



ISSN 1517-5219

Dezembro, 2001

Solos

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 24

**Cartografia tridimensional dos
solos - aspectos metodológicos
e aplicação ao estudo da varia-
bilidade espacial de solos
aluviais**

Maria de Lourdes Mendonça Santos

Rio de Janeiro, RJ
2001

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024 Jardim Botânico, Rio de Janeiro - RJ

Fone: (21) 2274-4999

Fax: (21) 2274-5291

www.cnps.embrapa.br

sac@cnps.embrapa.br

Supervisor editorial: Jacqueline Silva Rezende Mattos

Revisor de texto: Jacqueline Silva Rezende Mattos

Normalização bibliográfica: Maria da Penha Delaia

Tratamento de ilustrações: Felipe Dias

Editoração eletrônica: Deborah Caroline da S. Vieira

1ª edição

1ª impressão 2001: 150 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).

Cartografia tridimensional dos solos – aspectos metodológicos e aplicação ao estudo da variabilidade espacial de solos aluviais / Maria de Lourdes Mendonça Santos Brefin. - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2001.

1 cd rom. - (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa; n. 24)

ISSN 1517-5219

1. Solo – Cartografia – SIG. 2. Solo – Cartografia – Método tridimensional. I. Brefin, Maria de Lourdes Mendonça Santos. II. Embrapa Solos (Rio de Janeiro). III. Série.

CDD (21.ed.) 621.367

© Embrapa 2001

Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Introdução	9
Material e Métodos	10
Aquisição de dados	11
Modelagem das formas do relevo	13
Cartografia dos solos	14
Resultados e Discussão	15
Conclusões, Limitações e Perspectivas	21
Referências Bibliográficas	23

Cartografia tridimensional dos solos – aspectos metodológicos e aplicação ao estudo da variabilidade espacial de solos aluviais

Maria de Lourdes Mendonça Santos¹

Resumo

A proposta deste estudo foi estabelecer uma estrutura metodológica para a cartografia de solos que possibilite a visualização dos mesmos em duas e três dimensões. Essa cartografia tridimensional foi aplicada a um estudo da variabilidade espacial dos solos na planície aluvial do rio Sarine, na Suíça. Este ambiente é caracterizado por uma grande variabilidade espacial, tanto lateral quanto vertical, correspondendo às variações temporal e espacial da dinâmica fluvial do rio. O estudo foi realizado usando ferramentas existentes nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) comerciais, combinadas com funções específicas desenvolvidas e/ou adaptadas para a cartografia de solos. Esse tipo particular de cartografia SIG é baseado na noção de horizonte do solo, em vez de tomar como base o perfil diagnóstico. Um levantamento com GPS (Global Positioning System) foi realizado, a fim de construir um Modelo Numérico de Altitude (MNA) e para determinar as coordenadas para cada um dos 181 pontos onde os solos foram amostrados. Todos os dados foram armazenados em uma base de dados em ambiente SIG e procedeu-se a modelagem do relevo e da cartografia dos solos. Tanto o software ARC/Info quanto o MapInfo (módulo Vertical Mapper) mostraram-se adequados para a interpolação linear por triangulação (TIN) para o processamento das curvas de nível do terreno e para a criação dos blocos-diagrama (*cross-sections*) e seus perfis verticais correspondentes. Estes perfis verticais servem para ilustrar a superposição dos

¹ Engenheiro Agrônomo, PhD em Solos e Geomática, Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024, 22460-000, Rio de Janeiro, RJ; e-mail: loumendonca@cnps.embrapa.br.

horizontes do solo ao longo de qualquer seção linear traçada na área de estudo. Uma representação tridimensional do solo foi obtida usando o método de elemento finito quadrático, que é geralmente empregado em estudos geológicos e que foi especialmente adaptado para a representação dos horizontes do solo. A cartografia tridimensional dos solos, com base nos horizontes, permite que sejam visualizados de maneira espacial, o padrão de distribuição espacial de um dado horizonte (incluindo a variação de sua espessura), a superposição dos diferentes horizontes, a profundidade total do solo e o número de horizontes em qualquer ponto do terreno. Além disso, essa abordagem facilita a percepção do solo em sua concepção real e tridimensional. Dessa forma, pode-se observar as relações existentes entre qualquer horizonte e/ou seqüência de horizontes e a topografia onde o solo está inserido. Assim, por permitir a representação realística dos solos e por facilitar a compreensão da distribuição e da variabilidade espacial dos solos na paisagem, essa abordagem metodológica é um instrumento valioso para o entendimento das relações solo-paisagem, bem como para outras aplicações no campo da ciência do solo e de suporte à decisão em termos de planejamento e gestão de ecossistemas.

Termos de indexação: cartografia tridimensional de solos, SIG, cartografia 3-D, variabilidade espacial, relação solo-paisagem, solos aluviais, MNA.

Three-dimensional soil cartography – methodological aspects and application to the study of the spatial variability of alluvial soil

Abstract

The purpose of this study was to establish a framework for both, the study of the spatial variability of the soils found in the floodplain of the Sarine river in Switzerland, and the visualisation of soil distribution patterns in 2- and 3-dimensions (2-D, 3-D). This environment is characterised by a high lateral and vertical spatial variability of soils that correspond to the temporal and spatial variations of the fluvial dynamics of the river in question. The study was carried out using existing GIS (geographical information system) functions combined with those applications specific to soil cartography. This particular GIS cartography is based on the notion of soil horizon instead of that of soil diagnostic profile. A GPS (Global Positioning System) survey was carried out in order to construct a local DEM (Digital Elevation Model) and to ascertain the co-ordinates for each of the 181 soil points. All data were stored in a GIS database, and both landform modelling and soil cartography was undertaken. GIS, ARC/INFO and Vertical Mapper for MapInfo were adequate for our triangulation interpolation, for the running of contour processing and for the creation of cross-sections as well as the corresponding vertical profiles. These vertical profiles served to illustrate the superposition of soil horizons along any line across the sampled area. A three-dimensional representation of soil was obtained using the quadratic finite element method, which is generally employed in geological studies and which we adapted especially for the representation of soil horizons. 3-D cartography of this type allows the spatial pattern of a given horizon – including the variation of its thickness, the superimposition of the different soil horizons, the total soil depth,

and the number of horizons at any given point — to be followed through space. This approach, furthermore, facilitates the perception of soil in its real appearance, showing soil horizons as 3-D objects, and permits the visualisation of the existing relationships between any given horizon or sequence of horizons and the topography. In thus, enabling the realistic representation and easy visualisation of soil spatial distribution and variability within landscape. This methodological approach provides a powerful instrument for soil scientists, in order to better understand the soil-landscape relationship, as well as to other applications related to decision-support for ecosystem planning and management.

