Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em mode	ole
agro-hidrológico	

Alexandre Hugo Cezar Barros

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Física do Ambiente Agrícola

Piracicaba 2010

Alexandre Hugo Cezar Barros Engenheiro Agrônomo

Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em m	odelo
agro-hidrológico	

Orientador:

Prof. Dr. QUIRIJN DE JONG VAN LIER

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Física do Ambiente Agrícola

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Barros, Alexandre Hugo Cezar Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico / Alexandre Hugo Cezar Barros. - - Piracicaba, 2010. 148 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.

1. Água no solo 2. Caupi 3. Hidrologia 4. Milho 5. Simulação (Estatística) - Modelos 6. Solos - Propriedades físicas 7. Sorgo I. Título

> CDD 631.432 B277d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICO

A Deus, princípio de tudo;

À minha mãe Maria José Cezar;

Ao meu pai Clodoaldo de Souto Barros (in memoriam);

A minha esposa Zilmar Meireles e aos meus filhos João Lucas e Fernanda;

Aos meus irmãos Andrea, Adriane e André;

Aos meus sobrinhos Ana Carolina, Bia, Matheus e Marcelo;

A D. Dilza e Susanne.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido vida e saúde.

Expresso meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

Em especial, ao professor Quirijn de Jong van Lier, pelo apoio, simplicidade e orientação, que proporcionou o aprofundamento e a melhoria deste trabalho e exemplo profissional de comprometimento e ética.

Ao professor Paulo César Sentelhas quem primeiro acreditou na realização deste trabalho e pelas sugestões, apoio e amizade.

Aos amigos, Professor Mário Adelmo Varejão Silva, Magali Brandão Paiva e Maria de Jesus Nogueira Aguiar que sempre acompanharam e contribuíram para o meu aperfeiçoamento técnico e pessoal.

Aos professores, Luiz Roberto Angelocci, Sérgio Oliveira Moraes, Fábio Ricardo Marin, Valter Barbieri, Nilson Villa Nova e Jarbas Honório de Miranda, integrantes do Programa de Pós-Graduação (PPG) em Física do Ambiente Agrícola pelo apoio e sugestões.

Aos professores e pesquisadores, José Romualdo de Sousa Lima da UFRPE, Maurício Coelho da Embrapa Mandioca e Fruticultura, Alan Cunha Barros e José Leonaldo de Souza da UFAL, Javier Tomasella, do INPE, Adriano Franzoni Otavian e Stanley Robson de Medeiros Oliveira, da Embrapa Informática Agropecuária, Leonor Assad da UFSCAR, Fabiana Carnaúba do SEMARH, Francis Lacerda do LAMEPE, Lúcia Raquel Queiroz Pereira da Luz, Roberto da Boa Viagem Parahyba e José Coelho de Araújo Filho da Embrapa Solos, Aderson Soares de Andrade Júnior da Embrapa Meio Norte, José Nildo Tabosa do IPA, Aline de Holanda Nunes Maia da Embrapa Meio Ambiente, Marcelo Cid Amorim da UFRRJ, Gilmar Bristot da EMPARN, Marle Bandeira da AESA, José Francismar de Medeiros da UFERSA e José Maria Brabo Alves da FUNCEME, pela cessão de dados, colaboração e sugestões.

A todos os meus colegas do PPG em Física do Ambiente Agrícola que fizeram parte desta importante etapa de minha vida. Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas pela colaboração para a realização deste trabalho de tese, em especial aos amigos Ângela, Fernando, Francisco ("Chiquinho") e Robinson.

Em especial a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela concessão da Bolsa de Estudos.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"- ESALQ - USP, pela oportunidade da realização deste curso de doutorado.

Aos meus amigos e colegas da Embrapa que me incentivaram e colaboram para execução e melhoria deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas da "cúpula", Jones, Indriati, Deise, Jeanine, Nilceu, Gabriel, Adriano, Leandro, Marlon, Fábio, Andrea e Anderson, pela amizade e companheirismo. E tantos outros que me incentivaram de alguma forma para realização deste trabalho.

"Eu afirmo que o único objetivo da ciência é aliviar a miséria da existência humana" Bertold Brecht.

SUMÁRIO

RESU	MO	11
ABSTI	RACT	13
LISTA	DE FIGURAS	15
LISTA	DE TABELAS	19
LISTA	DE SÍMBOLOS	23
1 IN	NTRODUÇÃO	27
2.1	Modelos de simulação do sistema agrícola	31
2.1.1	Conceito de modelo	31
2.1.2	Modelagem do rendimento agrícola	32
2.2	Funções de pedotransferência	35
2.2.1	Desenvolvimento de funções de pedotransferência para a retenção de água no solo	39
2.2.2	Avaliação de funções de pedotransferência	42
3 MAT	TERIAL E MÉTODOS	47
3.1	Dados climatológicos	47
3.2	Dados de produtividade	48
3.3	Curvas de retenção	50
3.4	Funções de pedotransferência	52
3.4. 1	Elaboração e desenvolvimento de PTF	
3.5	Métodos e descrição teórica modelo SWAP	55
3.5.1	Balanço de água	
3.5.2	Desenvolvimento e crescimento de culturas	
3.5.3	Estágio de desenvolvimento da cultura	63
3.6	Métodos de avaliação das PTF	64
3.6.1	Avaliação estatística dos parâmetros do modelo das PTF	
3.6.2	Avaliação funcional das PTF	68
4 RES	ULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1	Desenvolvimento das funções de pedotransferência	73
4.1.1	Sistematização do conjunto de dados	
4.1.2	Funções de pedotransferência paramétricas e sua avaliação	79
4.1.3	Avaliação das PTF paramétricas como estimadoras do teor de água em potenciais	
	matriciais específicos	
4.2	Simulações agro-hidrológicas para avaliação funcional das PTF	99
4.2.1	Serra Talhada (PE)	99
4.2.1.1	,	
4.2.1.2	Estimativa da produtividade pelo modelo SWAP	102
4.2.2	Araripina (PE)	
4.2.2.1	Avaliação das curvas de retenção obtidas diretamente no local e por PTF	
4.2.2.2	1 1	
4.2.3	Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE)	
4.2.3.1	Avaliação das curvas de retenção obtidas diretamente e por PTF	
4.2.3.2	1	
4.2.4	Análise conjunta	130

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	137
REFERÊNCIAS	139

RESUMO

Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico

Foram desenvolvidas funções de pedotransferência (PTF) para estimar os parâmetros (α, n, θr e θs) do modelo de Van Genuchten (1980) utilizado para descrever curvas de retenção de água no solo. Os dados utilizados foram provenientes de diversas fontes, principalmente de estudos realizados na região Nordeste pelas Universidades, Embrapa e Codevasf, totalizando 786 curvas de retenção, as quais foram divididas em dois conjuntos de dados: 85% para desenvolvimento das PTF; e 15% para teste e validação, considerados como dados independentes. Além do desenvolvimento das PTF de caráter generalizado para todos os solos, foram desenvolvidas PTF específicas para as classes Argissolos, Latossolos, Neossolos e Planossolos. As PTF foram desenvolvidas utilizando técnicas de regressão múltipla, utilizando o procedimento stepwise (forward e backward) para selecionar os melhores preditores. Duas PTF foram desenvolvidas: a) incluindo todos os preditores, densidade do solo, teores de areia, silte e argila e de matéria orgânica e b) apenas com os teores de areia, silte e argila. A avaliação estatística das PTF foi feita de acordo o coeficiente de determinação (R^2) , o índice de Willmott (d) e o índice confiança (IC). Para avaliação da estimativa do teor de água em potenciais matriciais específicos foi utilizado a raiz do erro médio quadrado (RMSE). A avaliação funcional das PTF paramétricas foi realizada examinando o seu desempenho no contexto do modelo SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant). Os parâmetros θ s, θ r, α e n desenvolvidos por meio de PTF para o modelo de Van Genuchten foram introduzidos no modelo SWAP para verificar a viabilidade da utilização de funções de pedotransferência para descrever atributos físico-hídricos do solo e previsão do rendimento agrícola. Essa viabilidade foi avaliada pelo desempenho do modelo comparando suas estimativas da produtividade agrícola com valores observados. Para os parâmetros α e n da equação de Van Genuchten, as PTF demonstraram baixa capacidade preditiva, no entanto, para o parâmetro θr a predição foi melhor. Em potenciais matriciais específicos (-10, -33 e -1500 kPa), a capacidade preditiva das PTF foi maior, o que possibilita a utilização em modelos de simulação que requerem apenas aproximações da capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível. O desempenho das PTF específicas por classes de solo foi similar ao da PTF Geral, evidenciando que o agrupamento de solos para desenvolver as PTF por classe foi pouco vantajoso. O desempenho na estimativa do teor de água no solo foi melhor para as PTF desenvolvidas com teores granulométricos, matéria orgânica e densidade do solo. Os resultados das simulações de rendimento agrícola utilizando PTF não diferem muito daquelas que empregam outros métodos. Além disso, aplicados em séries de dados mais prolongadas, os erros são reduzidos devido à inerente variabilidade espaço-temporal da produtividade.

Palavras-chaves: Pedotransferência; Modelo; Simulação; SWAP; Feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.); Milho (*Zea mays* L.); Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)

ABSTRACT

Development of pedotransfer functions and their application in agrohydrological models

Pedotransfer functions (PTF) were developed to estimate the parameters (α , n, θ r and θ s) of the Van Genuchten (1980) soil water retention model. Data for 786 retention curves were obtained from several sources, mainly from studies from the Northeastern region of Brazil performed by universities, Embrapa and Codevasf. The data were divided in two groups: 85% of data for PTF development; and 15%, considered to be independent, for testing and validation. Besides development of general PTFs for all soils, for the classes Ultisols, Ferralsols, Entisols and Planosols specific PTFs were developed. Techniques of multiple regression, specifically the procedure stepwise (forward and backward) were used to select the best predictors. Two PTFs were developed: a) including all predictors (soil density and contents of sand, silt, clay and organic matter) and b) including only the contents of sand, silt and clay. The statistical performance of each PTF was evaluated from the coefficient of determination (R²), the Willmott index (d) and the confidence index (IC). To evaluate the prediction of soil water content at specific pressure heads, the root mean squared error (RMSE) was used. The functional evaluation of parametric PTFs was done examining performance of PTF estimated parameters in the context of the model SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant). The parameters α , n, θ r and θ s estimated through PTF were introduced in the model to evaluate, by comparison to observed yields, the performance of the PTF when its predictions were used to estimate agricultural productivity. The PTFs showed a low predictive capacity for parameters α and n, however, for parameters θ r and θ s the fits were better. At specific pressure heads (-10, -33 and -1500 kPa), the predictive performance of the PTF was better, allowing the use in simulation models that require only values of field capacity, permanent wilting point and available water content. The performance of the specific PTF for soil classes was better than the general PTF, but the difference was small, showing that grouping of soils to develop PTF per class seems to be of little advantage. The results of the simulations of agricultural productivity, using PTF, are similar to those that use more traditional methods. Moreover, when applied in long data series the errors are reduced due to the inherent space-temporary variability of the productivity.

Keywords: Pedotransfer; Model; Simulation; SWAP; Corn (*Zea mays* L.); Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.); Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático para representar os tipos de modelos de balanço hídrico do solo a) tipping bucket,
b) tipping bucket com múltiplas camadas; e c) modelo complexo. Adaptado de Ranatunga et al. (2008)33
Figura 2 – Exemplo demonstrando que variações dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) podem
produzir ajustes semelhantes na estimativa da curva de retenção de água no solo. Adaptado de Minasny
(2000)
Figura 3 - Curvas de retenção para quatro combinações dos parâmetros α e n da equação de Van Genuchten (1980)46
Figura 4 - Localização dos postos pluviométricos utilizados nesse estudo
Figura 5 - Localização dos solos cujos dados foram utilizadas para o desenvolvimento das funções de
pedotransferência
Figura 6 - Representação simplificada dos processos agro-hidrológicos incorporados no SWAP. Adaptado de Kroes e
Van Dam (2003)
Figura 7 - Coeficiente de redução α_{rw} da absorção de água pela raiz como função do potencial matricial de água no
solo (h) e a taxa de transpiração potencial (Tp). Adaptado de Kroes e Van Dam (2003)61
Figura 8 - Coeficiente de redução α_{rs} da absorção de água pela raiz como função da condutividade elétrica da água no
solo (EC). Adaptado de Kroes e Van Dam (2003)
Figura 9 - Representação simplificada dos processos de desenvolvimento e crescimento de culturas incorporados no
módulo detalhado do modelo SWAP. Adaptado de Kroes e Van Dam (2003)
Figura 10 - Representação simplificada dos estágios de desenvolvimento de uma cultura. Adaptado de Kroes e Van
Dam (2003)63
Figura 11 - Representação dos principais procedimentos para avaliação estatística dos parâmetros da equação de Van
Genuchten (1980), estimados com ajuste das curvas originais e por meio de PTF66
Figura 12- Representação da metodologia para avaliar as PTF paramétricas como estimadores do teor de água em
potenciais matriciais específicos
Figura 13 - Representação da metodologia para avaliação funcional das PTF paramétricas na simulação da
produtividade agrícola no modelo SWAP
Figura 14 - Classificação textural dos solos utilizados para o desenvolvimento e validação das PTF73
Figura 15 - Box-plots dos teores granulométricos e de matéria orgânica (MO) e de densidade do solo para os locais
de coleta (n=786)
Figura 16 - Box-plots do teor de água em potenciais matriciais específicos, utilizados para as estimativas dos
parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980), no conjunto de dados utilizados para o
desenvolvimento e validação das PTF
Figura 17 - Box-plots das estimativas dos parâmetros do modelo de Van Genuchten para os diferentes locais de
coleta (n=786)

Figura 18 - Correlações entre os parâmetros da equação de Van Genuchten (log α, n, θr e θs) e os teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo (n=786). A linha tracejada representa a regressão linear
Figura 19 - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) observados por ajuste aos dados originais dos solos
versus estimados por PTF - Dasam, utilizando teores de granulometria, matéria orgânica e de densidade
do solo para o conjunto de dados utilizados no desenvolvimento. A linha cheia representa a reta 1:1. O
valor de R ² refere-se à regressão linear
Figura 20 - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) observados por ajuste aos dados originais dos solos
versus estimados por PTF – Dasam, utilizando teores de granulometria, matéria orgânica e de densidade
do solo para o conjunto de dados utilizados na validação. A linha cheia representa a equação a reta 1:1.
O valor de R ² refere-se à regressão linear
Figura 21 - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) observados por ajuste aos dados originais dos solos
versus estimados por PTF - Asa, utilizando apenas a granulometria do solo para o conjunto de dados
utilizados no desenvolvimento. A linha cheia representa a reta 1:1. O valor de R ² refere-se à regressão
linear
Figura 22 - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) observados por ajuste aos dados originais dos solos
versus estimados por PTF - Asa, utilizando apenas a granulometria do solo para o conjunto de dados
utilizados na validação. A linha cheia representa a reta 1:1. O valor de R² refere-se à regressão linear . 91
Figura 23 – Ilustração das correlações entre teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo e o teor
de água no solo retida a potenciais matriciais específicos (-6, -10, -30 e -1500 kPa). A linha tracejada
representa a regressão linear
Figura 24 - Valores observados versus estimados de teor de água em potenciais matriciais específicos para a) dados
observados e obtidos por ajuste aos dados observados; b) dados observados e obtidos por PTF - Dasam.
As PTF foram estimadas utilizando a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo. A linha
cheia representa a reta 1:1. O valor de R ² refere-se à regressão linear
Figura 25 - Valores observados versus estimados de teor de água em potenciais matriciais específicos para a) dados
observados e obtidos por ajuste aos dados observados; b) dados observados e obtidos por PTF - Asa. As
PTF foram estimadas utilizando apenas a granulometria. A linha cheia a reta 1:1. O valor de R ² refere-se
à regressão linear
Figura 26 - Curvas de retenção de água do solo a 0-30 e 30-60 cm de profundidade no município de Serra Talhada
(PE). A linha cheia representa a curva original obtida no local e a tracejada a curva obtida pelas PTF
Geral (Dasam e Asa). h ₁ , h ₂ , h _{3h} , h _{3l} e h ₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de
água para a cultura do sorgo (Tabela 8)101
Figura 27 - Curvas de retenção de água do solo a 0-30 e 30-60 cm de profundidade no município de Serra Talhada
(PE). A linha cheia representa a curva original obtida no local e a tracejada a curva obtida pelas PTF
Neossolos (Dasam e Asa). h_1 , h_2 , h_{3h} , h_{3l} e h_4 correspondem aos potenciais matriciais limites de extração
de água para a cultura do sorgo (Tabela 8)

Figura 28 - Produtividade da cultura do sorgo estimada pelo modelo SWAP, utilizando a curva de retenção de água
local (Neossolo) a curva de retenção estimada pela PTF Geral (Dasam e Asa) e a curva de retenção
estimada por PTF Neossolo (Dasam e Asa). A linha cheia representa a reta 1:1
Figura 29 - Curvas de retenção de água do solo a 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm de profundidade no município de
Araripina (PE). A linha cheia representa a curva obtida no local e a tracejada a curva obtida pelas PTF
Geral (Dasam e Asa). h ₁ , h ₂ , h _{3h} , h _{3l} e h ₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de
água para a cultura do sorgo () e do milho (-) (Tabela 8)
Figura 30 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm de profundidade no município d
Araripina (PE). A linha cheia representa a curva obtida no local e a tracejada a curva obtida pelas PTF
Latossolo (Dasam e Asa). h ₁ , h ₂ , h _{3h} , h _{3l} e h ₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração
de água para a cultura do sorgo () e do milho (-) (Tabela 8)
Figura 31 - Produtividade da cultura do sorgo estimada pelo modelo SWAP, utilizando a curva de retenção de água
local (Latossolo); a curva de retenção estimada por PTF Geral (Dasam e Asa) e a curva de retenção
estimada por PTF Latossolo (Dasam e Asa). A Linha cheia representa a reta 1:111
Figura 32 - Produtividade da cultura do milho estimada pelo modelo SWAP para a localidade de Araripina, em 11
safras, entre 1994 a 2006, utilizando a curva de retenção de água local (Latossolo); a curva de retenção
estimada por PTF Geral (Dasam e Asa) e a curva de retenção estimada por PTF Latossolo (Dasam e
Asa). A linha cheia representa a reta 1:1
Figura 33 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm de profundidade no município d
Areia (PB). A linha sólida representa à curva original obtida no local e a curva tracejada obtida pela PT
Geral (Dasam e Asa). h ₁ , h ₂ , h _{3h} , h _{3l} e h ₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de
água para a cultura do feijão caupi (Tabela 8)12
Figura 34- Curvas de retenção de água no do solo a 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm de profundidade no município de
Areia (PB). A linha sólida representa à curva original obtida no local e a curva tracejada obtida pela PT
Latossolo (Dasam e Asa). h ₁ , h ₂ , h _{3h} , h _{3l} e h ₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração
de água para a cultura do feijão caupi (Tabela 8)
Figura 35 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-15, 15-40, 40-60 e 60-115 cm de profundidade no município
de Cruz das Almas (BA). A linha cheia representa a curva original obtida no local e a curva tracejada
obtida pela PTF Geral (Dasam e Asa). h ₁ , h ₂ , h _{3h} , h _{3l} e h ₄ correspondem aos potenciais matriciais limites
de extração de água para a cultura do milho (Tabela 8)
Figura 36 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-15, 15-40, 40-60 e 60-115 cm de profundidade no município
de Cruz das Almas (BA). A linha cheia representa à curva original obtida no local e a curva tracejada
obtida pela PTF Argissolo (Dasam e Asa). h ₁ , h ₂ , h _{3h} , h _{3l} e h ₄ correspondem aos potenciais matriciais
limites de extração de água para a cultura do milho (Tabela 8)
Figura 37 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-20 e 20-40 cm de profundidade no município de Umbaúba
(SE). A linha cheia representa a curva original obtida no local e a curva tracejada obtida pela PTF Geral
(Dasam e Asa). h ₁ , h ₂ , h _{3h} , h _{3l} e h ₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água
para a cultura do feijão caupi (Tabela 8)12

Figura 38 -	Curvas de retenção de água no do solo a 0-20 e 20-40 cm de profundidade no município de Umbaúba	
	(SE). A linha cheia representa a curva original obtida no local e a curva tracejada obtida pela PTF	
	$Argissolo (Dasam e Asa). h_1, h_2, h_{3h}, h_{3l} e h_4 correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de potenciais de $	o
	de água para a cultura do feijão caupi (Tabela 8)1	27
Figura 39 –	Índice de confiança (IC) da produtividade agrícola conjunta observada e estimada pelo modelo SWAP,	,
	utilizando a curva de retenção local, PTF Geral (Dasam e Asa) e Específica (Dasam e Asa)1	32
Figura 40 -	Produtividade agrícola conjunta observada e estimada pelo modelo SWAP, utilizando a curva de retenç	ãc
	local, PTF Geral (Dasam e Asa) e Específica (Dasam e Asa). A linha cheia representa a reta 1:11	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Funções de pedotransferência desenvolvidas para solos do Brasil. Modificado de Minasny et al. (2003) e
Netto (2007)
Tabela 2 - Medidas da raiz do erro médio quadrado (RMSE) relatados na literatura no desenvolvimento de PTF para
diversas regiões. Adaptado de Cornelis et al. (2001)
Tabela 3 - Postos meteorológicos utilizados para simulação da produtividade agrícola por município, localização,
período e instituição responsável
Tabela 4 - Locais por município, cultura e períodos utilizados na simulação da produtividade agrícola do feijão
caupi, milho e sorgo na Região Nordeste do Brasil
Tabela 5 - Exemplo de descrição dos principais atributos dos solos considerados na base de dados utilizada para o
desenvolvimento das funções de pedotransferência
Tabela 6 - Número de perfis utilizados na elaboração e validação das funções de pedotransferência para a Região
Nordeste, separadas por classe de solos
$\label{thm:conductividade} Tabela~7-Condutividade~hidráulica~saturada~(K_{sat})~utilizada~para~simular~a~produtividade~no~modelo~SWAP~em$
cinco localidades da região Nordeste do Brasil
Tabela 8 - Potenciais matriciais (cm) limites de extração de água (figura 7) pelas culturas do milho, sorgo e feijão
caupi, utilizados para simular a produtividade no modelo SWAP
Tabela 9 - Culturas e número de anos com dados de produtividade disponível nos cinco locais avaliados70
Tabela 10 - Critério de interpretação do índice de confiança (IC) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997)71
Tabela 11 - Parâmetros da cultura utilizados no modelo SWAP para simular a produtividade agrícola das culturas do
milho, sorgo e feijão caupi
Tabela 12 - Estatísticas descritivas dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila e de densidade do solo nos 786
pontos utilizados para o desenvolvimento (subconjunto A) e validação (subconjunto B) das funções de
pedotransferência de caráter geral
Tabela 13 - Estatísticas descritivas dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila e de densidade do solo nos 179
pontos utilizados para o desenvolvimento (subconjunto A) e validação (subconjunto B) das funções de
pedotransferência para a classe dos Argissolos
Tabela 14- Estatísticas descritivas dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila e de densidade do solo nos 343
pontos utilizados para o desenvolvimento (subconjunto A) e validação (subconjunto B) das funções de
pedotransferência para a classe dos Latossolos
Tabela 15 - Estatísticas descritivas dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila e de densidade do solo nos 63
pontos utilizados para o desenvolvimento (subconjunto A) e validação (subconjunto B) das funções de
pedotransferência para a classe dos Planossolos

Tabela 16 - Estatisticas descritivas dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila e de densidade do solo nos 172
pontos utilizados para o desenvolvimento (subconjunto A) e validar (subconjunto B) das funções de
pedotransferência para a classe dos Neossolos
Tabela 17 - Estatísticas descritivas dos parâmetros da equação de Van Genuchten dos solos utilizados para o
desenvolvimento das funções de pedotransferência (subconjunto A) e validação (subconjunto B) 79
Tabela 18 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para todos os solos (Geral)
utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e
propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo
Tabela 19 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para classe Argissolo
utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e
propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo
Tabela 20 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para classe Latossolo
utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e
propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo
Tabela 21 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para classe Neossolo
utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e
propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo
Tabela 22 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para classe Planossolo
utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e
propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo
Tabela 23 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Asa) para todos os solos (Geral)
utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e
propriedades relacionadas à granulometria
Tabela 24 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Asa) para classe Argissolo utilizadas
para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades
relacionadas à granulometria
Tabela 25 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Asa) para classe Latossolo utilizadas
para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades
relacionadas à granulometria
Tabela 26 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Asa) para classe Neossolo utilizadas
para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades
relacionadas à granulometria
Tabela 27 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Asa) para classe Planossolo utilizadas
para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades
relacionadas à granulometria
Tabela 28 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros da equação de Van Genuchten (log α , n, θ r e θ s) e os
teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo (n=786)

Tabela 29 -	Medidas de adequação estatística dos modelos de regressão múltipla (PTF Dasam) para todos os solos
	(Geral) e por classe de solo, utilizados para estimar parâmetros do modelo de Van Genuchten, utilizando
	como preditores teores de areia, silte, argila, matéria orgânica e de densidade do solo
Tabela 30 -	Medidas de adequação estatística dos modelos de regressão múltipla (PTF Asa) para todos os solos
	(Geral) e por classe de solo, utilizados para estimar parâmetros do modelo de Van Genuchten, utilizando
	como preditores apenas teores de areia, silte e argila
Tabela 31 -	Coeficiente de correlação entre teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e de densidade do solo e o
1 40 014 0 1	teor de água no solo a potenciais matriciais específicos
Tabela 32 -	Raiz do erro médio quadrado (RMSE) do teor de água no solo a potenciais matriciais específicos para as
14001402	PTF desenvolvidas, utilizando a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo (Dasam) e
	apenas a granulometria (Asa)
Tabela 33 -	Teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo, correspondente ao tipo de solo do
ruociu 33	local (Neossolo), utilizados para calcular as PTF no município de Serra Talhada (PE)100
Tabela 34 -	Parâmetros da equação de Van Genuchten, referentes às profundidades, 0-30 e 30-60 cm, utilizados no
rabela 54	modelo SWAP para simular a produtividade agrícola do sorgo no município de Serra Talhada (PE),
	obtidos pelos dados locais (Neossolo) e pelas PTF Dasam e Asa
Tabela 35 -	Raiz do erro médio quadrado (RMSE) utilizados para comparar os teores de água observados na curva de
1 aocia 33 -	retenção local e estimados por meio de PTF no município de Serra Talhada (PE)
Tabala 26	Medidas de adequação estatística e produtividade da cultura do sorgo estimada pelo modelo SWAP,
1 aucia 30 -	utilizando os parâmetros da equação de Van Genuchten da curva de retenção local (Neossolo) e
	estimado por PTF Geral (Dasam e Asa) e PTF Neossolo (Dasam e Asa), no município de Serra Talhada
T-1-1-27	(PE)
Tabela 3/-	Teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo, correspondente ao tipo de solo do
T. 1. 20	local (Latossolo), utilizados para calcular as PTF no município de Araripina (PE)
Tabela 38 -	Parâmetros da equação de Van Genuchten, referentes às profundidades, 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm,
	utilizados no modelo SWAP para simular a produtividade agrícola do feijão caupi no município de
	Araripina (PE), obtidos pelos dados locais (Latossolo) e por PTF Geral (Dasam e Asa) e PTF Latossolo
	(Dasam e Asa)
Tabela 39 -	Raiz do erro médio quadrado (RMSE) utilizado para comparar os teores de água observados na curva de
	retenção original e estimados por meio de PTF no município de Araripina (PE)
Tabela 40 -	Medidas de adequação estatística e produtividade da cultura do sorgo estimada pelo modelo SWAP,
	utilizando os parâmetros da equação de Van Genuchten da curva de retenção local (Latossolo), e
	estimado por PTF Geral (Dasam e Asa) e PTF Latossolo (Dasam e Asa) no município de Araripina (PE)
Tabela 41 -	Medidas de adequação estatística e produtividade da cultura do milho estimada pelo modelo SWAP,
	utilizando os parâmetros da equação de Van Genuchten da curva de retenção local (Latossolo), e
	estimado por PTF Geral (Dasam e Asa) e PTF Latossolo (Dasam e Asa) no município de Araripina (PE)

Tabela 42 -	· Teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo, correspondente ao tipo de solo do
	local, utilizados para calcular as PTF nos municípios de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba
	(SE)
Tabela 43 -	Parâmetros da equação de van Genuchten utilizados no modelo SWAP para simular a produtividade
	agrícola nos município de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE) obtidos pelo ajuste das
	curvas aos dados locais e pelas as PTF (Dasam), utilizando teores de granulometria, matéria orgânica e
	de densidade do solo
Tabela 44 -	Parâmetros da equação de van Genuchten utilizados no modelo SWAP para simular a produtividade
	agrícola nos município de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE) obtidos pelo ajuste das
	curvas aos dados locais e pelas as PTF (Asa), utilizando apenas teores granulométricos do solo120
Tabela 45 -	· Raiz do erro médio quadrado (RMSE) utilizados para comparar os teores de água observados na curva de
	retenção local e estimados por meio de PTF (Dasam e Asa) nos municípios de Areia (PB), Cruz das
	Almas (BA) e Umbaúba (SE)
Tabela 46 -	Produtividade das culturas do feijão caupi e do milho estimada no modelo SWAP, utilizando os
	parâmetros da equação de Van Genuchten da curva de retenção local e estimada por PTF Geral (Dasam
	e Asa) e PTF específica (Dasam e Asa), nos município de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba
	(SE)
Tabela 47 -	Medidas de adequação estatística e da produtividade agrícola para todas as simulações utilizando curvas
	de retenção do local e PTF geral e específica (Dasam e Asa), desenvolvidas com a granulometria, a
	matéria orgânica e a densidade do solo

LISTA DE SÍMBOLOS

			(continua)
Símbolo	Descrição	Dimensão	Unidade
cvl	Eficiência de conversão de CO ₂ para folhas	M M ⁻¹	kg kg ⁻¹
cvo	Eficiência de conversão de CO ₂ para órgãos de armazenamento	M M ⁻¹	kg kg ⁻¹
cvr	Eficiência de conversão de CO ₂ para as raízes	$M M^{-1}$	kg kg ⁻¹
cvs	Eficiência de conversão de CO ₂ para o caule	$M M^{-1}$	kg kg ⁻¹
dlo	Fotoperíodo ótimo	T	h
$\mathrm{D}_{\mathrm{raiz}}$	Profundidade do sistema radicular	L	cm
Ds	Estágio de desenvolvimento da cultura	-	-
ea	Pressão parcial de vapor	$M L^{-1} T^{-2}$	kPa
Ea	Evaporação atual do solo	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
EF	Eficiência fotossintética	$L^{-2} T^2$	kg J ⁻¹
E_{max}	Densidade do fluxo máximo de água no solo	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
E_{po}	Evaporação de um solo nu	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
es	Pressão de saturação de vapor	$\mathrm{M~L^{1}~T^{2}}$	kPa
ЕТро	Evapotranspiração potencial de uma cultura específica para condição seca	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
ETPref	Evapotranspiração potencial de referência da cultura	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
ETwo	Evapotranspiração potencial de uma cultura específica para condição úmida	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
GD	Graus-dias	ΘΤ	$^{\mathrm{o}}\mathrm{C}\;\mathrm{d}^{\mathrm{-1}}$
Н	Potencial hidráulico	L ou M	cm, kPa
h	Potencial matricial do solo	L	cm
h_1	Potencial matricial na primeira camada	L	cm
I	Lâmina de irrigação	L	cm
K	Condutividade hidráulica do solo	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
$K_{1/2}$	Condutividade hidráulica média do solo	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
Kc	Coeficiente de cultivo	-	-

LISTA DE SÍMBOLOS

(continuação)

Símbolo	Descrição	Dimensão	Unidade
kdir	Coeficiente de extinção da luz direta	-	-
K_{g}	Coeficiente de extinção da radiação solar.	-	-
Ksat	Condutividade hidráulica do solo saturada	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
Ksolo	Coeficiente do solo	-	-
LAI	Índice de área foliar (m² m-²)	-	-
n	Parâmetro empírico na equação de Van-Genuchten	-	-
P	Precipitação	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
Pe	Percolação de água no solo	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
Pi	Precipitação interceptada pela vegetação	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
q	Densidade de fluxo de água vertical	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
Q10	Fator de aumento da respiração a cada 10° C de aumento de temperatura	-	-
R	Escoamento superficial	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
rdc	Profundidade máxima do sistema radicular	L	cm
rml	Respiração de manutenção das folhas	$M L^{-2} T^{-1}$	kgCH ₂ O/kgd
rmo	Respiração de manutenção dos órgãos de armazenamento	$M L^{-2} T^{-1}$	kgCH ₂ O/kgd
rmr	Respiração de manutenção das raízes	$M L^{-2} T^{-1}$	kgCH ₂ O/kgd
rms	Respiração de manutenção do caule	$M L^{-2} T^{-1}$	kgCH ₂ O/kgd
Rn	Radiação líquida total	M T ⁻³	$MJm^{-2}d^{-1}$
S	Declividade da curva de pressão de vapor	$M L^{-1} T^{-2} \Theta^{-1}$	kPa °C ⁻¹
S_a	taxa de extração da água do solo pelas raízes	$L^{3}L^{-3}T^{-1}$	$m^3 m^{-3} d^{-1}$
SLA	Área foliar específica	$L M^{-1}$	ha kg ⁻¹
t	Tempo	T	d
T	Temperatura média do ar	Θ	°C
Ta	Transpiração atual	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
Tb	Temperatura base	Θ	°C
Tmax	Temperatura do ar máxima diária	Θ	°C
Tmin	Temperatura do ar mínima diária	Θ	°C

LISTA DE SÍMBOLOS

(conclusão)

Símbolo	Descrição	Dimensão	Unidade
To	Temperatura do ponto de orvalho	Θ	°C
Tp	Transpiração potencial	L T ⁻¹	cm d ⁻¹
TR	Transpiração relativa (Ta/Tp)	-	-
Tsumam	Graus-dias do florescimento a maturidade	ΘΤ	°C d
Tsumea	Graus-dias da emergência ao florescimento	ΘΤ	°C d
U_2	Velocidade do vento a 2 metros de altura	L T ⁻¹	$m s^{-1}$
z	Coordenada vertical	L	cm
α	Parâmetro empírico no modelo de Van-Genuchten	$M L^{-1} T^{-2}$	cm ⁻¹
$\alpha_{rd} \\$	Coeficiente de redução devido à deficiência hídrica	-	-
α_{rs}	Coeficiente de redução devido à salinidade	-	-
α_{rw}	Coeficiente de redução devido ao excesso hídrico	-	-
Θ	Saturação relativa do solo	-	$m^3 m^{-3}$
θ	Teor de água no solo	-	$m^3 m^{-3}$
$ heta_{ ext{Est}}$	Teor de água no solo estimado/simulado	-	$m^3 m^{-3}$
$ heta_{ m obs}$	Teor de água no solo observado	-	$m^3 m^{-3}$
$ heta r_{es}$	Teor de água no solo residual	-	$m^3 m^{-3}$
$ heta_{ m sat}$	Teor de água no solo saturado	-	$m^3 m^{-3}$
λ	Constante psicrométrica	$M L^{-1} T^{-2} \Theta^{-1}$	kPa °C ⁻¹

1 INTRODUÇÃO

As nações unidas afirmam que entre os dez maiores problemas da humanidade nos próximos 50 anos, pelo menos quatro se relacionam diretamente com a agricultura: a falta de água, alimentos, energia e a destruição do meio ambiente. Estimam um aumento de 65% na população mundial entre 1995 e 2050, com maiores crescimentos em países em desenvolvimento, como o Brasil.

