

CODIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NAS BORDAS DE MAPAS DE SOLO E USO DA TERRA UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Aurélio Azevedo BARRETO-NETO ¹ & Carlos Roberto de SOUZA FILHO ²

(1) Coordenação de Saneamento Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santos (CEFETES). Avenida Vitória, 1729 – Jucutuquara. CEP 29040-333. Vitória, ES. Endereço eletrônico: aurelio@cefetes.br

(2) Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Universidade Estadual de Campinas, Cidade Universitária “Zeferino Vaz” – Barão Geraldo. CEP 13083-870. Campinas, SP. Endereço eletrônico: beto@ige.unicamp.br

Introdução
Área de Estudo
Teoria *Fuzzy*
Conjunto *Fuzzy*
Variáveis Linguísticas
Sistema Baseado em Regras *Fuzzy*
Materiais e Métodos
Representação Digital do Uso da Terra
Representação Digital dos Solos
A Linguagem PCRaster
Construção do Conversor de Bordas Boleana para Bordas *Fuzzy*
Representação do Solo por Conjunto *Fuzzy*
Representação da Cobertura Vegetal por Conjunto *Fuzzy*
Discussão dos Resultados
Conclusões
Referências Bibliográficas

RESUMO – Recursos naturais, tais como solo e vegetação, são delimitados cartograficamente por polígonos. Entretanto, observações realizadas no campo demonstram que esses elementos da paisagem apresentam uma variação contínua no espaço, o que torna incoerente a sua delimitação utilizando linhas exatas. Essa visão determinística na concepção de mapas é ainda um paradigma das Geociências. Com o intuito de estudar uma alternativa mais realista para a representação cartográfica desses temas, neste artigo foi desenvolvido um método computacional para incorporação da lógica *fuzzy* a mapas booleanos. Os mapas digitais booleanos, de solos e vegetação, foram codificados para incorporarem atributos nas zonas de transição entre unidades de solo e vegetação, a partir de rotinas computacionais escritas com a linguagem de modelagem ambiental PCRaster. O método computacional desenvolvido possibilitou a geração de representação digital *fuzzy*, de forma simples, para aplicação em trabalhos de modelagem utilizando SIG.

Palavras chave: lógica *fuzzy*, PCRaster, bordas de mapas.

ABSTRACT – A.A. Barreto-Neto & C.R. de Souza Filho - *Uncertainty coding on landuse and soil boundaries using fuzzy set*. Natural landscape features, such as soil and vegetation, are represented by polygons in thematic maps. However, observations accomplished in the field demonstrated that these landscape elements present a continuous spatial variation that makes its depiction by exact lines rather incoherent. Such distortion in the conception of maps is yet a paradigm in Geosciences. Considering the need for a more realistic alternative for the cartographic representation of such themes, a computer routine based on fuzzy logic was here developed to convert crisp (Boolean) maps into fuzzy sets, using the PCRaster Environmental Modelling Language. Boolean maps of vegetation and soil types were decoded into fuzzy sets allowing the mathematical modeling of transition zones among geo-objects, where imprecision and/or uncertainties were dealt with consequently. The new digital fuzzy representations yielded in the process are tailored for modeling and spatial analysis of natural phenomena in Geographical Information Systems.

Keywords: fuzzy logic, PCRaster, map boundaries.

INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, a representação de elementos da paisagem tais como solos, geologia, vegetação e uso da terra, são delimitados cartograficamente, em mapas bi-dimensionais, por polígonos, ou seja, esses elementos são representados como objetos exatos ou geo-objetos (Burrough, 1996).

Essa forma de representação, extremamente abrupta entre geo-objetos, deve ser considerada como uma aproximação e uma simplificação de um padrão de variação bem mais complexo. Embora as variações

nas bordas sejam mais representativas que as variações no interior do polígono (Lagacherie et al., 1996), no mundo real, raramente essas bordas representam os fenômenos naturais. Em algumas situações, tais bordas são mais facilmente reconhecidas, uma vez que estão associadas à mudanças significativas e abruptas nos valores das propriedades observadas em pequenas distâncias. Essas variações podem ser extraídas a partir de observações na paisagem, tais como situações nas quais as bordas estão localizadas nas margens de

rios, em modificações da geologia (ex.: intrusões, falhas, fraturas) ou associadas com abruptas variações do relevo (Burrough, 1986). Além dessas situações de exceção, as bordas nos mapas estão associadas a dúvidas, inerentes ao objeto ou fenômeno identificado, e a incertezas, causadas por limitações de observações (Hadzilacos, 1996).