Index terms: three-dimensional soil mapping, GIS, 3-D cartography, spatial variability, soil-landscape relationship, soil horizon, alluvial soil, DEM.

Introdução

Diversos autores têm discutido os dois principais modelos usados no desenvolvimento da cartografia do solo: os modelos discreto e contínuo (Baize, 1986; Aubert & Boulaine, 1989; Lark & Beckett, 1998).

A cartografia tradicional do solo é baseada no modelo discreto da variabilidade espacial do solo. Nesse modelo, assume-se que os solos, ou suas características, mudam abruptamente nos limites. Em geral, cada unidade de mapeamento representa uma única classe de solo (representativa de uma associação com outras classes), ou uma característica pedológica constante. No primeiro caso, a unidade de mapeamento é definida por um “perfil representativo do solo” (Soil Survey Staff, 1999).

O modelo discreto não é geralmente realístico, porque os limites naturais na paisagem tendem a ser mais frequentemente graduais que abruptos. Não obstante, em escalas intermediárias a cartografia tradicional do solo pode oferecer uma solução adequada (Voltz & Webster, 1990; Lagacherie *et al.*, 1995), porque os limites do solo podem ser facilmente identificados por mudanças na paisagem (ruptura de inclinação, mudanças do material parental, mudanças na vegetação...).

O modelo contínuo fornece uma outra abordagem para o estudo da variabilidade espacial dos solos. Nele, assume-se que as características do solo variam gradualmente através do espaço. Entre as técnicas disponíveis que facilitaram o uso do modelo contínuo, a geoestatística tem sido vista como uma das mais apropriadas para uso na ciência do solo (Voltz & Webster, 1990; Gruyter *et al.*, 1994; Qian & Klinka, 1995; Voltz *et al.*, 1997). Para estudar o aspecto contínuo dos solos, FitzPatrick (1986) recomendou que a cartografia do solo fosse baseada na noção de horizontes, em vez do perfil do solo.

A cartografia do solo por horizontes, apesar de ser baseada no modelo discreto de variação espacial, facilita a percepção do solo em sua aparência real. Esta abordagem possui três vantagens: primeiro, o solo é considerado e visualizado como um corpo tridimensional; segundo, a variabilidade espacial dos horizontes do solo é levada em consideração; terceiro, permite que o padrão de superposição dos horizontes do solo seja analisado. Essas vantagens têm sido discutidas por diversos autores (Boulet *et al.*, 1982 a e b; Boulet *et al.*, 1989; Girard, 1983; Girard, 1989; Girard *et al.*, 1989; King, 1986; Pedro, 1989; Ruellan *et al.*, 1989). Até agora, a cartografia do solo por horizontes foi aplicada principalmente

para alguns solos tropicais ou aos solos cujos horizontes são claramente diferenciados (Bocquier, 1973). Além disso, a tecnologia de SIG facilitou extremamente a visualização 3-D dos solos, como um continuum.

Técnicas de visualização em 3-D têm sido recentemente desenvolvidas no campo da geologia (Bouzelboudjen & Kimmeier, 1998; Houding, 1994). Em contraste, na ciência de solo este tipo de representação encontra-se ainda em seus primórdios (Ameskamp, 1997; Benz, 1995; Heijs *et al.*, 1996; Pereira & FitzPatrick, 1998).

Em solos aluviais, a seqüência dos horizontes em uma dada posição, é o resultado do processo de sedimentação e da pedogênese *in situ*; esses dois processos sobrepõem-se, mas predominam as características herdadas do material originário (Gerrard, 1992; Santos *et al.*, 1997a). Esta ausência de características genéticas nos solos, combinada com a variabilidade horizontal e vertical da configuração textural dos solos aluviais, não pode ser corretamente descrita pelo método tradicional, baseado em perfis diagnósticos (Finkl, 1980; Gerrard, 1992). Uma abordagem por horizontes parece descrever melhor a complexidade e a variabilidade espacial desses solos.

O objetivo deste trabalho, foi propor uma estrutura metodológica para a cartografia 3-D dos solos, em ambiente SIG, a fim de mapear e estudar a variabilidade e o padrão de distribuição espacial dos horizontes do solo em um ecossistema aluvial, e representar o solo como um continuum em três dimensões.

A pesquisa foi realizada lançando-se mão de algumas funções existentes nos softwares de SIG e adicionando-se algumas aplicações desenvolvidas especificamente para a cartografia de solos por horizontes. A aplicação da metodologia aos solos de um ecossistema aluvial é justificada pelo fato desses solos apresentarem uma grande variabilidade espacial (lateral e vertical), devido ao processo de herança de materiais depositados pelo rio, o que não pode ser revelado pela abordagem clássica de mapeamento de solos.

Material e Métodos

A área de estudo, um ecossistema aluvial, situado a aproximadamente 750m acima do nível do mar, ao longo do rio Sarine na Suíça (Figura 1). A área onde a metodologia foi aplicada mede cerca de 1ha. Uma descrição detalhada do local foi anteriormente publicada em outros trabalhos de Santos *et al.*, (1997a e b).

