil diversity of the Paraná state, we found restrictions when using the pedotransfer functions evaluated to estimate the S index.

Keywords: Moisture retention curve. Akaike information criterion. Soil structure. Soil porosity. Mualem-Van Genuchten.

Introdução

Mesmo antes da proposição do termo Função de Pedotransferência, já se buscava obter funções preditivas de características complexas do solo (DE JONG; LOEBEL, 1982). O termo foi introduzido por Bouma (1989) para definir as funções preditivas de atributos do solo que apresentam custo elevado ou dificuldade de determinação, obtendo-as a partir de dados disponíveis. Neste aspecto, para Bouma (1989), um grande desafio para ciência do solo é “traduzir os dados que possuímos em dados que necessitamos”.

As considerações de Bouma faziam menção da utilização de informações de levantamentos de solo para alcançar as características desejadas, a partir de dados pré-existentes. No entanto, com o desenvolvimento das Funções de Pedotransferência (FPT), passou-se a utilizar dados topográficos e espaciais para as estimativas (MOTAGHIAN; MOHAMMADI, 2011). Atualmente as FPTs estão presentes nos esforços para obtenção do mapeamento digital do solo (SANCHEZ et al., 2009).

As FPTs para determinar as características de condutividade hidráulica e curva de retenção de água (CRA) são provavelmente as mais comuns. Outras FPT foram desenvolvidas para caracterizar a resistência à penetração (FIDALSKI; TORMENA, 2007; ALMEIDA et al., 2008)); densidade do solo (BENITES et al., 2007; HOLLIS; HANNAM; BELLAMY, 2012); resistividade elétrica (HADZICK et al., 2011); parâmetros do teste de Proctor (ÁLVAREZ et al., 2010) e modelagem de perda de solo por erosão (FLANAGAN; PACHEPSKY; RAWLS, 2004).

As FPT que estimam a CRA podem ser agrupadas em dois tipos distintos: as pontuais e paramétricas. As FPT paramétricas estimam os parâmetros da CRA, que normalmente utilizam o modelo Mualem–Van Genuchten - VGM (VAN GENUCHTEN, 1980). As pontuais estimam a umidade do solo em pontos de tensão específicos na CRA (VERECKEN et al., 2010).

Van Genuchten (1980) já discutia o ponto de inflexão da curva quando propôs o modelo para a CRA, mas Dexter (2004a) consolidou a proposta de uso como indicador de qualidade física do solo. Outros indicadores também foram propostos e avaliados, tais como a resistência à penetração (RIBON; TAVARES, 2004) porosidade, condutividade hidráulica, (FIDALSKI; TORMENA, 2007; ARAÚJO,

2011), densidade relativa (CARTER, 1990) e o Intervalo Hídrico Ótimo (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1999).

O índice S é definido como a tangente da inclinação da CRA no seu ponto de inflexão, quando a curvatura alterna de convexa para côncava. É uma indicação da extensão da porosidade do solo que se concentra em torno de uma estreita faixa, que é diretamente relacionado com a microestrutura do solo, o tamanho e continuidade da porosidade (DEXTER, 2004a).

Dexter (2004a) apresentou duas formas de determinação do índice S. A primeira é medida manualmente num gráfico traçado com os pontos de umidade do solo e tensão de água. A segunda necessita do ajuste da curva a uma função matemática, na qual a derivada de segunda ordem desta curva fornece o ponto de inflexão da curva. A inclinação neste ponto determinada pelos parâmetros da curva ajustada e é mais conveniente (DEXTER, 2004a).

Dexter (2004b) identificou o valor de $S = 0,035$ como o limite entre solos com boa e pobre qualidade estrutural. Dexter e Czyz (2007) acrescentaram dois outros limites, nos quais a qualidade estrutural do solo seria considerada muito pobre quando o índice S for inferior a 0,02, e ótima ou muito boa quando o índice S for superior a 0,05.

A determinação da umidade do solo em tensões específicas é normalmente demorada, em alguns casos pode exceder a meses, principalmente nas tensões mais altas. Portanto o objetivo foi verificar a viabilidade da utilização de Funções de Pedotransferência de CRA no solo, para determinação do índice S (de qualidade física) em condições de campo na diversidade de alguns solos do estado do Paraná.

Material e Métodos

Foram coletadas amostras de solo em 36 locais no estado do Paraná, em duas camadas (0 a 0,1 m e 0,1 a 0,2 m) e sob duas condições. A primeira condição foi em floresta nativa e natural; a segunda foi em solo explorado, sob o manejo e lavoura com representatividade da região e próximas da primeira amostragem (floresta), totalizando 144 condições. Ao amostrar duas condições de manejo, buscou-se aumentar a amplitude dos valores de índice S.

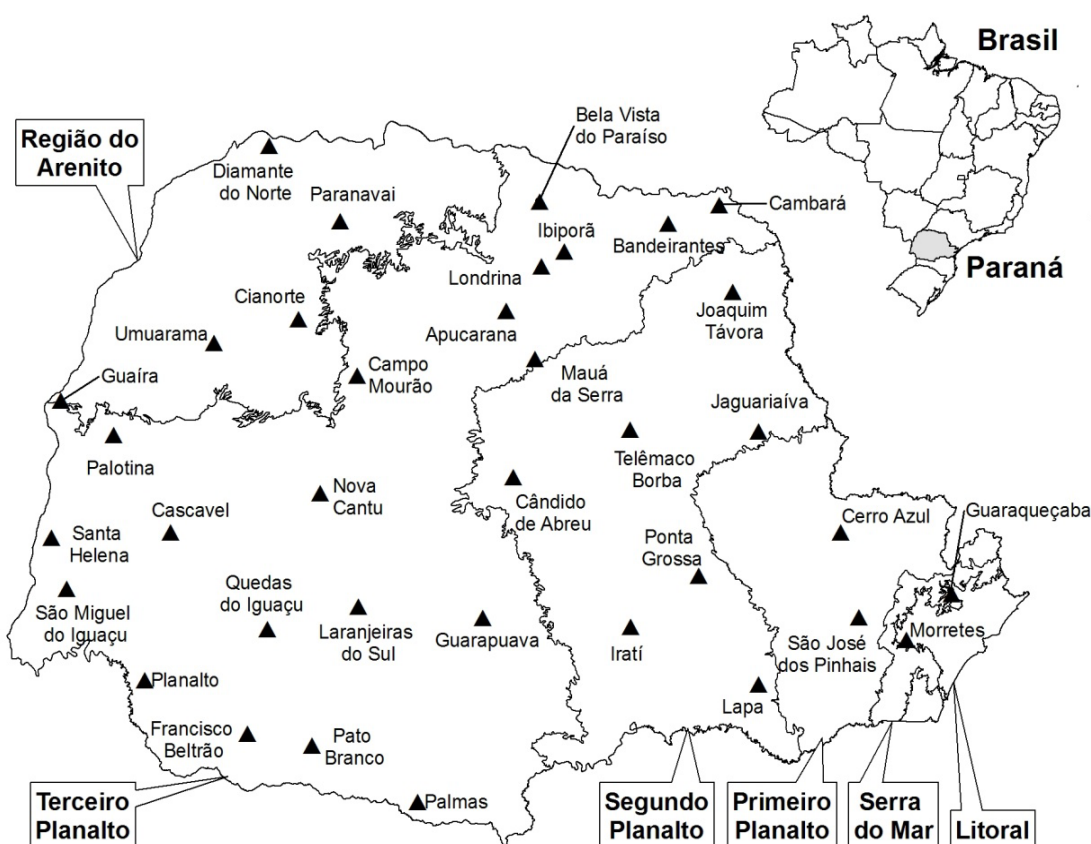
Cada local amostrado possuía manejo definido pelo proprietário da área, pois as amostras foram tomadas em áreas particulares. O plantio direto foi encontrado em 12 locais, plantio convencional em 21 e pastagens em 3. Nos locais em plantio direto as culturas instaladas dividiam-se entre soja (6) e milho (6), enquanto que no plantio convencional dividiam-se entre milho (14), soja (3), sorgo (1), palmeira real (1), mandioca (1) e pupunha (1).

Os Locais amostrados foram nos municípios de: Apucarana, Bandeirantes, Bela Vista do Paraíso, Cambara, Campo Mourão, Candido de Abreu, Cascavel, Cerro Azul, Cianorte, Diamante do Norte, Francisco Beltrão, Guaíra, Guarapuava, Guaraqueçaba, Ibiporã, Irati, Jaguaraíva, Joaquim Távora, Lapa, Laranjeiras do Sul, Londrina, Mauá da Serra, Morretes, Nova Cantu, Palmas, Palotina, Paranavaí, Pato Branco, Planalto, Ponta Grossa, Quedas do Iguaçu, Santa Helena, São José dos Pinhais, São Miguel do Iguaçu, Telêmaco Borba e Umuarama, todos no estado do Paraná, conforme a Figura 0.1, com a delimitação das regiões morfo-fisiográficas.

Em cada condição (manejo, local e camada) foi coletada amostra indeformada em triplicata, aleatórias e em distância que não comprometesse a independência ou a representatividade das coletas. Os anéis coletados, com volume de $99,37 \text{ cm}^3$ em aço, foram cravados verticalmente no solo, por meio de um amostrador/extrator que permitiu coletar os anéis das duas camadas no mesmo ponto, num total de 432 amostras simples. Também foram coletadas amostras em triplicata para outras determinações físicas.

Através das amostras de anel volumétrico foram determinadas a densidade do solo (D_s) e a umidade gravimétrica nas tensões (potencial mátrico) de 6; 30; 100; 300; 500 e 1500 kPa em mesa de tensão ou câmara de pressão de Richards (de acordo com a tensão), para ajuste à curva de retenção de água - CRA no solo. Foram determinadas a macroporosidade, a microporosidade, e a porosidade total, pelo método da EMBRAPA, e a densidade de partícula foi determinada pelo método do balão volumétrico. Os teores de argila, areia e silte foram determinados pelo método da pipeta com agitação lenta, na presença do dispersante NaOH (CLAESSEN et al., 1997). A Tabela 0.1 apresenta os momentos estatísticos das análises realizadas.

Figura 0.1 – Distribuição dos locais amostrados e as regiões morfo-fisiográficas do Estado do Paraná



Fonte: Autor

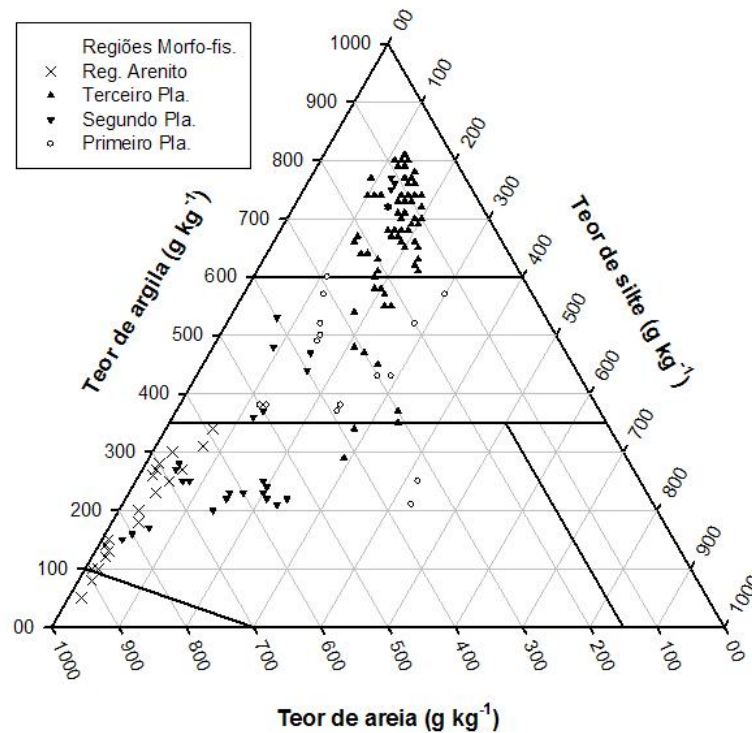
Tabela 0.1 – Momentos estatísticos das análises físicas das 144 condições

Atributo	Média	Desvio padrão	Mediana	Máximo	Mínimo
Teor de Argila (g kg^{-1})	498	232	570	810	50
Teor de Silte (g kg^{-1})	148	84	150	430	10
Teor de Areia (g kg^{-1})	354	267	280	930	70
Densidade (mg m^{-3})	1,15	0,21	1,12	1,69	0,91
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,38	0,09	0,39	0,56	0,15
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,19	0,10	0,18	0,45	0,02
Porosidade Total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,57	0,08	0,58	0,69	0,36

Fonte: Autor

A Figura 0.2 apresenta a distribuição granulométrica das amostras no triângulo textural, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (SANTOS et al., 2006). Nesta figura as amostras foram agrupadas e apresentadas segundo a região morfo-fisiográficas do estado referente ao local onde foram amostradas.

Figura 0.2 – Distribuição granulométrica das amostras agrupadas segundo a região morfo-fisiográfica do local amostrado, no triângulo textural do SiBCS e as classes texturais



Fonte: Adaptado de SANTOS et al. (2006).

Curva de Retenção de Água no Solo e o Índice S

Dexter (2004a) e Vereecken et al. (2010) citam que provavelmente o modelo mais utilizado para descrever a CRA seja o de Mualem–Van Genuchten (VGM). Para o ajuste da CRA foi adotado este modelo, descrito pela equação 0.1, no qual Van Genuchten (1980) recomenda manter a relação de Mualem, que restringe $m=1-1/n$.

$$\theta = (\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \cdot \left[1 + (\alpha \cdot h)^n \right]^{-m} + \theta_{\text{res}} \quad (0.1)$$

em que :

θ_h = conteúdo de água no solo na tensão h ;

θ_{sat} = umidade do solo saturada;

θ_{res} = umidade residual;

m, n e α = parâmetros.

