

INTERPOLAÇÃO QUALITATIVA DE DADOS ESPACIAIS

Qualitative interpolation of spatial data

ANDREA LOPES IESCHECK¹

CLAUDIA ROBBI SLUTER²

RICARDO NORBERTO AYUP-ZOUAIN¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Laboratório de Modelagem de Bacias, Instituto de Geociências

andrea.iescheck@ufrgs.br; ricardo.ayup@ufrgs.br

²Universidade Federal do Paraná

Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas

robbi@ufpr.br

RESUMO

O presente trabalho trata da interpolação qualitativa de dados espaciais, os quais, por sua natureza e importância, são parte fundamental no processo de análise espacial de fenômenos naturais. Os dados qualitativos utilizados nesta pesquisa são referentes à cor dos solos, que foram definidas a partir da descrição morfológica das amostras coletadas em campo. A metodologia adotada compreende as seguintes etapas: aquisição dos dados; interpolação qualitativa dos dados; representação e visualização do fenômeno. Os resultados obtidos com o procedimento proposto para interpolação qualitativa do atributo cor permitem a visualização e a representação da variação dessa propriedade morfológica no domínio espacial da região de estudo.

Palavras chaves: Interpolação qualitativa; Modelagem de dados espaciais; Visualização cartográfica.

ABSTRACT

This paper is on qualitative interpolation of spatial data. By considering the nature and magnitude of such data, they are very important in the spatial analysis process of natural phenomena. Qualitative data used in this research is related to soil color defined from morphological description of field-collected samples. The methodology was established through the followed steps: data acquisition; qualitative interpolation; phenomenon representation and visualization. The outcomes got from such procedure concerning the qualitative interpolation of the attribute color allow visualizing and representing the spatial variation of this morphological property.

Keywords: Qualitative interpolation; Spatial data modeling; Visualization.

1. INTRODUÇÃO

O entendimento de fenômenos naturais depende de informações confiáveis e detalhadas que descrevam a distribuição espacial de diversos elementos a eles relacionados. Tais fenômenos se desenvolvem no domínio multidimensional e, em geral, são contínuos, de caráter dinâmico (variam nas três dimensões do espaço e ao longo do tempo) e sua distribuição espacial não é uniforme (GRUNWALD e BARAK, 2003).

O delineamento espacial das propriedades dos fenômenos e de suas variações, realizado a partir de conjuntos de dados representativos, permite extrair informações científicas relevantes. Porém, a modelagem de fenômenos naturais, em sua maioria, requer não somente a análise e processamento de dados numéricos, com coordenadas espaciais precisamente determinadas, mas também - e muitas vezes principalmente - a interpretação e a análise de variáveis qualitativas.

Nesse contexto, a representação do conhecimento sobre o meio diz respeito à representação e ao raciocínio acerca dos ambientes dentro dos quais operam agentes inteligentes (GALTON e HOOD, 2004). Segundo estes autores, entender um ambiente é ter o domínio de um modelo estruturado no qual feições importantes são destacadas e suas inter-relações mútuas são disponibilizadas para realização de inferências.

Considere-se que as características dos fenômenos são definidas em função dos dados que se dispõem para análise e representação destes fenômenos. Estes dados, provenientes de diversas fontes, com diferentes dimensionalidades e de naturezas distintas, devem, portanto, ser processados, interpretados e representados.

A dimensionalidade dos fenômenos é definida em função das características espaciais que serão representadas. Com base nas suas dimensões, o comportamento espacial dos fenômenos pode ser caracterizado como adimensional, no caso de feições pontuais; unidimensional, para feições lineares; bidimensional, quando se trata de feições de área; ou tridimensional, para feições volumétricas. A multidimensionalidade pode incorporar a variável tempo, para traduzir o dinamismo dos fenômenos (representação espaço-temporal tridimensional), ou n atributos adicionais.

Para agregar significado e valor ao processo de conhecimento do fenômeno em estudo, os dados devem ser traduzidos para um formato que possibilite sua manipulação e seu processamento. Tanto os dados espaciais como os métodos para analisá-los podem ser qualitativos ou quantitativos, sendo que as características dos dados determinam os possíveis métodos de análise.

A interpolação qualitativa desenvolvida neste trabalho, pressupõe a transformação do elemento qualificado em dado, ou seja, existe uma mudança que está representada de forma que se substituem as “palavras por números”. Portanto, é necessário codificar o dado para que seja passível de tratamento matemático e,

conforme exposto por BERNARD (1996), a decisão sobre os temas ou códigos é um ato qualitativo na condução de um estudo particular, guiado por intuição e experiência sobre o que é importante e o que não é. Pode-se considerar assim, concordando com o referido autor, que após codificar a informação o tratamento matemático é uma questão de processamento de dados seguida pela análise dos resultados.

Considerando a avaliação de solos, o conhecimento da estrutura complexa do fenômeno se dá a partir de critérios qualitativos, vinculados às suas propriedades morfológicas, e quantitativos relativos às suas propriedades químicas, físicas e biológicas. Conforme exposto por KIEHL (1979), os solos se apresentam com horizontes diferenciados pelas suas características e propriedades. A sucessão dos horizontes de um solo da superfície até a rocha é denominada de perfil do solo. A partir da caracterização morfológica do perfil do solo e das amostras dos horizontes (análises físicas e químicas), pode-se identificar e classificar os solos. Na descrição morfológica de um perfil se observa: espessura, arranjo e número de horizontes; transição entre horizontes; **cor**; textura; estrutura, dentre outros elementos (LEMOS e SANTOS, 1984).

