

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIENCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA SOLOS
DO SUL DO URUGUAI**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fabrício da Silva Barboza

**Santa Maria, RS, Brasil
2011**

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA SOLOS DO SUL DO URUGUAI

por

Fabrício da Silva Barboza

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Reimar Carlesso

Santa Maria, RS, Brasil
2011

B238f Barboza, Fabrício da Silva
Funções de pedotransferência para solos do Sul do Uruguai / por Fabrício da Silva Barboza. – 2011.
94 f. ; il. ; 30 cm

Orientador: Reimar Carlesso
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2011

1 .Engenharia Agrícola 2. Curva de retenção 3. Stepwise 4. Pedofunções 5. Regressão múltipla I. Carlesso, Reimar II. Título.

CDU 631

Ficha catalográfica elaborada por Denise Barbosa dos Santos – CRB 10/1756
Biblioteca Central UFSM

©2011

Todos os direitos autorais reservados a Fabrício da Silva Barboza. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Piratini, Cassino, Nº 86, Rio Grande, RS, Brasil, CEP: 96207-560;

Fone: (055) 53 32368097; Celular: (055) 53 81224888;

Endereço Eletrônico: f.barboza@yahoo.com.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA SOLOS DO SUL DO
URUGUAI**

elaborada por
Fabício da Silva Barboza

como requisito parcial para a obtenção de grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Reimar Carlesso
PhD. (UFSM)
(Presidente/Orientador)**

**Cleudson José Michelin
Dr. (IFF - Júlio de Castilhos)**

**Claudio García Gallarreta
Dr. (INIA - Montevideú)**

Santa Maria, 17 de Janeiro de 2011.

OFEREÇO

A minha família, em especial minha mãe Claudete e meus avós Jacy e Dilma, que em todos os momentos foram presentes, e fazem de suas vidas exemplos a serem seguidos.

DEDICO

A minha namorada Gisele Vivan pela presença, parceria e amizade.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, pública e gratuita, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA-UFSM), pela oportunidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida.

Ao Prof. Reimar Carlesso, pela oportunidade e orientação proporcionadas. Meu agradecimento pelos ensinamentos e minha gratidão por fazer parte de meu crescimento profissional e pessoal.

Aos colegas e amigos do Sistema Irriga, pela colaboração e amizade, em especial a Alberto Knies, Cleudson Jose Michelin, Geraldo Rodrigues, Juliano Martins, Luis Fernando Grasel, Manoel Moura, Rodrigo Mulazzani, Roberto Miranda, Rodrigo Elesbão, Tiago Broetto, Ticiane Françoise, Vinicius Dubou, e Zanandra de Oliveira, pela ajuda e parceria em todos os momentos.

Ao Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) pela disponibilização dos dados, em especial, ao pesquisador Claudio García Gallarreta e sua equipe pela hospitalidade e cooperação.

Aos professores que ministraram as aulas no decorrer do Curso, pelos ensinamentos e disponibilidade de tempo sempre que necessário.

Aos meus familiares Claudete, Suedi, Priscila, Carmem, Milton e “a minha irmã de coração”, pelo incentivo, força e compreensão.

Enfim, agradeço a todos aqueles que me acompanharam durante este período e que, de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado...

“Quando a gente acha que tem todas as respostas, vem a vida e muda todas as perguntas...”

Luis Fernando Veríssimo

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA SOLOS DO SUL DO URUGUAI.

AUTOR: FABRÍCIO DA SILVA BARBOZA

ORIENTADOR: REIMAR CARLESSO

Santa Maria, Janeiro de 2011.

A busca contínua por informações que venham a auxiliar nas práticas agrícolas é fato relevante nos dias atuais, sendo primordial a utilização de metodologias que facilitem a determinação de parâmetros determinantes na produtividade agrícola, primando pela facilidade e agilidade nas determinações. Métodos alternativos para determinação das características físico-hídricas dos solos podem auxiliar no monitoramento da atividade agrícola. Dentre estes, salienta-se o uso de funções de pedotransferência (FPTs) que, entre outras propriedades, possibilitam a determinação indireta da curva de retenção de água do solo, reduzindo custos, tempo e mão-de-obra. O presente estudo objetiva utilizar de modelos de regressão linear múltipla para determinação de FPTs para os solos do Sul do Uruguai, visando a utilização prática destas em laboratórios de física do solo, para a obtenção da curva de retenção dos mesmos. Para a realização do trabalho foram utilizadas 251 amostras das camadas superficial, intermediária e inferior de solos do Sul do Uruguai, disponíveis no banco de dados de análises físicas do INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). Esse banco de dados é composto por informações de textura do solo (percentuais de areia, silte e argila), densidade do solo, porosidade total do solo, além das informações do conteúdo de água nos potenciais de 0, -3, -30, -100, -500 e -1500 kPa. A organização do banco de dados foi realizada de forma aleatória, sendo este subdividindo em dois bancos, um com 60% dos dados (desenvolvimento das FPTs) e o outro com 40% dos dados (validação das FPTs). Os dados utilizados para o desenvolvimento das FPTs foram inseridos no programa Statistical Analysis System (SAS), em seu método de determinação de equações de regressão linear múltipla (*Stepwise*). Sendo geradas FPTs para estimar a retenção de água nos potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa, para as camadas superficial (0-20 cm), intermediária (20-40 cm) e inferior (40-60 cm) do perfil do solo. As equações obtidas apresentaram em sua constituição atributos texturais e estruturais do solo, sendo observado que, os indicadores estatísticos erro médio e raiz quadrada do erro médio ao quadrado apresentaram valores próximos a zero, indicando boa acurácia na determinação da umidade residual através das FPTs estimadas. De modo geral pode-se afirmar que, o atributo estrutural, conteúdo de água remanescente no solo após aplicação de potencial de -3 kPa, foi significativo em todas as FPTs desenvolvidas. Conclui-se que as FPTs desenvolvidas para estimar o conteúdo de água remanescente no solo nos potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa apresentam-se satisfatórias, podendo ser utilizadas como alternativa na construção da curva de retenção de água em solos que apresentem características que o enquadrem nos requisitos das FPTs desenvolvidas para os solos do Sul do Uruguai.

Palavras-Chave: Curva de retenção, *Stepwise*, Regressão múltipla, Pedofunções.

ABSTRACT

Masters Dissertation

Agricultural Engineering Post Graduation Program

Santa Maria Federal University, RS, Brazil

DEVELOPMENT OF PEDOTRANSFER FUNCTIONS FOR SOIL TYPES OF SOUTHERN URUGUAY

AUTHOR: FABRÍCIO DA SILVA BARBOZA

ADVISOR: REIMAR CARLESSO

Santa Maria, January 2011.

The continuous search for information that will assist agricultural practices is today relevant, being the primary use of methodologies to facilitate the determination of relevant parameters in the agricultural productivity. Alternative methods for determining the physical and hydro soils can auxiliary in the monitoring of agricultural activity. Among these, the use stands of pedotransfer functions (FPTs), among other properties, provide an indirect measure of water retention of soil, reducing cost, time and manpower. This study aims to use multiple linear regression models to determine the FPTs for the soils of southern Uruguay to the practical use at laboratories in soil physics, to obtain the curve of retention. For the realization of the work, used 251 samples of superficial, intermediate and inferior soils of southern Uruguay, available in the database of physical analysis of the INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). This database consists of information of soil texture (percentage sand, silt and clay), bulk density, porosity of the soil, besides the information of water content at potentials of 0, -3, -30, -100, -500 and -1500 kPa. The organization of the database was organized randomly, which is subdivided into two banks, one with 60% of the data (development of FPTs) and the other with 40% of the data (validation of FPTs). The data used to develop the FPTs were included in the Statistical Analysis System (SAS), in its method of determining equations of multiple linear regression (stepwise). Being generated FPTs to estimate water retention at potentials of -30, -100, -500 and -1500 kPa for the superficial layers (0-20 cm), intermediate (20-40 cm) and bottom (40-60 cm) of the soil profile. The equations presented in its constitution datas textural and structural soil and observed that the statistical indicators mean error and root mean square error squared values were near zero, indicating good accuracy in the determination of residual moisture through the FPTs. In general can say that the attribute structure, water content remaining in the soil after application potential of -3 kPa, was significant in all the FPTs developed. We conclude that the FPTs developed to estimate the water content remaining in the soil at potentials of -30, -100, -500 and -1500 kPa were good, could be used as an alternative in the construction of water retention curve in soils that have characteristics that fall under the requirements of the FPTs developed for the soils of southern Uruguay.

Keywords: Retention curve, stepwise, Multiple regression, Pedofunções.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1–	Características das técnicas de determinação do potencial de água no solo.....	21
Tabela 2–	Exemplos de funções de pedotransferência desenvolvidas para solos Brasileiros (modificado de Minasny et al., 2003).....	28
Tabela 3–	Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para o desenvolvimento das funções de pedotransferência das camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do Sul do Uruguai.....	42
Tabela 4–	Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para a validação das funções de pedotransferência das camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do Sul do Uruguai.....	45
Tabela 5–	Coefficiente de correlação (r) entre as variáveis independentes e a umidade correspondente a cada potencial de água no solo, para as camadas superficial, intermediária e inferior.....	49
Tabela 6–	Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -30 kPa na camada superficial de solos do Sul do Uruguai.....	51
Tabela 7–	Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -100 kPa na camada superficial de solos do Sul do Uruguai.....	53

Tabela 8–	Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -500 kPa na camada superficial de solos do Sul do Uruguai.....	55
Tabela 9–	Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -1500 kPa na camada superficial de solos do Sul do Uruguai.....	56
Tabela 10–	Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -30 kPa na camada intermediária de solos do Sul do Uruguai.....	58
Tabela 11–	Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -100 kPa na camada intermediária de solos do Sul do Uruguai.....	60
Tabela 12–	Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -500 kPa na camada intermediária de solos do Sul do Uruguai.....	62
Tabela 13–	Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -1500 kPa na camada intermediária de solos do Sul do Uruguai.....	63
Tabela 14–	Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de - 30 kPa na camada inferior de solos do Sul do Uruguai.....	65
Tabela 15–	Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -100 kPa na camada inferior de solos do Sul do Uruguai.....	67

Tabela 16–	Função de pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -500 kPa na camada inferior de solos do Sul do Uruguai.....	68
Tabela 17–	Função de pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa na camada inferior de solos do Sul do Uruguai.....	70
Tabela 18–	Faixa de variação dos atributos utilizados na validação das FPTs para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de -30 a -1500 kPa, para a totalidade dos dados de validação, para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai.....	72
Tabela 19–	Indicador estatístico ME e erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa para a camada superficial para os solos do Sul do Uruguai.....	72
Tabela 20–	Lâminas médias do conteúdo de água, obtidas em laboratório, para os potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.....	73
Tabela 21–	Lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para o intervalo dos potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.....	74
Tabela 22–	Faixa de variação dos atributos utilizados na validação das FPTs para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de -30 a -1500 kPa, para a totalidade dos dados de validação, para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai.....	74

Tabela 23–	Indicador estatístico ME (erro médio) e erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai.....	75
Tabela 24–	Lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para os potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.....	75
Tabela 25–	Lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para a faixa potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.....	77
Tabela 26–	Faixa de variação dos atributos utilizados na validação das FPTs para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de -30 a -1500 kPa, para a totalidade dos dados de validação, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai.....	77
Tabela 27–	Indicador estatístico ME (erro médio) e erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai.....	78
Tabela 28–	Lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para os potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.....	78
Tabela 29–	Lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para a faixa potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1–	Curva de retenção de água no solo típica para diferentes solos.....	25
Figura 2–	Variação da curva de retenção devido ao tipo de solo (a) amostra moldada com $W(\text{umidade original}) < W_{ót}$ (umidade ótima) e (b) amostra moldada com $W(\text{umidade original}) > W_{ót}$ (umidade ótima) (Miller et al., 2002 modificado).....	25
Figura 3–	Mapas do Uruguai: (a) localização e (b) identificação dos departamentos.....	32
Figura 4–	Mapa representativo dos tipos de solo encontrados no Uruguai.....	33
Figura 5–	Caracterização do solo Uruguio (a) Paisagem do litoral Sul e Oeste e (b) Perfil de solo característico da área de estudo.....	34
Figura 6–	Representação das séries históricas de dados de precipitação (a) e evapotranspiração do tanque classe A (b) a partir de 1972, para a estação Agroclimática do INIA em Las Brujas, Uuguay.....	34
Figura 7–	Equipamento de coleta de solo: (a) extrator e cilindro acoplados e (b) cilindro separado do equipamento extrator.....	35
Figura 8–	Equipamento utilizado na determinação de tensões de até 3 kPa.....	36
Figura 9–	Equipamento utilizado para determinação do conteúdo de água do solo para a aplicação de tensões de 30 e 100 kPa.....	36

Figura 10–	Variabilidade textural dos solos do Sul do Uruguai utilizado para o desenvolvimento das funções de pedotransferência nas camadas: (a) camada superficial; (b) camada intermediária e (c) camada inferior.....	42
Figura 11–	Variabilidade textural dos solos do sul do Uruguai disponível no banco de dados utilizado para a validação das funções de pedotransferência em suas camadas: (a) camada superficial (b) camada intermediária (c) camada inferior.....	44
Figura 12–	Relação 1:1 entre os dados utilizados para o desenvolvimento versus dados utilizados para validação das FPTs, para a camada superficial.....	46
Figura 13–	Relação 1:1 entre os dados utilizados para o desenvolvimento versus dados utilizados para validação das FPTs, para a camada intermediária...	47
Figura 14–	Relação 1:1 entre os dados utilizados para o desenvolvimento versus dados utilizados para validação das FPTs, para a camada inferior.....	48
Figura 15–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -30kPa, para a camada superficial, de solos do Sul do Uruguai.....	52
Figura 16–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100kPa, para a camada superficial, de solos do Sul do Uruguai.....	54
Figura 17–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500kPa, para a camada superficial, de solos do Sul do Uruguai.....	56

Figura 18–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -1500kPa, para a camada superficial, de solos do Sul do Uruguai.....	57
Figura 19–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -30 kPa, para a camada intermediária, de solos do Sul do Uruguai.....	59
Figura 20–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100kPa, para a camada intermediária, de solos do Sul do Uruguai.....	61
Figura 21–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500 kPa, para a camada intermediária, de solos do Sul do Uruguai.....	62
Figura 22–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -1500 kPa, para a camada intermediária, de solos do Sul do Uruguai.....	64
Figura 23–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -30 kPa, para a camada inferior, de solos do Sul do Uruguai.....	66
Figura 24–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100 kPa, para a camada inferior, de solos do Sul do Uruguai.....	67
Figura 25–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500 kPa, para a camada inferior, de solos do Sul do Uruguai.....	69

Figura 26–	Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -1500 kPa, para a camada inferior, de solos do Sul do Uruguai.....	71
Figura 27–	Comparação entre os valores estimados e observado do conteúdo de água do solo na faixa de potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai.....	73
Figura 28–	Comparação entre os valores estimados e observados do conteúdo de água do solo na faixa de potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai.....	76
Figura 29–	Comparação entre os valores estimados e observados do conteúdo de água do solo na faixa de potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai.....	79

LISTA DE SÍMBOLOS

FPT	- Função de pedotransferência
Ds	- Densidade do solo (g.cm^{-3})
Vl	- Conteúdo de água extraído do solo a um potencial de -3 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
Vo	- Conteúdo de água remanescente no solo a um potencial de -3 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
Pt	- Porosidade total do solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
At	- Areia total (%)
Si	- Silte (%)
Arg	- Argila (%)
Si/Arg	- Relação silte por argila (%)
Si+At	- Somatório de silte e areia (%)
Si+Arg	- Somatório de silte e argila (%)
$\theta_{-3 \text{ kPa}}$	- Conteúdo de água correspondente ao potencial de -3 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
$\theta_{-30 \text{ kPa}}$	- Conteúdo de água correspondente ao potencial de -30 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
$\theta_{-100 \text{ kPa}}$	- Conteúdo de água correspondente ao potencial de -100 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
$\theta_{-500 \text{ kPa}}$	- Conteúdo de água correspondente ao potencial de -500 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
$\theta_{-1500 \text{ kPa}}$	- Conteúdo de água correspondente ao potencial de -1500 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
r	- Coeficiente de correlação
R²	- Coeficiente de determinação
ME	- Erro médio
RMSE	- Raiz quadrada do erro médio ao quadrado
Ei	- Valor estimado da variável resposta
Mi	- Valor medido da variável de interesse
N	- Número de observações
FPT_n (superf.)	- Função de pedotransferência da camada superficial
FPT_n (inter.)	- Função de pedotransferência da camada intermediária
FPT_n (inf.)	- Função de pedotransferência da camada inferior

PPGEA/UFSM, BARBOZA, Fabrício da Silva Mestre 2011

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 Água no solo	19
2.2 Retenção e armazenamento de água no solo	20
2.3 Curva de retenção da água no solo	21
2.3.1 Definições teóricas e comportamento.....	22
2.3.2 Relação umidade-potencial.....	24
2.4 Fatores determinantes na dinâmica da água no solo	24
2.4.1 Influência do tipo de solo.....	24
2.5 Funções de pedotransferência.....	26
2.6 Análise de regressão	29
2.6.1 Método de regressão <i>Stepwise</i>	30
3 MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 Descrição da área de estudo.....	32
3.1.1 Caracterização geral.....	32
3.2 Procedimento de coleta e determinação das características físico-hídricas do solo..	35
3.3 Composição do banco de dados.....	37
3.4 Comparação entre os dados utilizados no desenvolvimento e validação das FPTs...	37
3.5 Geração e obtenção das FPTs.....	38
3.6 Avaliação da acurácia das FPTs	38
3.7 Avaliação da acurácia das FPTs para estimativa da curva de retenção de água no solo	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Variabilidade dos atributos do banco de dados.....	41
4.1.1 Dados de solo utilizados para o desenvolvimento das FPTs.....	41
4.1.2 Dados de solo utilizados para a validação das FPTs.....	44
4.1.3 Comparação entre os dados utilizados para desenvolvimento e validação das FPTs.....	46
4.2 Correlação entre as variáveis independentes e a retenção de água no solo	48

4.3 Funções de Pedotransferência	50
4.3.1 Camada Superficial.....	50
4.3.2 Camada intermediária.....	58
4.3.3 Camada inferior.....	64
4.4 Acurácia das FPTs na estimativa do intervalo de potenciais da curva de retenção de água no solo	71
4.4.1 Estimativa da retenção de água no intervalo de potenciais de -30 a -1500 kPa - Camada Superficial.....	71
4.4.2 Estimativa da retenção de água no intervalo de potenciais de -30 a -1500 kPa - Camada Intermediária.....	74
4.4.3. Estimativa da retenção de água no intervalo de potenciais de -30 a -1500 kPa - Camada Inferior.....	77
5 CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

A quantidade de água necessária ao perfeito desenvolvimento das culturas é um parâmetro importante para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de um sistema de irrigação, sendo fundamental a determinação do balanço hídrico do solo em estudo, a fim de estimar parâmetros de determinação da dinâmica de água no solo.

Diversos indicadores de qualidade física do solo têm sido avaliados no intuito de desenvolver práticas de manejo mais adequadas e determinar o momento mais oportuno para efetivá-las, visando conservar os recursos do solo e da água, existindo diversas técnicas de campo e de laboratório que permitem avaliar o armazenamento e a dinâmica da água no solo. No entanto, apesar de serem bastante precisas, exigem a disponibilidade de equipamentos caros e de pessoal treinado para executar de forma adequada às avaliações. Essas técnicas normalmente são utilizadas para fins experimentais, mas devido ao custo não se tornam, muitas vezes, economicamente viáveis para uso em nível de campo.

Para contornar esse problema, nas últimas décadas surgiram modelos matemáticos para estimação de parâmetros ligados a dinâmica de água no solo, entre estes, alguns para o estudo da retenção da água no mesmo, em função de suas características físicas e estruturais, que são de mais fácil determinação quando comparadas as metodologias tradicionais de determinação da retenção de água no solo. Esses modelos são conhecidos como funções de pedotransferência (FPT) e normalmente utilizam informações de textura, matéria orgânica, densidade e estrutura do solo como parâmetros de entrada, afim de, com o uso de regressões lineares múltiplas determinar funções que permitam estimar satisfatoriamente o conteúdo de água a um dado potencial em função dos fatores de entrada.

O solo é afetado pelo seu manejo e pelas práticas culturais, com conseqüente alteração da dinâmica e retenção de água nos poros. Os principais fatores que influenciam a disponibilidade de água às culturas são: a estrutura do solo, por determinar o arranjo das partículas; a textura, o tipo e quantidade de argila e o teor de matéria orgânica (KLEIN & LIBARDI, 2000).

As FPTs são úteis por facilitarem a determinação das características físico-hídricas do solo, diminuindo o custo e o tempo gasto para a determinação. Segundo Silva et al (2008), o uso de FPTs ainda ocorre de forma restrita, mas pode facilitar o entendimento do comportamento mecânico do solo, visto que a avaliação das propriedades físicas dos distintos solos está mais avançada (SUZUKI et al., 2008), sendo utilizadas para orientar o manejo e o controle da qualidade física do solo.

O presente trabalho visou utilizar dados texturais e estruturais dos solos do Sul do Uruguai, obtidos no laboratório de física do solo do Instituto Nacional de Investigación Agropecuária (INIA - Las Brujas-Uruguai), para desenvolver funções de pedotransferência, a partir de regressão linear múltipla, para a estimativa dos valores de conteúdo de água retida nos potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa, a fim de se construir de forma indireta a curva de retenção de água do solo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Estabelecer, testar e validar FPTs a partir de banco de dados formados por amostras de solo das camadas superficial, intermediária e inferior de solos do Sul do Uruguai, estimando de forma indireta os valores de conteúdo de água retida no solo nos potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa para construção da curva de retenção de água do solo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Gerar FPT a partir de dados texturais e estruturais de amostras de solos coletadas nas camadas superficial, intermediária e inferior de solos do Sul do Uruguai;

- Validar as FPTs desenvolvidas para a determinação dos conteúdos de água retidos no solo nos potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa para as camadas superficial, intermediária e inferior;

- Avaliar o erro médio em lâmina correspondente a estimativa do armazenamento de água das camadas no perfil do solo, na faixa dos potenciais de -30 a -1500 kPa;

- Disponibilizar FPT que possam ser utilizadas em laboratórios de física do solo, como método alternativo aos tradicionais para a determinação da curva de retenção de água no solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Água no solo

A água no solo, assim como qualquer corpo na natureza, pode ser caracterizada por seu estado de energia. Reichardt (1990) destaca que, depois da umidade, o estado de energia da água é a característica mais importante dos solos. Quanto menor a energia do corpo, maior a sua estabilidade, uma vez que os corpos tendem a buscar o estado mínimo de energia, com a busca espontânea por estados de energia mais estáveis.

O potencial total da água no solo, representado pelo símbolo ψ , representa o trabalho útil que deve ser realizado para conduzir um infinitesimal de água pura, isotérmica, isobárica e reversivelmente de um reservatório sob condições padronizadas para o estado considerado no solo (REICHARDT, 1985). No solo, a água ocupa os espaços porosos formados pelo arranjo físico das partículas da fase sólida do solo, competindo, freqüentemente, com a fase gasosa do mesmo. Do total de água que chega ao solo uma parte vem a fazer parte da solução do solo, sendo esta altamente dinâmica, exibindo variação no tempo e no espaço, sobretudo perto da superfície do solo, devido à evaporação e atividade das raízes das plantas (REICHARDT, 1990).