Esse cenário de demanda por mais alimentos poderá ser agravado por mudanças no clima, como prevê o quarto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (International Panel on Climate Change - IPCC) que aponta o Brasil como uma das regiões afetadas, com possível elevação da temperatura e agravamento da escassez hídrica. Essas questões demandarão um grande esforço na construção de modelos de simulação, capazes de indicar e orientar medidas que viabilizem a produção de alimentos e aumentem a capacidade de auxiliar políticas de gestão e planejamento.

Modelos de simulação aplicados ao sistema agrícola podem ser utilizados para diversos propósitos, incluindo o monitoramento do movimento de água, solutos e poluentes do solo, previsão do rendimento de culturas, além do monitoramento da irrigação e de impactos ambientais, como erosão e poluição de aquíferos. Todos esses processos assumem maior importância quando são integrados com outros sistemas biológicos, econômicos e ambientais, capazes de fornecer análises conjuntas que permitem avaliar cenários e tomar medidas mais adequadas de sustentabilidade alimentar ou ambientais.

Modelos permitem prever futuras produções agrícolas sob diferentes cenários, inclusive do clima, e são capazes de simular o sistema solo-planta-atmosfera e interações que nele ocorrem, indicando a viabilidade de medidas de mitigação e adaptação à vulnerabilidade agrícola.

A falta de dados sobre o clima, culturas e os solos, sobretudo os atributos físico-hídricos, tem restringido a utilização de modelos para simular a dinâmica de água e solutos no solo e seus impactos na agricultura, particularmente no rendimento e na produtividade de culturas. A carência de dados tem levado ao desenvolvimento de modelos com balanços hídricos muito simplificados, limitando estudos mais detalhados sobre a dinâmica da água no solo e seu efeito sobre o estresse hídrico e rendimento das culturas.

Essa deficiência de dados físico-hídricos pode ser contornada pelo uso de funções de pedotransferência (pedotransfer functions - PTF), relações empíricas que permitem converter atributos geofísicos do solo em parâmetros físico-hídricos necessários à modelagem. O desenvolvimento de funções de pedotransferência para estimar as propriedades hidráulicas do solo pode, por um lado, auxiliar no desenvolvimento e aperfeiçoamento de métodos para estimar o armazenamento de água e soluto no solo, e por outro, contribuir para o desenvolvimento e testes de modelos de simulação para estimar o rendimento e a produtividade agrícola.

Na presente tese verifica-se a viabilidade da utilização de funções de pedotransferência para descrever atributos físico-hídricos do solo e utilizá-las em um modelo agro-hidrológico de previsão do rendimento agrícola. Essa viabilidade será avaliada pelo desempenho do modelo comparando suas estimativas da produtividade agrícola com valores observados.

1.1 Objetivos

Os objetivos dessa tese são:

- i. desenvolver funções de pedotransferência (PTF) para estimar a relação entre potencial matricial e teor de água no solo ("curva de retenção") para regiões do Nordeste brasileiro;
- ii. avaliar as funções de pedotransferência, comparando os parâmetros que definem a curva de retenção estimados por PTF com os determinados por ajuste aos dados originais;
- iii. testar e avaliar o uso das PTF em combinação com um modelo agro-hidrológico (SWAP) para a estimativa do rendimento do feijão caupi, do milho e do sorgo na Região Nordeste; e
- iv. avaliar a metodologia para estimar atributos físico-hidrícos do solo, por meio de técnicas de pedotransferência, especificamente, curvas de retenção de água para solos do Nordeste.

O presente trabalho é apresentado de acordo com as etapas realizadas no estudo: a primeira parte consta da revisão bibliográfica. A segunda descreve os métodos utilizados para o desenvolvimento e avaliação das funções de pedotransferência e das simulações do modelo SWAP. Na terceira parte são discutidos os testes do modelo com os resultados observados e

simulados de produtividade agrícola, utilizando as curvas de retenção de água no solo originais e calculadas por meio das funções de pedotransferência e; na quarta parte são apresentados os resumos, conclusões e sugestões referentes à avaliação e utilização das funções de pedotransferência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modelos de simulação do sistema agrícola

2.1.1 Conceito de modelo

Um sistema é uma parte limitada da realidade que contém elementos inter-relacionados. A totalidade das relações dentro do sistema é denominada de estrutura do sistema. Um modelo matemático é uma representação simplificada do sistema por meio de uma equação, ou um conjunto de equações, que procura reproduzir numericamente os processos que ocorrem em um sistema real (THORNLEY, 1976; WITT, 1982).

As contribuições de modelos à pesquisa agrícola envolvem um grande espectro de aplicações: (i) fornecer uma perspectiva coerente sobre o desempenho de todo o sistema; (ii) formular uma descrição precisa sobre novas hipóteses geradas, as quais devem ser testadas para ajudar a definir áreas onde o conhecimento é limitado; (iii) estimular uma integração interdisciplinar; (iv) descrever de forma concisa um grande número de observações isoladas; e (v) predizer o comportamento do sistema em combinações de condições não experimentadas anteriormente (FRANCE; THORNLEY, 1984; JONES, 1986).

No estudo do sistema solo-planta-atmosfera, os modelos são classificados em dois tipos: modelos empíricos ou estatísticos (estocásticos) e modelos mecanísticos. Modelos empíricos quantificam processos de causa-efeito e, embora descrevam relações existentes entre as variáveis, não se referem a qualquer estrutura biológica ou física que possa existir entre as mesmas (REYNOLDYS et al., 1985). Esses modelos descrevem as inter-relações no sistema por intermédio de procedimentos estatísticos.

Os modelos mecanísticos descrevem os mecanismos sistemáticos que dão origem aos fenômenos estudados. Nesses modelos, as funções matemáticas representam o conhecimento e/ou as hipóteses que relatam o comportamento observado dos fenômenos. Três tipos de modelos mecanísticos podem ser reconhecidos: os estocásticos, determinísticos e dinâmicos.

Os modelos estocásticos são aqueles baseados na probabilidade de ocorrência de alguns eventos e de variáveis exógenas; nos modelos determinísticos não existem graus de probabilidade

associados às respostas; os modelos dinâmicos que se fundamentam na integração espaçotemporal são aqueles que procuram descrever as variações no tempo. A grande maioria dos modelos desenvolvidos nos últimos anos é uma combinação dos tipos mecanístico, dinâmico e determinístico.

2.1.2 Modelagem do rendimento agrícola

O teor de água e a capacidade do solo em armazená-la são decisivos à produtividade agrícola. Globalmente, a falta ou excesso de água no solo é a principal causa na redução do rendimento agrícola. A forma como é calculado o balanço de água do solo por um modelo pode afetar significativamente os resultados das simulações.

Maraux et al. (1998) e mais recentemente Gomes (2005) investigaram uma série de modelos voltados à agricultura, principalmente com relação aos tipos de balanços hídricos e como eles afetam o rendimento simulado das culturas. Em geral, nos modelos mais simplificados há maiores diferenças no rendimento agrícola simulado, devido às diferenças relacionadas ao cálculo de absorção de água pelas raízes, promovida pela distribuição de água no solo, bem como pela falta de distinção entre evaporação do solo e transpiração da cultura. Além disso, outro fator frequentemente ignorado pelos modelos mais simples é a ascensão capilar.

É importante considerar que a evaporação da água da superfície do solo é limitada pelas características hidráulicas do solo seco, enquanto que o processo de transpiração pode continuar, mesmo quando o teor de água do solo se encontra abaixo do nível crítico. Por outro lado, à medida que o sistema radicular cresce em profundidade aumenta a capacidade de água disponível no solo - CAD. A maioria dos modelos mais simplificados não acompanha essas alterações, por assumir a CAD fixa no tempo.

Os modelos do tipo "tipping bucket", muito utilizados em simulações para estimar o rendimento agrícola, são baseados no balanço de massa de água. O balanço hídrico é realizado ao longo do perfil de solo, dividido em camadas. A soma de água infiltrada ou evaporada do solo é calculada pela diferença entre o total de precipitação pluviométrica e evaporação. O máximo de água que cada camada pode armazenar é definido de acordo com a sua capacidade de campo (CC). No caso de excedente, esse é somado ao teor de água na camada imediatamente abaixo.

A extração de água pelas raízes é simulada em cada compartimento até um limite crítico de teor de água, denominado de ponto murcha permanente (PMP). Quando esse limite é alcançado, a extração de água cessa e é demandada de outras camadas. O total da água armazenada no solo é o somatório da água retida em cada compartimento ao longo do perfil do solo e a água disponível para as plantas é calculada pela diferença entre o teor de água atual e o PMP. Esse tipo de abordagem é amplamente utilizado por causa da sua relativa simplicidade. Na figura 1 são representados os principais tipos de modelos de balanço hídrico.

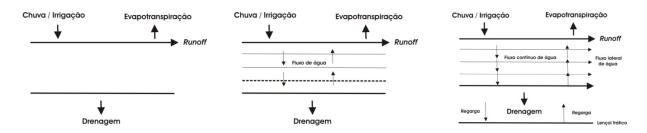


Figura 1 - Diagrama esquemático para representar os tipos de modelos de balanço hídrico do solo a) *tipping bucket*; b) *tipping bucket* com múltiplas camadas; e c) modelo complexo. Adaptado de Ranatunga et al. (2008)

As abordagens utilizadas nos modelos de simulação tipo "tipping bucket" são limitadas, devido à aplicação de conceitos como ponto de murcha permanente, capacidade de campo, umidade crítica, água capilar e água gravitacional, os quais geralmente não têm significado físico em um sistema dinâmico (REICHARDT; TIMM, 2004). Nesses casos, para o cálculo do balanço hídrico do solo necessita-se de hipóteses simplificadoras bastante restritivas. Entre os métodos mais utilizados mencionam-se os de Thorthwaite e Mather (1955) e Doorenbos e Kassam (1979).

Há evidências de que as simulações do rendimento agrícola diferem bastante em modelos que consideram também o fluxo de água no solo e a extração de água pelas raízes, influenciados por impactos de estresses ambientais (COSTA et al., 1988; OLIVEIRA et al., 2000; CORRÊA, 2001). De acordo com Ranatunga et al. (2008), modelos que consideram múltiplas camadas simulam a evaporação e a transpiração mais adequadamente. O teor de água crítico é normalmente estimado de modo empírico, em função da sensibilidade à deficiência hídrica da cultura e da demanda atmosférica (DOORENBOS; KASSAM, 1979; KROES; VAN DAM, 2003).

Apesar da constatação de que o bom desempenho dos modelos para simular o rendimento agrícola depende da eficiência na simulação dos processos do movimento de água e solutos no solo, o que se verifica é a utilização de modelos de simulação para estimativa do rendimento agrícola com um grande número de simplificações dos processos envolvidos, principalmente aqueles relacionados à dinâmica da água no solo. Entre os principais modelos se destacam: a) SARRA - Systeme d'analyse Regionale des Risques Agroclimatiques (CIRAD, 1995); b) SPAW - Soil, Plant, Atmosphere and Water (SAXTON; WILLEY, 2006); c) DSSAT - Decision Support System for Agrotechnology Transfer (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2004); d) CROPSYST - Cropping Systems Simulation Model (STOCKLE et al., 2003); e e) CROPWATER - Crop Water Requirements (SMITH; 1992; DOORENBOS; KASSAM, 1979). No Brasil: milho (SANS et al., 1997; BARROS, 1998), feijão (WREGE et al. 1997) e trigo (CUNHA et al., 1997).

Alguns desses modelos incorporam descrições mais elaboradas do balanço hídrico do solo, incorporando funções de fluxo de água no solo baseadas na lei de Darcy. De fato, é mais indicado um modelo mecanístico-dinâmico que utiliza a lei de Darcy e a equação de Richards para calcular a variação, no espaço e no tempo, do teor de água.

Diversos autores sugerem utilizar uma descrição mais correta, aplicando a equação de Richards e valores críticos do potencial matricial do solo (h) estimados em função da condutividade hidráulica (K), utilizando, por exemplo, o potencial de fluxo matricial (JONG VAN LIER; VAN DAM; METSELAAR; DUYNISVELD, 2008). Polak e Wallach (2001) afirmam que é mais recomendado utilizar a equação de Richards (1931) e considerar a condutividade hidráulica para expressar um limite crítico de extração de água pelas raízes, em vez de empregar um potencial matricial fixo.

A aplicação da equação de Richards demanda um nível maior de conhecimento sobre as características hidrodinâmicas do solo e de informações sobre a relação entre potencial matricial e teor de água, conhecida como curva característica de retenção de água no solo e condutividade hidráulica.

Singh et al. (2006) integraram o modelo dinâmico DRAINMOD com o Ceres-Maize para simular o crescimento e desenvolvimento do milho, como opção para simular o movimento e armazenamento de água no solo. Os resultados indicaram melhores ajustes entre o teor de água no solo medida e estimada, quando comparado com simulações utilizando apenas o Ceres-Maize,

com balanço hídrico simplificado, evidenciando que a modelagem da dinâmica da água do solo pode ser melhor descrita e produzir estimativas mais precisas do rendimento a agrícola.

Em resumo, é consenso que na modelagem da produtividade agrícola um dos pontos críticos é o balanço hídrico do solo. Por outro lado, a principal justificativa do uso dos modelos tipo "tipping bucket" é baseada nas limitações quanto ao nível de complexidade dos processos que envolvem a dinâmica da água no solo; à dificuldade de validação dos processos envolvidos; e ao aumento de informações necessárias à simulação, principalmente aquelas relacionadas às propriedades hidrodinâmicas do solo.

Superar essas limitações e prover informações sobre as propriedades hidráulicas do solo para melhorar os modelos de estimativa do rendimento agrícola se constitui um desafio.

2.2 Funções de pedotransferência

Cornelis et al. (2001); Rawls e Pachepsky, (2002) e Tomasella et al. (2003) afirmam que a representação da curva de retenção de água e da condutividade do solo, por meio de "funções de pedotransferência" é imprescindível no desenvolvimento da modelagem ambiental, sobretudo para o progresso de modelos com ênfase na produtividade agrícola.

A expressão "função de pedotransferência" (PTF) foi introduzida por Bouma (1989) para padronizar outros termos anteriormente utilizados com a mesma finalidade e com o significado de "transformar dados que possuímos em dados que necessitamos". Funções de pedotransferência podem ser definidas como funções utilizadas para fazer estimativas de propriedades dos solos a partir de outras propriedades medidas rotineiramente com maior facilidade e menor custo (MCBRATNEY et al., 2002). Essas funções surgiram no estágio inicial do desenvolvimento da ciência quantitativa do solo, numa tentativa de estimar algumas propriedades do solo a partir de outras, e quando tornou-se mais claro que todas as propriedades e processos estão relacionados e que algumas dessas propriedades determinam outras (SHEIN; ARKHANGEL'SKAYA, 2006).

As primeiras tentativas para o desenvolvimento de PTF podem ter sido oriundas do estudo de Briggs e Mclane (1907), posteriormente refinado por Briggs e Shantz (1912), quando propuseram a existência de uma correlação entre o teor de água no solo e a granulometria. No

período de 1950-1980, com a introdução dos conceitos de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) enunciados por Veihmeyer e Hendricksen (1927), as pesquisas tentaram correlacionar a distribuição do tamanho das partículas do solo, porosidade, densidade e matéria orgânica, com o conteúdo de água na CC (potencial matricial -1/3 atm), PMP (potencial matricial -15 atm) e a água disponível (AD) às plantas.

A tentativa mais abrangente parece ter vindo do estudo de Williams et al. (1983). Eles classificaram a retenção de água no solo com base em classe textural. Esse trabalho indicava uma tendência dos estudos envolvendo métodos indiretos das décadas seguintes: a estimativa da curva de retenção de água e da condutividade hidráulica do solo por meio de características texturais.

Diversos estudos sobre o desenvolvimento e uso de PTF utilizando propriedades físicas do solo foram publicados (RAWLS et al., 1991; VAN GENUCHTEN; LEIJ, 1992; TIMLIN et al., 1996; WÖSTEN, 1997; PACHEPSKY et al., 1999). Mais recentemente Wösten et al. (2001), Pachepsky e Rawls (2004) e Weynant et al. (2009) apresentaram um sumário sobre pedotransferência, envolvendo aspectos relacionados aos métodos de desenvolvimento dessas funções, à acurácia e incerteza a elas associadas, os efeitos da textura e estrutura do solo, além das avaliações estatísticas e funcionais correspondentes.

Atualmente, as PTF são largamente utilizadas na ciência do solo, hidrologia e agrometeorologia para estimar a condutividade hidráulica, curva de retenção e parâmetros relacionados à infiltração. Diversos modelos utilizam essas funções para simular o transporte de água, ar e solutos, regimes de temperatura dos solos e da planta, manejo, compactação, estabilidade da estrutura e resistência a penetração, mecânica, química do solo e agricultura de precisão.

Determinar diretamente a condutividade hidráulica e a curva característica de retenção de água no solo é um trabalho oneroso e demorado (WÖSTEN; VAN GENUCHTEN, 1988). Mesmo nos métodos conduzidos em laboratórios, com menores erros sistemáticos, persistem problemas de morosidade, custo e inexatidão. Na literatura predominam trabalhos que apresentam funções de pedotransferência para a condutividade hidráulica saturada e não-saturada, bem como para a curva de retenção de água no solo.

Há uma predominância de trabalhos que apresentam funções de pedotransferência para solos de regiões de clima temperado (WÖSTEN et al., 1999, 2001), os quais apresentam diferenças importantes em relação aos solos tropicais (HODNETT; TOMASELLA, 2000, 2002,

2008). Existem características físicas e químicas que determinam as diferenças de comportamento de solos de clima temperado, fazendo com que os solos tropicais tenham comportamento físico-hídrico diferenciado. O exemplo mais notável é o dos latossolos (SHARMA; UEHARA, 1968), com argila 1:1 que formam unidades estruturais muito diferentes das formadas em solos com argila 2:1 predominantes em climas temperados.

No Brasil, os primeiros trabalhos desenvolvidos sobre funções de pedotransferência datam da década de 1980, principalmente no estado de São Paulo. Arruda et al. (1987) fizeram as primeiras tentativas do uso de equações de regressão para estimar a água disponível com base na textura do solo. Bernoux et al. (1998) verificaram que a densidade do solo poderia ser prevista com bom nível de exatidão a partir do teor de argila do solo.

Na Região Nordeste do Brasil, as primeiras equações para solos do semi-árido foram apresentados por Silva et al. (1990). Van den Berg et al. (1997) trabalharam com perfis de Latossolos (Ferralsols) de dez países, estimando água retida no solo entre -10 e -1500 kPa, com base em análise de regressão a partir de propriedades dos solos mais facilmente medidas, como granulometria e densidade.

Gaiser et al. (2000) estudaram a influência da mineralogia de argilas na retenção de água do solo em áreas do semi-árido da África Ocidental e do Nordeste do Brasil. Em Pernambuco, Oliveira (2002) desenvolveu PTF para prognóstico do teor de água do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente. Giarola et al. (2002) fizeram regressões múltiplas para estimar os teores de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível em função dos teores de argila, silte e óxidos de ferro e de alumínio.

Na Região Sul, Peraza (2003) desenvolveu PTF para ajustar o modelo de Van Genuchten (1980) para potenciais específicos da curva de retenção de água para solos do Rio Grande do Sul. Prevedello (2002)¹ desenvolveu um sistema para obtenção da curva de retenção, por meio de um procedimento de pedotransferência, utilizando o método SPLINTEX, que estima os parâmetros hidráulicos do solo a partir da geometria e composição granulométrica. Esses trabalhos evidenciam um número expressivo de equações para estimar a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente a partir do modelo de Van Genuchten (1980).

_

¹ PREVEDELLO, C.L. Programa SPLINTEX para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo - Versão 1.0. Publicação em meio magnético. 2002. Citado por GOMES (2005).

Os trabalhos de Hodnett e Tomasella (1998) e Tomasella et al. (2000) foram os principais e de maior alcance regional, com informações de mais de 500 horizontes de solos de todo o Brasil com o objetivo de subsidiar modelos de circulação atmosférica e mudanças climáticas globais.

Há poucas referências sobre pedotransferência no Brasil, pois é um assunto relativamente novo e uma ferramenta pouco desenvolvida e testada. De acordo com Minasny et al. (2003), as principais são descritas na tabela 1. São raros os estudos relativos à avaliação de PTF em modelos de simulação de culturas no Brasil. O uso mais freqüente de PTF é limitado à estimativa da capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), muitos dos quais para sistemas de irrigação, balanços hídricos simplificados, monitoramento e previsão meteorológica (ROSSATO, 2001; GEVAERD, 2006). Constata-se que no Brasil não estão sendo desenvolvidas nem utilizadas as técnicas de pedotransferência em todo o seu potencial.

Tabela 1- Funções de pedotransferência desenvolvidas para solos do Brasil. Modificado de Minasny et al. (2003) e Netto (2007)

Variáveis preditas	Preditores	Tipo e localização do solo	Referências
Capacidade Tampão de pH	Teores de silte e argila, Teor de Carbono Orgânico	Trópico Semi - árido	Noble et al. (1997)
Condutividade Hidráulica	Curvas de retenção de água	Latossolos Amarelos cauliníticos da Amazônia	Tomasella et al. (1997)
Parâmetros de Brooks - Corey	Textura, densidade do solo, porosidade, teor de água	Amazônia brasileira	Hodnett e Tomasella (1998)
Água retida no solo entre -10 e -1500 kPa	Granulometria, densidade do solo	Ferralsols do Brasil	Van den Berg et al. (1997)
Relações entre o modelo de Van Genuchten (1980) e parâmetros de retenção de água	Textura, carbono orgânico, umidade equivalente, densidade do solo	Dados gerais de relatórios de levantamentos de solos do Brasil	Tomasella et al. (2000)
Mineralogia de argilas e retenção de água	Carbono orgânico, silte	Solos do semi - árido da África Ocidental e Nordeste do Brasil	Gaiser et al. (2000)
Teor de água do solo nos potenciais matriciais de -33 e - 1500 kPa	Textura e densidade de solos	Solos do Estado de Pernambuco	Oliveira et al. (2002)
Parâmetros de retenção de água usados no modelo de Van Genuchten (1980)	Textura, densidade do solo, mineralogia de argilas	Ferralsols, Andosols e outros	Hodnett e Tomasella (2002)

2.2.1 Desenvolvimento de funções de pedotransferência para a retenção de água no solo

Os principais métodos de estimativa da retenção de água no solo por meio de PTF são: i) método de regressão por potencial matricial, ii) método do modelo físico; e iii) método de regressão por parâmetro (PTF paramétrica).

A técnica de estimação por potenciais matriciais permite relacionar potenciais específicos a um determinado teor de água em função de propriedades do solo. Embora este procedimento seja muito usado, sua limitação está no fato de não permitir o conhecimento da curva de retenção inteira. A técnica é utilizada, por exemplo, para se estimar o teor de água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP). A vantagem reside na sua

simplicidade, quanto às técnicas de regressão relativamente simples a serem aplicadas (GONÇALVES et al., 1994). Por esse método é possível se obter uma curva de retenção completa, estimando-se valores da curva e, em seguida, realizar interpolações e ou ajustes, o que implica em fonte de erros. A comparação das curvas de diferentes solos tampouco é fácil.

O método do modelo físico inclui esquemas de Haverkamp e Parlange (1986), Arya e Paris (1981) e Tyler e Wheatcraft (1989). Este método consiste de três passos: i) a distribuição dos raios dos poros é estimada a partir da distribuição do tamanho das partículas; ii) o conteúdo de água é estimado a partir da distribuição do tamanho de partículas via equação da conservação de massa; e iii) os potenciais matriciais são estimados com base na distribuição dos raios dos poros por meio da equação de capilaridade.

Haverkamp e Parlange (1986) descreveram uma relação linear entre o diâmetro da partícula (d) e o raio do poro equivalente (R), ou seja, (d = γ R), em que γ representa a constante de proporcionalidade caracterizando a amostra do solo. Esta simplificação produz uma função de retenção como uma simples transformação linear da distribuição do tamanho das partículas e só é válida em solos arenosos com partículas relativamente uniformes. Partindo desta aproximação, os autores desenvolveram estimativas do efeito de histerese.

No método de regressão por parâmetro, utilizado na presente tese, descreve-se a curva de retenção por uma equação empírica, sendo os parâmetros dessa equação estimados por regressões ou outros métodos (TIETJE; TAPKENHINRICHS, 1993).

No contexto atual o esforço se concentra nos métodos de estimativa de parâmetros da curva de retenção de Brooks e Corey (1964) e de Van Genuchten (1980), devido à fácil incorporação em soluções numéricas dos modelos de simulação (SMETTEM; BRISTOW, 1999). A equação de Brooks e Corey (1964) tem o seguinte formato:

$$\theta = \begin{cases} \theta_{s} & \text{se } h \ge h_{b} \\ \theta_{r} + (\theta_{s} - \theta_{r}) \left(\frac{h_{b}}{h}\right)^{\lambda} & \text{se } h < h_{b} \end{cases}$$

e a de Van Genuchten (1980) se apresenta como:

$$\theta = \theta_{r} + \frac{\theta_{r} - \theta_{r}}{[1 + (\alpha |h|^{n})]^{1 - 1/n}}$$
 eq. 2

em que θ r e θ s designam os teores de água residual (m³ m⁻³) e saturada (m³ m⁻³) respectivamente, e α (cm⁻¹), n(-), h_b (cm), λ parâmetros empíricos das equações. h_o é o valor de entrada de ar e h é o potencial matricial (m).

Vereecken et al. (1992) afirmam que a técnica paramétrica facilita comparações entre solos, e a variável dependente não tem que ser medida a potenciais preestabelecidos. Nesse método, a vantagem de utilizar regressão múltipla é que as propriedades com menor peso podem ser excluídas, utilizando técnicas stepwise, diminuindo as variáveis independentes e evitando problemas de multicolinearidade. Rotinas especiais como análise de componentes principais são utilizadas, quando o número de variáveis preditoras é muito grande e ocorrem problemas de colinearidade.

Outros métodos para o desenvolvimento de PTF incluem as redes neurais artificiais (RNA), onde se constroem modelos matemáticos que trabalhem em caminhos análogos ao cérebro humano, modelos aditivos, árvore de regressão, lógica Fuzzy e mineração de dados (data mining) para construir polinômios hierarquizados (MINASNY; MCBRATNEY, 2002a, 2002b).

Em condições de maior teor de água, sob potenciais pouco negativos (> - 10 kPa), a quantidade de água retida no solo depende da sua porosidade, estrutura e densidade. À medida que o teor de água diminui, a quantidade retida passa a ser cada vez mais dependente de propriedades relacionadas com a superfície específica do solo, tais como: textura, conteúdo de matéria orgânica e mineralogia da fração argila (WILLIAMS et al., 1983).

Recentes estudos para verificar quais dos métodos produzem melhores resultados, indicam que o método de estimar PTF por ponto na curva de retenção tem melhor desempenho (TOMASELLA et al., 2003).

2.2.2 Avaliação de funções de pedotransferência

Um dos princípios do teste de modelos é a impossibilidade de validação completa (BALCI, 1997). A validação é um conceito controverso, pois é geralmente aceito e interpretado em termos de adequação de um propósito particular, que significa que o modelo é válido e responde de acordo com a expectativa dos processos modelados apenas na situação em que foi testado (ORESKES, 1998).

As funções de pedotransferência podem ser submetidas a dois tipos de teste: i) a validação estatística, em que se testa o seu nível de predição, as variáveis retidas e os coeficientes de regressão estimados; e ii) a validação funcional, definida como um teste estatístico das PTF no contexto de uma aplicação específica, ou seja, uma avaliação do resultado obtido quando a PTF é introduzida em outros modelos (VEREECKEN, 1989). Wösten et al. (1986) apresentam um conceito similar denominado de critério funcional.

Há duas principais categorias de medida quantitativa de ajuste, fundamentadas no resíduo estatístico entre valores observados e estimados: a primeira inclui o erro médio (EM), erro absoluto médio (EAM), a soma do quadrado do erro (SQE), a raiz do erro médio quadrado (RMSE) e o índice de concordância de Willmott (1982) e a outra, baseada na covariância: no coeficiente de correlação (R) e determinação (R²) (IMAM et al., 1999). A precisão de uma PTF é discutida em diversos estudos. A medida mais comum encontrada na literatura de avaliar estatisticamente uma PTF é por meio da raiz do erro médio quadrado (RMSE), cujos valores oscilam entre 0,02 a 0,11 m³m⁻³ (TIETJE; TAPKENHINRICHS, 1993; WÖSTEN et al., 1995).

Em média, a precisão de PTF para estimativa do teor de água para solos tropicais, utilizando a textura do solo está entre 0,04 e 0,06 m³m⁻³ (TOMASSELA et al., 1998). Os valores típicos de RMSE para a estimativa do teor de água em diversas regiões podem ser encontrados em Pachepsky et al. (2004) e Wösten et al. (2001), listados na tabela 2.

Tabela 2 - Medidas da raiz do erro médio quadrado (RMSE) relatados na literatura no desenvolvimento de PTF para diversas regiões. Adaptado de Cornelis et al. (2001)

Fonte (PTF)	Média RMSE m³m-³
Gupta et al. (1979)	0,060
Rawls e Brakensiek (1982)	0,065
Rawls e Brakensiek (1985)	0,077
Vereecken et al. (1989)	0,041
Wösten et al. (1994)	0,052
Scheinost et al. (1997)	0,057
Van den Berg et al. (1997)	0,080
Schaap et al. (1999)	0,072
Wösten et al. (1999)	0,051
Tomassella et al. (2000)	0,066
Hodnett e Tomassella, (2002)	0,066
Oliveira et al. (2002)	0,012-0,046
Tomassella et al. (2003)	0,037

Há três principais fontes de incerteza das PTF: i) a variabilidade espacial das propriedades do solo utilizadas para desenvolvê-la, teores de areia, silte, argila, matéria orgânica e de densidade do solo; ii) a incerteza associada ao uso da função de pedotransferência para prever as características hidráulicas; e iii) a incerteza referente ao modelo que utiliza a PTF. A variabilidade espacial das propriedades do solo é diretamente transferida para a PTF calculada, bem como para as características hidráulicas e as simulações do modelo.

Weynants, Vereecken e Javaux (2009) são enfáticos ao afirmarem que a maioria das PTF disponíveis na literatura é muito limitada, porque as PTF, em geral, não incorporam informações sobre a estrutura do solo, como a agregação e a macroporosidade, que influenciam o comportamento hidráulico do solo. Criticam à sua utilização generalizada em diversas regiões geográficas, diferentes daquelas para as quais foram desenvolvidas, que, em geral, apresentam geologia, hidrogeologia, clima e uso dos solos bastante distintos.