Este trabalho trata das questões relacionadas à modelagem de dados espaciais. Principalmente no que se refere à análise e ao processamento de dados qualitativos que, por sua natureza e importância, são fundamentais para o conhecimento da estrutura complexa dos fenômenos. A metodologia de trabalho adotada compreende desde a aquisição dos dados até a interpolação qualitativa e a visualização destes dados. A partir dos resultados obtidos é possível visualizar e representar a variação espacial da propriedade qualitativa referente às cores dos solos. A interpolação qualitativa de dados espaciais é justamente o que diferencia esta pesquisa da maioria dos trabalhos que se encontram publicados na literatura especializada, pois estes tratam de proposições matemáticas, estatísticas e metodológicas para a geração de superfícies com dados quantitativos. Na pesquisa bibliográfica aqui realizada encontrou-se apenas um artigo, GALTON e HOOD (2004), tratando desta problemática.

2. INTERPOLAÇÃO

A maioria dos fenômenos naturais envolvendo a pedologia, a geologia e a geofísica, dentre outros, tem propriedades que variam em todas as dimensões do espaço. Normalmente, informações sobre as propriedades destes fenômenos são obtidas de maneira discreta, a partir de um número limitado de medidas pontuais realizadas em campo. Os dados resultantes destas coletas, após análises e descrições, devem ser estendidos por toda a região para representar a geometria espacial contínua das estruturas e as características que configuram o fenômeno. Isto pode ser feito através de modelos matemáticos pelo processo de interpolação. A interpolação é um método ou uma função matemática que estima valores em locais onde não existem valores medidos.

Partindo-se de uma visão ampla e geral, o conceito que norteia a base teórica da interpolação espacial é a similaridade. Nessa linha de raciocínio, os valores de pontos próximos no espaço têm maior probabilidade de serem parecidos do que os pontos que estão mais afastados (*Tobler's Law of Geography*). A interpolação espacial, portanto, assume que os atributos dos dados são contínuos e espacialmente dependentes. Estas considerações permitem o desenvolvimento dos métodos de interpolação espacial.

A formulação geral do problema da interpolação espacial, segundo MITAS e MITASOVA (1999), pode ser definida da seguinte maneira: dados n valores de um fenômeno em estudo w_j , $j = 1, \dots, n$, medidos em pontos discretos $r_j = (x_j^{[1]}, x_j^{[2]}, \dots, x_j^{[d]})$, $j = 1, \dots, n$, dentro de uma determinada região do espaço d-dimensional, encontrar a função $F(r)$ com d variáveis que passa pelos pontos dados, ou seja, que atenda à condição:

$$F(r_j) = w_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

Os dados utilizados nesta pesquisa se enquadram no caso 4-dimensional, onde se tem d em R^3 , de forma que as coordenadas (x, y, z) determinam a posição da variável no espaço e w representa o atributo cor em cada ponto. Assim:

$$r_j = (x_j^{[1]}, x_j^{[2]}, x_j^{[3]}) \Rightarrow r_j = (x_j, y_j, z_j) \quad (2)$$

$$F(r_j) = w_j \Rightarrow F(x_j, y_j, z_j) = w_j$$

Para visualização no plano das cores dos solos nos diferentes horizontes, os dados foram reduzidos para o caso tridimensional, onde se tem d em R^2 . Dessa forma, a partir da coordenada z, identifica-se o horizonte do solo ao qual o ponto pertence, as coordenadas (x, y) definem sua posição no plano e o atributo w representa a cor do solo neste ponto, portanto:

$$r_j = (x_j^{[1]}, x_j^{[2]}) \Rightarrow r_j = (x_j, y_j) \quad (3)$$

$$F(r_j) = w_j \Rightarrow F(x_j, y_j) = w_j$$

Como existem diversas funções que atendem aos requisitos estabelecidos pela formulação geral do problema da interpolação espacial, algumas condições adicionais devem ser impostas para definir qual método de interpolação adotar. A escolha destas condições adicionais depende da característica do fenômeno a ser modelado e do tipo de aplicação. Algumas condições podem ser baseadas em conceitos geoestatísticos (*krigagem*), na localização (vizinho mais próximo), na suavidade e tensão (*splines*), ou em funções (polinomiais, multi-quádricas) (MITAS e MITASOVA, 1999).

Existe uma variedade de métodos desenvolvidos para interpolação de dados quantitativos, mas para dados qualitativos a interpolação é um procedimento mais complexo pela própria natureza do dado. A dificuldade está no estabelecimento de

um modelo matemático que descreva o comportamento do fenômeno ou variável qualitativa em questão.

GALTON e HOOD (2004) apresentam dois métodos para interpolação de dados qualitativos, a partir da consideração de que algumas características do meio podem ser representadas por fluentes espaciais, ou seja, por funções que relacionam valores com localizações no espaço. Segundo estes autores, os processos de interpolação e extrapolação são formas de raciocínio não monotônico e os princípios reguladores de tal raciocínio no domínio espacial são a continuidade e a pertinência, aplicados a fenômenos contínuos e discretos, respectivamente.