Mudanças no conteúdo de água do solo e no seu estado de energia afetam as propriedades mecânicas do solo, incluindo resistência, compactabilidade e penetrabilidade, podendo causar mudanças na densidade de solos (OR & WRAITH, 2000). A retenção de água do solo é primariamente dependente da distribuição de tamanho de partículas deste, de sua estrutura, mineralogia e matéria orgânica; numa segunda consideração, o uso e o manejo do solo estarão afetando a retenção e o seu conteúdo de água. O melhor aproveitamento da água capilar pode tornar-se fundamental para a melhoria das produções agrícolas e das condições do solo, pois, na medida em que é submetido a variados ciclos de umedecimento e secagem, o solo pode ter suas propriedades físicas afetadas, afetando diretamente os cultivos (FASSBENDER, 1982).

O armazenamento de água no solo varia em função da quantidade de água que entra no perfil e dos fatores que contribuem para que esta permaneça armazenada. Um deles é a condição da superfície que, inclusive irá regular a sua variação no solo. A evolução da superfície do solo é extremamente complexa e nela intervêm numerosos processos determinados pelas características da água da chuva, as propriedades físicas, mecânicas e hídricas do solo e fatores do local, como a percentagem de cobertura pela vegetação e a

história prévia da evolução da superfície (TABOADA CASTRO, 2001). Assim, estudos das relações entre o potencial de água e a umidade do solo são fundamentais para o conhecimento de sua dinâmica e disponibilidade, vindo a afetar diretamente as relações de produção e produtividade agrícola.

2.2 Retenção e armazenamento de água no solo

Muitos fatores interferem na capacidade de retenção de água de um solo. Reichardt (1990) considera como o principal deles o tipo de solo, pois este define a área de contato entre as partículas sólidas e a água e determina as proporções de poros de diferentes tamanhos. Outros fatores são a estrutura (determinada pelo arranjo das partículas e, por consequência, distribuição dos poros) e a qualidade (composição) mineralógica do solo. Alguns argilo-minerais, por exemplo, têm ótimas propriedades de retenção de água, como as montmorilonitas, vermiculitas e ilitas, ao contrário da caulinita e gibsitita.

Pode-se considerar que existam dois processos básicos que explicam a retenção de água pelos solos: (1) Capilaridade: ocorre nos microporos (diâmetro menor que 30 μm), sendo mais importante na faixa mais úmida do solo, e normalmente é função da estrutura do solo e; (2) Adsorção: ocorre nas superfícies dos sólidos como filmes presos a elas, sendo mais importante na faixa mais seca do solo e é mais influenciada pela textura e pela superfície específica do solo (HILLEL, 1971; REICHARDT, 1990; LIBARDI, 1995).

O movimento de água também não apresenta mudanças devido ao potencial osmótico, a não ser que exista uma membrana semipermeável no sistema (REICHARDT, 1985). Fredlund & Xing (1994) atentam que, para valores de potencial matricial elevados (superiores à 1500 kPa), o potencial matricial e o potencial total podem ser geralmente assumidos como equivalentes.

Várias técnicas foram desenvolvidas para medir o potencial de água no solo (FREDLUND & RAHARDJO, 1993). Ridley & Wray (1995) apresentam estudo dos métodos, no qual se discute as metodologias, instrumentos, tipo de medida, vantagens e limitações de cada uma delas. Na Tabela 1 são apresentadas as características das técnicas de determinação do potencial de água no solo.

Tabela 1- Características das técnicas de determinação do potencial de água no solo.

Método de Potencial	Faixa de Medida e Tempo aproximado de equilíbrio	Observações
Funil de pedra porosa (Matricial)	0 a 70 kPa (Horas)	- o potencial é aplicado diretamente na amostra; - bom para baixos potenciais onde a precisão das panelas é limitada.
Placa de pressão (Matricial)	0 a 1500 kPa (Horas)	- emprega a técnica da translação de eixos; - depende da capacidade da placa porosa; - continuidade da fase ar.
Membrana de pressão (Matricial)	Até 10000 kPa (Dias)	- emprega a técnica de translação de eixos; - emprega membrana de celulose.
Tensiômetro (Matricial)	0 a 70 kPa (Minutos)	- tempo de resposta depende da condutância da placa porosa; - tensiômetros de alta capacidade tiram partido da elevada resistência a tração da água.
Blocos porosos (Matricial)	10 a 1000 kPa (Semanas)	- baseia-se na condutividade elétrica dos materiais.
Psicrômetros (Total/Osmótico)	100 a 8000 kPa (Minutos)	- depende de rigoroso controle das temperaturas; - potencial osmótico, mede sucção de extrato da solução do solo.
Sensores de condutividade térmica (Osmótica)	Todos os valores (Minutos)	- condutividade elétrica do extrato da solução; - concentração de solutos.
Equilíbrio da fase vapor (Total)	Toda a faixa acima de 400 kPa (Dias)	- solução com concentração conhecida; - equilíbrio demorado.
Princípios osmóticos (Matricial)	200 a 1600 kPa (Horas)	- solo em contato com solução de concentração conhecida através de contato com membrana seletiva; - útil para instalar e controlar sucção em ensaios.

Fonte: Ridley & Wray (1995).

2.3 Curva de retenção da água no solo

A relação entre conteúdo de água no solo e o potencial matricial do solo denomina-se curva característica de água no solo, curva de retenção de água no solo ou simplesmente curva de retenção, que é a parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas do solo (CICHOTA, 2004).

2.3.1 Definições teóricas e comportamento

A curva de retenção permite calcular a quantidade de água que um solo pode reter dentro de determinados limites de potenciais matriciais. Deve-se conhecer toda a curva para poder interpretar as características do armazenamento de água no solo em relação às necessidades hídricas de determinado cultivo (RIGHES et al., 1983).

Reforçando essa idéia, Costa (1993) menciona que a curva de retenção permite quantificar o conteúdo de água que um solo pode armazenar dentro de um determinado limite de potencial matricial. Essa determinação reveste-se de grande importância, visto que a resposta das plantas está relacionada mais diretamente ao potencial energético da água no solo, do que simplesmente ao conteúdo de água no solo.

A curva característica de água no solo apresenta como principal vantagem o fato de mostrar o aspecto dinâmico da água no solo. Por outro lado, não existe nenhuma teoria satisfatória para sua previsão, a mesma é determinada experimentalmente e constitui uma característica específica de cada solo ou mesmo de cada horizonte ou camada do seu perfil (REICHARDT, 1985). Outra particularidade da curva de retenção de água no solo é que a mesma reflete a distribuição de poros por tamanho, uma vez que a aplicação de determinada tensão fornece o tamanho dos poros esvaziados no solo (URACH, 2007).

Para elevados conteúdos de água no solo, nos quais os fenômenos de capilaridade são importantes, a curva depende do arranjo e dimensões dos poros. Passa a ser, então, uma função da densidade e da porosidade do solo, sendo, influenciada pela estrutura do solo. Por outro lado, para reduzidos conteúdos de água, a curva praticamente independe do arranjo poroso do solo e, conseqüentemente, da estrutura, dependendo dos fenômenos de adsorção, os quais são mais influenciados pela textura e superfície específica (URACH, 2007).

Em elevados potenciais matriciais da água no solo, as forças capilares são mais atuantes e, nessa faixa de potencial matricial, a textura e a estrutura do solo determinam a quantidade de água retida pelos poros do solo. Com a redução gradativa do potencial matricial, diminuem as forças capilares e aumentam os fenômenos de adsorção da água no solo pela diminuição da espessura do envelope que envolve as partículas do solo e aumenta a energia de retenção da água no solo. Conseqüentemente, solos de textura fina ou argilosa retêm mais água quando comparados com solos arenosos. Tal condição é prevista pelo fato de possuírem maior porcentagem de material coloidal, maior espaço poroso e superfície adsortiva muito maior que os solos de textura mais arenosa (CARLESSO & ZIMMERMANN, 2000). Conforme Hillel (1982), a retenção de água pelo solo em condições

de altas tensões é uma decorrência mais da adsorção e, portanto, está mais relacionada a condições texturais do que estruturais do solo.

A compactação do solo afeta a curva de retenção de água, normalmente provocando redução na porosidade total do solo em decorrência da diminuição dos poros maiores inter-agregados. Isso significa que o conteúdo de água de saturação e os conteúdos de água retidos a baixos potenciais são reduzidos. Já o volume de poros médios, é provavelmente maior em solos compactados, pois muitos poros grandes são reduzidos. Por sua vez, os microporos não sofrem alterações. Assim, a curva para solos compactados pode ser quase idêntica à curva de solos não compactados na faixa de baixos potenciais (URACH, 2007).

A curva de retenção de água é afetada pela textura do solo, de forma que quanto maior for o conteúdo de argila, maior será, em geral, o teor de água retida sob um dado potencial matricial e mais suave será a inclinação da curva devido a uma distribuição mais uniforme de tamanho dos poros. Em solos arenosos, normalmente os poros são maiores, sendo mais rapidamente esvaziados a baixas tensões, restando pequenas quantidades de água retidas a potenciais menores, o que explica a inclinação acentuada da curva de retenção de água (HILLEL, 1982).

O tipo de mineral presente no solo também pode interferir na forma da curva, pois segundo Hillel (1982), um fenômeno importante é a possível variação na característica de umidade do solo causada pela contração e expansão das argilas, devido ao tipo de argila e a concentração da solução do solo em torno das mesmas. Analisando o comportamento da curva de retenção de água em relação às diferentes profundidades, Righes et al. (1983) observaram que, a retenção de água em potenciais maiores que -33 kPa obedeceu, particularmente, a variação da composição granulométrica das diferentes camadas. No entanto, quando as amostras de solo foram submetidas a potenciais menores ou iguais a -33 kPa, observou que esse fato não ocorreu, sendo contrário à variação da composição granulométrica.

Para a determinação da curva de retenção de água, pode-se ir diretamente a campo ou então no laboratório com amostras indeformadas. Os métodos no campo usualmente requerem a instalação de tensiômetros e tem a vantagem de possibilitar a determinação da relação potencial matricial e umidade do solo em muitas profundidades simultaneamente sob condições naturais. Por outro lado, os métodos de laboratório possibilitam a análise de um grande número de solos simultaneamente e com maior facilidade (LIN, 1999).

As características que distinguem as curvas de retenção dependem de vários fatores como a estrutura e agregação do solo, teor de umidade inicial ou de moldagem, índice de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia, histórico de tensões e método de compactação.

Estes fatores podem interferir na forma da curva de retenção de diferentes maneiras, cada um se sobressaindo ao outro, dependendo do tipo de solo. Amostras de um solo em particular, apesar de ter a mesma textura e mineralogia, podem exibir diferentes curvas de retenção se forem preparadas com diferentes umidades e possuírem diferentes histórico de tensões. Como resultado, o comportamento também será diferente (MILLER et al., 2002).

2.3.2 Relação umidade-potencial

Pode-se relacionar a componente potencial matricial aplicado no solo em função do conteúdo de água deste. Reichardt (1985) descreve o comportamento da água nos solos com a variação do potencial matricial aplicado em solos saturados, em equilíbrio com água pura à mesma elevação, o potencial matricial é nulo ($U_a - U_w = 0$). Aplicando-se uma pequena sucção à água do solo saturado, não ocorrerá nenhuma saída de água até o momento em que a sucção atinge determinado valor em que o maior poro se esvazia. Esta sucção ou pressão crítica é denominada de “valor (ou sucção) de entrada de ar”. (...) Aumentando-se a pressão, mais água é retirada dos poros que não conseguem reter água contra a pressão aplicada. Relembrando a equação da capilaridade, podemos imediatamente prever que um aumento gradual da pressão resultará em um esvaziamento de poros progressivamente menores, até que, a pressões muito altas, somente poros muito pequenos conseguem reter água.

Quanto à curva de retenção, esta representa relação entre a tensão aplicada e a umidade remanescente no solo, podendo ser dividida em três estágios de drenagem. O primeiro, chamado de “Efeito Limite” (*Boundary Effect Stage*) ocorre até o valor de entrada de ar e é onde praticamente todos os poros estão preenchidos com água. O segundo ocorre entre a pressão de entrada de ar e o ponto de início da umidade residual, também chamada fase de transição, neste estágio o fluxo de água é em fase líquida quando a sucção aplicada aumenta e o solo é drenado com maior sucção. Já no terceiro, fase residual de drenagem, a continuidade da água nos vazios é bastante reduzida e descontínua e acréscimos adicionais na sucção levam a pequenas mudanças no grau de saturação do solo (VANAPALLI et al., 1999).

2.4 Fatores determinantes na dinâmica da água no solo

2.4.1 Influência do tipo de solo

O solo tem uma relação (potencial versus umidade) característica, geralmente apresentada em forma sigmoide, desde que não se altere o arranjo poroso e a geometria do sistema. Na Figura 1 são apresentadas três curvas de retenção típicas dos solos.

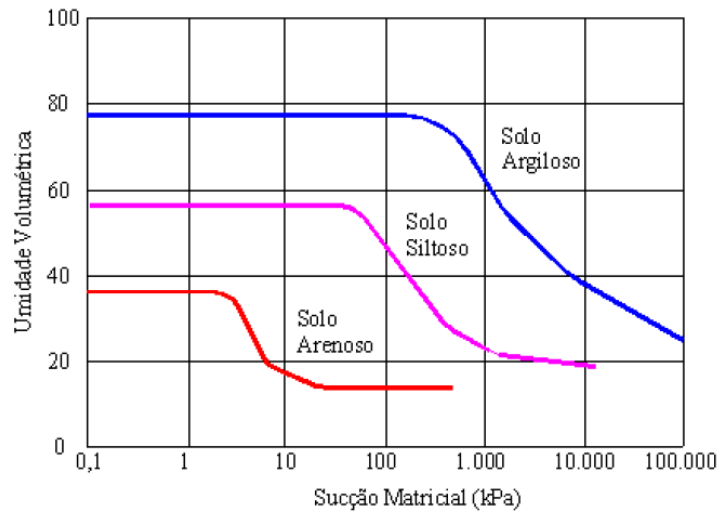


Figura 1 - Curva de retenção de água no solo típica para diferentes solos.
Fonte: (FREDLUND & XING, 1994).

Pequenas variações do potencial matricial respondem com maior variação de umidade em solos arenosos do que em solos argilosos, os quais necessitam de amplas variações de potencial para modificar sensivelmente o valor da umidade (θ_w). Além disso, o decréscimo do tamanho das partículas suaviza a inclinação da curva (BARBOUR, 1998). A posição relativa da curva de retenção obedece geralmente à ordem da plasticidade do solo, sendo que os solos que contêm maior plasticidade estão acima dos solos de menor plasticidade.

A curva de retenção pode, então, ser um indicativo da fração argila presente na amostra. Um aumento desta fração geralmente leva a um aumento da quantidade de água retida sob um mesmo valor de sucção. Miller et al. (2002) apresentam dados que confirmam este comportamento, como pode-se observar na Figura 2.

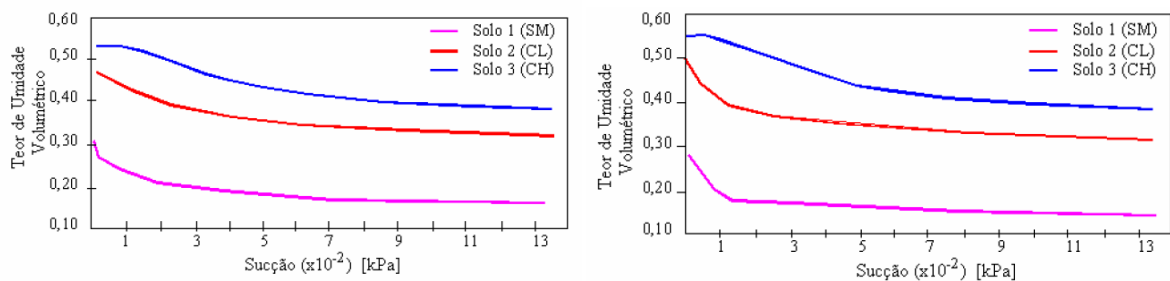


Figura 2 – Variação da curva de retenção devido ao tipo de solo (a) amostra moldada com W (umidade original) < $W_{ót}$ (umidade ótima) e (b) amostra moldada com W (umidade original) > $W_{ót}$ (umidade ótima) (Miller et al., 2002 modificado).

Onde: SM-Médio teor de silte; CL - Baixo teor de argila e CH- Alto teor de argila.

2.5 Funções de pedotransferência

Os dados de armazenamento do conteúdo de água no solo são fundamentais na utilização de modelos hidrológicos. Entretanto, a elaboração da curva de retenção de água no solo é laboriosa, de custo elevado e demanda muito tempo. Dessa forma, algumas funções matemáticas são utilizadas para estimar atributos mais difíceis de serem determinados a partir de atributos facilmente determinados e/ou obtidos em análises de laboratório, sendo esse o conceito de funções de pedotransferência introduzido por Bouma (1989). Essa técnica geralmente tem sido utilizada para prever propriedades hidráulicas do solo, tais como o armazenamento de água e a condutividade hidráulica (WÖSTEN et al., 2001). Assim, considerando a demanda de informação de apoio à agricultura e à melhoria da qualidade da terra, a utilidade do levantamento de solos não pode se restringir apenas em gerar dados de levantamento e distribuição geográfica das classes de solos, mas também prover a distribuição espacial quantitativa das propriedades dos solos (MINASNY et al., 2003).

Várias têm sido as propostas para obtenção da condutividade hidráulica e do armazenamento de água no solo, uma vez que essas propriedades são relativamente difíceis de serem avaliadas (PAULETTO et al., 1988; DIRKSEN, 1999). Segundo Van Den Berg et al. (1997) algumas equações podem fornecer um bom ajuste global para curvas de retenção, contudo, podem ocasionar baixa precisão em estimativas de conteúdos de água em determinados potenciais de alguns solos. Romano & Santini (1997) investigaram se uma dada FPT pode capturar a variabilidade espacial das funções de retenção, encontrando resultados razoáveis para FPTs que estimam parâmetros de uma dada função de retenção. Herbst et al. (2006) concluíram que o uso de regressões múltiplas apresenta potencial elevado para a predição espacial de propriedades hidráulicas do solo, com os erros associados à regressão aproximadamente na mesma ordem de grandeza aos associados à krigagem ordinária.

No laboratório, persistem problemas de custo, morosidade e inexatidão na determinação das propriedades hidráulicas do solo. Todavia, as propriedades de retenção de água são requeridas em modelos de simulação de fluxos de água e transporte de solutos, bem como muito usados em várias estratégias de manejo de água no solo (BOUMA, 1989).

Devido às dificuldades experimentais e a demanda de tempo envolvidas nessas determinações, tem-se observado um crescente interesse por métodos indiretos de estimativa da capacidade de retenção da água nos solos (PACHEPSKY & RAWLS, 1999), os quais utilizam dados taxonômicos simples.

As FPTs são equações de regressão ou modelos que relacionam propriedades básicas do solo entre si e que são de importância para a produção agrícola e manejo de recursos naturais. O princípio das FPTs consiste em que o sistema de informação ou os dados permitam expressar, de forma matemática, funções de pedotransferência específicas para uma variedade de propriedades e qualidades de solo. As FPTs permitem expressar de forma algébrica a umidade do solo a um determinado valor de potencial matricial (TOMASELLA et al., 2000). No entanto, o enfoque de FPTs geralmente é dado para a parte puramente física, onde são relacionados os limites hídricos como granulométrica, porosidade, densidade do solo e matéria orgânica do solo, deixando fora outras variáveis químicas, podendo limitar a análise integral dos fatores que explicam a retenção de água no solo.

Na literatura são encontrados modelos ou equações de pedotransferência que tentam descrever a umidade do solo a diferentes potenciais. Como exemplos, temos as equações desenvolvidas por: Arruda et al. (1987), utilizando 218 amostras obtidas em vários locais do estado de São Paulo; Bell et al. (1995) utilizando 148 amostras para o estado do México; Oliveira et al. (2002) desenvolveu funções de pedotransferência para o Estado de Pernambuco a partir de dados de 98 perfis de solos; Masutti (1997) e Meng et al. (1987) desenvolveram funções de pedotransferência para solos de regiões temperadas; Giarola et al. (2002) utilizaram amostras deformadas e indeformadas provenientes de 18 perfis de solos representativos de diversos locais do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina perfazendo um total de 35 amostras e, Tomasella et al. (2000) desenvolveu um modelo para as condições de solos brasileiros, utilizando dados de mais de 500 horizontes.

Atualmente, cada vez mais são desenvolvidos novos estudos sobre funções de pedotransferências, e para os mais variados tipos de solos, como os de Michelin (2010) e Urach (2007) para os solos irrigados do Rio Grande do Sul. Contudo, Minasny et al. (2003) alertam para a necessidade de se definir dois princípios básicos de FPTs, evitando o mau uso do conceito pedotransferência. Primeiro princípio de FPTs é: Não prognosticar algo que é mais fácil e mais barato medir ou determinar. Como o objetivo de funções de pedotransferência é prever propriedades cujas medidas ou determinações diretas são difíceis, laboriosas ou muito caras, os preditores devem ser de obtenção fácil ou barata. O custo e o esforço para obter a informação sobre o preditor deverão ser menores do que o de obter a informação sobre o que se pretende prever. Embora sejam mais onerosas as determinações de argila e matéria orgânica, os modelos que predizem densidade do solo a partir do teor de argila e de carbono orgânico são considerados os que originam FPTs mais eficientes.

Na Tabela 2 são relacionados alguns exemplos de funções de pedotransferência desenvolvidas para solos brasileiros.

Tabela 2- Exemplos de funções de pedotransferência desenvolvidas para solos Brasileiros (modificado de Minasny et al., 2003).

Variáveis preditas	Preditores	Tipo e localização do solo	Referências
Condutividade hidráulica	Curva de retenção de água	Latossolo Amarelos caulínicos da Amazônia	TOMASELLA et al. (1997)
Parâmetros de Brooks - Corey	Textura, densidade do solo, porosidade, teor de água	Amazônia Brasileira	TOMASELLA & HODNETT (1998)
Água retida no solo entre 10 e 1,5 kPa	Granulometria, densidade do solo	Ferralsols do Brasil	VAN DE BERG et al. (1997)
Relações entre a equação de van Genuchten e retenção de água	Textura, carbono orgânico, umidade equivalente, densidade do solo	Dados do relatório de levantamentos de solos do Brasil	TOMASELLA et al. (2000)
Mineralogia de argilas e retenção de água	Carbono orgânico	Solos do Nordeste do Brasil e África Ocidental	GAISER et al. (2000)
Umidade do solo no potencial de -33 a -1500 kPa e água disponível	Textura e densidade de solos	Solos do Estado de Pernambuco	OLIVEIRA et al. (2002)
Parâmetros da equação de van Genuchten	Textura, carbono orgânico, umidade equivalente e densidade do solo	Levantamento de solos do Brasil	TOMASELLA et al. (2003)

Isso porque, estes utilizam dados existentes em relatórios de levantamentos para prever uma variável perdida, que não foi determinada. O segundo princípio das FPT é: Não usar FPTs, a menos que se possa avaliar a incerteza associada e, para um determinado problema, se um conjunto de FPTs alternativas está disponível, usar aquela com menor variância.

A incerteza de uma FPT pode ser devida à incerteza do modelo e à incerteza nos dados de entrada (input). A incerteza associada a um modelo pode ser calculada pelo método não paramétrico “bootstrap” (auto-suficiente), conforme Efron & Tibshirani (1993), ou pela análise de primeira ordem, se as FPTs são geradas pelo método dos quadrados mínimos. A incerteza nos dados de entrada pode ser facilmente computada usando o método de simulação Monte Carlo. As FPTs tendem a apresentar resultados mais precisos quanto mais

homogêneos forem os solos que compõem a base de dados e quanto mais próximos destes estiverem os solos que terão seus dados estimados. Um problema bastante comum refere-se a diferenças nos métodos analíticos empregados para obtenção das variáveis dependentes e independentes (OLIVEIRA, 2002).