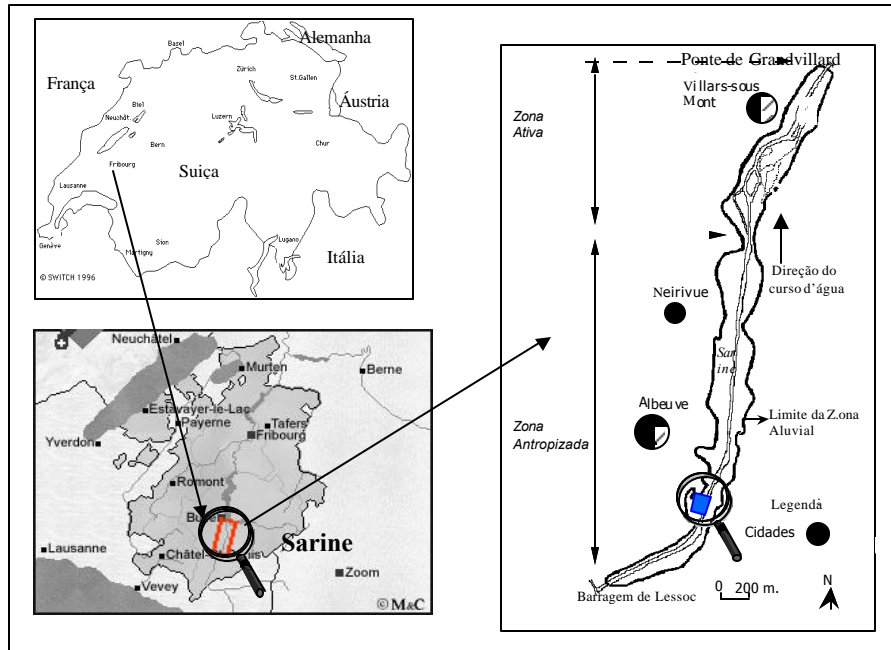


Fig. 1. Localização da área de estudo.

Para o desenvolvimento da metodologia, usou-se funções preexistentes nos softwares de SIG (ARC/info e Vertical Mapper para MapInfo), com aplicações especificamente desenvolvidas para a cartografia por horizontes. A Figura 2 ilustra as três partes principais da metodologia desenvolvida em ambiente SIG: aquisição de dados, modelagem do relevo e cartografia dos solos por horizontes.

Aquisição de dados

Um total de 181 pontos foram amostrados e descritos, usando-se tradagens pedológicas. A amostragem foi feita numa grade regular (5 metros no sentido EW e 10 metros no sentido SN). As seguintes propriedades foram levantadas para cada ponto: profundidade total do solo (o limite inferior foi o horizonte D = camada pedregosa com seixos calcários, sobre o qual o solo foi formado), número dos horizontes, espessura e textura de cada horizonte (textura determinada em campo). Além dessas propriedades, foram ainda determinadas para o horizonte superficial (topsoil):

- teor de matéria orgânica, determinado por combustão a 600° C;
- presença ou ausência de material grosseiro - cascalho e seixos (< 2mm);
- estrutura do solo - classe, grau e tipo -, de acordo com Soil Survey Staff (1999); e
- presença dos carbonatos, detectada no campo pela efervescência do HCl.

A nomenclatura dos horizontes foi realizada de acordo com o “Référentiel Pédologique 1995” da Associação Francesa para o Estudo do Solo (Association Française pour l’ Étude du Sol, 1995), mas outros sistemas, a exemplo do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999) poderiam ter sido utilizados, ou mesmo apenas uma denominação simplificada dos horizontes, como 1, 2, 3... Como complemento à nomenclatura da A.F.E.S., a textura dos horizontes e a estrutura do horizonte superficial também foram usadas para a classificação dos diferentes horizontes em solos aluviais. A fim de poder construir a modelagem dos solos, uma imposição da ordem dos horizontes foi assumida, com base dados levantados em campo. Os seguintes horizontes

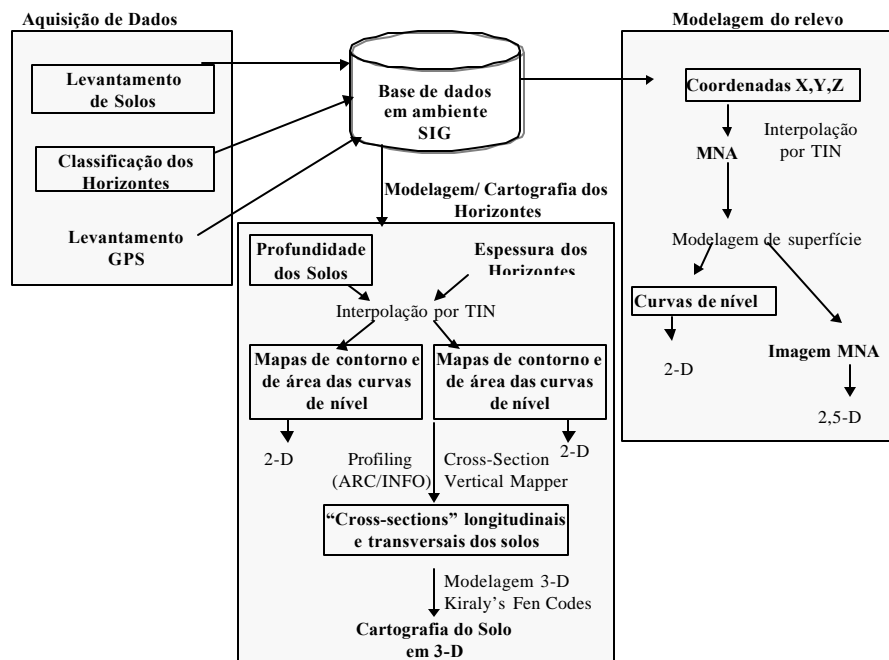


Fig. 2. Representação esquemática das etapas do procedimento metodológico.

foram encontrados nos solos analisados e nomeados de acordo com a A.F.E.S. (Association Française pour l' Étude du Sol, 1995):

Aca = "horizonte A calcário" - horizonte organo-mineral, biomacro-estruturado, apresentando efervescência generalizada ao HCl (> 5% de CaCO₃ abaixo de 5cm de profundidade);

Jp = "horizonte Jovem de profundidade" - horizonte "atípico" ou jovem, pouco diferenciado, seja por causa de uma evolução pedogenética insuficiente, seja porque um outro fator da pedogênese esteja ausente ou bloqueie a evolução. Neste horizonte, os processos de alteração ainda são pouco visíveis, embora já exista uma certa estruturação pedológica. Esta é no entanto, pouco desenvolvida e dependente da granulometria;

M = Substrato móvel ou tenro não ou pouco fragmentado, constituindo uma discontinuidade física ou mecânica do solum. Neste caso particular, correspondem às camadas de areia grosseira depositadas pelo rio e que não sofreram alteração *in situ*.

Com relação à textura dos horizontes, usadas entre parênteses na descrição, os seguintes designativos foram usados: **sl** = "sablo-limoneuse" – textura areno-siltosa; **s** = "sableuse" – textura arenosa; **ls** = "limono-sableuse" – textura silto-arenosa; **l** = "limoneuse" – textura siltosa. Os números romanos II, III e IV junto aos designativos dos horizontes, diz respeito a mesmo horizonte, mas de material de origem diferente.

