



ISSN 1517-2627

Setembro, 2003

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Solos
Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento*

Documentos 45

Revisão sobre Funções de Pedotransferência (PTFs) e Novos Métodos de Predição de Classes e Atributos do Solo

Minasny Budiman
Alexander B. M^o Bratney
Maria de Lourdes Mendonça-Santos
Humberto Gonçalves dos Santos

Rio de Janeiro, RJ
2003

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1.024. Jardim Botânico - Rio de Janeiro, RJ

Fone: (21) 2274.4999

Fax:(21) 2274.5291

Home page: www.cnps.embrapa.br

E-mail (sac): sac@cnps.embrapa.br

Supervisor editorial: Jacqueline Silva Rezende Mattos

Revisor de texto: André Luiz da Silva Lopes

Normalização bibliográfica: Cláudia Regina Delaia

Editoração eletrônica: André Luiz da Silva Lopes

1ª edição

1ª impressão (2003): 300 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo / Minasny Budiman... [et al.]. - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2003. 50 p.. - (Embrapa Solos. Documentos; n. 45)

ISSN 1517-2627

1. Pedometria. 2. pedotransferência. I. Budiman, Minasny. II. M^cBratney, Alexander B. III. Mendonça-Santos, Maria de Lourdes. IV. Santos, Humberto Gonçalves dos. V. Embrapa Solos (Rio de Janeiro). VI. Série.

CDD (21.ed.) 545.8

Autores

Minasny Budiman

School of Land, Water & Crop Sciences
McMillan Building A05, The University of Sydney,
Sydney, NSW 2006, Australia.

Alexander B. M Bratney

School of Land, Water & Crop Sciences
McMillan Building A05, The University of Sydney,
Sydney, NSW 2006, Australia.

Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Pesquisador III, PhD, Embrapa Solos
Rua Jardim Botânico 1.024 - Jardim Botânico - Rio de
Janeiro, RJ. E-mail: loundonca@cnps.embrapa.br.

Humberto Gonçalves dos Santos

Pesquisador III, PhD, Embrapa Solos
Rua Jardim Botânico 1.024 - Jardim Botânico - Rio de
Janeiro, RJ. E-mail: humberto@cnps.embrapa.br.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ o apoio financeiro para execução dos projetos E-170.023/2001 (Embrapa SEP 12.2002.001) - “Aplicação de técnicas quantitativas digitais para otimizar o mapeamento de solos para fins de planejamento e gestão ambiental” e FAPERJ E-26/171.360/2001 (Embrapa SEP 01.2002.202) - “Modelagem da magnitude e distribuição espacial do carbono orgânico nos solos do Estado do Rio de Janeiro, usando técnicas quantitativas, SIG e Base de Dados”, bem como à Universidade de Sydney pelo “Sesquicentennial Project (A general approach to making digital soil maps)”.

Maria de Lourdes Mendonça-Santos
Pesquisadora da Embrapa Solos

Sumário

Resumo	9
Abstract	11
Introdução	13
Funções de Pedotransferência na Austrália e no Brasil ...	14
Princípios	18
Princípio 1 - Eficiência	18
Princípio 2 - Incerteza	19
Classificação das Funções de Pedotransferência	20
Classificação baseada em variáveis preditoras e preditas	20
Classificação baseada em abordagens	21
Variáveis Preditoras	23
Dados de Laboratório	23
Descrição de campo e morfologia de solos	23
Variáveis ambientais	25
Espectro eletromagnético, sensores remotos e sensores próximos	26
Base de dados de solos	28
Funções Espaciais de Pedotransferência	29
Abordagens	31
Garantia de Qualidade das PTFs	33
Um esquema para desenvolver novas PTFs	33
Usando Funções de Pedotransferência	34
Sistema de Inferência de Solos	36
Referências Bibliográficas	39

Revisão sobre Funções de Pedotransferência (PTFs) e Novos Métodos de Predição de Classes e Atributos do Solo

Minasny Budiman

Alexander B. M. Bratney

Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Humberto Gonçalves dos Santos

Resumo

A pedotransferência é assunto relativamente novo no Brasil e uma metodologia pouco utilizada, embora tenhamos casos de aplicações potenciais deste recurso quando se utilizam dados analíticos e morfológicos de solos para estimar, por exemplo, uma classe de aptidão agrícola ou uma classe de suscetibilidade à erosão. De maneira geral, as interpretações de levantamentos de solos são pedotransferências para estimar, a partir de dados existentes, outras características ou propriedades correlacionadas.

Quando a pedotransferência é expressa de forma quantitativa, por meio de equações matemáticas, ela é designada por Funções de Pedotransferência (*Pedotransfer Functions – PTF*, em inglês). Funções de pedotransferência (PTF) é o mais novo tópico de muito interesse na área da Ciência do Solo e na Pesquisa Ambiental. Essa metodologia está começando a ser aplicada em muitas áreas e potencialmente pode ter muitas aplicações, como por exemplo, predição de propriedades hídricas do solo e suscetibilidade do solo à erosão. A morfologia do solo e as interpretações de dados de pesquisa de campo e análises de laboratório podem ser usadas para o mapeamento quantitativo de propriedades do solo. Por meio de equações matemáticas, as funções de pedotransferência traduzem os dados originados de levantamentos de solos em outras informações de difícil mensuração ou de obtenção mais cara. A presente revisão resultou de um trabalho de cooperação entre a Embrapa Solos e a Universidade de Sydney, nos projetos de pesquisa sobre Mapeamento Digital de Solos e Seqüestro de Carbono no Estado

do Rio de Janeiro, ambos financiados pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ. Esta revisão traça uma breve história sobre o uso das funções de pedotransferência e discute os vários tipos de PTFs. Diferentes abordagens e alguns princípios são considerados para desenvolver PTFs. Um conceito de sistema de inferência de solo é proposto (SINFERS), em que funções de pedotransferência são as regras do conhecimento, para serem usadas como ferramentas de inferência. Um sistema de inferência fornece medidas que conhecemos mais ou menos, dentro de um determinado nível de (in)certeza, e deduz dados que não conhecemos, com um mínimo de inexatidão, por meio de funções de pedotransferência, correta e logicamente combinadas. A pedotransferência depende da existência de dados básicos de levantamentos de solos, dados de laboratório e de bases de dados organizadas. É fornecida extensa bibliografia para consulta e expansão do conhecimento e uso da metodologia de pedotransferência.

Review on Pedotransfer Functions (PTFs) and New Methods for Prediction of Soil Classes and Attributes

Minasny Budiman

Alexander B. McBratney

Maria de Lourdes Mendonça-Santos

Humberto Gonçalves dos Santos

Abstract

Pedotransfer is a relatively new, not well known subject in Brazil, although, there are examples of potential applications of this methodology when analytical and morphological soil data are used to estimate, for example, agricultural suitability or susceptibility to erosion. In a general way, the interpretations of soil surveys are accomplished through pedotransfer functions, starting from existing data to estimate other characteristics or correlated properties in unsampled areas. When pedotransfer is expressed in a quantitative way, by means of mathematical equations, it is called Pedotransfer Functions (PTF). Pedotransfer function (PTF) has become a “white – hot” topic in soil science and environmental research. Field morphology and interpretations collected from field surveys and laboratory analysis can be used to quantitatively map soil properties. Pedotransfer functions translate these soil survey data into properties that are more difficult to measure or more expensive by means of mathematical equations. The present review resulted from a cooperation work between Embrapa Solos and The University of Sydney in the research projects of Digital Soil Mapping and Carbon Sequestration in the Rio de Janeiro State, both financed by Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ). This paper reviews the brief history of the use of pedotransfer functions and discusses the various types of PTFs. Different approaches to developing PTFs are considered and a few principles for developing and using PTFs are suggested. It is proposed the concept of the soil inference system (SINFERS), where pedotransfer functions are the knowledge rules for inference engines. A soil inference system takes measurements we more-

or-less know with a given level of (un)certainty, and infers data that we don't know with minimal inaccuracy, by means of properly and logically conjoined pedotransfer functions. Pedotransfer depends on the existence of basic soil survey and laboratory data, and organized data bases. Extensive bibliography is supplied for consultation and expansion of the knowledge and use of the pedotransfer methodology.

Introdução

Devido à demanda de informação de apoio à agricultura sustentável e à melhoria da qualidade da terra, a utilidade do levantamento de solos não se restringe somente a gerar dados de inventários e distribuição geográfica de classes de solos, mas, também, prover a distribuição espacial quantitativa de propriedades dos solos. A expressão Função de Pedotransferência (*Pedotransfer Function - PTF*, em inglês) foi criada por Bouma (1989), com o significado de “transformando dados que possuímos em dados que precisamos”. Funções de Pedotransferência permitem que informações básicas de solo, disponíveis em relatórios de levantamentos de solos ou em Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), sejam transformadas em outras, de obtenção mais laboriosa e mais cara. Funções de Pedotransferência são funções preditivas de certas propriedades dos solos a partir de outras facilmente medidas e rotineiramente obtidas a custos mais baixos. As Funções de Pedotransferência atendem às demandas por dados freqüentemente requeridos a partir de dados normalmente disponíveis em levantamentos de solos e bases de dados.

No mapeamento digital de solos, a utilidade das PTFs é prover informações mais úteis em termos de atributos e qualidade dos solos (Reuter, 1998) e funcionalidade do solo. Há duas abordagens no uso das Funções de Pedotransferência. A primeira é estática, em que Funções de Pedotransferência são usadas para estimar outras propriedades dos solos. A segunda, uma abordagem dinâmica, que prediz outras propriedades dos solos que serão usadas na inserção de dados (input) em modelos de simulação ou de suporte à decisão. Tais modelos podem ser usados para elaborar cenários sobre os efeitos de diferentes sistemas do manejo agrícola sobre a funcionalidade dos solos.

O Sistema Australiano de Informação do Recurso Solo (ASRIS, em inglês), um banco de dados e mapas digitais sobre os atributos dos solos em nível continental, (http://audit.ea.gov.au/ANRA/land/land_frame.cfm?region_type=AUS®ion_code=AUS&info=soil_ASRIS), é um bom exemplo do desenvolvimento e aplicação de PTFs (Bui *et al.*, 2002). O ASRIS possibilita estimativas espaciais de propriedades dos solos (tais como teor de argila, densidade do solo, condutividade hidráulica saturada, capacidade de água disponível) e as incertezas associadas, a partir de classes de solos. As propriedades de solos “estimadas” podem então ser usadas como entradas em modelos de erosão hídrica e de transporte de sedimentos/nutrientes, risco de acidificação do solo e produtividade.