O índice S foi proposto por Dexter (2004a) como indicador de qualidade física do solo. É descrito como sendo a tangente da inclinação da CRA no ponto de inflexão. Quando se considera a restrição de $m=1-1/n$ no modelo VGM o índice S pode ser obtido pela equação 0.2 (DEXTER, 2004a). O índice S é sempre negativo, mas Dexter (2004a) recomenda utilizar sempre o modulo do valor.

$$S = -n(\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}) \cdot \left[\frac{2 \cdot n - 1}{n - 1} \right]^{\left[\frac{1}{n} - 2 \right]} \quad (0.2)$$

em que :

S = índice S proposto por Dexter (2004a);

θ_{sat} = umidade do solo saturada;

θ_{res} = umidade residual;

n = parâmetro do modelo VGM.

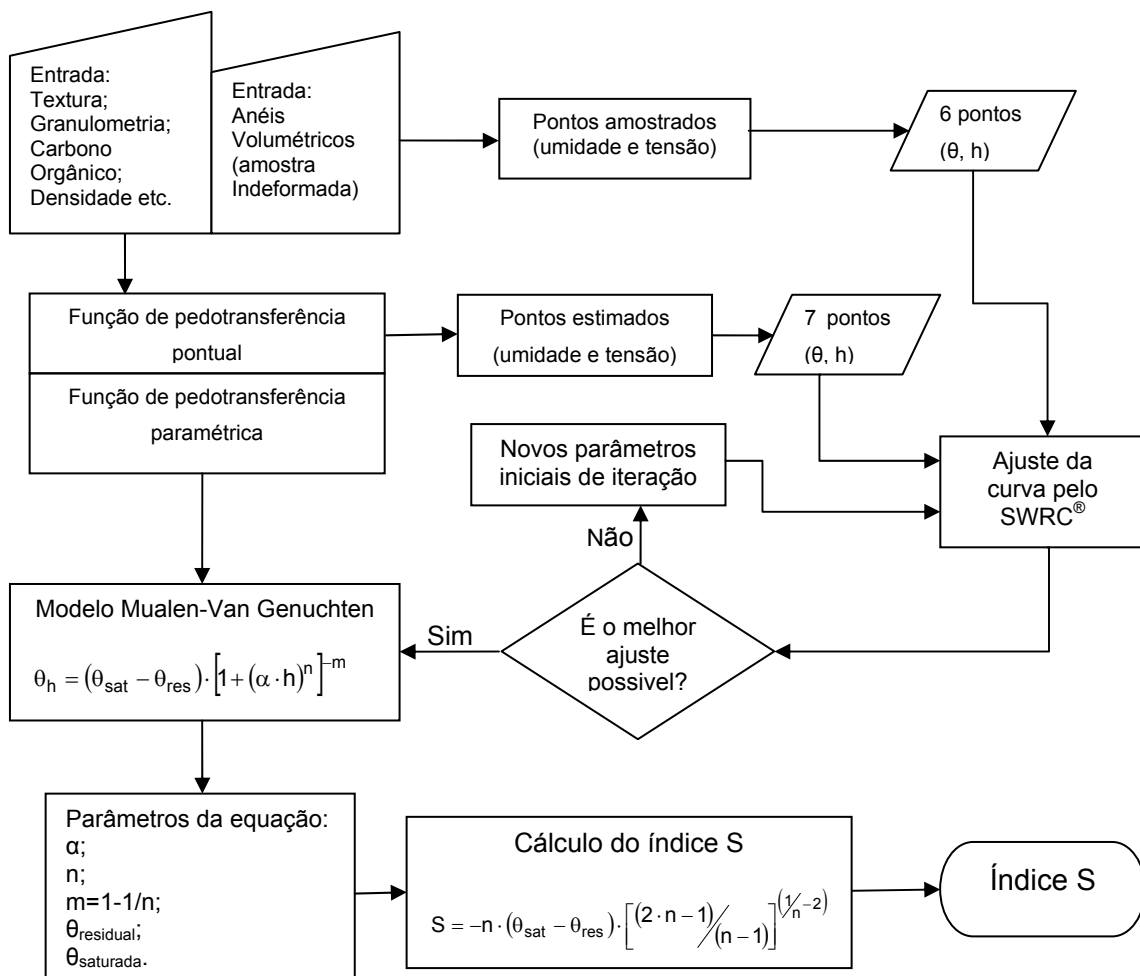
Para obter as CRA estimadas, foram utilizadas Funções de Pedotransferência de Tomasella et al. (2003), que foram desenvolvidas com base numa grande variedade de solos brasileiros. A FPT pontual de Tomasella et al. (2003) estima 5 pontos de tensão, em 6, 10, 33, 100 e 1500 kPa, além do ponto de saturação (0 kPa). As variáveis auxiliares e os detalhes das FPT paramétricas e pontuais (TOMASELLA et al., 2003) são detalhadas no anexo. As propriedades de entrada necessárias para as FPT são: distribuição de tamanho de partículas; densidade do solo e equivalente umidade.

Ajuste da Curva

Os dados de umidade do solo, observados nas amostras e estimados pela FPT pontual, foram ajustados às CRA baseada no modelo VGM, utilizando-se o software SWRC, considerando-se a restrição de $m=1-1/n$ (VAN GENUCHTEN, 1980). O SWRC foi desenvolvido por Dourado-Neto et al. (2000) e realiza o ajuste por iterações sucessivas a partir de parâmetros inicialmente preestabelecidos do modelo VGM (α , n, m, umidade saturada e residual). O ajuste de cada curva foi avaliado por coeficientes estatísticos calculados pelo SWRC durante o ajuste.

Após o ajuste inicial, cada curva foi avaliada visualmente, pela plotagem da curva ajusta com os pontos de tensão e umidade (obtidos ou estimados). O ajuste de cada curva foi repetido, com a alteração de parâmetros iniciais da iteração, até que as avaliações estatística e visual revelassem a curva com menor desvio dos pontos. A Figura 0.3 apresenta o diagrama de fluxo adotado com os passos entre os resultados amostrados até a obtenção do índice S. Nos casos que o SWRC não alcançou este ajuste, a definição dos parâmetros iniciais foi auxiliada pelo software RETC (VAN GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991) e redefinida no SWRC. Da amostra em triplicata foi selecionado o anel (dados de umidade e tensão) com a curva de melhor ajuste em cada uma das 144 situações.

Figura 0.3 – Fluxograma dos passos para obtenção do Índice S, pelas funções de pedotransferência e pelos dados amostrais



Fonte: Autor

Duas formas de estimar a umidade residual foram consideradas durante o ajuste das CRA. A primeira fixou a umidade residual em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto que a segunda, permitiu a estimativa variável em função do melhor ajuste da curva. Este procedimento foi adotado tanto para os pontos amostrados como para os pontos estimados pelas FPT de Tomasella et al. (2003). A umidade residual foi fixada em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, em razão dos resultados obtidos por Weynants et al. (2009) e Al Majou, Bruand e Duval (2008).

Os parâmetros do modelo VGM de cada curva ajustada, pelos dados observados, pelos pontos estimados das FPT pontuais ou ainda estimados pela FPT paramétrica, foram introduzidos na equação 0.2 para obtenção do índice S. Os índices S das curvas dos dados observados foram comparados com os simulados nas curvas de cada FPT avaliada (pontual ou paramétrica). A Tabela 0.2 apresenta a relação das curvas ajustadas com o tipo de FPT e também segundo a estimativa da umidade residual.

Tabela 0.2 – Relação das curvas ajustadas para estimativa do índice S, em razão da FPT, do tipo de estimativa da umidade residual e simbologia adotada

Modelo – FPT	Tipo	θ residual	Símbolo
1 Observado	Pontual	Estimado	Obs_est
2 Observado	Pontual	0,01	Obs_001
3 (TOMASELLA et al., 2003)	Paramétrica	Estimado	Tom_par
4 (TOMASELLA et al., 2003)	Pontual	0,01	Tom_001
5 (TOMASELLA et al., 2003)	Pontual	Estimado	Tom_est

Fonte: Autor

Análises Estatísticas

Inicialmente, cada curva ajustada foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2), Akaike Information Criterion (AIC) e nível de significância (p-valor) da análise de variância da regressão, calculados pelo SWRC. O índice AIC (equação 0.3) é um teste utilizado para discriminar modelos, é afetado pelo número de parâmetros e observações.

$$AIC = (-2) \cdot \log(ML) + 2(k) \quad (0.3)$$

em que:

AIC = Akaike Information Criterion;

ML = máxima verossimilhança (Maximum Likelihood);

k = número de parâmetros ajustados.

Poeter e Anderson (2005) descrevem que, entre dois modelos, aquele que possui melhor ajuste apresentará o AIC de menor valor. Quando a diferença entre o AIC de um modelo e o AIC do melhor (menor AIC) for inferior a 2 indica que os modelos são muito bons e próximos. Quando se encontra entre 4 e 7, a sustentação empírica do modelo é pequena e essencialmente nenhuma se maior que 10 (BURNHAM; ANDERSON, 2004). Com base nestas avaliações foi selecionada uma curva de cada triplicata de cada condição de manejo, local e camada.

A avaliação estatística entre os valores observados e estimados do índice S foi realizada pelo ajuste de uma regressão linear que passa pela origem. Seguindo as orientações de Bussab (1988), os dados observados foram atribuídos à variável dependente e os dados estimados, à variável independente. Foi estimado o coeficiente de determinação (R^2) e pelo teste t de student, foi testada a hipótese $H_0: \beta=1$ e $\alpha=0$. A notação utilizada para o resultado do teste foi: ns (não significativo), não é possível afirmar que $\beta \neq 1$ e considerou-se $\beta=1$; ** para $\beta \neq 1$. Devido ao número de observações, foi adotado o nível de significância de 1%. Também foi utilizado o índice de eficiência (EF) de modelagem (NASH; SUTCLIFFE, 1970) recomendado por Donatelli et al. (2004) para avaliação da acurácia de FPT.

Resultados e Discussão

A Tabela 0.3 mostra os momentos estatísticos do AIC, do coeficiente de determinação (R^2) e do índice S, obtidos durante o ajuste das 144 curvas aos dados de umidade e tensão (observados e estimados). Tanto a média como a mediana do coeficiente de determinação do ajuste dos dados observados foi superior a 0,99 expressando o bom ajuste das curvas, confirmado também pelo AIC.

Os ajustes de curva dos dados observados, para as duas formas de estimar a umidade residual, apresentaram resultados do AIC, coeficiente de determinação e índice S próximos entre si. Os valores de S são apresentados em módulo seguindo a recomendação de Dexter (2004a).

As médias e medianas do índice S das FPT foram maiores que dos dados observados. Os valores do índice S médios dos dados observados foram de 0,038 e 0,030, respectivamente para Obs_est e Obs_001. Valores próximos foram observados por outros autores, tais como Gate, Czyz e Dexter (2006) que encontraram valores entre 0,042 e 0,019 estudando 5 locais na Polônia, na camada de 0-0,2 m. No estado de São Paulo, Aratani et al. (2009) encontraram valores do índice S entre 0,16 e 0,04 em Latossolo Vermelho acriférrico típico textura argilosa, sob plantio direto irrigado e sequeiro (12 e 5 anos, respectivamente), convencional, integração lavoura-pecuária (2 anos) e floresta natural.

Tabela 0.3 – Momentos estatísticos do coeficiente de determinação (R^2), do Akaike Information Criterion (AIC) e índice S das 144 curvas ajustadas aos dados observados e as FPT

Curvas ajustadas	Indicador	Momentos estatísticos				Desvio padrão
		Média	Mediana	Máximo	Mínimo	
Obs_est	R^2	0,994	0,998	1,000	0,967	0,008
	AIC	-16,80	-16,74	-6,03	-32,38	4,77
	Índice S	0,038	0,037	0,099	0,009	0,020
Obs_001	R^2	0,993	0,996	1,000	0,962	0,007
	AIC	-16,57	-16,64	-7,92	-29,87	4,04
	Índice S	0,030	0,029	0,077	0,009	0,012
Tom_001	R^2	0,986	0,989	1,000	0,935	0,012
	AIC	-10,34	-10,17	-1,41	-19,36	2,97
	Índice S	0,044	0,042	0,133	0,022	0,017
Tom_est	R^2	0,990	0,996	1,000	0,947	0,013
	AIC	-10,12	-10,52	1,63	-22,20	4,13
	Índice S	0,064	0,055	0,272	0,025	0,033
Tom_par	Índice S	0,064	0,063	0,123	0,033	0,014

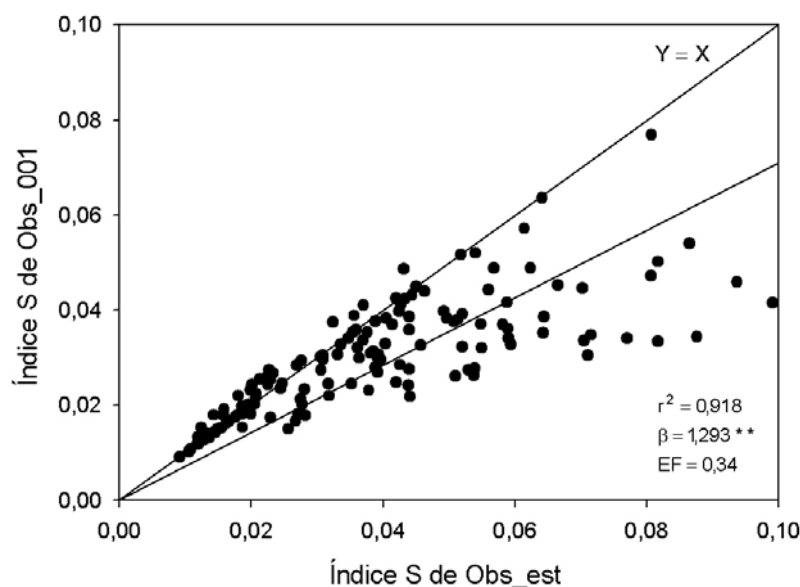
Fonte: Autor

Semelhantemente, Cunha et al. (2011) encontraram variações do índice S entre 0,091 e 0,019, num Latossolo com textura franco-argilosa, com 320 g kg^{-1} de argila, sob plantio direto (4 anos), convencional e floresta nativa, em Goiás. Andrade e Stone (2009), no cerrado brasileiro, encontraram valores de S entre 0,116 e 0,025, em solos com textura desde muito argilosa a arenosa.