A validação funcional consiste na utilização de parâmetros preditos por uma PTF num modelo que utiliza esses parâmetros. Uma PTF não deve ser utilizada antes de uma validação funcional, pois embora a avaliação estatística seja importante e necessária, ela não é suficiente. No entanto, são raras as referências sobre avaliação funcional de PTF. Segundo Van den Berg et al. (1997), algumas PTF podem fornecer um ajuste bom para as curvas de retenção, contudo, podem produzir baixa precisão em estimativas de conteúdo de água nos modelos, pelo fato de as relações entre parâmetros do solo e suas propriedades básicas serem complexas e dependerem de fatores inter-relacionados.

Na avaliação funcional de PTF, exemplos como os de Workman e Skaggs (1992) são comuns, comparando o desempenho de dois modelos (PREFLO e DRAINMOD) para simular a evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial e drenagem. Nesse caso, a comparação dos resultados com valores medidos e baseados na PTF foi discrepante, evidenciando a grande variabilidade encontrada nos resultados provenientes de simulações com PTF.

Wösten et al. (1990) testaram quatro métodos diferentes para gerar propriedades hidráulicas, incluindo medidas de laboratório, de dados médios regionais e nacionais e valores de PTF paramétricas. As propriedades obtidas foram utilizadas como entrada em um modelo de simulação para acompanhar o movimento de água no solo. O armazenamento de água na profundidade 0,5 m foi avaliado durante um período de sete anos. Os autores concluíram que não houve diferenças significativas entre os resultados produzidos por medidas diretas e PTF. Se uma PTF tem a mesma variabilidade dos dados medidos em campo e se os erros não diferem significamente, ela pode ser considerada precisa (WÖSTEN et al., 2001).

Entretanto, outros trabalhos indicam o oposto. Timlin et al. (1996) simularam o rendimento da soja no estado do Mississipi, utilizando dados medidos e estimados por meio de PTF paramétricas de curvas de retenção e condutividade hidráulica saturada. Os resultados mostraram que o rendimento medido e estimado por PTF difere. A média do rendimento simulado por PTF foi maior devido às estimativas de água disponível serem muito superiores.

Minasny (2000) utilizou diversas PTF para testar dois modelos de balanço hídrico na Austrália, um simplificado, denominado tipping bucket e outro mecanístico. Além de discutir as principais incertezas quanto às diferenças nos resultados encontrados das simulações, as principais conclusões foram relativas aos erros encontrados entre os valores do armazenamento de água no solo observados e estimados, da ordem de 40 a 60%.

Com o objetivo de estimar o rendimento agrícola, Smettem et al. (1999) estimaram PTF para as propriedades hidráulicas e as utilizaram em modelos mecanísticos para simular a distribuição espacial do balanço hídrico e prever o rendimento de trigo. Utilizando o modelo Common Agricultural Policy Regional Impact Assessment – CAPRI, Leip et al. (2007), fizeram estudo semelhante para diversas culturas agrícolas no continente europeu e Schillinger et al. (2004) para o arroz. Os resultados indicaram ser necessário identificar as principais fontes de incerteza para avaliar o efeito da PTF na simulação. Outras aplicações foram desenvolvidas utilizando validação funcional de PTF, demonstrando o potencial dessas funções em modelos de

simulação solo-planta-atmosfera (HUTSON; CASS, 1987; DAM et al., 1997; SMETTEM et al., 1999; CORNELIS et al., 2001; MCBRATNEY et al., 2002).

Na avaliação e testes de PTF, as conclusões sobre o uso de pedotransferência parecem muito controversas. Encontra-se, porém, certo consenso de que o uso dessas funções depende da escala e do objetivo do estudo. A tendência é que sejam utilizadas em grandes áreas, onde as propriedades físicas dos solos sejam semelhantes ao conjunto de dados empregados para o desenvolvimento da PTF. As funções de pedotransferência desenvolvidas a partir de dados regionais apresentam bons resultados em regiões com solos e paisagens similares. Seu uso seria mais adequado em estudos de escala regional do que em aplicações pontuais (PACHEPSKY et al., 1999).

Van Genuchten e Wösten (1988) demonstraram que variações simultâneas de dois ou mais parâmetros da equação de Van Genuchten para estimar a curva de retenção podem produzir resultados semelhantes (Figura 2), o que dificulta a avaliação das PTF. Variações nos parâmetros da equação podem não levar a desvios grandes na estimativa do teor de água no solo. Na figura 3 mostra como os parâmetros α e n afetam o formato da curva. Um aumento do valor do parâmetro α produz uma antecipação do ponto de inflexão. Um maior valor de n faz com que a inclinação do ponto de inflexão seja maior.

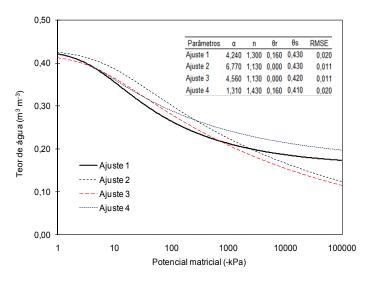


Figura 2 – Exemplo demonstrando que variações dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) podem produzir ajustes semelhantes na estimativa da curva de retenção de água no solo. Adaptado de Minasny (2000)

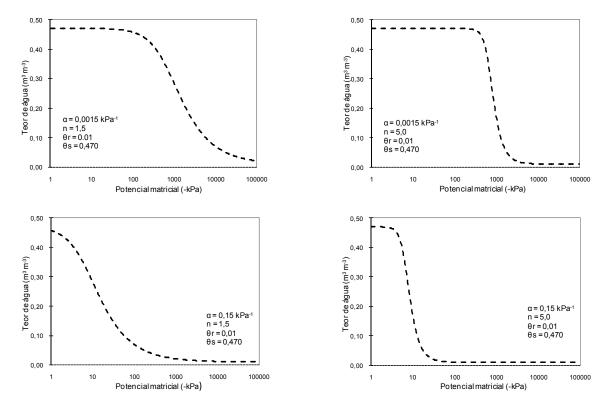


Figura 3 - Curvas de retenção para quatro combinações dos parâmetros α e n da equação de Van Genuchten (1980)

Em razão dessas considerações, há necessidade de estudos sobre o desenvolvimento de funções de pedotransferência. Possíveis aperfeiçoamentos incluem: i) refinamento do ajuste da expressão matemática; ii) conferência da influência dos atributos básicos dos solos como entrada; iii) avaliação funcional; e iv) métodos alternativos para obter e ajustar as equações (PACHEPSKY; RAWLS, 1999).

É importante destacar que há raros relatos no Brasil sobre avaliação funcional de PTF no âmbito de modelos com maior nível de descrição dos processos de movimento de água no solo e seu impacto na produtividade agrícola. O presente estudo se constitui um desafio na avaliação quantitativa e qualitativa dessas funções no modelo num modelo agro-hidrológico.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Dados climatológicos

Para as simulações de produtividade agrícola foram utilizados dados climatológicos diários publicados pela SUDENE (1990), Agência Nacional de Águas - ANA e Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e complementados com as séries históricas dos núcleos estaduais de meteorologia. Os elementos meteorológicos utilizados foram: precipitação pluviométrica, temperatura máxima e mínima e radiação solar. O período para as simulações de produtividade das culturas do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), milho (*Zea mays* L.) e sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e a relação completa dos postos meteorológicos utilizados consta na tabela 3. A localização dos postos é ilustrada na figura 4. No sentido de assegurar maior confiabilidade aos resultados todos os valores considerados como "duvidosos" ou "estimados" foram suprimidos.

Tabela 3 - Postos meteorológicos utilizados para simulação da produtividade agrícola por município, localização, período e instituição responsável

Município	UF	Latitude Longitude		Período		Responsável
		Graus	e décimos	Início	Término	
Araripina	PE	-7,48	-40,60	1988	2005	IPA^1
Areia	PB	-6,96	-35,70	2002	2003	INMET ²
Cruz das Almas	BA	-12,67	-39,15	1995	1996	Embrapa ³
Serra Talhada	PE	-7,98	-38,32	1973	2001	IPA ¹
Umbaúba	SE	-11,37	-37,67	1998	2005	CMRHSE ⁴

⁻ Instituto Agronômico de Pernambuco; 2 - Instituto Nacional de Meteorologia; 3 - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

Centro de Meteorologia e Recursos Hídricos de Sergipe

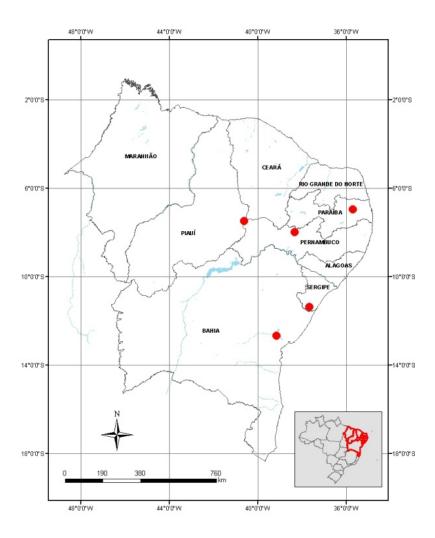


Figura 4 - Localização dos postos pluviométricos utilizados nesse estudo

3.2 Dados de produtividade

Os dados médios de produtividade de milho e sorgo foram provenientes de resultados do Programa de Melhoramento Genético de Milho e sorgo do Nordeste, realizado pelas empresas estaduais de pesquisa agropecuária e coordenado pela Embrapa.

A avaliação de variedades de milho e sorgo em diversas áreas do Nordeste brasileiro tem como objetivo a recomendação daquelas de melhor adaptação. Foram selecionadas, ainda, teses e dissertações com dados de produtividade agrícola, obtidos em experimentos realizados na Região com milho, sorgo e feijão caupi.

Os municípios dos experimentos foram selecionados de diferentes ambientes do Nordeste, distribuídos nos Estados do Piauí, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia (Figura 4). Três principais tipos climáticos foram selecionados no Nordeste: (1) o da Baixada Litorânea (Zona da Mata), onde predomina o clima tropical úmido com temperaturas médias em torno dos 24°C; as chuvas nesta região ficam em torno dos 1.600 mm anuais sendo maior no litoral (2.000 mm/ano); (2) o do Agreste - no centro - caracterizado como área de transição entre a região mais úmida (Zona da Mata) e (3) o da região mais seca (Sertão) - a oeste - onde ocorre o clima caracterizado como semi-árido quente. Os plantios dos ensaios foram realizados no início do período chuvoso, dependendo da região, durante os meses de novembro a maio.

Os dados selecionados de produtividade do milho e sorgo dos ensaios nacionais da Embrapa correspondem às médias de rendimento de variedades adaptadas à região e com forte disseminação entre os produtores, principalmente aquelas de ciclo curto. Na tabela 4 constam os locais, cultura e o período de simulação.

Tabela 4 - Locais por município, cultura e períodos utilizados na simulação da produtividade agrícola do feijão caupi, milho e sorgo na Região Nordeste do Brasil

Município	UF	Latitude	Longitude	Cultura		eríodo Iulação	Fonte Produtividade
		Graus	e décimos		Início	Término	
Araripina	PE	-8,42	-37,07	Milho	1994	2005	Embrapa ¹
Araripina	PE	-8,42	-37,07	Sorgo	1988	2004	IPA ²
Areia	PB	-6,96	-35,70	Feijão caupi	2002	2004	Lima, (2004,2006) Sales, (2007)
Cruz das Almas	BA	-12,67	-39,15	Milho	1995	1996	Embrapa ¹
Serra Talhada	PE	-7,98	-38,32	Sorgo	1973	2001	IPA ²
Umbaúba	SE	-11,37	-37,67	Milho	1998	2005	Embrapa 1

^{1 -} Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; 2 - Instituto Agronômico de Pernambuco

3.3 Curvas de retenção

As curvas de retenção de água e os dados morfológicos do solo foram selecionados de diversos estudos na Região Nordeste do Brasil, realizados por universidades, Embrapa e Codevasf, totalizando 786 conjuntos de dados. De todos os dados disponíveis de teor de água versus potencial matricial foram utilizados apenas os valores correspondentes aos potenciais matriciais de -6, -10, -30, -50, -100 e -1500 kPa. O teor de água na saturação, θs (potencial matricial = 0) foi estimado com base na densidade do solo (D_s) pela equação:

$$\theta_s = 1 - \frac{D_s}{D_n}$$
 eq. 3

onde D_p é a densidade das partículas, para a qual foi utilizado o valor de 2700 kg $\mbox{m}^{\text{-3}}.$

Os estados de Pernambuco e Alagoas foram os mais representados, pois nesses estados se encontrou um maior número de informações disponíveis. Além disso, a Codevasf e a Embrapa, com grande fonte de informações de perfis de solo, apresentam um maior número de dados disponíveis de forma sistematizada e organizada, provenientes de estudos de solos de diversos perímetros de irrigação, como também a Embrapa dispõe de levantamentos exploratórios de reconhecimento de solos na escala 1:100.000 (Figura 5).

A classificação taxonômica dos solos foi realizada de acordo com os critérios do Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPS) da Embrapa para levantamentos de solos no Brasil, como descritos em Embrapa (1997), Camargo et al. (1987) e Oliveira et al. (1992). A classificação do solo foi atualizada de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

As informações foram armazenadas de duas formas: a) atributos que permitem desenvolver PTF (argila, areia, silte, matéria orgânica e densidade do solo) e; b) dados sobre a retenção de água (curvas de retenção).

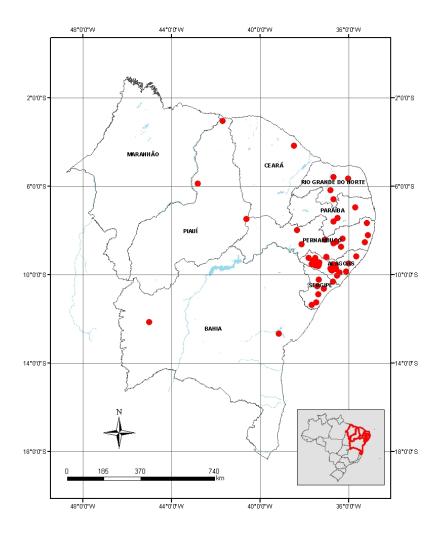


Figura 5 - Localização dos solos cujos dados foram utilizadas para o desenvolvimento das funções de pedotransferência

O conteúdo do banco de dados para cada perfil dos solos do estudo é ilustrado conforme exemplo da Tabela 5.

Tabela 5 - Exemplo de descrição dos principais atributos dos solos considerados na base de dados utilizada para o desenvolvimento das funções de pedotransferência

Lat ¹	Lon ²	Prof Sup ⁴	Prof ³ Inf ⁵	Hor ⁶	Classe de Solo	Matéria orgânica	Areia	Silte	Argila	C ⁷	Densidade
Graus e	décimos		m	-	•	J		kg/kg			kg/m ³
-9,64	-36,68	0	20	Ap	Latossolo	0,0091	0,511	0,068	0,135	0,0053	1840
-9,64	-36,68	20	53	AB	Latossolo	0,0057	0,425	0,128	0,205	0,0033	1750
-9,65	-36,61	0	23	A	Neossolo	0,0091	0,175	0,258	0,165	0,0053	1820
-9,65	-36,61	23	40	C	Neossolo	0,0036	0,197	0,236	0,115	0,0021	1800
-9,64	-36,60	0	33	A	Neossolo	0,0100	0,296	0,274	0,225	0,0058	1400
-10,32	-36,59	0	60	A	Argissolo	0,0028	0,276	0,325	0,260	0,0016	1810
•••	••••	•••	•••	• • •	•••	•••	•••	•••	•••	•••	••••

^{1 –} Latitude; 2 – Longitude; 3 - Profundidade; 4 – Superior; 5 – Inferior; 6 – Horizonte; 7 – Carbono.

A classificação textural foi realizada conforme o triângulo de textura proposto pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA) e modificado pela EMBRAPA (1997).

3.4 Funções de pedotransferência

3.4.1 Elaboração e desenvolvimento de PTF

Para elaboração das PTF foram selecionados dois subconjuntos de dados considerados independentes (Tabela 6): dados de 673 locais (85%) para o desenvolvimento; e de 113 locais (15%) para teste e validação. Os dados utilizados na validação abrangem teores de areia, silte, argila, matéria orgânica e da densidade do solo, utilizados no desenvolvimento das PTF.

Solos Total	Total	Subconjunto		
		Desenvolvimento	Validação	
Latossolo	343	298	45	
Argissolo	179	159	20	
Neossolo	172	141	31	
Planossolo	63	51	12	
Cambissolo	21	18	3	
Luvissolo	8	6	2	
ГОТАL	786	673	113	

Tabela 6 - Número de perfis utilizados na elaboração e validação das funções de pedotransferência para a Região Nordeste, separadas por classe de solos

No presente estudo, os parâmetros θr , θs , α e n da equação de Van Genuchten (1980) foram originados de duas fontes:

- a) obtidos experimentalmente: o ajuste da equação 2 aos dados observados foi realizado por minimização da soma dos quadrados dos desvios, através do método interativo de Newton-Raphson, fixando-se o valor de θs como valor do teor de água do solo saturado com base na densidade do solo (equação 3) e θr como valor do teor de água correspondente ao potencial matricial de -1500 kPa.
- b) determinados por meio de funções de pedotransferência desenvolvidas especificamente para solos da Região Nordeste. Para relacionar cada parâmetro da equação de Van Genuchten (equação 2) com os demais dados do solo, foram utilizadas técnicas de regressão linear múltipla. Os procedimentos estatísticos foram efetuados no programa *Statistica* 8 (STATSOFT, 2007).

As PTF foram elaboradas de acordo com as seguintes etapas:

- 1^a) Divisão aleatória dos dados em dois subconjuntos a) 85% dos dados para desenvolvimento e b) 15% para validação, utilizando o procedimento *subset random*;
- 2^a) Investigação sobre a presença de *outliers* ou valores atípicos para as características avaliadas por meio de análise gráfica no *software statistica* ou por observação direta dos mesmos;
- 3ª) Ajuste da equação de Van Genuchten (1980) aos dados observados, conforme descrito acima, obtendo-se 673 conjuntos para o desenvolvimento e 113 para validação das PTF;
- 4ª) Ajuste de um modelo de regressão linear múltipla para cada parâmetro da equação de Van Genuchten (1980), utilizando os teores granulométricos (areia, silte, argila), a matéria orgânica e a densidade do solo como preditores; e

5^a) Ajuste de um modelo de regressão linear múltipla para cada parâmetro da equação de Van Genuchten (1980), utilizando apenas os teores granulométricos como preditores.

A granulometria e o teor de matéria orgânica foram expressas em kg kg⁻¹ e a densidade do solo em kg m⁻³. As equações finais foram obtidas utilizando o procedimento *stepwise* com nível de significância de 5%, e possuem o seguinte formato:

$$x_i = b_{i,0} + b_{i,1}Areia + b_{i,2}Silte + b_{i,3}Argila + b_{i,4}MO + b_{i,5}Ds$$
 eq. 4

$$x_i = b_{i,0} + b_{i,1}Areia + b_{i,2}Silte + b_{i,3}Argila$$
 eq. 5

em que x_i é o valor do parâmetro da equação de Van Genuchten (i = 1,2,3 ou 4 corresponde a $log(\alpha)$, n, θr e θs , respectivamente). MO, Areia, Silte, Argila são teores de matéria orgânica, Areia, Silte e Argila (kg kg⁻¹) e Ds é a densidade do solo (kg m⁻³). $b_{i,n}$ são os coeficientes da regressão múltipla linear: $b_{i,o}$ representa o intercepto, e $b_{i,1}$, $b_{i,2}$, $b_{i,3}$, $b_{i,4}$ e $b_{i,5}$ os parâmetros relativos aos teores de areia, silte, argila e matéria orgânica (MO) e densidade do solo, respectivamente.

A equação 4 inclui, além dos teores granulométricos, informações sobre a densidade e o teor de matéria orgânica do solo e foi abreviada pela sigla Dasam (<u>D</u>ensidade, <u>A</u>reia, <u>S</u>ilte, <u>A</u>rgila e <u>M</u>atéria Orgânica). A PTF da equação 5, baseada apenas nos teores granulométricos foi abreviada pela sigla Asa (<u>A</u>reia, <u>S</u>ilte e <u>A</u>rgila).

A regressão *stepwise* começa formando um modelo com uma variável, usando a variável preditora que tenha a mais alta correlação com a variável de resposta. O procedimento de seleção *forward e backward* é uma variação da regressão *stepwise*, e está baseado no princípio de que as variáveis preditoras devem ser adicionadas e/ou removidas ao modelo uma de cada vez, de acordo com sua importância, até que não haja mais variáveis preditoras (STATSOFT, 2007).

O procedimento *stepwise* foi escolhido por se tratar de um método, que seleciona apenas as variáveis com forte relação. Foi utilizado o teste t e/ou análise de variância para eliminação de variáveis não informativas. Esse procedimento evita problemas com alguns termos, devido às combinações lineares provocadas por multicolinearidade.

Para diminuir a variância, o valor do parâmetro α da equação 2 foi avaliado na sua forma logarítima (log α), como proposto por Vereecken et al. (1989).

Após o desenvolvimento das PTF de caráter generalizado, considerando todos os solos em conjunto foi desenvolvida uma PTF específica para as classes Argissolo, Latossolo, Neossolo e Planossolo, utilizando os mesmos procedimentos metodológicos anteriormente descritos. Essas classes representam os solos mais utilizados na agricultura de sequeiro no Nordeste. Para as demais classes (Cambissolos e Luvissolos), o número de dados para validação foi muito reduzido.

Foram avaliadas, ainda, as correlações das propriedades do solo utilizadas, matéria orgânica, areia, silte e argila e a densidade do solo com os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) e com o teor de água em potenciais matriciais específicos (-6, -10, -30 e - 1500 kPa).

3.5 Métodos e descrição teórica modelo SWAP

O modelo utilizado para realizar o teste funcional das PTF foi o modelo SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) (KROES; VAN DAM, 2003). O modelo SWAP foi desenvolvido para simular simultaneamente os fluxos de água, calor e de solutos e o crescimento e desenvolvimento de culturas. O modelo se utiliza da equação de Richards para simular o movimento vertical de água e as funções hidráulicas do solo são definidas de acordo com as equações de Mualem-Van Genuchten sob diferentes condições ambientais e de contorno (VAN DAM, 2000).

O SWAP utiliza um conjunto de regras e operações bem definidas e ordenadas, destinadas à solução de problemas relativos à disponibilidade de água no solo e do rendimento agrícola. O SWAP tem como grande vantagem a utilização de um número relativamente pequeno de parâmetros de entrada de solo, cultura e clima, haja vista a capacidade de simular com razoável nível de detalhes os principais processos físicos e agronômicos envolvidos na produção agrícola.

Apresentam-se aqui as principais informações parâmetros relacionados à estimativa da produtividade da cultura: o balanço de água no solo, incluindo os processos de evaporação e transpiração. Os principais processos de desenvolvimento e crescimento da cultura, conforme descrito com mais detalhe em Kroes e Van Dam (2003).

3.5.1 Balanço de água

O SWAP é uma extensão do modelo agro-hidrológico SWATR (Soil Water Actual Transpiration Rate) desenvolvido por Feddes et al. (1978). Nele os fluxos são simulados na direção vertical, permitindo uma estrutura unidimensional. A figura 3 mostra o fluxograma ilustrando os principais processos incorporados no SWAP. O modelo apresenta uma grande variedade de possibilidades para questões práticas em agricultura como o manejo da água e a proteção ambiental e foi aplicado em diversos ambientes com diferentes tipologias agrícolas. (VAN DAM, 2000).

A disponibilidade de água é determinada pelas características físicas do solo. Essas características determinam a quantidade máxima de água que o solo pode armazenar e suprir à cultura. O balanço de água na zona radicular durante certo período de crescimento da cultura é igual à diferença entre as entradas e saídas de água do solo. As entradas correspondem à precipitação pluviométrica, interceptação de água pela vegetação e pela irrigação e as saídas pela transpiração, evaporação, percolação e infiltração de água no solo (Figura 6).

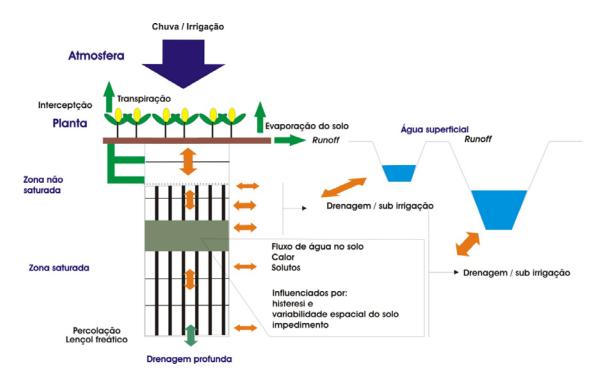


Figura 6 - Representação simplificada dos processos agro-hidrológicos incorporados no SWAP. Adaptado de Kroes e Van Dam (2003)

Diversas opções de manejo de irrigação, drenagem, salinidade, soluto e crescimento de culturas são disponíveis. No presente trabalho foi simulado apenas o balanço de água e a produtividade agrícola.

O SWAP simula o balanço de água, assumindo que uma coluna vertical de solo com vegetação, armazena uma quantidade de água (W) [m] num certo instante:

$$\Delta W = P + I - R - P_i - T_a - E_a - Pe$$
 eq. 6

em que ΔW é a variação de armazenamento de água no solo [m], P é a precipitação pluviométrica [m], I é a irrigação [m], R é o escoamento superficial (*runoff*) [m], Pi é a interceptação de água pela vegetação [m], Ta é a transpiração atual [m], Ea é a evaporação atual do solo [m] e Pe é a percolação [m].

O movimento de água no solo é governado pelo gradiente de potencial hidráulico, H [m]:

$$H = h + z eq. 7$$

onde h é o potencial matricial [m] e z é a coordenada vertical [m]. Em solos não saturados, o fluxo de água é predominantemente vertical. Usando a lei de Darcy, a densidade de fluxo de água vertical unidimensional, q [m d⁻¹] é descrito por:

$$q=-K(h)\left[\frac{\partial h}{\partial z}+1\right]$$
 eq. 8

em que K é a condutividade hidráulica do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função do potencial matricial total do solo $[m d^{-1}]$, função $[m d^{-1}]$, fu

Considerando conservação de massa e representando a taxa de extração da água do solo pelas raízes como sumidouro $S_a(z)$ [m³m⁻³ s⁻¹], obtém-se a equação:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} - S_a(z)$$
 eq. 9

em que θ é teor de água no solo [m³m³] e t é o tempo (d). A combinação das equações 6, 7 e 8 permite descrever a equação geral do fluxo de água no solo, conhecida como equação de Richards:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_a(z)$$
 eq. 10

No qual $C(h) = d\theta / dh$.

Não há solução analítica geral para equação de Richards. O SWAP utiliza uma aproximação numérica para condições de contorno específicas, conhecidas as relações hidráulicas entre as variáveis θ , h e K.

Por meio da combinação da equação 2 e a teoria de Mualem (1976), obtém se a condutividade hidráulica para solos em condições não saturadas (K):

$$K(\theta) = K_{\text{sat}} \Theta^{\gamma} \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-1/n} \right]^2$$
 eq. 11

em que γ é um parâmetro empírico adimensional, $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo [$m\ d^{-1}$], K_{sat} é a condutividade hidráulica do solo saturado [$m\ d^{-1}$] e Θ é a saturação relativa do solo [$\Theta=(\theta-\theta r)\ /\ (\theta s-\theta r)$]. Os valores de condutividade saturada (K_{sat}) utilizados para as simulações da produtividade agrícola pelo modelo SWAP nas localidades do Nordeste constam na tabela 7.

Tabela 7 - Condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) utilizada para simular a produtividade no modelo SWAP em cinco localidades da região Nordeste do Brasil

Local	Prof.(cm)	Ksat (m d ⁻¹)
	0-20	1,236
Ararinina (DE)	20-40	1,171
Araripina (PE)	40-60	0,573
	60-80	0,489
	0-20	0,095
Areia (PB)	20-40	0,773
Aleia (FB)	40-60	0,027
	60-80	0,048
	0-15	0,549
Cruz dos Almos (DA)	15-40	0,144
Cruz das Almas (BA)	40-60	0,468
	60-115	2,249
Sarra Talhada (DE)	0-30	1,414
Serra Talhada (PE)	30-60	1,368
Umbaúba (SE)	0-20	0,998
Umbaúba (SE)	20-40	1,387

A evapotranspiração refere-se à soma da transpiração e da cultura e a evaporação do solo ou da água interceptada pela vegetação. O termo potencial indica que não há limitação para a evapotranspiração, quanto ao fornecimento de água às plantas.

Devido à falta de dados completos para calcular a evapotranspiração por meio do método de Penman-Monteith foi utilizada a parametrização padrão recomendada pelo boletim FAO 56 para calcular as estimativas de evapotranspiração potencial (ALLEN et al. 1998).

As premissas básicas para utilizar a parametrização FAO por meio de equações simplificadas, para calcular a estimativa de evapotranspiração são as seguintes: quando os dados de umidade relativa e/ou pressão de vapor estão faltando ou são de qualidade duvidosa, a pressão de vapor atual, e_a, pode ser obtida assumindo que a temperatura do ponto de orvalho (To) está próximo da temperatura do ar mínima diária (Tmin); e o ar está próximo a Tmin quase saturado com vapor de água.

O SWAP estima a evapotranspiração real, multiplicando o valor da evapotranspiração potencial pelos fatores de redução de estresses hídrico (α_{rw}) e salino (α_{rs}) ilustrados nas figuras 7 e 8.

Em casos em que ocorrem estresses hídrico e salino simultaneamente, a taxa de extração de água pelas raízes (Sa) [z] é calculada como produto da redução dos coeficientes:

$$S_a(z) = \alpha_{rd}\alpha_{rw}\alpha_{rs}S_{max}(z)$$
 eq. 12

em que, α_{rd} , α_{rw} e α_{rs} são coeficientes de redução para estresse hídrico (úmido e seco) e salino, respectivamente.

A taxa de transpiração atual (Ta) é a integração de Sa(z) ao longo da profundidade, até alcançar todo sistema radicular D_{raiz} :

$$T_a = \int_{-D_{raiz}}^{0} S_a(z) dz$$
 eq. 13

Distinguem-se algumas faixas de potenciais, nas quais o valor do coeficiente de redução é mínimo (0), máximo (1), crescente ou decrescente. Os valores dos potenciais matriciais que delimitam essas faixas são h₁, h₂, h₃ (potencial crítico) e h₄ (potencial do PMP). O valor de h₃ varia, segundo o modelo, conforme a transpiração potencial: h_{3h} corresponde a uma alta e h_{3l} a uma baixa taxa de transpiração.

Os potenciais acima dependem da resistência da cultura aos estresses submetidos. Os potenciais matriciais limites utilizados para as culturas do milho, sorgo e feijão caupi constam na tabela 8.

Tabela 8 - Potenciais matriciais (cm) limites de extração de água (figura 7) pelas culturas do milho, sorgo e feijão caupi, utilizados para simular a produtividade no modelo SWAP

Potencial Matricial	Milho	Sorgo	Caupi
h1	-10	-10	-10
h2	-25	-25	-25
h3h	-350	-750	-750
h31	-800	-2000	-2000
h4	-10000	-12000	-12000

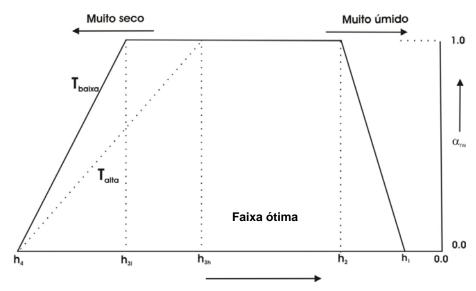


Figura 7 - Coeficiente de redução α_{rw} da absorção de água pela raiz como função do potencial matricial de água no solo (h) e a taxa de transpiração potencial (Tp). Adaptado de Kroes e Van Dam (2003)

A redução da absorção de água pela raiz por causa do estresse salino é ilustrada na figura 8. EC_{max} representa a condutividade elétrica na qual o estresse começa e EC_{inclinação} a taxa de diminuição da absorção de água pela raízes, para valores superiores a EC_{max}. Para as culturas de milho, feijão caupi e sorgo foram utilizados os valores de 0,5 dSm⁻¹ para EC_{max} e 20 %/dSm⁻¹ para EC_{inclinação}.

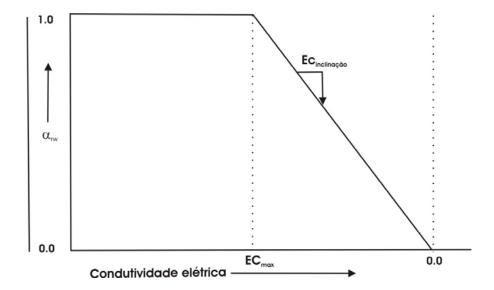


Figura 8 - Coeficiente de redução α_{rs} da absorção de água pela raiz como função da condutividade elétrica da água no solo (EC). Adaptado de Kroes e Van Dam (2003)

3.5.2 Desenvolvimento e crescimento de culturas

O modelo SWAP possui duas rotinas para simular a produtividade agrícola: um módulo simples e outro detalhado. O módulo utilizado nesse estudo foi o detalhado, que incorpora fatores de estresse ambiental e resulta em valores absolutos de produtividade. A figura 9 ilustra os principais processos do desenvolvimento e crescimento da cultura incorporados no módulo detalhado.