Revisões sobre o desenvolvimento e o uso de PTFs podem ser encontradas em: Rawls *et al.* (1991), Pachepsky *et al.* (1999), Wösten (1997) e Wosten *et al.* (2001).

A maioria das revisões sobre Funções de Pedotransferência é limitada a estimativas de propriedades hidráulicas dos solos. Cresswell *et al.* (1999) revisaram a aplicação de PTFs na predição de propriedades hidráulicas para solos da Austrália. Funções de Pedotransferência são reconhecidas como um dos métodos eficientes para determinar propriedades hidráulicas dos solos. Monografias, como o Manual de Determinações Físicas de Solos na Austrália (McKenzie *et al.*, 2002) e Métodos de Análise de Solos no EUA (Dane & Topp, 2002) incluem um capítulo sobre o uso de modelos de predição.

Funções de Pedotransferência na Austrália e no Brasil

No princípio, diversos procedimentos indiretos foram formulados para estimar várias propriedades de solos. O estudo por Stirk (1957), em North Queensland, sugeriu uma estimativa do ponto de murchamento permanente (PMP) para solos com teor de argila até 60%, como:

$$\text{PMP} = 2/5\% \text{ argila}$$

A primeira tentativa mais abrangente para desenvolver PTFs parece ter vindo do estudo de Williams *et al.* (1983). Eles classificaram a retenção de água com base em classe textural e produziram valores médios de parâmetros para um modelo de função potencial ($y = ax^b$) da curva de retenção de água com base em classes de textura. Estudos adicionais de Williams *et al.* (1992) calcularam os parâmetros do modelo de Campbell para a curva de retenção de água, a partir das informações de textura e estrutura. À semelhança do modelo de Campbell para curvas de retenção de água (Campbell, 1974), foram desenvolvidos muitos PTFs na Austrália, para prever estes parâmetros, como aqueles por Cresswell & Paydar (1996), Paydar e Cresswell (1996) e Smettem *et al.* (1999). Minasny & McBratney (2002b) conceberam redes neurais para prever os parâmetros de retenção de água de van Genuchten. McKenzie & Jacquier (1999) desenvolveram uma descrição morfológica de campo para estimar condutividade hidráulica saturada. A maioria destas PTFs foi compilada por Cresswell *et al.* (2001) em um programa chamado SH - Pro.

Embora a maioria das PTFs tenha sido desenvolvida para prever propriedades hidráulicas dos solos, funciona também para estimar outras propriedades físicas e químicas (Tabela 1). Enquanto somente algumas PTFs foram desenvolvidas para propriedades químicas, pesquisa original por Janik *et al.* (1995) possibilita a previsão de várias propriedades químicas a partir de medidas de espectroscopia no comprimento de onda infravermelho médio.

McKenzie *et al.* (2000) compilaram tabelas que calculam amplitudes de variação típicas de propriedades de solos associadas com cada tipo de perfil principal de Northcote (Northcote, 1976). A aplicação de PTFs foi bem demonstrada em cartografia continental de atributos de solos no Sistema Australiano de Informação do Recurso Solo - ASRIS (Carlisle *et al.*, 2001). O ASRIS compilou um banco de dados nacional de propriedades de solos e desenvolveu modelos de regressão para prever várias propriedades de solos de outras áreas do país. Principais propriedades de solos foram mapeadas para todo o continente, em uma resolução de grade de 1 km com base em dados pontuais e unidades de mapeamento de solos.

No Brasil, poucas referências sobre resultados de pesquisa em pedotransferência são encontradas. Estimativas de condutividade hidráulica de Latossolos Amarelos cauliniticos da Amazônia, com base em curvas de retenção de água, mais facilmente medidas, foram obtidas por Tomasella *et al.* (1997). A validade dos métodos de PTFs depende de dados diretamente medidos em campo, escassos na Amazônia. Amostragem adicional concentrada em áreas específicas foi recomendada nestes casos.

Tomasella & Hoodnett (1998) desenvolveram equações de PTFs com base em regressão linear múltipla, para prever parâmetros de Brooks-Corey usando textura do solo (areia, silte, argila), densidade do solo, porosidade e conteúdo de água. Foi observada alta significância da correlação entre valores medidos e valores estimados neste estudo.

Outros investigadores, como van den Berg *et al.* (1997) trabalharam com perfis de Ferralsols (Latossolos) de dez países diferentes e estimaram a água retida no solo entre 10 e 1.5 kPa de pressão, com base em análise de regressão a partir de propriedades dos solos mais facilmente medidas, como granulometria e densidade.

Tomasella *et al.* (2000) usaram propriedades do solo como textura, carbono orgânico, umidade equivalente e densidade do solo, disponíveis em relatórios de

levantamentos de solos e estabeleceram relações entre a equação de van Genuchten e parâmetros de retenção de água.

Tabela 1. Exemplos de Funções de Pedotransferência desenvolvidas para solos da Austrália e do Brasil.

VARIÁVEIS PREDITAS	PREDITORES	TIPO E LOCALIZAÇÃO DO SOLO	REFERÊNCIAS
Parâmetros da equação de Campbell	Combinações de: - Classe textural de campo, - estrutura, granulometria, - Teor de matéria orgânica, - densidade do solo,	Queensland, Australian wheat belt (NSW, Vic, SA)	Williams et al. (1992)
Parâmetros de curva de retenção de água de van Genuchten	Granulometria. Teor de argila	Solo arenoso, Oeste da Austrália	Smettem & Gregory (1996)
Parâmetros da equação de Campbell	Dois valores de $\theta(h)$, Densidade do solo	Cinturão do trigo Sul, Norte – Sudoeste e Norte Victoria	Cresswell & Paydar (1996)
Parâmetros da equação de Campbell	Um valor de $\theta(h)$, Densidade do solo, Areia, silte, argila, densidade do solo	Cinturão do trigo Sul, Norte – Sudoeste e Norte Victoria	Paydar & Cresswell (1996)
Parâmetros da equação de Campbell	Um valor de $\theta(h)$, argila, Densidade do solo	Solo superficial de trigo (NSW, Vic, SA), Northern Territory e North Queensland	Smettem et al. (1999)
Condutividade Hidráulica Saturada (K_s)	Teor de argila	Sul da Austrália, Solo de trigo, North Queensland	Smettem & Bristow (1999)
Capacidade de campo medida no campo (solo drenado por 2 dias) Ponto de murchamento medido no campo	Teor de Argila, Teor de Areia, Fração Grosseira, Densidade do Solo	Áreas de cultivo de trigo de sequeiro de North Queensland	Littleboy (1998)
Condutividade Hidráulica Saturada (K_s)	Morfologia de campo	Southern e Eastern Australia	McKenzie & Jacquier (1997)
Capacidade de campo medida "in situ" (solo drenado por 2 dias)	Granulometria	North Queensland Tropical	Bristow et al. (1999)
Ponto de murchamento medido "in situ"	Granulometria	North Queensland Tropical	Bristow et al. (1999)
Parâmetros da Equação de Campbell K_s	Granulometria	North Queensland Tropical	Bristow et al. (1999)

VARIÁVEIS PREDITAS	PREDITORES	TIPO E LOCALIZAÇÃO DO SOLO	REFERÊNCIAS
Parâmetros da Equação de Campbell K_s	Granulometria	North Queensland Tropical	Bristow et al. (1999)
Teor de Água (θ a -10, -33 e -1500 kPa)	Granulometria, Densidade do Solo	Geral	Minasny et al. (1999)
K_s	Granulometria, Densidade do Solo	Geral	Minasny & McBratney (2001)
Parâmetros da equação de van Genuchten	Granulometria, Densidade do Solo	Geral	Minasny & McBratney (2001)
θ a -5 and -1500 kPa, Ksat	Morfologia de Campo e Granulometria	Bacias de Captação florestadas, Sudeste, NSW	O'Connell and Ryan (2002)
Fator erodibilidade de solos	Granulometria, Orgânica	Matéria Solos do NSW e Queensland	Loch et al. (1998)
Sorção de Fósforo	pH em NaF	Solo superficial do Sudoeste da Austrália	Gilkes and Hughes (1994)
Capacidade Tampão de pH	Teor de Matéria Orgânica, Teor de Argila	Geral	Helyar et al. (1990)
Capacidade Tampão de pH	Teores de silte e argila, Teor de Carbono Orgânico	Trópico Semi – árido de Northern Queensland e Northern Territory.	Noble et al. (1997)
Condutividade Hidráulica	Curvas de retenção de água	Latossolos Amarelos caulíníticos da Amazônia	Tomasella et al (1997)
Parâmetros de Brooks - Corey	Textura, densidade do solo, porosidade, teor de água	Amazônia brasileira	Tomasella & Hodnett (1998)
Água retida no solo entre 10 e 1,5 kPa	Granulometria, densidade do solo	Ferralsols do Brasil	van den Berg et al. (1997)
Relações entre a equação de van Genuchten 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)
Parâmetros de retenção de água usados na equação de van Genuchten	Textura, densidade do solo, mineralogia de argilas	Ferralsols, Andosols e outros	Hodnett & Tomasella (2002)

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 e mostraram que PTFs para solos com argila de atividade baixa diferem significativamente de PTFs para solos sem argila de atividade baixa, em função dos teores de silte e carbono orgânico.

Hoodnett & Tomasella (2002) desenvolveram novas funções de pedotransferência para solos tropicais relativas aos parâmetros de retenção de água usados na equação de van Genuchten. É sugerido que análises e dados mineralógicos sejam incluídos em PTFs, o que, indubitavelmente, pode mostrar as diferenças entre solos de clima temperado e tropicais e a necessidade de desenvolver PTFs próprios para solos tropicais, em geral ou para classes específicas de solos.

Princípios

Conforme a Tabela 1, foram desenvolvidas muitas Funções de Pedotransferência durante as últimas décadas. Neste momento, é útil definir dois princípios de PTFs, para evitar mau uso do conceito de pedotransferência. Os princípios se relacionam a esforço e incerteza.

Princípio 1 - Eficiência

O primeiro princípio de PTF é: **Não prognosticar algo que é mais fácil e mais barato medir ou determinar.**

Como o objetivo de funções de pedotransferência é prever propriedades cujas medidas ou determinações diretas são difíceis, laboriosas ou muito caras, os preditores devem ser de obtenção mais fácil ou mais barata. O custo e o esforço para obter a informação sobre o preditor deverá ser menor do que o de obter a informação sobre o que se pretende prever.