O primeiro resultado de destaque é com relação à forma de estimar a umidade residual nos dados observados. A Figura 0.4 mostra os pares de pontos de índice S entre Obs_est e Obs_001 e a reta estimada na regressão. A regressão entre eles apresentou o coeficiente de determinação superior a 0,9, mas o coeficiente da regressão foi diferente de 1 enquanto que o índice de eficiência da modelagem (EF) foi de 0,34. Este fato mostra a influência da determinação da umidade residual na estimativa do Índice S.

Ainda observa-se que quanto maior o índice S, maior a interferência da umidade residual sobre o mesmo. Também se verifica que o índice S em geral é subestimado quando a umidade residual é fixada em 0,01, durante o ajuste da curva, em relação à umidade residual estimada pela curva. Na comparação entre Obs_001 e Obs_est, merece destaque o fato de que tanto a média como a mediana do índice S de Obs_est foram superior ao valor limítrofe (0,035) de qualidade definido por Dexter (2004b), ao contrário de Obs_001, que apresentou valores inferiores a este valor (Tabela 0.3).

Figura 0.4 – Índices S dos dados observados (144 curvas), obtidos de duas formas de estimar a umidade residual (fixo em 0,01 - Obs_001 e estimado - Obs_est) e a análise de regressão



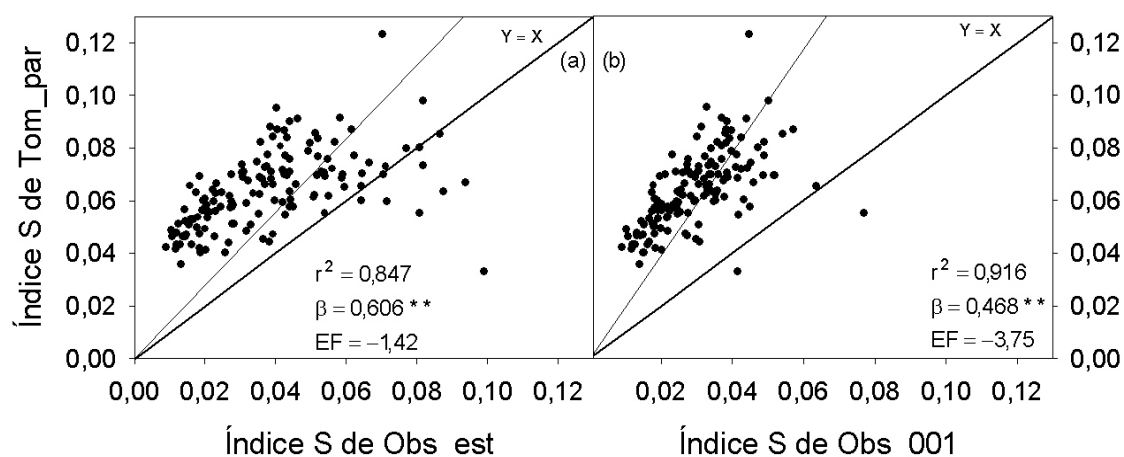
Fonte: Autor

Para todas as comparações do Índice S, entre os dados observados e os estimado pelas FPT, observa-se uma tendência em superestimar em relação aos dados observados. Em todas as comparações o EF foi negativo e o coeficiente

de determinação (R^2) foi superior a 0,9 somente entre Tom_par e Obs_001 (Figura 0.5-b). No restante das FPT, apresentou uma variação entre 0,759 a 0,895.

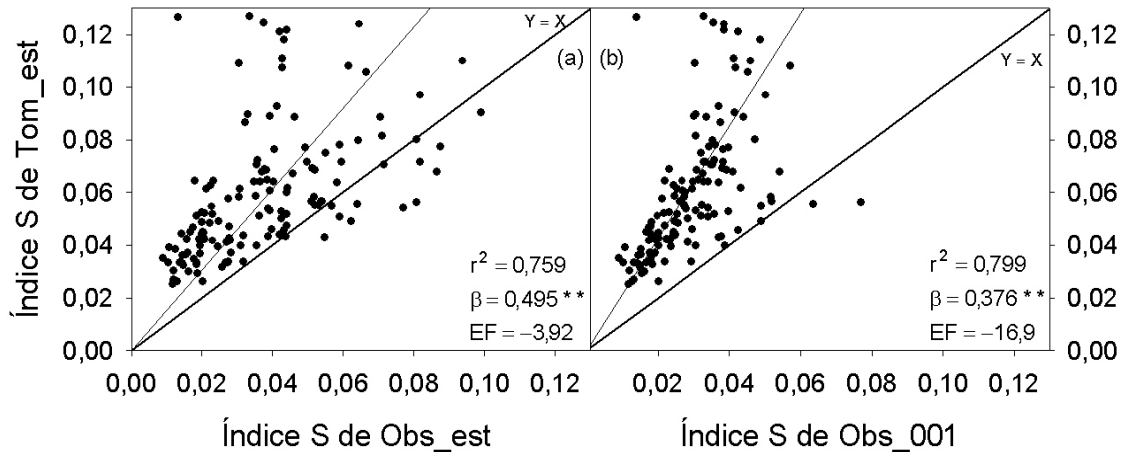
A FPT que apresentou melhor coeficiente de determinação foi a de Tomasella et al. (2003) paramétrica (Tom_par) quando comparada aos dados observados (Obs_001), com R^2 de 0,916. Os índices S estimados por Tom_par comparados com os observados de Obs_est e Obs_001, são apresentados, com a reta da análise de regressão e índice de eficiência (EF) de modelagem, na Figura 0.5, respectivamente (a) e (b). A Figura 0.6, apresenta a FPT Tomasella et al. (2003) pontual com umidade residual estimada (Tom_Est) comparada com os dados observados (Obs_est e Obs_001, respectivamente a e b).

Figura 0.5 – Índices S dos dados estimados pela FPT de Tomasella et al. (2003) paramétrica (Tom_par) em relação aos observados (a) com umidade residual estimada (Obs_est) e (b) com umidade residual fixada (Obs_001) com as respectivas análises de regressão (144 curvas)



Fonte: Autor

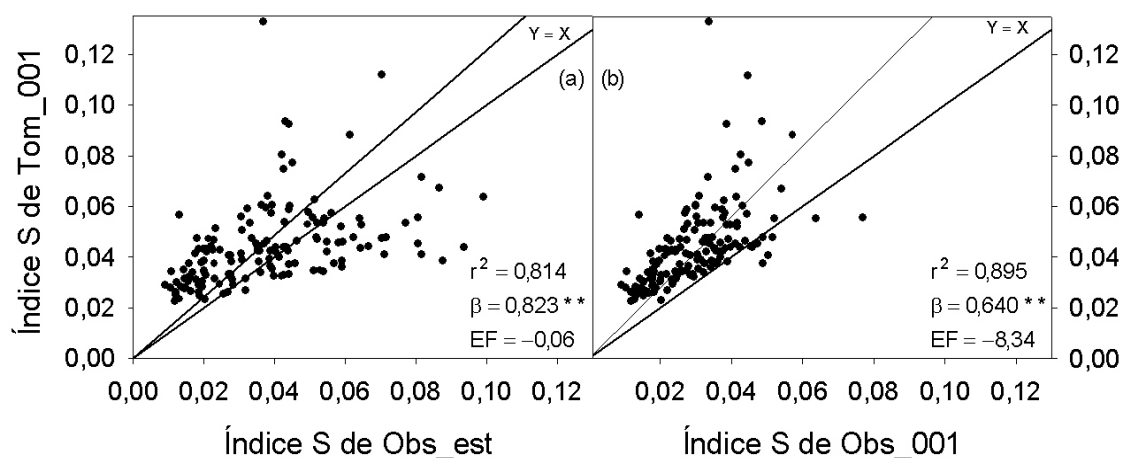
Figura 0.6 – Índices S dos dados estimados pela FPT de Tomasella et al. (2003) pontual com umidade residual estimada (Tom_est) em relação aos observados (a) com umidade residual estimada (Obs_est) e (b) com umidade residual fixada (Obs_001) com as respectivas análises de regressão (144 curvas)



Fonte: Autor

A reta da análise de regressão e índice de eficiência (EF) de modelagem da comparação da FPT de Tomasella et al. (2003) pontual com umidade residual fixa em 0,01 (Tom_001) com os dados observados (Obs_est e Obs_001), são apresentados na Figura 0.7, respectivamente (a) e (b). Em todas as comparações das FPT (Tom_par, Tom_est e Tom_001) com os dados observados (Obs_est e Obs_001), a inclinação da reta foi diferente de 1, sendo que a mais próxima ($\beta = 1$) foi entre Tom_001 e Obs_est ($\beta = 0,832$).

Figura 0.7 – Índices S dos dados estimados pela FPT de Tomasella et al. (2003) pontual com umidade residual fixada (Tom_001) em relação aos observados (a) com umidade residual estimada (Obs_est) e (b) com umidade residual fixada (Obs_001) com as respectivas análises de regressão (144 curvas)



Fonte: Autor

O índice de eficiência da modelagem (EF) ficou abaixo de zero em todas as comparações evidenciando a dificuldade das FPT em estimar curvas para predição de valores de índice S. Provavelmente deve-se a dois fatores. Observou-se na equação do índice S (Eq. 0.2), que é dependente somente de 3 dos 5 parâmetros do modelo de VGM, que são: n , umidade residual (θ_{res}), umidade saturada (θ_{sat}). A FPT de Tomasella et al. (2003) paramétrica (Tom_par) possui estimativa de umidade residual, para a FPT pontual a estimativa de umidade residual é pelo ajuste da CRA ou então fixado, neste caso em 0,01.

Jorge, Corá e Barbosa (2010) ressaltam a importância da umidade a 1500 KPa na determinação da CRA, no entanto para determinação do índice S fica clara a importância da umidade residual. Asgarzadeh et al. (2010) encontraram correlação positiva do índice S com a disponibilidade hídrica do solo, embora não seja determinada diretamente pela umidade residual, reforça a importância da determinação precisa da umidade residual e saturada. Mesmo porque, estes pontos de umidade são os extremos da CRA, numa região da curva em que a imprecisão das estimativas matemáticas de qualquer modelo é normal.

Streck et al. (2008) trabalhando em solos do Sul do Brasil não identificaram influência do teor de argila ou argila dispersa em água no índice S, embora tenham encontrado correlações com a densidade do solo e da matéria

orgânica. Considerando isto, é provável que o índice S dos solos no sul do Brasil apresente maior dependência de outros fatores do que do teor de argila. Portanto, é possível que o teor de argila, enquanto fator de entrada nas FPT avaliadas, tenha contribuído para na imprecisão das estimativas do índice S.

Conclusão

Nas condições avaliadas de campo e diversidade de solo do estado do Paraná, foram encontradas restrições na estimativa do índice S usando as Funções de Pedotransferência avaliadas.

Referências

AL MAJOU, H.; BRUAND, A.; DUVAL, O. The use of in situ volumetric water content at field capacity to improve the prediction of soil water retention properties. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 88, n. 4, p. 533-541, Aug. 2008.

ALMEIDA, C. X. D.; CENTURION, J. F.; FREDDI, O. D. S.; JORGE, R. F.; BARBOSA, J. C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo á penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2235-2243, Nov./Dez. 2008.

ÁLVAREZ, C. R.; MICUCCI, F. G.; BUSTINGORRI, C.; TABOADA, M. A. Pedotransfer functions to estimate proctor test parameters under different tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1787-1793, Nov./Dez. 2010.

ANDRADE, R. D. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 382-388, Jul./Ago. 2009.

ARATANI, R. G.; FREDDI, O. D. S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um latossolo vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 677-687, Maio/Jun. 2009.

ARAÚJO, E. A. D. **Indicadores físicos de qualidade do solo: ênfase para solos tropicais**. Rio Branco: Ed. do Autor, 2011. 54 p.

ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M. R.; MAHBOUBI, A. A.; NOSRATI, A.; DEXTER, A. R. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. **Plant and Soil**, v. 335, n. 1/2, p. 229-244, Oct. 2010.

BENITES, V. M.; MACHADO, P.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, n. 1/2, p. 90-97, Apr. 2007.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B. A. (Ed.) **Advances in soil science**. New York: Springer-Verlag, 1989. v. 9, p. 177-213.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference - understanding AIC and BIC in model selection. **Sociological Methods & Research**, v. 33, n. 2, p. 261-304, Nov. 2004.

BUSSAB, W. D. O. **Análise de variância e de regressão**. 2. ed. São Paulo: Atual, 1988. 148 p.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 70, n. 3, p. 425-433, Aug. 1990.

CLAESSEN, M. E. C.; BARRETO, W. D. O.; PAULA, J. L. D.; DUARTE, M. N. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

CUNHA, E. D. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. D. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 589-602, Mar./Abr. 2011.

DE JONG, R.; LOEBEL, K. Empirical relations between soil components and water-retention at 1/3 and 15 atmospheres. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 62, n. 2, p. 343-350, May 1982.

DEXTER, A. R. Soil physical quality - Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3/4, p. 201-214, June 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality - Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v. 120, n. 3/4, p. 227-239, June 2004b.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A. Applications of S-THEORY in the study of soil physical degradation and its consequences. **Land Degradation & Development**, v. 18, n. 4, p. 369-381, July/Aug. 2007.