Parte do carboidrato produzido é utilizado para respiração de manutenção e crescimento, convertido em folhas, raízes, caules e órgão de armazenamento, dependendo do estágio de desenvolvimento da cultura. O aumento estrutural de matéria seca das folhas determina o desenvolvimento da área foliar específica SLA (m² kg¹), e consequentemente, a dinâmica de interceptação da radiação.

O aumento da matéria seca total é obtido por meio da integração, no tempo, de todas as partes da cultura no tempo, depois de subtraídas as taxas de senescência. Todos esses processos são controlados pelos estágios de desenvolvimento da cultura e são influenciados por estresses ambientais e temperatura.

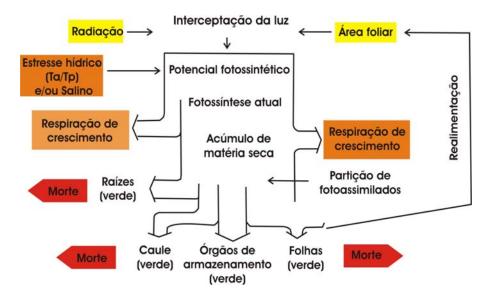


Figura 9 - Representação simplificada dos processos de desenvolvimento e crescimento de culturas incorporados no módulo detalhado do modelo SWAP. Adaptado de Kroes e Van Dam (2003)

3.5.3 Estágio de desenvolvimento da cultura

A simulação do crescimento da cultura tem inicio na data de emergência e avança por sucessivos estágios. O estágio de desenvolvimento é calculado pelos graus-dias acumulados, assumindo os valores 0 para a emergência, 1 para o início do florescimento e 2 para a maturação e colheita. O desenvolvimento da cultura anterior à antese é controlado pela temperatura e/ou pelo fotoperíodo, após a antese apenas a temperatura afeta a taxa de desenvolvimento. A representação simplificada dos estágios de desenvolvimento e a partição de matéria seca é ilustrada na figura 10.

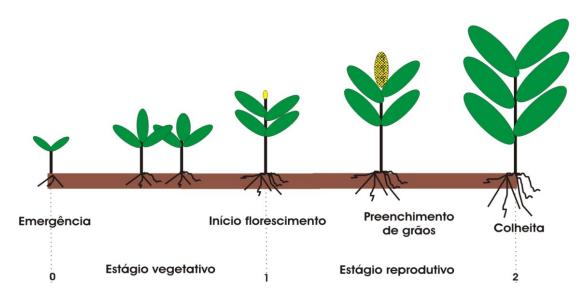


Figura 10 - Representação simplificada dos estágios de desenvolvimento de uma cultura. Adaptado de Kroes e Van Dam (2003)

O estágio de desenvolvimento é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$D_{j} = D_{j-1} + \frac{T_{j} - T_{b}}{GD}$$
 eq. 14

em que, T_j é a temperatura média no dia j [°C], D_j é o estágio de desenvolvimento da cultura no dia j, GD é o número de graus-dias acumulados estabelecido para completar o estágio fenológico e Tb é a temperatura base [°C].

3.6 Métodos de avaliação das PTF

3.6.1 Avaliação estatística dos parâmetros do modelo das PTF

A avaliação estatística dos parâmetros do modelo de Van Genuchen (α , n, θ r e θ s) consiste em determinar o grau de ajuste entre os parâmetros estimados com ajuste das curvas originais e por meio de PTF. A figura 11 mostra os principais procedimentos para avaliação estatística dos parâmetros.

Os dados originais obtidos em diversos locais da Região Nordeste (Figura 5) foram divididos em dois conjuntos, desenvolvimento e validação (1).

Após a separação das curvas de retenção e as propriedades relacionadas à granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo, foram realizados os ajustes das curvas de retenção aos dados obtidos de acordo com equação de Van Genuchten (1980), nos dois conjuntos de dados, desenvolvimento e validação (2), obtendo os parâmetros α , n, θ r e θ s.

Os modelos das PTF para estimativa dos parâmetros da equação 2 foram desenvolvidos utilizando o conjunto de desenvolvimento (3). O grau de concordância entre os parâmetros estimados pelas PTF e os parâmetros estimados com ajuste das curvas originais foi avaliado (4).

Uma vez desenvolvidas as PTF (Dasam – eq. 4 e Asa – eq 5) foi realizado o procedimento de validação (5). Os modelos das PTF foram utilizados no conjunto de dados original independente para calcular os parâmetros α , n, θ s e θ r da equação de Van Genuchten (1980), de acordo com a granulometria, matéria orgânica e a densidade do solo. Esses parâmetros calculados pelas PTF no conjunto de dados independente foram comparados com os parâmetros obtidos do ajuste das curvas originais (6). (Figura 11).

O desempenho da estimativa dos parâmetros da equação de Van Genuchten pelas PTF e os parâmetros provenientes do ajuste das curvas originais foi obtido através do coeficiente de determinação (R²), o índice de Willmott (d) e o índice de concordância (IC).

A utilização apenas do R² é bastante questionável, pois seu valor não está relacionado com a exatidão das estimativas. O R² expressa apenas o grau de concordância entre valores observados e preditos e não é adequada para quantificar o viés das estimativas (WILLMOTT, 1985; PACHEPSKY et al., 2004). O índice de d (Willmott) quantifica a exatidão do método e indica também o grau de afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Esse

índice varia de 0, para desempenho nulo, a 1, para desempenho perfeito. As seguintes expressões foram empregadas:

$$R^{2} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (E_{i} - \overline{E})(M_{i} - \overline{M})}{\left[\sum_{i=1}^{n} (E_{i} - \overline{E})^{2} \sum_{i=1}^{n} (M_{i} - \overline{M})^{0.5}\right]}\right)$$
 Coeficiente de determinação eq. 15

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(E_i - \overline{M}_i \right)^2}{\left[\sum_{i=1}^{n} \left(E_i - \overline{E}_i \right) + \left(M_i - \overline{M}_i \right) \right]^2}$$
 Índice de Willmott eq. 16

$$R = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(E_{i} - \overline{E}\right) \left(M_{i} - \overline{M}\right)}{\left[\sum_{i=1}^{n} \left(E_{i} - \overline{E}\right)^{2} \sum_{i=1}^{n} \left(M_{i} - \overline{M}\right)^{0.5}\right]}\right)$$
 Coeficiente de correlação eq. 17

Índice de Confiança eq. 18
$$IC=r.d$$

em que E é o valor estimado pela PTF e M o valor medido (obtido pelo ajuste das curvas originais). \overline{E} e \overline{M} são as médias dos valores estimado pelas PTF e medidos, respectivamente. N é o número total de dados, d o índice de desempenho de Willmott e IC o índice de confiança que integra de forma conjunta a precisão (r) e a exatidão (d).

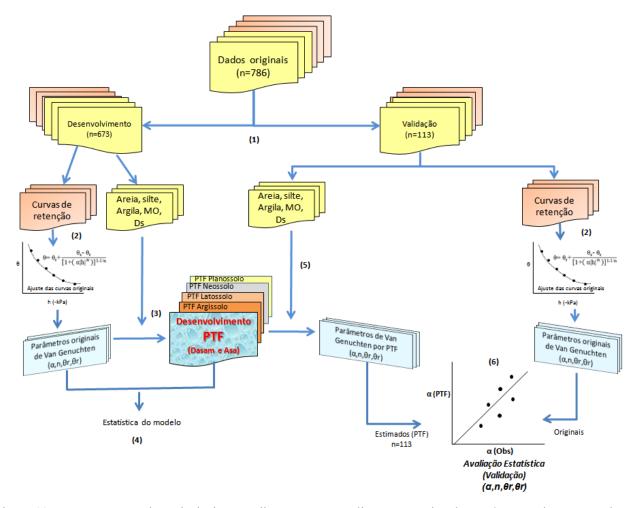


Figura 11 - Representação dos principais procedimentos para avaliação estatística dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), estimados com ajuste das curvas originais e por meio de PTF

Também foi avaliado o desempenho das PTF como estimadores do teor de água em potenciais matriciais específicos, 0, -6, -10, -30 e -1500 kPa, conforme metodologia ilustrada na figura 12. O teor de água foi avaliado nos potenciais específicos da seguinte forma: (1) comparando os valores observados e os dados obtidos pelo ajuste das curvas originais (RMSE Ajuste x OBS) e (2) comparando as estimativas das PTF e os valores observados (RMSE PTF x OBS).

Para essa avaliação foi utilizado o índice da raiz do erro médio quadrado (RMSE) que indica a precisão entre o teor de água em potenciais matriciais específicos calculados por meio das PTF e os dados observados (equação 19).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (M_i - E_i)^2}{N}}$$
 Raiz do erro médio quadrado eq. 19

em que E é o valor estimado pela PTF e M o valor medido (obtido pelo ajuste das curvas originais). N é o número total de dados.

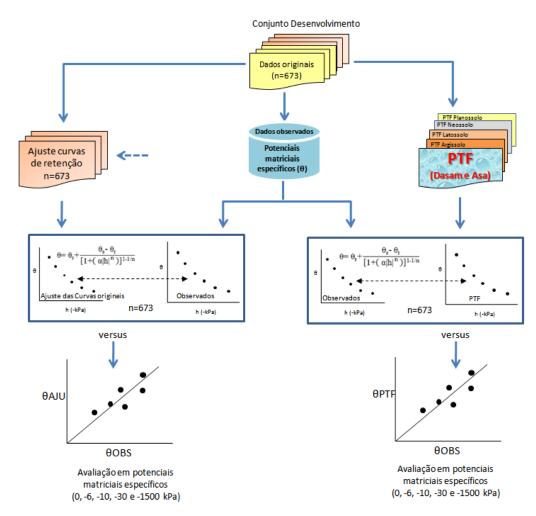


Figura 12- Representação da metodologia para avaliar as PTF paramétricas como estimadores do teor de água em potenciais matriciais específicos

3.6.2 Avaliação funcional das PTF

A avaliação funcional e teste das PTF foi realizada examinando-se o desempenho das PTF paramétricas no contexto do modelo SWAP para estimar a produtividade agrícola. Os municípios selecionados para teste e avaliação das PTF estão distribuídos em regiões do Nordeste conforme a figura 5.

Nesses locais se dispunham dados de produtividade das culturas do milho, sorgo e feijão caupi, de curvas de retenção de água no solo e dados de granulometria, matéria orgânica e densidade do solo. Ressalta-se que os dados utilizados para avaliação funcional não compuseram o conjunto de dados para o desenvolvimento e validação das PTF, uma vez que o objetivo foi testar a aplicabilidade das PTF no contexto específico.

A figura 13 ilustra os métodos utilizados para avaliação funcional. As PTF desenvolvidas foram utilizadas para estimar os parâmetros θ s, θ r, α e n da equação de Van Genuchten (1980) através da equação 4 (Dasam), com teores de areia, silte, argila, matéria orgânica e de densidade do solo, e pela equação 5 (Asa) com apenas teores de areia, silte e argila dos locais selecionados (1). Esses parâmetros foram utilizados como entrada no modelo SWAP (2) para estimar a produtividade da cultura utilizando as PTF (3).

Os parâmetros θ s, θ r, α e n das curvas de retenção dos mesmos locais também foram introduzidos diretamente no modelo SWAP (4) para estimar a produtividade (5).

A produtividade das culturas do milho, sorgo e feijão caupi estimada pelo modelo SWAP por meio das PTF e da curva de retenção do local foi comparada a valores observados de produtividade do próprio local (6).

As simulações foram realizadas para cada local com a PTF geral, obtidas para todos os solos e as outras simulações com PTF específicas da classe de solo do local. Em cada análise foi dada ênfase à PTF de caráter geral e às PTF específicas do local. Esse procedimento foi adotado para 5 localidades do Nordeste: Araripina (PE), Serra Talhada (PE), Areia(PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE), conforme tabela 4 e figura 4.

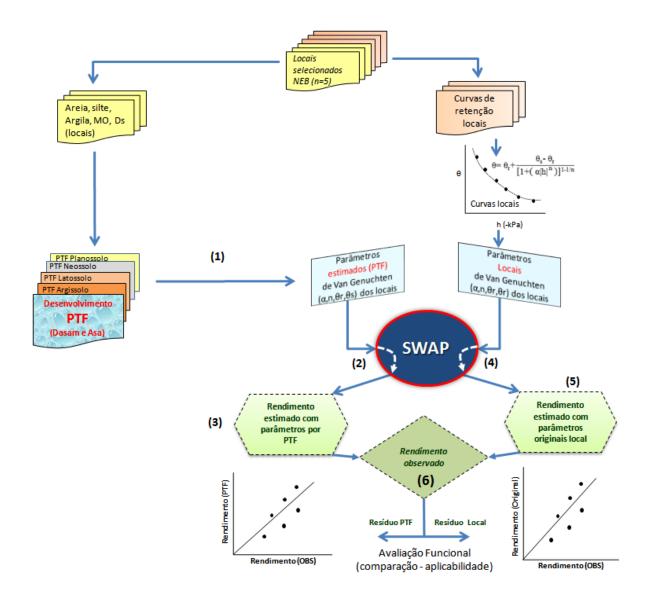


Figura 13 - Representação da metodologia para avaliação funcional das PTF paramétricas na simulação da produtividade agrícola no modelo SWAP

Para o município de Araripina (PE) dispunha-se de uma série de produtividade de 25 anos para a cultura do sorgo e 11 anos para o milho. Para Serra Talhada (PE), havia disponibilidade de um conjunto de dados de produtividade de 25 anos. A avaliação funcional das PTF em Serra Talhada foi com o objetivo de verificar o potencial das estimativas de produtividade do sorgo realizadas por meio de PTF, durante um período mais extenso.

Em Areia (PB), os dados de produtividade e das curvas de retenção utilizados para avaliar as PTF foram provenientes de trabalhos experimentais de tese de avaliação da

produtividade com a cultura do feijão caupi, com o propósito de verificar o desempenho das PTF em uma escala mais restrita e pontual, com apenas um período disponível de 3 anos de dados de produtividade.

A inclusão de dados do município de Umbaúba (SE) justifica-se por representar uma grande extensão dos tabuleiros costeiros, com solos predominantemente de Latossolos e Argissolos. No caso de Cruz das Almas (BA) o município apresenta áreas de transição de floresta tropical subperenifólia/subcaducifólia, com grande parte ocupada por Latossolo Amarelo e o Argissolo Amarelo que se diferenciam de outros ambientes do Nordeste. Para esses locais havia disponibilidade de dados de apenas 1 e 2 anos, respectivamente.

Na tabela 9 consta um resumo dos dados de produtividade observados disponíveis.

Tabela 9 - Culturas e número de anos com dados de produtividade disponível nos cinco locais avaliados

Local	Cultura	Anos disponíveis
Ararinina (DE)	Milho	11
Araripina (PE)	Sorgo	17
Areia (PB)	Feijão caupi	3
Cruz das Almas (BA)	Milho	2
Serra Talhada (PE)	Sorgo	25
Umbaúba (SE)	Feijão caupi	1

Após as simulações para todos os locais e anos, os resultados foram agrupados para análise conjunta das medidas de adequação estatística. Foram empregados os índice de confiança (IC) e o d de Willmott, descritos pelas equações 15, 16, 17 e 18, comparando o grau de precisão e exatidão dos dados observados e simulados de produtividade agrícola. O índice de confiança (IC) foi interpretado de acordo com os critérios relacionados na Tabela 10.

Tabela 10 - Critério de interpretação do índice de confiança (IC) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997)

IC	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
< 0,40	Péssimo

Todos os parâmetros de entrada do SWAP para a cultura foram mantidos constantes nas simulações de produtividade, com o objetivo de avaliar apenas o efeito do uso das PTF. Os parâmetros das culturas de milho, sorgo e feijão caupi foram inseridos de acordo com a literatura, notadamente para as condições do Nordeste. Os parâmetros de entrada de solo e das culturas utilizados no modelo SWAP para avaliação funcional constam na tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros da cultura utilizados no modelo SWAP para simular a produtividade agrícola das culturas do milho, sorgo e feijão caupi

Parâmetro	Abreviatura		Valor		Unidade
		Milho	Sorgo	Feijão Caupi	
Soma térmica da emergência ao florescimento	Tsumea	700	750	600	°C d
Soma térmica do florescimento a maturidade	Tsumam	1000	950	750	°C d
Temperatura base	Tb	10,0	10,0	10,0	$^{\mathrm{o}}\mathrm{C}$
Eficiência fotossintética	EF	0,45	0,40	0,35	$kg ha^{-1} h^{-1}/$ Jm^2s^{-1}
Coeficiente de extinção da luz direta	kdir	0,75	0,75	0,70	-
Eficiência de conversão de CO ₂ para folhas	cvl	0,68	0,68	0,70	kg kg ⁻¹
Eficiência de conversão de CO ₂ para órgãos de armazenamento	cvo	0,72	0,72	0,65	kg kg ⁻¹
Eficiência de conversão de CO ₂ para as raízes	cvr	0,72	0,72	0,65	kg kg ⁻¹
Eficiência de conversão de CO ₂ para o caule	cvs	0,69	0,69	0,70	kg kg ⁻¹
Fator de aumento da respiração a cada 10° C de aumento de temperatura	Q10	2,00	2,00	2,00	-
Respiração de manutenção das folhas	rml	0,030	0,030	0,250	kgCH ₂ O/ kg d
Respiração de manutenção dos órgão de armazenamento	rmo	0,010	0,010	0,018	kgCH ₂ O/ kg d
Respiração de manutenção das raízes	rmr	0,010	0,010	0,018	kgCH ₂ O/ kg d
Respiração de manutenção do caule	rms	0,015	0,015	0,018	kgCH ₂ O/ kg d
Profundidade máxima do sistema radicular	rdc	120,0	120,0	60,0	cm
Fotoperíodo ótimo	dlo	12,0	12,0	12,0	h

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desenvolvimento das funções de pedotransferência

4.1.1 Sistematização do conjunto de dados

Os solos utilizados nesse estudo apresentaram uma textura, característica da Região Nordeste, com teores de areia elevados. A maioria dos solos foi classificada como franco-argiloarenoso, franco-arenoso, franco e franco-argiloso (Figura 14).

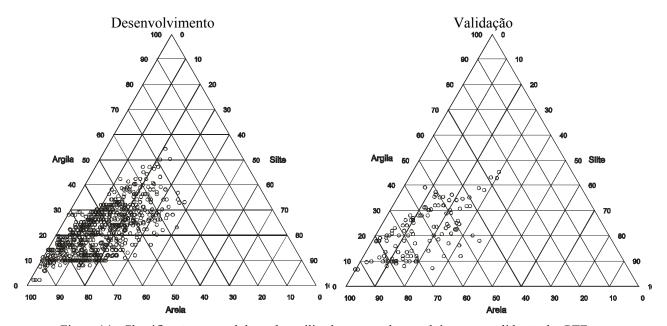


Figura 14 - Classificação textural dos solos utilizados para o desenvolvimento e validação das PTF

Os box-plots dos teores granulométricos e dados quantitativos para os dois subconjuntos de solos, um utilizado para o desenvolvimento e o outro para a validação das PTF, encontram-se na figura 15 e na tabela 12. Os teores de argila variam de 0,06 a 0,54 kg kg⁻¹; silte de 0,02 a 0,41 kg kg⁻¹ e areia de 0,25 a 0,95 kg kg⁻¹, com médias de 0,22, 0,15 e 0,63 kg kg⁻¹, respectivamente. A densidade média dos solos foi 1680 kg m⁻³. Os valores de densidade são muito semelhantes aos encontrados por Oliveira et al. (2002), que desenvolveram PTF para predição da umidade retida a potenciais específicos no Nordeste.

Valores semelhantes foram observados para a granulometria dos subconjuntos de dados para as classes de solos Latossolos, Argissolos, Planossolos e Neossolos (Tabelas 13, 14, 15 e 16). Os maiores teores de areia foram observados nos Neossolos e Argissolos, com 0,96 e 0,91 kg kg⁻¹, respectivamente. Os teores máximos de argila foram encontrados nos Argissolos (0,46 kg kg⁻¹) e Latossolos (0,50 kg kg⁻¹). Verifica-se, ainda, que solos com textura muito argilosa são inexistentes no conjunto de dados.

Solos de textura mais fina geralmente têm uma capacidade maior de armazenamento de água no solo. Nesse sentido, o teor de areia médio (0,63 kg kg⁻¹) nos solos utilizados para o desenvolvimento das PTF indica que, em geral, os solos têm uma baixa capacidade de armazenamento de água.

Em todas as classes observa-se um baixo teor de matéria orgânica, média de 0,006 kg kg⁻¹ e de silte 0,15 kg kg⁻¹. Oliveira (1968) faz referência aos baixos teores de silte e matéria orgânica em solos do Nordeste e Sudeste do Brasil, onde 60% desses solos têm baixos teores de matéria orgânica, e de silte, inferiores a 0,10 kg kg⁻¹. Oliveira et al. (2002), que desenvolveram PTF para o Estado de Pernambuco, encontraram teores médios de silte de 0,136 kg kg⁻¹.

Tomasella et al. (2000) trabalharam com solos de diversas regiões do Brasil e desenvolveram PTF paramétricas, as quais são referência para solos tropicais, e encontraram teores de silte, na sua maioria, entre 0,15 e 0,20 kg kg⁻¹, raramente excedendo 0,50 kg kg⁻¹. Os baixos teores de silte em solos tropicais é uma das razões para a reduzida funcionalidade naqueles solos de PTF desenvolvidas em regiões temperadas, onde os teores de silte costumam ser mais elevados.

Na figura 16 são apresentados os box-plots dos teores de água nos potenciais de 0, -6, -10, -30, -50, -100 e -1500 kPa, utilizados para o ajuste dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) e para o desenvolvimento e validação das PTF. Para os dois conjuntos de dados observa-se que os valores médios e a dispersão em todos os potenciais matriciais são de ordem de grandeza equivalentes.

Nota-se, ainda, que os valores médios dos teores de água na faixa da capacidade de campo, correspondentes aos potenciais matriciais de -10 e -30 kPa, são relativamente baixos, da ordem de 0,220 m³m⁻³, evidenciando uma limitação na capacidade de retenção de água do solo, característica predominante dos solos da Região Nordeste.

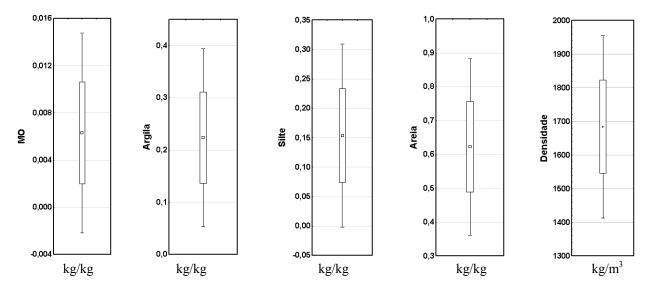


Figura 15 - Box-plots dos teores granulométricos e de matéria orgânica (MO) e de densidade do solo para os locais de coleta (n=786)

Tabela 12 - Estatísticas descritivas dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila e de densidade do solo nos 786 pontos utilizados para o desenvolvimento (subconjunto A) e validação (subconjunto B) das funções de pedotransferência de caráter geral

Subconjunto	Estatística	Matéria orgânica	Areia	Silte	Argila	Densidade do solo
		(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/m ³)
A (n=673)	Média	0,006	0,634	0,149	0,216	1686
(Desenvolvimento)	Máximo	0,027	0,945	0,406	0,542	1980
	Mínimo	0,000	0,249	0,002	0,060	800
	Desvio Padrão	0,004	0,139	0,079	0,091	138
B (n=113)	Média	0,006	0,648	0,145	0,209	1682
(Validação)	Máximo	0,023	0,910	0,382	0,471	1900
	Mínimo	0,001	0,288	0,016	0,050	1170
	Desvio Padrão	0,004	0,148	0,083	0,080	136

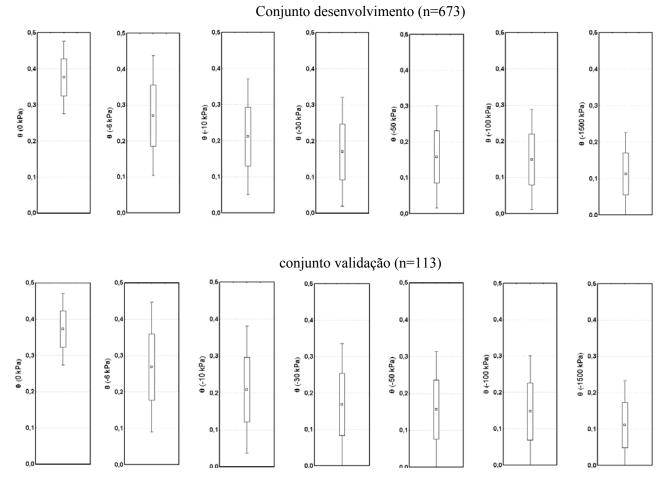


Figura 16 - Box-plots do teor de água em potenciais matriciais específicos, utilizados para as estimativas dos parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980), no conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento e validação das PTF

O procedimento utilizado para o desenvolvimento das PTF específicas, subdividindo os dados conforme as classes de solos, não diminuiu a variância dos dados para o desenvolvimento das PTF específicas, devido à variabilidade observada nos teores de areia, silte e argila dentro das classes de solos (Tabelas 13, 14, 15 e 16).

Tabela 13 - Estatísticas descritivas dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila e de densidade do solo nos 179 pontos utilizados para o desenvolvimento (subconjunto A) e validação (subconjunto B) das funções de pedotransferência para a classe dos Argissolos

Subconjunto	Estatística	Matéria orgânica	Areia	Silte	Argila	Densidade do solo
		(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/m ³)
A (n=159)	Média	0,005	0,633	0,142	0,224	1700
(Desenvolvimento)	Máximo	0,019	0,911	0,362	0,422	1940
	Mínimo	0,001	0,288	0,006	0,057	1232
	Desvio Padrão	0,003	0,150	0,085	0,086	122
B (n=20)	Média	0,005	0,662	0,135	0,210	1712
(Validação)	Máximo	0,015	0,900	0,383	0,422	1900
	Mínimo	0,001	0,288	0,020	0,009	1480
	Desvio Padrão	0,003	0,160	0,090	0,080	104

Tabela 14- Estatísticas descritivas dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila e de densidade do solo nos 343 pontos utilizados para o desenvolvimento (subconjunto A) e validação (subconjunto B) das funções de pedotransferência para a classe dos Latossolos

Subconjunto	Estatística	Matéria orgânica	Areia	Silte	Argila	Densidade do solo
		(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/m ³)
A (n=298)	Média	0,006	0,614	0,131	0,255	1703
(Desenvolvimento)	Máximo	0,017	0,889	0,316	0,501	1930
	Mínimo	0,001	0,254	0,002	0,070	1230
	Desvio Padrão	0,003	0,121	0,069	0,069	101
B (n=45)	Média	0,006	0,624	0,128	0,248	1708
(Validação)	Máximo	0,013	0,816	0,316	0,471	1860
	Mínimo	0,002	0,310	0,035	0,129	1420
	Desvio Padrão	0,003	0,127	0,072	0,071	89

Tabela 15 - Estatísticas descritivas dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila e de densidade do solo nos 63 pontos utilizados para o desenvolvimento (subconjunto A) e validação (subconjunto B) das funções de pedotransferência para a classe dos Planossolos

Subconjunto	Estatística	Matéria orgânica	Areia	Silte	Argila	Densidade do solo
		(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/m ³)
	Média	0,007	0,447	0,158	0,210	1708
A (n=51)	Máximo	0,024	0,713	0,303	0,542	1980
(Desenvolvimento)	Mínimo	0,001	0,202	0,019	0,088	1340
	Desvio Padrão	0,005	0,132	0,067	0,112	157
	Média	0,007	0,418	0,210	0,202	1721
B (n=12)	Máximo	0,019	0,609	0,303	0,427	1910
(Validação)	Mínimo	0,002	0,145	0,112	0,088	1490
	Desvio Padrão	0,005	0,171	0,063	0,127	133

Tabela 16 - Estatísticas descritivas dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila e de densidade do solo nos 172 pontos utilizados para o desenvolvimento (subconjunto A) e validar (subconjunto B) das funções de pedotransferência para a classe dos Neossolos

Subconjunto	Estatística	Matéria orgânica	Areia	Silte	Argila	Densidade do solo
		(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/m ³)
	Média	0,006	0,715	0,165	0,121	1661
A (n=141)	Máximo	0,027	0,965	0,406	0,340	1960
(Desenvolvimento)	Mínimo	0,000	0,365	0,004	0,020	730
	Desvio Padrão	0,006	0,106	0,073	0,043	167
	Média	0,006	0,723	0,159	0,119	1656
B(n=31)	Máximo	0,019	0,910	0,309	0,246	1890
(Validação)	Mínimo	0,001	0,519	0,016	0,055	1400
	Desvio Padrão	0,006	0,110	0,080	0,039	134

Pode-se observar que os teores de argila, areia, silte, argila, matéria orgânica e densidade do solo, utilizados para o desenvolvimento são da mesma ordem de grandeza dos dados utilizados para a validação das PTF.

A variabilidade nos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), obtidos por meio do ajuste aos dados originais pode ser verificado na tabela 17. A dispersão dos parâmetros α e n pode ser observada nos gráficos box-plots na figura 17. Os parâmetros θ r e θ s apresentaram variação com médias de 0,113 e 0,380 m³m⁻³, respectivamente.

Os parâmetros α e n que determinam a forma da curva de retenção apresentam uma variabilidade acentuada. Foram encontrados valores médios para α de 0,033 cm⁻¹ e 1,7 para n, respectivamente. As curvas de retenção com α mais alto apresentam teores maiores de areia, esvaziando considerável parte dos poros em sucções relativamente pequenas. Por outro lado, solos com texturas semelhantes não desenvolvem necessariamente a mesma estrutura e arquitetura de poros.

Variando os valores de α e n causam-se alterações na forma das curvas (Figuras 2 e 3), o que pode resultar em erros na estimativa de água para as plantas, no fluxo de água no solo e, consequentemente, na produtividade das culturas. O bom desempenho de uma PTF para estimar o conteúdo de água depende da combinação de todos os parâmetros da equação de Van Genuchten.

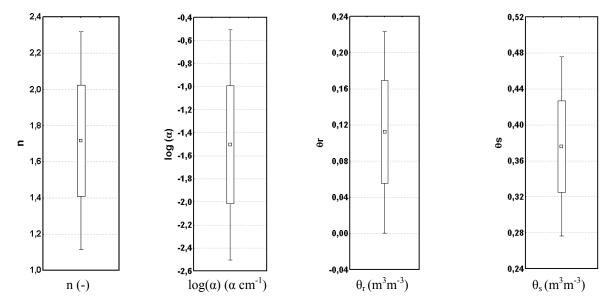


Figura 17 - Box-plots das estimativas dos parâmetros do modelo de Van Genuchten para os diferentes locais de coleta (n=786)

Tabela 17 - Estatísticas descritivas dos parâmetros da equação de Van Genuchten dos solos utilizados para o desenvolvimento das funções de pedotransferência (subconjunto A) e validação (subconjunto B)

Subconjunto	Estatística	log(α) (α cm ⁻¹)	n (-)	θr (m ³ m ⁻³)	θ s (m ³ m ⁻³)
A	Media	-1,477	1,716	0,113	0,380
(Desenvolvimento)	Máximo	-0,184	2,458	0,324	0,563
	Mínimo	-2,725	1,280	0,015	0,274
	Desvio Padrão	0,350	0,193	0,053	0,050
В	Media	-1,426	1,653	0,115	0,372
(Validação)	Máximo	-0,505	2,166	0,246	0,567
	Mínimo	-2,110	1,302	0,023	0,285
	Desvio Padrão	0,382	0,198	0,052	0,051

4.1.2 Funções de pedotransferência paramétricas e sua avaliação

Nas tabelas de 18 a 27 são apresentados os valores encontrados dos coeficientes da equação de regressão dos modelos das PTF para estimativa dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), utilizando como preditores os teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e de densidade do solo (equação 4 - Dasam) e apenas os teores de areia, silte e argila (equação 5 - Asa). Os coeficientes são válidos para todos os solos (Geral) e para as classes de solos Latossolos, Argissolos, Planossolos e Neossolos, separadamente.