Zadeh (1965) desenvolveu a teoria dos conjuntos *fuzzy* permitindo assim a modelagem matemática em zonas de imprecisão e incerteza. A teoria dos conjuntos *fuzzy*, que é uma generalização da teoria clássica dos conjuntos, tem como característica a atribuição de uma função de pertinência a um conjunto de dados. A teoria dos conjuntos *fuzzy* é adequada quando é necessário descrever ambigüidades, incertezas e imprecisões em modelos matemáticos ou modelos conceituais de fenômenos empíricos (Kandel, 1986).

Muitos trabalhos têm demonstrado a capacidade da lógica *fuzzy* na modelagem de fenômenos espaciais. Burrough et al. (1992), utilizando classificação *fuzzy*, identificaram um número superior de áreas disponíveis para agricultura do que as identificadas pela classificação booleana. McBratney & Odeh (1997) apresentaram algumas aplicações da teoria dos conjuntos *fuzzy* nas ciências dos solos, tais como: mapeamento e classificação numérica; avaliação do uso; modelagem e simulação de processos físicos; variograma e krigagem *fuzzy* de variáveis; análise de imagem digital; medidas de fenômenos definidos de forma imprecisa e índice de qualidade dos solos. Os autores ainda ressaltam que muitos outros conceitos e sistemas de solos podem ser modelados, simulados e copiados com a ajuda dos sistemas *fuzzy*. Odeh et al. (1992)

identificaram classes de solo com amostras obtidas de dois perfis, utilizando o classificador *Fuzzy-c-means*. McBratney & De Gruijter (1992), utilizando a técnica *Fuzzy-k-means*, geraram classes de solos que refletem as principais feições pedológicas de forma contínua, em uma área de 4800 ha na Holanda. Barreto-Neto (2004), Barreto-Neto & Souza Filho (2008) adaptaram a lógica *fuzzy* ao modelo hidrológico da Curva Número encontrando, com o modelo *fuzzy*, valores de escoamento superficial mais próximos dos dados medidos em campo.

Estudos relacionados aos fenômenos naturais têm demonstrado que a utilização da lógica booleana aos geo-objetos é muitas vezes inadequada para um melhor entendimento das interações ocorridas no meio ambiente (Burrough, 1986). O mapeamento de unidades de solo, de vegetação, declividade de terrenos e uso da terra, não apresentam, em todo o espaço geográfico, limites precisos e abruptos (Burrough, 1986; 1989). Entretanto, os mapeamentos de solo, vegetação e geologia não apresentam nenhuma descrição indicadora da variação existente nas bordas dos geo-objetos na grande totalidade dos mapas publicados, indicando assim que essas bordas são extremamente abruptas, o que é uma negligência em relação à realidade (Lagacherie et al., 1996).

Considerando a importância dessa representação mais realista entre bordas de geo-objetos, esse trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um método para a geração de bordas *fuzzy* em mapas booleanos utilizando a Linguagem de Modelagem Ambiental (LMA) PCRaster (Wesseling et al., 1996), que é uma linguagem computacional associada a um sistema de informações geográficas.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a bacia hidrológica do Rio Quilombo, localizada no vale do Ribeira, porção sul do Estado de São Paulo, Brasil (Figura 1). A

cobertura vegetal da área é composta, em sua maior parte, por florestas e pastagens e apresenta quatro tipos distintos de solos.

TEORIA FUZZY

Teoricamente, um conjunto *fuzzy* A , do conjunto universo X , onde os elementos x estão definidos, é representado pelo mapeamento de uma função de pertinência $\mu_A(x)$ na qual é atribuído a cada x um valor no intervalo de $[0,1]$ (Zadeh, 1965). Estes conjuntos são utilizados para descrever incertezas e imprecisões e podem ser aplicados em várias áreas do conhecimento.