A capacidade preditiva de uma equação pode ser inspecionada visualmente (BOUMA, 1989), comparando os dados estimados com os dados de curvas obtidas (curva 1:1). Essa curva não dá informações sobre o desempenho das FPTs em relação às aplicações específicas de modelos de simulação dinâmicos, como cálculo do déficit de umidade e a capacidade de previsão de água no solo. Nesse sentido, Minasny et al. (2003) afirmam que: a heterogeneidade de dados pode causar uma performance apenas razoável das funções de pedotransferência, em razão da variação na predição não estar vinculada somente à limitação do modelo, mas também à incompatibilidade dos dados. Ainda segundo esses autores, a priori, deve-se utilizar FPTs já desenvolvidas, mas a validade de uma determinada FPT não deve ser interpolada ou extrapolada além do ambiente pedológico em que foi elaborada. Para Minasny et al. (2003) o desenvolvimento de funções de pedotransferência é impulsionado pela existência de grandes bancos de dados de solos, que possibilitam o uso de ferramentas de busca de dados.

As FPTs são usadas em modelos aplicados em várias escalas (PACHEPSKY et al., 1999). Entretanto, o seu uso mais adequado relaciona-se a estudos em escala regional ao invés de aplicações em locais específicos (LIN et al., 1999). A utilização de pedofunções deve basear-se em calibrações locais porque as equações obtidas de outros trabalhos demonstraram baixa capacidade preditiva (COELHO et al., 1998), constatação também realizada por Meng et al. (1987), Oliveira et al. (2002) e Tomasella et al. (2003). O mesmo ocorre com modelos de transporte de água e solutos desenvolvidos e testados em pequenas escalas e empregados em escalas maiores, como por exemplo, em uma bacia hidrográfica (ESKES & CRESTANA, 1996).

2.6 Análise de regressão

Análise de regressão é uma metodologia estatística para prever valores de uma ou mais variáveis (dependentes), baseando-se em um conjunto de valores de variáveis predictoras (independentes). Tem por objetivo descrever através de uma equação matemática a relação existente entre duas ou mais variáveis partir de “n” observações dessas variáveis (DRAPER & SMITH, 1981).

Em muitas situações a explicação de um fenômeno através de apenas uma variável independente (regressão simples) pode não ser satisfatória, pois essa variável será apenas uma componente influenciando na variação da resposta estudada. Nestes casos deve-se propor uma equação envolvendo mais de uma variável independente, chamado de modelo de regressão múltiplo (PAULA, 1997).

O método mais usual para estimação dos parâmetros do modelo de regressão é conhecido como método de mínimos quadrados. O princípio fundamental do método de mínimos quadrados consiste em determinar estimativas dos parâmetros que minimizem o quadrado das distâncias entre os valores observados (valores reais) e os correspondentes ao modelo proposto (valores estimados), onde essas diferenças são definidas como resíduo (DRAPER & SMITH, 1981).

Para encontrar o modelo mais eficiente, algumas variáveis independentes poderão ser eliminadas do modelo por não contribuírem significativamente, além de que podem trazer problemas de multicolinearidade, então uma solução é a utilização dos métodos estatísticos para a seleção de variáveis (MONTGOMERY et al, 2001). Existem vários métodos estatísticos para a seleção de variáveis. No entanto, a comparação dos métodos de seleção de variáveis univariado e multivariado é muito interessante, pois pode aperfeiçoar o modelo com o ganho razoável de tempo, no caso em que a quantidade de variáveis for elevada.

Segundo Draper e Smith (1981) o método estatístico univariado de *Stepwise*, é provavelmente o mais utilizado, pois não requer o cálculo de todas as regressões possíveis. No entanto, não é tão simples quando o número de variáveis é muito grande.

2.6.1 Método de regressão *Stepwise*

De acordo com Montgomery et al. (2001) pelo fato da avaliação e todas as regressões possíveis poderem ser computacionalmente pesadas, vários métodos têm sido desenvolvidos para avaliar subgrupos de modelos de regressão ou por adição ou por eliminação de regressores. Esses métodos são geralmente referidos como um procedimento de *Stepwise*. Eles podem ser classificados dentro de três categorias: seleção *Forward* (1); Eliminação *Backward* (2); regressão *Stepwise* (3).

A regressão *Stepwise* (3) é uma combinação dos outros dois procedimentos (1) e (2). A regressão *Stepwise* é uma modificação da seleção de *Forward* em que cada passo todos os regressores que entrarem no modelo, previamente, são reavaliados a partir de suas estatísticas F (parciais). Um regressor adicionado no passo anterior pode agora ser redundante por causa da relação entre eles. Se a estatística F(parcial) para a variável é menor que a F para a retirada,

essa variável é mantida no modelo (DRAPER; SMITH, 1981). Os limites de F para adição e retirada de variáveis não precisam ser iguais. Geralmente, o limite F para retirada de uma variável é especificado como sendo menor que o limite para a inclusão de variáveis (PAULA, 2004).

A regressão do tipo *Stepwise* pode resultar em combinações lineares das variáveis independentes que não apresentam a menor soma de quadrados dos resíduos (SQE) e pode apresentar deficiência nas estimativas dos parâmetros quando as variáveis independentes são correlacionadas, ou seja, quando existir multicolinearidade (MONTGOMERY et al., 2001).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

3.1.1 Caracterização geral

O território Uruguaio está compreendido dentro da zona temperada do sudeste da América do Sul, entre as latitudes de 30 ° e 35 ° sul e longitude de 53 ° e 58 ° oeste. O país tem uma área de 176.215 km², com extensão de 680 km de costa localizados na margem norte do Rio de la Plata, e parte do sudoeste do oceano Atlântico. Na figura 3 (a) é apresentada a localização espacial do Uruguaio e a (b) a localização da área de estudos.

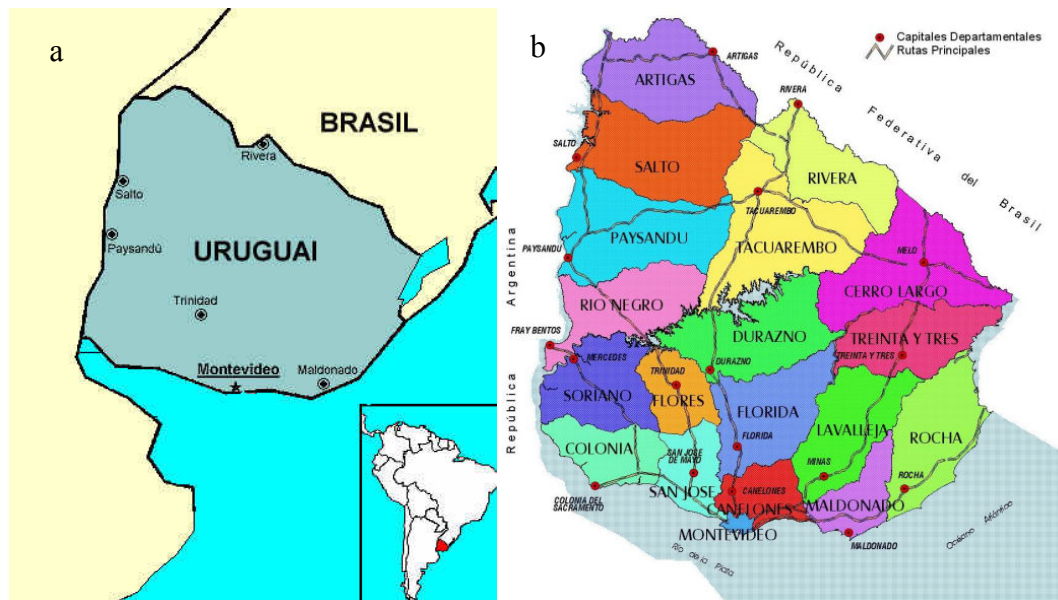


Figura 3 – Mapas do Uruguaio: (a) localização e (b) identificação dos departamentos.

O relevo do Uruguaio é caracterizado por topografia baixa de rolamento. O ponto mais alto fica a apenas 500 m. O litoral, tanto do Atlântico e do Rio de La Plata, é composto principalmente de dunas e praias, rodeado por pontas rochosas. Na costa oceânica há uma série de lagoas costeiras. O litoral é muitas vezes modificado pelo efeito recorrentes das tempestades.

3.1.1.1 Solos

O território é coberto por três tipos de solos principais: (1) solos pesados - com um horizonte B textural a uma profundidade de entre 30 e 40 cm, (2) solos com horizonte

superficial arenoso e horizonte B textural de argila a uma profundidade de 70-80 cm, caracteriza-se por baixo teor de matéria orgânica e (3) solos superficiais (30 mm), desenvolvido sobre rochas de basalto ou granito. A prática mais comum nos primeiros dois tipos é o sistema de rotação de pastagem, enquanto o terceiro tipo é amplamente coberto por campos naturais utilizados para pecuária e silvicultura (INIA, 2010).

Fator determinante nos solos do Uruguai é a sua cor, sendo que se destaca a cor preta, marrom escuro ou marrom cinzento escuro. Estes, em sua maioria possuem uma saturação por bases acima de 50% e um pH superior a 5,5 ao longo do perfil, mostrando os valores tendendo a elevar-ser com a profundidade (DURAN, CALIFRA & MOLFINO, 1999). Na figura 4 é apresentada a distribuição espacial dos solos do Uruguai.

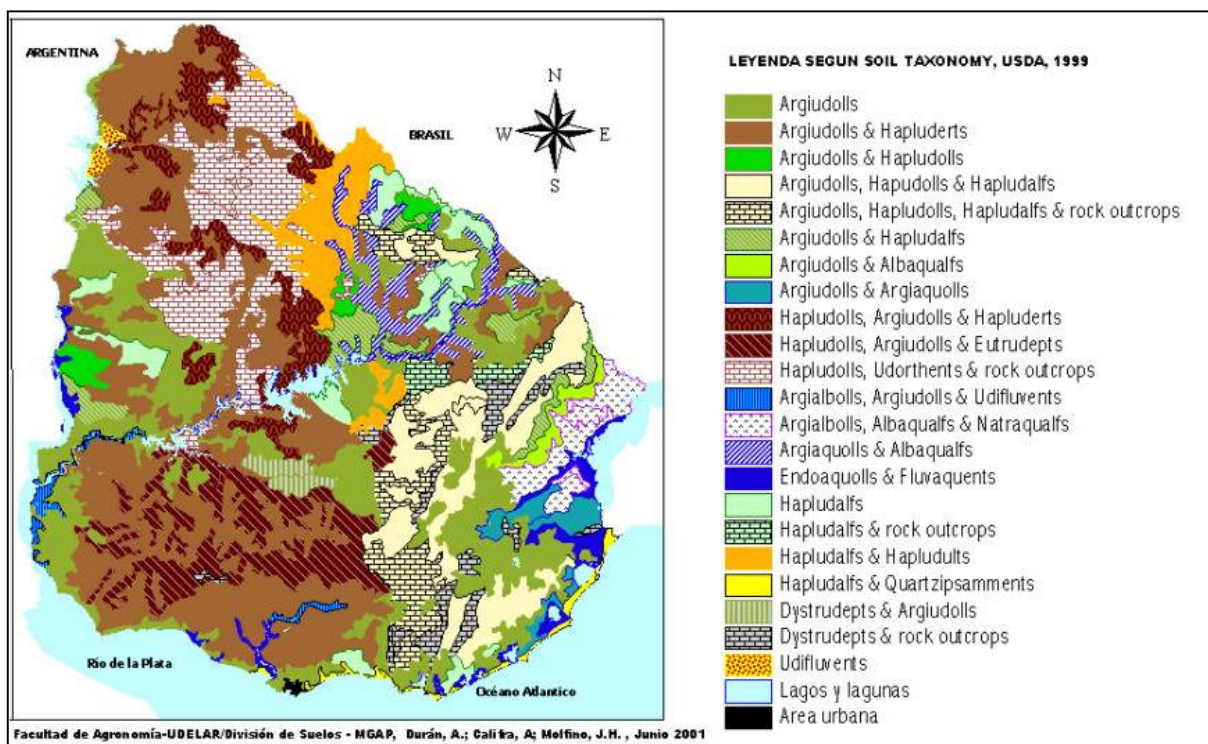


Figura 4 - Mapa representativo dos tipos de solo encontrados no Uruguai.

Fonte: UDELAR, 2001.

Os solos do estudo pertencem ao grande grupo dos solos saturados lixiviados, possuindo um horizonte argilúvico muito desenvolvido e seqüência de horizontes A-Bt-C, sendo classificados como Argisoles e possuindo três grandes subcategorias: Argiudolls & Hapluderts; Argiudollsegião, Hapludolls & Hapludalfs & hapludolls, Argiudolls & Eutrudedts. Na figura 5 é apresentada a paisagem dos solos do Sul do Uruguai, predominantes na área de estudo.



Figura 5- Caracterização do solo Uruguiaio: (a) Paisagem do litoral Sul e Oeste e (b) Perfil de solo característico da área de estudo.

3.1.1.2 Clima

O clima do Uruguai é bastante homogêneo ao longo de seu território, sendo definido como temperado-úmido, sem estação seca, conforme a classificação Koeppen (KOEPPEN, 1931). A temperatura média anual é de cerca de 16°C no sul e 19°C no norte do país. A temperatura média mensal varia entre 7°C, em julho, à 31°C, em janeiro.

A precipitação mensal é distribuída uniformemente ao longo do ano, com um ligeiro aumento no outono. Sua distribuição espacial apresenta gradiente decrescente na transição NE-SW, com um total máximo anual de 1400 mm, no Nordeste e um mínimo de 900 mm no sudoeste do país (CORSI, 1978). Na figura 6 é apresentada a distribuição das precipitações pluviais e da evapotranspiração do tanque classe A a partir do ano de 1972 para a estação de Las Brujas, no Sul do Uruguai.

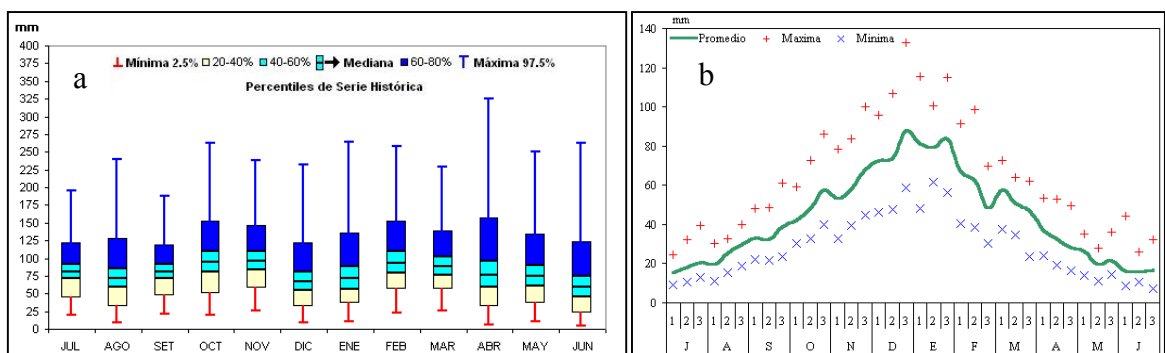


Figura 6 - Representação das séries históricas de dados de precipitação (a) e evapotranspiração do tanque classe A (b) a partir de 1972, para a estação Agroclimática do INIA em Las Brujas, Uuguay.

Fonte: INIA (2010).

3.2 Procedimento de coleta e determinação das características físico-hídricas do solo

No presente estudo foram utilizadas amostras de solos localizados nos departamentos de: Canelones, Montevideo, Colonia, Maldonado, Soriano e San Jose. A área de estudo está localizada no sul do território Uruguaio, nestas foram selecionados 39 produtores, nas quais as áreas foram georeferenciadas através da tomada dos dados de Latitude, Longitude e altitude do local de coleta. Para a coleta das amostras foram abertas trincheiras, sendo que o perfil coletado foi subdividido em três camadas, sendo estas: camada superficial, normalmente de 0-20 cm de profundidade, camada intermediária, normalmente de 20-40 cm, e camada inferior, normalmente de 40 -60 cm de profundidade. Coletaram amostras com estrutura preservada, com auxílio de um extrator, o qual foi acoplado em cilindro metálico de diâmetro de 6,3 cm e altura de 7,5 cm. Na figura 7 é apresentado o equipamento de coleta de solo (a) extrator e cilindro acoplados (b) cilindro separado do equipamento extrator.

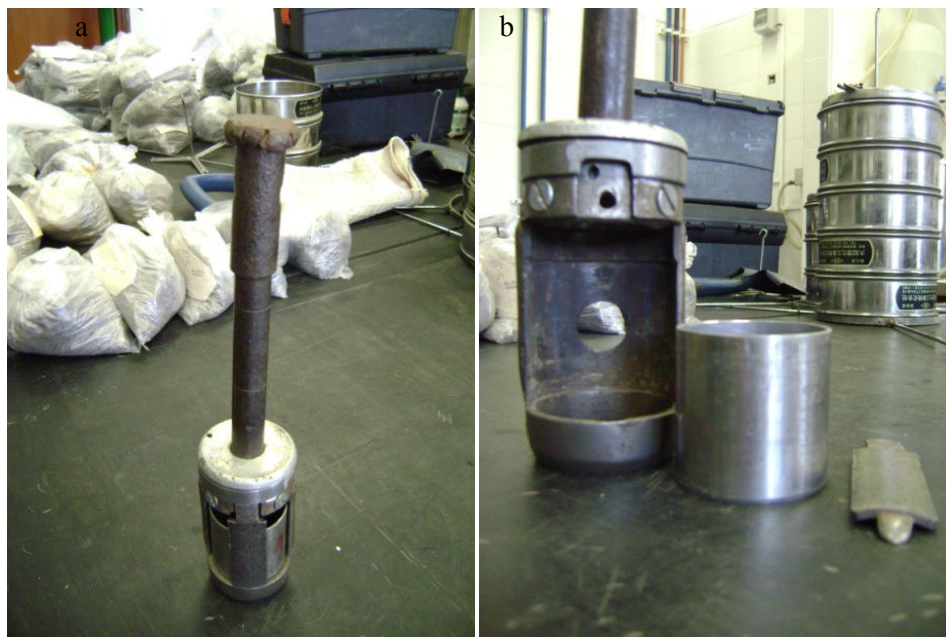


Figura 7 - Equipamento de coleta de solo: (a) extrator e cilindro acoplados e (b) cilindro separado do equipamento extrator.

As amostras indeformadas das diferentes camadas em estudo foram transportadas para o laboratório, saturadas durante 48 horas e depois pesadas. Posteriormente, as amostras seguiram para a mesa de tensão, onde foram submetidas à tensão de 3 kPa por 48 horas. Na figura 8 é apresentado o equipamento utilizado na determinação de tensões de até 3 kPa.

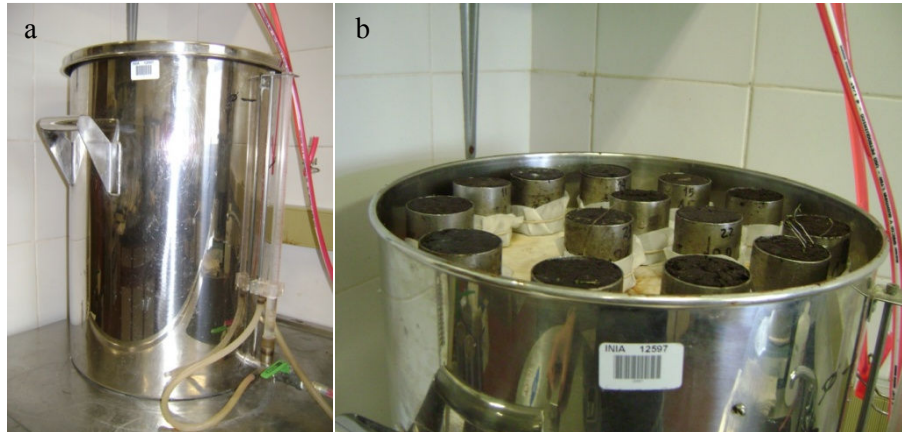


Figura 8 - Equipamento utilizado na determinação de tensões de até 3 kPa.

As amostras de solo, ainda com estrutura preservada, seguiram para o aparelho extrator de água idealizado por Richards (RICHARDS, 1949), onde permaneceram por um período de 96 horas na tensão de 30 kPa e outras 96 horas na tensão de 100 kPa, para a obtenção do conteúdo de água do solo nos potenciais de -30 e -100 kPa, respectivamente.

Estas amostras posteriormente foram conduzidas para equipamento de mesmo princípio para determinação dos teores de umidade relativos a potenciais de -500 kPa e -1500 kPa, ocorrendo em média de 5 e 10 dias, respectivamente. Na figura 9 é apresentado o equipamento utilizado para determinação do conteúdo de água do solo para a aplicação de tensões de 30 e 100 kPa.



Figura 9 - Equipamento utilizado para determinação do conteúdo de água do solo para a aplicação de tensões de 30 e 100 kPa.

As amostras com estrutura preservada foram utilizadas para as determinações da densidade do solo (D_s), porosidade total (P_t), conteúdo de água extraído do solo após a aplicação do potencial de -3 kPa (V_I) conteúdo de água remanescente no solo após a aplicação do potencial de -3 kPa (V_o).

Nas trincheiras foi executado o processo de coleta de solo com estrutura deformada, sendo coletados aproximadamente 1000 gramas de solos com estrutura deformada da porção mediana de cada camada do perfil. As determinações analíticas de textura (Pipeta) e densidade do solo (Anel volumétrico) foram realizadas conforme os métodos descritos no manual de análises de solos da Embrapa (EMBRAPA, 1997).

3.3 Composição do banco de dados

O banco de dados utilizado foi constituído de informações de textura e estrutura do solo, sendo estas: percentuais de argila, silte e areia, densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), conteúdo de água remanescente no solo a um potencial de -3 kPa (Vo) e conteúdo de água extraído do solo a um potencial de -3 kPa (VI), além das informações do conteúdo de água remanescente nos potenciais de 0, -3, -30, -100, -500 e -1500 kPa de amostras do solo.

Foram utilizadas 251 amostras de solo das três camadas superficial, intermediária e inferior, sendo estas a profundidades de 0-20 cm, de 20-40 cm e 40-60 cm, respectivamente. Das amostras, 87 pertencem a camada superficial, 80 a camada intermediária e 84 da camada inferior dos perfis do solo. O banco de dados total foi dividido aleatoriamente através da função de distribuição de divisão aleatória de dados do aplicativo de planilhas eletrônicas EXCEL, da Microsoft Informática, em dois conjuntos de dados: um conjunto foi utilizado para gerar as FPTs (60% do banco de dados total de cada camada), e o outro foi utilizado para validar os modelos gerados (40% do banco de dados total de cada camada).

A variabilidade dos dados de solo utilizados foi analisada plotando-se os percentuais de argila, silte e areia em um diagrama textural, sendo realizado o enquadramento dos dados em suas respectivas classes texturais. Este procedimento foi realizado para as camadas superficial, intermediária e inferior, tanto no banco de dados utilizados no desenvolvimento, quanto no banco de dados utilizados na validação das FPTs. Também foram verificados os extremos máximos e mínimos, juntamente com os valores médios e desvios padrão das variáveis utilizadas no desenvolvimento e validação das FPTs, para as três profundidades do perfil.

3.4 Comparação entre os dados utilizados no desenvolvimento e validação das FPTs

Para a comparação entre os dados utilizados no desenvolvimento (60% do banco de dados) e na validação (40% do banco de dados) foi utilizada a relação 1:1 e analisada a

dispersão dos pontos em relação à reta $Y=X$, este procedimento foi realizado para as três camadas do perfil.