O raciocínio não monotônico faz uso de axiomas e regras de inferência para permitir o raciocínio de conhecimentos incompletos, porém de raciocínio lógico na forma de redes de representação das informações. O raciocínio monotônico ocorre quando se processa informações estáticas, ou seja, durante o processo de resolução do problema o estado dos fatos - verdadeiro ou falso - permanece constante (ARAGÃO, 2000).

A interpolação para fluentes espaciais discretos, de acordo com GALTON e HOOD (2004), pode ser formulada da seguinte maneira:

- dada uma função espacial F que define a localização espacial de pontos discretos representativos de um conjunto $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ de n atributos qualitativos de um determinado fenômeno;
- impõe-se a condição de adjacência mútua a F , ou seja, para qualquer valor $w_i, w_j \in W$, uma região sobre a qual $F=w_i$ deve ser adjacente a outra região na qual $F=w_j$.

Para aplicar o raciocínio não monotônico a esta função, utiliza-se o princípio da pertinência espacial da seguinte maneira: supondo que o valor de w na posição r_1 é conhecido, $F(r_1) = w$, e considerando que r_2 é uma outra posição, então, a não ser que haja alguma barreira que impeça a propagação do valor de w entre r_1 e r_2 , assume-se que $F(r_2) = w$ por *default* (GALTON e HOOD, 2004).

As soluções apresentadas por GALTON e HOOD (2004), denominadas de método da projeção e de método da projeção modificado, utilizam regras baseadas na localização para estabelecer a pertinência espacial. Em outras palavras, usam a interpolação por métodos locais de vizinhança. Nos métodos locais de vizinhança, o valor do fenômeno nos pontos não amostrados é calculado por funções cujos coeficientes são definidos a partir de pontos situados dentro de uma região de interesse (MITAS e MITASOVA, 1999). O valor da superfície $F(r)$ em um determinado ponto é representado como uma função linear, ponderada em relação aos valores dos dados próximos a este ponto. Assim:

$$F(r) = p_i \cdot w_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

Onde:

n é o número de pontos próximos;

p_i peso atribuído aos pontos

A diferença entre os interpoladores locais está na maneira como se selecionam os pontos para o cálculo da função e na forma como são atribuídos os pesos aos valores dos dados nestes pontos (OKABE et al., 1998). No método de interpolação pelo inverso da distância ponderada, o valor do fenômeno em um ponto não amostrado é dado pelo valor da média ponderada, em função das distâncias aos pontos situados dentro de um raio definido, ou a partir de um determinado número de pontos, e os pesos são inversamente proporcionais à distância entre o ponto a ser amostrado e as amostras (MITAS e MITASOVA, 1999). Na interpolação pelo vizinho mais próximo, a seleção do ponto que será utilizado para estimar o valor do fenômeno no ponto não amostrado é feita com base no vizinho mais próximo, ou seja, para cada ponto é atribuído o valor da amostra mais próxima a este ponto.

Como se trata de interpolação qualitativa é necessário adotar o método do vizinho mais próximo, pois assume-se que existem regiões do solo nas quais o atributo cor se mantém constante. Neste método, mantêm-se os valores das amostras, ou seja, das cores dos solos, sem gerar valores intermediários. Contudo, é exigido um nível de densidade espacial das amostras que possibilite a determinação das transições entre as regiões caracterizadas pela variação entre diferentes cores dos solos. As informações coletadas, totalizando 231 amostras para cada horizonte do solo, distribuídas sobre uma área de 23 ha, permitem assumir que a densidade espacial das amostras apresenta robustez suficiente para a interpolação qualitativa do atributo cor.

3. METODOLOGIA

Os procedimentos realizados para interpolação qualitativa e visualização das cores dos solos estão esquematizados na figura 1. A primeira etapa do trabalho trata da aquisição de dados e envolve o levantamento planialtimétrico para geração da base topográfica da área de estudo, a implantação da malha de amostragem, a coleta dos monólitos e a descrição morfológica destes monólitos. De posse dos dados ocorre a segunda fase relativa à organização e à codificação dos dados. Após esta etapa, realizou-se a interpolação qualitativa destes dados para representação do atributo cor por toda a área de estudo, e a visualização das cores dos solos para cada horizonte.

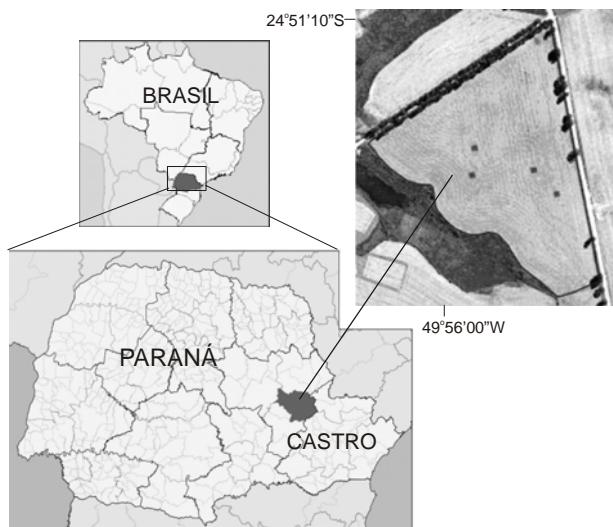
3.1 Área de Estudo

A área utilizada no desenvolvimento desta pesquisa localiza-se no município de Castro, Estado do Paraná, a 140 km de Curitiba, na região do Segundo Planalto Paranaense (figura 2). O talhão selecionado para condução dos trabalhos abrange uma área de 21,5 hectares e está situado no Centro de Treinamento da Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária. Este talhão apresenta um relevo suave ondulado, é caracterizado por diferentes tipos de solos e seu uso é para atividade agrícola com plantio direto.