Um conjunto *fuzzy* A é um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{x, \mu_A(x)\} \text{ para todo } x \in X \quad (1)$$

A função de pertinência $\mu_A(x)$ define um valor entre 0 e 1 para cada ponto (x) no espaço de entrada, com x pertencendo ao conjunto universo X . Na prática a equação 1 é escrita da seguinte forma:

$$A = \{x_1, \mu_A(x_1); x_2, \mu_A(x_2); \dots; x_n, \mu_A(x_n)\} \quad (2)$$

As operações básicas realizadas entre conjuntos *fuzzy* são uma generalização das operações utilizadas

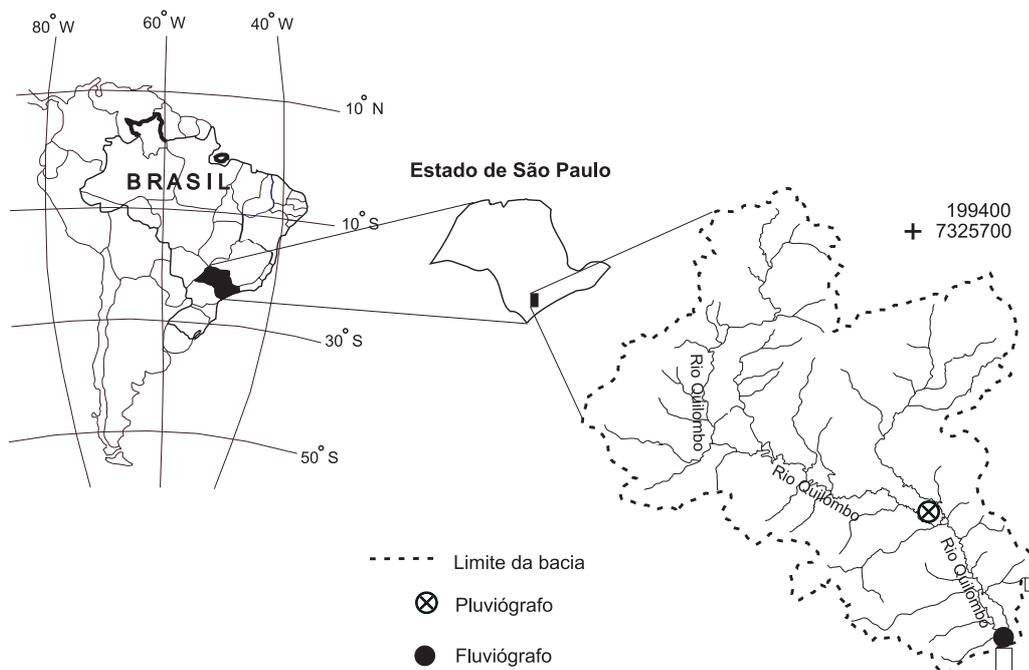


FIGURA 1. Mapa de localização da área de estudo.

na teoria clássica dos conjuntos (conjuntos booleanos). Maiores detalhes de todas estas operações podem ser encontradas, por exemplo, em Pedrycz & Gomide (1998), Kendel (1986) e Zimmermann (1985).

VARIÁVEIS LINGÜÍSTICAS

O ser humano, devido a sua grande capacidade para sumarizar informações, pode manipular, representar e gerenciar dados vagos e cheios de incertezas, como os termos utilizados na linguagem natural (ex. “alto”, “bom”, “denso”, “pobre”), de forma muito eficiente. Esses termos podem ser representados e processados por computador utilizando uma forma numérica através dos conjuntos *fuzzy* e, posteriormente, serem utilizados para descrever diferentes fenômenos (Kandel et al., 1996).

As regras *fuzzy* utilizam as variáveis lingüísticas como forma de representação do conhecimento. Estas regras podem ser utilizadas quando uma função explícita é impraticável ou difícil de ser definida, derivada ou calibrada. Os termos da linguagem natural podem apresentar maior especificação através do uso de modificadores lingüísticos. Estes modificadores podem resultar em uma descrição mais precisa ou mais imprecisa (Bardossy & Duckstein, 1995). Alguns exemplos destes modificadores são: “muito”, “freqüentemente”, “pouco”, “raramente” e “não”.

SISTEMA BASEADO EM REGRAS FUZZY

As regras proporcionam uma forma de represen-

tação de diretivas e estratégias, sendo freqüentemente apropriadas quando o domínio do conhecimento resulta de experiências ou associações empíricas (Pedrycz & Gomide, 1998). Nos sistemas de regras *fuzzy*, as variáveis do sistema são variáveis lingüísticas ou números difusos.