3.5 Geração e obtenção das FPTs

Os dados utilizados no desenvolvimento das FPTs (60 % do total para cada camada) foram então organizados dentro do programa estatístico SAS, onde primeiramente realizou-se a análise de correlação simples entre todas as variáveis. Sendo posteriormente realizada a análise de regressão múltipla na ferramenta *Stepwise* do programa, para obtenção das FPTs (SAS, 1997). Um exemplo de regressão múltipla é $\theta_{\Psi_m} = \alpha \text{ areia} + \beta \text{ Si} + \lambda \text{ Arg} + \delta \text{ Ds}$, onde θ é conteúdo de água no potencial determinado Ψ_m , considerado a variável dependente; α , β , λ , δ , são os coeficientes de regressão e areia, Si, Arg e Ds são as variáveis independentes da equação (MICHELON, 2010).

Na definição das equações de regressão linear múltiplas, para prever os parâmetros do modelo, foi estabelecido que o comportamento de uma característica na equação deve afetar o parâmetro a ser predito (variável dependente) de forma coerente com o conhecimento empírico e teórico do processo (MICHELON, 2010). Foram então obtidas FPT para determinar o conteúdo de água para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa da curva de retenção de água no solo, totalizando 4 FPTs geradas para cada camada estudada (uma para cada ponto da curva).

As FPTs foram geradas por meio de variáveis independentes incluídas no modelo, em nível de 5% de probabilidade de erro. As variáveis independentes utilizadas neste estudo foram: densidade do solo (g/cm^3); argila (%); areia (%); silte (%); porosidade total; V_l ; V_o ; relação silte por argila; somatório dos percentuais de silte com areia (%); somatório dos percentuais de silte com argila (%).

3.6 Avaliação da acurácia das FPTs

A acurácia das FPTs foi analisada graficamente pela relação 1:1 dos dados estimados versus os observados e por meio dos indicadores estatísticos coeficiente de determinação (R^2), erro médio (ME) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) (MICHELON, 2010). O ME e o RMSE foram obtidos através das seguintes equações:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ei - mi)^2} \quad (2)$$

Em que:

n = número de observações;

ei = valor estimado pela FPT da variável de interesse;

mi = valor medido da variável de interesse.

O ME é um indicador da exatidão da estimativa, revelando a tendência da FPT de superestimar os valores (se positivo) ou de subestimar (se negativo). Quanto mais próximo de zero for o ME, maior será a acurácia do modelo. A RMSE quantifica a dispersão dos valores medidos e estimados em torno da linha 1:1. Quando o valor de RMSE é igual a zero, indica que houve ajuste perfeito entre os dados estimados e observados. Dentro do banco de dados utilizados para validação, determinou-se a os extremos inferiores e superiores dos valores para cada atributo nas diferentes camadas estudadas, obtendo assim a faixa de valores dentro do qual cada termo independente (atributo) deve se enquadrar.

Após o desenvolvimento das FPTs correspondentes a cada potencial e camada em estudo, realizou-se a substituição na FPTs dos valores dos termos independentes significativos, gerando valores estimados de conteúdo de água remanescente no solo a cada potencial. Calculou-se então o indicador estatístico ME entre os valores observados e estimados para cada potencial, sendo posteriormente multiplicados pela profundidade da camada (200 mm) e assim determinando-se o ME em lâmina para cada potencial estudado (-30, -100, -500 e -1500 kPa).

Determinou-se então a lâmina média (mm) correspondente a cada potencial, computando-se os valores em (mm) correspondentes aos percentuais de 1, 3, 7 e 10 % desta lâmina. Comparando-se o erro médio em mm correspondente a cada potencial com o valor em mm correspondente ao percentual de lâmina observado, determinou-se em qual percentual de lâmina o erro esta enquadrado.

A avaliação da acurácia de uma função de pedotransferência é obtida através da investigação e análise das respostas dos indicadores estatísticos ME e RMSE resultantes da faixa de dados para as quais estas foram validadas, levando-se em consideração os atributos significativos em nível de 5% de probabilidade dentro de cada potencial da FPT desenvolvida. A acurácia de uma FPT é variável em função da homogeneidade do banco de dados. Segundo

Minasny et al. (2003), quanto mais homogêneo for o banco de dados, maior será a precisão da FPT.

3.7 Avaliação da acurácia das FPTs para estimativa da curva de retenção de água no solo

Para avaliar a acurácia das FPTs, na estimativa não somente de pontos específicos da curva, mas também na sua totalidade foi selecionada a faixa de -30 a -1500 kPa, sendo esta composta pelo conjunto de dados dos potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa presentes no banco, formando assim o conjunto de dados observados desta faixa. Esses dados foram relacionados com o conjunto de dados estimados pelas FPTs geradas para os potenciais -30, -100, -500 e -1500 kPa.

Os cálculos foram realizados em função do armazenamento de água na faixa de -30 a -1500 kPa, e a eficiência das FPTs foi calculada por meio dos indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE. A lâmina média de água armazenada na faixa foi obtida multiplicando-se a média do conteúdo de água encontrado na faixa de -30 a -1500 kPa pela profundidade da camada (200 mm). Sendo então determinados os percentuais de 1, 3, 7 e 10 % desta lâmina e comparados estes valores com os valores do ME (mm) (erro médio multiplicado pela profundidade da camada).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variabilidade dos atributos do banco de dados

4.1.1 Dados de solo utilizados para o desenvolvimento das FPTs.

Nas 151 amostras utilizadas para o desenvolvimento das FPTs, percebe-se que a grande maioria destas apresentam teores de silte compreendidos entre 40 e 60% (Figura 10). Isso deve-se ao fato de que grande parte da área de estudo está compreendida em território que predomina a presença de Argisoles que pertencem ao grande grupo dos solos saturados lixiviados. Nota-se também que o banco de dados apresentou distribuição homogênea ao longo do perfil estudado, com leve acréscimo de argila com o incremento de profundidade e conseqüente redução dos teores de silte e areia (Figura 10).

Os dados de D_s apresentaram um incremento nos valores em profundidade, sendo esta elevação mais significativa da camada superficial para a intermediária. Na tabela 3 são apresentados os valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis (A_g , s_i , A_t , D_s , P_t , S_i/Arg , V_l , V_o , S_i+A_t , S_i+Arg e conteúdo de água armazenado nos potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa) utilizadas para o desenvolvimento das funções de pedotransferência das camadas do solo estudadas.

Analisando-se o conteúdo de água armazenado para os potenciais estudados, observou-se que a camada superficial apresenta maior umidade volumétrica média, indicando que é nesta onde se encontra maior conteúdo de água disponível as culturas. É possível apontar que a redução do conteúdo de água médio do solo, de acordo com o aumento do potencial foi relativamente reduzido, onde a redução nos potenciais de -30 a -1500 kPa para as camadas superficial, intermediária e inferior foram de respectivamente $0,081 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, $0,062 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e $0,052 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, indicando que o solo apresenta pequena variação de umidade a medida que este é sujeito ao acréscimo de potencial, o que pode vir a afetar a absorção de água pelas plantas (Tabela 3). Também é possível observar que através do incremento da profundidade ocorre uma redução da P_t de 0,461 para $0,445 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Quando analisado o V_l observa-se que na camada superior o V_l apresentou-se maior que nas demais profundidades.

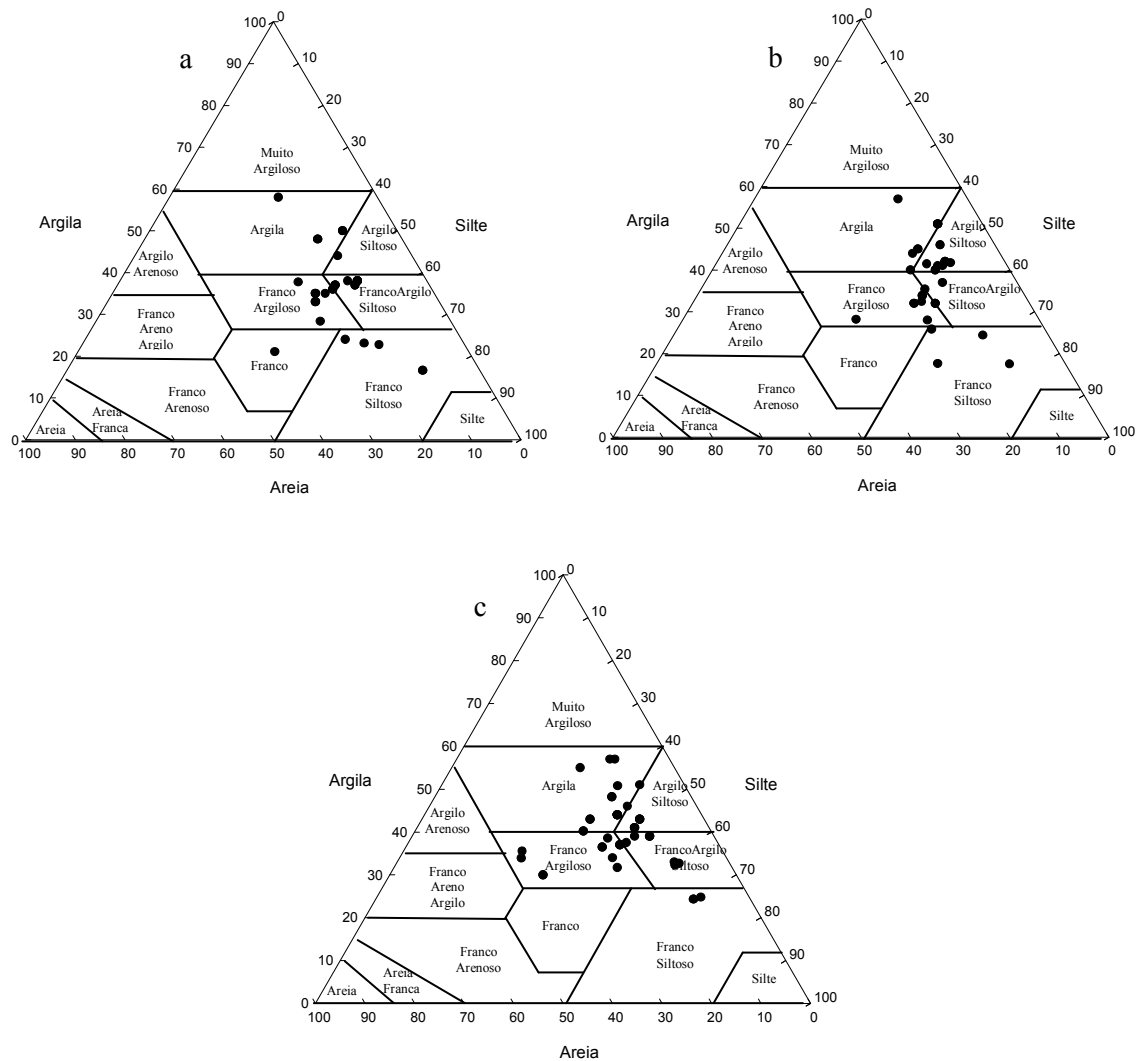


Figura 10 - Variabilidade textural dos solos do Sul do Uruguai utilizado para o desenvolvimento das funções de pedotransferência nas camadas: (a) camada superficial (b) camada intermediária (c) camada inferior.

Tabela 3 - Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para o desenvolvimento das funções de pedotransferência das camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do sul do Uruguai.

Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	Desvp
Camada superficial				
Arg	58,000	16,569	35,056	7,873
Si	71,913	22,000	45,576	7,783
At	41,000	10,000	20,735	6,865
Ds	1,399	0,895	1,144	0,114
Pt	0,764	0,254	0,449	0,083
Si/Arg	4,340	0,379	1,429	0,697
Vl	0,224	0,001	0,046	0,053
Vo	0,618	0,253	0,403	0,066
Si+At	86,000	42,000	66,311	9,350

continua...

Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	Desvp
Camada superficial				
Si+Arg	89,000	60,828	80,632	5,579
θ_{30}	0,517	0,172	0,351	0,070
θ_{100}	0,478	0,120	0,320	0,075
θ_{500}	0,417	0,103	0,290	0,075
θ_{1500}	0,385	0,080	0,270	0,075
Camada intermediária				
Arg	57,000	17,492	37,250	8,443
Si	71,242	29,000	44,531	6,808
At	36,882	9,000	18,036	5,757
Ds	2,040	1,009	1,320	0,200
Pt	0,672	0,326	0,445	0,069
Si/Arg	4,073	0,509	1,313	0,622
Vl	0,067	0,000	0,015	0,017
Vo	0,662	0,293	0,431	0,067
Si+At	82,508	43,000	62,566	8,242
Si+Arg	91,000	63,118	81,781	5,859
θ_{30}	0,556	0,266	0,393	0,063
θ_{100}	0,531	0,237	0,377	0,066
θ_{500}	0,525	0,176	0,351	0,073
θ_{1500}	0,500	0,131	0,331	0,073
Camada inferior				
Arg	57,000	24,326	40,794	8,055
Si	65,451	23,998	41,380	9,023
At	41,469	6,000	17,730	8,149
Ds	1,951	0,860	1,331	0,204
Pt	0,703	0,258	0,461	0,085
Si/Arg	2,640	0,473	1,087	0,475
Vl	0,081	0,000	0,018	0,019
Vo	0,675	0,249	0,443	0,086
Si+At	75,674	43,000	59,110	8,155
Si+Arg	93,000	58,531	82,173	8,071
θ_{30}	0,649	0,233	0,408	0,078
θ_{100}	0,639	0,227	0,395	0,077
θ_{500}	0,544	0,207	0,371	0,071
θ_{1500}	0,550	0,188	0,356	0,072

Onde: Ds - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vo- Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa(%);Vo - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa(%); At - Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total.

4.1.2 Dados de solo utilizados para a validação das FPTs

Para a validação das FPTs foram utilizadas 95 amostras de solo, onde observa-se que a maioria destas apresentam percentuais de silte entre 40 a 60%, pertencendo principais as classes de solo argilo-siltoso, franco-argilo-siltoso e franco-argiloso. Na Figura 11 é apresentada a variabilidade textural dos solos do Sul do Uruguai do banco de dados utilizado para a validação das FPTs.

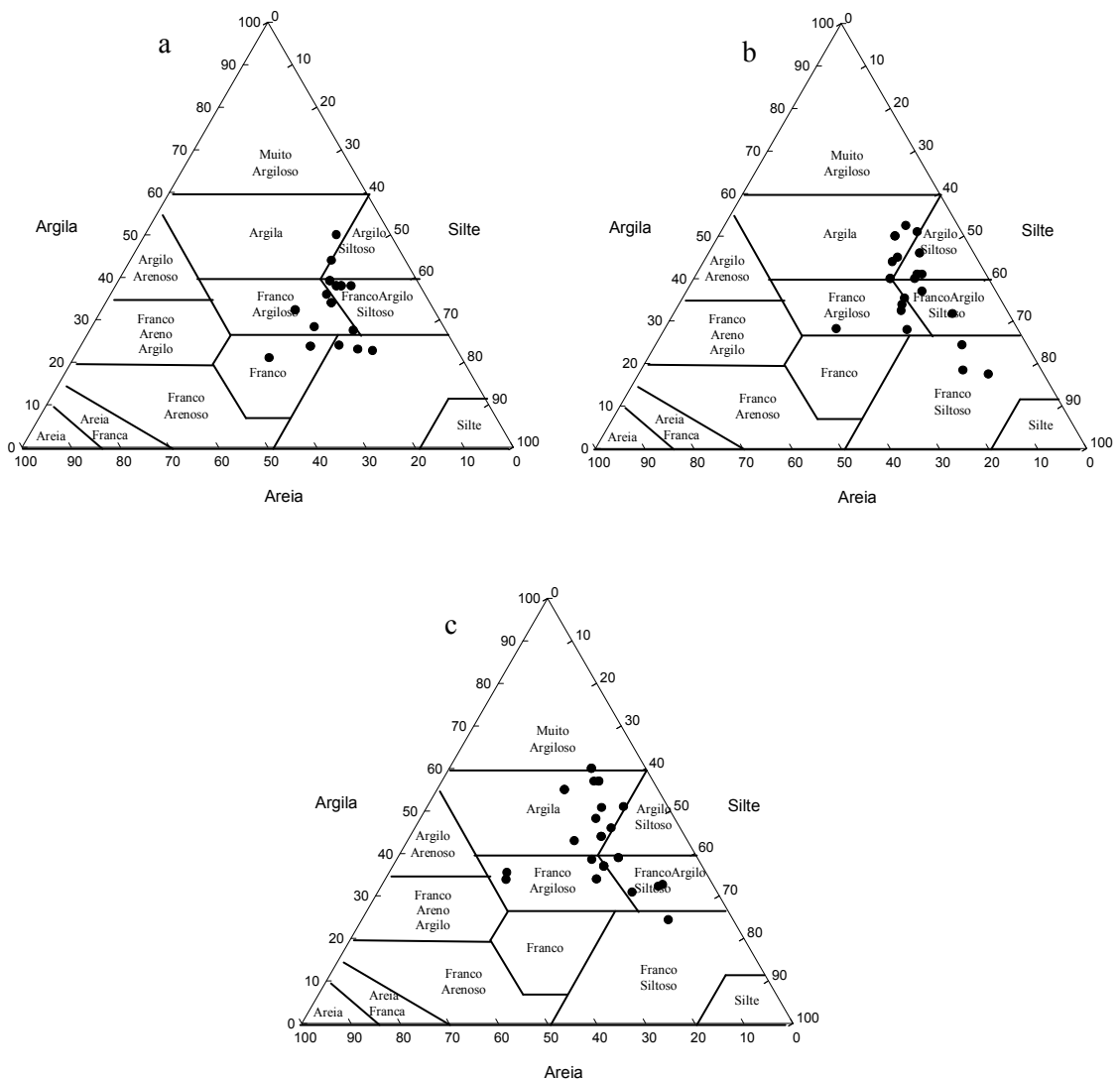


Figura 11 - Variabilidade textural dos solos do sul do Uruguai disponível no banco de dados utilizado para a validação das funções de pedotransferência em suas camadas: (a) camada superficial (b) camada intermediária (c) camada inferior.

Analisando as características texturais das amostras de solo utilizadas na validação das FPTs, observa-se valores médios do percentual de argila de aproximadamente 33, 37 e 43 %, para as camadas superficial, intermediária e inferior, respectivamente.

respectivamente, para as camadas superficial, intermediária e inferior, apontando a elevação de seus percentuais com o incremento da profundidade do perfil. Observa-se que a Ds média foi mais acentuada na camada intermediária, com valor de $1,326 \text{ g.cm}^{-3}$. Os conteúdos de água armazenados entre os potenciais de -30 a -1500 kPa foram de $0,063 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, $0,058 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,045 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, para as camadas superficial, intermediária e superior, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das variáveis utilizadas para a validação das funções de pedotransferência das camadas superficial, intermediária e inferior dos solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	Desvp
Camada superficial				
Arg	50,000	21,064	33,243	7,021
Si	60,010	39,000	46,236	5,028
At	41,000	11,000	21,758	6,992
Ds	1,677	0,868	1,158	0,150
Pt	0,714	0,330	0,469	0,082
Si/Arg	2,640	0,780	1,474	0,447
Vl	0,163	0,001	0,041	0,045
Vo	0,642	0,306	0,428	0,066
Si+At	86,000	50,000	67,995	8,155
Si+Arg	89,000	60,828	79,479	6,231
θ_{30}	0,509	0,186	0,372	0,069
θ_{100}	0,458	0,140	0,349	0,076
θ_{500}	0,429	0,126	0,325	0,073
θ_{1500}	0,406	0,110	0,309	0,073
Camada intermediária				
Arg	52,495	17,492	37,788	8,903
Si	71,242	34,946	44,921	8,722
At	36,882	9,000	17,130	5,660
Ds	1,815	0,885	1,326	0,170
Pt	0,684	0,302	0,446	0,086
Si/Arg	4,073	0,704	1,343	0,776
Vl	0,061	0,000	0,012	0,014
Vo	0,680	0,296	0,434	0,083
Si+At	82,508	47,505	62,051	8,787
Si+Arg	91,000	63,118	82,709	5,715
θ_{30}	0,599	0,270	0,396	0,065
θ_{100}	0,568	0,260	0,378	0,063
θ_{500}	0,525	0,222	0,355	0,067
θ_{1500}	0,510	0,140	0,338	0,072

continua...

Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	Desvp
Camada inferior				
Arg	60,000	24,388	43,789	9,777
Si	62,428	23,998	39,176	9,342
At	41,469	6,000	16,910	7,797
Ds	1,897	0,946	1,298	0,185
Pt	0,705	0,364	0,447	0,065
Si/Arg	2,560	0,473	0,978	0,459
Vl	0,122	0,000	0,016	0,026
Vo	0,695	0,324	0,431	0,062
Si+At	75,612	40,000	56,086	9,825
Si+Arg	93,000	58,531	82,965	7,705
θ_{30}	0,587	0,287	0,402	0,052
θ_{100}	0,545	0,273	0,391	0,051
θ_{500}	0,504	0,224	0,371	0,054
θ_{1500}	0,480	0,219	0,357	0,054

Onde: Ds - Densidade do solo (g/cm^3); Pt - Porosidade Total (%); Vo - Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa(%); Vo - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa(%); At - Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total.

4.1.3 Comparação entre os dados utilizados para desenvolvimento e validação das FPTs.

Na figura 12 é apresentada a relação entre os dados utilizados para o desenvolvimento versus utilizados para validação das FPTs para a camada superficial.

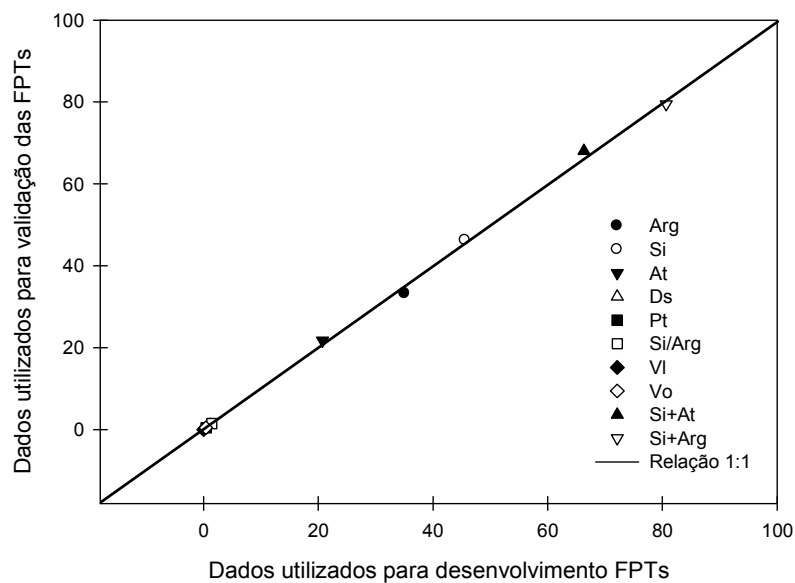


Figura 12 - Relação 1:1 entre os dados utilizados para o desenvolvimento versus dados utilizados para validação das FPTs, para a camada superficial.

Nota-se que existe elevada similaridade entre os dados utilizados para o desenvolvimento e validação das FPTs, onde somente os parâmetros Agr e Si+Arg tiveram seus valores médios inferiores no banco de dados utilizados para desenvolvimento em relação aos dados médios do banco de dados utilizados para validação.

Na figura 13 é apresentada a relação entre os dados utilizados para o desenvolvimento versus utilizados para validação das FPTs para a camada intermediária. Na camada intermediária, foi observada elevada similaridade entre os bancos de dados utilizados no desenvolvimento e na validação das FPTs, sendo que somente o parâmetro At apresentou valor médio inferior no banco de dados utilizado para desenvolvimento em relação ao de validação.