Um levantamento dos pontos com GPS foi realizado, a fim de determinar as coordenadas (X, Y, Z) de cada ponto onde os solos foram amostrados. Esse levantamento teve uma precisão de 50cm no plano horizontal e de 2cm no vertical. Todos os dados foram armazenados em uma base de dados de SIG (Info de ARC/Info). A Tabela 1 mostra um exemplo da armazenagem desses dados na base (1a) e do cálculo da altitude (Z) do limite inferior de cada horizonte (1b).

Modelagem das formas do relevo

Os dados do levantamento feito por GPS foram interpolados usando-se a interpolação linear TIN (Triangular Irregular Network), a partir do qual um MNA foi construído. Esta técnica permite que a superfície de cada triângulo passe exatamente sobre cada ponto onde as medidas foram tomadas no campo.

De acordo com Bonham-Carter (1994), esta técnica é a mais apropriada para os casos em que os dados tenham uma margem de erro relativamente pequena.

Tabela 1. Organização na base de dados, das informações sobre a espessura dos horizontes (a) e cálculo dos valores da altitude (Z) do limite inferior de cada horizonte (b), com base na espessura.

Coordenadas			Espessura dos Horizontes (cm)												
X (m)	Y (m)	Altitude Z (msm)	Aca	Jp (sl)	M (s)	Jp (ls)	IIJp (sl)	IIM (s)	IJp (ls)	IIIJp (sl)	IIMZ (s)	IVJp (sl)	Jp (l)	IVM (s)	
571161.9315	151168.5340	747.6490	10	15	40	0	0	20	0	0	0	0	15	0	
571156.2130	151170.3250	747.9025	20	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
571151.3005	151171.9975	748.1160	10	0	50	0	0	25	0	0	0	0	15	0	
571146.7775	151173.7245	748.1895	17	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
571142.0255	151175.2765	748.2325	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
571136.9065	151176.7745	748.2280	18	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
571132.5110	151178.0635	748.2470	10	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
571127.7810	151179.7580	748.0235	15	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
571123.0855	151181.1345	747.8785	10	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
571191.0528	151295.9160	746.6770	6	0	22	0	4	18	0	5	7	0	0	0	

Coordenadas			Altitude (Z) do limite inferior dos horizontes (msm)												
X (m)	Y (m)	Altitude (Z) terreno (msm)	Z Aca	Z Jp (sl)	Z M (s)	Z Jp (ls)	Z IIJp (sl)	Z IIM (s)	Z IJp (ls)	Z IIIJp (sl)	Z IIMZ (s)	Z IVJp (sl)	Z Jp (l)	Z IVM (s)	
571161,932	151168,534	747,6490	747,5	747,4	747	747,0	747,0	746,8	746,8	746,8	746,8	746,8	747	746,65	
571156,213	151170,325	747,9025	747,7	747,7	747	747,4	747,4	747,4	747,4	747,4	747,4	747,4	747	747,4	
571151,301	151171,998	748,1160	748,0	748,0	748	747,5	747,5	747,3	747,3	747,27	747,3	747,27	747	747,12	
571146,778	151173,725	748,1895	748,0	748,0	748	748,0	748,0	748,0	748,0	747,99	748	747,99	748	747,99	
571142,026	151175,277	748,2325	748,1	748,1	748	748,1	748,1	748,1	748,1	748,08	748,1	748,08	748	748,08	
571136,907	151176,775	748,2280	748,0	747,8	748	747,8	747,8	747,8	747,8	747,85	747,8	747,85	748	747,85	
571132,511	151178,064	748,2470	748,1	748,1	748	748,0	748,0	748,0	748,0	748	748	748	748	748	
571127,781	151179,758	748,0235	747,9	747,6	748	747,6	747,6	747,6	747,6	747,64	747,6	747,64	748	747,64	
571123,086	151181,135	747,8785	747,8	747,3	747	747,3	747,3	747,3	747,3	747,28	747,3	747,28	747	747,28	
571191,0528	151295,9160	746,6770	746,6	746,6	746,4	746,4	746,4	746,2	746,2	746,1	746,1	746,1	746,1	746,1	

Cartografia dos solos

As características dos dados levantados - grade regular, amostragem densa e medidas com um bom grau de precisão – fizeram com que o uso da técnica de interpolação TIN fosse particularmente apropriada para nosso estudo. A cartografia tridimensional do solo com base nos horizontes, foi realizada de acordo com as etapas seguintes: os valores de Z (altitude) do limite inferior de cada horizonte foram calculados com base no valor de Z da superfície do solo, medidos por GPS e pela espessura do referido horizonte, determinada nas tradagens. Em seguida, esses valores foram interpolados e um algoritmo para o desenho das curvas de nível foi aplicado (em ambiente SIG), criando linhas de mesmo valor de altitude em torno dos pontos de amostragem. Finalmente, mapas em 2 dimensões das curvas de nível e das áreas referentes aos horizontes

(cada um, separadamente, ou da profundidade total dos solos) foram produzidos. Com base nos correspondentes mapas bidimensionais e usando-se o procedimento “profiling” em ARC/Info ou alternativamente, usando o procedimento “cross-section” em Vertical Mapper (MapInfo), seções transversais foram geradas para quaisquer transectos sobre a área de estudo.

Finalmente, o volume do solo como um todo foi modelado, a fim de representar o solo como um contínuo na paisagem. Isto foi conseguido usando um método de elemento finito quadrático, o “Király’s Fen Code” (Király, 1985), especialmente adaptado para esta modelagem dos solos. A rede bidimensional da superfície foi replicada verticalmente para cada horizonte do solo, a fim de se obter uma rede de elementos finitos em três dimensões. Isto significa que cada ponto amostrado é realmente representado por uma borda vertical da rede tridimensional.