Em outras palavras, se definirmos eficiência (Minasny & McBratney, 2002a) como:

Eficiência 1 = qualidade da informação / esforço

Eficiência 2 = qualidade de informação / custo,

a razão entre a eficiência dos prognósticos em relação à eficiência dos preditores deve ser maior que 1 para justificar uma PTF eficiente. Isto também implica em que a qualidade da informação de uma PTF deverá ser mais alta (ou a informação deverá ser mais útil) que o preditor. Este princípio se aplica ao uso de dados existentes, disponíveis, para prever valores inexistentes (não medidos ou determinados).

Um exemplo típico é a predição da densidade do solo, que embora reconhecida sua utilidade para cálculo de outros atributos dos solos, em relação à massa e ao

volume, e ser um preditor chave no prognóstico de retenção de água, raramente é determinada durante a execução de levantamentos de solos.

Isto é assim principalmente porque, no passado, o propósito principal dos levantamentos de solos foi produzir mapas de classes de solos e a maioria das variáveis analisadas eram tão somente para fins de classificação de solos.

Embora custem mais as determinações de argila e matéria orgânica, os modelos que predizem densidade do solo a partir do teor de argila e do carbono orgânico são considerados PTF eficientes. Isto, porque usa dados existentes em relatórios de levantamentos, para prever uma variável perdida, que não foi determinada.

No entanto, prever a condutividade hidráulica saturada (K_s) de um solo, a partir de suas características estruturais, mensuradas através de análise de imagens, não constituiria uma PTF eficiente. Embora haja uma boa relação entre os parâmetros de análise de imagem e K_s , exige mais esforço usar técnicas de análise de imagem, a menos que a tecnologia melhore substancialmente. A previsão de K_s , a partir de morfologia de campo é, no entanto, um exemplo de PTF eficiente.

Princípio 2 - Incerteza

Não usar PTFs, a menos que se possa avaliar a incerteza associada e, para um determinado problema, se um conjunto de PTFs alternativas está disponível, usar aquela com menor variância.

O Princípio 2 implica em dois sub - princípios,

- a incerteza das PTFs deve ser quantificada e
- se um conjunto de PTFs alternativas está disponível, usar aquela com menor variância.

Foram desenvolvidas muitas PTFs para prever as mesmas ou similares propriedades dos solos. Na Austrália, por exemplo, pelo menos 10 funções encontram-se disponíveis para a predição de retenção de água, enquanto que no âmbito mundial, há mais de 100 funções para estimar esta propriedade. Então, é mais prudente escolher a função que tenha o menor erro de variância ou que se ajuste melhor ao tipo de solo. Alternativamente, alguma análise Bayesiana poderia ser usada para prover a estimativa mais provável, ou todas as estimativas poderiam ser combinadas com pesos inversamente proporcionais às suas incertezas.

A incerteza de uma PTF pode ser devida à incerteza do modelo e à incerteza nos dados de entrada (input). A incerteza associada a um modelo pode ser calculada pelo método não paramétrico “bootstrap” (auto-suficiente), conforme Efron & Tibshirani (1993), ou pela análise de primeira ordem, se as PTFs são geradas pelo método dos quadrados mínimos. A incerteza nos dados de entrada pode ser facilmente computada usando o método de simulação Monte Carlo. Deve-se também minimizar a extrapolação de propriedades do solo.

Classificação de Funções de Pedotransferência

Classificação baseada em variáveis preditoras e preditas

Wösten *et al.* (1995) reconheceram dois tipos de PTFs: PTFs de classe e PTFs contínuas. PTFs de classe predizem certas propriedades dos solos com base na classe à qual o solo pertence. PTFs contínuas predizem certas propriedades dos solos como uma função contínua das variáveis medidas.

No entanto, a situação é um pouco mais complexa, podendo-se classificar as PTFs segundo o tipo de preditor e as variáveis preditas. As variáveis preditoras/preditas podem ser uma classe definida (hard class) ou difusa; podem ser ainda variáveis contínuas ou mistas. Assim, temos 16 possibilidades (Tabela 2), mas conforme os princípios definidos anteriormente, nem todas as combinações podem ser classificadas como PTFs. As variáveis preditoras deveriam ser adquiridas com esforço substancialmente menor do que as variáveis preditas (Eficiência > 1). Usar diferentes variáveis contínuas (por exemplo, teores de areia e de argila) para prever uma classe ou categoria (por exemplo, classe de textura) não constituiria assim, uma PTF. As combinações possíveis encontram-se marcadas como “●” e as não possíveis como “○”.

As PTFs mais comuns são variáveis contínuas, que predizem propriedades contínuas do solo. Outros exemplos são:

- uma tabela de atributos que prediz propriedades de solos a partir da classe à qual o solo pertence é uma PTF que parte de uma classe definida (preditora), para uma classe contínua (predita).
- McKenzie & Jacquier (1997) apresentaram uma árvore de regressão que prediz Ks a partir de classes de morfologia de campo (classes de textura, grau estrutural, porosidade). Isto é classificado como uma PTF que parte de

uma classe definida (preditora), para uma contínua (predita). Em outras palavras, a árvore de regressão é uma tabela multinível de atributos.

- Pachepsky & Rawls (1999) fizeram predição do teor de água nos potenciais de -33 e -1.500k Pa a partir de propriedades básicas dos solos, com base no agrupamento de classes taxonômicas de solos, regimes de umidade e de temperatura dos solos e classes texturais. Isto é classificado como uma PTF mista: parte de uma classe definida e contínua (preditora), para uma contínua (predita).
- Minasny *et al.* (1999) predisseram parâmetros da equação de van Genuchten a partir de propriedades básicas dos solos e de classes difusas de textura. Isto é uma PTF mista: parte de classe difusa e contínua (preditora), para uma contínua (predita).

Classificação baseada em abordagens

Tabela 2. Diferentes combinações de variáveis preditoras e preditas. As combinações consideradas PTFs são marcadas como "●" e aquelas não consideradas PTFs como "○".

	Variáveis Preditoras			
	classe		contínua	mista
	Classe definida (hard class)	difusa		
Variáveis Preditas	Classe definida (hard class)	●	○	○
	Classe difusa	●	○	○
	Classe contínua	●	●	●
	Classe mista	●	●	●

As abordagens para desenvolver PTFs podem ser inteiramente empíricas ou físico-empíricas. Abordagens empíricas tentam achar relações entre as variáveis preditoras e preditas usando análise de regressão ou outros modelos matemáticos. Em uma abordagem físico-empírica, as propriedades dos solos são derivadas com base em alguns princípios físicos. Por exemplo, na predição da curva de retenção de água, Arya & Paris (1981) traduziram a distribuição granulométrica em uma curva de retenção de água, através da conversão de frações de massa sólida em conteúdo de água e distribuição da porosidade em potencial hidráulico por meio da

equação de capilaridade. Zeiliger *et al.* (2000) propuseram um modelo aditivo para retenção de água do solo, o qual assume que a retenção de água pode ser aproximadamente, a soma da retenção de água das frações componentes da classe textural (areia, silte e argila).

Considerando o tipo de dados que desejamos prever, podemos distinguir PTFs por pontos simples e PTFs paramétricas. PTFs por pontos simples, predizem uma propriedade do solo, enquanto que PTFs paramétricas predizem parâmetros de um modelo. Uma PTF paramétrica prediz a relação entre uma variável dependente (y) e variáveis independentes (x), por exemplo, a curva de retenção de água (relação entre o teor de água e o potencial hidráulico). Assume-se que um modelo $y = f(x, p)$ que é uma equação com p parâmetros, pode representar os dados adequadamente. Uma abordagem paramétrica é normalmente preferida, por produzir uma função contínua da relação.

O cálculo dos parâmetros de um modelo de retenção de água é a PTF paramétrica mais comumente formulada. Não obstante, outras relações foram estudadas, como por exemplo, características de sorção de fósforo (Scheinost & Schwertmann, 1995), características de sorção de potássio (Scheinost *et al.*, 1997a), curva de resistência mecânica do solo (Da Silva & Kay, 1997) e curva de contração do solo (Crescimanno & Provenzano, 1999).

Os passos habituais para derivar PTFs paramétricas compreendem o cálculo dos parâmetros do modelo pelo ajuste deste aos dados e então, formando relações empíricas entre propriedades básicas dos solos e os parâmetros. O passo seguinte pode ser alcançado através de vários métodos matemáticos, por exemplo, regressão linear múltipla, ou redes neurais artificiais. No entanto, o modelo assumido nem sempre se ajusta aos dados, e conseqüentemente, os parâmetros calculados não são significantes. Muitos autores tiveram dificuldades, ao tentarem correlacionar os parâmetros com as propriedades básicas dos solos (Tietje & Tapkenhinrichs, 1993).

Scheinost *et al.* (1997b) propuseram a seguinte abordagem: estabelecer a relação esperada entre os parâmetros do modelo e as propriedades do solo, e então inserir a relação no modelo e estimar os parâmetros da relação, ajustando o modelo estendido usando regressão não linear. Minasny & McBratney (2002b) também sugeriram uma abordagem semelhante, mas usando redes neurais. Assim, PTFs paramétricas deveriam ser modeladas para se ajustarem às variáveis independentes e não aos parâmetros calculados.

Variáveis Preditoras

Há várias fontes de informação que podem ser usadas para prognosticar propriedades de solos e podem ser consideradas como funções de pedotransferência. Ampliaremos nossa visão sobre o uso de PTFs em conformidade com os princípios relacionados ao esforço. Os preditores potenciais podem vir de fontes como: laboratório, descrições de campo e morfologia do solo, variáveis ambientais, espectro eletromagnético do solo e base de dados de solos.

Dados de laboratório

As análises de laboratório para fins de levantamentos de solos são normalmente realizadas para alocar o perfil de solo a um sistema de classificação existente. O alto custo das análises de laboratório estimula o desenvolvimento de relações empíricas que relacionem propriedades mais facilmente ou habitualmente medidas com outras propriedades que são mais úteis, mas inexistentes. Um dos exemplos mais comuns é a estimativa da capacidade de água disponível a partir da análise granulométrica. O desenvolvimento de funções de pedotransferência é impulsionado pela existência de grandes bancos de dados de solos, que possibilitam o uso de ferramentas de busca de dados.

Como se sabe, análises de rotina normalmente são carentes de dados físicos. A variável mais útil na previsão de propriedades físicas dos solos é talvez o teor de argila, pois relaciona-se diretamente com a retenção de umidade, resistência do solo e muitos outros processos físicos e químicos.