Tabela 18 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para todos os solos (Geral) utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo

		Parâme	tro do mode	lo de Van Genuc	nten (1980)
Variável independente		$\log(\alpha)$ $\alpha \text{ em cm}^{-1}$	n -	$\frac{\theta_r}{m^3m^{-3}}$	$\frac{\theta_s}{m^3m^{-3}}$
	Coeficientes	x_1	x_2	x_3	x_4
Intercepto	b_0	0,8118	1,1527	0,0858	1
Areia (kg/kg)	b_I	0,8861	0,7427	-0,1671	0
Silte (kg/kg)	b_2	0	0,4135	0	0
Argila (kg/kg)	b_3	-1,1907	0	0,3516	0
Matéria orgânica (kg/kg)	b_4	0	-5,5341	1,1846	0
Densidade do solo (kg/m ³)	b_5	-0,0015140	0	0,0000290	-0,00037*

^{*- 0,00037 = -1/2700}

Tabela 19 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para classe Argissolo utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo

		Parâmo	etro do mode	lo de Van Genuch	ten (1980)
Variável independente		$\log(\alpha)$ $\alpha \text{ em cm}^{-1}$	n -	$\frac{\mathbf{\theta_r}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$	$\frac{\theta_s}{m^3m^{-3}}$
	Coeficientes	x_1	x_2	x_3	x_4
Intercepto	b_0	1,07385	1,2928	-0,098864	1
Areia (kg/kg)	b_I	1,14739	0,6770	0	0
Silte (kg/kg)	b_2	0	0	0,163228	0
Argila (kg/kg)	b_3	-0,87655	0	0,491560	0
Matéria orgânica (kg/kg)	b_4	0	-10,6304	0	0
Densidade do solo (kg/m³)	b_5	-0,0017960	0	0,000046497	-0,00037*

^{*- 0,00037 = -1/2700}

Tabela 20 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para classe Latossolo utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo

		Parâm	etro do mode	lo de Van Genuch	ten (1980)
Variável independente		$\log(\alpha)$ $\alpha \text{ em cm}^{-1}$	n -	$\frac{\mathbf{\theta_r}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$	θ_s m^3m^{-3}
	Coeficientes	x_1	x_2	x_3	x_4
Intercepto	b_0	0,66908	2,63944	0,349867	1
Areia (kg/kg)	b_I	1,83090	-0,66545	-0,460791	0
Silte (kg/kg)	b_2	0	0	-0,271574	0
Argila (kg/kg)	b_3	0	-2,09512	0	0
Matéria orgânica (kg/kg)	b_4	16,14177	-9,21339	1,164808	0
Densidade do solo (kg/m³)	b_5	-0,0020035	0	0,000053056	-0,00037*

^{*- 0,00037 = -1/2700}

Tabela 21 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para classe Neossolo utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo

		Parâm	etro do mode	lo de Van Genuch	ten (1980)
Variável independente		$\log(\alpha)$ $\alpha \text{ em cm}^{-1}$	n -	$\frac{\mathbf{\theta_r}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$	θ_s m^3m^{-3}
	Coeficientes	x_1	x_2	x_3	x_4
Intercepto	b_0	1,0363	1,94900	-0,073620	1
Areia (kg/kg)	b_I	0	0	0	0
Silte (kg/kg)	b_2	1,6290	-1,48863	0,101966	0
Argila (kg/kg)	b_3	-3,8339	0	0,628420	0
Matéria orgânica (kg/kg)	b_4	-14,3409	0	1,247318	0
Densidade do solo (kg/m³)	b_5	-0,0011875	0	0,000020888	-0,00037*

^{*- 0,00037 = -1/2700}

Tabela 22 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Dasam) para classe Planossolo utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo

		Parâme	tro do model	o de Van Genuc	hten (1980)
Variável independente		$\log(\alpha)$ $\alpha \text{ em cm}^{-1}$	n -	$\frac{\mathbf{\theta_r}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$	θ_s m^3m^{-3}
	Coeficientes	x_1	x_2	x_3	x_4
Intercepto	b_0	-1,08930	1,87414	-0,050854	1
Areia (kg/kg)	b_I	2,03213	0	0	0
Silte (kg/kg)	b_2	0	0	0,227631	0
Argila (kg/kg)	b_3	0	-1,03290	0,703732	0
Matéria orgânica (kg/kg)	b_4	0	0	0	0
Densidade do solo (kg/m ³)	b_5	-0,00107199	0	0	-0,00037*

^{*- 0,00037 = -1/2700}

Tabela 23 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Asa) para todos os solos (Geral) utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria

		Parâmetro do modelo de Van Genuchten (1980)						
Variável independente		$\log(\alpha)$ $\alpha \text{ em cm}^{-1}$	n -	$\frac{\mathbf{\theta_r}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$	$\frac{\mathbf{\theta_s}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$			
	Coeficientes	x_1	x_2	x_3	x_4			
Intercepto	b_0	-1,07329	1,134153	0,128617	0,434714			
Areia (kg/kg)	b_I	0	0,722216	-0,148360	-0,114177			
Silte (kg/kg)	b_2	0	0,395740	0	0,117845			
Argila (kg/kg)	b_3	-1,59578	0	0,357050	0			

Tabela 24 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Asa) para classe Argissolo utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria

		Parâmetro do modelo de Van Genuchten (1980)						
Variável independente		$\log(\alpha)$ $\alpha \text{ em cm}^{-1}$	n -	$\frac{\mathbf{\theta_r}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$	$\frac{\mathbf{\theta_s}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$			
	Coeficientes	x_1	x_2	x_3	x_4			
Intercepto	b_0	-1,96560	1,304684	-0,011769	0,310582			
Areia (kg/kg)	b_I	0,81871	0,552796	0	0			
Silte (kg/kg)	b_2	0	0	0,153654	0			
Argila (kg/kg)	b_3	0	0	0,461490	0,272265			

Tabela 25 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Asa) para classe Latossolo utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria

		Parâmetro do modelo de Van Genuchten (1980)						
Variável independente		$\log(\alpha)$ $\alpha \text{ em cm}^{-1}$	n -	$\frac{\mathbf{\theta_r}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$	$\frac{\mathbf{\theta_s}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$			
	Coeficientes	x_1	x_2	x_3	x_4			
Intercepto	b_0	-2,14513	1,87986	0,418834	0,480375			
Areia (kg/kg)	b_I	1,05076	0	-0,417836	-0,174821			
Silte (kg/kg)	b_2	0	0,74634	-0,259413	0			
Argila (kg/kg)	b_3	0	-1,32242	0	0			

Tabela 26 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Asa) para classe Neossolo utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria

		Parâmetro do modelo de Van Genuchten (1980)						
Variável independente		$\log(\alpha)$ $\alpha \text{ em cm}^{-1}$	n -	$\frac{\mathbf{\theta_r}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$	$\frac{\mathbf{\theta_s}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$			
	Coeficientes	x_1	x_2	x_3	x_4			
Intercepto	b_0	-1,07533	1,94900	-0,039008	0,330455			
Areia (kg/kg)	b_I	0	0	0	0			
Silte (kg/kg)	b_2	1,51681	-1,48863	0,113670	0			
Argila (kg/kg)	b_3	-3,14627	0	0,668881	0,459183			

Tabela 27 - Estimativas dos coeficientes da função de pedotransferência (PTF Asa) para classe Planossolo utilizadas para descrever a relação entre cada um dos parâmetros do modelo de Van Genuchten e propriedades relacionadas à granulometria

		Parâmetro do modelo de Van Genuchten (1980)						
Variável independente		$\log(\alpha)$ $\alpha \text{ em cm}^{-1}$	n -	$\frac{\mathbf{\theta_r}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$	$\frac{\mathbf{\theta_s}}{\text{m}^3\text{m}^{-3}}$			
	Coeficientes	x_1	x_2	x_3	x_4			
Intercepto	b_0	-2,31960	1,87414	-0,050854	0,575021			
Areia (kg/kg)	b_I	1,22541	0	0	-0,278970			
Silte (kg/kg)	b_2	0	0	0,227631	0			
Argila (kg/kg)	b_3	0	-1,03290	0,703732	0			

Na figura 18 mostram-se graficamente as correlações entre as propriedades do solo utilizadas e os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980). Valores quantitativos dessas correlações estão na tabela 28.

Observa-se uma correlação de -1 entre θ s e a densidade do solo. Essa correlação se deve à utilização da equação 3 para o cálculo de θ s. Na sequência, os maiores valores de correlação entre a granulometria e os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) foram encontrados entre os teores de argila e θ r (0,90); areia e θ r (-0,87); silte e θ r (0,46); areia e θ s (-0,43); $\log(\alpha)$ e argila (0,40); e densidade e $\log(\alpha)$ (0,40). Em geral, a correlação com o parâmetro n foi baixa. A correlação entre a matéria orgânica e os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) também foi baixa.

Verifica-se ainda que a argila apresenta uma correlação positiva e a areia negativa, com ambos os parâmetros θ s e θ r. Resultados semelhantes foram encontrados por Peraza (2003), com solos do sul do Brasil.

Tabela 28 - Coeficiente de correlação entre os parâmetros da equação de Van Genuchten ($\log \alpha$, n, θ r e θ s) e os teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo (n=786)

Variáveis	$\begin{array}{c} \textbf{Log} \\ (\alpha \text{ em cm-1}) \end{array}$	n (-)	$\frac{\theta \mathbf{r}}{(m^3 m^{-3})}$	$\frac{\mathbf{\theta s}}{(m^3m^{-3})}$
Matéria orgânica (kg kg ⁻¹)	0,22*	-0,09*	0,01	0,25*
Areia (kg kg ⁻¹)	0,32*	0,39*	-0,87*	-0,43*
Silte (kg kg ⁻¹)	-0,09*	-0,24*	0,46*	0,40*
Argila (kg kg ⁻¹)	-0,40*	-0,38*	0,90*	0,29*
Densidade do solo (kg m ⁻³)	-0,40*	0,20*	-0,30*	-1*

^{*} nível de significância: 5%.

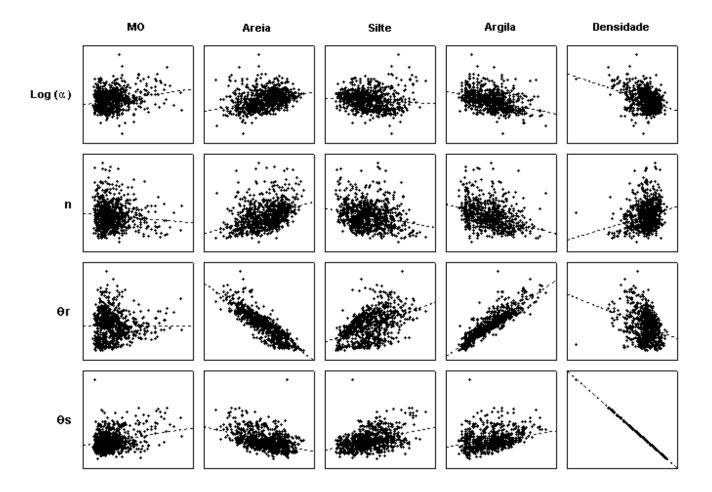


Figura 18 - Correlações entre os parâmetros da equação de Van Genuchten ($\log \alpha$, n, θ r e θ s) e os teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo (n=786). A linha tracejada representa a regressão linear

As propriedades relacionadas à granulometria, matéria orgânica e densidade do solo, como preditores dos parâmetros da equação da curva de retenção de Van Genuchten (1980), em solos do Nordeste do Brasil apresentaram, em geral, baixa qualidade de ajuste (Tabela 29 e 30). Apenas para o parâmetro θr (teor de água residual) o R² foi superior a 0,86 em todas as classes.

À exceção dos Neossolos, todas as classes apresentaram valores de R^2 entre 0,37 e 0,55 para $log(\alpha)$ para as PTF que foram desenvolvidas a partir da granulometria, da matéria orgânica e da densidade do solo. Para as PTF que utilizaram apenas a textura do solo o desempenho para $log(\alpha)$ foi inferior.

Em todas as estimativas, o pior resultado foi para o parâmetro n que apresentou valores de R², em geral, muito baixo, tanto para o conjunto de desenvolvimento, quanto para validação.

De acordo com Tomasella et al. (2003) é provável que o valor de n seja controlado pela densidade do solo, cuja correlação foi muito baixa.

Além do parâmetro n, observa-se, ainda, que há uma baixa capacidade preditiva para o parâmetro θ s, utilizando como preditores apenas os valores granulométricos do solo, com R^2 máximo de 0,31 para a classe Latossolo.

Em geral, os índices de confiança (IC) que refletem de modo conjunto a precisão e magnitude do viés das estimativas para os dados utilizados na validação foram predominantemente entre sofrível, mau e péssimo para o parâmetro log(α) e n. Verifica-se, ainda, que tanto para as PTF estimadas com teores de granulometria, matéria orgânica e densidade do solo, quanto para as PTF, estimadas somente com teores granulométricos do solo, não há uma combinação, onde todos os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) apresentaram índices confiáveis. Resultados semelhantes foram encontrados por Minasny (2000), trabalhando com diversos métodos para desenvolver PTF paramétricas.

As informações sobre as propriedades do solo têm uma variabilidade espaço-temporal muito acentuada, desde as PTF desenvolvidas com abrangência mais geral, calculadas com um número grande de curvas de retenção de diversos países ou aquelas mais específicas e regionais, como as desenvolvidas nesse trabalho (PACHEPSKY et al., 2004). Em todos, os resultados são semelhantes para estimativas dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), principalmente para logα e n, o que reforça a dificuldade de estabelecer a relação entre propriedades morfológicas, estrutura e retenção de água no solo.

Scheinost et al. (1997) também encontraram dificuldade em estimar os parâmetros α e n da equação de Van Genuchten, utilizando métodos de regressão linear múltipla. Pachepsky et al. (2004) e Wösten et al. (2001), em seus trabalhos de revisão sobre PTF, considerando vários tipos de solos e situações em todo mundo, mostraram que os resultados para log α e n são imprecisos.

Tomassela et al. (1998) sugerem que a estrutura do solo é determinante para a retenção de água em potenciais matriciais próximos à saturação. As PTF baseadas em parâmetros relacionados apenas nos teores granulométricos não reproduzem bem as formas da curva sob tensões pequenas. Pachepsky et al. (2004) afirmam que esse fato pode ser parcialmente explicado pela imperfeição de modelos para representar a distribuição de água nos poros em função do tamanho das partículas do solo.

Na comparação dos valores dos parâmetros da equação 2, os coeficientes de determinação (R^2) e os índices de confiança entre os dois conjuntos de dados, verifica-se que houve um melhor desempenho nos dados de validação, principalmente para os parâmetros α e n nas duas PTF desenvolvidas. (Tabela 29 e 30).

No agrupamento de dados por classe de solos verifica-se um pequeno aumento nos valores de R², evidenciando melhores ajustes na capacidade preditiva dos parâmetros. No entanto, Oliveira et al. (2002) mostraram que o agrupamento de dados baseados na classe textural não produziu melhoria na capacidade preditiva das PTF. Pachepsky et al. (1999) utilizando a estratificação das PTF encontraram melhores ajustes dos parâmetros, mas as estimativas do teor de água não melhoraram.

Tabela 29 - Medidas de adequação estatística dos modelos de regressão múltipla (PTF Dasam) para todos os solos (Geral) e por classe de solo, utilizados para estimar parâmetros do modelo de Van Genuchten, utilizando como preditores teores de areia, silte, argila, matéria orgânica e de densidade do solo

Parâmetro do modelo de	R ^{2*}	D ²		•	f 11 1 01
Van Genuchten (1980)	Modelo	\mathbb{R}^2	r	d	Índice de confiança
	C1			Validação	
1 r -la	Geral	0.40	0.60	0.70	0.54 (0.07.1)
logα [α em cm ⁻¹]	0,44	0,48	0,69	0,78	0,54 (Sofrível)
n [-]	0,16	0,24	0,49	0,55	0,27 (Péssimo)
$\theta_{\rm r} [{\rm m}^3 {\rm m}^{-3}]$	0,88	0,80	0,89	0,94	0,84 (Muito Bom)
$\theta_{\rm s} [{\rm m}^3 {\rm m}^{-3}]$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00 (Ótimo)
	Argissolos				
logα [α em cm ⁻¹]	0,51	0,31	0,55	0,72	0,40 (Mau)
n [-]	0,21	0,37	0,61	0,62	0,38 (Péssimo)
$\theta r [m^3 m^{-3}]$	0,90	0,93	0,96	0,98	0,94 (Ótimo)
$\theta s \left[m^3 m^{-3} \right]$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00 (Ótimo)
	Latossolos			ĺ	, \
logα [α em cm ⁻¹]	0,55	0,70	0,83	0,87	0,72 (Bom)
n [-]	0,18	0,21	0,46	0,53	0,24 (Péssimo)
θ r [m ³ m ⁻³]	0,89	0,90	0,95	0,97	0,92 (Ótimo)
$\theta s \left[m^3 m^{-3} \right]$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00 (Ótimo)
	Neossolos				
logα [α em cm ⁻¹]	0,37	0,32	0,57	0,65	0,37 (Péssimo)
n [-]	0,31	0,44	0,66	0,71	0,47(Mau)
$\theta r [m^3 m^{-3}]$	0,86	0,75	0,86	0,93	0,80 (Muito Bom)
$\theta s \left[m^3 m^{-3} \right]$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00 (Ótimo)
	Planossolos		,		, <u>, , , , , , , , , , , , , , , , , , </u>
logα [α em cm ⁻¹]	0,44	0,34	0,58	0,61	0,36 (Péssimo)
n [-]	0,13	0,10	0,31	0,49	0,15 (Péssimo)
θ r [m ³ m ⁻³]	0,82	0,69	0,83	0,86	0,71(Bom)
$\theta s [m^3 m^{-3}]$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00 (Ótimo)

^{*}Quadrado do coeficiente de correlação entre valores observados e preditos pelos respectivos modelos de regressão múltipla.

Tabela 30 - Medidas de adequação estatística dos modelos de regressão múltipla (PTF Asa) para todos os solos (Geral) e por classe de solo, utilizados para estimar parâmetros do modelo de Van Genuchten, utilizando como preditores apenas teores de areia, silte e argila

Parâmetro do modelo de Van Genuchten (1980)	R ^{2 *} Modelo	\mathbb{R}^2	r	d Validação	Índice de confiança
				Validação	
1 5 -12	Geral	0.14	0.25	0.45	0.15 (D/ :)
logα [α em cm ⁻¹]	0,16	0,14	0,37	0,45	0,17 (Péssimo)
n [-]	0,15	0,22	0,47	0,52	0,24 (Péssimo)
$\theta_{\rm r} \left[{\rm m}^3 {\rm m}^{-3} \right]$	0,86	0,79	0,89	0,95	0,85 (Muito Bom)
$\theta_{\rm s} [{\rm m}^3 {\rm m}^{-3}]$	0,23	0,15	0,39	0,54	0,21 (Péssimo)
	Argissolos				
logα [α em cm ⁻¹]	0,12	0,10	0,32	0,46	0,15 (Péssimo)
n [-]	0,17	0,32	0,61	0,63	0,38 (Péssimo)
$\theta r \left[m^3 m^{-3} \right]$	0,89	0,92	0,96	0,97	0,93 (Ótimo)
$\theta s \left[m^3 m^{-3} \right]$	0,22	0,47	0,69	0,71	0,50 (Mau)
	Latossolos	,		,	, , ,
logα [α em cm ⁻¹]	0,17	0,24	0,49	0,47	0,23 (Péssimo)
n [-]	0,17	0,22	0,47	0,54	0,25 (Péssimo)
$\theta r [m^3 m^{-3}]$	0,88	0,89	0,94	0,97	0,91 (Ótimo)
$\theta s \left[m^3 m^{-3} \right]$	0,31	0,10	0,32	0,53	0,16 (Péssimo)
	Neossolos				, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,
logα [α em cm ⁻¹]	0,10	0,09	0,30	0,26	0,08 (Péssimo)
n [-]	0,31	0,44	0,66	0,71	0,47 (Mau)
$\theta r \left[m^3 m^{-3} \right]$	0,84	0,63	0,79	0,88	0,70 (Bom)
$\theta s [m^3 m^{-3}]$	0,10	0,10	0,32	0,39	0,12 (Péssimo)
	Planossolos	•		•	· ` ` ` /
logα [α em cm ⁻¹]	0,26	0,29	0,54	0,52	0,28 (Péssimo)
n [-]	0,13	0,10	0,31	0,49	0,15 (Péssimo)
$\theta r \left[m^3 m^{-3} \right]$	0,82	0,69	0,83	0,86	0,71(Bom)
$\theta s \left[m^3 m^{-3}\right]$	0,38	0,51	0,84	0,70	0,59 (Sofrível)

^{*}Quadrado do coeficiente de correlação entre valores observados e preditos pelos respectivos modelos de regressão múltipla.

A capacidade preditiva da equação pode ser inspecionada visualmente, comparando os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), estimados pelas PTF, com os parâmetros provenientes do ajuste das curvas obtidos experimentalmente. Nas figuras 19 a 22 mostra-se graficamente a avaliação estatística dos parâmetros obtidos tanto para as PTF - Dasam, utilizando como preditores a granulometria, matéria orgânica e densidade do solo (Figura 19 e 20), quanto para as PTF - Asa, obtidas apenas utilizando como preditores a granulometria (Figura 21 e 22), conforme procedimentos apresentados na figura 11.

Observa-se nos gráficos referente aos parâmetros estimados com as PTF, utilizando a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo que grande parte dos valores está próximo da reta de 1:1, tanto no conjunto de dados utilizados no desenvolvimento (Figura 19), como no conjunto validação das PTF (Figura 20). Embora os valores apresentem pouca precisão

(R²), que indica menor precisão nas propriedades dos solo, observa-se maior grau de exatidão, evidenciando menores erros sistemáticos nos métodos empregados no desenvolvimento das PTF.

As PTF – Asa utilizando somente a granulometria do solo têm menor grau de precisão para os parâmetros $log(\alpha)$, n e θ s (Figura 21 e 22). Em todas as situações o melhor desempenho foi para o parâmetro θ r.

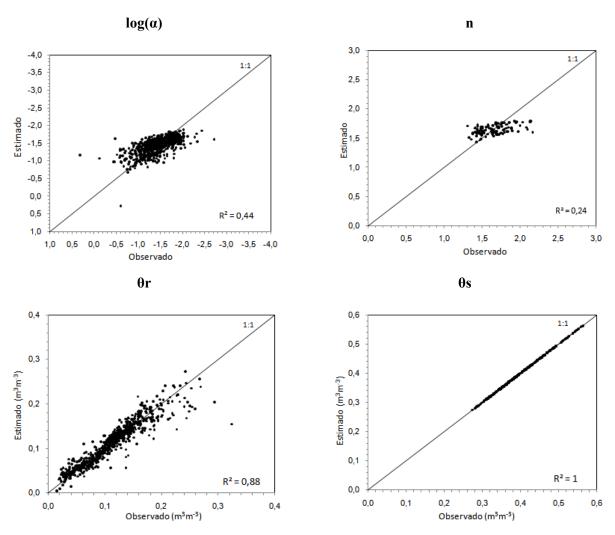


Figura 19 - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) observados por ajuste aos dados originais dos solos versus estimados por PTF - Dasam, utilizando teores de granulometria, matéria orgânica e de densidade do solo para o conjunto de dados utilizados no desenvolvimento. A linha cheia representa a reta 1:1. O valor de R² refere-se à regressão linear

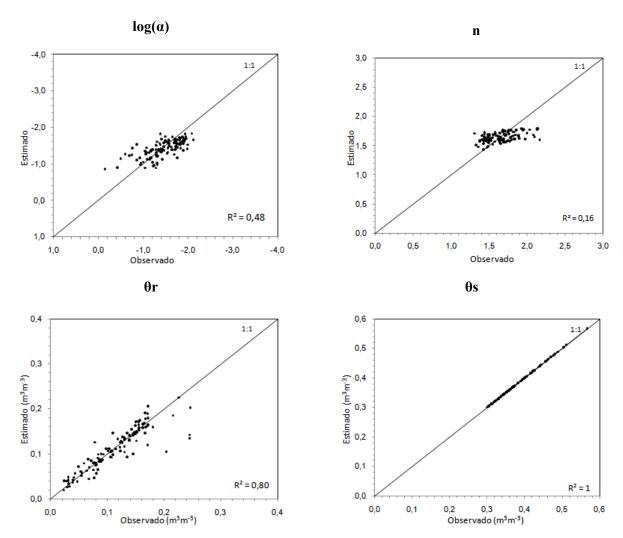


Figura 20 - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) observados por ajuste aos dados originais dos solos versus estimados por PTF — Dasam, utilizando teores de granulometria, matéria orgânica e de densidade do solo para o conjunto de dados utilizados na validação. A linha cheia representa a equação a reta 1:1. O valor de R² refere-se à regressão linear

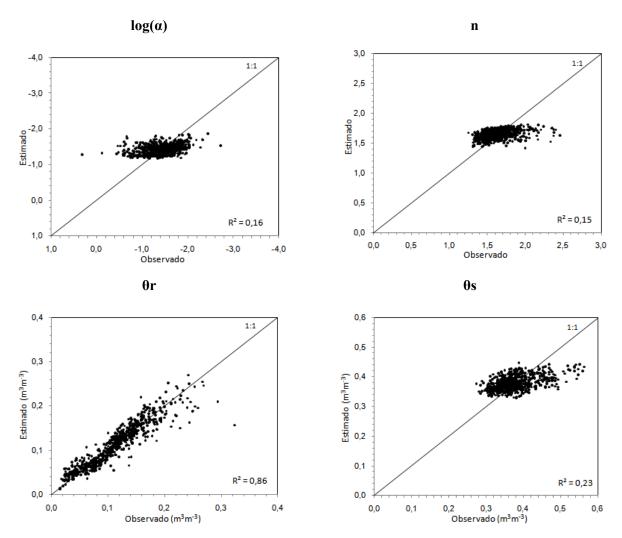


Figura 21 - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) observados por ajuste aos dados originais dos solos versus estimados por PTF - Asa, utilizando apenas a granulometria do solo para o conjunto de dados utilizados no desenvolvimento. A linha cheia representa a reta 1:1. O valor de R² refere-se à regressão linear

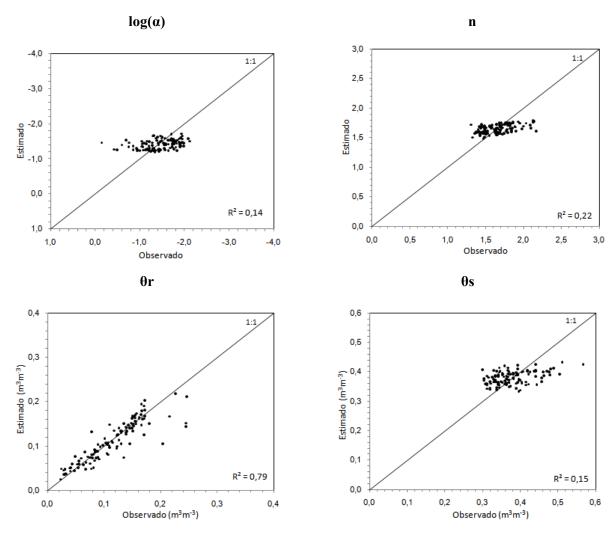


Figura 22 - Parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) observados por ajuste aos dados originais dos solos versus estimados por PTF - Asa, utilizando apenas a granulometria do solo para o conjunto de dados utilizados na validação. A linha cheia representa a reta 1:1. O valor de R² refere-se à regressão linear

4.1.3 Avaliação das PTF paramétricas como estimadoras do teor de água em potenciais matriciais específicos

Na figura 23 e na tabela 31 são apresentadas as correlações entre o teor de água em quatro potenciais matriciais específicos (-6, -10, -30 e -1500 kPa) e os teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e da densidade do solo. Observa-se que os teores de areia e de argila apresentam maior correlação com os teores de água. Conforme os potenciais matriciais se tornam mais negativos, essas correlações aumentam. A areia e argila apresentam maior correlação com a retenção de água nos potenciais matriciais de -6 a -1500 kPa, seguida pela silte.

Os maiores valores de correlação foram encontradas para os potenciais matriciais de - 30 e -1500 kPa com areia e argila. O teor de silte apresenta moderada correlação em todos os potenciais matriciais. Os resultados demonstram que a relação entre teor de água e a granulometria do solos estreita-se à medida que os potenciais matriciais ficam mais negativos. Neste caso, a composição granulométrica é a que melhor descreve a retenção de água no solo nos potenciais de -6 a -1500 kPa (Tabela 31).

Para as PTF que utilizam apenas os teores granulométricos do solo como preditores, as correlações entre o teor de água e os potenciais matriciais na faixa de -6 a -1500 kPa indicam que a capacidade de predição nesses potenciais pode não ser muito afetado quando se elimina a matéria orgânica e a densidade do solo, principalmente devido ao fato de as correlações encontradas serem muito reduzidas (Tabela 31 e Figura 23), como constatado também por Urach (2007) trabalhando com PTF para estimar o teor de água para fins de irrigação.

Tabela 31 - Coeficiente de correlação entre teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e de densidade do solo e o teor de água no solo a potenciais matriciais específicos

Variáveis	-6 kPa	- 10 kPa	-30 kPa	-1500 kPa
Matéria orgânica (kg kg ⁻¹)	-0,01	-0,02	0,01	0,01
Areia (kg kg ⁻¹)	-0,83*	-0,87*	-0,88*	-0,87*
Silte (kg kg ⁻¹)	0,47*	0,50*	0,48*	0,46*
Argila (kg kg ⁻¹)	0,84*	0,86*	0,89*	0,90*
Densidade (kg m ⁻³)	-0,20*	-0,30*	-0,30*	-0,29*

^{*} nível de significância de 5%.

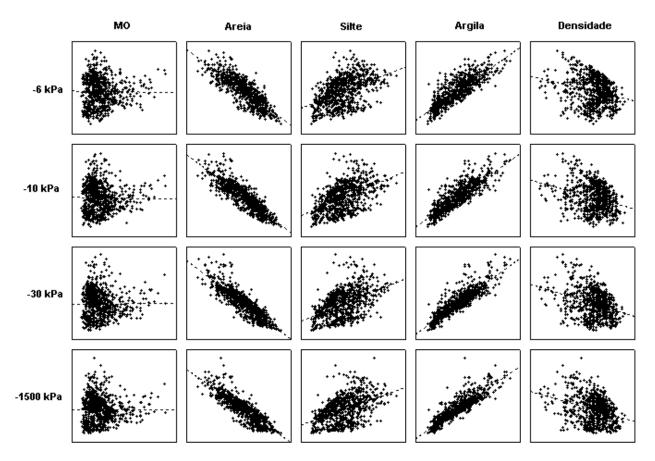


Figura 23 – Ilustração das correlações entre teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo e o teor de água no solo retida a potenciais matriciais específicos (-6, -10, -30 e -1500 kPa). A linha tracejada representa a regressão linear

Na avaliação das PTF como estimadores do teor de água em potenciais matriciais específicos (0, -6, -10, -30 e -1500 kPa), os resultados tendem a ser melhores do que na estimativa dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) (Figuras 24 e 25).

A estimativa do teor de água pelas PTF, quando comparado aos dados observados a raiz do erro médio quadrado (RMSE) foi, em média, da ordem de 0,031 m³ m⁻³ para as PTF - Dasam desenvolvidas, utilizando teores areia, silte, argila, matéria orgânica e de densidade do solo; e 0,040 m³ m⁻³ utilizando apenas a granulometria. Observa-se, ainda, que entre as PTF – Dasam e a PTF – Asa a ordem de grandeza do valor do RMSE foi semelhante. No entanto, o RMSE do ajuste versus as PTF os valor foi de 2 a 3 vezes maior (Tabela 32).

Para os potenciais matriciais de -30 e -1500 kPa, os ajustes são melhores para todas as PTF, com coeficiente de determinação (R²) superior a 0,85 (Figuras 24 e 25). Quando se observam os gráficos dos potenciais matriciais específicos, notadamente nas faixas de -6 a -30 kPa, verifica-se que há uma ligeira tendência das PTF subestimar os teores de água. No

entanto, do ponto de vista prático, esses resultados podem contribuir para aplicações mais simplificadas do balanço hídrico, onde há a necessidade de conhecer os teores de água em potenciais matriciais específicos.

Tabela 32 - Raiz do erro médio quadrado (RMSE) do teor de água no solo a potenciais matriciais específicos para as PTF desenvolvidas, utilizando a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo (Dasam) e apenas a granulometria (Asa)

		PTF				
		Dasam	Asa			
Potencial	RMSE Aju x Obs	RMSE PTF x Obs	RMSE PTF x Obs			
matricial	m^3m^{-3}	$\mathrm{m}^{3}\mathrm{m}^{-3}$	m^3m^{-3}			
0 kPa	0	0	0,051			
-6 kPa	0,014	0,046	0,050			
-10 kPa	0,017	0,031	0,038			
-30 kPa	0,009	0,027	0,034			
-1500 kPa	0,008	0,020	0,029			
Média	0,012	0,031	0,040			

Para as PTF baseadas apenas na granulometria, os resultados da avaliação das PTF paramétricas em potenciais específicos exibem as dificuldades das estimativas dos valores próximos a saturação (Figura 25). Os valores de R² de 0,23 (0 kPa) e 0,78 (-6 kPa) são inferiores, quando comparados aos outros potenciais matriciais.

A utilização da matéria orgânica e, principalmente, da densidade do solo como preditores nas PTF tem um efeito predominante na estimativa do teor de água próximo a saturação, como ilustrado na figura 25, onde se pode observar o fraco desempenho da PTF – Asa no potencial matricial de 0 kPa.