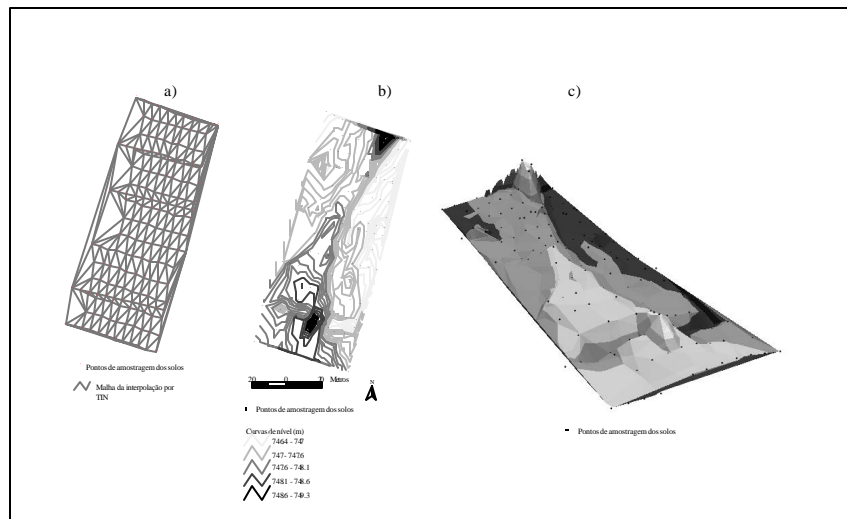
No método de elemento finito, a função desconhecida é calculada a partir de um subconjunto do domínio global, usando funções de interpolação. No presente trabalho, apenas interpolação lineares foram usadas. O modelo global foi discretizado em elementos de 1, 2, ou 3 dimensões. O programa permite o uso de triângulos ou retângulos para elementos de 2 dimensões e de tetraedros, prismas triangulares ou cubos, para os elementos em 3 dimensões. Estes elementos podem submeter-se a deformações futuras adicionais.

O número de formas do elemento, permite uma considerável flexibilidade na concepção de uma rede tridimensional para analisar por exemplo, a água e o transporte de sedimentos em meio altamente heterogêneo (Eisenlohr *et al.*, 1997 a e b). Neste trabalho, a rotina após o processamento do modelo, permite a criação de uma série de planos em seção transversal ou em blocos-diagramas tridimensionais.

Resultados e Discussão

A Figura 3 ilustra as diferentes etapas para a construção do MNA: os pontos de amostragem dos solos e a malha da rede de triangulação, oriunda da interpolação por TIN (3a); as curvas de nível (3b); e o bloco-diagrama do MNA em 2,5 dimensões (3c). O MNA construído desta maneira, permite visualizar diferenças locais na topografia, o que não seria possível com um MNA mais geral (por exemplo, 1:25.000). Na área de estudo, três ambientes se distinguem, em termos de topografia: Uma zona mais elevada, que corresponde a uma antiga ilha

e seu prolongamento, que é facilmente visível na parte central da área de estudo. Uma zona intermediária, situada no lado esquerdo da área de estudo e uma zona mais baixa, constituída de uma depressão e situada no lado direito da área, próxima ao rio (o qual não é mostrado aqui).



- (a) malha resultante do processo de interpolação por TIN que leva em consideração cada ponto onde os solos foram amostrados;
- (b) curvas de nível mostrando os contornos da topografia do terreno;
- (c) bloco-diagrama do MNA em 2,5-D; cor clara = partes mais elevadas do terreno e cor escura = áreas de depressão.

Fig. 3. Modelo Numérico de Altitude (MNA).

A Figura 4 mostra o padrão de distribuição espacial da profundidade dos solos na área de estudo. Os solos mais rasos são encontrados nas áreas mais elevadas, enquanto que os solos mais profundos encontram-se na zona de depressão. A espessura de cada um dos 12 horizontes foi mapeada em 2-D.

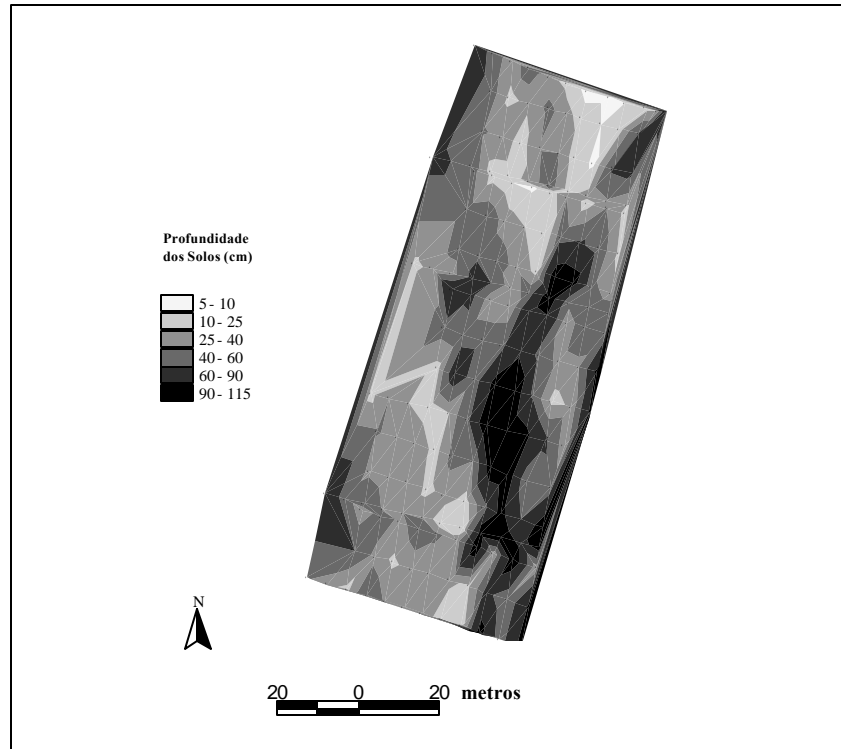


Fig. 4. Mapa da distribuição espacial da profundidade total dos solos

Os mapas da Figura 5 ilustram a variação da espessura dos três primeiros horizontes, Aca, Jp(sl), e M(s). Estes mapas permitem:

- visualizar o padrão de distribuição espacial de cada horizonte e a variação de sua espessura;
- observar a presença ou ausência de um dado horizonte em qualquer ponto do espaço;
- comparar os padrões de distribuição espacial dos diferentes horizontes.

Por exemplo, o primeiro mapa à esquerda (Figura 5), mostra a distribuição espacial do horizonte A (com relação à sua espessura), o qual se encontra presente em toda a área de estudo, enquanto que o último mapa, à direita, mostra a distribuição espacial da espessura do horizonte M (um horizonte arenoso), o qual encontra-se

presente somente em alguns pontos. As áreas brancas nos mapas do centro e da direita representam a ausência dos horizontes em questão.