A regra *fuzzy* consiste de um conjunto de argumentos $A_{i,k}$ na forma de conjuntos *fuzzy* com funções de pertinência $\mu_{A_{i,k}}$, e um conseqüente B_i , também na forma de conjunto *fuzzy*, tal como:

$$\text{Se } a_1 \text{ é } A_{i,1} \otimes a_2 \text{ é } A_{i,2} \otimes \dots \otimes a_k \text{ é } A_{i,k} \\ \text{Então } B_i \quad (3)$$

onde a_k são variáveis que descrevem o processo e o operador \otimes representa os operadores lógicos AND ou OR ou XOR (Bardossy & Duckstein, 1995).

Regras verbais são freqüentemente convertidas em regras *fuzzy* utilizando variáveis lingüísticas. A seguir é apresentado um exemplo de regra que pode ser utilizada em uma modelagem hidrológica.

“Se o solo possui alta capacidade de infiltração e a cobertura vegetal é floresta densa, então baixo valor de escoamento superficial”.

Na regra descrita acima como exemplo, o conjunto *fuzzy* $A_{i,1}$ representa a infiltração. A variável lingüística “alta capacidade de infiltração” pode ser caracterizada por um conjunto *fuzzy*, tal como um mapa de solo *fuzzy*. O conjunto *fuzzy* $A_{i,2}$ “floresta densa”, o qual representa uma característica da cobertura vegetal, pode ser caracterizado por funções de pertinência.

MATERIAIS E MÉTODOS

REPRESENTAÇÃO DIGITAL DO USO DA TERRA

A representação digital do uso da terra foi obtida pela aplicação do índice de vegetação *Leaf Pigment Index* (LPI) (Almeida & Souza Filho, 2004), adaptado para imagens do sensor ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (Abrams, 2000; Souza Filho, 2003), com o objetivo de se obter uma representação da superfície contínua associado à cobertura vegetal da área em estudo (Figura 2). O índice de vegetação LPI é obtido pela equação:

$$LPI = (ASTER1)^2 / (ASTER2) \quad (4)$$

onde *ASTER1* é a banda 1 (0.52-0.60µm – verde) e *ASTER2* é a banda 2 (0.63-0.69µm – vermelho) do sensor ASTER.

Outros índices de vegetação tais como, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse et al., 1974) e *Moisture Stress Index* (MSI) (Rock et al., 1986) foram testados, sendo que o LPI foi o que melhor representou a cobertura vegetal da área em estudo, quando os resultados foram confrontados com as observações realizadas em campo.

O mapa gerado com o LPI foi convertido para o formato ASCII, compatível com a LMA PCRaster.

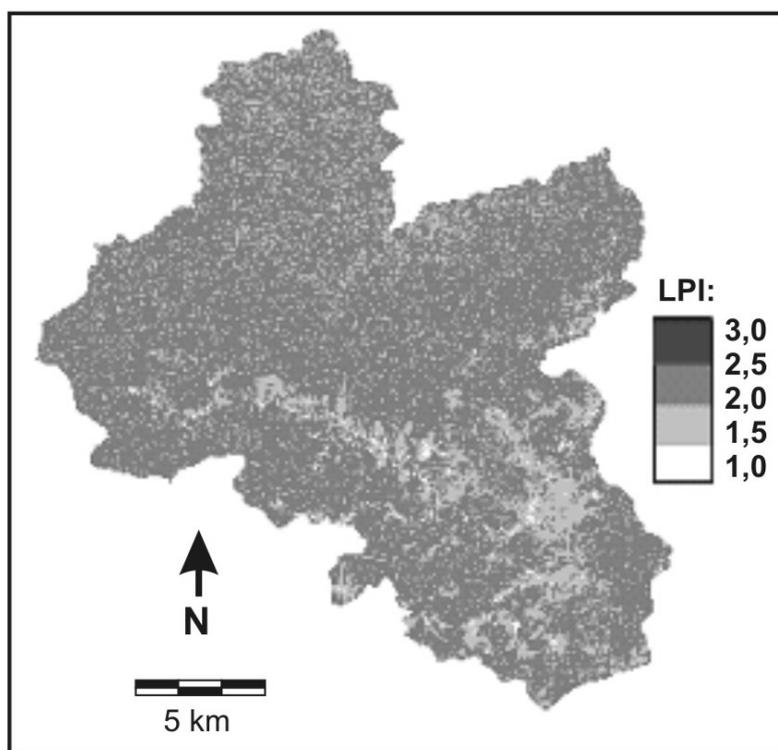


FIGURA 2. Mapa do LPI, representando o índice de pigmento da cobertura vegetal da bacia do Rio Quilombo.