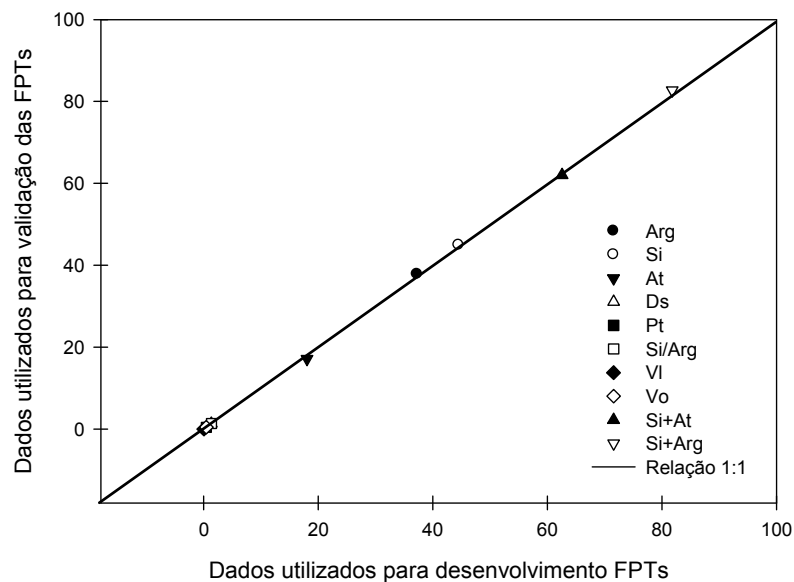


Figura 13 - Relação 1:1 entre os dados utilizados para o desenvolvimento versus dados utilizados para validação das FPTs, para a camada intermediária.

Na figura 14 é apresentada a relação entre os dados utilizados para o desenvolvimento versus os dados utilizados para validação das FPTs para a camada inferior. Nota-se que a relação de similaridade (proximidade dos dados da reta 1:1) entre os dados continua elevada, porem, nesta camada observa-se que os parâmetros At, Si e Si+Arg tem seus valores médios no banco de dados utilizados para o desenvolvimento das FPTs subestimados em relação aos dados médios do banco de dados utilizados na validação. Entretanto, pode-se afirmar que a relação entre os bancos é satisfatória, sendo o coeficiente de determinação $R^2=1$, indicando que dados utilizados no desenvolvimento e na validação não diferem estatisticamente.

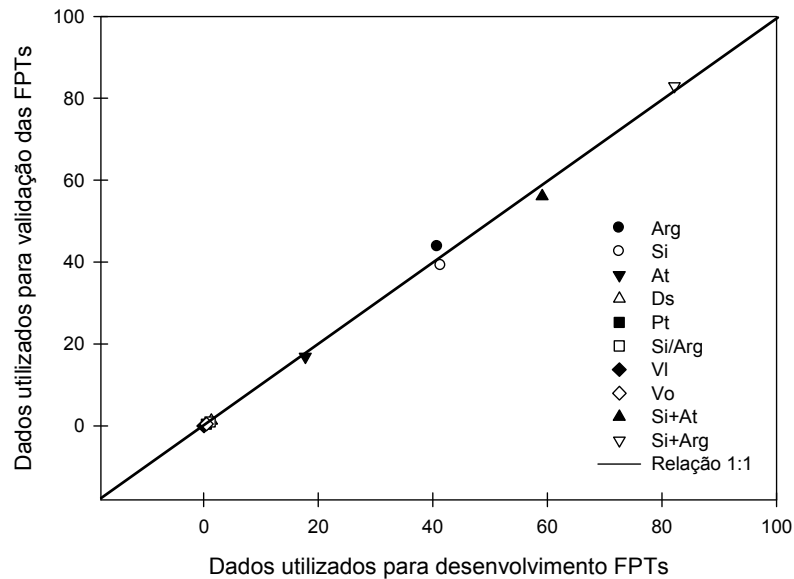


Figura 14 - Relação 1:1 entre os dados utilizados para o desenvolvimento versus dados utilizados para validação das FPTs, para a camada inferior.

As funções de pedotransferência tendem a ser tão mais acuradas quanto mais homogêneos forem os solos que compõem a base de dados e quão mais próximos destes estiverem os que terão seus dados estimados (OLIVEIRA et al, 2002).

4.2 Correlação entre as variáveis independentes e a retenção de água no solo

O coeficiente de correlação de Pearson mostra o grau de relação existente entre as características do solo, de forma isolada, e a umidade retida a determinado potencial. Pode-se interpretá-lo como um indicador que descreve a interdependência entre as variáveis. Quanto maior o coeficiente de correlação, maior é a influência de determinado atributo do solo na retenção de água (MICHELON, 2010).

Salter & Williams (1965), Salter et al. (1966), Petersen et al. (1968), Ahuja et al. (1985), Saxton et al. (1986), Arruda et al (1987), Meng et al. (1987), Rawls et al. (1991), Kern (1995), Berg et al. (1997), dentre outros apontam a utilização de princípios galtonianos para elaborar equações com vistas em estimar os parâmetros relacionados as propriedades físico-hídricas dos solos.

Segundo Brady & Weil (2008), a areia possui reduzida capacidade de retenção de água causada pelo grande espaço entre as partículas e o rápido escoamento de água de percolação.

Solos que predominam essa granulometria são mais propensos a serem deficientes em umidade em períodos de estiagem.

Na tabela 5 são apresentados os coeficientes de correlação entre as variáveis independentes e a umidade correspondente a cada potencial de água no solo, para as camadas superficial, intermediária e inferior. Nota-se que para a camada superficial, o fator que mais apresenta influência na retenção de água no solo à potenciais de -30 kPa a -100 kPa é o V_o , que apresenta coeficiente de correlação mais próximo a 1 em relação aos demais, sendo que sua influência decresce a medida que são analisados os potenciais mais elevados.

Quando observado o parâmetro V_I , percebe-se que existe correlação negativa, que torna-se mais acentuada a medida que eleva-se o potencial, indicando que o conteúdo de água tende a diminuir. Quando observamos os valores do coeficiente de correlação para o atributo A_t nota-se que este se mantém próximo a 0, indicando que a umidade de solo não depende linearmente deste atributo. Para a camada intermediária, nota-se que o V_o continua a ser o atributo com mais elevado coeficiente de correlação, seguido pela P_t e D_s . Estudando a camada inferior, nota-se que o atributo com mais elevado coeficiente de correlação também é o V_o , seguido pela P_t , D_s , V_I e A_t . Sendo possível afirmar que para as três camadas estudadas, os atributos argila e silte sempre se mantiveram próximos de 0, indicando que a umidade não depende linearmente de tais atributos.

Tabela 5 - Coeficiente de correlação (r) entre as variáveis independentes e a umidade correspondente a cada potencial de água no solo, para as camadas superficial, intermediária e inferior.

Variáveis	Potencial, kPa			
	-30	-100	-500	-1500
Camada superficial				
Arg	0,23	0,12	0,11	0,10
Si	-0,26	-0,17	-0,12	-0,09
A_t	0,00	-0,02	-0,05	-0,05
D_s	-0,22	-0,11	-0,13	-0,12
P_t	0,43	0,29	0,21	0,13
Si/Arg	-0,17	-0,06	0,00	0,04
V_I	-0,35	-0,43	-0,45	-0,51
V_o	0,83	0,72	0,63	0,58
Si+ A_t	-0,22	-0,15	-0,14	-0,11
Si+Arg	-0,04	-0,06	-0,01	0,02

continua...

Variáveis	Potencial, kPa			
	-30	-100	-500	-1500
Camada intermediária				
Arg	-0,11	-0,12	-0,07	-0,02
Si	-0,04	0,01	0,03	-0,11
At	0,21	0,17	0,07	0,14
Ds	0,29	0,27	0,33	0,34
Pt	0,87	0,80	0,78	0,74
Si/Arg	-0,03	0,00	-0,01	-0,10
Vl	0,04	0,05	0,07	0,02
Vo	0,90	0,82	0,79	0,76
Si+At	0,12	0,13	0,07	0,01
Si+Arg	-0,21	-0,17	-0,07	-0,15
Camada inferior				
Arg	0,04	0,01	-0,04	-0,06
Si	-0,16	-0,15	-0,16	-0,13
At	0,15	0,17	0,23	0,22
Ds	0,29	0,28	0,33	0,31
Pt	0,93	0,89	0,84	0,84
Si/Arg	-0,14	-0,11	-0,08	-0,05
Vl	-0,17	-0,19	-0,27	-0,25
Vo	0,96	0,93	0,89	0,89
Si+At	-0,03	0,00	0,05	0,07
Si+Arg	-0,14	-0,16	-0,22	-0,21

Onde: Ds - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vo- Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa(%);Vo - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa(%); At - Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg – Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total.

Avaliando a tabela 5 foi possível observar que o Vo foi o atributo que apresentou maior coeficiente positivo de correlação indicando que este atributo provavelmente irá contribuir nas FPTs a serem desenvolvidas. Assim, além dos atributos texturais os atributos estruturais também apresentam importância no desenvolvimento das FPTs.

Michelon (2010), afirma que, ao se utilizar banco de dados com amostras com estrutura preservada, a modelagem da estimativa da retenção de água no solo deve considerar, além da textura, os atributos estruturais do solo.

4.3 Funções de Pedotransferência

4.3.1 Camada Superficial

4.3.1.1 Potencial matricial de -30 kPa

Na tabela 6 são apresentados os coeficientes para os atributos significativos em nível de 5% de probabilidade. Nota-se que os atributos significativos para o potencial de -30 kPa, na camada superficial foram o V1 e Vo e o percentual de Si+At, que apresentaram coeficientes angulares respectivamente de -0,50; 0,91 e 0,0013 e o coeficiente linear, ponto de intersecção entre função e o eixo das ordenadas, corresponde a -0,0669. Assim, a função de Pedotransferência desenvolvida para a estimativa da umidade volumétrica do solo correspondente ao potencial de -30 kPa, na camada superficial dos solos do Sul do Uruguai pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-30} = -0,5061 V1 + 0,9157 Vo + 0,0013 (Si+At) - 0,0669 \quad (3)$$

Tabela 6- Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -30 kPa na camada superficial de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
Pt	ns	---
V1	-0,5061	0,1061
Vo	0,9157	0,6831
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	0,0013	0,0167
Intersecção	-0,0669	---
R ²		0,8059

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); V1- Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At- Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

Realizar a verificação da adequação da equação de pedotransferência ao banco de dados a ser utilizado na sua validação é fundamental para analisar sua qualidade preditiva. Assim, quando esta é abastecida pelos termos independentes da função de pedotransferência com seus valores dentro da série de dados de validação, ocorre a geração de uma nova série de dados de umidade (dados estimados). Após, quando é realizada a comparação entre dados estimados e observados, relação 1:1, é possível diagnosticar a capacidade preditiva da FPT através de seus indicadores estatísticos (R², ME e RMSE).

Na figura 15 é apresentada a comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -30 kPa, para a camada superficial, de solos do Sul do Uruguai.

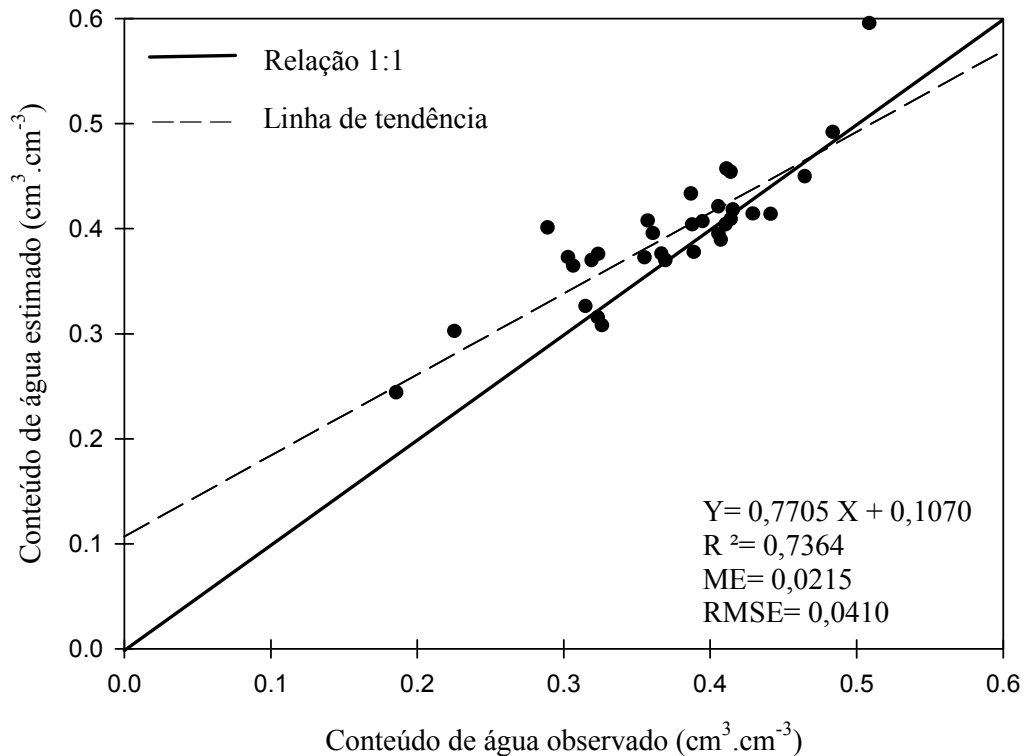


Figura15 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -30 kPa, para a camada superficial, de solos do Sul do Uruguai.

Observa-se na figura 15 que o indicador estatístico ME calculado para avaliar a $FPT_{-30\text{kPa}} (\text{superf.})$ indica que ocorreu leve subestimativa do conteúdo de água no solo calculado pela FPT ($ME=0,0215$). Comparando a linha de tendência e a linha indicativa da relação 1:1 observa-se que até valores de $0,466 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ a FPT tende a superestimar os valores de conteúdo de água e a partir deste tende a subestimar. O coeficiente de determinação encontrado foi de 0,7364, indicando que 73,64% da variância da variável resposta é explicada pela variância das variáveis explicativas. Assim pode-se afirmar que a $FPT_{-30\text{kPa}} (\text{superf.})$ apresentou estimativa satisfatória do conteúdo de água remanescente no solo após a aplicação do potencial de -30 kPa.

4.3.1.2 Potencial matricial de -100 kPa

Na tabela 7 são apresentados os valores dos coeficientes dos atributos que foram significativos em nível de probabilidade de 5% para o potencial de -100 kPa. Dentre os

atributos significativos foi possível observar que o atributo Vo foi o que mais contribuiu na função determinada, visto que este apresentou um coeficiente de determinação parcial de 0,5219.

Tabela 7- Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -100 kPa na camada superficial de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
PT	ns	---
Vl	-0,7113	0,1710
Vo	0,8758	0,5219
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	0,0018	0,0438
Intersecção	-0,1256	---
R ²		0,7367

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vl - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At- Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

Além dos atributos estruturais (Vl e Vo) foi obtido para esta FPT o atributo textural Si+At como significativo, o qual na função gerada possui coeficiente de determinação parcial de 0,0438, o menor coeficiente entre os três significativos. De acordo com os dados da tabela 7 a FPT desenvolvida para a estimativa de retenção de água no solo no potencial de -100 kPa para a camada superficial pode ser expressa como:

$$\theta_{-100} = 0,0018 (Si+At) - 0,7113 Vl + 0,8758 Vo - 0,1256 \quad (4)$$

Na figura 16 é apresentada a comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100 kPa, para a camada de 0-20 cm, de solos do Sul do Uruguai. Após análise e interpretação da figura 16 é possível afirmar que o erro médio (ME=-0,005) por apresentar-se negativo indica que houve leve subestimativa do conteúdo de água no solo calculado pela FPT_{-100kPa (superf.)}. Também é observado para esta FPT que a linha de tendência dos dados apresentou um coeficiente de determinação de 0,5951, juntamente com um coeficiente linear de 0,1294.

A intersecção da reta 1:1 com a linha de tendência, indica que valores de conteúdo de água inferiores a $0,347 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ são superestimados pela função desenvolvida, enquanto que valores superiores a esta referência são subestimados.

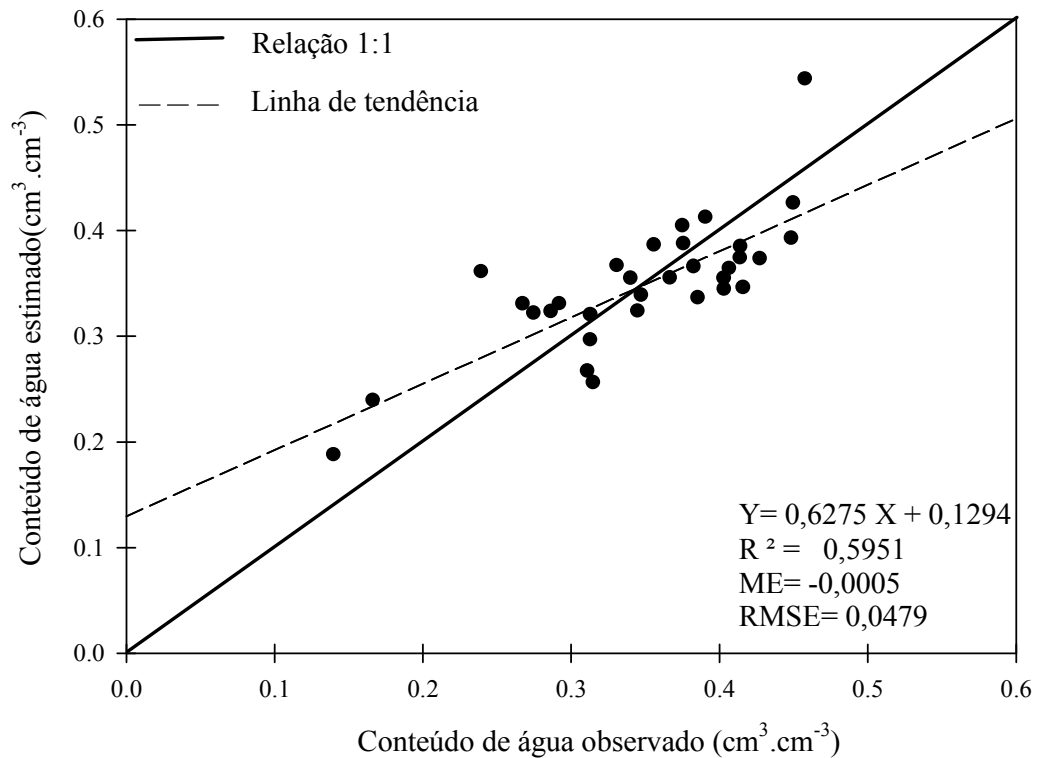


Figura 16 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100 kPa, para a camada superficial, de solos do Sul do Uruguai.

O erro médio (ME=-0,0005) indica que houve leve subestimativa do conteúdo de água do solo calculada pela FPT. Também foi possível observar que ocorreu certa dispersão dos pontos em torno da reta 1:1 (RMSE=0,0479).

4.3.1.3 Potencial matricial de -500 kPa

Na tabela 8 são apresentados os atributos texturais e estruturais testando para o desenvolvimento da FPT. Sendo que destes os significativos apresentam seus valores e seus respectivos coeficientes angulares. Dentre os atributos que foram significativos em nível de probabilidade de 5% no desenvolvimento da FPT que estima o conteúdo de água para o potencial de -500 kPa para a camada superficial estão o VI, Vo e Si/Arg, podendo ser indicado que o atributo estrutural VI apresenta-se como o mais significativo, com coeficiente de determinação maior que os demais (0,4010). A função desenvolvida para a estimativa do potencial de -500 kPa apresentou coeficiente linear de -0,0315.

Tabela 8 - Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -500 kPa na camada superficial de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
PT	ns	---
Vl	-0,6447	0,1903
Vo	0,7830	0,4010
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	0,0255	0,0519
Si+Arg	ns	---
Si+At	ns	---
Intersecção	-0,0315	---
R ²		0,6432

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vl- Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At- Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

De acordo com os dados apresentados na tabela 8 é possível expressar a função de pedotransferência que estima o conteúdo de água para o potencial de -500 kPa para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai podendo ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-500} = 0,0255 (Si/Arg) - 0,6447 Vl + 0,7830 Vo - 0,0315 \quad (5)$$

Na figura 17 é apresentada a comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500 kPa, para a camada superficial. Observa-se a tendência de subestimativa do conteúdo de água do solo através da $FPT_{-500(supenf)}$, visto que o erro médio obtido é negativo ($ME = -0,0104 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$), salienta-se também que ocorreu certa dispersão dos dados estimados pela FPT em torno da reta 1:1, visto o valor de RMSE ser de $0,522 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

O coeficiente de determinação (R²) que expressa a relação entre dados estimados e observados foi de 0,49, indicando que aproximadamente 49% dos valores de conteúdo de água estimados pela FPT podem ser explicados através dos valores de conteúdo de água observado em laboratório. Também pode ser observado que a intersecção da função de tendência (tracejada) com a reta de relação 1:1 ($y = x$) indica que valores de umidade estimados pela FPT inferiores a $0,3020 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ são superestimados, enquanto que valores acima deste apresentam uma certa subestimativa.

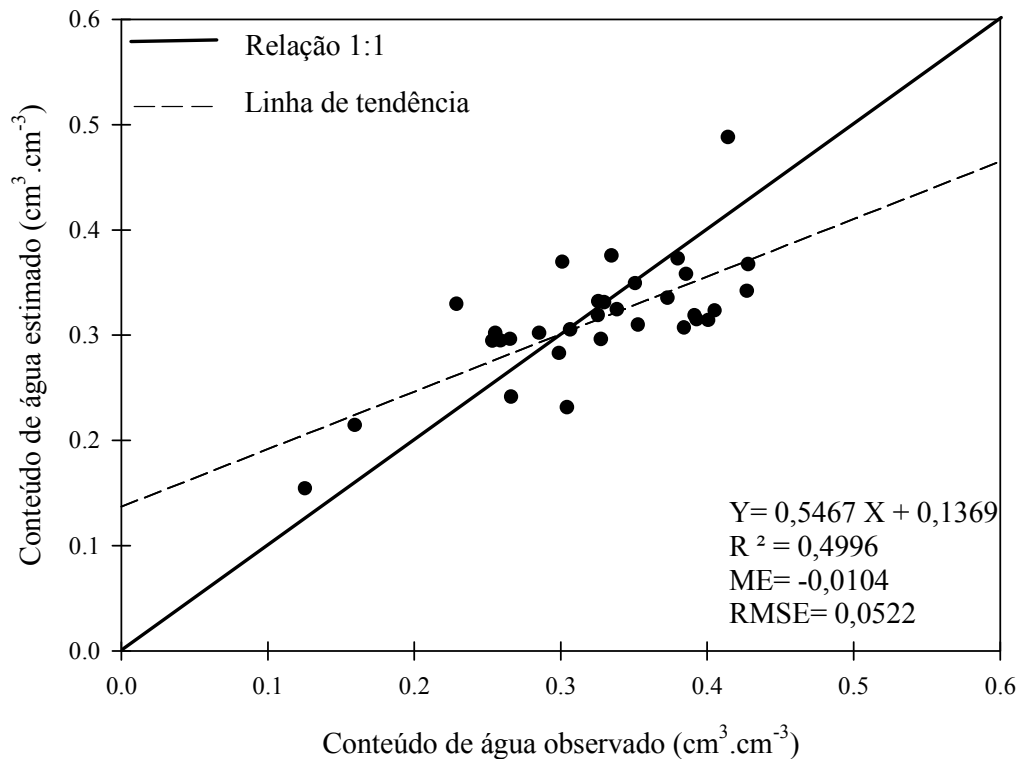


Figura17 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500k Pa, para a camada superficial, de solos do Sul do Uruguai.

4.3.1.4 Potencial matricial de -1500 kPa

Na tabela 9 é apresentada a FPT para a estimativa de retenção de água no potencial de -1500 kPa na camada superficial de solos do Sul do Uruguai.