Estes mapas podem também ser plotados sobre a superfície do MNA, quando se deseja estudar a correlação entre os horizontes e a topografia. Não obstante, na representação em duas dimensões, não é possível a integração simultânea de todos os horizontes do solo. Conseqüentemente, essa representação é insuficiente para fins de estudos pedogenéticos, embora constitua uma etapa indispensável para a construção da representação em três dimensões.

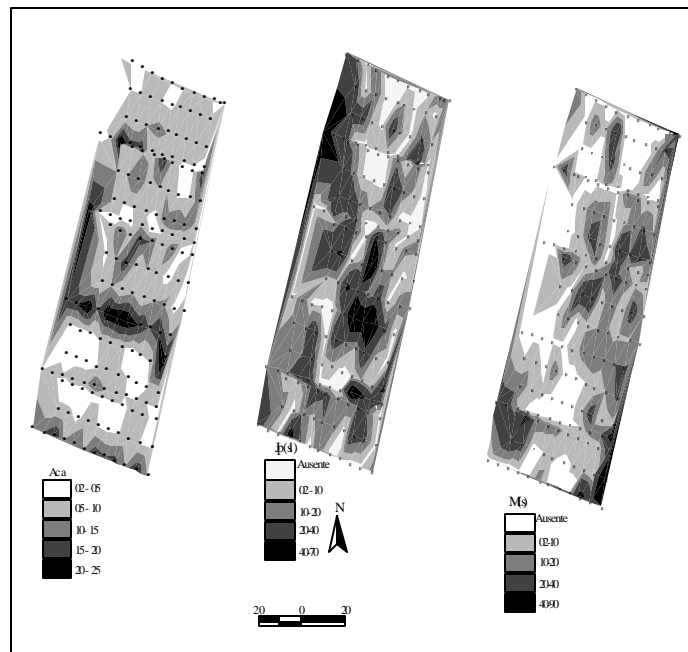


Fig. 5. Mapas da distribuição espacial da espessura dos três primeiros horizontes encontrados.

Alguns resultados obtidos com a abordagem 3-D são ilustrados na Figura 6a e 6b. No canto superior esquerdo, as três “cross-sections” realizadas são mostradas sobre o MNA (duas perpendiculares e uma paralela ao rio). O restante da figura mostra os referidos cortes e como os horizontes se distribuem nessas áreas, tanto horizontalmente, como verticalmente. A legenda ao lado direito das seções indica a

nomenclatura do horizonte. Todos os solos da área de estudo foram classificados como "FLUVIOSOLS typiques calcareous", de acordo com o " Referentiel Pédologique 1995 " (A.F.E.S).

O perfil longitudinal L1, localizado próximo ao leito do rio, inicia-se numa altitude de 748m, cruza toda a área de depressão (com um mínimo de 746m) e termina na antiga ilha (o ponto o mais elevado do local, com mais de 749m de altitude). Mesmo sendo pequena a diferença de elevação (relevo), isto constitui um fator determinante no processo do sedimentação. Há mais horizontes nos solos das posições mais baixas do que nas outras partes. Na extremidade do transect, sobre a antiga ilha, por exemplo, o solo é constituído de apenas um horizonte. A mesma tendência é verificada nas outras cross-sections. Este padrão ilustra claramente a influência da dinâmica do rio na formação desses solos. Os solos com diversos horizontes são formados essencialmente pela deposição de sedimentos aluviais nos braços antigos do rio ou em áreas de depressão próxima ao leito. Em contraste, os solos mais rasos, encontrados nas posições mais elevadas, foram ao longo do tempo, protegidos das inundações.

A presença de um dado horizonte e sua espessura, fornece informações sobre os processos de sedimentação devido a um mesmo evento de inundação. A configuração espacial de um horizonte pode ser explicada, quando relacionada à presença do horizonte (s) subjacente(s), sem qualquer referência à topografia atual. Dessa forma, os processos de sedimentação ficam mais fáceis de serem reconstituídos. Por exemplo, a parte central do perfil longitudinal (L1) demonstra a existência passada de dois setores geomorfológicos distintos, os quais são caracterizados por diferentes seqüências de horizontes sedimentares. Estes setores foram interconectados subseqüentemente pela dinâmica fluvial (presença dos mesmos horizontes) e as variações topográficas passadas foram atenuadas.

Esta abordagem cartográfica é útil para identificar os dois processos que originam os solos aluviais: sedimentação e *pedogenesis in situ*. Como as unidades de solos são muito difíceis de definir e delimitar - porque todos os solos pertencem à mesma classe (FLUVIOSOLS calcareous) e porque eles diferem principalmente no número e na espessura dos horizontes e variam dentro de uma curta distância -, uma abordagem mais clássica seria imprópria.

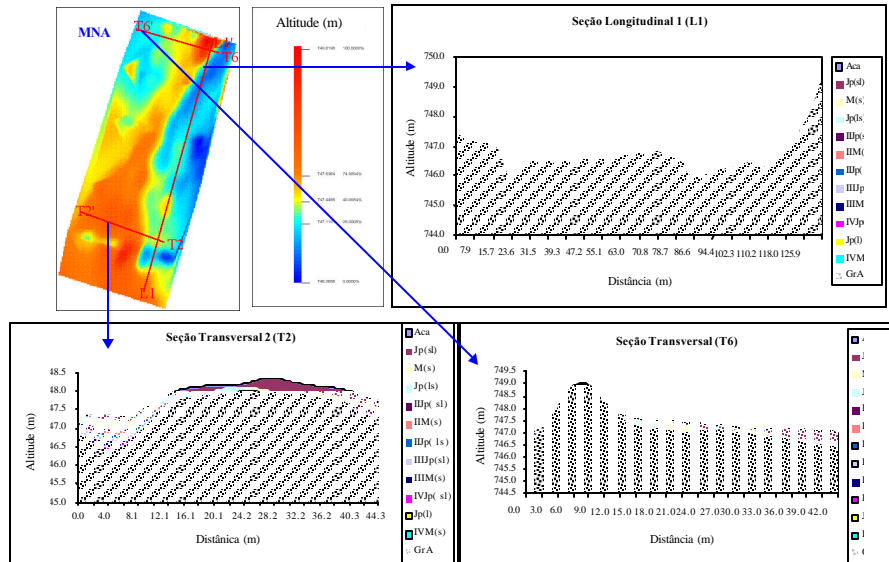


Fig. 6a. MNA com a localização das cross-sections e os correspondentes perfis verticais dos horizontes dos solos.