DONATELLI, M.; WÖSTEN, J. H. M.; BELOCCHI, G.; PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. Methods to evaluate pedotransfer functions. In: PACHEPSKY, Y. e RAWLS, W. J. (Ed.) **Developments of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. v. 30, p. 357-411.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 191-192, Jan./Mar. 2000.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1316-1322, Set./Out. 2007.

FLANAGAN, D.; PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions for soil erosion models. In: PACHEPSKY, Y. e RAWLS, W. J. (Ed.) **Developments of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. v. 30, p. 177-193.

GATE, O. P.; CZYZ, E. A.; DEXTER, A. R. Soil physical quality, S, as a basis for relationships between some key physical properties of arable soils. In: HORN, R.; FLEIGE, H.; PETH, S. e PENG, X. H. (Ed.), CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANISATION, 17., 2006, Kiel, **Anais...** Kiel: ISTRO. p.102-109.

HADZICK, Z. Z.; GUBER, A. K.; PACHEPSKY, Y. A.; HILL, R. L. Pedotransfer functions in soil electrical resistivity estimation. **Geoderma**, v. 164, n. 3/4, p. 195-202, Sep. 2011.

HOLLIS, J. M.; HANNAM, J.; BELLAMY, P. H. Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. **European Journal of Soil Science**, v. 63, n. 1, p. 96-109, Feb. 2012.

JORGE, R. F.; CORÁ, J. E.; BARBOSA, J. C. Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um latossolo vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1831-1840, Nov./Dec. 2010.

MOTAGHIAN, H. R.; MOHAMMADI, J. Spatial estimation of saturated hydraulic conductivity from terrain attributes using regression, Kriging, and artificial neural networks. **Pedosphere**, v. 21, n. 2, p. 170-177, Apr. 2011.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, Apr. 1970.

POETER, E.; ANDERSON, D. Multimodel ranking and inference in ground water modeling. **Ground Water**, v. 43, n. 4, p. 597-605, July 2005.

RIBON, A. A.; TAVARES, J. Models for the estimation of the physical quality of a yellow red latosol (Oxisol) under pasture. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, n. 1, p. 25-31, Mar. 2004.

SANCHEZ, P. A.; AHAMED, S.; CARRE, F.; HARTEMINK, A. E.; HEMPEL, J.; HUISING, J.; LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; MCKENZIE, N. J.; MENDONCA-SANTOS, M. D.; MINASNY, B.; MONTANARELLA, L.; OKOTH, P.;

PALM, C. A.; SACHS, J. D.; SHEPHERD, K. D.; VAGEN, T. G.; VANLAUWE, B.; WALSH, M. G.; WINOWIECKI, L. A.; ZHANG, G. L. Digital soil map of the world. **Science**, v. 325, n. 5941, p. 680-681, Aug. 2009.

SANTOS, H. G. D.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. D.; OLIVEIRA, V. Á. D.; OLIVEIRA, J. B. D.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. esp., p. 2603-2612, Out./Dez. 2008.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; 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, July/Aug. 2003.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. D.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil & Tillage Research**, v. 52, n. 3/4, p. 223-232, Oct. 1999.

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, Sep. 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Ada, Oklahoma: R. S. Kerr Environmental Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, 1991. 85 p.

VEREecken, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. Using pedotransfer functions to estimate the Van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 4, p. 795-820, Nov. 2010.

WEYNANTS, M.; VEREecken, H.; JAVAUX, M. Revisiting Vereecken pedotransfer functions: Introducing a closed-form hydraulic model. **Vadose Zone Journal**, v. 8, n. 1, p. 86-95, Feb. 2009.

E o que estava assentado sobre o trono disse: Eis que faço novas todas as coisas. E disse-me: Escreve; porque estas palavras são verdadeiras e fiéis. E disse-me mais: Está cumprido. Eu sou o Alfa e o Omega, o princípio e o fim. A quem quer que tiver sede, de graça lhe darei da fonte da água da vida.

Apocalipse 21:5-6

5 CONCLUSÕES GERAIS

A busca pela qualidade do solo ou por indicadores desta qualidade não possui fim em si própria, mas deve refletir na manutenção das funções básicas do solo. Esse fato reforça a declaração de que: “Os profissionais e cientistas do solo devem buscar a qualidade do manejo do solo antes do manejo da qualidade do Solo.⁶” (Sojka e Upchurch, 1999, tradução nossa). Nesse aspecto, o artigo A concluiu que o Índice S apresentou sensibilidade como indicador de qualidade física do solo, demonstrando correlação significativa com a porosidade total e densidade do solo, a macroporosidade, teor de carbono orgânico, nas condições amostradas.

A identificação desses indicadores também deve apresentar resultados rápidos, de forma a expressar as alterações de qualidade antes que as funções solo sejam comprometidas. As funções de pedotransferência foram desenvolvidas para estimar atributos complexos do solo com maior rapidez e menor custo. Nesse aspecto, as FPT estimaram o Índice S, com rapidez e custo menor. No entanto, o artigo B concluiu que, nas condições avaliadas de campo, foram encontradas restrições na estimativa do índice S usando as Funções de Pedotransferência avaliadas.

Considerando que as funções de pedotransferência avaliadas estimavam as características da curva de retenção de água no solo, é relevante observar a importância do desenvolvimento de funções específicas para estimar o índice S. Também se observa a importância da determinação laboratorial da umidade residual em razão da simplicidade da determinação e influência no índice S.

⁶ "We suggest emphasizing quality soil management rather than soil quality management as a professional and scientific goal".

REFERÊNCIAS

- ABBASI, Y.; GHANBARIAN-ALAVIJEH, B.; LIAGHAT, A. M.; SHORAFI, M. Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline-alkali soils of Iran. **Pedosphere**, v. 21, n. 2, p. 230-237, Apr. 2011.
- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, Dec. 1974.
- AL MAJOU, H.; BRUAND, A.; DUVAL, O. The use of in situ volumetric water content at field capacity to improve the prediction of soil water retention properties. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 88, n. 4, p. 533-541, Aug. 2008.
- ALMEIDA, C. X. D.; CENTURION, J. F.; FREDDI, O. D. S.; JORGE, R. F.; BARBOSA, J. C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2235-2243, Nov./Dez. 2008.
- ÁLVAREZ, C. R.; MICUCCI, F. G.; BUSTINGORRI, C.; TABOADA, M. A. Pedotransfer functions to estimate proctor test parameters under different tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1787-1793, Nov./Dez. 2010.
- ANDRADE, R. D. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 382-388, Jul./Ago. 2009.
- ARATANI, R. G.; FREDDI, O. D. S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um latossolo vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 677-687, Maio/Jun. 2009.
- ARAÚJO, E. A. D. **Indicadores físicos de qualidade do solo: ênfase para solos tropicais**. Rio Branco: Ed. do Autor, 2011. 54 p.
- ARAÚJO, J. L. D.; ANJOS, L. H. C. D.; PEREIRA, M. G. Atributos do solo e distinção de pedoambientes para a agricultura na terra indígena Mbya em Ubatuba (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1765-1776, Nov./Dec. 2009.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 8, p. 337-345, Mar./Abr. 2004.
- ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M. R.; MAHBOUBI, A. A.; NOSRATI, A.; DEXTER, A. R. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. **Plant and Soil**, v. 335, n. 1/2, p. 229-244, Oct. 2010.
- BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerkamp test. **Soil Use and Management**, v. 23, n. 4, p. 329-337, Dec. 2007.

BARBOUR, S. L. Nineteenth canadian geotechnical colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 35, n. 5, p. 873-894, 1998.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. New York: J. Wiley, 1972. 498 p.

BENITES, V. M.; MACHADO, P.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, n. 1/2, p. 90-97, Apr. 2007.

BENNETT, H. H. **The Hugh Bennett lectures**. Raleigh: Agricultural Foundation, North Carolina State College, 1959. 52 p.

BORGESSEN, C. D.; IVERSEN, B. V.; JACOBSEN, O. H.; SCHAAP, M. G. Pedotransfer functions estimating soil hydraulic properties using different soil parameters. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 11, p. 1630-1639, May 2008.

BORGESSEN, C. D.; SCHAAP, M. G. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. **Geoderma**, v. 127, n. 1/2, p. 154-167, Jul. 2005.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B. A. (Ed.) **Advances in soil science**. New York: Springer-Verlag, 1989. v. 9, p. 177-213.

BRUAND, A.; PROST, R. Effect of water content on the fabric of a soil material: an experimental approach. **Journal of Soil Science**, v. 38, n. 3, p. 461-472, Sep. 1987.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference - understanding AIC and BIC in model selection. **Sociological Methods & Research**, v. 33, n. 2, p. 261-304, Nov. 2004.

BUSSAB, W. D. O. **Análise de variância e de regressão**. 2. ed. São Paulo: Atual, 1988. 148 p.

CAGLIARI, J.; VERONEZ, M. R.; ALVES, M. E. Remaining phosphorus estimated by pedotransfer function. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 203-212, Jan./Fev. 2011.

CALEGARI, A.; CASTRO FILHO, C.; TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. D. F. Melhoria da agregação do solo através do sistema plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 27, n. 2, p. 147-158, Abr./Jun. 2006.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. D.; SEVERIANO, E. D. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a Equação Duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 77-86, Jan./Fev. 2011.

CARGNELUTTI FILHO, A.; TOEBE, M.; BURIN, C.; SILVEIRA, T. R. D.; CASAROTTO, G. Tamanho de amostra para estimação do coeficiente de correlação

linear de Pearson entre caracteres de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 12, p. 1363-1371, Dez. 2010.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 70, n. 3, p. 425-433, Aug. 1990.

CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G.; ANDERSON, D. W.; DORAN, J. W.; JANZEN, H. H.; PIERCE, F. J.; GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. Concepts of soil quality and their significance. In: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Ed.) **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam: Elsevier, 1997. v. 25, p. 1-19.

CENTURION, J. F.; FREDDI, O. D. S.; ARATANI, R. G.; METZNER, A. F. M.; BEUTLER, A. N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 199-209, Mar./Abr. 2007.

CLAESSEN, M. E. C.; BARRETO, W. D. O.; PAULA, J. L. D.; DUARTE, M. N. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

CORNELIS, W. M.; KHLOSI, M.; HARTMANN, R.; VAN MEIRVENNE, M.; DE VOS, B. Comparison of unimodal analytical expressions for the soil-water retention curve. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 6, p. 1902-1911, Nov./Dec. 2005.

CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D. D.; DE MOURA, M. R. D.; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H. D. Atributos físicos do argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1207-1216, Jul./Ago. 2011.

CUNHA, E. D. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. D. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 589-602, Mar./Abr. 2011.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KAMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, L. E. F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993.

DE JONG, R.; LOEBEL, K. Empirical relations between soil components and water-retention at 1/3 and 15 atmospheres. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 62, n. 2, p. 343-350, May 1982.

DEXTER, A. R. Soil physical quality - Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3/4, p. 201-214, June 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality - Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v. 120, n. 3/4, p. 227-239, June 2004b.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A. Applications of S-THEORY in the study of soil physical degradation and its consequences. **Land Degradation & Development**, v. 18, n. 4, p. 369-381, July/Aug. 2007.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A.; RICHARD, G.; RESZKOWSKA, A. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, v. 143, n. 3/4, p. 243-253, Feb. 2008.

DEXTER, A. R.; RICHARD, G. The saturated hydraulic conductivity of soils with n-modal pore size distributions. **Geoderma**, v. 154, n. 1/2, p. 76-85, Dec. 2009a.

DEXTER, A. R.; RICHARD, G. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. **Soil & Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 113-118, Apr. 2009b.

DONATELLI, M.; WÖSTEN, J. H. M.; BELOCCHI, G.; PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. Methods to evaluate pedotransfer functions. In: PACHEPSKY, Y. e RAWLS, W. J. (Ed.) **Developments of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. v. 30, p. 357-411.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 191-192, Jan./Mar. 2000.

EMILIANO, P. C. **Fundamentos e aplicações dos critérios de informação: akaïke e bayesiano**. 2009. 92 p. Dissertação (Mestrado em Estatística e experimentação agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1316-1322, Set./Out. 2007.

FLANAGAN, D.; PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions for soil erosion models. In: PACHEPSKY, Y. e RAWLS, W. J. (Ed.) **Developments of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. v. 30, p. 177-193.

FUNCK, R. **Glossary of soil science terms**. Madison: Soil science society of america, 2008. 88 p.

GATE, O. P.; CZYZ, E. A.; DEXTER, A. R. Soil physical quality, S, as a basis for relationships between some key physical properties of arable soils. In: HORN, R.; FLEIGE, H.; PETH, S. e PENG, X. H. (Ed.), CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOIL TILLAGE RESEARCH ORGANISATION, 17., 2006, Kiel, **Anais...** Kiel: ISTRO. p.102-109.

GREGORICH, E. G.; MONREAL, C. M.; CARTER, M. R.; ANGERS, D. A.; ELLERT, B. H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 74, n. 4, p. 367-385, Nov. 1994.

GRIFFITHS, B. S.; BALL, B. C.; DANIELL, T. J.; HALLETT, P. D.; NEILSON, R.; WHEATLEY, R. E.; OSLER, G.; BOHANEK, M. Integrating soil quality changes to arable agricultural systems following organic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation. **Applied Soil Ecology**, v. 46, n. 1, p. 43-53, Sep. 2010.

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, Sep. 2004.

HADZICK, Z. Z.; GUBER, A. K.; PACHEPSKY, Y. A.; HILL, R. L. Pedotransfer functions in soil electrical resistivity estimation. **Geoderma**, v. 164, n. 3/4, p. 195-202, Sep. 2011.