No entanto, na comparação entre as duas PTF, à exceção do potencial matricial 0 (saturação), pode-se observar que o desempenho é similar, com R² da mesma ordem de magnitude. É provável que, devido à fraca correlação entre o teor de matéria orgânica e a densidade do solo e a forte correlação entre os teores de areia e argila nos potenciais matriciais na faixa de -30 a -1500 kPa, o valor adicional de densidade do solo e do teor de matéria orgânica seja pequeno.

De acordo com Reichardt e Timm (2004) pelos teores de areia, silte e argila explica-se mais de 80% da retenção de água no solo, constituindo parte importante para estrutura geral da curva de retenção. Para altos teores de água, nos quais os fenômenos capilares são importantes na

determinação do potencial matricial, a curva de retenção depende mais do arranjo e das dimensões dos poros. Neste caso, a densidade do solo e a porosidade têm grande importância. Por outro lado à medida que os potenciais matriciais se reduzem o teor de matéria orgânica e a densidade do solo diminuem sua importância na retenção de água no solo.

Peraza (2007), trabalhando com solos do Rio Grande do Sul, e Oliveira (2002), em Pernambuco encontram resultados semelhantes: à medida que aumenta o número de variáveis como preditoras o desempenho das PTF melhora, principalmente na faixa mais úmida. Van den Berg (1997) também notou uma consistente relação entre os potenciais matriciais e a granulometria do solo para PTF desenvolvidas para solos tropicais.

Por outro lado, maiores erros na faixa mais úmida produzem menor incerteza para solos com θ s em torno de 0,4 m³m-³. Pachepsky et al. (2004) mostraram que o RMSE da curva de retenção da ordem de 0,05 m³m-³ e com valores de teores de água de 0,4 m³m-³ e 0,05 m³m-³, produzem erros da ordem de 12,5% (0,05 m³m-³ / 0,4 m³m-³) e 100 % (0,05 m³m-³ / 0,05 m³m-³), respectivamente.

Tomasella (2000) encontrou valores de RMSE da ordem de 0,032 a 0,427 m³m⁻³ para solos tropicais. A precisão de PTF para estimativa do teor de água para solos tropicais, utilizando a granulometria do solo está, em média, entre 0,04 e 0,06 m³m⁻³ (TOMASSELA et al., 1998). Os valores de referência para erros encontrados na estimativa do teor de água em diversas regiões no mundo podem ser encontrados em Pachepsky et al. (2004) e Wösten et al. (2001), listados na tabela 2, os quais apresentam erros entre 0,02 e 0,11 m³m⁻³.

Valores semelhantes no erro da estimativa do teor de água foram observados por Oliveira et al. (2002), analisando curvas características de retenção de água de solos do Nordeste, principalmente com Argissolos e Latossolos. Esses valores estão muito próximos também à magnitude observada em diversos trabalhos com PTF desenvolvidas para todo o Brasil, utilizando as mesmas propriedades físicas do solo e/ou com a umidade equivalente (TOMASELLA et al., 2000, 2008).

Ressalta-se que valores encontrados de RMSE da ordem de 0,04 m³m⁻³, considerados aceitáveis para os solos da Região Nordeste, não asseguram um bom desempenho na estimativa do teor e da dinâmica da água no solo. Minasny (2000) mostrou que a discrepância dos parâmetros da equação 2 pode produzir bom ajuste da curva de retenção de água, mesmo com alguns parâmetros com maior ou menor grau de incerteza o que, de certo modo, comprova o

caráter empírico da equação. Van Genuchten e Wösten (1988) demonstraram que as variações simultâneas de mais de dois parâmetros da equação podem produzir resultados muito semelhantes (Figura 2).

A estimativa por potenciais específicos pode produzir melhores resultados do que a estimativa por parâmetros. Tomassela et al. (2008) sugerem que, mesmo na estimativa por parâmetros se utilizem potenciais matriciais específicos e se interpolem outros valores, como forma de diminuir a variabilidade. Em geral, o desempenho das PTF em potenciais matriciais específicos é melhor (ASSAD et al., 2001; OLIVEIRA, 2002; PERAZA, 2003; PACHEPSKY; RAWLS, 2004).

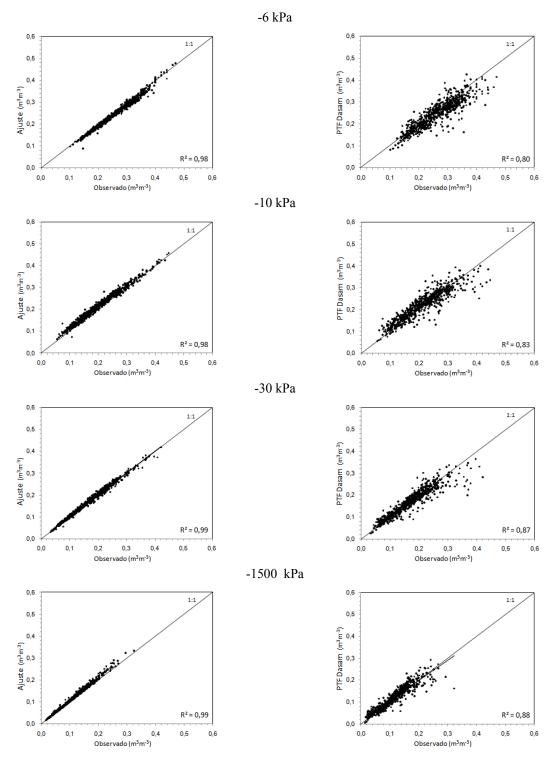


Figura 24 - Valores observados versus estimados de teor de água em potenciais matriciais específicos para a) dados observados e obtidos por ajuste aos dados observados; b) dados observados e obtidos por PTF - Dasam. As PTF foram estimadas utilizando a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo. A linha cheia representa a reta 1:1. O valor de R² refere-se à regressão linear

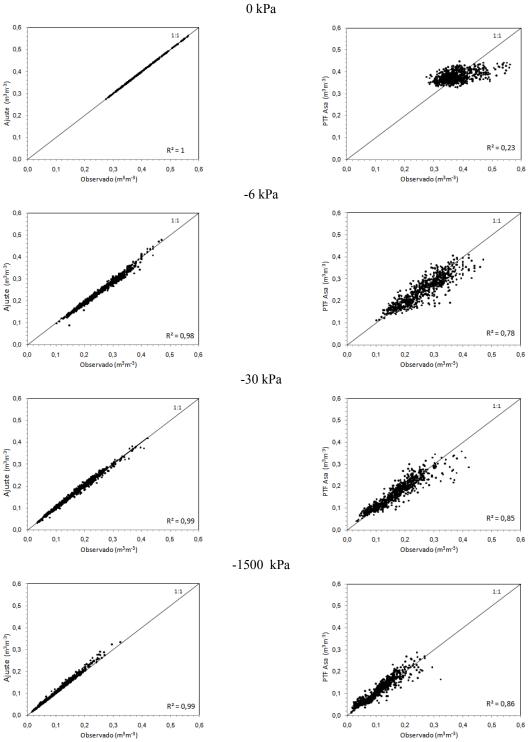


Figura 25 - Valores observados versus estimados de teor de água em potenciais matriciais específicos para a) dados observados e obtidos por ajuste aos dados observados; b) dados observados e obtidos por PTF - Asa. As PTF foram estimadas utilizando apenas a granulometria. A linha cheia a reta 1:1. O valor de R² refere-se à regressão linear

4.2 Simulações agro-hidrológicas para avaliação funcional das PTF

4.2.1 Serra Talhada (PE)

4.2.1.1 Avaliação das curvas de retenção obtidas diretamente no local e por PTF

Os dados morfológicos utilizados para cálculo dos parâmetros da equação de Van Genuchten pelas PTF no município de Serra Talhada (PE) são apresentados na tabela 33. Os parâmetros da equação 2, tanto para curva de retenção original, correspondente à classe Neossolo, como para as PTF estão listados na tabela 34. A cultura utilizada foi a do sorgo. Os dois horizontes do perfil do solo distinguidos encontram-se a 0-30 e 30-60 cm de profundidade.

A maior discrepância entre os parâmetros da equação de Van Genuchten originais e estimados por PTF foi verificado para θr. Os valores mais coincidentes dos parâmetros da equação 2 entre as curvas locais e as PTF foram n e θs. Os valores de θs diferem apenas das estimativas com as PTF utilizando somente a granulometria (Tabela 34). Na figura 26 pode-se observar que o valor de θs para PTF Geral (Asa) é inferior ao valor nas curvas de retenção originais. No entanto, verifica-se que θs tende a ficar mais próximo ao valor da curva original, utilizando a PTF Neossolo (Asa). (Figura 27).

Em geral, observa-se melhor ajuste entre as curvas de retenção locais e as ajustadas pelas PTF (Dasam), aplicando a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo como preditoras. Para essas PTF a utilização da densidade do solo como variável preditora, principalmente ao nível de saturação do solo mostrou-se importante para os valores iniciais do teor de água (Figuras 26 e 27).

O desempenho das PTF na profundidade de solo entre 30 a 60 cm foi inferior ao da camada superficial, com RMSE médio de 0,1 m³m⁻³. No entanto, verifica-se que o RMSE médio foi da ordem de 0,079 m³m⁻³ (Tabela 35), evidenciando pouca diferença entre a estimativa do teor de água pelas PTF. Para as PTF Geral existe uma tendência de subestimar o teor de água em relação às curvas de retenção do local. As PTF específicas apenas na profundidade de 0 a 30 cm tendem a superestimar.

Tabela 33 - Teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo, correspondente ao tipo de solo do local (Neossolo), utilizados para calcular as PTF no município de Serra Talhada (PE)

Prof.	Granulometria							
	Matéria Orgânica	Areia	Silte	Argila	Densidade do solo			
cm		kg kg ⁻¹			kg m ⁻³			
0-30	0,0040	0,580	0,100	0,320	1430			
30-60	0,0039	0,630	0,150	0,220	1440			

Tabela 34 - Parâmetros da equação de Van Genuchten, referentes às profundidades, 0-30 e 30-60 cm, utilizados no modelo SWAP para simular a produtividade agrícola do sorgo no município de Serra Talhada (PE), obtidos pelos dados locais (Neossolo) e pelas PTF Dasam e Asa

Fonte dos parâmetros	Solo	Prof.	Parâmetros da equação de Van					
				Genuchten				
		cm	α	n	θr	θ s		
			(cm^{-1})	(-)	(m^3m^{-3})	(m^3m^{-3})		
Original	Neossolo	0-30	0,021	1,480	0,066	0,470		
Original		30-60	0,007	1,610	0,069	0,466		
	Geral	0-30	0,060	1,603	0,148	0,471		
PTF		30-60	0,085	1,661	0,104	0,467		
Dasam	Neossolo	0-30	0,016	1,800	0,173	0,471		
		30-60	0,047	1,726	0,115	0,467		
	Geral	0-30	0,026	1,593	0,157	0,380		
PTF		30-60	0,038	1,649	0,114	0,379		
Asa	Neossolo	0-30	0,012	1,800	0,186	0,477		
		30-60	0,029	1,726	0,125	0,431		

Tabela 35 - Raiz do erro médio quadrado (RMSE) utilizados para comparar os teores de água observados na curva de retenção local e estimados por meio de PTF no município de Serra Talhada (PE)

Profundidade	RMSE	RMSE	
	PTF Geral	PTF Neossolo	
cm	m^3m^{-3}	m^3m^{-3}	
	(Dasam)		
0-30	0,049	0,052	
30-60	0,104	0,082	
Média	0,076	0,067	
	(Asa)		
0-30	0,067	0,069	
30-60	0,099	0,072	
Média	0,083	3 0,070	

PTF Geral

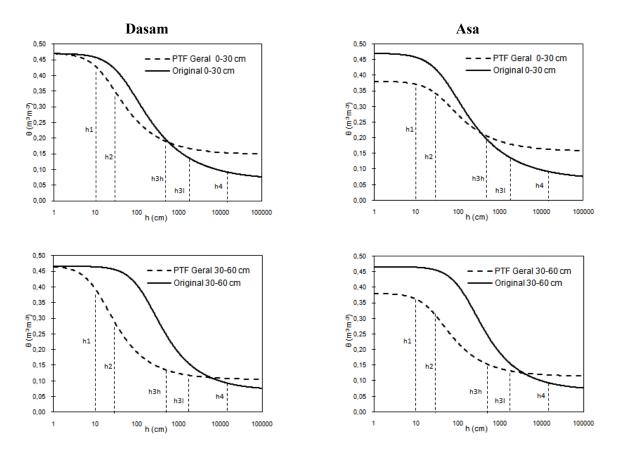


Figura 26 - Curvas de retenção de água do solo a 0-30 e 30-60 cm de profundidade no município de Serra Talhada (PE). A linha cheia representa a curva original obtida no local e a tracejada a curva obtida pelas PTF Geral (Dasam e Asa). h₁, h₂, h_{3h}, h_{3l} e h₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água para a cultura do sorgo (Tabela 8)

PTF Neossolo

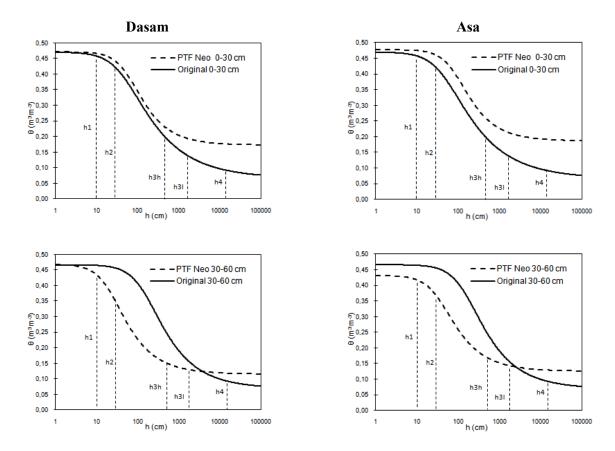


Figura 27 - Curvas de retenção de água do solo a 0-30 e 30-60 cm de profundidade no município de Serra Talhada (PE). A linha cheia representa a curva original obtida no local e a tracejada a curva obtida pelas PTF Neossolos (Dasam e Asa). h₁, h₂, h_{3h}, h_{3l} e h₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água para a cultura do sorgo (Tabela 8)

4.2.1.2 Estimativa da produtividade pelo modelo SWAP

Os resultados das simulações de produtividade do sorgo pelo modelo SWAP, para o período de 25 anos para o município de Serra Talhada (PE), são apresentados na tabela 36. A performance das simulações de produtividade com parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) obtidos por ajuste aos dados locais e pelas PTF foi entre sofrível a mediano, com índice de confiança (IC) da ordem de 0,60. O melhor desempenho foi verificado para a estimativa de produtividade com parâmetros da equação de Van Genuchten (1980), utilizando a PTF Geral - Asa, estimada apenas com teores granulométricos, com índice de confiança de 0,68 (Tabela 36).

Tabela 36 - Medidas de adequação estatística e produtividade da cultura do sorgo estimada pelo modelo SWAP, utilizando os parâmetros da equação de Van Genuchten da curva de retenção local (Neossolo) e estimado por PTF Geral (Dasam e Asa) e PTF Neossolo (Dasam e Asa), no município de Serra Talhada (PE)

Plantio	Produtividade (kg ha ⁻¹)						
	Experimento	Curva do Local	PTF Geral	PTF Neossolo	PTF Geral	PTF Neossolo	
		uo Locai		asam)	(Asa)		
20-mar-1973	2590	3474	3066	3043	2628	2831	
06-mar-1974	4433	4695	4717	4695	4696	4694	
25-fev-1975	4581	4881	4638	4718	4727	4723	
19-jan-1976	3030	4686	3952	4307	3977	4224	
18-fev-1977	3459	4696	4261	4226	4207	4196	
03-fev-1978	4114	4682	4321	4659	4045	4624	
14-jan-1979	4329	3257	2637	2622	2541	2501	
03-jan-1980	3735	5514	5543	5605	5275	5604	
09-fev-1981	2130	3736	5219	5307	4422	5214	
19-mar-1982	1647	3248	2732	2181	2028	2003	
15-jan-1983	1996	3221	2843	2839	3002	2861	
10-fev-1984	5637	5482	5215	5458	5456	5479	
15-fev-1985	5615	4725	4636	4696	4710	4705	
22-fev-1986	4131	4652	4674	4644	4645	4641	
28-jan-1987	4910	4934	4800	4901	4911	4917	
22-fev-1988	5307	5006	4842	4976	4948	4999	
14-jan-1989	3421	5238	4892	4829	5035	4838	
21-fev-1990	2025	4225	3898	3489	3730	3483	
03-jan-1991	3464	4955	5073	5091	4589	5063	
15-jan-1992	3561	4840	4468	4937	4279	4872	
19-jan-1993	500	801	754	632	697	559	
02-fev-1995	4240	4947	4768	4841	4900	4799	
19-fev-1996	3740	4420	4300	4382	4386	4401	
10-fev-1997	3800	4854	4741	4847	4844	4857	
19-jan-1998	908	460	411	228	247	172	
•		<u>. </u>		r			
		0,78	0,72	0,75	0,79	0,74	
			•	ď	<u> </u>	ŕ	
		0,81	0,81	0,83	0,86	0,83	
		,	,	IC	,	,	
		0,63	0,59	0,62	0,68	0,61	

No caso das simulações com as PTF, calculada com a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo, os resultados mostraram pouca diferença com relação às PTF desenvolvidas somente com teores granulométricos. O melhor desempenho de algumas PTF pode estar associado às pequenas diferenças dos teores de água limites do potencial matricial (h), utilizados como referência pelo modelo SWAP, em relação à faixa ótima, entre os potenciais matriciais h₂ e h₃. Por outro lado, os índices de confiança da PTF Neossolo, utilizando todos os preditores (Dasam) e os da curva local são praticamente iguais, indicando melhor ajuste entre as duas curvas.

A menor diferença entre as curvas de retenção local e a calculada pela PTF Neossolo (Asa), desenvolvida apenas com teores granulométricos resultou em melhor desempenho (Figura 26). Essa constatação mostra que a aplicação de uma PTF no contexto específico deve sempre estar associada a teste e validação, pois dependendo da aplicação, a acurácia da estimativa do teor de água em intervalos específicos de potenciais matriciais pode ser determinante nos resultados.

Em geral, a dispersão dos valores observados e estimados é bastante acentuada (Figura 28), mas as PTF têm desempenho semelhante quanto a erros aleatórios (r) e sistemáticos (d). O índice de Willmott (d) foi superior a 0,7 em todas as simulações com as PTF (Tabela 36).

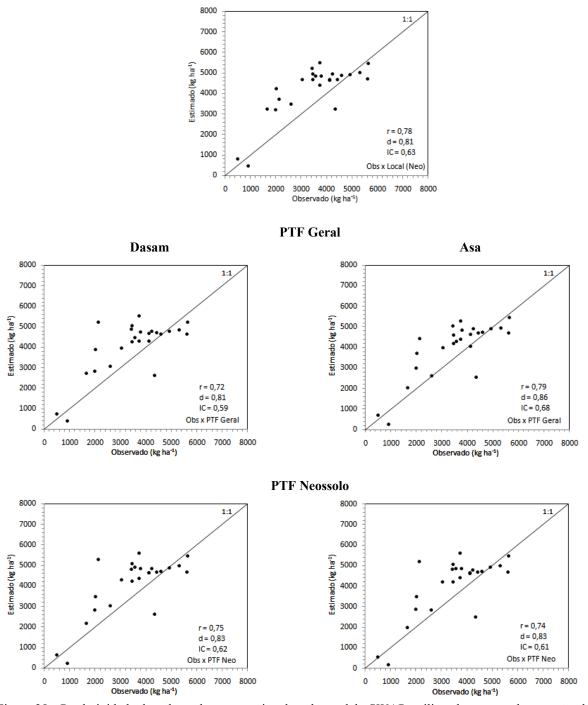
Na Figura 28 pode-se observar, ainda, que os valores estimados de produtividade, tanto para as curvas de retenção do local, quanto para as PTF, mostram uma equidistância semelhante à reta 1:1, mas com tendência para superestimar a produtividade, evidenciando que o erro na estimativa da produtividade pode estar associado a outros fatores.

Considerando o período de 25 anos como um tempo representativo, os resultados evidenciam um bom potencial do modelo SWAP em combinação com PTF para simulação de rendimento agrícola, principalmente quando se observa pouca diferença entre as estimativas das PTF com as obtidas por ajuste aos dados locais da curva de retenção.

Pachepsky et al. (1999) destacaram que as funções de pedotransferência desenvolvidas a partir de dados regionais apresentam bons resultados em regiões com solos e paisagens similares.

Com relação à aplicação das PTF, Verburg et al. (1996) aplicaram quatro tipos de PTF para calcular os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) e estimar o movimento de água no solo. Os autores concluíram que as diferenças nas PTF não afetaram de maneira significativa as simulações em escala temporal mais abrangente.

Bond et al. (1999) compararam medidas diretas com estimativas realizadas com PTF para simular o transporte de brometo e o balanço hídrico do solo. As diferenças entre as medidas direta e indireta (PTF) foram muito pronunciadas. No entanto, os resultados das simulações mostraram bom desempenho, indicando a validade e aplicabilidade das PTF.



Dados locais

Figura 28 - Produtividade da cultura do sorgo estimada pelo modelo SWAP, utilizando a curva de retenção de água local (Neossolo) a curva de retenção estimada pela PTF Geral (Dasam e Asa) e a curva de retenção estimada por PTF Neossolo (Dasam e Asa). A linha cheia representa a reta 1:1

4.2.2 Araripina (PE)

4.2.2.1 Avaliação das curvas de retenção obtidas diretamente no local e por PTF

Na tabela 37 são enumerados os dados granulométricos e a densidade dos solos utilizados para utilização das PTF e na tabela 38 os parâmetros da equação 2 para a localidade de Araripina (PE). No perfil do Latossolo distinguiram-se horizontes nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm. As culturas utilizadas para as simulações de produtividade foram o sorgo e o milho.

Na estimativa dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) por PTF, o valor de α foi superior aos valores observados na curva local nas PTF desenvolvidas, utilizando a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo. No entanto, foi inferior para as PTF desenvolvidas apenas utilizando a granulometria (Tabela 38). A eliminação da densidade do solo como variável preditora provoca maior incerteza na curva de retenção, principalmente na estimativa de θ s (Figuras 29 e 30).

Para as PTF calculadas somente com a granulometria, os valores θ s são inferiores aos valores observados da curva local com diferença da ordem de 0,15 m³m⁻³ (Tabela 38). Por outro lado, com valores altos de teor de areia (> 0,60 kg kg⁻¹) as estimativas de θ r tendem a melhorar, como ilustrado nas figuras 29 e 30.

Em média, a raiz do erro médio quadrado (RMSE) do teor de água foi menor para a PTF Geral (0,044 m³ m⁻³), desenvolvida a partir da granulometria, da matéria orgânica e da densidade do solo (Dasam). O RMSE médio foi de 0,050 m³ m⁻³ para as PTF, utilizando os mesmos preditores e da ordem de 0,053 m³m⁻³ para as PTF utilizando apenas a granulometria do solo. (Tabela 39). Em todas as curvas de retenção o teor de água nos potenciais de -200 a -1000 kPa, estimado por PTF está próximo ao teor previsto pela curva local.

Nos valores críticos do potencial matricial de água no solo (h) para absorção de água pela raiz das culturas do milho e sorgo, notadamente entre os potenciais h2 (-25 kPa) e h31 (-350 e -750 kPa), verifica-se que, à exceção das PTF, utilizando todas as variáveis peditoras, os teores de água são semelhantes aos das curvas locais (Figuras 29 e 30).

Tabela 37 - Teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo, correspondente ao tipo de solo do local (Latossolo), utilizados para calcular as PTF no município de Araripina (PE)

Prof.	Granulometria					
	Matéria Orgânica	Areia	Silte	Argila	Densidade do solo	
cm	kg kg ⁻¹				kg m ⁻³	
0-20	0,0004	0,727	0,029	0,265	1371	
20-40	0,0003	0,704	0,025	0,283	1325	
40-60	0,0002	0,698	0,021	0,282	1307	
60-80	0,0002	0,632	0,073	0,303	1322	

Tabela 38 - Parâmetros da equação de Van Genuchten, referentes às profundidades, 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm, utilizados no modelo SWAP para simular a produtividade agrícola do feijão caupi no município de Araripina (PE), obtidos pelos dados locais (Latossolo) e por PTF Geral (Dasam e Asa) e PTF Latossolo (Dasam e Asa)

Fonte dos parâmetros	Solo	Prof.	Parâmetros da equação de Van Genuchten			
		cm	α	n	θr	θs
			(cm^{-1})	(-)	(m^3m^{-3})	(m^3m^{-3})
Original	Latossolo	0-20	0.086	1.457	0.116	0.479
Original		20-40	0.078	1.479	0.122	0.498
		40-60	0.094	1.482	0.123	0.500
		60-80	0.061	1.541	0.120	0.498
	Geral	0-20	0,116	1,694	0,097	0,493
PTF		20-40	0,126	1,679	0,106	0,512
Dasam		40-60	0,132	1,672	0,107	0,519
		60-80	0,103	1,648	0,125	0,512
	Latossolo	0-20	0,177	1,612	0,086	0,493
		20-40	0,205	1,584	0,092	0,512
		40-60	0,214	1,592	0,096	0,519
		60-80	0,152	1,590	0,111	0,512
PTF Asa	Geral	0-20	0,032	1,662	0,115	0,355
		20-40	0,030	1,648	0,125	0,357
		40-60	0,030	1,640	0,126	0,358
		60-80	0,028	1,617	0,142	0,371
	Latossolo	0-20	0,041	1,551	0,113	0,355
		20-40	0,039	1,525	0,121	0,358
		40-60	0,038	1,525	0,125	0,360
		60-80	0,033	1,535	0,137	0,370

Tabela 39 - Raiz do erro médio quadrado (RMSE) utilizado para comparar os teores de água observados na curva de retenção original e estimados por meio de PTF no município de Araripina (PE)

Profundidade	RMSE	RMSE
	PTF Geral	PTF Latossolo
	(Areia, Silte, Argila, Maté	éria orgânica e Densidade do solo)
cm	m^3m^{-3}	m^3m^{-3}
0-20	0,0512	0,0646
20-40	0,0502	0,0645
40-60	0,0450	0,0395
60-80	0,0303	0,0186
Média	0,0430	0,0468
	(Areia	, Silte, Argila)
0-20	0,0545	0,0568
20-40	0,0623	0,0633
40-60	0,0578	0,0569
60-80	0,0571	0,0605
Média	0,0579	0,0593

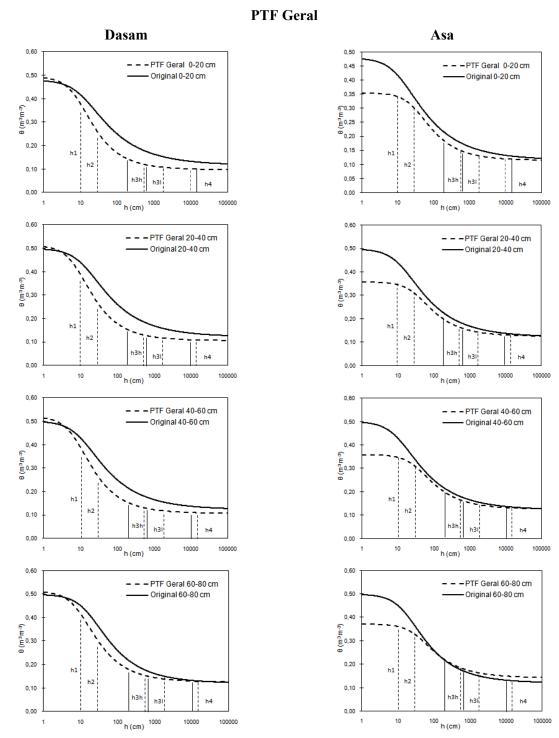


Figura 29 - Curvas de retenção de água do solo a 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm de profundidade no município de Araripina (PE). A linha cheia representa a curva obtida no local e a tracejada a curva obtida pelas PTF Geral (Dasam e Asa). h₁, h₂, h_{3h}, h_{3l} e h₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água para a cultura do sorgo (---) e do milho (-) (Tabela 8)

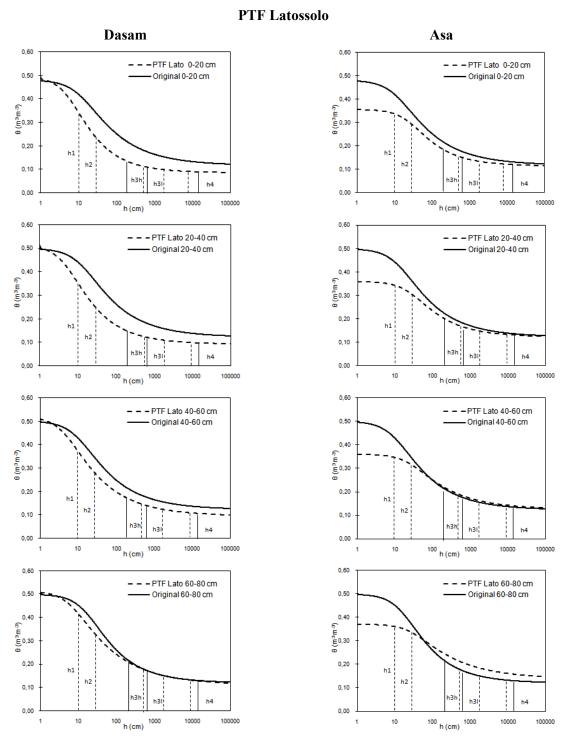


Figura 30 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm de profundidade no município de Araripina (PE). A linha cheia representa a curva obtida no local e a tracejada a curva obtida pelas PTF Latossolo (Dasam e Asa). h₁, h₂, h_{3h}, h_{3l} e h₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água para a cultura do sorgo (---) e do milho (-) (Tabela 8)

4.2.2.2 Estimativa da produtividade pelo modelo SWAP

Para as simulações para a localidade de Araripina houve anos em que os valores simulados de produtividade do sorgo estiveram mais próximos aos valores observados, mas em geral, o resultado foi sofrível (Tabela 40). Executando-se as simulações com os parâmetros de Van Genuchten (1980) estimados pela PTF Geral, desenvolvida com a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo, com índice de confiança (IC) da ordem de 0,60, todas as outras PTF tiveram um desempenho entre mau e sofrível. Mesmo nas simulações com a curva local o resultado foi sofrível (0,57). Embora haja dispersão nos valores de produtividade também com os resultados em Araripina (PE), pode-se observar que muitos dos valores estimados estão próximos à reta 1:1 (Figura 31).

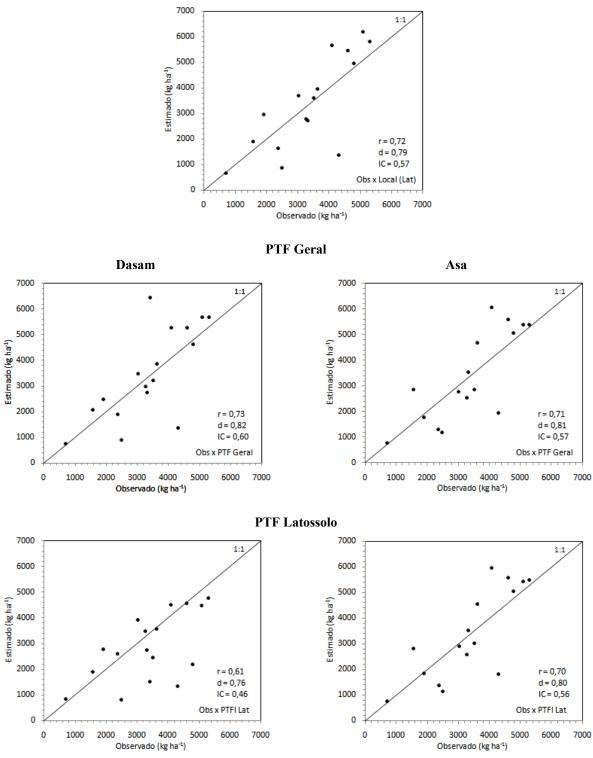
Na comparação dos resultados estatísticos entre as simulações da curva local e as PTF verifica-se que não houve uma diferença muito pronunciada, indicando que a divergência entre as simulações e a produtividade observada pode estar relacionada também a outras fontes de incertezas. Na tabela 40 observa-se que houve pouca diferença entre os dados de produtividade do sorgo observado e os resultados das simulações obtidos pelo ajuste das curvas locais e pelas PTF.

A PTF Geral (Dasam) desenvolvida a partir da granulometria, matéria orgânica e densidade do solo apresentou o melhor desempenho na estimativa de produtividade, assim como para o teor de água na profundidade de 0 a 20 cm. O pior desempenho foi para a PTF específica Latossolo (Dasam), desenvolvida com todos os preditores, que apresentou o maior erro da raiz do erro médio quadrado (RMSE) da estimativa do teor de água da ordem de 0,064 m³ m⁻³ na camada superficial do solo.