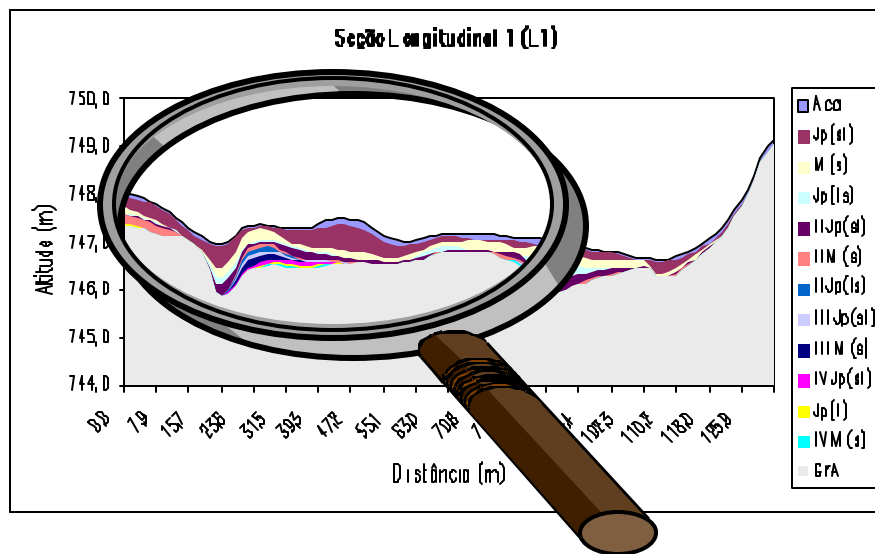
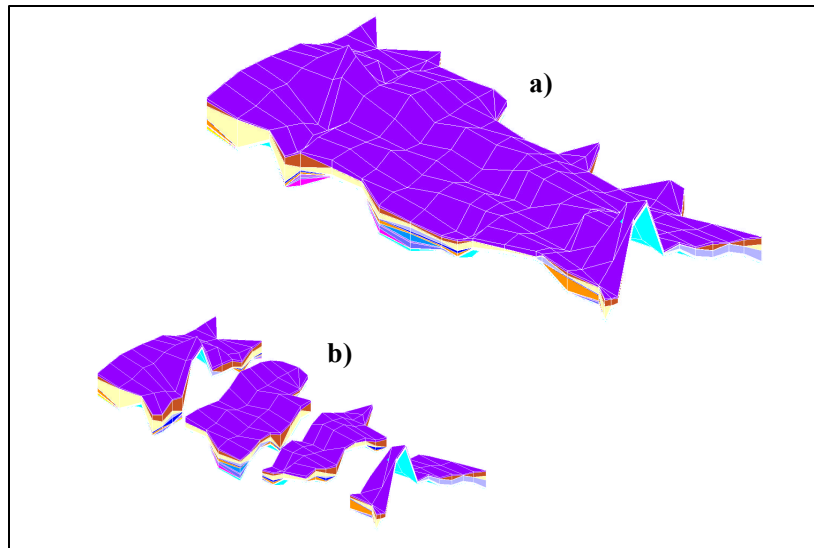


Fig. 6b. Detalhe da distribuição espacial dos horizontes do solo para a seção longitudinal L1.

A representação tridimensional (Figura 7) mostra o solo como um volume no espaço e conserva as vantagens da representação por seção transversal. Contém a mesma informação desta, mas a apresenta em uma visão volumétrica e permite a realização de cortes diversos, seguindo diferentes perspectivas, que podem ser feitos simultaneamente.



Nota: os pontos de cruzamento da malha correspondem aos pontos de amostragem dos solos. (a) a área de estudo como um todo; (b) três cortes transversais.

Fig. 7. Modelagem do solo em 3-D (azimute do sol: N a 60 °; inclinação: 30°; exageração vertical: 10 x).

Conclusões, Limitações e Perspectivas

A cartografia tridimensional com base nos horizontes do solo, desenvolvida em ambiente SIG, oferece numerosas vantagens em comparação com as técnicas mais tradicionais de mapeamento de solos. A única classificação necessária é a definição dos horizontes. Além disso, o uso de SIG permite uma abordagem mais flexível, particularmente com relação ao tipo e ao número de horizontes a serem mapeados e da escolha das cross-sections a serem geradas. Além disso, nossa abordagem cartográfica permite o cálculo de volume dos horizontes. Tal cálculo poderia ser útil às explicações pedogenéticas (intensidade das enchentes que originam um dado depósito aluvial), às propriedades do solo (capacidade de

armazenamento de água ou de poluentes) ou ao planejamento ambiental (extração do material, por exemplo).

A representação tridimensional proposta permite uma visualização facilitada da distribuição e da variabilidade espacial dos solos. A metodologia é particularmente apropriada para o mapeamento de solos com alta variabilidade espacial. Este trabalho demonstrou o papel imprescindível da tecnologia SIG para a ciência do solo, por facilitar a organização e gerência dados e por permitir a espacialização, análise, visualização e mapeamento dos dados de solos, de maneira interativa.

As melhorias futuras desta abordagem metodológica focalizarão no emprego de técnicas de geoestatística, a fim quantificar a variabilidade espacial destes solos e conhecer o erro associado dessa estimativa. Finalmente, nossa cartografia tridimensional em ambiente SIG quando associada a mapas temáticos, constitui-se numa ferramenta de grande utilidade para os sistemas de suporte à decisão usados para o planejamento ambiental.

Referências Bibliográficas

AMESKAMP, M. **Three-dimensional rule-based continuous soil modelling**. 1997. 206 p. PhD Thesis. Christian-Albrechts-Universität, Kiel:

ASSOCIATION FRANÇAISE POUR L'ÉTUDE DU SOL. **Référentiel pédologique**. Paris: INRA Éditions, 1995. 332 p. (AFES. Collection Techniques et Pratiques).

AUBERT, G.; BOULAIN, J. Contributions de certains pédologues français à l'évolution des concepts pédologiques utilisés en cartographie. **Science du Sol**, Versailles, v. 27, n. 4, p. 395-411, 1989.

BAIZE, D. Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. **Science du Sol**, Versailles, v. 24, n. 3, p. 227-243, 1986.