A pedotransferência tem sido aplicada, principalmente, na predição de propriedades hidráulicas, como retenção de água e condutividade hidráulica saturada. Algumas análises mais simples foram utilizadas para calcular propriedades mais difíceis de medir, tais como pH em NaF como uma indicação de capacidade de sorção de fósforo (Gilkes & Hughes, 1994).

Descrição de campo e morfologia de solos

A maior parte da pesquisa tem focado em correlações de propriedades determinadas em laboratório com propriedades mais difíceis de determinar, principalmente por causa da disponibilidade de bancos de dados de levantamentos de solos, e a suposição de que essas propriedades são as mais apropriadas para

fins de predição. No entanto, foi também reconhecido, durante algum tempo, que a descrição morfológica de solos poderia ser usada como preditora (O'Neal, 1949, 1952; McKeague *et al.*, 1982; McKenzie & McLeod, 1989; McKenzie & Jacquier, 1997). Esse aspecto é crítico na Austrália, porque a maioria dos levantamentos de solos não contém dados detalhados de análises de laboratório. No Brasil, os levantamentos de solos contêm, com relativa abundância, dados químicos e morfológicos e carecem sobremaneira de dados físico-hídricos.

Calhoun *et al.* (2001) argumentam que a descrição morfológica de campo tem sido subutilizada no desenvolvimento de Funções de Pedotransferência. Eles mostraram a representação dos fatores de formação do solo de Jenny através das variáveis: **fisiografia, material originário, horizonte, textura de campo e estrutura** (como coletadas em levantamentos de solos) para prever a densidade do solo. Eles demonstraram que a própria morfologia e os descritores de campo respondem por mais variabilidade na predição de densidade do solo, do que a determinação granulométrica e de carbono orgânico em laboratório.

A utilidade da descrição fisiográfica e da caracterização morfológica do solo foi ilustrada por Rawls & Pachepsky (2002). Eles usaram gradiente da encosta, posição na encosta e tipo de horizonte como registrados em levantamentos, para prever retenção de água.

Muitos estudos foram conduzidos para estabelecer correlação entre morfologia de solos e propriedades hidráulicas. Vários estudos tiveram êxito predizendo condutividade hidráulica usando características morfológicas (por exemplo O'Neal, 1952; McKeague *et al.*, 1982). No entanto, os sistemas descritivos e interpretativos em levantamentos convencionais foram principalmente qualitativos e apropriados para um determinado grupo de solos. McKenzie *et al.* (1991) mostraram que vários sistemas descritivos publicados para inferir propriedades hidráulicas resultavam em predições pobres para um grupo limitado de solos do Sul da Austrália.

McKenzie e Jacquier (1997) argumentaram que boas relações de predição somente deveriam ser esperadas quando os critérios de campo usados tivessem uma conexão física lógica, com as propriedades hidráulicas. Eles postularam, posteriormente, que sistemas de predição que desenvolvem relações diretas entre propriedades hidráulicas e critérios de campo com significado físico, deveriam ser superiores e preferidos aos sistemas que se baseiam em entidades pedológicas como horizontes ou série de solos. Eles conceberam uma estimativa visual simples

da porosidade e descobriram que a condutividade hidráulica saturada pode ser calculada a partir da textura de campo, grau de desenvolvimento da estrutura, porosidade, densidade do solo, índice de dispersão e tipo de horizonte.

Lin *et al.* (1999) também propuseram sistema semelhante para prever propriedades hidráulicas a partir de morfologia de campo. Eles converteram propriedades morfológicas para um sistema de pontuação relacionado com o fluxo de água. Destes estudos, foi concluído que descrições morfológicas adicionais, além daquelas rotineiramente descritas, podem ser necessárias, para melhorar a capacidade de predição.

Variáveis ambientais

Sabe-se que propriedades de solos são relacionadas com posições na paisagem. Isto implica em que as variáveis dos fatores de formação do solo de Jenny, podem ser usadas para prever atributos dos solos. As relações solo-paisagem, mostram a significância de aspectos do terreno na predição de propriedades dos solos. Por exemplo, muitos estudos mostraram que teores de argila, matéria orgânica, pH e CTC podem ser preditos a partir da declividade, curvaturas do declive e CTI que são também boas preditoras de retenção de água (Pachepsky *et al.* 2000; Romano & Paladino, 2002). Pachepsky demonstrou também que um aumento nos valores do declive e um decréscimo na curvatura resultam em decréscimo na retenção de água a tensões entre -10 e -33 kPa.

Bui *et al.* (2002) usaram variáveis ambientais como clima, aspectos do terreno (elevação, declive, distância entre cumes e rios, derivados de Modelos Numéricos de Altitude - MNAs), litologia, imagens MSS de Landsat, uso da terra e classes de solos para prever a distribuição espacial de várias propriedades físicas e químicas de solos.

Variáveis climáticas são comumente usadas em árvores de regressão e revelam-se como as preditoras mais importantes, principalmente para predição de pH, carbono orgânico, nitrogênio e fósforo. O clima é reconhecido como um importante fator de influência sobre as propriedades dos solos. Jenny (1941) mostrou que o teor total de nitrogênio na superfície do solo pode estar relacionado à umidade e à temperatura anual. Com base em dados publicados sobre recarga do lençol freático na Austrália, Petheram *et al.* (2002) obtiveram correlação linear entre velocidade de recarga e o total de precipitação anual.

Espectro eletromagnético, sensores remotos e sensores próximos

Espectro eletromagnético

Desenvolvimentos alcançados em espectroscopia resultaram em um aumento no potencial de análise de solos. A espectroscopia nas faixas infravermelho (próximo ou médio) permite a aquisição rápida de informação sobre solos.

Obukhov & Orlov (1964) mostraram, em primeiro lugar, as diferenças entre grupos de solos em termos de reflectância difusa. Porém, estas descobertas não foram exploradas até recentemente. Shepherd & Walsh (2002) demonstraram o uso da reflectância difusa nas faixas visível e infravermelho próxima na estimativa rápida de parâmetros de fertilidade na superfície do solo no leste da África. Fidêncio *et al.* (2002) demonstraram o uso da reflectância infravermelho próxima, de solo moído, na predição de carbono orgânico em solos brasileiros. Fidêncio *et al.* (2001) conduziram também um estudo semelhante ao de Obukhov & Orlov (1964), porém mais avançado em termos de recursos computacionais para o Estado de São Paulo.

Assinaturas espectrais de materiais de solos são caracterizadas por sua reflectância, a um comprimento de onda particular, no espectro eletromagnético. Investigações conduzidas por Ben-Dor & Banin (1995), Janik & Skjemstad (1995) e outros demonstraram a capacidade da reflectância para prover estimativas de algumas propriedades físicas, químicas e biológicas de solos. Dalal & Henry (1986) avaliaram o uso da espectroscopia de reflectância infravermelho próxima difusa para prever umidade do solo, carbono orgânico e teor de nitrogênio total. Eles desenvolveram um modelo de regressão linear selecionando três valores de comprimento de onda que predizem melhor os atributos dos solos.

Janik *et al.* (1995) ofereceram a espectroscopia no comprimento de onda infravermelho médio para estimativa simultânea de exigência de calcário, carbono orgânico, cátions trocáveis, umidade em amostra seca ao ar, teor de argila e indicadores biológicos. A metodologia infravermelho parece ter vantagens, facilitando algumas análises de solos que são trabalhosas ou caras.

Ludwig *et al.* (2002) avaliaram a aplicação da técnica de espectroscopia infravermelho para prever várias propriedades químicas e biológicas de amostras de solos coletadas em dois locais em Victoria (Austrália), 10 anos depois do corte

da floresta. Eles obtiveram resultados promissores para C, N, Olsen P, C microbiano, N cumulativo, C mineralizado e C potencialmente mineralizável.

Espectros digitais de solos normalmente contêm centenas ou milhares de valores de reflectância em função do comprimento de onda. Desde que haja mais variáveis preditoras do que preditas, são requeridos métodos que reduzam as dimensões das preditoras. Regressão de componente principal (PCA) e quadrados mínimos parciais (PLS) são comumente utilizados. O método de regressão de componente principal reduz a dimensão dos preditores por análise de componente principal e regressão linear entre os componentes principais e os atributos de solos (Martens & Naes, 1989; Chang *et al.*, 2001). Quadrados mínimos parciais (PLS) extraem combinações lineares sucessivas das variáveis preditoras, otimizam os objetivos combinados de explicar as variações de respostas e de preditores. PLS, por isso, equilibra os dois objetivos, de explicar as variações de respostas e de preditores.

Sensores próximos

O desenvolvimento do método de espectroscopia está potencialmente vinculado ao desenvolvimento progressivo dos sistemas de sensores próximos ou de varredura. Esses sistemas de sensores próximos ou de varredura podem superar problemas atuais de alto custo, esforço, tempo e imprecisão de amostragem, aumentando eficazmente a precisão da representação da variabilidade espacial das propriedades medidas (Viscarra Rossel & McBratney, 1998).

Sudduth & Hummel (1993) conceberam um espectrofotômetro infravermelho próximo, portátil, para predizer o teor de matéria orgânica, umidade e valor de CTC (Capacidade de Troca Catiônica) do solo.

Um medidor de indução eletromagnética e de resistência do solo, acoplado a um veículo, fornece uma rápida e espacialmente georreferenciada leitura da condutividade elétrica do solo. A condutividade elétrica da massa do solo reflete uma combinação da mineralogia do solo, sais, teor de umidade e textura, conseqüentemente é uma boa medida composta do solo. Sensores próximos, como estes, oferecem a possibilidade de gerar mapas de propriedades dos solos com alta resolução. Equações de regressão foram desenvolvidas para predizer teor de umidade, espessura do horizonte superficial e teor de argila, porém sobre os valores de condutividade elétrica aparente medida no campo (ECa), que são uma combinação dessas variáveis, pouca pesquisa tem sido conduzida para decifrar esses fatores.

No futuro, espectrofotômetros de infravermelho próximo (NIR) para uso no campo estarão disponíveis (tais ferramentas estão em uso por geólogos de campo). Com calibração apropriada pelo uso de PTFs, estimativas de propriedades de solos serão aperfeiçoadas e outras propriedades como CTC e C orgânico poderão ser estimadas no campo pela primeira vez. Observação de campo, sensores próximos e PTFs serão combinados em um instrumento mais poderoso.