HALL, G. F.; LOGAN, T. J.; YOUNG, K. K. Criteria for determining tolerance erosion rates. In: FOLLETT, R. F. e STEWART, B. A. (Ed.) **Soil erosion and crop productivity**. Madison: Soil Science Society of America, 1985. p. 173-188.

HANKS, D.; LEWANDOWSKI, A. **Protecting urban soil quality**: examples for landscape codes and specifications. Disponível em: <http://soils.usda.gov/sqi/management/files/protect_urban_sq.pdf> Acesso em: dez. 2011.

HANKS, R. J.; ASHCROFT, G. L. **Applied soil physics**: soil water and temperature applications. 8. ed. New York: Springer-Verlag, 1980. 159 p. (Advanced series in agricultural sciences).

HEUMANN, S.; RINGE, H.; BOTTCHE, J. Field-specific simulations of net N mineralization based on digitally available soil and weather data: II. Pedotransfer functions for the pool sizes. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 91, n. 3, p. 339-350, Dec. 2011.

HILLEL, D. **Introduction to Soil Physics**. Orlando: Academic Press, 1982. 364 p.

HOLLIS, J. M.; HANNAM, J.; BELLAMY, P. H. Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. **European Journal of Soil Science**, v. 63, n. 1, p. 96-109, Feb. 2012.

JANA, R. B.; MOHANTY, B. P. Enhancing PTFs with remotely sensed data for multi-scale soil water retention estimation. **Journal of Hydrology**, v. 399, n. 3/4, p. 201-211, Mar. 2011.

JOHNSON, L. C. Soil loss tolerance: fact or myth? **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 42, n. 3, p. 155-160, May/June 1987.

JORGE, R. F.; CORÁ, J. E.; BARBOSA, J. C. Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um latossolo vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1831-1840, Nov./Dec. 2010.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, v. 114, n. 3/4, p. 145-156, June 2003.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4-10, Jan./Feb. 1997.

KASTANEK, F. J.; NIELSEN, D. R. Description of soil water characteristics using cubic spline interpolation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 2, p. 279-283, Mar. 2001.

KOEKKOEK, E. J. W.; BOOLTINK, H. Neural network models to predict soil water retention. **European Journal of Soil Science**, v. 50, n. 3, p. 489-495, Sep. 1999.

LAL, R. Applying soil quality concepts for combating soil erosion. In: LAL, R. (Ed.) **Soil quality and soil erosion**. Ankeny: CRC Press, 1999. p. 309-318.

LETEY, J.; SOJKA, R. E.; UPCHURCH, D. R.; CASSEL, D. K.; OLSON, K. R.; PAYNE, W. A.; PETRIE, S. E.; PRICE, G. H.; REGINATO, R. J.; SCOTT, H. D.; SMETHURST, P. J.; TRIPLETT, G. B. Deficiencies in the soil quality concept and its application. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 58, n. 4, p. 180-187, July/Aug. 2003.

LI, L.; DU, S. H.; WU, L. S.; LIU, G. C. An overview of soil loss tolerance. **Catena**, v. 78, n. 2, p. 93-99, Aug. 2009.

LI, L. L.; CHAN, K. Y.; NIU, Y. N.; LI, G. D.; OATES, A.; DEXTER, A.; HUANG, G. B. Soil physical qualities in an Oxic Paleustalf under different tillage and stubble management practices and application of S theory. **Soil & Tillage Research**, v. 113, n. 2, p. 82-88, June 2011.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 345 p.

LIRA, S. A. **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. 2004. 196 p. Dissertação (Mestrado em Métodos numéricos em engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LOGSDON, S. D.; KARLEN, D. L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. **Soil & Tillage Research**, v. 78, n. 2, p. 143-149, Aug. 2004.

LOWDERMILK, W. C. **Conquest of the land through seven thousand years**

Agriculture Information Bulletin 99. Washington D.C.: U.S. Gov. Print Office, 1953. 33 p.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 495-502, Mar./Abr. 2008.

MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1/2, p. 3-52, Nov. 2003.

- MICHELON, C. J. **Qualidade física dos solos irrigados do Rio Grande do Sul e do Brasil Central**. 2005. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - UNiversidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. The neuro-m method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 2, p. 352-361, Mar./Apr. 2002.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; BRISTOW, K. L. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. **Geoderma**, v. 93, n. 3/4, p. 225-253, Dec. 1999.
- MINASNY, B.; PERFECT, E.; PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. Solute adsorption and transport parameters. In: PACHEPSKY, Y. e RAWLS, W. J. (Ed.) **Developments of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. v. 30, p. 195-224.
- MOEYS, J.; BERGHEAUD, V.; COQUET, Y. Pedotransfer functions for isoproturon sorption on soils and vadose zone materials. **Pest Management Science**, v. 67, n. 10, p. 1309-1319, Oct. 2011.
- MOTAGHIAN, H. R.; MOHAMMADI, J. Spatial estimation of saturated hydraulic conductivity from terrain attributes using regression, Kriging, and artificial neural networks. **Pedosphere**, v. 21, n. 2, p. 170-177, Apr. 2011.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, Apr. 1970.
- NEBEL, Á. L. C.; TIMM, L. C.; CORNELIS, W.; GABRIELS, D.; REICHARDT, K.; AQUINO, L. S.; PAULETTO, E. A.; REINERT, D. J. Pedotransfer functions related to spatial variability of water retention attributes for lowland soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 669-680, Maio/Jun. 2010.
- OMUTO, C. T. Biexponential model for water retention characteristics. **Geoderma**, v. 149, n. 3/4, p. 235-242, Mar. 2009.
- PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G. Data mining and exploration techniques. In: PACHEPSKY, Y. e RAWLS, W. J. (Ed.) **Developments of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. v. 30, p. 21-32.
- PACHEPSKY, Y. A.; TIMLIN, D.; VARALLYAY, G. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 3, p. 727-733, May 1996.
- PALLADINO, M.; ROMANO, N.; SANTINI, A. Integration of pedotransfer functions and topographical data to obtain soil hydraulic properties at catchment scale. In: NÜTZMANN, G.; VIOTTI, P. e AAGAARD, P. (Ed.) **Reactive transport in soil and groundwater**. Berlin: Springer, 2005. p. 197-207.

PEREIRA, F. D. S.; ANDRIOLI, I.; PEREIRA, F. D. S.; OLIVEIRA, P. R. D.; CENTURION, J. F.; FALQUETO, R. J.; MARTINS, A. L. D. S. Qualidade física de um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 87-95, Jan./Fev. 2011.

PIDGEON, J. D. Measurement and prediction of available water capacity of ferrallitic soils in Uganda. **Journal of Soil Science**, v. 23, n. 4, p. 431-441, Sep. 1972.

POETER, E.; ANDERSON, D. Multimodel ranking and inference in ground water modeling. **Ground Water**, v. 43, n. 4, p. 597-605, July 2005.

PRUNTY, L.; CASEY, F. X. M. Soil water retention curve description using a flexible smooth function. **Vadose Zone Journal**, v. 1, n. 1, p. 179-185, Aug. 2002.

REATTO, A.; DA SILVA, E. M.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; LIMA, J. Validity of the centrifuge method for determining the water retention properties of tropical soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 6, p. 1547-1553, Nov./Dec. 2008.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto, **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD ROM.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. D. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M.; CERETTA, C. A. (Ed.) **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Palloti, 2001. v. 1, p. 114-133.

RIBON, A. A.; TAVARES, J. Models for the estimation of the physical quality of a yellow red latosol (Oxisol) under pasture. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, n. 1, p. 25-31, Mar. 2004.

ROMANO, N.; CHIRICO, G. B.; PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. J. The role of terrain analysis in using and developing pedotransfer functions. In: PACHEPSKY, Y. e RAWLS, W. J. (Ed.) **Developments of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. v. 30, p. 273-294.

ROSSI, C.; NIMMO, J. R. Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness. **Water Resources Research**, v. 30, n. 3, p. 701-708, Mar. 1994.

SANCHEZ, P. A.; AHAMED, S.; CARRE, F.; HARTEMINK, A. E.; HEMPEL, J.; HUISING, J.; LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; MCKENZIE, N. J.; MENDONCA-SANTOS, M. D.; MINASNY, B.; MONTANARELLA, L.; OKOTH, P.; PALM, C. A.; SACHS, J. D.; SHEPHERD, K. D.; VAGEN, T. G.; VANLAUWE, B.; WALSH, M. G.; WINOWIECKI, L. A.; ZHANG, G. L. Digital soil map of the world. **Science**, v. 325, n. 5941, p. 680-681, Aug. 2009.

SANTOS, G. G.; DA SILVA, E. M.; MARCHAO, R. L.; DA SILVEIRA, P. M.; BRUAND, A.; JAMES, F.; BECQUER, T. Analysis of physical quality of soil using the

water retention curve: Validity of the S-index. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 343, n. 4, p. 295-301, Apr. 2011.

SANTOS, H. G. D.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. D.; OLIVEIRA, V. Á. D.; OLIVEIRA, J. B. D.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006. 306 p.

SANTOS, R. D. D.; LEMOS, R. C. D.; SANTOS, H. G. D.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade brasileira de ciência do solo, 2005. 100 p.

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, Aug. 2008.

SCHAAP, M. G.; BOUTEN, W. Modeling water retention curves of sandy soils using neural networks. **Water Resources Research**, v. 32, n. 10, p. 3033-3040, Oct. 1996.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J. Using neural networks to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. **Soil & Tillage Research**, v. 47, n. 1/2, p. 37-42, June 1998.

SCHERTZ, D. L. The basis for soil loss tolerances. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 38, n. 1, p. 10-14, Jan./Fev. 1983.

SCHOENHOLTZ, S. H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 138, n. 1/3, p. 335-356, Nov. 2000.

SCHOFIELD, R. K. The pF of the water in soil. In: International congress of soil science, 3., Oxford, 1935, **Trans...** Oxford, 1935.

SILVA, Á. P. D.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 1-10, Jan./Fev. 2008.

SOJKA, R. E.; UPCHURCH, D. R. Reservations regarding the soil quality concept. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 5, p. 1039-1054, Sep. 1999.

SPAROVEK, G.; DE MARIA, I. C. Multiperspective analysis of erosion tolerance. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 2, p. 409-416, Abr./June 2003.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. esp., p. 2603-2612, Out./Dez. 2008.

TAMARI, S.; WOSTEN, J. H. M.; RUIZSUAREZ, J. C. Testing an artificial neural network for predicting soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 6, p. 1732-1741, Nov./Dec. 1996.

TESSIER, D.; LAJUDIE, A.; PETIT, J. C. Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties. **Applied Geochemistry**, v. 7, Supplement 1, p. 151-161, 1992.

TIKTAK, A.; HENDRIKS, R. F. A.; BOESTEN, J. Simulation of movement of pesticides towards drains with a preferential flow version of PEARL. **Pest Management Science**, v. 68, n. 2, p. 290-302, Feb. 2012.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; 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, July/Aug. 2003.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. D. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 211-219, Mar./Abr. 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 305-314, Mar./Abr. 2002.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. D.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil & Tillage Research**, v. 52, n. 3/4, p. 223-232, Oct. 1999.

TWARAKAVI, N. K. C.; SIMUNEK, J.; SCHAAP, M. G. Development of pedotransfer functions for estimation of soil hydraulic parameters using support vector machines. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 5, p. 1443-1452, Sep./Oct. 2009.

VAN DER SALM, C.; VAN DEN TOORN, A.; CHARDON, W. J.; KOOPMANS, G. F. Water and nutrient transport on a heavy clay soil in a fluvial plain in the netherlands. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 1, p. 229-241, Jan. 2012.

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, Sep. 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Ada, Oklahoma: R. S. Kerr Environmental Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, 1991. 85 p.

VERECKEN, H.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. Using pedotransfer functions to estimate the Van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 4, p. 795-820, Nov. 2010.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743-755, Jul./Ago. 2009.

WESSELING, J. G.; RITSEMA, C. J.; STOLTE, J.; OOSTINDIE, K.; DEKKER, L. W. Describing the soil physical characteristics of soil samples with cubical splines. **Transport in Porous Media**, v. 71, n. 3, p. 289-309, Feb. 2008.

WEYNANTS, M.; VEREECKEN, H.; JAVAUX, M. Revisiting Vereecken pedotransfer functions: Introducing a closed-form hydraulic model. **Vadose Zone Journal**, v. 8, n. 1, p. 86-95, Feb. 2009.

YANG, S.; LU, T.-H. Study of soil-water characteristic curve using microscopic spherical particle model. **Pedosphere**, v. 22, n. 1, p. 103-111, Feb. 2012.