Por outro lado, os resultados mostram também que o melhor desempenho na estimativa do teor de água de uma PTF não garante um bom resultado da simulação da produtividade. A PTF específica Latossolo, desenvolvida com a granulometria, apresentou resultado similar, comparado com outras PTF, cujo erro médio foi maior.

Tabela 40 - Medidas de adequação estatística e produtividade da cultura do sorgo estimada pelo modelo SWAP, utilizando os parâmetros da equação de Van Genuchten da curva de retenção local (Latossolo), e estimado por PTF Geral (Dasam e Asa) e PTF Latossolo (Dasam e Asa) no município de Araripina (PE)

Plantio	Produtividade (kg ha ⁻¹)								
	Experimento	Curva	PTF	PTF	PTF	PTF			
		do Local	Geral	Latossolo	Geral	Latossolo			
			(Da	asam)	(Asa)				
04-fev-1988	5297	5817	5682	4783	5380	5476			
10-fev-1989	5093	6208	5698	4499	5389	5435			
08-fev-1990	3410	7072	6468	1508	7058	7093			
01-fev-1991	4079	5668	5264	4512	6056	5947			
13-jan-1992	3270	2796	2989	3488	2550	2575			
15-jan-1993	700	668	756	827	772	744			
18-jan-1994	4300	1385	1378	1350	1964	1802			
06-fev-1995	4600	5465	5284	4586	5595	5579			
08-fev-1996	4786	4975	4631	2192	5053	5050			
07-jan-1997	3513	3612	3235	2467	2850	3024			
19-jan-1998	3020	3693	3479	3921	2765	2909			
22-jan-1999	3623	3949	3880	3562	4688	4539			
10-fev-2000	2485	876	905	819	1188	1144			
05-fev-2001	2363	1626	1901	2612	1299	1376			
08-fev-2002	1557	1905	2077	1884	2858	2811			
30-jan-2003	3317	2735	2738	2763	3533	3532			
20-jan-2004	1894	2967	2486	2781	1787	1841			
-				r					
		0,72	0,73	0,61	0,71	0,70			
				d					
		0,79	0,82	0,76	0,81	0,80			
				IC					
		0,57	0,60	0,46	0,57	0,56			



Dados locais

Figura 31 - Produtividade da cultura do sorgo estimada pelo modelo SWAP, utilizando a curva de retenção de água local (Latossolo); a curva de retenção estimada por PTF Geral (Dasam e Asa) e a curva de retenção estimada por PTF Latossolo (Dasam e Asa). A Linha cheia representa a reta 1:1

No caso das simulações no SWAP com as mesmas PTF para simular a produtividade da cultura do milho, durante o período de 11 anos, os valores do índice de confiança foram entre mau e péssimo. O índice de confiança (IC) foi de 0,21 para simulação, utilizando os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) obtidos da curva de retenção do local - Araripina (Figura 32 e Tabela 41).

Para as PTF - Asa, os índices de confiança foram melhor, da ordem de 0,60. Pode-se observar que a maior diferença entre a forma da curva de retenção local e as curvas estimadas pelas PTF Geral e específica (Dasam), principalmente nos potenciais matriciais críticas à cultura, apresentaram o pior desempenho na estimativa de produtividade da cultura do milho (IC=0,19 e 0,06, respectivamente). Por outro lado, a mesma PTF Geral apresentou o melhor desempenho para cultura do sorgo (IC=0,60), evidenciando que a cultura do sorgo pode ter apresentado maior tolerância a baixos teores de água.

Entretanto pode-se observar também que um menor erro na estimativa do teor de água para PTF Latossolo (Asa), desenvolvida apenas com teores granulométricos, apresentou o melhor resultado para simulação de produtividade do milho, sugerindo que o uso de funções de pedotransferência deve estar associado com teste e validação, pois os resultados demonstram que sua aplicação depende de uma combinação de fatores.

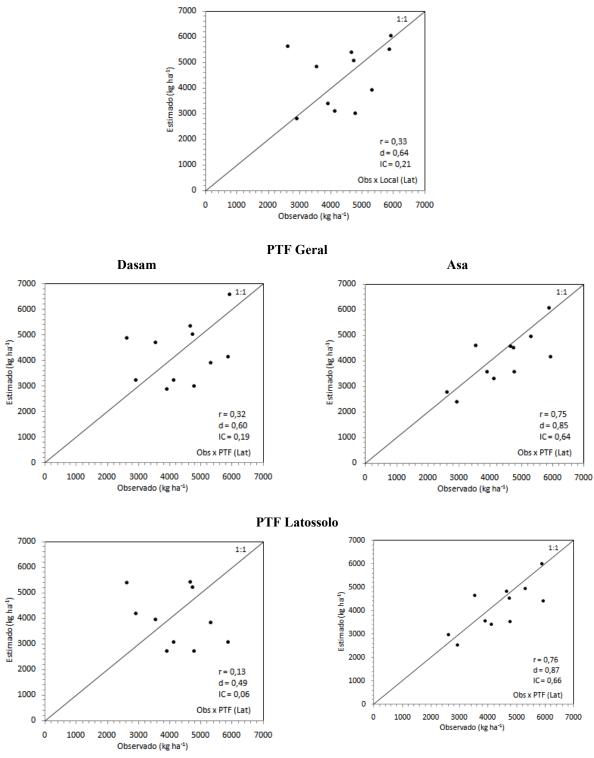
Nota-se de forma semelhante às simulações para o município de Serra Talhada que o melhor ajuste com a curva de retenção local foi verificado para as PTF (Dasam), desenvolvidas a partir de todos os preditores, pois os índices de confiança foram os mais próximos (Tabela 41).

Vereecken et al. (1992) simularam o teor de água no solo e encontraram resultados similares na avaliação funcional de PTF. As PTF mais precisas foram as que produziram os piores resultados na estimativa do teor de água no solo medido e simulado.

Da forma semelhante, Wopereis et al. (1993) apresentaram uma avaliação funcional de PTF, simulando o teor de água a 40 cm na cultura do arroz. Os resultados de condutividade hidráulica, calculada por meio de PTF, foram muito divergentes dos valores medidos, no entanto, o teor de água no solo estimado por PTF produziu melhores resultados. Por outro lado, Wösten et al. (1990) usaram curvas obtidas por métodos diretos e indiretos (PTF) no modelo SWAP para simular o armazenamento de água no solo nos Países Baixos e demonstraram que métodos diretos produziam melhores resultados.

Tabela 41 - Medidas de adequação estatística e produtividade da cultura do milho estimada pelo modelo SWAP, utilizando os parâmetros da equação de Van Genuchten da curva de retenção local (Latossolo), e estimado por PTF Geral (Dasam e Asa) e PTF Latossolo (Dasam e Asa) no município de Araripina (PE)

Plantio	Produtividade (kg ha ⁻¹)								
	Experimento	Curva do Local	PTF Geral	PTF Latossolo	PTF Geral	PTF Latossolo			
			(D	asam)		Asa)			
10-jan-1994	3900	3386	2873	2711	3567	3546			
20-fev-1995	3530	4828	4714	3967	4602	4657			
10-jan-1996	5871	5512	4148	3075	6073	5994			
05-fev-1999	4734	5086	5026	5232	4516	4536			
11-fev-2000	4775	3030	2997	2737	3562	3525			
10-fev-2001	2911	2798	3235	4194	2413	2519			
25-jan-2002	4111	3111	3239	3067	3312	3409			
30-jan-2003	5302	3940	3913	3844	4957	4947			
22-jan-2004	2611	5628	4890	5411	2780	2968			
20-jan-2005	4651	5389	5355	5429	4584	4818			
19-jan-2006	5919	6049	6600	7367	4155	4413			
				r					
		0,33	0,32	0,13	0,75	0,76			
				d					
		0,64	0,60	0,49	0,85	0,87			
				IC					
		0,21	0,19	0,06	0,64	0,66			



Dados locais

Figura 32 - Produtividade da cultura do milho estimada pelo modelo SWAP para a localidade de Araripina, em 11 safras, entre 1994 a 2006, utilizando a curva de retenção de água local (Latossolo); a curva de retenção estimada por PTF Geral (Dasam e Asa) e a curva de retenção estimada por PTF Latossolo (Dasam e Asa). A linha cheia representa a reta 1:1

4.2.3 Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE)

4.2.3.1 Avaliação das curvas de retenção obtidas diretamente e por PTF

Os valores das propriedades do solo utilizadas para as localidades de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE) são apresentados na tabela 42 para 4 horizontes em Areia (PB) e Cruz das Almas (BA) e para dois horizontes para Umbaúba (SE). Os parâmetros da equação 2 utilizados para simulação da produtividade estão nas tabelas 43 e 44.

Para as PTF desenvolvidas com teores de areia, silte, argila, matéria orgânica e de densidade do solo (Dasam), as maiores diferenças entre os parâmetros das curvas locais obtidas por ajuste e os parâmetros das curvas estimadas por PTF foram referentes aos parâmetros n e α .

O parâmetro α da curva de retenção do Município de Umbaúba (SE) foi o que apresentou maior diferença com o seu valor estimado pela PTF. Esse local foi o que apresentou os maiores teores de areia no perfil do solo, ocasionado maior diferença na forma de decaimento da curva de retenção (Tabelas 42, 43 e 44).

Na comparação entre os valores dos parâmetros de θr e θs , as diferenças foram menores para as PTF desenvolvidas com a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo. Entretanto, para as PTF que foram desenvolvidas somente com a granulometria a diferença foi maior da ordem de $0,1~\text{m}^3\text{m}^{-3}$, principalmente para θr .

Pode-se observar ainda nas tabelas 42, 43 e 44 a influência da maior quantidade de argila para a estimativa do parâmetro θs da curva de retenção. Nas curvas de retenção referentes ao Município de Cruz das Almas (BA) verifica-se o teor de argila com valores relativamente altos (> 50%) nas camadas de 40-60 e 60-115 cm. A estimativa de θs através das PTF desenvolvidas apenas com a granulometria tende a ser maior e semelhante aos parâmetros locais.

As diferenças entre os valores dos parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) obtidos por PTF ou dados originais são mais acentuados à medida que os teores de areia e o de argila aumentam. Essa constatação é notória, principalmente no caso de Umbaúba (SE) e Cruz das Almas (BA). Conforme os teores de argila e areia aumentam e diminuem no perfil do solo, θs e α respondem da mesma forma. Arruda et al. (1987) observaram que os teores de argila somados ao de silte apresentavam boas correlações com o teor de água na saturação do solo.

O pior desempenho na estimativa do teor de água foi para a PTF Geral estimada apenas com a granulometria, com RMSE da ordem de 0,107 m³m⁻³, notadamente nas curvas do município de Areia (PB). Em média, o erro das outras PTF foi da ordem de 0,09 a 0,04 m³m⁻³ (Tabela 45).

De fato, em Areia (PB) observam-se diferenças significativas entre as curvas locais e as PTF. No entanto, nas profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm, as diferenças são menores, sobretudo nos valores críticos do potencial matricial de água no solo (h) de absorção de água pela cultura, principalmente para PTF Geral desenvolvida com todos os preditores. (Figuras 33 e 34).

Em Cruz das Almas (BA), apenas nas profundidades de 0-15 e 15-40 cm as curvas ficam mais coincidentes nos potenciais matriciais entre h₂ (-25 kPa) e h_{3h} (-750 kPa) para as duas PTF Geral. No caso do Município de Umbaúba (SE), os formatos das curvas são divergentes, principalmente com relação nos potenciais matriciais críticos que correspondem ao cálculo da água disponível para a cultura.

Em geral, verifica-se um melhor desempenho das PTF específicas, com menores erros de RMSE, evidenciando que a definição de PTF para grupo de solos pode aumentar precisão do modelo, provavelmente devido a similaridades dentro de cada grupo. Entretanto, outros resultados indicam que a confiabilidade do modelo não aumenta quando se estima uma PTF para cada classe de solo, principalmente quando as PTF são utilizadas em outras regiões diferentes daquelas às quais foram desenvolvidas (PACHEPSKY; RAWLS, 1999).

Tabela 42 - Teores de matéria orgânica, areia, silte, argila e densidade do solo, correspondente ao tipo de solo do local, utilizados para calcular as PTF nos municípios de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE)

Local	Solo	Prof.	Granulometria					
			Matéria	Areia	Silte	Argila	Densidade	
			Orgânica				do solo	
		cm		kg k	g ⁻¹		kg m ⁻³	
		0-20	0,0048	0,629	0,141	0,230	1280	
Areia (PB)	Latossolo	20-40	0,0038	0,558	0,140	0,301	1335	
Areia (FB)	Latossoio	40-60	0,0035	0,470	0,117	0,412	1375	
		60-80	0,0033	0,488	0,082	0,429	1315	
		0-15	0,0140	0,614	0,093	0,293	1550	
Cruz das Almas (BA)	Argissolo	15-40	0,0080	0,480	0,144	0,406	1580	
		40-60	0,0050	0,391	0,101	0,508	1490	
		60-115	0,0030	0,388	0,103	0,509	1340	
Umbaúba(SE)	Argissolo	0-20	0,0035	0,733	0,106	0,162	1850	
		20-40	0,0024	0,625	0,111	0,273	1890	

Tabela 43 - Parâmetros da equação de van Genuchten utilizados no modelo SWAP para simular a produtividade agrícola nos município de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE) obtidos pelo ajuste das curvas aos dados locais e pelas as PTF (Dasam), utilizando teores de granulometria, matéria orgânica e de densidade do solo

Local	Fonte dos parâmetros	Solo	Prof.	Parâmetros da equação de Van					
				Genuchten					
				α	n	θr	θs		
				(cm ⁻¹)	(-)	(m^3m^{-3})	$(m^3 m^{-3})$		
			0-20	0,042	2,316	0,060	0,438		
	Original	Latossolo	20-40	0,019	2,370	0,059	0,432		
	Original	Lato33010	40-60	0,012	2,382	0,049	0,409		
Areia			60-80	0,014	2,388	0,052	0,442		
			0-20	0,144	1,651	0,104	0,526		
		Geral	20-40	0,084	1,604	0,142	0,506		
			40-60	0,045	1,531	0,196	0,491		
	PTF		60-80	0,055	1,531	0,197	0,513		
	111		0-20	0,215	1,695	0,096	0,526		
		Latossolo	20-40	0,120	1,602	0,130	0,506		
			40-60	0,068	1,431	0,179	0,491		
			60-80	0,096	1,385	0,176	0,513		
			0-15	0,004	2,530	0,129	0,337		
	Original	Argissolo	15-40	0,011	1,684	0,182	0,325		
	Original		40-60	0,010	1,783	0,201	0,365		
			60-115	0,017	1,684	0,168	0,417		
Cruz das Almas			0-15	0,046	1,570	0,148	0,427		
		Geral	15-40	0,023	1,524	0,204	0,415		
			40-60	0,020	1,457	0,248	0,449		
	PTF		60-115	0,033	1,467	0,242	0,504		
	111		0-15	0,055	1,560	0,132	0,427		
		Argissolo	15-40	0,027	1,533	0,198	0,415		
			40-60	0,025	1,504	0,237	0,449		
			60-115	0,046	1,524	0,230	0,504		
	Original	Argissolo	0-20	0,243	1,622	0,100	0,370		
	Original	Aigissolu	20-40	0,132	1,622	0,110	0,400		
Umbaúba			0-20	0,029	1,722	0,078	0,316		
	PTF	Geral	20-40	0,015	1,649	0,135	0,301		
	1 1 F		0-20	0,028	1,752	0,084	0,316		
		Argissolo	20-40	0,014	1,690	0,141	0,301		

Tabela 44 - Parâmetros da equação de van Genuchten utilizados no modelo SWAP para simular a produtividade agrícola nos município de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE) obtidos pelo ajuste das curvas aos dados locais e pelas as PTF (Asa), utilizando apenas teores granulométricos do solo

Local	Fonte dos parâmetros	Solo	Prof.	Parâmetros da equação de Van					
				Genuchten					
				α (cm ⁻¹)	n (-)	θr $(m^3 m^{-3})$	θ s (m ³ m ⁻³)		
			0-20	0,042	2,316	0,060	0,438		
			20-40	0,019	2,370	0,059	0,432		
	Original	Latossolo	40-60	0,012	2,382	0,049	0,409		
Areia			60-80	0,014	2,388	0,052	0,442		
			0-20	0,036	1,644	0,117	0,380		
		Geral	20-40	0,028	1,593	0,153	0,388		
			40-60	0,019	1,520	0,206	0,395		
	DTE		60-80	0,017	1,519	0,209	0,389		
	PTF		0-20	0,033	1,681	0,120	0,371		
		Latossolo	20-40	0,028	1,586	0,149	0,383		
			40-60	0,022	1,422	0,192	0,398		
			60-80	0,023	1,373	0,194	0,395		
			0-15	0,0036	2,530	0,129	0,337		
	Outsinal	Argissolo	15-40	0,0112	1,684	0,182	0,325		
	Original		40-60	0,0108	1,783	0,201	0,365		
			60-115	0,0177	1,684	0,168	0,417		
Cruz das Almas			0-15	0,029	1,614	0,142	0,376		
		Geral	15-40	0,019	1,538	0,202	0,397		
			40-60	0,013	1,457	0,252	0,402		
	PTF		60-115	0,013	1,455	0,253	0,403		
	FIF		0-15	0,034	1,644	0,138	0,390		
		Argissolo	15-40	0,027	1,570	0,198	0,421		
			40-60	0,023	1,521	0,238	0,449		
			60-115	0,022	1,519	0,239	0,449		
	Original	Argissolo	0-20	0,243	1,622	0,100	0,370		
	Original	Aigissoio	20-40	0,132	1,622	0,110	0,400		
Umbaúba			0-20	0,047	1,705	0,078	0,363		
	PTF	Geral	20-40	0,031	1,629	0,133	0,376		
	rır		0-20	0,043	1,710	0,079	0,355		
		Argissolo	20-40	0,035	1,650	0,131	0,385		

Tabela 45 - Raiz do erro médio quadrado (RMSE) utilizados para comparar os teores de água observados na curva de retenção local e estimados por meio de PTF (Dasam e Asa) nos municípios de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE)

Local	Profundidade	RMSE PTF Geral (Dasa	RMSE PTF Específica
	cm	m^3m^{-3}	m ³ m ⁻³
(55)	0-20	0,054	0,048
Areia (PB)	20-40	0,079	0,071
	40-60	0,134	0,125
	60-80	0,140	0,123
	Média	0,101	0,091
	0-20	0,050	0,052
Cruz das Almas (BA)	20-40	0,056	0,053
, ,	40-60	0,073	0,063
	60-80	0,092	0,077
	Média	0,067	0,061
Umbaúba (SE)	0-20	0,041	0,042
• •	20-40	0,056	0,057
	Média	0,048	0,059
		(Asa))
	0-20	0,074	0,077
Areia (PB)	20-40	0,091	0,089
,	40-60	0,127	0,119
	60-80	0,138	0,130
	Média	0,107	0,103
	0-20	0,034	0,040
Cruz das Almas (BA)	20-40	0,047	0,054
, ,	40-60	0,057	0,066
	60-80	0,077	0,072
	Média	0,053	0,058
Umbaúba (SE)	0-20	0,047	0,046
	20-40	0,054	0,052
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Média	0,050	0,049

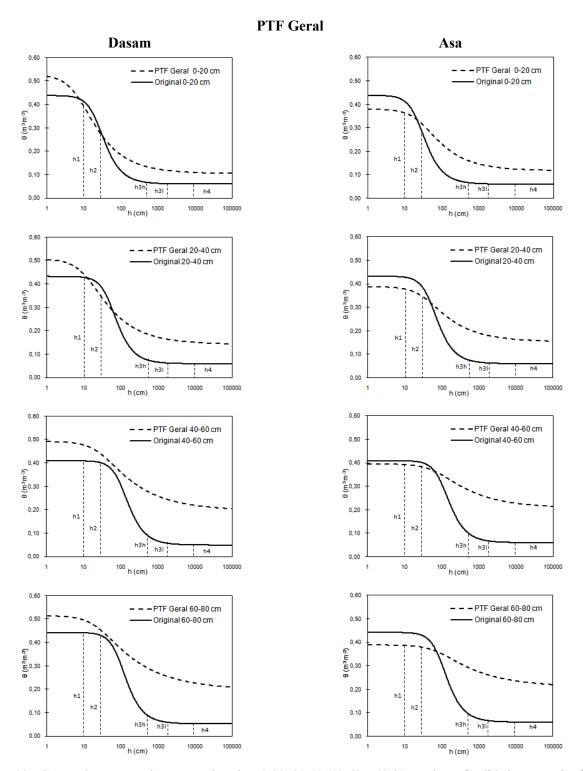


Figura 33 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm de profundidade no município de Areia (PB). A linha sólida representa à curva original obtida no local e a curva tracejada obtida pela PTF Geral (Dasam e Asa). h₁, h₂, h_{3h}, h_{3l} e h₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água para a cultura do feijão caupi (Tabela 8)

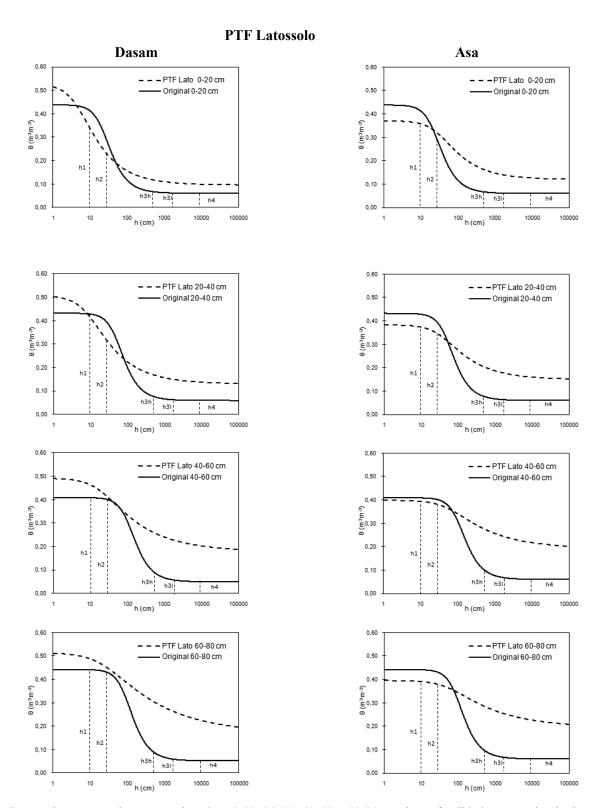


Figura 34- Curvas de retenção de água no do solo a 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm de profundidade no município de Areia (PB). A linha sólida representa à curva original obtida no local e a curva tracejada obtida pela PTF Latossolo (Dasam e Asa). h₁, h₂, h_{3h}, h_{3l} e h₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água para a cultura do feijão caupi (Tabela 8)

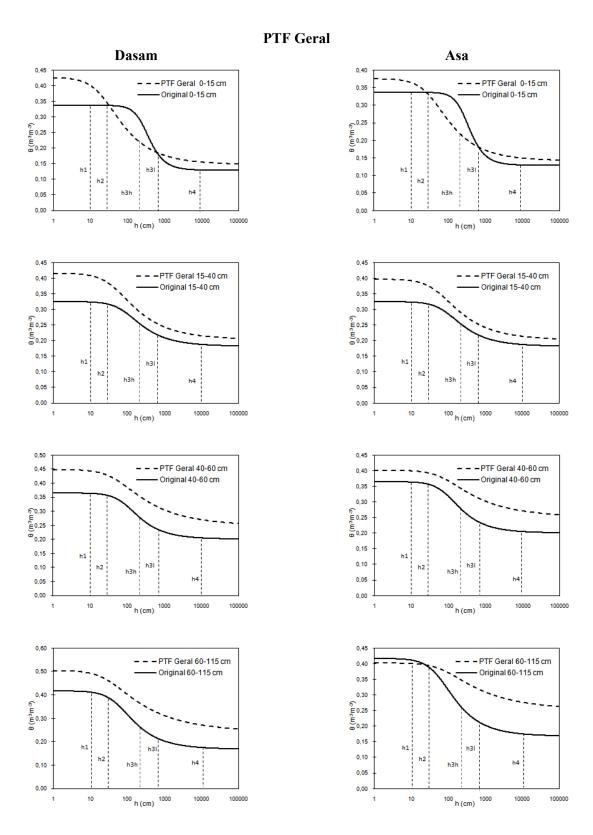


Figura 35 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-15, 15-40, 40-60 e 60-115 cm de profundidade no município de Cruz das Almas (BA). A linha cheia representa a curva original obtida no local e a curva tracejada obtida pela PTF Geral (Dasam e Asa). h₁, h₂, h_{3h}, h_{3l} e h₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água para a cultura do milho (Tabela 8)

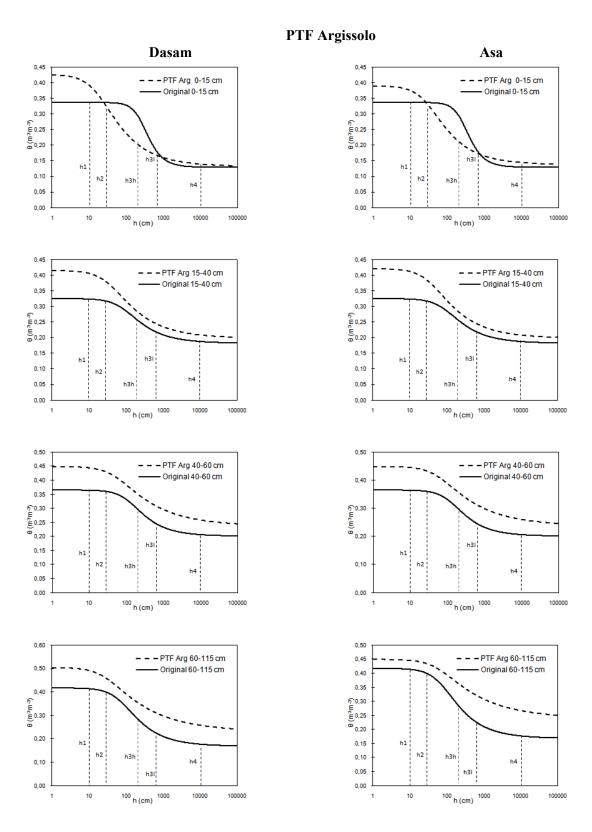


Figura 36 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-15, 15-40, 40-60 e 60-115 cm de profundidade no município de Cruz das Almas (BA). A linha cheia representa à curva original obtida no local e a curva tracejada obtida pela PTF Argissolo (Dasam e Asa). h₁, h₂, h_{3h}, h_{3l} e h₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água para a cultura do milho (Tabela 8)

PTF Geral

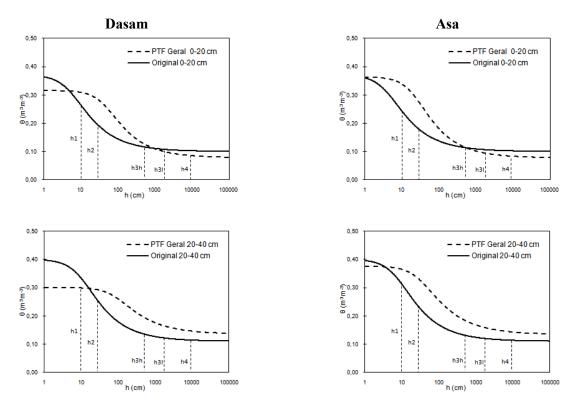


Figura 37 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-20 e 20-40 cm de profundidade no município de Umbaúba (SE). A linha cheia representa a curva original obtida no local e a curva tracejada obtida pela PTF Geral (Dasam e Asa). h₁, h₂, h_{3h}, h_{3l} e h₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água para a cultura do feijão caupi (Tabela 8)

PTF Argissolo

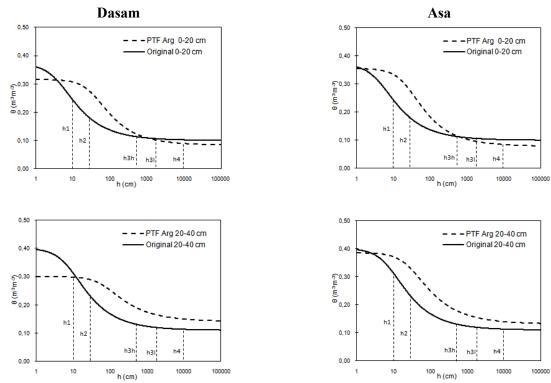


Figura 38 - Curvas de retenção de água no do solo a 0-20 e 20-40 cm de profundidade no município de Umbaúba (SE). A linha cheia representa a curva original obtida no local e a curva tracejada obtida pela PTF Argissolo (Dasam e Asa). h₁, h₂, h_{3h}, h_{3l} e h₄ correspondem aos potenciais matriciais limites de extração de água para a cultura do feijão caupi (Tabela 8)

4.2.3.2 Estimativa da produtividade pelo modelo SWAP

Os valores comparativos entre a produtividade observada e estimativa pelo modelo SWAP, utilizando as diferentes curvas de retenção baseadas nos dados locais e estimadas pelas PTF Geral e pelas PTF específicas podem ser observados na tabela 46 para os municípios de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE).

Os valores de produtividade estimada com a curva local e as PTF foram semelhantes. As PTF desenvolvidas a partir dos teores de areia, silte, argila, matéria orgânica e de densidade do

solo (Dasam) tendem a superestimar os valores de produtividade. Entretanto, pode-se observar também que, em geral, a estimativa da produtividade da cultura, do milho e do feijão caupi, utilizando as curvas locais, são da mesma ordem de grandeza das estimativas das PTF (Tabela 46). Resultados semelhantes foram encontrados por Vazifedoust (2007) para a produtividade simulada de trigo, milho, girassol e beterraba em diversas regiões semi-áridas do Irã.

Em Areia (PB), os valores de produtividade do feijão caupi estimada pelas PTF foram da mesma ordem de grandeza da produtividade estimada com as curvas locais, com diferenças de 200 a 400 kg ha⁻¹ em relação aos dados experimentais observados. De fato, não houve muita diferença entre os resultados (Tabela 46).

Em Cruz das Almas (BA) também, a estimativa da produtividade do milho foi semelhante à observada nos avaliados (1995 e 1996), utilizando as curvas calculadas pelas PTF, com diferença em relação dos dados experimentais em torno de 700 kg ha⁻¹. Neste caso, observa-se, da mesma forma, que a estimativa da produtividade com parâmetros obtidos pelo ajuste aos dados locais ficou muito próxima aos dados experimentais observados, mas com tendência também de superestimar os valores.

Em Umbaúba (SE) houve pouca diferença entre a produtividade estimada utilizando os parâmetros da curva local e os dados experimentais observados. Enquanto o resultado obtido experimentalmente foi de 970 kg ha⁻¹, pela curva local foi de 818 kg ha⁻¹. Em termos percentuais, a concordância entre a produtividade observada e estimada por meio da curva local foi de 84%. No entanto, pelas PTF o erro foi da ordem de 50% (Tabela 46).

Embora se observem divergências dos parâmetros da equação 2 e da produtividade, a ordem de magnitude da produtividade agrícola, estimada por meio de PTF, não se diferencia excessivamente dos dados observados. Minasny (2000) afirma que diferentes formas das curvas de retenção podem produzir resultados semelhantes. Finke (1996) mostrou que uma das maiores fontes de incerteza das PTF é a variabilidade espacial das propriedades dos solos que são necessariamente repassadas às funções de pedotransferência.

Esses resultados mostram também a dificuldade encontrada com relação à determinação das fontes de incerteza nesse tipo de avaliação. A acurácia das PTF não dá informação suficiente sobre o desempenho em aplicações específicas. Resultados semelhantes são comuns, como os encontrados por Timlin et al. (1996), simulando o rendimento da soja no Estado do Mississipi (EUA) e Minasmy (2000) estimando o armazenamento de água no solo, com erros entre 40-60%.

Vereecken et al. (1992) mostraram um paradoxal caso de estudo em simulações do fluxo de água na zona radicular. O desempenho das PTF era melhor, na medida em que a variabilidade dos solos aumentava. Estudo semelhante foi realizado por Nemes et al. (2003), utilizando dados nacionais, continentais e internacionais de textura do solo para desenvolver PTF e estimar o teor de água. As diferenças de escala não foram a principal fonte de erros encontrados no modelo de simulação de conteúdo de água no solo. Os resultados das simulações com PTF foram inferiores apenas às medidas de campo.

Tabela 46 - Produtividade das culturas do feijão caupi e do milho estimada no modelo SWAP, utilizando os parâmetros da equação de Van Genuchten da curva de retenção local e estimada por PTF Geral (Dasam e Asa) e PTF específica (Dasam e Asa), nos município de Areia (PB), Cruz das Almas (BA) e Umbaúba (SE)

a) Areia (PB)

Plantio	Produtividade (kg ha ⁻¹)								
	Experimento	Curva do Local	PTF Geral	PTF Específica	PTF Geral	PTF Específica			
		uo Locai		sam)	(Asa)				
13-mar-2002	813	773	1110	1173	593	614			
13-mar-2003	888	1310	1638	406	1003	1092			
28-jul-2003	206	413	518	867	237	271			
b) Cruz da 03-mar-1995	4559	5109	5673	5726	4164	5031			
10-mar-1996	5036	6006	5831	5787	5678	5854			
c) Umbaúk	oa (SE)								
10-mai-2004	970	818	1883	1882	1881	1884			

4.2.4 Análise conjunta

A análise conjunta dos resultados das simulações com o modelo SWAP foi realizada para investigar o desempenho das PTF. Na tabela 47 são apresentados os índices estatísticos de comparação da produtividade agrícola simuladas com os parâmetros obtidos das curvas locais e das PTF.