Sensores Remotos

A vantagem dos sensores remotos sobre os sensores próximos é que grandes extensões de solos podem ser cobertas rapidamente, permitindo muitas estimativas, embora em escala mais grosseira. O valor inferido de dados remotamente sensoriados, quer sejam oriundos de sensores aerotransportados ou de satélites, mostrou-se eficiente para avaliar recursos de solos em escalas pequenas. Os dados remotamente sensoriados podem incluir sinais espectrais, radar e sinais térmicos e radiométricos. Esses dados refletem condições ambientais e condições de solos que se sabe, são associadas às propriedades dos solos. Ben-Dor (2002) fez uma revisão sobre a aplicação de sensores remotos na avaliação quantitativa de propriedades de solos.

Bases de dados de solos

Extensivas determinações físicas e químicas foram raramente realizadas durante a execução de levantamentos de solos na Austrália. Atualmente, há somente alguns conjuntos de dados publicados que contêm tal informação, por exemplo Prebble (1970), Colwell (1977), Forrest *et al.* (1985), McGarry *et al.* (1989) e Geeves *et al.* (1995).

O Sistema Australiano de Informação do Recurso Solo (ASRIS) é o banco de dados atual, que contém mais de 160.000 descrições de perfis de solos e análises de laboratório. Este banco constitui uma fonte potencial para desenvolver novas PTFs para os solos da Austrália. A limitação principal de uso deste banco de dados é a grande heterogeneidade das análises. A heterogeneidade de dados pode causar uma performance apenas razoável das funções de pedotransferência, devido a que a variação na predição não está vinculada somente à limitação do modelo, mas também à incompatibilidade dos dados.

Funções Espaciais de Pedotransferência

Seria desejável incluir na predição de atributos de solos, variáveis ambientais ou os fatores de formação dos solos de Jenny no contexto espacial como Função de Pedotransferência, mas isto exige cautela. Esta é uma nova função, chamada Função Espacial de Predição do Solo (*Soil Spatial Prediction Function* - *SSPF*, em inglês). Deveriam ser chamadas de Função de Pedotransferência somente quando predizendo atributos de solos a partir de outros atributos, ou $s = f(s)$ e não quando $s = f(c, o, r, p, a, n)$, e quando alguns princípios esboçados, principalmente o princípio de esforço, é observado. Sem dúvida, é discutível se predizer atributos de solos a partir do terreno ou de variáveis de clima deveria ser considerado uma PTF. Há uma possível interseção, ou área de superposição, entre PTFs e SSPFs, isto é, elas obedecem aos princípios de PTF, são espacialmente localizadas e são uma função de coordenadas espaciais. Funções de Pedotransferência assim caracterizadas são chamadas de espaciais. A Figura 1 é uma tentativa para ilustrar as diferenças e possíveis sobreposições entre PTFs e SSPFs. Pachepsky *et al.* (2001) e Romano & Palladino (2002) mostraram exemplos de pedotransferência espacial, mas eles são realmente exemplos de $s = f(s, r)$, sendo, assim, mais caracterizadas como SSPFs do que PTFs.

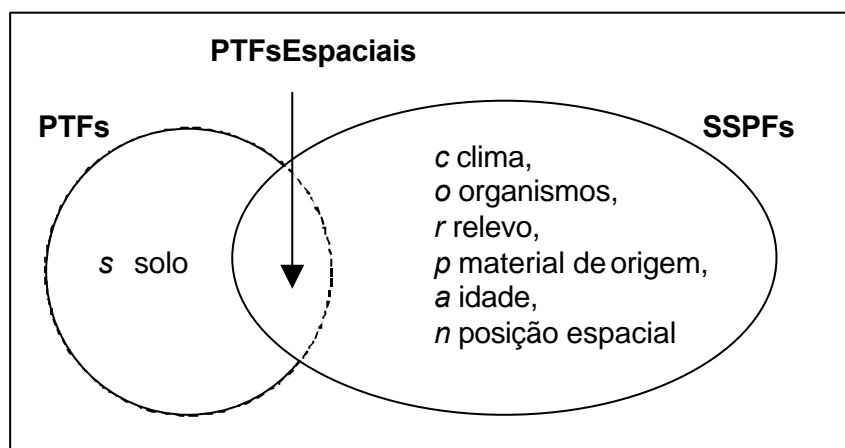


Fig. 1. Interface entre PTFs e SSPFs.

A maioria das PTFs foi calibrada a partir de dados pontuais, pressupondo-se independência espacial.

No mapeamento digital de solos, interessa estimar a distribuição espacial de propriedades do solo. Houve poucos estudos de avaliação da efetividade do uso de PTFs para quantificar variabilidade espacial de propriedades do solo. Springer & Cundy (1987) compararam os parâmetros da equação de infiltração de Green - Ampt a partir de medidas de campo e aqueles estimados por PTFs. Eles mostraram que a média e a variância dos parâmetros estimados por PTFs não foram mantidas, as variâncias foram sempre mais baixas. As tendências (*trends*) e as correlações cruzadas entre os parâmetros, também foram reduzidas. Eles posteriormente usaram as PTFs para simular fluxo superficial e chegaram a resultados significativamente diferentes, quando usando parâmetros medidos no campo. Romano & Santini (1997) avaliaram o desempenho de algumas PTFs publicadas para quantificar a variabilidade espacial de retenção de água do solo em uma área amostrada a intervalos de 50m entre pontos ao longo de um transecto de 5km. Usando diferentes PTFs, avaliaram o semivariograma de conteúdo de água a -1, -10 e -100kPa. Concluíram que a maioria das PTFs eram adequadas, pois mantinham a variância dentro do campo.

Quando as propriedades medidas são espacialmente limitadas, a predição espacial é requerida para gerar um mapa de distribuição contínua dessas variáveis. A combinação de método de interpolação espacial, como krigagem e PTFs pode gerar um mapa contínuo e há duas possibilidades para combiná-los. A primeira é pela interpolação de propriedades em locais não visitados, por krigagem, e depois usar PTFs para as variáveis interpoladas. A segunda aplica PTFs para medidas pontuais depois interpola os resultados preditos.

Bocneau (1998) comparou essas duas abordagens para estimar a CTC na província de West-Flanders, Bélgica, e mostrou que o desempenho de ambos os métodos é quase igual. Sinowski *et al.* (1997) compararam essas abordagens para estimar a curva de retenção de água e acharam que a primeira oferece uma predição melhor.

Heuvelink & Pebesma (1999) discutiram o papel da escala. Como as PTFs, em sua maioria, foram derivadas de dados pontuais, elas não são válidas para volumes maiores de solo. Isto significa que na situação em que os dados de entrada (*input*) disponíveis são PTFs pontuais e onde o resultado requerido (*output*) é em maiores volumes de solo (*block support*), agregação espacial deverá ser feita após as

funções terem sido calculadas. É essencial separar agregação espacial de interpolação espacial. Interpolação é mais adequada de ser aplicada antes de uma função ou modelo ser executado, porque isto possibilita um uso mais eficiente das características de distribuição espacial. Quando um modelo é executado com valores de entrada interpolados, é importante notar a incerteza da interpolação.

Correlação espacial de erro é normalmente ignorada na geração de PTFs, considerando que a fonte de dados vem de vários lugares sem coordenadas geográficas. Modelos de predição em PTFs usualmente são assumidos na forma:

$$y = f(x) + e$$

onde y é a variável predita, $f(x)$ é a PTF que prediz y a partir de x , e e é o erro. A suposição em modelo de quadrados mínimos ordinário é que e tem média 0, variância s^2 e é independente. No entanto, esta suposição de independência não é válida para variáveis espacialmente correlacionadas. Pachepsky *et al.* (1999) utilizaram modelos generalizados de quadrados mínimos com erro correlacionado, para predição de retenção de água a partir de atributos do terreno, onde e foi quantificado pela correlação espacial.

Abordagens

A maioria das instituições que executam levantamentos de solos possui seus próprios procedimentos práticos, regras estabelecidas e a experiência, para prever propriedades dos solos. Outra forma é usar uma tabela prática de referência, que normalmente relaciona classe de textura de campo com teor de argila, água disponível, etc.

Essas regras práticas e as tabelas, normalmente são derivadas da experiência e do conhecimento do especialista, ou por meio da média de propriedades de classes específicas em um banco de dados de solos.

Para as variáveis contínuas preditas, uma superabundância de modelos matemáticos pode ser usada, para derivar PTFs e estabelecer relações entre variáveis preditoras e preditas. Vários métodos foram desenvolvidos para os objetivos da inteligência artificial (*data mining*), sendo que o uso dessas ferramentas tem trazido grandes benefícios. Muitas dessas técnicas modernas são descritas por Hastie *et al.* (2001).

Os métodos variam de regressão linear, modelos lineares generalizados (*GLM*, em inglês), modelos aditivos generalizados (*GAM*, em inglês), árvore de regressão, redes neurais e sistemas de lógica difusa. Muitos pacotes estatísticos permitem o uso destas ferramentas agora em um ambiente “usuário – amigável”, como S - Plus (Insightful, 2002) e o JMP (SAS Institute, 2002).

Programas baseados em linguagem de programação, como Matlab (Mathworks, 2002), R (<http://www.r-project.org>) oferecem muitas ferramentas matemáticas avançadas. Também há software específico desenvolvido os objetivos de *data mining*, são normalmente mais poderosos e podem trabalhar com grandes conjuntos de dados, porém são normalmente mais caros que os pacotes estatísticos gerais.

Minasny & McBratney (2002c) desenvolveram software de redes neurais para ajustar PTFs pontuais e paramétricas. As capacidades preditiva e interpretativa variam entre modelos e dependem de suas complexidades.

A Tabela 3 mostra uma comparação entre vários modelos. Quanto mais complexo o modelo, mais parâmetros haverá e o usuário precisa estar atento ao princípio da parcimônia (Lark, 2001).

Há um limite para o modelo preditivo; usuários devem escolher o modelo mais simples que possa atender adequadamente à variação da predição.

Modelos com alta complexidade parecerão ajustar-se muito bem aos dados, mas também podem causar distorções devido aos ajustamentos exagerados ou excesso de parâmetros no modelo, e assim, o modelo ajustará também o ruído dos dados. É recomendado separar os dados em conjuntos de calibração e de validação, usando os dados de calibração para ajustar e testar o modelo e de validação para validar o modelo (veja Hastie *et al.* (2001) para mais detalhes). Wösten *et al.* (2001) compararam o desempenho de três modelos para prever teor de água a -33 kPa a partir de propriedades dos solos, usando o mesmo conjunto de dados. Eles revelaram que a precisão dos três métodos é semelhante, e sugeriram que a melhoria do ajustamento pode não ser esperada pelo uso de modelos diferentes, mas de um melhor conjunto de dados.