APÊNDICES

Apêndice A

Relação das Curvas Ajustadas em Cada Local Amostrado

Tabela a.1 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0 a 0,1 m, com umidade residual estimada e floresta nativa. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC)

Município/local	Alfa	n	Umidade residual	Umidade saturada	R^2	AIC
Apucarana	0,242	1,347	0,339	0,723	0,999	-16,766
Bandeirantes	65,307	1,064	0,010	0,747	0,986	-7,792
Bela Vista do Paraíso	18,639	1,117	0,010	0,531	0,998	-14,894
Cambará	253,057	1,090	0,090	0,691	0,997	-11,794
Campo Mourão	252,986	1,088	0,171	0,729	0,995	-10,877
Cândido de Abreu	0,957	1,285	0,141	0,682	1,000	-19,405
Cascavel	0,338	1,211	0,259	0,715	0,995	-11,838
Cerro Azul	1,705	1,127	0,010	0,705	0,982	-6,031
Cianorte	75,848	1,156	0,010	0,631	1,000	-18,509
Diamante do Norte	0,815	1,131	0,010	0,281	0,987	-12,907
Francisco Beltrão	4,632	1,132	0,146	0,689	0,999	-17,974
Guaíra	0,580	1,248	0,135	0,514	0,999	-16,721
Guarapuava	0,564	1,222	0,226	0,723	0,999	-15,232
Guaraqueçaba	0,771	1,044	0,009	0,626	0,974	-9,940
Ibiporã	0,802	1,082	0,010	0,699	0,975	-6,613
Irati	12,704	1,108	0,010	0,703	0,995	-10,067
Jaguariaíva	0,870	1,179	0,010	0,715	0,993	-8,196
Joaquim Távora	0,193	1,271	0,220	0,505	0,998	-16,385
Lapa	0,892	1,087	0,010	0,689	0,993	-10,694
Laranjeiras do Sul	0,562	1,244	0,234	0,725	0,981	-6,537
Londrina	76,023	1,056	0,010	0,747	0,996	-11,666
Mauá da Serra	17,821	1,061	0,111	0,521	0,999	-21,123
Morretes	0,080	1,086	0,009	0,703	0,976	-7,744
Nova Cantu	0,938	1,157	0,197	0,737	0,998	-13,793
Palmas	0,073	1,349	0,351	0,649	1,000	-22,587
Palotina	253,001	1,093	0,164	0,605	1,000	-19,407
Paranavaí	0,558	1,420	0,230	0,703	1,000	-17,310
Pato Branco	0,350	1,278	0,376	0,719	0,998	-15,695
Planalto	0,807	1,077	0,010	0,721	0,992	-10,312
Ponta Grossa	0,247	1,383	0,309	0,671	1,000	-19,598
Quedas do Iguaçu	0,597	1,170	0,257	0,719	0,999	-16,330
Santa Helena	42,197	1,109	0,121	0,636	1,000	-21,863
São José dos Pinhais	0,792	1,065	0,010	0,402	0,977	-11,305

São Miguel do Iguaçu	141,470	1,050	0,010	0,745	0,998	-14,690
Telêmaco Borba	0,134	1,462	0,334	0,699	0,999	-15,547
Umuarama	25,267	1,109	0,121	0,608	1,000	-21,863

Fonte: Autor

Tabela a.2 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0,1 a 0,2 m, com umidade residual estimada e floresta nativa. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC)

Município/local	Alfa	n	Umidade residual	Umidade saturada	R^2	AIC
Apucarana	0,487	1,249	0,284	0,728	1,000	-22,352
Bandeirantes	66,374	1,040	0,010	0,411	0,994	-15,791
Bela Vista do Paraíso	35,397	1,127	0,029	0,511	1,000	-19,695
Cambará	253,062	1,094	0,088	0,753	0,997	-11,714
Campo Mourão	0,140	1,416	0,301	0,751	0,999	-14,950
Cândido de Abreu	0,095	1,548	0,168	0,474	1,000	-20,359
Cascavel	0,223	1,340	0,272	0,568	0,999	-19,779
Cerro Azul	253,025	1,114	0,163	0,703	0,998	-13,255
Cianorte	3,411	1,253	0,045	0,394	0,999	-16,720
Diamante do Norte	1,082	1,113	0,010	0,251	0,995	-17,218
Francisco Beltrão	17,091	1,077	0,010	0,598	0,999	-16,046
Guaíra	0,808	1,154	0,010	0,359	0,996	-14,167
Guarapuava	0,323	1,312	0,234	0,545	1,000	-32,369
Guaraqueçaba	0,938	1,040	0,010	0,500	0,997	-18,860
Ibiporã	1,070	1,082	0,010	0,504	0,991	-12,130
Irati	12,502	1,084	0,010	0,496	0,998	-15,386
Jaguariaíva	0,848	1,150	0,010	0,397	0,996	-13,754
Joaquim Távora	0,800	1,084	0,010	0,333	0,998	-19,205
Lapa	0,528	1,258	0,230	0,525	1,000	-22,423
Laranjeiras do Sul	2,869	1,072	0,142	0,731	0,999	-18,809
Londrina	252,980	1,099	0,181	0,75	1,000	-19,236
Mauá da Serra	1,028	1,079	0,010	0,719	0,99	-9,556
Morretes	0,031	1,070	0,030	0,478	0,993	-15,694
Nova Cantu	0,299	1,300	0,264	0,751	0,999	-15,394
Palmas	0,059	1,468	0,383	0,700	1,000	-20,253
Palotina	253,037	1,053	0,033	0,504	0,999	-17,734
Paranavaí	0,678	1,307	0,044	0,353	0,999	-17,515
Pato Branco	0,169	1,321	0,342	0,712	0,999	-16,202
Planalto	3,460	1,077	0,010	0,727	0,994	-10,511
Ponta Grossa	0,080	1,402	0,302	0,553	0,997	-16,223
Quedas do Iguaçu	0,033	1,722	0,347	0,634	0,999	-18,179
Santa Helena	32,994	1,106	0,120	0,623	1,000	-19,694
São José dos Pinhais	0,041	1,258	0,160	0,455	0,993	-12,988
São Miguel do Iguaçu	24,753	1,044	0,010	0,406	0,998	-20,194
Telêmaco Borba	0,172	1,316	0,168	0,471	0,996	-14,169
Umuarama	19,206	1,106	0,120	0,595	1,000	-19,694

Fonte: Autor

Tabela a.3 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0 a 0,1 m, com umidade residual estimada em solo explorado com a cultura e manejo encontrado. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC)

Município/local	Cultura	Manejo	Alfa	n	Umi. resid.	Umi. satur.	R^2	AIC
Apucarana	Soja	Direto	0,221	1,278	0,262	0,636	1,000	-20,618
Bandeirantes	Milho	Conv.	1,453	1,057	0,010	0,364	0,999	-23,094
B. V. Paraíso	Milho	Direto	0,808	1,135	0,010	0,258	0,994	-15,708
Cambará	Milho	Direto	0,054	1,073	0,010	0,366	0,998	-20,134
C. Mourão	Soja	Conv.	0,844	1,262	0,200	0,743	0,999	-16,125
C. de Abreu	Soja	Direto	0,792	1,071	0,010	0,367	0,980	-11,972
Cascavel	Milho	Direto	0,065	1,396	0,264	0,558	0,999	-17,385
Cerro Azul	Pupunha	Conv.	0,792	1,058	0,010	0,699	0,977	-8,303
Cianorte	Milho	Conv.	0,241	1,280	0,045	0,219	0,996	-17,653
D. do Norte	Milho	Conv.	0,752	1,242	0,042	0,441	1,000	-26,217
F. Beltrão	Soja	Direto	3,585	1,057	0,010	0,343	0,998	-19,945
Guaíra	Soja	Direto	0,493	1,223	0,075	0,368	1,000	-27,360
Guarapuava	Soja	Direto	0,137	1,378	0,109	0,408	1,000	-25,678
Guaraqueçaba	Mandioca	Conv.	0,785	1,044	0,009	0,573	0,985	-12,458
Ibiporã	Sorgo	Conv.	0,017	1,061	0,010	0,374	0,990	-17,064
Irati	Milho	Conv.	0,791	1,212	0,105	0,587	1,000	-18,377
Jaguariaíva	Milho	Conv.	0,806	1,108	0,010	0,356	0,995	-14,757
J. Távora	Pastagem	Conv.	0,063	1,089	0,010	0,309	0,969	-12,045
Lapa	Milho	Conv.	0,053	1,089	0,064	0,344	0,992	-16,672
Lar. do Sul	Milho	Conv.	0,805	1,071	0,010	0,648	0,997	-14,306
Londrina	Milho	Conv.	1,573	1,133	0,176	0,522	0,999	-17,888
M. da Serra	Milho	Conv.	0,768	1,035	0,010	0,600	0,973	-11,189
Morretes	Palm. real	Conv.	0,787	1,050	0,010	0,575	0,984	-11,398
Nova Cantu	Milho	Conv.	134,361	1,065	0,010	0,705	0,999	-14,627
Palmas	Milho	Direto	0,079	1,373	0,350	0,658	1,000	-26,649
Palotina	Soja	Direto	0,407	1,125	0,154	0,368	0,999	-23,167
Paranavaí	Pastagem	Conv.	0,393	1,336	0,039	0,316	0,998	-16,305
Pato Branco	Milho	Direto	0,940	1,163	0,219	0,583	0,999	-17,759
Planalto	Milho	Conv.	0,790	1,059	0,009	0,473	0,988	-12,756
Ponta Grossa	Milho	Conv.	0,344	1,199	0,238	0,608	0,999	-18,481
Q. do Iguaçu	Soja	Conv.	0,041	1,490	0,330	0,519	0,999	-20,791
Santa Helena	Milho	Direto	0,682	1,208	0,184	0,518	1,000	-22,508
S. J. Pinhais	Milho	Conv.	1,905	1,103	0,010	0,699	0,999	-14,957
S. M. Iguaçu	Milho	Conv.	0,787	1,045	0,010	0,328	0,995	-19,047
Telê. Borba	Brachiaria	Conv.	0,231	1,205	0,260	0,475	0,998	-18,579
Umuarama	Soja	Conv.	0,439	1,209	0,184	0,490	1,000	-22,532

Fonte: Autor

Tabela a.4 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0,1 a 0,2 m, com umidade residual estimada em solo explorado com a cultura e manejo encontrado. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC)

Município/local	Cultura	Manejo	Alfa	n	Umi. resid.	Umi. satur.	R^2	AIC
Apucarana	Soja	Direto	0,966	1,146	0,210	0,492	1,000	-22,817
Bandeirantes	Milho	Conv.	25,071	1,038	0,010	0,381	0,997	-18,744
B. V. Paraíso	Milho	Direto	0,806	1,107	0,010	0,212	0,991	-16,398
Cambará	Milho	Direto	2,201	1,058	0,010	0,405	0,997	-17,627
C. Mourão	Soja	Conv.	0,107	1,267	0,264	0,439	0,998	-20,008
C. Abreu	Soja	Direto	0,104	1,299	0,141	0,309	0,999	-23,719
Cascavel	Milho	Direto	0,222	1,230	0,249	0,455	0,998	-19,603
Cerro Azul	Pupunha	Conv.	0,793	1,043	0,010	0,521	0,973	-11,216
Cianorte	Milho	Conv.	0,265	1,403	0,048	0,234	0,999	-21,556
D. do Norte	Milho	Conv.	0,700	1,208	0,034	0,318	1,000	-26,702
F. Beltrão	Soja	Direto	7,834	1,041	0,010	0,274	1,000	-28,139
Guaíra	Soja	Direto	0,804	1,109	0,010	0,260	0,998	-19,613
Guarapuava	Soja	Direto	0,162	1,307	0,200	0,449	1,000	-24,071
Guaraqueçaba	Mandioca	Conv.	0,767	1,037	0,010	0,514	0,984	-13,638
Ibiporã	sorgo	Conv.	0,199	1,042	0,010	0,419	0,979	-14,372
Irati	Milho	Conv.	0,809	1,106	0,010	0,369	0,967	-8,814
Jaguariaíva	Milho	Conv.	0,811	1,176	0,010	0,338	0,995	-13,508
J. Távora	Pastagem	Conv.	0,846	1,050	0,010	0,271	0,996	-20,615
Lapa	Milho	Conv.	0,087	1,054	0,010	0,347	0,981	-15,017
Lar. do Sul	Milho	Conv.	0,790	1,047	0,010	0,588	0,983	-11,503
Londrina	Milho	Conv.	2,449	1,108	0,144	0,506	0,999	-18,254
M. da Serra	Milho	Conv.	0,863	1,030	0,010	0,410	0,987	-17,052
Morretes	Palm. real	Conv.	0,819	1,059	0,010	0,414	0,991	-15,783
Nova Cantu	Milho	Conv.	0,457	1,181	0,187	0,532	0,998	-16,743
Palmas	Milho	Direto	0,753	1,041	0,010	0,620	0,972	-10,125
Palotina	Soja	Direto	0,862	1,044	0,013	0,333	0,999	-23,545
Paranavaí	Pastagem	Conv.	0,710	1,326	0,029	0,252	0,999	-20,255
Pato Branco	Milho	Direto	0,507	1,137	0,249	0,495	0,996	-17,392
Planalto	Milho	Conv.	20,930	1,047	0,010	0,460	0,999	-19,805
Ponta Grossa	Milho	Conv.	0,751	1,033	0,010	0,443	0,97	-13,116
Q. do Iguaçu	Soja	Conv.	0,119	1,220	0,344	0,609	0,998	-17,668
Santa Helena	Milho	Direto	0,116	1,294	0,228	0,385	0,999	-22,443
S. J. Pinhais	Milho	Conv.	0,775	1,038	0,010	0,454	0,972	-12,399
S. M. Iguaçu	Milho	Conv.	0,975	1,046	0,010	0,344	0,997	-20,824
Telê. Borba	Brachiaria	Conv.	0,016	1,405	0,242	0,398	0,996	-17,375
Umuarama	Soja	Conv.	0,737	1,045	0,010	0,361	0,986	-15,527

Fonte: Autor

Tabela a.5 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0 a 0,1 m, com umidade residual fixa em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em floresta nativa. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC)