Figura 1 – Etapas do desenvolvimento da pesquisa



Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo



3.2 Aquisição de Dados

O processo de obtenção dos dados se deu a partir da geração da base cartográfica digital da área de estudo. Esta base foi elaborada por meio de levantamento topográfico, utilizando estação total Leika TC403 (precisão angular de 10"). Para caracterização detalhada do relevo local, o levantamento foi executado com precisão e grau de detalhamento compatível à representação por curvas de nível, com equidistância vertical de 20 cm. Com o objetivo de compatibilizar este novo levantamento com a base digital já existente no sistema da Fundação ABC, utilizou-se o sistema de projeção UTM e o sistema geodésico de referência SAD-69 (*South American Datum – 1969*).

A associação do levantamento ao SAD-69 foi feita por rastreio de satélites do sistema GPS, a partir de dois pontos materializados próximos à área de estudo. Os dados provenientes do rastreamento foram processados tendo por base o ponto da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) da UFPR (Universidade Federal do Paraná), em Curitiba. A ausência de RN (referência de nível) próxima ao local levantado inviabilizou o transporte da altimetria por nivelamento. Para adequação da referência altimétrica ao SAD-69, fez-se a correção da ondulação do geóide nos pontos provenientes do rastreamento. Utilizou-se para tanto o Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal desenvolvido pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e pela EPUSP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo), MAPGEO2004, versão 2.0 (IBGE, 2005). Tal sistema permite obter a ondulação geoidal (N) em um ponto, ou conjunto de pontos, referida aos sistemas SIRGAS-2000 e SAD-69, a partir do Modelo de Ondulação Geoidal (IBGE - EPUSP), com resolução de 10' de arco.

As coordenadas dos dois pontos de referência foram transformadas em coordenadas UTM e, a partir destes pontos, aplicando as devidas reduções lineares e angulares nas observações terrestres topográficas, procedeu-se ao transporte de coordenadas. Após o levantamento da área de estudo e também por transporte de coordenadas, fez-se a locação de uma malha de pontos para coleta dos monólitos, materializada no terreno por meio de estacas de madeira devidamente identificadas, totalizando 261 pontos. Esta malha de amostragem foi distribuída regularmente sobre a área, com espaçamento de 30 em 30 metros, acrescida de pontos nos limites do talhão.

A amostragem dos monólitos foi executada com trado tubular acoplado a um trator e foram utilizados tubos de PVC com 10 cm de diâmetro e 120 cm de comprimento. Dos 261 pontos materializados foram coletados 255 monólitos, dos quais foram aproveitados 231 (figura 3), sendo os demais descartados por problemas de identificação.

Após coleta em campo, procedeu-se à descrição morfológica do material correspondente aos 231 monólitos. Esta descrição foi realizada por um pedólogo e as características morfológicas dos solos observadas foram: horizontes, cor e

estrutura (tipo, classe e grau). O solo é caracterizado por uma série de camadas dispostas horizontalmente (horizontes) que acompanham a configuração da superfície e portanto, inicialmente, fez-se a identificação dos horizontes e suas subdivisões, e foram medidas as profundidades de cada subdivisão. A figura 4 mostra um exemplo de monólito, com a identificação dos horizontes Ap, AB, BA e Bw e suas respectivas profundidades. Em seguida, determinou-se a cor dos solos, por comparação entre a amostra coletada e a referência padronizada na carta de Munsell, e foi descrita a estrutura quanto ao seu tipo, classe e grau, para cada horizonte individualmente. A cor correspondente à amostra por horizonte obtida da carta de cores de Munsell é anotada na seqüência matiz, valor (luminosidade) e saturação, por exemplo, a notação 5YR 4/4 significa que 5YR é o matiz, 4 é o valor da cor e 4 é a sua saturação.

Figura 3 – Malha de amostragem

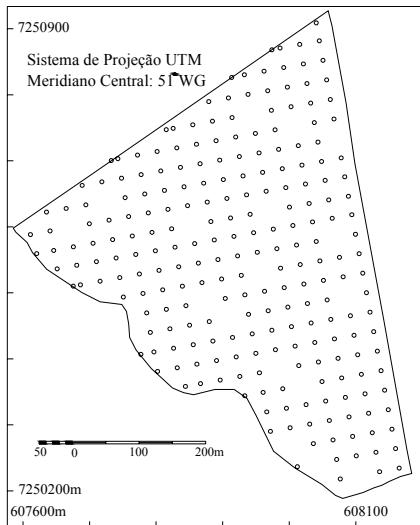
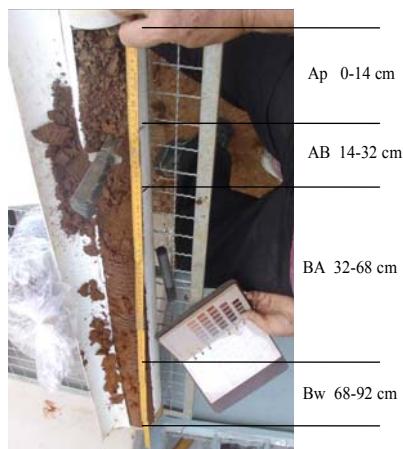