Tabela 3. Comparação de diferentes modelos matemáticos de predição, ☺ = bom, ☹ = razoável ☹☹ = ruim (Adaptado do Quadro 10.1 de Hastie et al. 2001).

Características	Modelos Lineares	GLM	GAM	Árvore de Regressão	Rede Neural
Facilidade de Uso	☺	☹	☹	☺	☹☹
Parcimônia	☺	☹☹	☹☹	☺	☹☹
Capacidade Interpretativa	☺	☹	☹☹	☺	☹☹
Não Linearidade	☹☹	☹☹	☺	☺	☺
Manuseio de dados mistos (qualitativo e quantitativo)	☹☹	☺	☺	☺	☹☹
Eficiência Computacional (muitos dados)	☺	☺	☹	☺	☹☹
Poder de predição	☹☹	☹	☹	☹	☺

Garantia de Qualidade das PTFs

De acordo com o segundo princípio, há necessidade de considerar a qualidade das PTFs publicadas. É sugerido que haja um número mínimo de repetições quando novas PTFs forem publicadas. Quando descreverem novas PTFs, os autores devem fornecer dados estatísticos do conjunto de dados (média, desvio padrão, medianas, mínimo e máximo e correlações entre variáveis). Os autores devem também estimar a incerteza associada ao modelo, usando a análise de primeira ordem de Taylor (Chen *et al.*, 1997; Heuvelink, 1998) ou o método “bootstrap” (Efron & Tibshirani, 1993). Se as PTFs foram geradas pelo método dos quadrados mínimos os autores devem listar o erro padrão dos parâmetros com suas variâncias – covariâncias.

Um Esquema para Desenvolver Novas PTFs

Saber se são necessárias novas PTFs requer responder questões do tipo “sob quais circunstâncias se pode querer desenvolver novas PTFs?” As respostas a esta questão poderiam ser “temos um modelo e ele necessita de certos parâmetros”. Temos estes parâmetros? E, finalmente, necessitamos PTFs?

Um esquema é ilustrado na Figura 2, para desenvolver PTFs conforme os seguintes passos:

- proceder a uma revisão de literatura, para localizar PTFs já disponíveis;
- compilar base de dados: busca de bases de dados existentes ou organização de novas;
- buscar o melhor método numérico, incluindo partição de variância, com base em planos geográfico, textural ou funcional,
- selecionar diferentes combinações de variáveis preditoras, dependendo da disponibilidade de dados. Um tipo hierárquico de PTFs com base na disponibilidade de dados é sugerida (Schaap *et al.*, 1998). Por exemplo, PTFs podem ser desenvolvidas de preditores como: classe de textura; análise granulométrica + densidade do solo; e assim por diante; e
- gerar as novas PTFs e proceder às análises das incertezas associadas.

Usando Funções de Pedotransferência

Desenvolver novas PTFs é uma tarefa árdua, porque requer uma ampla base de dados de solos contendo muitos dados morfológicos e determinações de laboratório. É aconselhável, em primeira instância, utilizar PTFs que já tenham sido desenvolvidas, mas a validade de uma determinada PTF não deve ser interpolada ou extrapolada além do ambiente pedológico ou tipo de solo em que foi desenvolvida.

As propriedades distintas dos solos da Austrália (Williams, 1983), do Brasil ou outra região do planeta não permitem aplicação direta, sem testar, de PTFs desenvolvidas em outros lugares. Testes são requeridos, de forma que PTFs mais adequadas possam ser identificadas. Estratificação e calibração de PTFs são também essenciais. Wösten *et al.* (2001) discutiram a respeito de precisão e confiabilidade de PTFs. Precisão é definida como o desempenho da PTF nos dados de treinamento, enquanto que confiabilidade refere-se ao desempenho fora dos dados de treinamento.

Podem ser feitas algumas sugestões para usar PTFs publicadas, como segue: **estratificação, calibração e teste**. A estratificação é uma etapa necessária para estabelecer a separação de PTFs com base no tipo de solo e informação de entrada.

A estratificação tem sido feita de várias maneiras, de acordo com horizontes de solos (Hall *et al.*, 1977); classes de solos da FAO (Batjes, 1996), classes de textura (Tietje & Hennings, 1996); horizontes hidráulico-funcionais (Wösten *et al.*, 1986); grandes grupos de solos, regimes de temperatura, regimes de umidade (Pachepsky & Rawls, 1999); material de origem e morfologia de horizontes de solos (Franzmeier, 1991); classificação numérica de solos (Williams *et al.*, 1983); unidades de manejo de solos (Droogers & Bouma, 1997).

A calibração é exigida para ajustar propriedades de acordo com dados de entrada. A calibração é necessária por causa das diferenças de critérios e medidas de

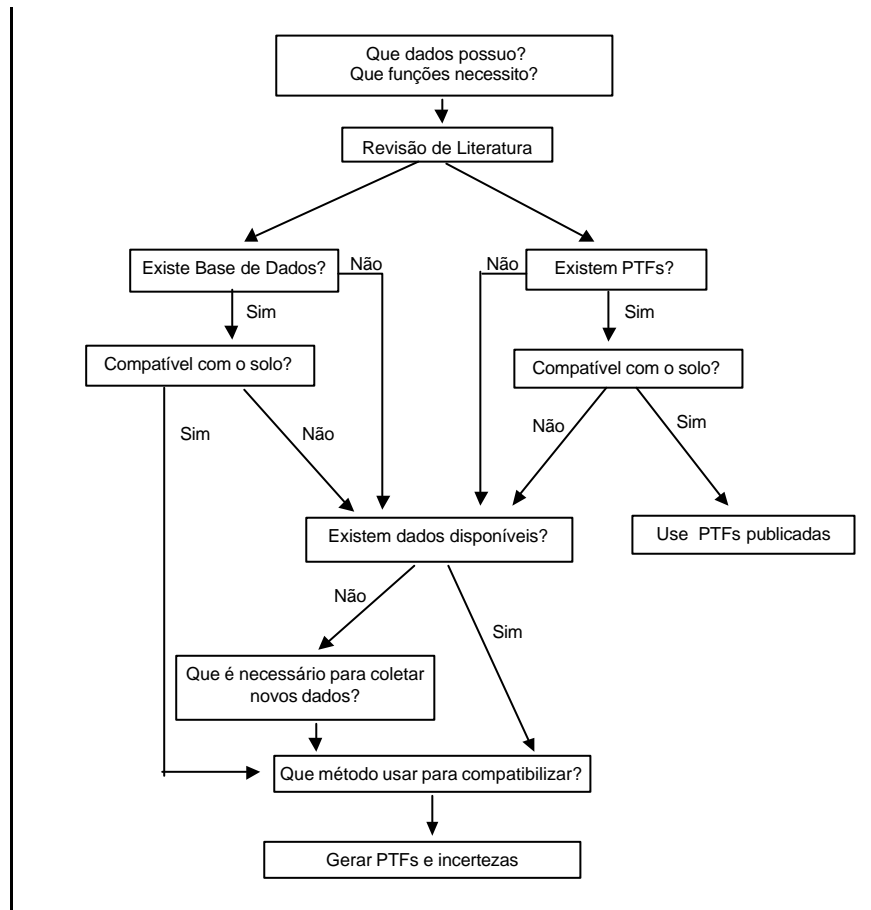


Fig. 2. Esquema para gerar PTFs.

Funções de Pedotransferência existentes. Por exemplo, frações de areia são diferentes, de acordo com a classificação de ISSS/Australiana (partícula diâmetro 20-2.000mm) e os critérios da FAO/USDA (partícula diâmetro 50-2.000mm). Minasny & McBratney (2001) forneceram equações para converter estes dois tipos de tamanho de silte. Little (1992) e Henderson & Bui (2003) estabeleceram relações entre pH medido em água e pH medido em CaCl_2 .

Testes de PTFs publicadas podem ser feitos a partir de dados disponíveis. Muitas PTFs exóticas são aplicáveis somente a certos tipos de solos, onde elas foram calibradas. Documentos que avaliam a aplicação de diferentes PTFs (por exemplo Tietje & Tapkenhinrichs, 1993; Minasny & McBratney, 2000) podem oferecer um guia para a escolha de qual função usar.

É recomendado usar uma função consistente quando aplicando PTFs em um perfil ou em uma área. Por exemplo, no caso em que uma distribuição granulométrica esteja disponível para cada horizonte em um perfil de solo, mas a densidade do solo somente exista para apenas alguns dos horizontes. Sabendo-se que há PTFs que usam somente análise granulométrica e outras, que usam análise granulométrica mais densidade do solo como dados de entrada, devemos usar a função que leva análise granulométrica mais densidade do solo como dados de entrada para cada camada. Para os horizontes sem determinação de densidade, valores podem ser preditos a partir da interpolação entre horizontes ou podem ser preditos a partir da granulometria. É essencial usar PTFs consistentes, pois o uso de PTFs diferentes da estrutura da função, podem causar valores anômalos, devidos à estrutura dissimilar das funções.

Sistemas de Inferência de Solos

Enquanto há muitas funções de pedotransferência semelhantes, geradas através de conjuntos de dados novos ou existentes, parece haver muito menos esforço em escolher e usar as PTFs disponíveis. McBratney *et al.* (2002) propuseram o conceito de sistema de inferência de solo (SINFERS, em inglês), onde funções de pedotransferência são regras de conhecimento.

“Um sistema de inferência de solo realiza medidas que mais ou menos conhecemos em um determinado nível de incerteza, e estima dados que nós não conhecemos, com inexatidão mínima, por meio de funções de pedotransferência apropriadas e logicamente combinadas”.

Dale *et al.* (1989) discutiram o papel de sistemas especialistas em classificação de solos, e princípios similares podem ser aplicados ao sistema de inferência proposto. Isto é ilustrado na Figura 3, onde o sistema é constituído de 3 partes: uma **fonte** de dados, um **organizador** e um **preditor**. As fontes de conhecimento para prever propriedades de solos são coleções de funções de pedotransferência e bancos de dados de solos. O organizador categoriza as funções de pedotransferência com respeito aos dados de entrada e tipos de solos dos quais eles foram gerados. A ferramenta de inferência (preditor) é uma coleção de regras lógicas que selecionam as funções de pedotransferência com a menor variância. As regras simplesmente podem ser um conjunto de formulações do tipo “se - então”, ou baseadas em inferência Bayesiana probabilística.