Município/local	Alfa	n	Umidade saturada	R^2	AIC
Apucarana	23,085	1,058	0,723	0,994	-13,012
Bandeirantes	149,737	1,060	0,747	0,987	-9,567
Bela Vista do Paraíso	23,856	1,114	0,531	0,999	-16,664
Cambará	252,769	1,072	0,691	0,996	-12,882
Campo Mourão	252,743	1,058	0,729	0,992	-11,469
Cândido de Abreu	25,057	1,113	0,682	0,999	-15,316
Cascavel	2,339	1,077	0,715	0,994	-12,620
Cerro Azul	3,491	1,116	0,705	0,983	-7,925
Cianorte	84,984	1,155	0,631	1,000	-20,227
Diamante do Norte	1,130	1,125	0,281	0,988	-14,689
Francisco Beltrão	22,963	1,076	0,689	0,999	-18,725
Guaíra	6,424	1,101	0,514	0,998	-16,110
Guarapuava	5,933	1,084	0,723	0,997	-14,486
Guaraqueçaba	0,188	1,055	0,626	0,989	-14,191
Ibiporã	0,308	1,096	0,699	0,980	-9,061
Irati	20,329	1,103	0,703	0,996	-11,884
Jaguariaíva	1,341	1,168	0,715	0,994	-10,150
Joaquim Távora	2,293	1,071	0,505	0,994	-15,138
Lapa	1,146	1,084	0,689	0,993	-12,499
Laranjeiras do Sul	9,606	1,082	0,725	0,979	-7,981
Londrina	109,283	1,054	0,747	0,996	-13,405
Mauá da Serra	38,130	1,042	0,521	0,999	-22,681
Morretes	0,080	1,086	0,703	0,976	-9,422
Nova Cantu	4,068	1,080	0,737	0,997	-14,699
Palmas	0,793	1,063	0,649	0,989	-12,672
Palotina	252,742	1,057	0,605	0,996	-14,799
Paranavaí	252,782	1,078	0,703	0,996	-12,550
Pato Branco	24,386	1,047	0,719	0,994	-14,035
Planalto	0,724	1,078	0,721	0,992	-12,013
Ponta Grossa	56,825	1,057	0,671	0,994	-13,233
Quedas do Iguaçu	3,619	1,067	0,719	0,998	-16,083
Santa Helena	252,767	1,067	0,636	1,000	-22,104
São José dos Pinhais	0,191	1,081	0,402	0,992	-16,165
São Miguel do Iguaçu	165,603	1,050	0,745	0,998	-16,393
Telêmaco Borba	22,485	1,060	0,699	0,990	-11,523
Umuarama	160,369	1,065	0,608	1,000	-22,399

Fonte: Autor

Tabela a.6 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0,1 a 0,2 m, com umidade residual fixa em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em floresta nativa. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC)

Município/local	Alfa	n	Umidade saturada	R^2	AIC
Apucarana	12,453	1,068	0,728	0,998	-15,185
Bandeirantes	104,460	1,038	0,411	0,994	-17,547
Bela Vista do Paraíso	62,784	1,111	0,511	1,000	-21,295
Cambará	252,777	1,077	0,753	0,997	-12,741
Campo Mourão	6,348	1,081	0,751	0,991	-10,674
Cândido de Abreu	5,313	1,101	0,474	0,990	-12,211
Cascavel	16,190	1,058	0,568	0,994	-14,542
Cerro Azul	252,769	1,071	0,703	0,994	-11,718
Cianorte	35,694	1,148	0,394	0,999	-17,886
Diamante do Norte	1,447	1,109	0,251	0,996	-19,111
Francisco Beltrão	21,732	1,075	0,598	0,999	-17,873
Guaíra	0,395	1,173	0,359	0,998	-18,468
Guarapuava	20,215	1,064	0,545	0,996	-15,545
Guaraqueçaba	0,973	1,040	0,500	0,997	-20,546
Ibiporã	1,519	1,078	0,504	0,992	-13,989
Irati	14,496	1,083	0,496	0,998	-17,101
Jaguariaíva	1,096	1,145	0,397	0,996	-15,615
Joaquim Távora	0,557	1,089	0,333	0,999	-22,319
Lapa	27,243	1,058	0,525	0,997	-16,987
Laranjeiras do Sul	4,874	1,052	0,731	0,999	-20,279
Londrina	252,749	1,063	0,750	0,997	-13,422
Mauá da Serra	1,285	1,076	0,719	0,990	-11,298
Morretes	0,031	1,067	0,478	0,993	-17,371
Nova Cantu	6,763	1,084	0,751	0,996	-12,650
Palmas	1,354	1,063	0,700	0,983	-10,571
Palotina	252,741	1,050	0,504	0,999	-19,337
Paranavaí	3,702	1,179	0,353	0,998	-17,998
Pato Branco	4,441	1,063	0,712	0,993	-12,746
Planalto	5,006	1,074	0,727	0,994	-12,338
Ponta Grossa	1,845	1,060	0,553	0,986	-12,770
Quedas do Iguaçu	1,021	1,070	0,634	0,962	-8,405
Santa Helena	208,085	1,064	0,623	1,000	-20,807
São José dos Pinhais	0,085	1,113	0,455	0,990	-13,509
São Miguel do Iguaçu	29,323	1,043	0,406	0,998	-21,940
Telêmaco Borba	1,952	1,095	0,471	0,992	-13,745
Umuarama	100,882	1,065	0,595	1,000	-20,807

Fonte: Autor

Tabela a.7 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0 a 0,1 m, com umidade residual fixa em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em solo explorado com a cultura e manejo encontrado. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC)

Município/local	Cultura	Manejo	Alfa	n	Umi. satur.	R^2	AIC
Apucarana	Soja	Direto	3,223	1,074	0,636	0,996	-14,541
Bandeirantes	Milho	Conv.	1,533	1,056	0,364	0,999	-24,820
B. V. Paraíso	Milho	Direto	0,347	1,155	0,258	0,998	-20,744
Cambará	Milho	Direto	0,054	1,073	0,366	0,998	-21,812
C. Mourão	Soja	Conv.	23,470	1,092	0,743	0,998	-14,352
C. de Abreu	Soja	Direto	0,237	1,086	0,367	0,990	-15,822
Cascavel	Milho	Direto	0,653	1,082	0,558	0,988	-12,224
Cerro Azul	Pupunha	Conv.	0,255	1,069	0,699	0,985	-11,356
Cianorte	Milho	Conv.	0,851	1,153	0,219	0,995	-18,454
D. do Norte	Milho	Conv.	1,762	1,177	0,441	1,000	-22,277
F. Beltrão	Soja	Direto	4,274	1,056	0,343	0,998	-21,743
Guaíra	Soja	Direto	1,966	1,122	0,368	0,999	-20,960
Guarapuava	Soja	Direto	1,119	1,136	0,408	0,995	-15,034
Guaraqueçaba	Mandioca	Conv.	0,412	1,048	0,573	0,988	-14,751
Ibiporã	Sorgo	Conv.	0,017	1,061	0,374	0,990	-18,742
Irati	Milho	Conv.	3,428	1,120	0,587	0,999	-17,622
Jaguariaíva	Milho	Conv.	0,510	1,116	0,356	0,996	-17,162
J. Távora	Pastagem	Conv.	0,065	1,088	0,309	0,969	-13,725
Lapa	Milho	Conv.	0,060	1,069	0,344	0,992	-18,326
Lar. do Sul	Milho	Conv.	0,810	1,071	0,648	0,997	-15,985
Londrina	Milho	Conv.	8,996	1,060	0,522	0,998	-18,607
M. da Serra	Milho	Conv.	0,181	1,044	0,600	0,989	-15,449
Morretes	Palm. Real	Conv.	0,274	1,059	0,575	0,991	-14,962
Nova Cantu	Milho	Conv.	137,956	1,065	0,705	0,999	-16,306
Palmas	Milho	Direto	1,203	1,064	0,658	0,989	-12,338
Palotina	Soja	Direto	1,275	1,052	0,368	0,998	-22,800
Paranavaí	Pastagem	Conv.	1,573	1,203	0,316	0,997	-17,083
Pato Branco	Milho	Direto	8,011	1,061	0,583	0,998	-17,712
Planalto	Milho	Conv.	0,253	1,071	0,473	0,997	-18,743
Ponta Grossa	Milho	Conv.	2,330	1,070	0,608	0,997	-16,513
Q. do Iguaçu	Soja	Conv.	0,666	1,052	0,519	0,977	-12,702
Santa Helena	Milho	Direto	8,909	1,072	0,518	0,998	-18,225
S. J. Pinhais	Milho	Conv.	1,941	1,103	0,699	0,999	-16,638
S. M. Iguaçu	Milho	Conv.	0,351	1,051	0,328	0,999	-26,400
Telê. Borba	Brachiaria	Conv.	2,147	1,047	0,475	0,994	-17,567
Umuarama	Soja	Conv.	4,043	1,072	0,490	0,998	-18,218

Fonte: Autor

Tabela a.8 – Parâmetros da curva de retenção de água, ajustada para cada local, pelo modelo Mualem–Van Genuchten, para a camada de 0,1 a 0,2 m, com umidade residual fixa em $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em solo explorado com a cultura e manejo encontrado. Coeficiente de determinação (R^2) e critério de informação de Akaike (AIC)

Município/local	Cultura	Manejo	Alfa	n	Umi. satur.	R^2	AIC
Apucarana	Soja	Direto	7,703	1,051	0,492	0,999	-21,038
Bandeirantes	Milho	Conv.	30,598	1,037	0,381	0,997	-20,465
B. V. Paraíso	Milho	Direto	0,305	1,127	0,212	0,997	-21,318
Cambará	Milho	Direto	2,338	1,058	0,405	0,997	-19,316
C. Mourão	Soja	Conv.	1,073	1,047	0,439	0,991	-17,149
C. de Abreu	Soja	Direto	0,791	1,078	0,309	0,993	-17,968
Cascavel	Milho	Direto	2,895	1,048	0,455	0,994	-17,686
Cerro Azul	Pupunha	Conv.	0,470	1,046	0,521	0,974	-13,080
Cianorte	Milho	Conv.	3,913	1,156	0,234	0,997	-18,972
D. do Norte	Milho	Conv.	1,345	1,158	0,318	1,000	-24,897
F. Beltrão	Soja	Direto	8,255	1,040	0,274	1,000	-29,867
Guaíra	Soja	Direto	0,641	1,113	0,260	0,998	-21,690
Guarapuava	Soja	Direto	2,528	1,073	0,449	0,994	-15,997
Guaraqueçaba	Mandioca	Conv.	0,189	1,045	0,514	0,999	-23,125
Ibiporã	Sorgo	Conv.	0,208	1,042	0,419	0,979	-16,053
Irati	Milho	Conv.	0,484	1,115	0,369	0,968	-10,623
Jaguariaíva	Milho	Conv.	0,358	1,203	0,338	0,998	-17,847
J. Távora	Pastagem	Conv.	0,981	1,049	0,271	0,996	-22,382
Lapa	Milho	Conv.	0,086	1,054	0,347	0,981	-16,695
Lar. do Sul	Milho	Conv.	0,432	1,051	0,588	0,985	-13,606
Londrina	Milho	Conv.	8,638	1,058	0,506	0,998	-19,440
M. da Serra	Milho	Conv.	1,082	1,029	0,410	0,987	-18,794
Morretes	Palm. real	Conv.	0,082	1,059	0,414	0,991	-17,462
Nova Cantu	Milho	Conv.	2,526	1,073	0,532	0,997	-16,659
Palmas	Milho	Direto	0,203	1,051	0,620	0,985	-13,674
Palotina	Soja	Direto	0,872	1,043	0,333	0,999	-25,223
Paranavaí	Pastagem	Conv.	3,491	1,200	0,252	0,999	-20,637
Pato Branco	Milho	Direto	2,746	1,042	0,495	0,995	-18,276
Planalto	Milho	Conv.	22,091	1,046	0,460	0,999	-21,492
Ponta Grossa	Milho	Conv.	0,164	1,042	0,443	0,989	-17,689
Q. do Iguaçu	Soja	Conv.	0,715	1,050	0,609	0,993	-15,652
Santa Helena	Milho	Direto	1,747	1,048	0,385	0,992	-17,690
S. J. Pinhais	Milho	Conv.	0,153	1,049	0,454	0,992	-17,873
S. M. Iguaçu	Milho	Conv.	1,085	1,046	0,344	0,998	-22,572
Telê Borba	Brachiaria	Conv.	0,052	1,073	0,398	0,980	-14,431
Umuarama	Soja	Conv.	0,439	1,048	0,361	0,988	-17,615

Fonte: Autor

ANEXOS

Anexo A

Relação das Avaliações Estatísticas de FPT

Relação das estatísticas citadas por Donatelli et al. (2004) para avaliação de FPT: Que são 36 índices estatísticos baseados em diferença e 13 estatísticas baseadas em correlação.

Tabela a.1 – Lista de abreviaturas utilizadas no anexo A

Símbolo	Significado
i	i -ésimo ponto de dados
n	Número de dados pareados
E_i	Valor estimado
M_i	Valor medido
\bar{E}	Média dos valores estimados
\bar{M}	Média dos valores medidos
s_E^2	Variância dos valores estimados
s_M^2	Variância dos valores medidos
s_E	Desvio padrão dos valores estimados
s_M	Desvio padrão dos valores medidos
$F_{E(x)}$	Função de distribuição cumulativa empírica para valores estimados
$F_{M(x)}$	Função de distribuição cumulativa empírica para valores medidos
OLS	Método dos mínimos quadrados ordinário (ordinary least squares method)
RMA	Método do eixo principal reduzido (reduced major axis method)
s.e. (b_1)	Erro padrão de b_1
s.e. (b_0)	Erro padrão de b_0
\hat{E}_i	Valor estimado da regressão E_i versus M_i
s.e. \hat{E}_i	Erro padrão das estimativas da regressão E_i versus M_i
l, m	Índice do grupo
p	Número de grupos (2-5)
R	Modelo residual ($E_i - M_i$)
q_l, q_m	Numerosidade dos grupos
i_l, i_m	Valor residual interno do grupo
s_p^2	Variância entre grupos
s_e^2	Variância do Erro

Fonte: Donatelli et al. (2004)

Tabela a.2 – Lista das estatísticas baseadas em diferença citadas por Donatelli et al. (2004) para avaliação de FPT

Estatística	Símbolo	Formulação
Diferença simples		
Simple differences Mean bias error	MBE	$MBE = \bar{E} - \bar{M}$
Relative error	E	$E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{E_i - M_i}{M_i}$
Maximum error	MaxE	$MaxE = \text{Max}(E_i - M_i)$
Maximum percent error	MaxE%	$MaxE\% = \frac{100}{M_{\max}} \text{Max}(E_i - M_i)$
Normalized average error	NAE	$NAE = \frac{\bar{E} - \bar{M}}{\bar{M}}$
Fractional bias	FB	$FB = 2 \cdot \frac{\bar{E} - \bar{M}}{\bar{E} + \bar{M}}$
Relative mean bias	rB	$rB = \frac{\bar{E} - \bar{M}}{s_M}$
Coefficient of residual mass	CRM	$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$
Diferenças quadráticas		
Square differences Simulation bias	SB	$SB = (\bar{E} - \bar{M})^2$
Root mean square variation	RMSV	$RMSV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(E_i - \bar{E}) - (M_i - \bar{M})]^2}{n}}$
Sum of square error	SSE	$SSE = \sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2$
Mean square error	MSE	$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{n}$
Root mean square error	RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{n}}$
Relative root mean square error	RRMSE	$RRMSE = RMSE \cdot \frac{100}{\bar{M}}$
Normalized mean square error	NMSE	$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n E_i \cdot M_i}$
Modeling efficiency	EF	$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}$
Modeling percent efficiency	EF%	$EF\% = 100 \cdot (1 - EF)$

Continua...