Figura 4 – Horizontes e profundidades



3.3 Aplicação e Resultados

Os dados tridimensionais das propriedades dos solos foram obtidos de maneira discreta, a partir de amostras pontuais medidas em campo. Estes dados, provenientes da descrição morfológica, são de natureza qualitativa e representam as propriedades morfológicas dos solos para cada horizonte. A forma discretizada de sua aquisição estabelece a necessidade de interpolação como um condicionante para a representação da variação do fenômeno no domínio espacial.

Neste trabalho, os dados qualitativos utilizados são referentes à cor do solo. Verificando que não há uma barreira que impeça a propagação do valor deste

atributo entre as amostras, adotou-se a solução proposta por GALTON e HOOD (2004) no método da projeção, onde são utilizadas regras baseadas na localização para estabelecer a pertinência espacial. A grande densidade da amostragem para a área de 21,5 ha garante a robustez das informações coletadas e define o mapeamento detalhado das cores dos solos, sem a necessidade de gerar valores intermediários.

A representação bidimensional gerada utiliza os polígonos de Voronoi para definir as extensões das cores dos solos, de maneira contínua, para toda a região de estudo. De acordo com BURROUGH e McDONNELL (1998), os polígonos de Voronoi fazem com que a região fique totalmente definida pela distribuição dos pontos amostrados. Em torno de cada ponto é construído um polígono convexo, de forma que dois polígonos contíguos possuam somente uma aresta em comum, definindo a área de domínio de cada cor. Desta forma, o referido princípio considerado através do polígono de Voronoi pode ser matematicamente definido da seguinte maneira: seja um número finito de n pontos $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, no plano Euclidiano, com $2 \leq n < \infty$. O plano pode ser particionado de modo que cada ponto esteja associado ao elemento de P mais próximo de si. O conjunto dos pontos associados ao local p_i constitui o polígono de Voronoi de p_i , denotado $V(p_i)$. Este polígono é, portanto, o lugar geométrico dos pontos no plano que estão mais próximos de p_i do que de qualquer outro elemento de P (FELGUEIRAS, 2001), ou seja:

$$V(p_i) = \{x | d(p_i - x) \leq d(p_j - x) \text{ para } j \neq i\} \quad (5)$$

Para proceder à interpolação qualitativa do atributo cor foi necessário a transformação do elemento qualificado em dado, por meio de uma codificação, tornando-o passível de tratamento matemático. Adotou-se uma codificação mnemônica de forma que, ao se consultar o atributo diretamente sobre a representação criada, é possível identificar, por associação, a designação da cor correspondente no sistema de Munsell. Nessa codificação, a identificação do matiz por letras foi eliminada, uma vez que todos os pontos têm matiz YR, e os valores do matiz, do valor e da saturação foram multiplicados por dez. Assim, por exemplo, a cor 10YR3/3 foi codificada como 100,3030, a cor 7,5YR4/2 como 75,4020, a cor 5YR2/5 como 50,2050 e, dessa forma, para as demais cores.

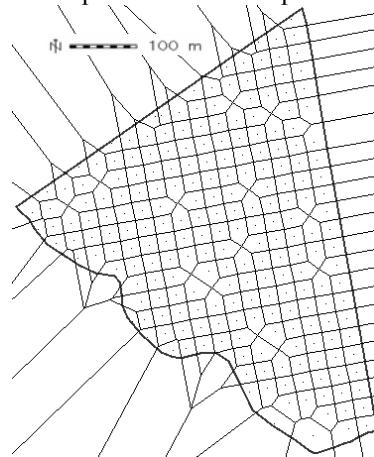
Após o processo de codificação das cores, realizou-se a interpolação pelo vizinho mais próximo para gerar os polígonos de Voronoi (figura 5). Para cada horizonte do solo, individualmente, a área foi dividida em polígonos de Voronoi e cada polígono recebeu o valor correspondente ao valor do ponto em seu interior, ou seja, a cor do solo correspondente àquele ponto. Neste procedimento foram utilizados os algoritmos de interpolação implementados no programa GRASS GIS (versão 6.1 cvs, para o ambiente Linux). O GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*) é um programa computacional para Sistemas de

Informações Geográficas, de domínio público e de código aberto, com estrutura de dados aberta, documentado e organizado como bibliotecas de funções (GRASS GIS, 2006).

Como as cores dos solos foram obtidas no sistema de Munsell, para representação computacional destas cores foi necessário transformá-las para o sistema RGB. O sistema de Munsell é um modelo orientado ao usuário, baseado em como se percebe a cor, e o sistema RGB é um modelo orientado ao hardware, relacionado com a produção de cores das telas de computadores (SLOCUM, 1999). No sistema RGB a cor é definida por um triângulo que corresponde ao comprimento de onda de cada uma das três cores primárias da luz (vermelho, verde e azul). Para transformação do sistema de Munsell para o sistema RGB, utilizou-se o programa *Munsell Conversion*, versão 4.01 (COLORPRO, 2004).