Observa-se que os índices de confiança são maiores para as PTF que utilizaram apenas a granulometria (Figura 47). No entanto, a utilização de curvas de retenção ajustadas aos dados locais apresenta desempenho similar as PTF Geral e Específica, utilizando teores granulométricos, matéria orgânica e densidade do solo, evidenciando melhor ajuste entre as curvas locais e as PTF que utilizaram todos os preditores (Tabela 47). Os resultados demonstram que as diferenças entre as estimativas da produtividade podem estar associados a divergência dos parâmetros da equação de Van Genuchten, mas também a outros fatores.

Na figura 40 são ilustrados os resultados de todas as simulações de produtividade agrícola observada e estimada pelo no modelo SWAP, utilizando as curvas locais e as PTF. Constata-se que uma parcela considerável de valores está próxima a reta 1:1.

Na figura 40 pode-se verificar, ainda, pequena diferença nos valores nos índices de precisão (r), exatidão (d) e confiança (IC) para os resultados de forma conjunta. Os erros de desempenho (d) caracterizados por erros sistemáticos, são da ordem de 0,80 e os aleatórios de 0,60, mostrando que, a maior fonte de erro está na precisão da estimativa da produtividade do que no prognóstico do teor de água no solo estimado pelas PTF, haja vista os índices serem muito próximo.

Além dos erros associados à variabilidade das propriedades do solo, outras fontes de erros podem ser o método utilizado no desenvolvimento das PTF e o modelo empregado para a obtenção das curvas de retenção e da produtividade agrícola.

Embora os valores do índice de confiança se apresentem relativamente baixos, os resultados são compatíveis com simulações de produtividade, utilizando outros métodos (HOOGENBOOM et al., 2004; STOCKLE et al., 2003; DOORENBOS; KASSAM, 1979; SANS et al., 1997).

Os índices estatísticos encontrados expressam a variabilidade das propriedades e características dos solos. Todos os índices são, em ordem de grandeza, muito próximos aos

encontrados na avaliação da produtividade, o que pode indicar a variabilidade das propriedades do solo é repassada aos parâmetros da equação de Van Genuchten, às PTF e aos resultados das estimativas do modelo.

Pachepsky e Rawls (1999) afirmam que uma PTF pode ser considerada precisa se a variabilidade por ela predita for semelhante à variabilidade encontrada nas propriedades do solo. Por outro lado, na literatura encontram-se poucas referências que consideram a variabilidade do solo nas simulações dos modelos. Poucos modelos revisados apresentam uma abordagem estocástica, sobretudo com relação aos erros associados aos parâmetros e resultados de simulações do modelo. Além disso, a possibilidade de comparação dos resultados encontrados com outros estudos, utilizando solos tropicais, é muito reduzida.

Os resultados mostram que as principais limitações de simulações dessa natureza são: identificar, isolar e quantificar o grau de incerteza provenientes das PTF, e por outro lado, que a utilização de métodos indiretos para descrever a curva de retenção de água no solo, que é complexa, principalmente utilizando PTF paramétricas em intervalos de potenciais matriciais diferentes.

Tabela 47 - Medidas de adequação estatística e da produtividade agrícola para todas as simulações utilizando curvas de retenção do local e PTF geral e específica (Dasam e Asa), desenvolvidas com a granulometria, a matéria orgânica e a densidade do solo.

Local	Cultura	Curva Local		PTF Geral			PTF Específica			
		r	d	IC	r	d	IC	r	d	IC
			Da	sam						
Areia (PB)	Feijão caupi	0,86	0,84	0,72	0,93	0,67	0,62	0,10	0,32	0,03
Serra Talhada (PE)	Sorgo	0,78	0,81	0,63	0,72	0,81	0,59	0,75	0,83	0,62
Araripina (PE)	Sorgo	0,72	0,79	0,57	0,73	0,82	0,60	0,61	0,76	0,46
	Milho	0,33	0,64	0,21	0,32	0,60	0,19	0,13	0,49	0,06
Umbaúba (SE)	Caupi	-	=	-	=	-	-	-	=	-
Cruz das Almas (BA)	Milho	-	=	-	=	-	=	-	=	-
			A	sa						
Areia (PB)	Feijão caupi	0,86	0,84	0,72	0,89	0,94	0,84	0,87	0,93	0,81
Serra Talhada (PE)	Sorgo	0,78	0,81	0,63	0,79	0,86	0,68	0,74	0,83	0,61
Araripina (PE)	Sorgo	0,72	0,79	0,57	0,71	0,81	0,57	0,70	0,80	0,56
	Milho	0,33	0,64	0,21	0,75	0,85	0,64	0,76	0,87	0,66
Umbaúba (SE)	Caupi	-	=.	=.	=.	-	-	-	=.	-
Cruz das Almas (BA)	Milho	-	-	-	-	-	-	-	-	-

⁻ Dados insuficientes

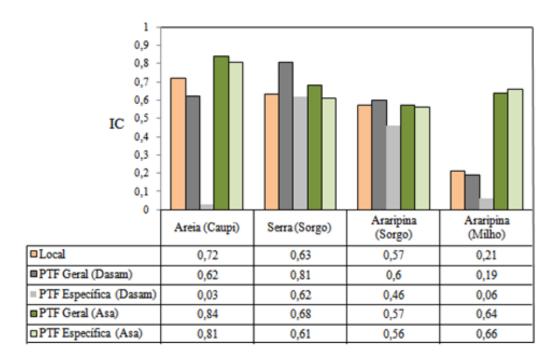
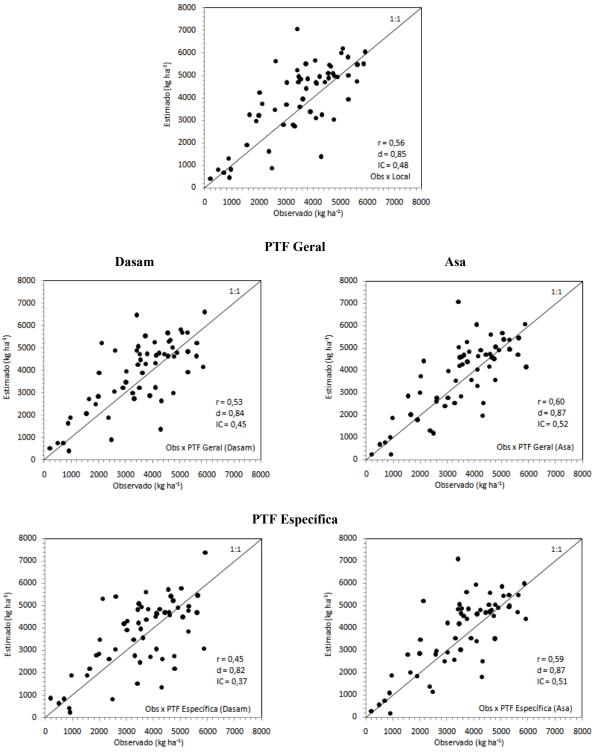


Figura 39 – Índice de confiança (IC) da produtividade agrícola conjunta observada e estimada pelo modelo SWAP, utilizando a curva de retenção local, PTF Geral (Dasam e Asa) e Específica (Dasam e Asa).



Dados locais

Figura 40 - Produtividade agrícola conjunta observada e estimada pelo modelo SWAP, utilizando a curva de retenção local, PTF Geral (Dasam e Asa) e Específica (Dasam e Asa). A linha cheia representa a reta 1:1

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de funções de pedotransferência é uma técnica relativamente nova. Os métodos estatísticos empregados não eliminam ou incorporam totalmente propriedades e variáveis do solo. A regressão múltipla, mesmo utilizando técnicas de *stepwise* e eliminação por meio de *outliers*, não oferece ferramentas de agrupamento de dados, tampouco filtra casos isolados que afetam a regressão.

Por outro lado, há evidências do potencial do uso dessas funções, notadamente, a investigação e teste de outros métodos capazes de agregar características do solo em diversos agrupamentos que podem melhorar as estimativas das PTF.

Além da complexidade em se estabelecer as relações entre as características do solo e a retenção de água, os erros associados aos parâmetros α e n da equação de Van Genuchten mostram, também, que a inexatidão da curva é de ordem conceitual da equação, principalmente com relação a α, haja vista a dificuldade de determinar matematicamente a forma e orientação de poros ou arranjo das partículas primárias e secundárias do solo. A equação de Van Genuchten é empírica, assim como os seus parâmetros. Os parâmetros α e n podem ser interpretados como empíricos possuindo nenhum significado físico.

Estudos sobre a avaliação funcional de PTF para solos tropicais é muito reduzida, restringindo a comparação desse estudo com outros da mesma natureza. A maioria limita-se à comparação entre a estimativa das PTF para o teor de água em potenciais específicos, como na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente.

Os erros aleatórios na estimativa da produtividade agrícola das culturas foram mais pronunciados do que os sistemáticos, demonstrando que podem ser devido aos métodos utilizados no desenvolvimento das PTF, à falta de uniformidade das medidas de campo ou no ajuste do modelo.

A acurácia da PTF pode não ser o principal motivo da variabilidade da produtividade, pois os valores dos índices foram da mesma ordem de grandeza. Nesse sentido, é importante comparar a variabilidade de uma PTF com outras fontes de entrada de dados em modelos de simulação.

Identificar as principais fontes de incerteza parece ser decisivo neste tipo de estudo. Estimar as imprecisões e a sensibilidade do modelo SWAP, utilizando métodos diretos e indiretos (PTF), pode identificar e ajudar a resolver problemas relativos à quantificação do grau de incerteza da estimativa do modelo. Poucos modelos revisados apresentam uma abordagem estocástica, sobretudo com relação aos erros associados aos parâmetros e nos resultados do modelo.

Há de se destacar, ainda, que, embora as PTF apresentem baixa capacidade preditiva na estimativa da produtividade agrícola, os resultados são compatíveis com simulações de produtividade utilizando outros modelos e métodos. Os resultados das simulações utilizando PTF não diferem muito dos encontrados empregando métodos mais tradicionais. Além disso, aplicados em séries de dados mais prolongadas, os erros tendem a ser reduzidos devido à inerente variabilidade espaço-temporal da produtividade.

Trabalhos como o presente têm algumas limitações inerentes que devem ser ressaltadas:

1) geralmente, os dados utilizados de produtividade e das curvas de retenção incluem uma incerteza relativamente grande devido à não uniformidade metodológica; 2) a metodologia para a obtenção da condutividade hidráulica saturada é também pouco padronizada, principalmente quanto ao número de repetições; 3) a identificação das principais fontes de incerteza é complexa; 4) o conjunto de dados utilizados com maior característica arenosa também limita o uso das PTF em ambientes muito distintos daqueles para as quais foram desenvolvidas.

Sugere-se que futuros trabalhos sobre PTF procurem testar sua aplicação usando modelos específicos de balanço hídrico, simulação de culturas (produtividade) e variabilidade espacial das características hidráulicas do solo no campo, avaliando as diversas fontes de incerteza.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- 1) Utilizando um conjunto de curvas de retenção de água de solos do Nordeste do Brasil, as funções de pedotransferência (PTF), envolvendo teores de matéria orgânica, silte, areia e argila, bem como a densidade do solo, demonstraram baixa capacidade preditiva para os parâmetros α e n da equação de Van Genuchten. Para os parâmetros θr e θs da mesma equação, a capacidade preditiva foi melhor;
- 2) em potenciais matriciais específicos (-10, -33 e -1500 kPa), a capacidade preditiva das PTF é maior, o que possibilita a utilização em modelos de simulação que requerem apenas aproximações da capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível;
- o desempenho na estimativa do teor de água no solo é melhor para as PTF desenvolvidas com teores granulométricos, matéria orgânica e densidade do solo do que utilizar apenas os teores granulométricos;
- 4) o desempenho das PTF Geral é semelhante ao das PTF específicas por classes de solo, pois a diferença é pouco pronunciada, evidenciando que o agrupamento de solos para desenvolver as PTF por classe parece ser pouco vantajoso;
- 5) o uso da matéria orgânica e da densidade do solo não apresentou muita diferença na estimativa do teor de água em potenciais mais negativos que -10 kPa. Para potenciais menos negativos mostrou-se indispensável;
- 6) a estimativa da produtividade agrícola no modelo SWAP é similar , seja com os parâmetros da equação de Van Genuchten das curvas de retenção obtidas nos locais, seja com os parâmetros estimados por meio de PTF; e
- 7) os resultados das simulações de rendimento agrícola utilizando PTF não diferem muito daquelas que empregam métodos mais tradicionais. Além disso, aplicados em séries de dados mais prolongadas os erros são reduzidos devido à inerente variabilidade espaço-temporal da produtividade;

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration:** guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage. Paper, 56).
- ANGELOCCI, L.R. A planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba: ESALQ, 2002. 268 p.
- ARRUDA, F.B.; ZULLO JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1987.
- ARYA, L.M.; PARIS, J.F. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 4, p. 1023-1030, 1981
- BALCI, O. Principles of simulation model validation, verification, and testing. **Transactions of the Society for Computer Simulation International**, Vista, v. 14, p. 3-12, 1997
- BATJES, N.H. (Ed.). **A homogenized soil data file for global environmental research**: a subset of FAO, ISRIC and NRCS profiles (Version 1.0). Wageningen: International Soil Reference and Information Centre, 1995. 47 p. (Working Paper and Preprint 95/10b).
- _____. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science,** Oxford, v. 47, p. 151–163, 1996.
- _____. A world data set of derived soil properties by FAO-UNESCO soil unit for global modeling. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 13, p. 9–16, 1997.
- _____. Carbon and nitrogen stocks in the soils of Central and Eastern Europe. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 18, n. 4, p. 324–329, 2002.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 62, p. 743-749, 1998.
- BOUMA, J. Using soil survey data or quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, New York, v. 9, p. 177-213, 1989.
- BRIGGS, L.J.; MCLANE, J.W. **The moisture equivalent of soils.** Washington: USDA, 1907. 23 p. (USDA. Bureau of Soils. Bulletin, 45).
- BRIGGS, L.J.; SHANTZ, H.L. The wilting coefficient and its indirect measurement. **Botanical Gazette**, Chicago, v. 53, p. 20-37, 1912.
- BROOKS, R.H.; COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media**. Fort Collins: Colorado State University, Civil Engineering Department, 1964. 27 p. (Hydrology Paper, 3).

- CAMARGO, A.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desenvolvimento de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997
- CAMARGO, M.N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J.H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 1, p. 11-33, 1987
- CAMPBELL, G.S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Science**, Baltimore, v. 117, p. 311-314, 1974.
- Centre de Recherche Agronomique Pour Le Développment (CIRAD). **SARRA**: **guide d'utilisation**. Montpellier: CIRAD-CA: Unité de Recherche "Gestion de l'eau". 1995. 68 p.
- CORNELIS, W.M.; RONSYN, J.; MEIRVENNE, M. V.; HARTMANN, R. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 638-648, 2001.
- CORRÊA, M.M. **Desenvolvimento e teste de modelo de transporte unidimensional de solutos no solo.** 2001. 104 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal Viçosa, Viçosa, 2001.
- COSTA, L.C. Modelo agrometeorológico de previsão de produtividade da soja para as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Parnaíba, Minas Gerais. Viçosa, MG. 1988. 40 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- CUNHA, G.R.; HAAS, J.C.; ASSAD, E.D. Zoneamento dos riscos climáticos para a cultura de trigo no Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBA; ESALQ, 1997. p. 372-373.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H.; BENTVELSEN, C.L.M.; BRANSCHEID, V.; PLUSJÉ, J.M.G.A.; SMITH, M.; UITTENBOGAARD, G.O.; VAN DER WAL, H.K. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).
- DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.N. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 57-64, jan./mar. 2000.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- _____. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.
- FEDDES, R.A.; KOWALIK, P.J.; ZARADNY, H. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen: Pudoc, 1978. 189 p. (Simulation Monographs).

- FRANCE, J.; THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in agriculture:** the quantitative approach to problems in agriculture and related sciences. London: Butterworth, 1984. 230 p.
- GAISER, T.; GRAEF, F.; CORDEIRO, J.C. Water retention characteristics of soils with contrasting clay mineral composition in semi-arid tropical regions. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 38, p. 523-526, 2000.
- GEVAERD, R.; FREITAS, S. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte I: descrição da metodologia e validação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 1-15, 2006.
- 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**, Viçosa, v. 26, p. 885-893, 2002.
- GOMES, S. Ajuste e avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades no Estado do Paraná. 2005. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.
- GONÇALVES, M.C.P.B. **Características hidrodinâmicas dos solos:** sua determinação e funções de pedotransferência. 1994. 212 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1994.
- GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H.H. **Modelling potential crop growth processes:** textbook with exercises. Amsterdam: Kluwer Academic Press, 1994. 238 p.
- GUPTA, S.C.; LARSON, W.E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content, and bulk density. Washington, v. 20, p. 1633-1635, 1979.
- HANKS, R.J.; RITCHIE, J.T. **Modelling plants and soil systems**. Madison: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America, 1991. 387 p. (Agronomy, 31).
- HAVERKAMP, R.; PARLANGE, Y.-Y. Predicting the water-retention curve from particle size distribution: I. Sandy soils without organic matter. **Soil Science**, Baltimore, v.1, n.142, p.325–339, 1986.
- HODNETT, M.G; TOMASELLA, J. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, Baltimore, v. 163, p. 190-202, 1998.
- _____. Marked differences between Van Genuchten soil water-retention parameters for temperature and tropical soils- A new water-retention pedotransfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 108, p. 155-180, 2002.
- HOOGENBOOM, G.; JONES, J.W.; WILKENS, P.W.; PORTER, C.H.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; BOOTE, K.J.; SINGH, U.; URYASEV, O.; BOWEN, W.T.; GIJSMAN, A.J.; DU TOIT, A.; WHITE, J.W.; TSUJI, G.Y. **Decision support system for agrotechnology transfer version 4.0.** Honolulu: University of Hawaii, 2004. 1 CD-ROM.

- HUTSON, J.L.; CASS, A. A retentivity function for use in soil-water simulation models. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 38, p. 105-113, 1987.
- JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT Cropping System Model. **European Journal of Agronomy,** Cambridge, v. 18, p. 235–265, 2003.
- JONES, P.N.; KINIRY, J.R. **CERES-Maize:** a simulation model of maize growth and development. College Station: Texas A & M. University Press, 1986. 194 p.
- JONG VAN LIER, Q. de; VAN DAM, J.C.; METSELAAR, K.; JONG, R. de; DUYNISVELD, W.H.M. Macroscopic root water uptake distribution using a matric flux potential approach. **Vadose Zone Journal,** Madison, v. 7, p. 1065-1078, 2008.
- KROES, J.G.; VAN DAM, J.C. **Reference Manual SWAP version 3.0.3**. Wageningen: Alterra Green World Research, 2003. 211 p. (Alterra Report, 773).
- LEENHARDT, D.; VOLTZ, M.; BORNAND, M. Propagation of the error of spatial prediction of soil properties in simulating crop evapotranspiration. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 45, p. 303-311, 1994.
- LEIP, G A.; MARCHI, R.K.; KEMPEN, M.; BRITZ, W.; LI, C. Linking an economic model for European agriculture with a mechanistic model to estimate nitrogen losses from cropland soil in Europe. **Biogeosciences Discuss**, Stuttgart, v. 4, p. 2215–2278, 2007.
- LIMA, J.R.S. Balanço hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para condições do Brejo Paraibano. 2004. 193 p. Tese (Doutorado em Física do Solo) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; SOARES, W.A.; SOUZA, E.S.; LIRA; C.A.B.O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 1, p. 89-95, 2006.
- MARAUX, F.; LAFOLIE, F.; BRUCKLER, L. Comparison between mechanistic and functional models for estimating soil water balance: deterministic and stochastic approaches. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 38, p. 1–20, 1998.
- McBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R.; VERVOORT, R.W. From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 109, p. 41-73, 2002.
- MINASNY, B. **Efficient methods for predicting soil hydraulic properties.** 2000. 396 p. Thesis (Doctor of Philosophy) University of Sydney, New South Wales, 2000.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B. The efficiency of various approaches to obtaining estimative of soil hydraulic properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 107, p. 55-70, 2002a.
- _____. The neuro-*m* methods for fitting neural network parametric pedotransfer functions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66: p. 352-361, 2002b.

- MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B.; BRISTOW, K. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. **Geoderma**, Amsterdam, v. 93, p. 225-253, 1999.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M.L.; SANTOS, H.G. Revisão sobre funções de pedotransferência e novos métodos de predição de classes e atributos do solo. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2003. 50 p. (Documentos, 45).
- MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; DOURADO NETO, D. Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção da água pelo solo. **Scentia Agricola**, Piracicaba, v.50, p. 383–392, 1993.
- NEMES, A.; SCHAAP, M.G.; WÖSTEN, J.H.M.; Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 1093-1102, 2003.
- NETTO, A.A. Estimativa da retenção da água no solo a partir do uso de equipamentos não convencionais, rede neurais artificiais e funções de pedotransferência. 2007. 176 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) Universidade de São Carlos, São Carlos, 2007.
- NOBLE, A.D.; CANNON, M.; MULLER, D. Evidence of accelerated soil acidification under Stylosanthes-dominated pastures. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 35, p. 1309-1322, 1997.
- OLIVEIRA, J.B. de; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para seu reconhecimento. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201 p.
- OLIVEIRA, L.B. Considerações sobre a composição granulométrica de solos do Nordeste. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 3 p. 189–195, 1968.
- 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**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 315-323, mar./abr. 2002.
- OLIVEIRA, L.F.C.; MARTINEZ, M.A.; PRUSKI, F.F.; RUIZ, H.A.; LIMA, L.A. Transporte de solutos no solo e no escoamento superficial: I. Desenvolvimento do modelos de simulação do movimento de água e escoamento superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 63-69, 2000.
- ORESKES, N. Evaluation (not validation) of quantitative models. **Environmental Health Perspectives,** North Carolina, v. 106, p. 1453-1460, 1998.
- PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 1748-1756, 1999.
- _____. **Development of pedotransfer functions in soil hydrology.** Amsterdam: Elsevier, 2004. 498 p. (Developments in Soil Science, 30).

- PERAZA, J.E.S. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Su**l. 2003. 118 p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- POLAK, A.; WALLACH, R. Analysis of soil moisture variations in an irrigated orchard root zone. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 233, n. 2, p. 145-159, June 2001.
- RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil properties. **Journal of Irrigation and Drainage.** Division ASCE, New York, v. 108, p. 166–198, 1982.
- RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A. Using field topographic descriptors to estimate soil water retention. **Soil Science**, Baltimore, v. 167, p. 423-435, 2002.
- RAWLS, W.J.; GISH, T.J.; BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Soil Science**, New York, v. 16, p. 213-234, 1991.
- RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L. Prediction of soil water properties for hydrologic modelling. In: SYMPOSIUM OF IRRIGATION AND DRAINAGE, 8., 1985, Denver. **Watershed management: Proceedings...** New York: ASCE, 1985. p. 293-299.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera:** conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- REYNOLDS, J.F.; ACOCK, B. Predicting the response of plants to increasing carbon dioxide: a critique of plant growth models. **Ecological Modelling**. Amsterdam, n. 29, p. 107 129, 1985.
- RICHARDS, L.A. Capillary conductivity of liquid through porous media. **Physics**, New York, v. 1, p. 318-333, 1931.
- ROSSATO, L. Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil. 2001. 145 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.
- SALES, B.B. **Dinâmica da água em solo cultivado com feijão caupi em Região de brejo de altitude**. 2007. 86 p. Dissertação (Mestrado em Física do Solo) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- SANS, L.M.A.; ASSAD, E.D.; AVELLAR, G.; FARIA, C.M.; SOUZA, L.F. Riscos climáticos para a cultura do milho nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBA; ESALQ, 1997. p. 357-359.

- SCHAAP, M.G.; LEIJ, F.J.; VAN GENUCHTEN, M.TH. A bootstrap than neural network approach to predict soil hydraulic parameters. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON CHARACTERIZATION AND MEASUREMENTS OF THE HYDRAULIC PROPERTIES OF UNSATURATED POROUS MEDIA, 1999, Riversidade. **Proceedings...** Riverside: University of California, 1999. p. 1237–1250.
- SCHEINOST, A; SINOWSKI L.; AUERSWALD, K. Rationalization of soil water retention curves in a highly variable soils cape, I. Developing a new pedotransfer function. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 129-143, 1997.
- SCHILLINGER, W.S.; YOUNG, D.L. Cropping systems research in the world's driest rainfed wheat region. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 1182–1187, 2004.
- SHARMA, M.; UEHARA, G. Influence of soil structure on water relations in low humic latossols: I. Water retention. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 32, p. 765-770, 1968.
- SHEIN, E.V.; ARKHANGEL'SKAYA, T.A.S. Pedotransfer functions: state of the art, problems and outlooks. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 39, n. 10, p. 1090-1099, 2006.
- SCHEINOST, A.C.; SINOWSKI, W.; AUERSWALD, K. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 129-143, 1997.
- SILVA, A.S.; BRITL, T.L.O.; C OLIVEIRA, A.V.; MOTA, A.W. Parâmetros de solo em função da umidade na capacidade de campo em área irrigáveis do trópico semi-árido brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, p. 103-116, 1990.
- SINGH, R.; HELMERS, M.J.; QI, Z. Calibration and validation of drainmod to design subsurface drainage systems for Iowa's tile landscapes. **Agricultural Water Management,** Amsterdam, v. 85, p. 221-232, 2006.
- SKAGGS, R.W. Drainmod reference report. Methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables. Fort Worth: USDA-SCS; South National Technical Center, 1980. 130 p.
- SMETTEM, K.R.J.; BRISTOW, K.L. Obtaining soil hydraulic properties for water balance and leaching models from survey data. 2. Hydraulic conductivity. **Australian Journal of Soil Research**, East Melbourne, v. 50, p. 1259-1262, 1999.
- SMITH, M. **CROPWAT:** a computer program for irrigation planning and management. Rome: FAO, 1992 298 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 46).
- SAXTON, S.K.E.; WILLEY, P.H. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. In: SINGH, V.P.; FREVERT, D. **Mathematical modeling of watershed hydrology**, Boca Raton: CRC Press, 2006. chap. 17, p. 401-435.
- STOCKLE, C.O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal of Agronomy**, Cambridge, v. 18, p. 289-307, 2003.

- SUDENE Dados pluviométricos mensais do Nordeste. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, Recife, 1990 (Série Pluviometria 1 a 10)
- TANNER, C.B.; JURY, W.A. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 239-242, 1996.
- THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology:** a quantitative approach to problems in plant and crop physiology. London. Academic Press, 1976. 318 p.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, R.J. **The water balance**. New Gersey: Laboratory of Climatology, 1955. 104 p. (Publication in Climatology, 8).
- TIETJE, O.; TAPKENHINRICHS, M. Evaluation of pedotransfer functions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 4, p. 1088-1095, July/Aug. 1993.
- TIMLIM, D.J.; PACHEPSKY, A.; ACOCK, B.; WHISLER, F. Indirect estimation of soil hydraulic properties to predict soybean yield using GLYCIM. **Agricultural Systems**, Essex, v. 52 n. 23, p. 331-353, 1996.
- TOMASELLA, J.; HOODNETT, M.G.. Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soils using soil water retention data. **Soil Science**, Baltimore, v. 162, p. 703-712, 1997.
- _____. Estimating soil water characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, Baltimore, v. 163, p. 190-202, 1998.
- TOMASELLA, J.; HOODNETT, M.G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 64, p. 327-338, 2000.
- TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.A.; CRESTANA, S.; RAWLS, W.J. Comparison of two approximation techniques to develop pedotransfer functions for Brazilian soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 1085-1092, 2003.
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G.; CUARTAS, L.A.; NOBRE, A.D.; WATERLOO, M.J.; OLIVEIRA, S.M. The water balance of an Amazonian micro-catchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behavior. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 22, n. 13, p. 2133-2147, 2008.
- TYLER, W.S.; WHEATCRAFT, S.W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 3, p. 987-996, 1989.
- URACH, F. L. Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigacao. 2007. 79p. Tese de Mestrado (Mestrado em Engenharia de Água no solo) Universidade de Santa Maria , Santa Maria, 2007.
- VAN DAM, J.C. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. 2000. 179 p. (Doctoral Thesis) Wageningen University, Wageningen, 2000.

VAN DEN BERG, M.; KLAMT, E.; VAN REEUWIJK, L.P.; SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 161-180, 1997.

VAN DIEPEN, C.; VAN KEULEN.; WOLK, J.; BERKHOUT, J. Land evaluation: from intuition to quantification. **Advances in Soil Science**, Baltimore, v. 15, p. 139-204, 1991.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsatured soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M.TH.; LEIJ, F.J.; LUND, L.J. (Ed.). **Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils**. Riverside: University of California, 1992. 290 p.

VAZIFEDOUST, M. **Development of an agricultural drought assessment system:** integration of agrohydrological modelling, remote sensing and geographical information. 2007. 171 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - Wageningen University, Wageningen, 2007.

VEIHMEYER, F.J.; HENDRIKSON, A.H. The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 1., 1927, Washington. **Proceedings...** v. 3, p. 498-513.

VERBURG, K.; BOND, W.J.; BRISTOW, K.L.; CRESSWELL, H.P.; ROSS, P.J. Functional sensitivity and uncertainty analysis of water and solute transport predictions. In: AUSTRALIAN AND NEW ZEALAND NATIONAL SOIL CONFERENCE, 1996, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: University of Mebourne, 1996. p. 299–300.

VEREECKEN, H.; DIELS, J.; VAN ORSHOVEN, J. Functional evaluation of pedotransfer for the estimation of soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 56, p. 1371-1378, 1992.

VEREECKEN, H.; MAES, J.; FEYEN, J.; DARIUS, P. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density, and carbon content. **Soil Science**, Baltimore, v. 148, n. 6, p. 389-403, 1989.

WEYNANTS, M.; VEREECKEN, H.; JAVAUX, M. Revisiting Vereecken pedotransfer functions: introducing a closed-form hydraulic model. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 8, n. 1, p. 102-123, 2009. In: *Soils: An Australian Viewpoint*. pp.499-530. Division of Soils, CSIRO, CSIRO: Melbourne

WILLIAMS, J. Physical properties and water relations: soil hydrology. In: _____ Soils: an Australian viewpoint. Division of Soils, CSIRO: Melbourne, Academic Press, London, 1983. 503p.

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Easton, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

WITT. C.T. Simulation of living system. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. (Ed.). Simulations of plant growth and crop production. Wageninen: Pudoc, 1982. 308 p.

- WOPEREIS, M.C.S.; WÖSTEN, J.H.M.; TEN BERGE, H.F.M.; WOODHEAD, T., DE SAN AUGUSTIN, E.M. Comparing the performance of a soil—water balance model using measured and calibrated hydraulic conductivity data, a case study for the dryland rice. **Soil Science**, Baltimore, v. 156, p. 133-140, 1993.
- WORKMAN, S.R., SKAGGS, R.W. Sensitivity of water management models to errors in soil hydraulic properties. In: INTERNATIONAL WINTER MEETING OF ASAE, 1992, Nashville. Nashville: ASAE, 1992. 102p. (Paper, 922567).
- WÖSTEN, J.H.M. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R. (Ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health.** Amsterdam: Elsevier, 1997. p. 221-245. (Developments in Soil Science, 25).
- WOSTEN, J.H.M.; VAN GENUCHTEN, M.T. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 762-1770, 1988.
- WÖSTEN, J.H.M.; FINKE, P.A.; JANSEN, M.J.W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 66, p. 227-237, 1995.
- 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**, Amsterdam, v. 251, n. 3/4, p. 123-150, 2001.
- WÖSTEN, J.H.M.; VEERMAN, G.J.; STOLTE, J. Waterretentieen doorlatendheidskarakteristieken Van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Wageningen: Staring Centre, Agricultural Research Dept., 1994. 66 p. (Techn. Doc., 18).
- WÖSTEN, J.H.M.; LILLY, A.; NEMES, A.; BAS, C.L. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 90, p. 169-185, 1999.
- WÖSTEN, J.H.M.; BANNINK, M.H.; DE GRUIJTER, J.J.; BOUMA, J. A procedure to identify different groups of hydraulic conductivity and moisture retention curves for soil horizons. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 86, p. 133-145, 1986.
- WÖSTEN, J.H.M.; SCHUREN, C.H.J.E.; BOUMA, J.; STEIN, A. Functional sensitivity analysis of four methods to generate soil hydraulic functions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 832-836, 1990.
- WREGE, M.S.; GONÇALVES, S.L.; CARAMORI, P.H.; VASCONCELLOS, M.E.C.; OLIVEIRA, D.; ABUCARUB NETO, M. Riscos de deficiência hídrica na cultura do feijoeiro durante a safra das águas no Estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. Anais... Piracicaba: SBA; ESALQ, 1997. p. 306-308.