Continuação da Tabela a.2

Estatística	Símbolo	Formulação
Index of agreement	d	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{M} + (M_i - \bar{M}))}$
Ratio of scatter	RS	$RS = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}$
Fractional variance	FV	$FV = \frac{s_E^2 - s_M^2}{0.5 \cdot (s_E^2 + s_M^2)}$
Variance ratio	VR	$VR = \frac{s_E^2}{s_M^2}$
Diferenças absolutas Absolute fractional bias	AFB	$AFB = 2 \cdot \frac{ \bar{E} - \bar{M} }{ \bar{E} + \bar{M} }$
Maximum absolute error	MaxAE	$\text{MaxAE} = \max_{i, \dots, n} E_i - M_i $
Mean absolute error	MAE	$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i - M_i }{n}$
Mean absolute percent error	MA%E	$\text{MA}\%E = 100 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{ E_i - M_i }{M_i} \frac{1}{n}$
Relative mean absolute error	RMAE	$\text{RMAE} = \text{MAE} \cdot \frac{100}{\bar{M}}$
Modified modeling efficiency	EF1	$\text{EF} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n E_i - M_i }{\sum_{i=1}^n M_i - \bar{M} }$
Alternative index of agreement	Ad	$\text{Ad} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n E_i - M_i }{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{M} + (M_i - \bar{M}))}$
Diferenças não paramétrica Median absolute error	MdAE	$\text{MdAE} = \text{median}_{i, \dots, n} E_i - M_i $
Relative median absolute error	RMdAE	$\text{RMdAE} = \text{median}_{i, \dots, n} E_i - M_i \cdot \frac{100}{\bar{M}}$
Relative modeling efficiency	REF	$\text{REF} = \text{median}_{i, \dots, n} \cdot \left(\frac{\text{median}_{i, \dots, n} M_i - \bar{M} - \text{median}_{i, \dots, n} M_i - E_i }{\text{median}_{i, \dots, n} M_i - \bar{M} } \right)$

Continua...

Continuação da Tabela a.2

Estatística	Símbolo	Formulação
Upper quartile absolute error	UppAE	$\text{UppAE} = 75\text{th} \cdot \text{percentile} E_i - M_i $
Test statistics		
t-test (MBE = 0)	t	$t = \frac{\text{MBE}}{s_d^2} = \sqrt{\frac{(n-1) \cdot \text{MBE}^2}{\text{MSE} - \text{MBE}^2}}$
chi-square (MSE=0)	χ^2	$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)}{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n [(E_i - M_i)^2 - \text{MSE}]^2}$
Kolmogorov-Smirnov	KS	$\text{KS} = \max_x F_{E(x)} - F_{M(x)} $

Fonte: Donatelli et al. (2004)

Tabela a.3 – Lista das estatísticas baseadas em correlação citadas por Donatelli et al. (2004) para avaliação de FPT

Estatística	Símbolo	Formulação
Índices		
Pearson correlation coefficient (E_i vs. M_i)	r	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}}$
Pearson correlation coefficient ($E_i - M_i$ vs. $E_i + M_i$)	$r_{d,s}$	$r_{d,s} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)(E_i + M_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2 \sum_{i=1}^n (E_i + M_i)^2}}$
Spearman correlation Coefficient (E_i vs. M_i)	r_s	$r_s = \frac{6 \sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{n^3 - n}$
Slope of the regression (E_i vs. M_i)	b_1	OLS: $b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(M_i - \bar{M})}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}$ RMA: $b_1 = \pm \frac{s_E}{s_M}$
Intercept of the regression (E_i vs. M_i)	b_0	$b_0 = \bar{E} - b_1 \cdot \bar{M}$
Systematic root mean square error	RMSEs	$RMSE_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{E}_i - M_i)^2}{n}}$
Erratic root mean square error	RMSEe	$RMSE_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \hat{E}_i)^2}{n}}$
Testes estatísticos ^a		
t-test ($\rho=0$)	t	$t = \sqrt{\frac{r^2(n-2)}{1-r^2}}$
t-test ($\rho_{d,s}=0$)	t	$t = \sqrt{\frac{r_{d,s}^2(n-2)}{1-r_{d,s}^2}}$
t-test ($\beta_1=0$)	t	$t = \frac{b_1}{s.e.(b_1)}$
t-test ($\beta_1=1$)	t	$t = \frac{1-b_1}{s.e.(b_1)}$
t-test ($\beta_0=0$)	t	$t = \frac{b_0}{s.e.(b_0)}$
F-test ($\beta_0=0$ e $\beta_1=1$)	F	$F = \frac{(n-2) \left[nb_0^2 + 2n\bar{E}b_0(b_1-1) + \sum_{i=1}^n E_i^2(b_1-1)^2 \right]}{2ns.e._{\hat{E}}^2}$

Fonte: Donatelli et al. (2004)

^a Testes estatísticos - ρ : coeficiente de correlação de Pearson; β_1 e β_0 parâmetros da regressão.

Anexo B

Funções de pedotransferência utilizadas no artigo B

A FPT de Tomasella et al. (2003) paramétrica é definida pelas equações a seguir:

$$\theta_{\text{sat}} = 0,515224 + 0,100899.z_5$$

$$\theta_{\text{res}} = 0,161487 + 0,101111.z_6$$

$$\alpha = 10^{(0,0736768 + 0,789068.z_2)}$$

$$n = 10^{(0,140543 + 0,0797516.z_4)}$$

Com as variáveis auxiliares a seguir:

$$z_1 = 4,25417.x_1 + 2,72322.x_2 + 3,07242.x_3 + 5,00093.x_4 - 0,195062.x_5 - 0,377081.x_6$$

$$z_2 = 0,110144 + 0,640373.z_1 - 1,16884.(z_1)^2 - 0,155394.x_4 - 0,358591.z_1.x_4 - 1,00996.(z_1)^2.x_4 + 0,126617.(x_4)^3$$

$$z_3 = 0,37398.x_1 - 0,0940338.(x_1)^3 + 0,838535.x_1.x_5 - 0,590525.(x_1)^2.x_5 + 0,761113(x_5)^2 - 0,789465.x_1.(x_5)^2 - 0,273647.(x_5)^3 - 0,512764.x_6 + 0,455363.x_1.x_6 - 0,38428.(x_1)^2.x_6 + 0,731809.x_5.x_6 - 1,00484.x_1.x_5.x_6 - 0,172341.(x_5)^2.x_6 + 0,219746.(x_6)^2 - 0,367679x_1.(x_6)^2 + 0,131251.(x_6)^3$$

$$z_4 = -0,360294 + 0,76878.z_3 + 0,0770122.(z_3)^3 - 0,193142.x_2 - 0,121583.z_3.x_2 + 0,0889415.(z_3)^2.x_2 + 0,284168.(x_2)^2 - 0,0674767.(x_2)^3 - 0,202897.x_3 - 0,341951.z_3.x_3 - 0,270616.x_2.x_3 + 0,0880845.(x_2)^2.x_3 + 0,24982(x_3)^2 + 0,102658x_2(x_3)^2 - 0,0801841(x_3)^3$$

$$z_6 = 0,12867 - 0,492412.x_3 + 0,787425.x_5 - 0,235254.x_3.x_5;$$

$$z_5 = 0,164417 + 0,126139.(x_1)^2 + 0,281797.x_3 + 0,484823.x_1.x_3 - 0,293866.(x_3)^2 - 0,354924.x_1.(x_3)^2 - 0,705803.x_6 - 0,189153.x_3.x_6 - 0,267997.x_1.x_3.x_6 - 0,023954.(x_3)^2.x_6 - 0,0918816.x_1.(x_6)^2 + 0,0323997.(x_6)^3$$

$$x_1 = -1,0679 + 0,0536107.CS$$

$$x_2 = -1,17468 + 0,0808098.FS$$

$$x_3 = -1,05976 + 0,0650437.Si$$

$$x_4 = -2,10641 + 0,0427715.Cl$$

$$x_5 = -2,21391 + 8,92268.Me$$

$$x_6 = -6,03516 + 4,81197.Db$$

A FPT de Tomasella et al. (2003) pontual é definida pelas equações a seguir:

$$\theta_0 = 0,517589 + 0,0994301 \cdot z_7$$

$$\theta_6 = 0,34505 + 0,117162 \cdot z_8$$

$$\theta_{10} = 0,339255 + 0,112526 \cdot z_{10}$$

$$\theta_{33} = 0,28951 + 0,103815 \cdot z_{11}$$

$$\theta_{100} = 0,257093 + 0,0952908 \cdot z_{12}$$

$$\theta_{1500} = 0,214008 + 0,0862945 \cdot z_{13}$$

Com as variáveis auxiliares a seguir:

$$z_7 = 0,159379 + 0,137397 \cdot (x_7)^2 + 0,265398 \cdot x_8 + 0,519965 \cdot x_7 \cdot x_8 - 0,276027 \cdot (x_8)^2 - 0,362393 \cdot x_7 \cdot (x_8)^2 - 0,702969 \cdot x_9 - 0,222252 \cdot x_8 \cdot x_9 - 0,244634 \cdot x_7 \cdot x_8 \cdot x_9 - 0,092267 \cdot x_7 \cdot (x_9)^2 + 0,0332669 \cdot (x_9)^3$$

$$z_8 = -0,259878 \cdot x_{10} + 0,0867921 \cdot x_{11} + 0,806806 \cdot x_{12} + 0,196837 \cdot x_{13}$$

$$z_9 = 0,175202 + 1,18513 \cdot x_{17} - 0,0996042 \cdot (x_{17})^2 + 0,327915 \cdot x_{16} - 0,0758657 \cdot (x_{16})^2$$

$$z_{10} = 0,929344 \cdot z_9 + 0,132519 \cdot x_{14}$$

$$z_{11} = 0,191452 + 1,25652 \cdot x_{17} - 0,079098 \cdot (x_{17})^2 + 0,393814 \cdot x_{16} + 0,152095 \cdot x_{17} \cdot x_{16}$$

$$z_{12} = 0,231205 - 0,0968656 \cdot (x_{15})^2 + 0,0799528 \cdot (x_{15})^3 + 1,28868 \cdot x_{17} + 0,13082 \cdot x_{15} \cdot x_{17} - 0,143115 \cdot (x_{17})^2 - 0,126294 \cdot x_{15} \cdot (x_{17})^2 + 0,429792 \cdot x_{16} + 0,133537 \cdot x_{17} \cdot x_{16} - 0,0661431 \cdot x_{15} \cdot x_{17} \cdot x_{16}$$

$$z_{13} = 0,235084 + 0,33033 \cdot x_{15} - 0,191838 \cdot (x_{15})^2 + 0,0543679 \cdot (x_{15})^3 + 0,977685 \cdot x_{17} + 0,304174 \cdot x_{15} \cdot x_{17} - 0,218857 \cdot (x_{17})^2 - 0,164373 \cdot x_{15} \cdot (x_{17})^2 + 0,0415057 \cdot (x_{17})^3 + 0,373361 \cdot x_{16} + 0,0811861 \cdot x_{17} \cdot x_{16} - 0,0768087 \cdot x_{15} \cdot x_{17} \cdot x_{16}$$

$$x_7 = -1,0553 + 0,0533922 \cdot CS$$

$$x_8 = -1,07131 + 0,0649731 \cdot Si$$

$$x_9 = -6,18145 + 4,95385 \cdot Db$$

$$x_{10} = -1,17152 + 0,0500892 \cdot CS$$

$$x_{11} = -0,867548 + 0,0519417 \cdot Si$$

$$x_{12} = -1,97975 + 8,3484 \cdot Me$$

$$x_{13} = -5,72537 + 4,53135 \cdot Db$$

$$x_{14} = -1,05501 + 0,0650857 \cdot Si$$

$$x_{15} = -2,07588 + 0,0423954 \cdot CI$$

$$x_{16} = -6,03402 + 4,80572 \cdot Db$$

$$x_{17} = -2,18409 + 8,84963 \cdot Me$$

Em que os parâmetros estimados são: θ_{sat} ou θ_0 umidade saturada ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{res} umidade residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); n e α (cm^{-1}); θ_6 , θ_{10} , θ_{33} , θ_{100} , θ_{1500} , são as umidades volumétricas ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) nas tensões de 0, 6, 10, 33, 100, 1500 kPa. Os dados necessários são: Cl, teor de argila (%); Si, teor de silte (%); Db, densidade do solo (g cm^{-3}); OC, teor de carbono orgânico (g kg^{-1}) Me, equivalente de umidade (g g^{-1} - centrifugação a 2400 rpm por 30 min.). z_1 a z_{13} e x_1 a x_{17} são variáveis auxiliares.