Os códigos das cores dos pontos no sistema de Munsell foram associados aos triângulos de cores correspondentes no sistema RGB. O arquivo criado com esta associação foi utilizado como arquivo de cores no programa GRASS GIS, de forma que cada ponto, para cada horizonte, é representado pela sua cor definida em campo conforme referência padronizada na carta de Munsell. Os tipos de horizontes e suas subdivisões foram delimitados na descrição morfológica dos 231 monólitos. Os horizontes Ap, AB e BA apareceram sucessivamente sobrepostos em toda a área de estudo e, abaixo do horizonte AB, observaram-se as ocorrências dos horizontes Bw e Bi.

Figura 5 – Extensão dos dados pontuais discretos para áreas - Polígonos de Voronoi



Com os dados morfológicos das cores dos solos foram geradas representações que mostram a distribuição deste atributo de acordo com o sistema de Munsell. Na área de estudo foram observadas 64 cores distintas distribuídas nos horizontes Ap, AB, BA e Bw/Bi. A figura 6 apresenta as cores dos solos para o horizonte Ap, onde

se pode observar a ocorrência de 26 cores distintas. No horizonte AB e BA foram observadas 27 cores diferentes para cada um destes horizontes (figuras 7 e 8). E nos horizontes Bw/Bi aparecem 31 cores, como pode ser visto na figura 9.

Nos mapas dos horizontes Ap, AB, BA e Bw/Bi, figuras 6, 7, 8 e 9, respectivamente, foram mantidas todas as cores correspondentes às diferenças observadas nos solos da área de estudo. Estas representações mostram os resultados das interpolações qualitativas por polígonos de Voronoi, de forma que possibilitam o conhecimento da variação espacial das cores dos solos conforme obtidas na amostragem em campo. As análises visuais destes mapas permitem as seguintes conclusões:

- a predominância do matiz 5YR, já conhecida do resultado das análises de campo, mostrou-se também visualmente predominante em todos os horizontes e distribuído por toda a área de estudo;
- a predominância espacial do matiz 5YR tem como consequência a ocorrência de vizinhanças espaciais com os demais matizes;
- é possível também observar que as cores com baixo nível de saturação são dominantes.

Figura 6 – Cores do solo para o horizonte Ap

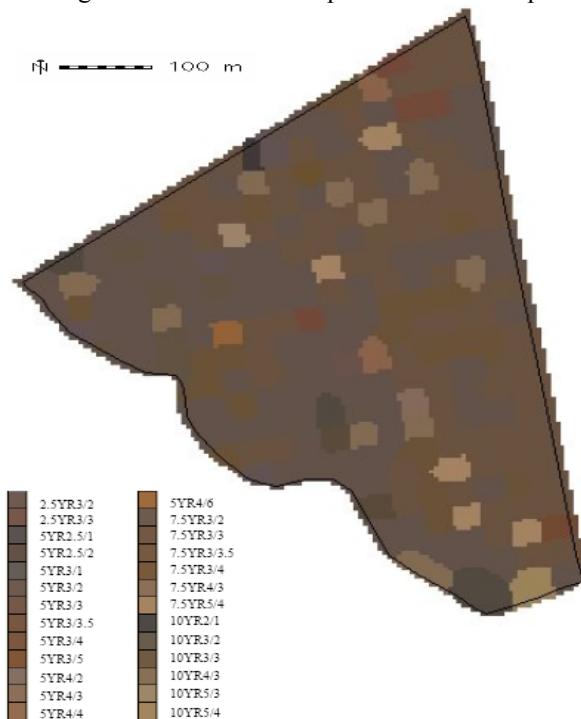
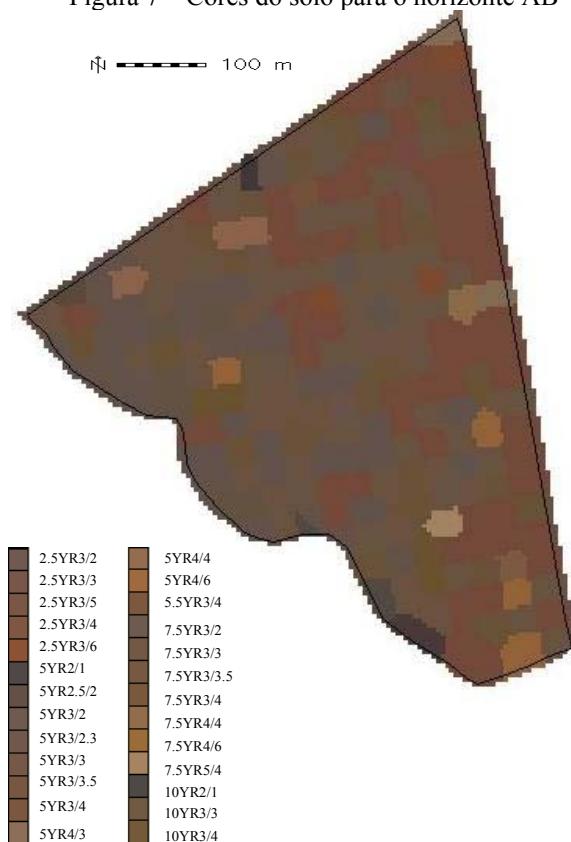
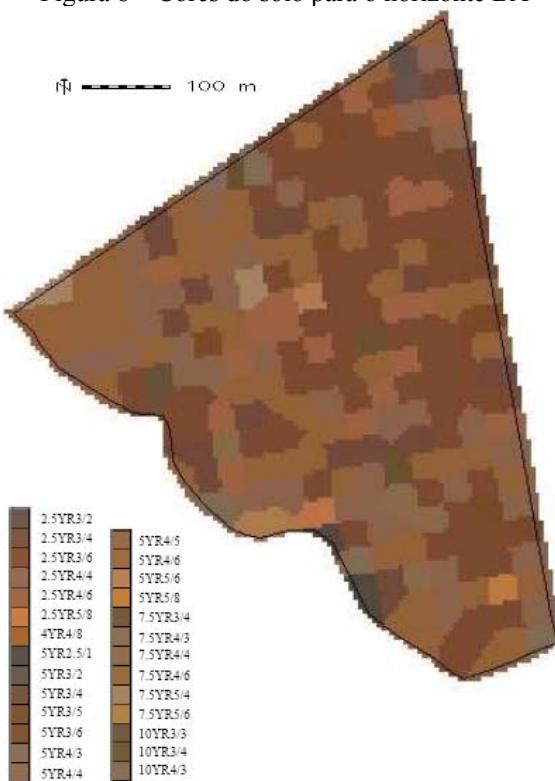