Tabela 9 - Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -1500 kPa na camada superficial de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
PT	ns	---
Vl	-0,8642	0,2490
Vo	0,7317	0,3410
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	0,0023	0,0664
Intersecção	-0,1393	---
R ²		0,6564

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm^3); Pt - Porosidade Total (%); Vl - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); At - Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

Pode ser evidenciado na tabela 9 que a FPT estimada para a determinação do conteúdo de água retida no potencial de -1500 kPa é composta pelos atributos estruturais VI e Vo e o atributo textural Si+At, já que estes apresentaram-se significativos em nível de 5% de probabilidade. Entre os atributos aquele que possui maior contribuição no resultado final do valor de umidade é o Vo o qual apresenta coeficiente de determinação parcial (0,3410).

Diversos autores destacam a importância do diâmetro e da distribuição do tamanho de poros na retenção de água, especialmente em potenciais mais elevados, onde as forças capilares são mais atuantes (FABIAN & OTTONI FILHO, 2000; MAJOU et al., 2008). Assim, de acordo com os dados da tabela 9 a FPT_{-1500 (superf.)} para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -1500 kPa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-1500} = 0,00232 (Si+At) - 0,8642 VI + 0,7317 Vo - 0,1393 \quad (6)$$

A relação 1:1 dos dados observados (presentes no banco) e estimados pela FPT_{-1500 (superf.)}, juntamente com os indicadores estatísticos R², ME e RMSE, são apresentados na figura 18.

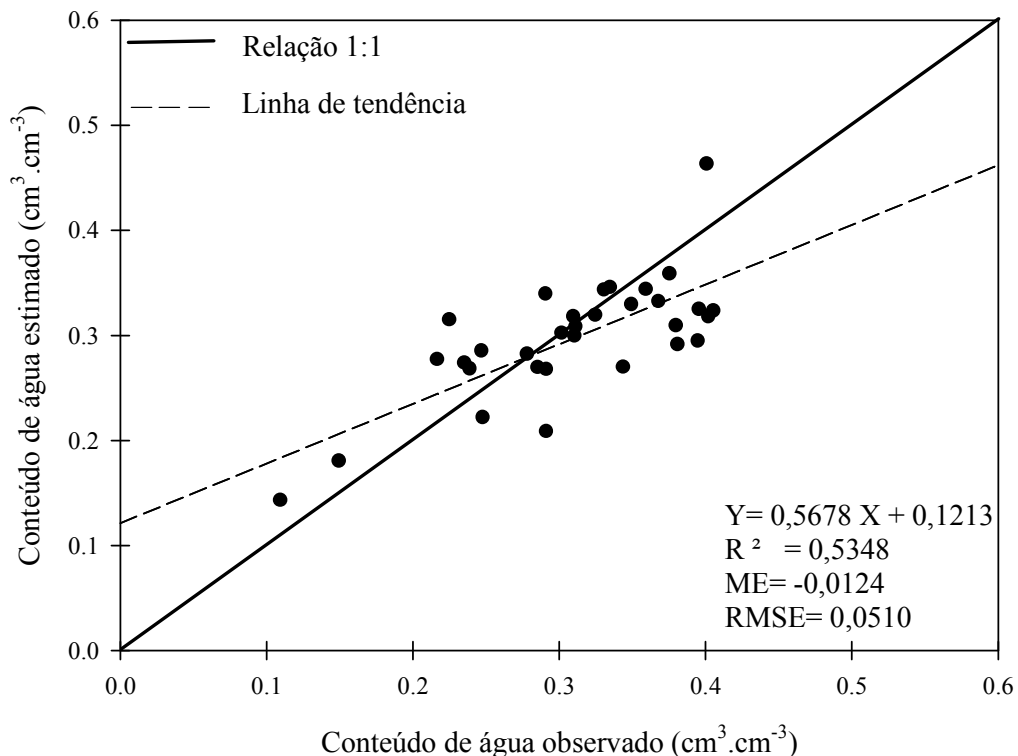


Figura 18 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -1500 kPa, para a camada superficial, de solos do Sul do Uruguai.

Na figura 18 é possível verificar que a FPT desenvolvida para o potencial de -1500 kPa por apresentar erro médio negativo ($ME = -0,0124 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) tende a subestimar os valores de conteúdo de água. Devido a valoração do indicador estatístico raiz quadrada do erro médio quadrado ($RMSE = 0,0510 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) e através da análise visual da figura é possível verificar que ocorreu certa dispersão dos dados em relação a reta 1:1. A FPT desenvolvida superestima valores de conteúdo de água do solo quando os mesmos são inferiores a $0,2804 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e subestima seus resultados quando estes forem superiores a este.

4.3.2 Camada intermediária

4.3.2.1 Estimativa da retenção de água no potencial matricial de -30 kPa

Na tabela 10 são apresentados os atributos que foram analisados na construção da FPT para estimativa do conteúdo de água no potencial de -30 kPa da camada intermediária, sendo que o atributo significativo em nível de 5% de probabilidade foi o V_o , apresentando um coeficiente de determinação de 0,8018 e um coeficiente linear de 0,0298. Sendo a FPT para o potencial de -30 kPa:

$$\theta_{-30} = 0,8432 V_o + 0,0298 \quad (7)$$

Tabela 10 - Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -30 kPa na camada de intermediária de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
Pt	ns	---
Vl	ns	---
Vo	0,8432	0,8018
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	ns	---
Intersecção	0,0298	---
R ²		0,8018

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vl - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At- Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg – Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

Na Figura 19 é apresentada a relação 1:1 dos dados observados e estimados pela FPT-_{30 (inter.)}, juntamente com os indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE. Através da análise dos indicadores estatísticos calculados pode-se observar que ocorreu uma dispersão dos dados consideravelmente pequena em torno da reta 1:1 (RMSE= 0,0268 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), e que a equação estimada para o cálculo do conteúdo de água do solo no potencial de -30 kPa tende a uma leve subestimativa dos valores de conteúdo de água estimados pela FPT (ME= -0,0001 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). Observando-se a linha de tendência e a reta 1:1 nota-se que estas mantêm-se bastante próximas, indicando uma boa relação entre os dados estimados pela FPT com os dados observados em laboratório, o coeficiente de determinação $R^2=0,9024$ indica que a FPT desenvolvida apresentou eficiência satisfatória.

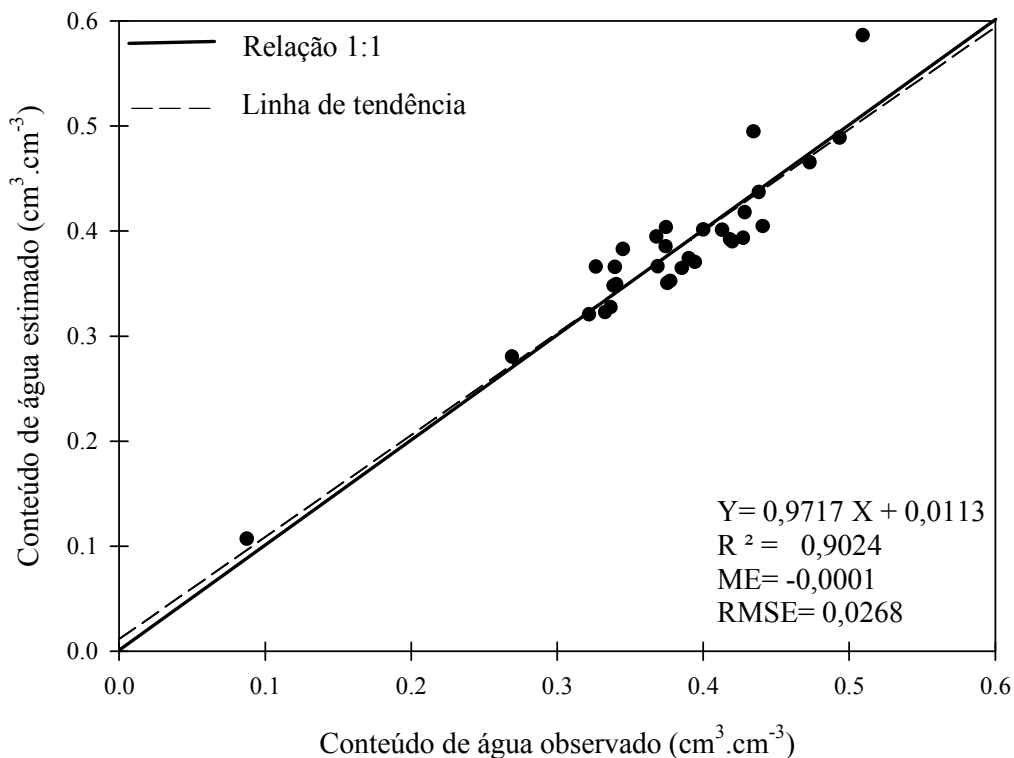


Figura 19 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -30 kPa, para a camada intermediária, de solos do Sul do Uruguai.

4.3.2.2 Estimativa da retenção de água no potencial matricial de -100 kPa

Na tabela 11 são apresentados os atributos significativos e seus respectivos coeficientes angulares no desenvolvimento da FPT que estima o conteúdo de água para o potencial de -100 kPa, na camada intermediária.

Tabela 11 - Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -100 kPa na camada intermediária de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
PT	ns	---
Vl	ns	---
Vo	0,7990	0,6690
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	ns	---
Intersecção	0,0332	---
R ²		0,6690

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vl - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At- Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

Dentre os atributos analisados estatisticamente em nível de 5% de probabilidade, na determinação da FPT para o potencial de -100 kPa, foi observado que o Vo foi o único atributo significativo, apresentando coeficiente de determinação parcial de 0,6690 juntamente com coeficientes angular de 0,7990 e linear de 0,0332. Portanto a FPT desenvolvida para estimar o conteúdo de água para o potencial de -100 kPa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-100} = 0,7990 V_o + 0,0332 \quad (8)$$

A relação 1:1 entre os dados observados e estimados pela FPT_{-100 (inter.)}, juntamente com os indicadores estatísticos R², ME e RMSE, são apresentados na figura 20. É possível observar uma tendência de superestimativa dos dados estimados pela FPT_{-100 (inter.)} (ME= 0,0016 cm³.cm⁻³) e a ocorrência de certa dispersão dos dados em relação à relação 1:1 (RMSE= 0,0365 cm³.cm⁻³).

O coeficiente de determinação R²=0,8062, indica boa relação entre os dados observados e estimados pela Pedofunção desenvolvida. Através da intersecção da linha de tendência e a reta 1:1 foi observado que a FPT superestima o conteúdo de água do solo quando os valores são inferiores a 0,3916 cm³.cm⁻³ e, acima deste, tem a tendência de subestimar o conteúdo de água calculado.

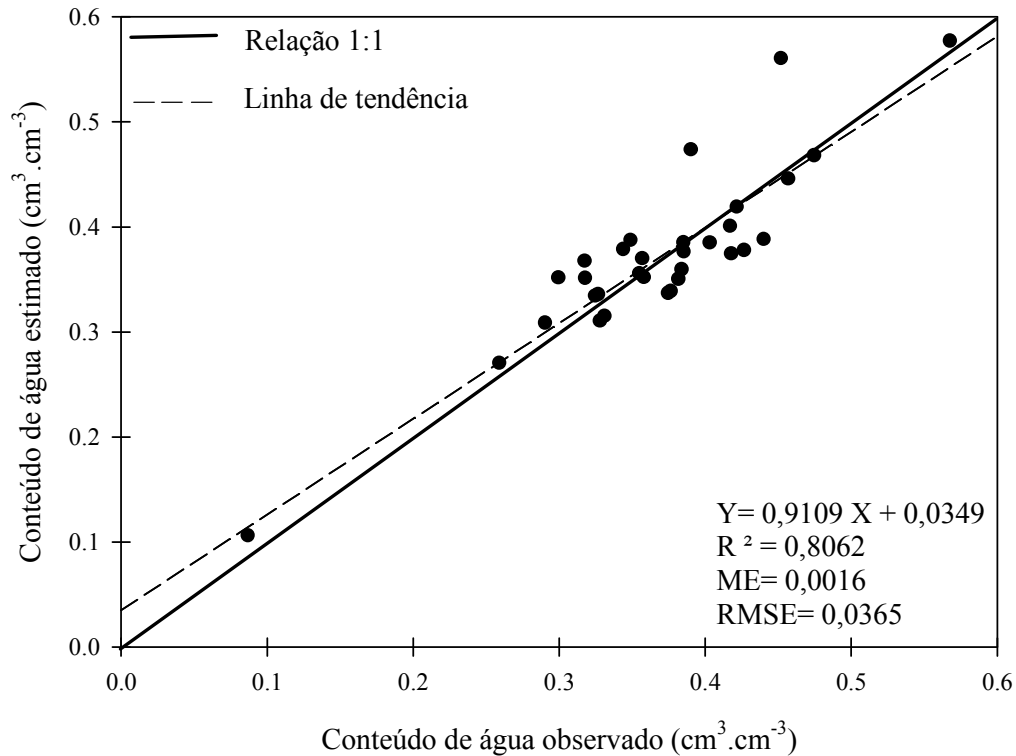


Figura 20 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100 kPa, para a camada intermediária, de solos do Sul do Uruguai.

4.3.2.3 Estimativa da retenção de água no potencial matricial de -500 kPa

Na tabela 12 é apresentada a FPT para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -500 kPa da camada intermediária de solos do sul do Uruguai.

Pode-se observar através da tabela 12 que o atributo significativo em nível de 5% de probabilidade foi o V_o , que representa o conteúdo de água remanescente no solo após a aplicação de um potencial de -3 kPa, este atributo apresenta coeficiente angular de 0,8561 e a FPT apresenta coeficiente linear de -0,0173. O R^2 parcial apresentado pela FPT desenvolvida para o potencial de -500 kPa, na camada intermediária foi de 0,6207, que coincide com o coeficiente de determinação do atributo V_o , visto que este é o único termo independente na FPT, este valor de coeficiente de determinação indica que acima de 62% dos valores de conteúdo de água estimados pela FPT são explicados pelo atributo V_o . Aponta-se que a FPT desenvolvida para estimar o conteúdo de água para o potencial de -500 kPa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-500} = 0,8561 V_o - 0,0173 \quad (9)$$

Tabela 12 - Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -500 kPa na camada intermediária de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
PT	ns	---
Vl	ns	---
Vo	0,8561	0,6207
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	ns	---
Intersecção	-0,0173	---
R ²		0,6207

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vl- Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At- Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

A relação 1:1 dos dados observados e estimados pela FPT₋₅₀₀ (inter.), juntamente com os indicadores estatísticos R², ME e RMSE, são apresentados na figura 21.

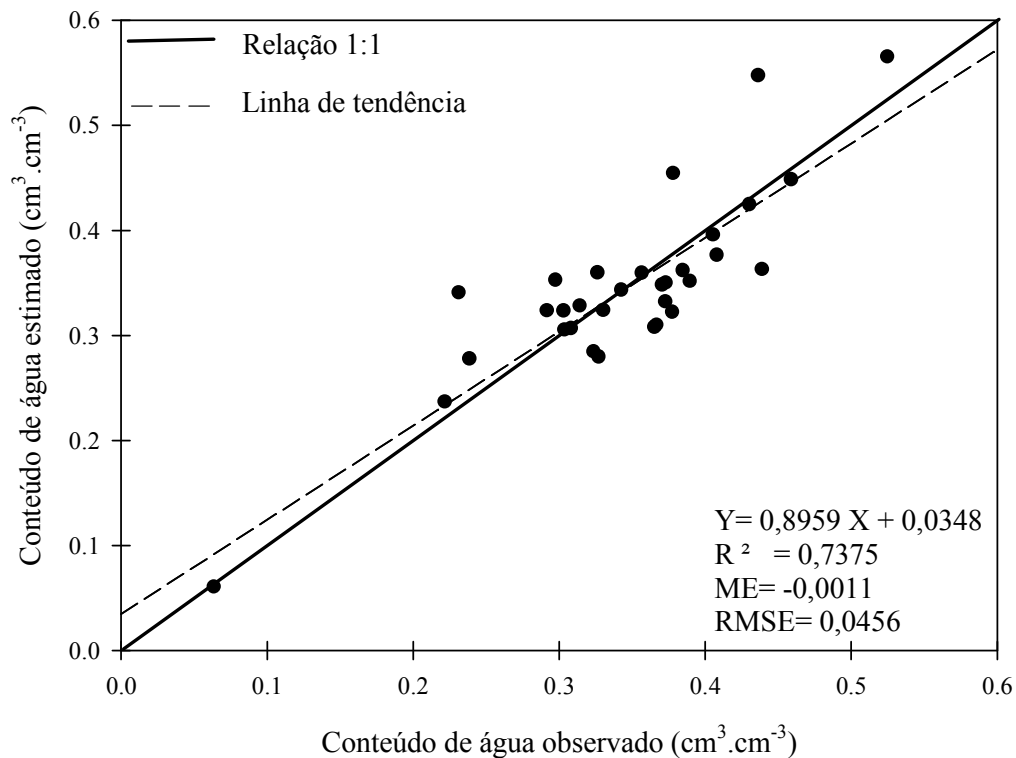


Figura 21- Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500 kPa, para a camada intermediária, de solos do Sul do Uruguai.

Após análise da figura 21 é possível afirmar que a FPT desenvolvida apresenta a tendência de subestimativa do conteúdo de água ($ME = -0,0011 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) e que os dados em torno da reta 1:1 apresentam certa dispersão ($RMSE = 0,0456 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). O coeficiente de determinação parcial da função $R^2 = 0,7375$ indica que a FPT desenvolvida apresentou eficiência satisfatória. Através da intersecção da linha de tendência e a reta 1:1 foi observado que a FPT superestima valores do conteúdo de água inferiores a $0,3342 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e acima deste tem a tendência de subestimar.

4.3.2.4 Estimativa da retenção de água no potencial matricial de -1500 kPa

Na tabela 13 são apresentados os valores dos coeficientes dos atributos que foram significativos a um nível de probabilidade de 5% para o potencial de -1500 kPa. Dentre os atributos significativos foi possível observar que o atributo V_o , assim como nos demais potenciais desta camada, foi quem contribuiu na FPT, visto que este apresentou um coeficiente de determinação parcial de 0,5719 e coeficiente linear de -0,0248. A partir dos dados da tabela 13, a FPT para estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-1500} = 0,8259 V_o - 0,0248 \quad (10)$$

Tabela 13 - Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -1500 kPa na camada intermediária de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
PT	ns	---
V _o	ns	---
V _l	0,8259	0,5719
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	ns	---
Intersecção	-0,0248	---
R ²		0,5719

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); V_l - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³·cm⁻³); V_o Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³·cm⁻³); At - Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

A relação 1:1 dos dados observados e estimados pela FPT_{-1500 (inter.)}, juntamente com os indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE, são apresentados na figura 22. Avaliando a figura 22 é possível afirmar que houve subestimativa dos dados calculados pela função de pedotransferência (ME= -0,0047), e que os dados em torno da reta 1:1 apresentam certa dispersão (RMSE= 0,0540 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$). O coeficiente de determinação parcial da função $R^2= 0,6407$, indica que a FPT desenvolvida apresentou eficiência satisfatória.

Através da intersecção da linha de tendência e a reta 1:1 foi observado que a FPT superestima valores de conteúdo de água do solo quando este é inferior a 0,3068 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e acima deste tem a tendência de subestimar o conteúdo de água calculado.

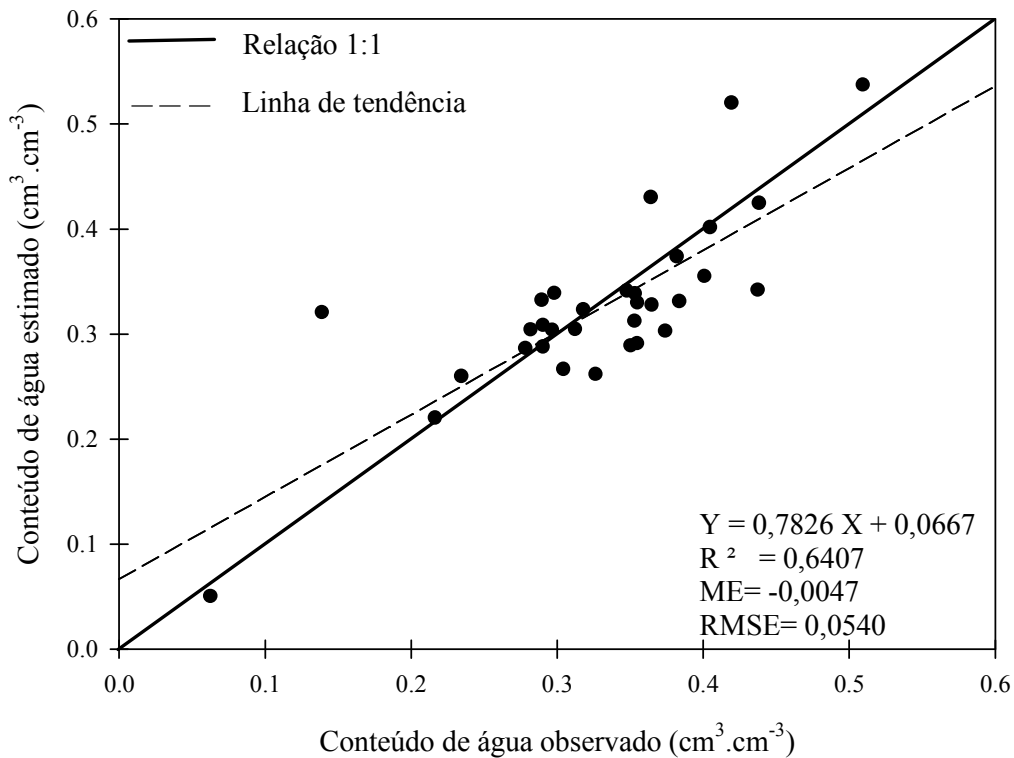


Figura 22 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -1500 kPa, para a camada intermediária, de solos do Sul do Uruguai.

4.3.3 Camada inferior

4.3.3.1 Estimativa da retenção de água no potencial matricial de -30 kPa

Na tabela 14 é apresentada a FPT para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -30 kPa da camada inferior de solos do sul do Uruguai.

Dentre os atributos analisados estatisticamente a um nível de 5% de probabilidade na determinação da FPT para o potencial de -30 kPa, foi observado que o V_o foi o único atributo significativo, apresentando coeficiente de determinação parcial de 0,9296 juntamente com coeficientes angular de 0,8789 e linear de 0,0181. A partir dos dados da tabela 14, a FPT para estimativa do conteúdo de água no potencial de -30 kPa pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-30} = 0,8789 V_o + 0,0181 \quad (11)$$

Tabela 14 - Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de - 30 kPa na camada inferior de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
PT	ns	---
Vl	ns	---
Vo	0,8789	0,9296
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	ns	---
Intersecção	0,0181	---
R ²		0,9296

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vl- Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At- Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

A relação 1:1 dos dados observados e estimados pela FPT_{-30 (inf.)}, juntamente com os indicadores estatísticos R², ME e RMSE, são apresentados na figura 23.

Na figura 23 pode ser evidenciado que a FPT desenvolvida possui a tendência de subestimar seus resultados de conteúdo de água para o potencial de -30 kPa (ME= -0,0049 cm³.cm⁻³) e apresenta uma pequena dispersão dos dados em torno da reta 1:1 que pode ser observado no indicador estatístico (RMSE= 0,0208). Após a análise do ponto de intersecção da função gerada pela reta de tendência e a reta 1:1 (Y=X) é possível observar que resultados obtidos pela FPT inferiores a 0,2708 cm³.cm⁻³ tendem a serem superestimados, enquanto que valores superiores a este tendem a subestimar o conteúdo de água do solo.