A incerteza da predição pode ser avaliada usando simulações do tipo Monte – Carlo (acaso, aleatório). O sistema de inferência opera através de uma interface com o usuário, que resultará em predições de propriedades físicas e químicas de solos com as incertezas associadas, com base na informação fornecida.

McBratney *et al.* (2002) e Minasny *et al.* (2002) demonstraram que construir um sistema de inferência de solo é criar um sistema muito rudimentar na forma de uma planilha eletrônica especialmente adaptada. Tem duas características essencialmente novas: primeiramente, contém uma coleção de funções de pedotransferência publicadas. O resultado de uma PTF pode funcionar como uma entrada para outras funções (se dados medidos não estão disponíveis). Em segundo lugar, as incertezas em estimativas são entradas (*inputs*) e as incertezas dos cálculos subsequentes são realizadas. As entradas (*inputs*) são as propriedades essenciais dos solos. A ferramenta de inferência funcionará da seguinte maneira:

- prediz todas as propriedades de solos usando todas as combinações possíveis de dados (input) e PTFs;
- seleciona a combinação que conduza a uma predição com variância mínima.

Considera-se que um sistema de inferência de solo completo poderá ser construído e adaptado a um contexto de SIG. O sistema deverá ter um banco de dados de propriedades de solos (valores médios), como, por exemplo, granulometria e teor de matéria orgânica, para diferentes tipos de solos. A ferramenta de inferência conterá regras e instruções que determinarão que funções usar e calculará as incertezas. O resultado serão similares as propriedades físicas e químicas preditas e as respectivas incertezas. Isto pode ser incorporado em uma estrutura espacial,

onde um ponto no espaço poderá ser predito, a partir de propriedades básicas de solos ou classe de solo que ocorrem em outros pontos na vizinhança.

Bouma (1989) definiu funções de pedotransferência em termos de transformação de dados. Nós podemos descrever esta função de transformação, como informação. Esta informação, quando correta e logicamente reunida, constitui o conhecimento. O conhecimento pode gerar vários outros dados. Os Sistemas de Inferência de Solos realizam medidas que são conhecidas com uma certa precisão e inferem propriedades que não conhecemos com uma determinada precisão, por meio de funções de pedotransferência, correta e logicamente combinadas.

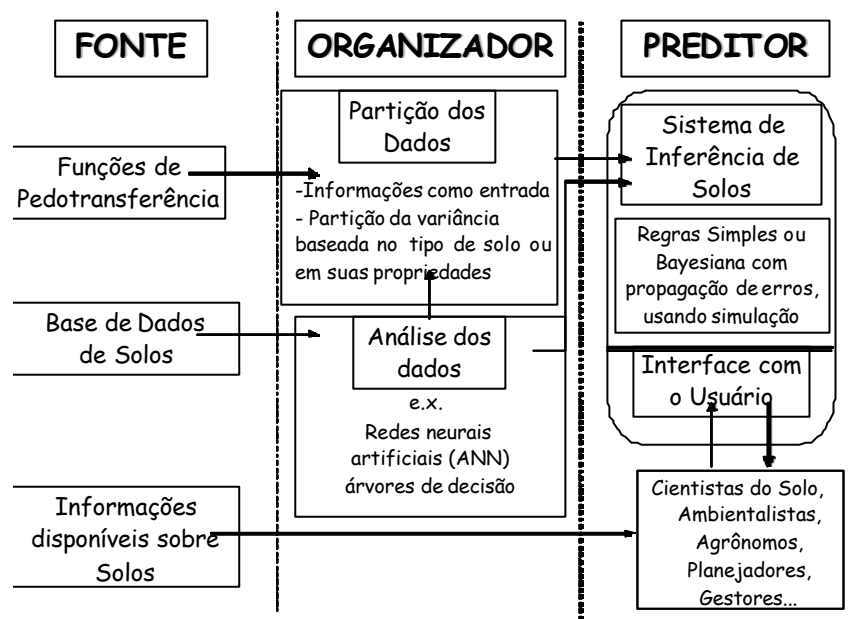


Fig. 3. Sistema de Inferência de Solo.

Referências Bibliográficas

ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A Physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 1023 -1030, 1981.

BATJES, N.H. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. **Geoderma**, Amsterdam, v. 71, p. 31-52, 1996.

BEN-DOR, E. Quantitative remote sensing of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v. 75, p. 173-243, 2002.

BEN-DOR, E.; BANIN, A. Near-infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, p. 364–72, 1995.

BOUCNEAU, G. **Geographical information science applied to soils of west-flanders**. 1998. 201 p.. PhD thesis. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, University of Ghent.

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

BRISTOW, K. L.; SMETTEM, K. R. J.; ROSS P. J.; FORD, E. J.; ROTH, C.; VERBURG, K. Obtaining Hydraulic properties for soil water balance models: some pedotransfer functions for tropical Australia. In: GENUCHTEN, M. T. H. VAN; LEIJ, F. J.; WU, L (Eds). **Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media**. Riverside, CA: University of California, 1999. p. 1103- 1120.

BUI, E.; HENDERSON, B.; MORAN, C.; JOHNSTON, R. Continental-scale spatial modelling of soil properties. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 17. 14-21 August 2002, Bangkok, Thailand. **Proceedings...** Bangkok: [s.ed.], 2002. Paper n. 1470.

CALHOUN, F. G.; SMECK, N. E.; SLATER, B. L.; BIGHAM, J. M.; HALL, G. F. Predicting bulk density of Ohio soils from morphology, genetic principles, and laboratory characterization data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 811-819, 2001.

CAMPBELL, G. S. A Simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. **Soil Science**, Baltimore, v. 117, p. 311-314, 1974.

CARLILE, P.; BUI, E.; MORAN, C.; SIMON, D.; HENDERSON, B. **Method used to generate soil attribute surfaces for the Australian Soil Resource Information System using soil maps and look-up tables**. Canberra: CSIRO Land and Water, 2001. 35 p. Technical Report 24/01.

CHANG, C. W.; LAIRD, D. W.; MAUSBACH, M. J.; HURBURGH, C. R. Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 480-490, 2001.

CHEN, G.; YOST, R. S.; LI, Z. C.; WANG, X.; COX, F. R. Uncertainty analysis for knowledge-based decision aids: application to PDSS (Phosphorous Decision Support System). **Agricultural Systems**, Barking, Inglaterra, v. 55, p. 461-471, 1997.

COLWELL, J. D. **National soil fertility project**. CSIRO Division of Soils in collaboration with state departments of agriculture and the fertilizer industry. Adelaide: CSIRO Division of Soils, 1977. 197 p.

CRESCIMANNO, G.; PROVENZANO, G. Soil shrinkage characteristic curve in clay soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 25-32, 1999.

CRESWELL, H. P.; PAYDAR, Z. Water retention in Australian soils. I. Description and prediction using parametric functions. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 34, p. 195-212, 1996.

CRESWELL, H. P.; MCKENZIE, N. J.; PAYDAR, Z. A Strategy for determination of hydraulic properties of Australian soil using direct measurement and pedotransfer functions. In: GENUCHTEN, M. T. H. van; LEIJ, F. J.; WU, L. (Eds). **Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media**. Riverside, CA: University of California, 1999. p. 1143-1159.

CRESSWELL, H.; PIERRET, C.; BREBNER, P.; PAYDAR, Z. **The SH-Pro V1.03 software for predicting and analysing soil hydraulic properties**. Canberra: CSIRO Land and Water, 2002. 1v.

DA SILVA, A., KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 877-883, 1997.

DALAL R. C.; HENRY, R. J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near infrared reflectance spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 120-123, 1986.

DALE, M. B.; McBRATNEY, A. B.; RUSSELL, J. S. On the role of expert systems and numerical taxonomy in soil classification. **Journal of Soil Science**, Oxford, Inglaterra, v. 40, p. 223-234, 1989.

DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.) **Methods of soil analysis** part 4 – physical methods.. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, 2002. 1692 p. (SSSA Book Series 5)

DROOGERS, P.; BOUMA, J. Soil survey input in exploratory modelling of sustainable soil management practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1704-1710, 1997.

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

FIDÊNCIO, P. H.; POPPI, R. J.; DE ANDRADE, J. C. Determination of organic matter in soils using radial basis function networks and near infrared spectroscopy. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 453, p. 125-134, 2002.

FIDÊNCIO, P. H.; RUISÁNCHEZ, I.; POPPI R. J. Application of artificial neural networks to the classification of soils from São Paulo state using near-infrared spectroscopy. **Analyst**, London, v. 126, p. 2194-2200, 2001.

FORREST, J. A.; BEATTY, J.; HIGNETT, C. T.; PICKERING, J. H.; WILLIAMS, R. G. P. **A Survey of the physical properties of wheatland soils in eastern Australia**. Canberra, Austrália: CSIRO Australia Divison of Soils, 1985. 49 p.. (Divisional Report, n. 78)

FRANZMEIER, D. P. Estimation of hydraulic conductivity from effective porosity data for some Indiana soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 1801-1803, 1991.

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, Australia, v. 38, p. 523-526, 2000.

GILKES, R. J.; HUGHES, J. C. Sodium fluoride pH of south-western Australian soils as an indicator of P-sorption. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 32, p. 755-766, 1994.

HALL, D. G.; REEVE, M. J.; THOMASSON, A. J.; WRIGHT, V. F. **Water retention, porosity and density of field soils**. Harpenden: Soil Survey of England and Wales, 1977. 1 v. (Technical Monograph, n. 9).

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The Elements of statistical learning: data mining, inference and prediction**. New York: Springer-Verlag, 2001. 533 p.. (Springer Series in Statistics)

HELYAR, K. R.; CREGAN, P. D.; GODYN, D. L. Soil acidity in New south Wales - current pH values and estimates of acidification rate. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 28, p. 523-527, 1990.

HENDERSON, B. L.; BUI, E. N. An improved calibration curve between soil pH measured in water and CaCl_2 . **Australian Journal of Soil Research**, 2003. No prelo

HEUVELINK, G. B. M. **Error propagation in environmental modelling with GIS**. Bristol, London: Taylor & Francis, 1998. 1 v.

HEUVELINK, G. B. M.; PEBESMA, E. J. Spatial aggregation and soil process modeling. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, p. 47–65, 1999.

HOODNETT, M. G.; TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedotransfer function developed for tropical soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 108, p. 155 – 180, 2002.

INSIGHTFUL. S-Plus6 for Windows User's Guide. Insightful Corporation, Seattle, WA, 2001. Disponível em: <http://www.insightful.com>. Acessado em: 1 Mar. 2003.

JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O.; RAVEN, M. D. Characterization and analysis of soils using mid-infrared partial least squares. I. Correlations with XRF-determined major element composition. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 33, p. 621–636, 1995.

JANIK, L.; SKJEMSTAD, J. O. Characterization and analysis of soils using mid-infrared partial least squares. II. Correlations with some laboratory data. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 33, p. 637–650, 1995.

LARK, R.M. Some tools for parsimonious modelling and interpretation of within-field variation of soil and crop systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 58, p. 99-111, 2001.

LIN, H.S., MCINNES, K.J., WILDING, L.P., HALLMARK, C.T. Effects of soil morphology on hydraulic properties: I. Quantification of soil morphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p. 948-954, 1999.

LITTLE, I. P. The relationship between soil pH measurements in calcium chloride and water suspensions. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 30, p. 587-592, 1992.

LITTLEBOY, M. **Spatial generalisation of biophysical simulation models for quantitative land evaluation**: a case study for dryland wheat growing areas of Queensland. 1998. 255 p. PhD Thesis. The University of Queensland.

LOCH, R. J.; SLATER, B. K.; DEVOIL, C. Soil erodibility (Km) values for some Australian soils. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 36, p.1045-1055, 1998.

LUDWIG, B., KHANNA, P. K., BAUHUS, J. HOPMANS, P. Near infrared spectroscopy of forest soils to determine chemical and biological properties related to soil sustainability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 171, p.121-132, 2002.

MARTENS, G.; NAES, T. **Multivariate calibration**. New York: John Wiley and Sons, 1989. 419 p.

MATHWORKS. Matlab Release 13. Natick, MA : MathWorks Inc., 2002.
Disponível em: <http://www.mathworks.com>. Acessado em: 1 Mar. 2003.

McGARRY, D.; WARD, W. T.; McBRATNEY, A. B. **Soil studies in the Lower Namoi Valley: methods and data**. Glen Osmond, South Australia: The Edgeroi Data Set. CSIRO Division of Soils, 1989. 840 p.

McKEAGUE, J. A.; WANG, C.; TOPP, G. C. Estimating saturated hydraulic conductivity from soil morphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, p. 1239-1244, 1982.

McKENZIE N. J.; JACQUIER, D. W. Improving the field estimation of saturated hydraulic conductivity in soil survey. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 35, p. 803–825, 1997.

McKENZIE N. J.; JACQUIER, D. W.; ASHTON L.J., CRESSWELL, H.P. **Estimation of soil properties using the atlas of australian soils**. Canberra: CSIRO Land and Water, 2000. 1 v. (Technical Report 11/00)

McKENZIE, N. J.; COUGHLAN, K.; CRESSWELL, H. P. (Eds.) **Soil physical measurement and interpretation for land evaluation**. Victoria: CSIRO Publishing, 2002. 379 p.

McKENZIE, N. J.; MacLEOD, D. A. Relationships between soil morphology and soil properties relevant to irrigated and dryland agriculture. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 27, p. 235-258, 1989.

McKENZIE, N. J.; SMETTEM, K. R. J., RINGROSE-VOASE, A. J. Evaluation of methods for inferring air and water properties of soils from field morphology. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 29, p. 587-602, 1991.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. **Neuropack**: Neural networks package for fitting pedotransfer functions. [s.l.]: Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, 2002c. Disponível em: <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>. Acessado em: 1 Mar. 2003.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. The Australian soil texture boomerang: a comparison of the Australian and USDA/FAO soil particle-size classification systems. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 39, 1443-1451, 2001.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 107, p. 55-70, 2002a.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. The neuro-m method 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., 2000. Evaluation and development of hydraulic conductivity pedotransfer functions for Australian soil. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v.38, p. 905-926, 2000.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B., CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotransfer function to soil inference system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 109, p. 41-73, 2002.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; BRISTOW, K. L.. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. **Geoderma**, Amsterdam, v. 93, p. 225-253, 1999.

NOBLE, A.D.; CANNON, M.; MULLER, D. Evidence of accelerated soil acidification under *Stylosanthes*-dominated pastures. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 35, p. 1309-1322, 1997.

NORTHCOTE, K. H. A **Factual key for the recognition of australian soils**. 4.ed. Rellim Tech: Glenside, Austrália, 1979. 123 p.

O'CONNELL, D. A.; RYAN, P. J. Prediction of three key hydraulic properties in a soil survey of a small forested catchment. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australia, v. 40, p. 191–206, 2002.

O'NEAL, A. M. A Key for evaluating soil permeability by means of certain field clues. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, WI, v. 16, p. 312-315, 1952.

O'NEAL, A. M. Some characteristics significant in evaluating permeability. **Soil Science**, Baltimore, MD, v. 67, p. 403-409, 1949.

OBUKHOV, A. I.; ORLOV, D. S. Spectral reflectivity of the Major Soil Groups and possibility of using diffuse reflection in soil investigations. **Soviet Soil Science**, Washington, DC, v. 2, p. 174-184, 1964.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v. 63, p. 1748-1756, 1999.

PACHEPSKY, Y. A.; TIMLIN, D. J.; AHUJA, L. R. The current status of pedotransfer functions: their accuracy, reliability and utility in field- and regional-scale modeling. In: CORWIN, D. L.; LOAGE, K.; ELLSWORTH, T. R. (Eds.) **Assessment of non-point source pollution in vadose zone**. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1999. p. 223-234. (Geophysical Monograph 108)

PACHEPSKY, Y. A.; TIMLIN, D. J.; RAWLS, W. J. Soil water retention as related to topographic variables. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v. 65, p. 1787-1795, 2001.

PAYDAR, Z.; CRESSWELL, H. P. Water retention in Australian soils. II Prediction using particle-size, bulk density and other properties. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, Australis, v. 34, p. 679-693, 1996.

PREBBLE, R. E. **Soil physical measurements and grass roots distributions on a red podzolic at Samford, South East Queensland**. Australia: CSIRO, 1970. 10 p. (CSIRO Division of Soils Technical Memorandum 13/70).

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.; PACHEPSKY, Y. A. Using field topographic descriptors to estimate soil water retention. **Soil Science**, Baltimore, MD, v. 167, p. 423-435, 2002.

REUTER, D. J. Developing indicators for monitoring catchment health: the challenges. **Australian Journal Experimental Agriculture**, East Melbourne, Australia, v. 38, p. 637-648, 1998.

ROMANO, N.; PALLADINO, M. Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes. **Journal of Hydrology**, v. 265, p. 56-75, 2002.

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

SAS Institute. **JMP Statistics and Graphics Guide, Version 5**. Cary, NC: SAS Institute Inc, 2002. Disponível em: <http://www.jmpdiscovery.com>. Acessado em: 1 Mar. 2003.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. L.; Van GENUCHTEN, M. T. H. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v. 62, p. 847-855, 1998.

SCHEINOST, A. C.; SCHWERTMANN, U.. Predicting phosphate adsorption-desorption in a soilscape. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v. 59, p. 1575-1580, 1995.

SCHEINOST, A. C.; SINOWSKI, W.; AUERSWALD, K. Regionalization of soil buffering functions: A new concept applied to K/Ca exchange curves. **Advances in GeoEcology**, Cremlingen, v. 30, p. 23-38, 1997a.

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, 1997b.

SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v. 66, p. 988-998, 2002.

SINOWSKI, W.; SCHEINOST, A. C.; AUERSWALD, K. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, II. Comparison of regionalization procedures using a pedotransfer function. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 145-159, 1997.

SMETTEM, K. J. R.; GREGORY, P. J. The relation between soil water retention and particle size distribution parameters for some predominantly sandy Western Australian soils. **Australian Journal of Soil Research**, East Melbourne, Australia, v. 34, p. 695-708, 1996.

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, Austrália, v. 50, p. 1259-1262, 1999.

SMETTEM, K. R. J.; OLIVER, Y. M.; HENG, L. K.; BRISTOW, K. L.; FORD, E. J. Obtaining soil hydraulic properties for water balance and leaching models from survey data 1. Water retention. **Australian Journal of Soil Research**, East Melbourne, Austrália, v. 50, p. 283-289, 1999.

SPRINGER, E. P.; CUNDY, T. W. Field-scale evaluation of infiltration parameters from soil texture for hydrologic analysis. **Water Resources Research**, Washington, D.C., v. 23, p. 325-334, 1987.

STIRK, G. B. **Physical properties of soils of the lower Burdekin valley, North Queensland**. CSIRO, Australia: CSIRO Division of Soils, 1957. 27 p. (Divisional Report 1/57)

SUDDUTH, K. A.; HUMMEL, J. W. Soil organic matter, CEC (cation exchange capacity), and moisture sensing with a portable NIR spectrophotometer. **Transactions of the ASAE**, St.Joseph-MI, v. 36, p. 1571-1582, 1993.

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

TIETJE, O.; TAPKENHINRICHS, M. Evaluation of pedo-transfer functions **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v. 57, p. 1088-1095, 1993.

TOMASELLA, J.; HOODNETT, M. G.. Estimating soil water characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, Baltimore, MD, v. 163, p. 190-202, 1998.

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

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, WI, v. 64, p. 327-338, 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.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; McBRATNEY, A. B. Soil chemical analytical accuracy and costs: implications from precision agriculture. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, Australia, v. 38, p. 765-775, 1998.

WILLIAMS J.; PREBBLE, J. E.; WILLIAMS, W. T.; HIGNETT, C. T. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. **Australian Journal of Soil Research**, East Melbourne, Austrália, v. 21, p. 15-32, 1983.

WILLIAMS, J. Physical properties and water relations: Soil hydrology. In: **SOILS: an Australian Viewpoint**. Melbourne: CSIRO Div. Soils.; London: Academic Press, 1983. p. 507-30

WILLIAMS, J.; ROSS, P. J.; BRISTOW, K. L. Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure and organic matter. In: van GENUCHTEN, M. T. H.; LEIJ, F. J.; LUND, L. J. (Eds.) **Proceedings of the international workshop on indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils**. Riverside, CA: University of California, 1992. p. 427-441.

WÖSTEN, J. H. M. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. (Eds.) **Soil quality for crop production and ecosystem health**. **Developments in Soil Science**, Amsterdam, v. 25, p. 221-245, 1997.

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.; FINKE, P. A.; JANSEN, M. J. W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. **Geoderma**, Amsterdam, 66, 227-237, 1995.

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

ZEILIGUER, A.M., PACHEPSKY, Y.A., RAWLS, W.J. Estimating water retention of sandy soils using the additivity hypothesis. **Soil Science**, Baltimore, v. 165, p. 373-383, 2000.