Figura 7 – Cores do solo para o horizonte AB



A partir da análise visual das cores para o horizonte Ap (figura 6), podem-se identificar duas regiões predominantes, abrangendo aproximadamente a mesma área, e definidas pela percepção de duas cores distintas as quais estão delimitadas na figura 10. A região apresentada na figura 10a é vista como cinza devido ao baixo nível de saturação, variando entre 1 e 2, e valor de cor variando entre 2,5 e 3. E a região apresentada na figura 10b é vista como marrom escuro, pois apresenta um nível de saturação mais alto (3 ou 3,5) e valor de cor igual a 3. Este tipo de análise permite identificar as cores dominantes para cada horizonte.

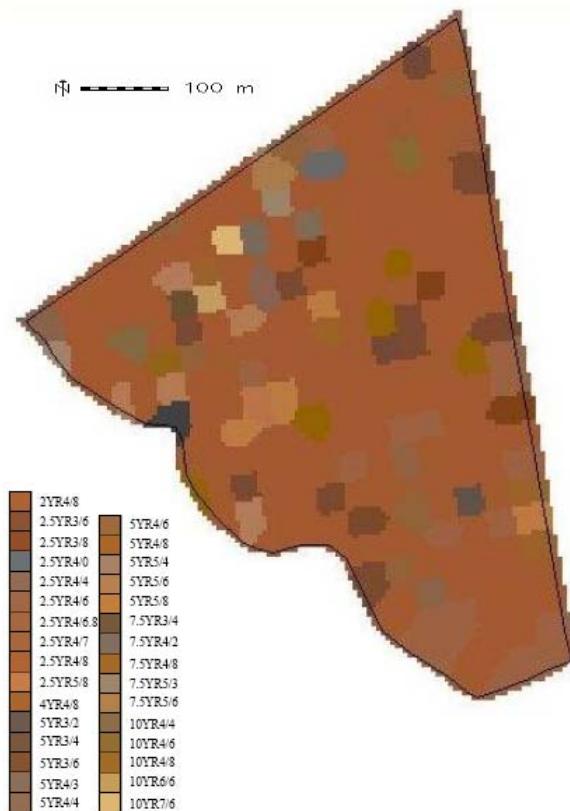
Figura 8 – Cores do solo para o horizonte BA



Foram descritas 64 cores na área de estudo e, por uma limitação inata do ser humano, não é possível a percepção visual de mais do que 8 ou 9 diferentes cores. Isto explica a dificuldade de se discriminar visualmente as ocorrências de todos os matizes. Para construir os mapas temáticos correspondentes às variações do atributo cor, deve-se reduzir o número de classes, mantendo os padrões das variações espaciais dos diferentes solos. Dessa forma, para o horizonte Ap, a região vista como cinza é composta por polígonos de Voronoi com as seguintes cores de Munsell: 5YR 3/2 ; 2,5 YR 3/2 ; 5 YR 3/1 ; 5 YR 3/1 ; 5 YR 2,5/1 ; 7,5 YR 3/2 ; 10 YR 3/2; que podem ser representadas como uma única classe apresentada com a cor 5 YR 3/2. E a região vista como marrom é composta por polígonos de Voronoi com as seguintes cores de Munsell: 5YR 3/3 ; 2,5 YR 3/3 ; 5 YR 3/5 ; 5 YR 3/3,5 ; 7,5 YR 3/3; 7,5 YR 3/3,5; 10 YR 3/3; e pode ser representada como uma única classe apresentada com a cor 5 YR 3/3. A comparação das figuras 6 e 10 mostra que a redução de classes não altera o resultado de nossa percepção visual. As regiões

representadas como homogêneas na figura 10, são vistas como homogêneas, em relação ao atributo cor, na figura 6.