BENZ, R. **Essai d'approche tridimensionnelle de la couverture pédologique**: application à trois stations d'étude dans la région du col du Marchairuz (Haut-Jura Vaudois). Univ. Neuchâtel, Institut de Botanique, Laboratoire d'Ecologie Végétale, Neuchâtel, 1995.

BOCQUIER, G. **Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad**. Interprétation biogéodynamique. Paris: ORSTOM, 1973. v. 62, 350 p.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 398 p.

BOULET, R., HUMBEL, F. X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et cartographie en pédologie II. **Cahiers ORSTOM**, Série Pedologie, Paris, v. 19, n. 4, p. 323-339, 1982a.

BOULET, R., CHAUVEL, A., HUMBEL, F. X.; LUCAS, Y. Analyse structurale et cartographie en pédologie I. **Cahiers ORSTOM**, Série Pedologie, Paris, v. 19, n. 4, p. 309-321, 1982b.

BOULET, R., CURMI, P., PELLEGRIN, J.; QUEIROZ NETO, J. P. Distribution spatiale des horizons dans un versant: apport de l'analyse de leurs relations géométriques. **Science du Sol**, Versailles, v. 27, n. 1, p. 53-56, 1989.

BOUZELBOUDJEN, M.; KIMMEIER, F. GIS vector and raster database, advanced geostatistics and 3-D groundwater flow modelling in strongly heterogeneous geologic media : an integrated approach. **In: ANNUAL ESRI USER CONFERENCE. 18.**, 1998, San Diego. [**Proceedings**]... ESRI, 1998.

EISENLOHR, L., KIRÁLY, L., BOUZELBOUDJEN, M.; ROSSIER, Y. Numerical simulation as a tool for controlling the interpretation of karst spring hydrographs. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 193, p. 306-315, 1997a.

EISENLOHR, L., BOUZELBOUDJEN, M., KIRÁLY, L.; ROSSIER, Y. Numeric versus hydrological and statistical modelling of natural response of a karst hydrogeological system. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 202, p. 244-262, 1997b.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

FINKL, C. W. J. Stratigraphic principles and practices as related to soil mantles. **Catena**, Cremlingen, v. 7, p. 169-194, 1980.

FITZPATRICK, E. A. **Soils: their formation, classification and distribution**. Essex: Longman, 1986. 353 p.

GERRARD, J. **Soil geomorphology: an integration of pedology and geomorphology**. London: Chapman & Hall, 1992. 296p

GIRARD, M. C. **Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique**: Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne. Paris: Département des Sols - Institut National Agronomique Paris-Grignon, 1983. 430 p.

GIRARD, M. C. La cartographie en horizons. **Science du Sol**, Versailles, v. 27, n. 1, p. 41-44, 1989.

GIRARD, M. C., AUROUSSEAU, P., KING, D.; LEGROS, J. P. Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. **Science du Sol**, Versailles, v. 27, n. 4, p. 335-350, 1989.

- GRUYTER, J. J. de; WEBSTER, R. ; MYERS, D. E. (ed.). **Pedometrics 92: developments in spatial statistics for soil science: [proceedings]...** Amsterdam: Elsevier, 1994. 325 p. *Geoderma*, Amsterdam, v. 62, n. 1/3, 1994. Special Issue.
- HEIJS, A. W. J., RITSEMA, C. J.; DEKKER, L. W. Three-dimensional visualization of preferential flow patterns in two soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 70, n. 2/4, p. 101-116, 1996.
- HOUDING, S. W. **3D Geoscience modeling: Computer Techniques for Geological.** Springer, 1994. 309 p.
- KING, D. **Modélisation cartographique du comportement des sols.** Paris, 1986. 243 p.
- KIRÁLY, L. **FEM 301 - a three dimensional model for groundwater flow simulation.** Baden, 1985. 96 p. (NAGRA Technical Report 84-49)
- LAGACHERIE, P., LEGROS, J. P.; BURROUGH, P. A. A soil survey procedure using the knowledge on soil pattern of a previously mapped reference area. **Geoderma**, Amsterdam, v. 65, n. 3/4, p. 283-301, 1995.
- LARK, R. M.; BECKETT, P. H. T. A geostatistical descriptor of the spatial distribution of soil classes, and its use in predicting the purity of possible soil map units. **Geoderma**, Amsterdam, v. 83, n. 3/4, p. 243-267, 1998.
- PEDRO, G. L'approche spatiale en pédologie: fondement de la connaissance des sols dans le milieu naturel - réflexions liminaires. **Science du Sol**, Versailles, v. 27, n. 4, p. 287-300, 1989.
- PEREIRA, V.; FITZPATRICK, E. A. Three-dimensional representation of tubular horizons in sandy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 81, p. 259-303, 1998.
- QIAN, H.; KLINKA, K. Spatial variability of humus forms in some coastal forest ecosystems of British Columbia. **Annales des Sciences Forestières**, Paris, v. 52, n. 4, p. 653-666, 1995.
- RUELLAN, A., DOSSO, M.; FRITSCH, E. L'analyse structurale de la couverture

pédologique. **Science du Sol**, Versailles, v. 27, n. 4, p. 319-334, 1989.

SANTOS, M. L. M. , GUENAT, C., THEVOZ, C., BUREAU, F.; VEDY J. C. Impacts of embanking on the soil-vegetation relationships in a floodplain ecosystem of a pre-alpine river. **Global Ecology and Biogeography Letters**, Oxford, v. 6, p. 339-348, 1997a.

SANTOS, M. L. M., GUENAT, C., THEVOZ, C.; BUREAU F. Modifications d'une zone alluviale suite à l'endiguement. approche méthodologique. **Géomorphologie: relief, processus , environnement**, Paris, v. 4, p. 365-374, 1997b.

SOIL SURVEY STAFF . **Soil taxonomy**: a basic system of soil classification of making and interpreting soil surveys. 2.ed. Washington, D.C.: USDA-Natural Resources Conservation Service, 1999. 869 p.

VOLTZ, M., LAGACHERIE, P.; LOUCHART, X. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 48, p. 19-30, 1997.

VOLTZ, M.; WEBSTER, R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, p. 473-490, 1990.



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Solos
Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
R. Jardim Botânico, 1.024 CEP 22460-000 Rio de Janeiro, RJ
Telefone(OXX-21) 2274-4999 Fax (OXX-21) 2274-5291
<http://www.cnps.embrapa.br>*

Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento