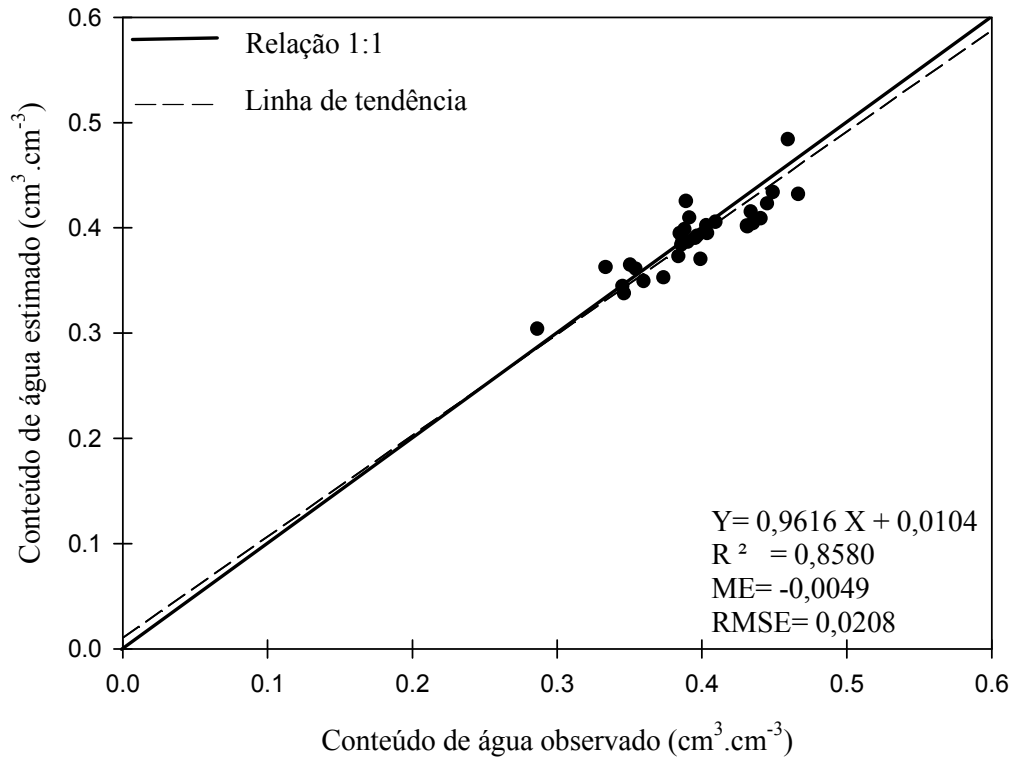


Figura 23 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -30 kPa, para a camada inferior, de solos do Sul do Uruguai.

4.3.3.2 Estimativa da retenção de água no potencial matricial de -100 kPa

Na tabela 15 está apresentada a FPT desenvolvida para a estimativa de retenção de água no potencial de -100 kPa da camada inferior de solos do sul do Uruguai. Podendo ser observado que o atributo significativo em nível de 5% de probabilidade é o V_o , possuindo coeficiente de determinação parcial de 0,8614, coeficiente angular de 0,8317. Sendo que a FPT desenvolvida apresenta coeficiente linear de 0,0255 e seu coeficiente de determinação é igual ao coeficiente de determinação do atributo V_o , visto que este é o único termo independente utilizado pela FPT. Avaliando os dados da tabela 15, a FPT desenvolvida para estimativa do conteúdo de água no potencial matricial de -100 kPa, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai, pode ser expressa da seguinte forma:

$$\theta_{-100} = 0,8317 V_o + 0,0255 \quad (12)$$

Tabela 15 - Função de pedotransferência para estimativa do conteúdo de água no potencial de -100 kPa na camada inferior de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
PT	ns	---
Vl	ns	---
Vo	0,8317	0,8614
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	ns	---
Intersecção	0,0255	---
R ²		0,8614

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vl - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At- Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

A relação 1:1 dos dados observados e estimados pela FPT_{-100 (inf.)}, juntamente com os indicadores estatísticos R², ME e RMSE, são apresentados na figura 24.

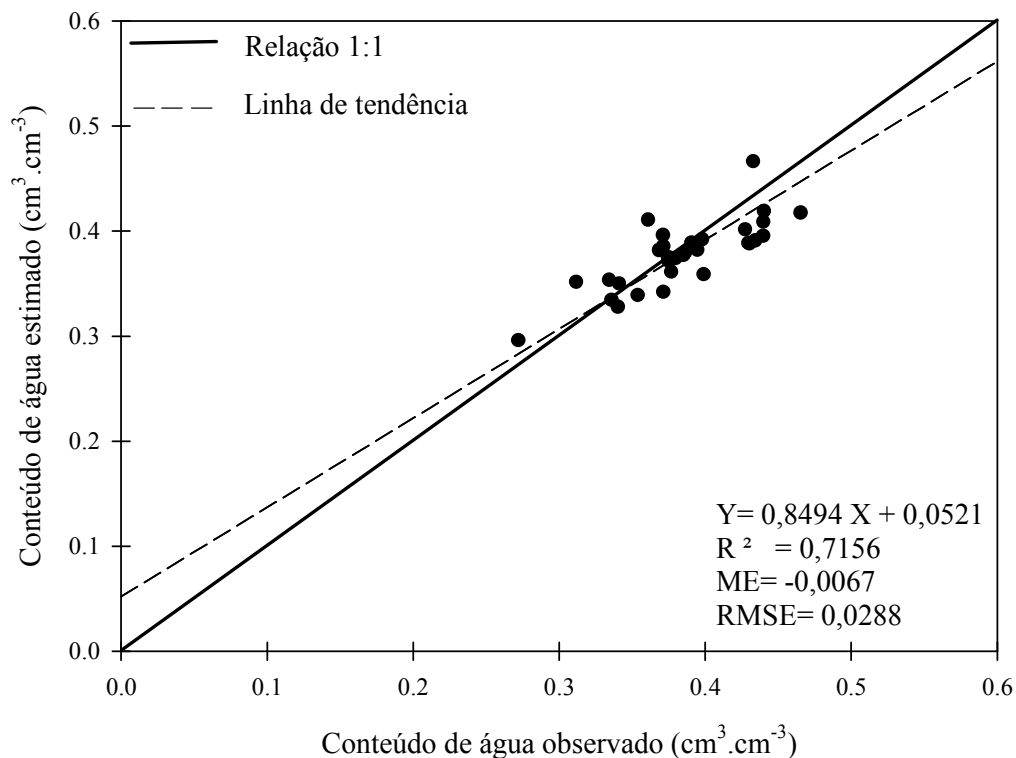


Figura 24 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -100 kPa, para a camada inferior, de solos do Sul do Uruguai.

Pode ser observado a tendência da FPT desenvolvida em subestimar seus resultados ($ME = -0.0067 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) e a leve dispersão dos valores em torno da reta 1:1 ($RMSE = 0,0288$). O coeficiente de determinação $R^2 = 0,7156$ indica que a FPT desenvolvida apresentou eficiência satisfatória. Através da intersecção da linha de tendência e a reta 1:1 foi observado que a FPT superestima dos valores de conteúdo de água inferiores a $0,3459 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e acima deste tem a tendência de subestimar o conteúdo calculado.

4.3.3.3 Estimativa da retenção de água no potencial matricial de -500 kPa

Na tabela 16 é apresentada a FPT para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -500 kPa da camada 40-60 cm de solos do sul do Uruguai. Após análise da tabela 16 podemos verificar que os atributos que foram significativos a em nível de 5% de probabilidade para a FPT desenvolvida foram o V_o , V_l (parâmetros estruturais) e A_t (parâmetro textural). Sendo que destes o atributo que apresenta maior contribuição no desenvolvimento da FPT é o V_o , possuindo coeficiente de determinação parcial de 0,8016.

Tabela 16 - Função de pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -500 kPa na camada inferior de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
PT	ns	---
Vl	-0,5401	0,0227
Vo	0,7122	0,8016
At	0,0011	0,0176
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	ns	---
Intersecção	0,0803	---
R ²		0,8419

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vl - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³·cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³·cm⁻³); At - Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

Avaliando o resultado apresentado na tabela 16, a FPT para a estimativa da retenção de água no potencial de -500 kPa a FPT pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\theta_{-500} = 0,0011 A_t - 0,5401 V_l + 0,7122 V_o + 0,0434 \quad (13)$$

A relação 1:1 dos dados observados e estimados pela FPT-500 (inf.), juntamente com os indicadores estatísticos R^2 , ME e RMSE, são apresentados na figura 25. Na figura 25 é apresentada que a FPT desenvolvida tem a tendência de subestimar os valores de conteúdo de água ($ME = -0,0100 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$), e apresenta certa dispersão dos dados ao entorno da reta 1:1 ($RMSE = 0,0314 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). A função que representa a linha de tendência dos dados observados versus estimados apresenta $R^2 = 0,6899$, indicando uma boa capacidade preditiva da FPT gerada. A intersecção da linha de tendência e a reta 1:1 retrata que valores de conteúdo de água inferiores a $0,3253 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ são superestimados, enquanto que valores acima deste tendem a estar subestimados.

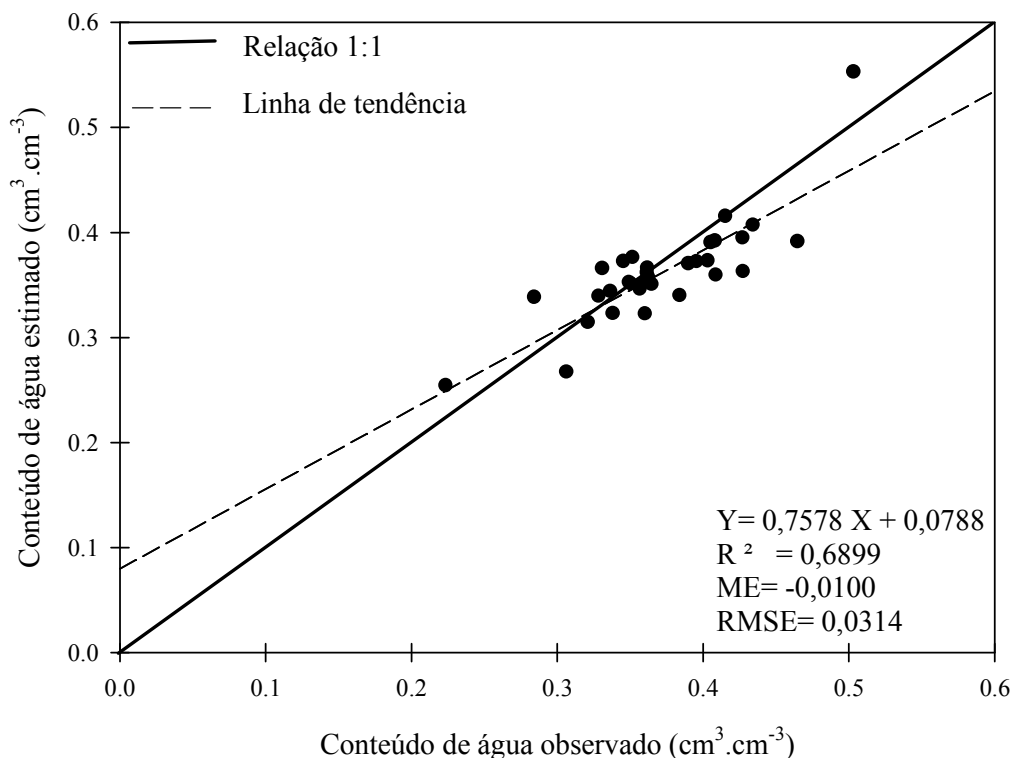


Figura 25 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -500 kPa, para a camada inferior, de solos do Sul do Uruguai.

4.3.3.4 Estimativa da retenção de água no potencial matricial de -1500 kPa

Na tabela 17 esta apresentada a FPT desenvolvida para a estimativa do conteúdo de água remanescente no solo após a aplicação de potencial matricial de -1500 kPa, para a camada inferior de solos do Sul do Uruguai.

Tabela 17 - Função de pedotransferência para estimativa da retenção de água no potencial de -1500 kPa na camada inferior de solos do Sul do Uruguai.

Variáveis	Coefficientes	R ² Parcial
Ds	ns	---
PT	ns	---
Vl	ns	---
Vo	0,7660	0,8013
At	ns	---
Si	ns	---
Arg	ns	---
Si/Arg	ns	---
Si+Arg	ns	---
Si+At	0,0011	0,0272
Intersecção	-0,0709	---
R ²		0,8285

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vl - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At- Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

O atributo estrutural Vo foi o atributo que apresentou mais elevada contribuição na estimativa do conteúdo de água do solo para o potencial de -1500 kPa, visto que este apresenta um coeficiente de determinação parcial de 0,8013 e coeficiente angular 0,7660 (Tabela 17). Também pode ser verificado que o atributo textural Si+At possui contribuição para a estimativa do conteúdo de água na FPT desenvolvida, apresentando coeficiente de determinação parcial de 0,0272. A partir dos resultados apresentados na tabela 17, a FPT desenvolvida para a estimativa do conteúdo de água no potencial de -1500 kPa, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai, pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\theta_{-1500} = 0,7660 \text{ Vo} + 0,0011 (\text{Si+At}) - 0,0709 \quad (14)$$

Avaliando a figura 26 é possível afirmar que houve subestimativa dos valores dos conteúdos de água calculados pela FPT (ME= -0,0345 cm³.cm⁻³) e que os dados em torno da reta 1:1 apresentam certa dispersão (RMSE= 0,0471 cm³.cm⁻³). O R²=0,6452, indica que a FPT desenvolvida apresentou eficiência satisfatória. Através da intersecção da linha de tendência e da reta 1:1 foi observado que a FPT superestima valores de conteúdo de água inferiores a 0,2421 cm³.cm⁻³ e, acima deste tem a tendência de subestimar o conteúdo calculado. A relação 1:1 dos dados observados e estimados pela FPT_{-1500 (inf.)}, juntamente com os indicadores estatísticos R², ME e RMSE, são apresentados na figura 26.

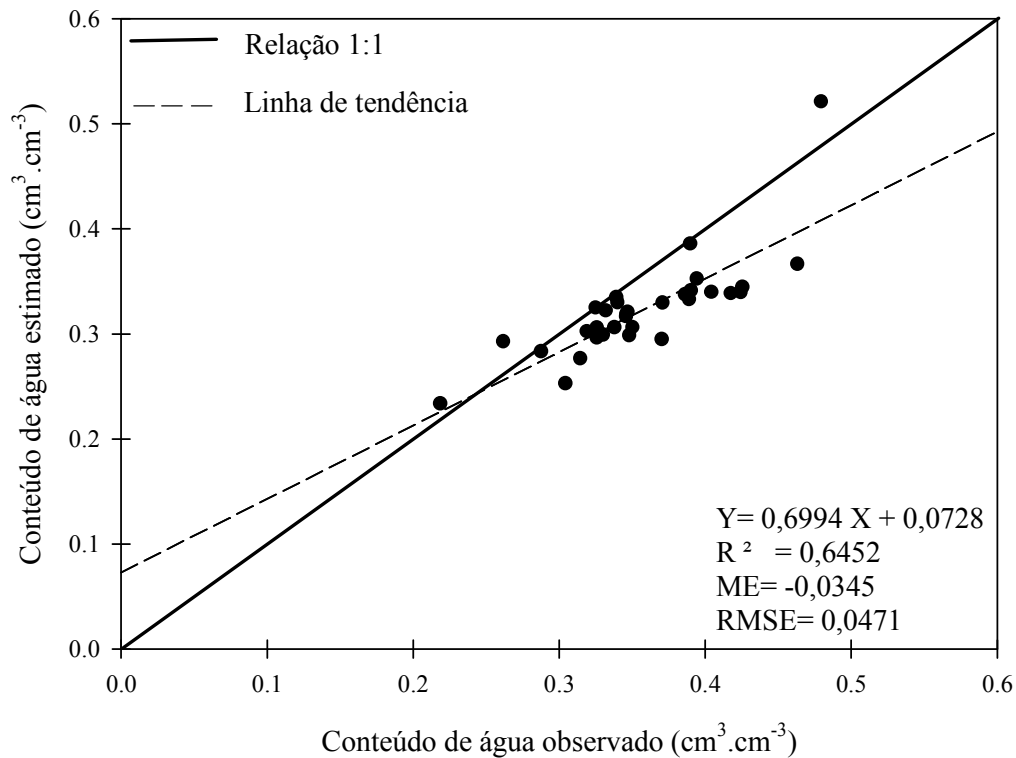


Figura 26 - Comparação entre os valores observados e estimados do conteúdo de água no solo no potencial de -1500 kPa, para a camada inferior, de solos do Sul do Uruguai.

4.4 Acurácia das FPTs na estimativa do intervalo de potenciais da curva de retenção de água do solo

4.4.1 Estimativa da retenção de água no intervalo de potenciais de -30 a -1500 kPa - Camada Superficial

Na tabela 18 são apresentados os intervalos dos atributos utilizados na validação das FPT desenvolvidas para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de -30 a -1500 kPa. Conforme apresentado nas tabelas 6, 7, 8 e 9 é possível avaliar que para a camada superficial os atributos significativos em nível de 5% de probabilidade foram: V_o , V_l , $Si+At$ e Si/AGr . Também na tabela esta apresentado o intervalo dos valores de cada atributo para a determinação do conteúdo de água do solo para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa estimados através da FPTs desenvolvidas, que devem estar compreendidos entre: (0,30 a $0,64 \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) para V_o , (0,01 a $0,16 \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) para V_l , (50 a 86 %) para $Si+At$ e (0,78 a 2,64 %) para o atributo Si/At .

Tabela 18 - Faixa de variação dos atributos utilizados na validação das FPTs para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de -30 a -1500 kPa, para a totalidade dos dados de validação, para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai.

Atributos	Conjunto de dados	
	Extremo Inferior	Extremo Superior
Arg	21,06	50,00
Si	39,00	60,01
At	11,00	41,00
Ds	0,87	1,68
Pt	0,33	0,71
Si/Arg	0,78	2,64
VI	0,01	0,16
Vo	0,30	0,64
Si+At	50,00	86,00
Si+Arg	60,83	89,00

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); VI- Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At- Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg – Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

Na tabela 19 são apresentados o indicador estatístico ME e o erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os potenciais de -30,-100, -500 e -1500 kPa para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai. Avaliando a tabela 19, foi possível verificar que, dentre os potenciais, o que apresentou maior ME foi a FPT desenvolvida para a estimativa do conteúdo de água retida no solo a -30 kPa (ME= 0,0215 cm³.cm⁻³), e por conseqüência esta também apresenta valor superior quando comparado com os demais potenciais da camada no critério ME em lâmina (4,3004 mm).

Tabela 19 - Indicador estatístico ME e erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os potenciais de -30,-100, -500 e -1500 kPa para a camada superficial para os solos do Sul do Uruguai.

Potenciais (kPa)	ME (cm ³ .cm ⁻³)	ME em lâmina (mm)
-30	0,0215	4,3004
-100	-0,0005	-0,1091
-500	-0,0104	-2,0772
-1500	-0,0124	-2,4737

Na tabela 20 são apresentadas as lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para os potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas. Quando comparados os valores em lâmina de erro médio disponibilizados na tabela 19 com os percentuais da lâmina

armazenada em cada potencial pode ser verificado que a FPT_{-30} (Superf.) apresenta valores médios de erro inferiores a 6%, enquanto que para os potenciais de -100, -500 e -1500 kPa, os ME de lâmina armazenada encontram-se inferior a 1%, 4% e 4% respectivamente. Indicando a boa estimativa do conteúdo de água no solo quando utilizadas as FPTs.

Tabela 20 - Lâminas médias do conteúdo de água, obtidas em laboratório, para os potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.

Potenciais (kPa)	Lâmina Média (mm)	Percentual da lâmina média (mm)			
		1%	3%	7%	10%
-30	74,49	0,74	2,23	5,21	7,45
-100	69,80	0,70	2,09	4,89	6,98
-500	64,98	0,65	1,95	4,55	6,50
-1500	61,88	0,62	1,86	4,33	6,19

Na figura 27 é apresentada a comparação entre os valores estimados e observados do conteúdo de água do solo na faixa de potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai.

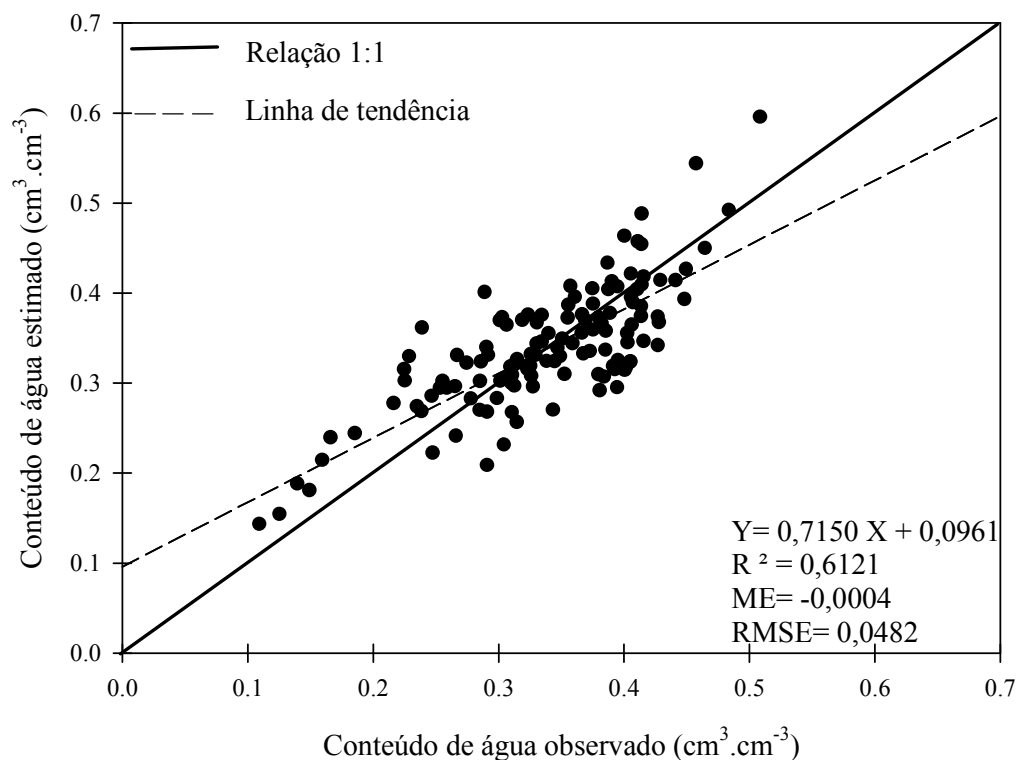


Figura 27 - Comparação entre os valores estimados e observado do conteúdo de água do solo na faixa de potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai.

Observou-se nesta a subestimativa do conteúdo de água do solo ($ME = -0,0004 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) e dispersão dos dados na reta 1:1 ($RMSE = 0,0482 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). A tendência de subestimativa é maior nos valores superiores a $0,3371 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. O valor de $ME = -0,0004 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ transformado em lâmina armazenada, na camada superficial, resulta em $ME = 0,08 \text{ mm}$. Este valor é inferior ao percentual de 1% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para o intervalo de potencial de -30 a -1500 kPa (Tabela 21).

Tabela 21 – Lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para o intervalo dos potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada superficial dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.

Potenciais (kPa)	Lâmina Média (mm)	Percentual da lâmina média (mm)			
		1%	3%	7%	10%
-30 a -1500	67,79	0,68	2,03	4,75	6,78

4.4.2 Estimativa da retenção de água no intervalo de potenciais de -30 a -1500 kPa - Camada Intermediária

Na tabela 22 é apresentado o intervalo numérico dos atributos utilizados na validação das FPTs para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de -30 a -1500 kPa na camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai.

Tabela 22- Faixa de variação dos atributos utilizados na validação das pedofunções para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de -30 a -1500 kPa, para a totalidade dos dados de validação, para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai.

Atributos	Conjunto de dados	
	Extremo Inferior	Extremo Superior
Arg	17,49	52,49
Si	34,95	71,24
At	9,00	36,88
Ds	0,88	1,82
Pt	0,30	0,68
Si/Arg	0,70	4,07
Vl	0,00	0,06
Vo	0,30	0,68
Si+At	47,51	82,51
Si+Arg	63,12	91,00

Onde: R^2 - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R^2); DS - Densidade do solo (g/cm^3); Pt - Porosidade Total (%); Vl - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$); At - Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

Conforme apresentado nas tabelas 10, 11, 12 e 13 é possível avaliar que para acamada intermediária o atributo significativo em nível de 5% de probabilidade foi o V_o . Assim, a tabela 22 especifica o intervalo numérico do atributo significativo V_o , juntamente com o intervalo de valores utilizados na validação das FPTs da camada intermediária. Para a determinação das valorações do conteúdo de água no solo para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa estimados através da FPTs desenvolvidas, os valores de V_o devem estar compreendidos entre 0,30 a 0,68 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

Na tabela 23 são apresentados os indicadores estatísticos ME em lâmina (mm) para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa para a camada intermediária. Sendo possível verificar que dentre as FPT desenvolvidas aquela que apresentou maior ME foi a FPT desenvolvida para a estimativa do conteúdo de água a -1500 kPa (ME= -0,0047 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), e por conseqüência esta também apresentou valor superior quando comparada com os demais potenciais da camada no quesito ME em lâmina (-0,9338 mm).

Tabela 23- Indicador estatístico ME (erro médio) e erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai.

Potenciais (kPa)	ME ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	ME em Lâmina (mm)
-30	-0,0001	-0,0254
-100	0,0016	0,3181
-500	-0,0011	-0,2164
-1500	-0,0047	-0,9338

Na tabela 24 são apresentadas as lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para os potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.

Tabela 24 – Lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para os potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.

Potenciais (kPa)	Lâmina Média (mm)	Percentual da lâmina média (mm)			
		1%	3%	7%	10%
-30	79,19	0,79	2,38	5,54	7,92
-100	75,68	0,76	2,27	5,30	7,57
-500	71,06	0,71	2,13	4,97	7,11
-1500	67,65	0,68	2,03	4,74	6,77

Quando comparado os valores em lâmina do erro médio (tabela 23) com os percentuais da lâmina armazenada em cada potencial, verifica-se que a FPT₋₁₅₀₀ (inter.)

apresenta valores médios de erro inferiores a 2%, enquanto que para os potenciais de -30, -100 e -500 o ME em lâmina armazenada apresenta-se inferior a 1%. Indicando a ótima estimativa do conteúdo de água retida no solo quando utilizadas estas FPTs.

Na figura 28 é apresentada a comparação entre os valores estimados e observados do conteúdo de água do solo na faixa de potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada intermediária. Pode ser observado nesta que existe subestimativa do conteúdo de água do solo (ME= -0,0011 cm³.cm⁻³) e dispersão dos dados na reta 1:1 (RMSE= 0,0420 cm³.cm⁻³).

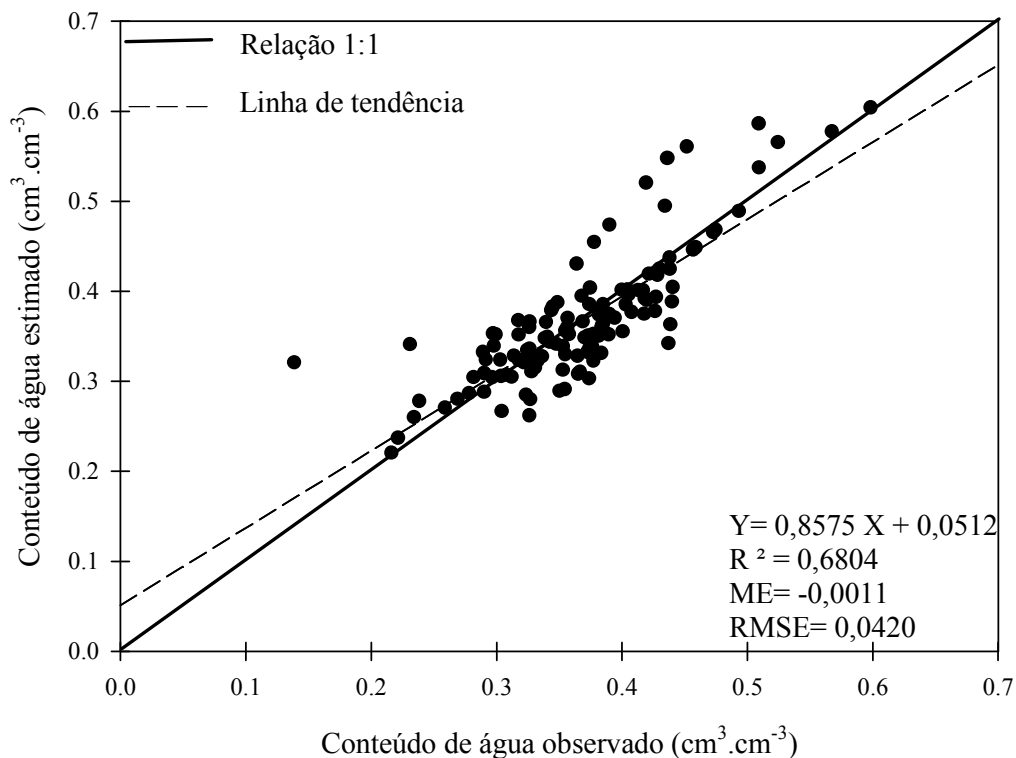


Figura 28 – Comparação entre os valores estimados e observados do conteúdo de água do solo na faixa de potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai.

Na tabela 25 são apresentadas as lâminas médias de água para a faixa potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas. Nota-se a tendência de subestimativa é maior nos valores superiores a 0,3592 cm³.cm⁻³. O valor de ME= -0,0011 cm³.cm⁻³ convertido em lâmina armazenada, na camada de intermediária resulta em ME= 0,22 mm. Este valor é inferior ao percentual de 1% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para a faixa de potencial de -30 a -1500 kPa.

Tabela 25 - Lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para a faixa potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada intermediária dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.

Potenciais (kPa)	Lâmina Média (mm)	Percentual da lâmina média (mm)			
		1%	3%	7%	10%
-30 a -1500	73,40	0,73	2,20	5,14	7,34

4.4.3. Estimativa da retenção de água no intervalo de potenciais de -30 a -1500 kPa - Camada Inferior

Na tabela 26 é apresentado o intervalo dos atributos utilizados na validação das FPTs para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de -30 a -1500 kPa, para a totalidade dos dados de validação, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai. Conforme apresentado nas tabelas 14, 15, 16 e 17 é possível avaliar que para a camada inferior os atributos significativos em nível de 5% de probabilidade foram: Vo, Vl, Si+At e At. Assim, na tabela 26 é especificado o intervalo dos valores de cada atributo para a determinação da retenção de água no solo para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa estimados através da FPTs desenvolvidas, sendo que estes devem estar compreendidos entre: (0,32 a 0,70 cm³.cm⁻³) para Vo, (0,00 a 0,12 cm³.cm⁻³) para Vl, (40,00 a 75,61 %) para Si+At e (6,00 a 41,47 %) para o atributo At.

Tabela 26- Faixa de variação dos atributos utilizados na validação das pedofunções para estimativa do conteúdo de água nos potenciais de -30 a -1500 kPa, para a totalidade dos dados de validação, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai.

Atributos	Conjunto de dados	
	Extremo Inferior	Extremo Superior
Arg	24,39	60,00
Si	24,00	62,43
At	6,00	41,47
Ds	0,95	1,90
Pt	0,36	0,70
Si/Arg	0,47	2,56
Vl	0,00	0,12
Vo	0,32	0,70
Si+At	40,00	75,61
Si+Arg	58,53	93,00

Onde: R² - Coeficiente de determinação parcial (contribuição de cada variável para o R²); DS - Densidade do solo (g/cm³); Pt - Porosidade Total (%); Vl - Conteúdo de água extraído do solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); Vo Conteúdo de água remanescente no solo à um potencial de -3 kPa (cm³.cm⁻³); At - Percentual de Areia total (%); Si - Percentual de Silte (%); Arg - Percentual de argila (%); Si/Arg - Relação Silte por Argila; Si+Arg - Soma do percentual de silte e argila; Si+At - Soma do percentual de silte e areia total; ns - Não significativo a um nível de 5% de probabilidade.

Na tabela 27 são apresentados o indicador estatístico ME (erro médio) e ME em lâmina de água armazenada (mm) para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa para a camada inferior para os solos do Sul do Uruguai.

Tabela 27 - Indicador estatístico ME (erro médio) e erro médio em lâmina de água armazenada (mm) para os potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai.

Potenciais (kPa)	ME (cm ³ .cm ⁻³)	ME em lâmina (mm)
-30	-0,0049	-0,9822
-100	-0,0067	-1,3466
-500	-0,0100	-2,0074
-1500	-0,0345	-6,8919

Após análise da tabela 27, foi possível verificar que dentre os potenciais, o que apresentou maior ME foi a FPT desenvolvida para a estimativa do conteúdo de água retida no solo -1500 kPa (ME= 0,0345 cm³.cm⁻³), e por conseqüência esta também apresenta mais elevado valor quando comparado com os demais potenciais da camada no critério ME em lâmina (-6,8919 mm).

Na tabela 28 são apresentadas as lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para os potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas. Quando comparado os valores em lâmina do ME (tabela 28) com os percentuais da lâmina armazenada em cada potencial, pode-se verificar que a FPT_{-30 (Inf)} apresenta os valores médios de erro inferiores a 2%, enquanto que para os potenciais de -100, -500 e -1500 o erro médio de lâmina armazenada encontra inferior a 2%, 3% e 10% respectivamente. Indicando a boa estimativa do conteúdo de água retida no solo quando utilizadas as FPTs.

Tabela 28 - Lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para os potenciais de -30 a -1500 kPa, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.

Potenciais (kPa)	Lâmina Média (mm)	Percentual da lâmina média (mm)			
		1%	3%	7%	10%
-30	80,340	0,80	2,41	5,62	8,03
-100	78,106	0,78	2,34	5,47	7,81
-500	74,209	0,74	2,23	5,19	7,42
-1500	71,393	0,71	2,14	5,00	7,14

Na figura 29 é apresentada a comparação entre os valores estimados e observados do conteúdo de água do solo no intervalo de potencial de -30 a -1500 kPa para a camada inferior. Sendo observada subestimativa do conteúdo de água do solo ($ME = -0,0140 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) e certa dispersão dos dados em torno da reta 1:1 ($RMSE = 0,0334 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). A tendência de subestimativa é maior nos valores superiores a $0,2513 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

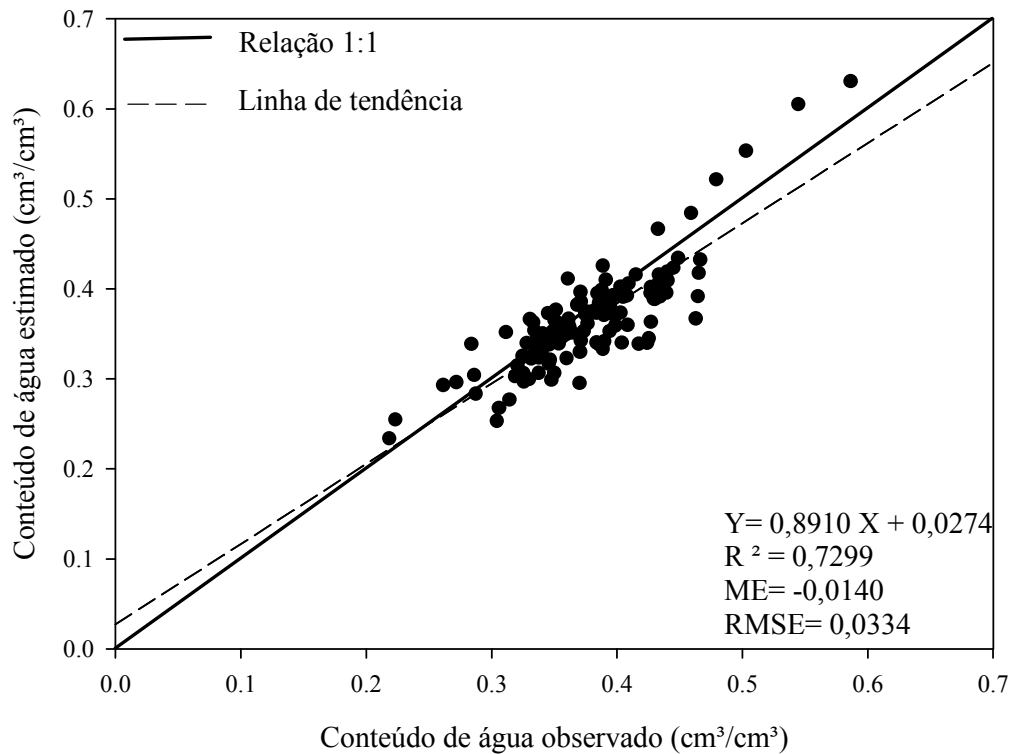


Figura 29 - Comparação entre os valores estimados e observados do conteúdo de água do solo na faixa de potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai.

Na tabela 29 são apresentadas as lâminas médias de água armazenada na faixa potencial de -30 a -1500 kPa, e os valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas. Nota-se que o valor de $ME = -0,0140 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ transformado em lâmina armazenada, na camada inferior, resulta em $ME = 2,8 \text{ mm}$. Este valor é inferior ao percentual de 4% da lâmina média armazenada obtida em laboratório para a faixa de potencial de -30 a -1500 kPa.

Tabela 29 – Lâminas médias de água armazenadas, obtidas em laboratório, para a faixa potencial de -30 a -1500 kPa, para a camada inferior dos solos do Sul do Uruguai, e valores dos percentuais de 1, 3, 7 e 10% destas lâminas.

Potenciais (kPa)	Lâmina Média (mm)	Percentual da lâmina média (mm)			
		1%	3%	7%	10%
-30 a -1500	76,01	0,76	2,28	5,32	7,60

Ao final, observa-se que as FPTs desenvolvidas para a estimativa a retenção de água nos diferentes potenciais, para as três camadas de solo estudadas, foram eficientes, podendo afirmar-se que estas se utilizadas para as condições de solo próximas aquelas do estudo, possibilitam prever com acurácia os conteúdos de água remanescentes a cada potencial e, conseqüentemente, construir a curva de retenção de água no solo de forma mais direta, rápida e com baixo custo.

5 CONCLUSÕES

- Quatro pedofunções foram desenvolvidas para cada camada do perfil do solo, para determinar o conteúdo de água nos potenciais de -30, -100, -500 e -1500 kPa a partir das características texturais e estruturais de 251 amostras de solo das camadas superior (0-20 cm), intermediária (20-40 cm) e inferior (40-60 cm) de solos pertencentes à região Sul do Uruguai;
- O atributo conteúdo de água remanescente no solo a um potencial de -3kPa (V_0) foi significativo em todas as pedofunções desenvolvidas, demonstrando que a estrutura do solo foi determinante na estimativa da retenção de água;
- Os indicadores estatísticos erro médio, raiz quadrada do erro médio ao quadrado e o coeficiente de determinação (ME, RMSE e R^2) apresentaram-se próximo a zero para ME e RMSE e próximo a 1 para R^2 , indicando que as pedofunções desenvolvidas apresentam acurácia na determinação do conteúdo de água no solo para os potenciais estudados;
- O erro médio determinado entre os valores estimados em relação aos observados, quando convertido em lâmina para a faixa de potenciais de -30 a -1500 kPa foi inferior a 10% da lâmina média armazenada nas camadas do solo estudado;
- As pedofunções desenvolvidas apresentaram desempenho satisfatório, sendo possível utilizá-las com acurácia no desenvolvimento da curva de retenção de água no solo, possibilitando reduções de tempo e equipamentos para sua determinação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHUJA, L.R.; NANEY, J.W. & WILLIAMS, R.D. Estimating soil water characteristics from simpler properties on limited data. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 49:1100-1105, 1985.

ARRUDA, F. B.; JÚLIO Jr., J. & OLIVEIRA, J. B. Parâmetros de solo para cálculo de água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.11-15, 1987.

BARBOUR, S. L. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 35, p. 873-894. 1998.

BELL, M. & KEULEN, van. H. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.865-871, 1995.

BERG, M.D.; KLANT, E.; van REEUWIJK, L.P. & SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferrasols and related soils. **Geoderma**, 78:161-180, 1997.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, v.9, p.177-213, 1989.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. Prentice Hall, 14th ed. 965 p. 2008.

CARLESSO, R. & ZIMMERMANN, F. L. **Água no solo: parâmetros para dimensionamento de sistemas de irrigação**. Caderno Didático nº3, 2000.

CICHOTA, R. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.585-596, 2004.

COELHO, E. F.; CONCEIÇÃO, M. A.; SOUZA, V. A. B. Estimativa dos limites de disponibilidade de água em função da densidade global e da textura do solo. **Revista Ceres**. Viçosa, v. 45, p. 183-192, 1998.

CORSI, W.C. 1978. Clima. IN: Avances en Pasturas IV. **Miscelánea** 18:255-256. Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Böerger. La Estanzuela. Uruguay.

COSTA, A. E. M. **Quantificação de atributos físicos de solos de várzea, relacionados com a disponibilidade de água, o espaço aéreo e a consistência do solo**. 1993. 134f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1993.

DIRKSEN, C. **Soil physical measurements**. Reiskirchen, Catena Verlag. 1999. 154 p.

DRAPER, N.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1981.

DURÁN, A.; CALIFRA, A.; MOLFINO, J.H. 1999. **Suelos del Uruguay según Soil Taxonomy**. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. 14 p. Disponível em <http://www.fagro.edu.uy/~edafologia/suelosROU.pdf>

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. J. **An Introduction to the bootstrap**. London, UK: Chapman & Hall, 1993. 436 p. (Monographs on statistics and applied probability 57)

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análises de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

ESKES, S.J.T.; CRESTANA, S. **Uma abordagem probabilística para quantificar o movimento de solutos no solo em uma escala de bacia hidrográfica**. São Carlos: EMBRAPA-CNPDIA, nº 9, p. 1-6, 1996 (Pesquisa em andamento).

FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. Determinação de capacidade de campo in situ ou através de equações de regressão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 1029-1036, maio 2000.

FASSBENDER, H.W. **Química de suelos, con ênfasis en suelos de América Latina**. San Jose: IICA. 1982. 422p.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. (1993). **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 517p.

FREDLUND, D.G.; XING, A. & HUANG, S. (1994). Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the Soil-Water Characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 31, p. 533-546.

GAISER, T.; GRAEF, F.; CORDEIRO, J.C. Water retention characteristics of soils with contrasting Clay mineral composition in semi-arid tropical regions. **Australian Journal Soil Research**, v. 38, p. 523-536, 2000.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. & IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. V.26, p.885-893, 2002.

HERBST, M.; DIEKKRÜGER, B.; VERECKEN, H. Geostatistical co-regionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes. **Geoderma** v.132, p.206-221, 2006.

HILLEL, D. **Soil and water: Physical principles and processes**. New York: Academic Press, 1971. 288 p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 413p.

HILLEL, D. 1982. **Introduction to Soil Physics**. New York, Academic Press, 365p.

INIA- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Uruguay. 2010.

- KERN, J.S. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 59:1134- 1141, 1995.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um latossolo roxo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 6, pp. 959-964, 2000.
- KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M. & REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** [online]. 2006, vol.10, n.3, pp. 646-650. ISSN 1415-4366.
- KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde.** De Gruite. Berlin. 1931.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo.** Edição do Autor, ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, Piracicaba, 497p. 1995.
- LIN, H. S. MCINNES, K. J.; WILDING, L. P. & HALLMARK, C. T. Effects of soil morphology on hydraulic properties: Hydraulic pedotransfer functions. **Soil Science Society American Journal**, v.63, p.955-961, 1999.
- MAJOU, H. AL. et al. Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. **Soil Use and Management**, v. 24, p. 383-391, 2008.
- MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V.A.; BIASUZ JUNIOR, I. J.; SIMON, M. A. Efeito de restos culturais sobre a superfície do solo na compactação do solo. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 15, 2004, Santa Maria. **Resumos expandidos.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004.
- MASSUTI, M. M. **Caracterização da água disponível a partir de parâmetros físico-hídricos em solos da zona da mata do estado de Pernambuco.** 1997. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1997.

MENG, T. P et al. Models to predict water retention in semiarid sandy soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.5, p.1563-1565, 1987.

MICHELON, C. J. **Pedofunções para retenção de água de solos do Rio Grande do Sul irrigados por aspersão**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 2010.

MILLER, C.J.; YESILLER, N.; YALDO, K. & MERAYYAN, S. Impact of Soil Type and Compaction Conditions on Soil Water Characteristic. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.128, nº 9. p.733-742. 2002.

MINASNY, B. et al. **Revisão sobre funções de pedotransferência e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50 p.

MONTGOMERY, D. C. ; PECK, E. A. ; VINING, G. G. **Introduction to linear regression analysis**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V. & MARQUES, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.315-323, 2002.

OR, D.; WRAITH, J.M. Soil water content and water potential relationships. In: Sumner, M. E. (ed.) **Handbook of Soil Science**. Boca Raton, Washington. p. A-53-A-85, 2000.

PACHEPSKY, Y. & RAWLS, W. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society American Journal**, v.63, p. 1748-1757, 1999.

PAULA, G. A. **Estimação e testes em modelos de regressão com parâmetros restritos**. São Paulo: ABE, 1997.

PAULETTO, E.A.; LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, p. 189-195, 1988.

PETERSEN, G.N.; CUNNINGHAM, R.L. & MATELSKI, R.P. Moisture characteristics of Pennsylvania soils: I. Moisture retention as related to texture. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 32:271-275, 1968.

RAWLS, W.J.; GISA, T.J. & BRAKENSIER, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Adv. Soil Sci.**, 16:213-234, 1991.

REICHARDT, K. **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta- Atmosfera**, 4ª ed. Campinas: Fund. Cargill. 466p. 1985.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, p. 188, 1990.

RICHARDS, L.A. Methods of measuring moisture tension. **Soil Science**, Madison, v. 58, p. 95-112, 1949.

RIDLEY, A.M. & WRAY, W.K. **Suction measurement: A review of current theory and practices**, In: 1st International Conference on Unsaturated Soils, Paris. Unsaturated Soils. p.1293-1322. 1995.

RIGHES, A.; LOVATO, T. & SOARES, E. Caracterização física, química e microbiológica de um planossolo da unidade de mapeamento Vacacaí, RS. **Ciência Rural**, v.13, n.1, p.25-45, 1983.

ROMANO, N., SANTINI, A. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.202, p.137–157, 1997.

SALTER, P.J.; BERRY, G. & WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. III. Quantitative relationships between particle, composition, and available capacity. **J. Soil. Sci.** 17:93-98, 1966.

SALTER, P.J. & WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. II. Available water capacity and moisture release characteristics. **J. Soil. Sci.** 16:310-317, 1965.

SAS INSTITUTE. **SAS Statistical Package**. Cary: SAS Inc., 1997. version 6.12

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J.; ROMBERGER, J. S.; PAPENDICK, R. I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, v.5, p.1031-1036, 1986.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32: 1-10, 2008.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32: 963-973, 2008.

TABOADA CASTRO, M. M. **Morfología de superficies cultivadas. En relación con la infiltración, la formación del excedente de agua y la erosión**. La Coruña: UDC, 2001. 541p. Tesis Doctoral.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in brasilian soils. **Soil Science Society America Journal**, v.64, p.327-338, 2000.

UDELAR - Universidad de la República, Uruguay. 2001.

URACH, F. **Estimativa da retenção de água para fins de irrigação**. 2007. 78f. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, RS.

VAN DEN B. et al. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferrasols and related soils. **Geoderma**, v. 78, p. 161-180, 1997.

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G. & PUFHAL, D.E. The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till. **Géotechnique**, Vol. 49, nº 2, p. 143-159. 1999.

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