Figura 9 – Cores do solo para o horizonte Bw e Bi



Estas são soluções possíveis para a representação cartográfica voltada às análises espaciais. As cores 5YR 3/2 e 5YR 3/3 são sugeridas para a simbologia do mapa temático para a representação das cores do solo no horizonte AB. Na legenda que apresenta a simbologia e as correspondentes classes, todas as cores dos solos acima listadas devem estar relacionadas a estas duas classes, como mostra a figura 11. A mesma solução pode ser aplicada às demais cores do horizonte AB, bem como aos demais horizontes do solo.

Figura 10 – Regiões com predominância de cores

a - cinza

b - marrom escuro



Figura 11 – Legenda das regiões com predominância de cores



5YR 3/2 ; 2,5 YR 3/2 ; 5 YR 3/1 ; 5 YR 3/1 ; 5 YR
2,5/1 ; 7,5 YR 3/2 ; 10 YR 3/2



5YR 3/3 ; 2,5 YR 3/3 ; 5 YR 3/5 ; 5 YR 3/3,5 ; 7,5
YR 3/3; 7,5 YR 3/3,5; 10 YR 3/3

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem de fenômenos naturais e de suas variações envolve a análise de dados de natureza qualitativa e quantitativa, bem como a representação computacional de conceitos, por vezes abstratos, oriundos do domínio do conhecimento especializado. A interpolação qualitativa de dados espaciais é um procedimento complexo. Na bibliografia disponível, o tema é pesquisado no contexto da inteligência artificial, com base na aplicação do raciocínio não

monotônico no domínio espacial, lógica *fuzzy*, simulação baseada em conhecimento, estatística multivariada, dentre outros. Há, no entanto, uma escassez de publicações nesse assunto.

Em cartografia de solos, a cor é usada como uma variável visual para representação taxonômica dos solos em mapas pedológicos. As cores são dados de natureza qualitativa, obtidos na descrição morfológica das amostras, que caracterizam a composição do solo.

O procedimento proposto para interpolação do atributo cor foi um resultado importante do trabalho. Tal procedimento permite que a variação dessa propriedade morfológica seja visualizada e representada na região de estudo. A transformação dos dados pontuais em polígonos representativos do domínio espacial de cada ponto delimitou a área de abrangência de cada cor. A representação estende o valor medido no ponto para uma área de abrangência limitada pelos polígonos de Voronoi. Na solução adotada, a área de abrangência é delimitada pela distribuição das amostras e está diretamente relacionada com o espaçamento da malha de amostragem. Com a malha de amostragem espaçada em 30 m para coleta dos monólitos, fica definido o mapeamento detalhado das cores dos solos na escala 1:10.000. Além disso, a associação dos arquivos dos polígonos aos triplets RGB, permite a representação das cores conforme definidas no sistema de Munsell para visualização em representações cartográficas bidimensionais.

REFERÊNCIAS

- ARAGÃO, F. E. F. *Raciocínio e decisão usando LEI*. Fortaleza. 97 p. Dissertação de Mestrado. Mestrado em Ciência da Computação, Universidade Federal do Ceará, 2000.
- BERNARD, H. R. *Qualitative data, quantitative analysis*. In: CAM, The Cultural Anthropology Methods Journal, v. 8, n. 1. Florida. 1996.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press, 1998. 333 p.
- COLORPRO. *Munsell Conversion Program*. Disponível em: <<http://www.colorpro.com/info/software/munsell.htm>>. Acesso em abril de 2002.
- FELGUEIRAS, C. A. *Modelagem numérica de terreno*. In: Fundamentos de geoprocessamento. INPE. Livro on-line. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br>>. Acesso em março de 2001.
- GALTON, A.; HOOD, J. *Qualitative interpolation for environmental knowledge representation*. In: ECAI 2004. European Conference on Artificial Intelligence. R. López de Mántaras and L. Saitta Eds., IOS Press, p. 1017-1018, 2004.
- GRASS GIS. *Geographic Resources Analysis Support System*. Disponível em: <<http://grass.itc.it>>. Acesso em março de 2006.
- GRUNWALD, S.; BARAK, P. *3D geographic reconstruction and visualization techniques applied to land resource management*. In: Transactions in GIS, vol. 7, n. 2, p. 231-241, 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal - MAPGEO2004*. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtml>. Acesso em maio de 2005.

KIEHL, E. J. *Manual de edafologia. Relações solo-planta*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda., 1979. 262 p.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Comissão de Método de Trabalho de Campo. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. 2 ed. Campinas, 1984. 46 p.

MITAS, L.; MITASOVA, H. *Spatial interpolation*. In: *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*. Eds. P. Longley et al., Wiley, 1999. p. 481-492.

OKABE, A. et al. *Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams*. West Sussex, England: John Wiley & Sons. 2. ed. 1998. 671 p.

SLOCUM, T. A. *Thematic cartography and visualization*. Upper-Saddle River, Nova Jersey: Prentice-Hall, 1999. 293p.

(Recebido em abril/08. Aceito em dezembro/08)