REPRESENTAÇÃO DIGITAL DOS SOLOS

O mapa digital de solos da bacia do Rio Quilombo foi extraído do mapa de solos da região Ribeira do Iguape na escala 1/100.000 (Sakai et al., 1983). Basicamente, a bacia é composta por quatro tipos de solos: Argissolo, Cambissolo, Latossolo e Organossolo (Embrapa, 1999).

O mapa de solos, originalmente em formato analógico, foi convertido para o formato digital, utilizando mesa digitalizadora. Em seguida, esses dados foram transformados para o formato raster (Figura 3)

com células de 15x15 m (equivalente à resolução da representação digital do uso da terra). O mapa raster foi então convertido para o formato ASCII, compatível com a LMA PCRaster.

A LINGUAGEM PCRASTER

A linguagem de modelagem ambiental PCRaster (Wesseling et al., 1996), é um programa computacional desenvolvido para modelagem de processos ambientais, que permite interação de dados espaciais e temporais.

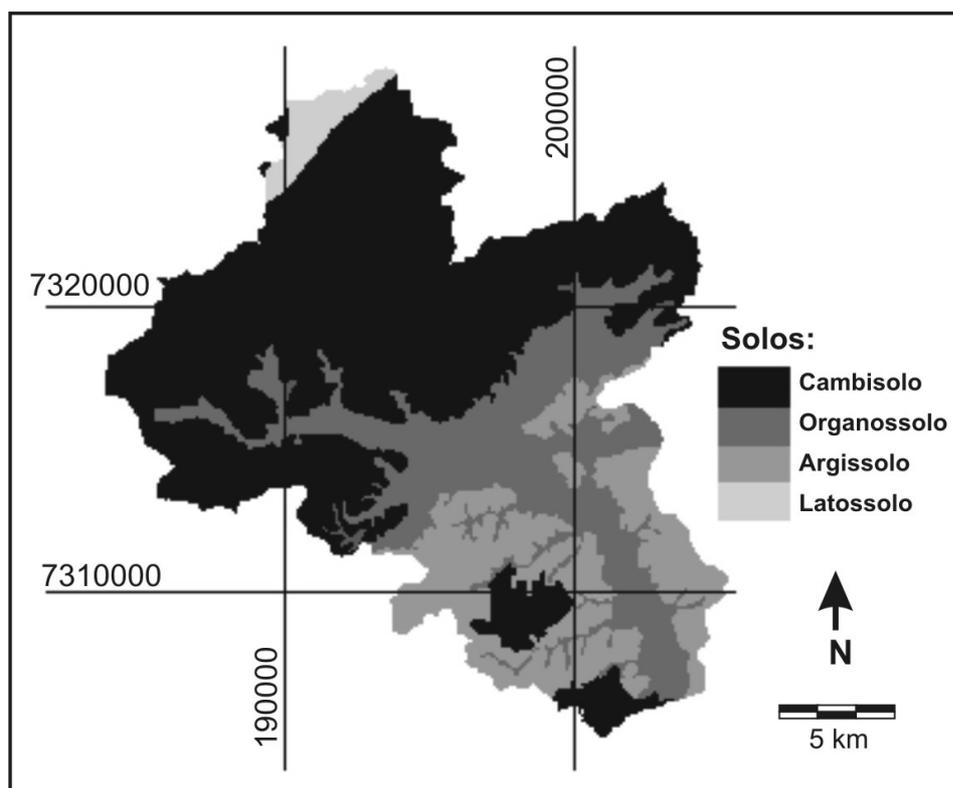


FIGURA 3. Mapa de solos da bacia do Rio Quilombo.

A LMA PCRaster utiliza para processamento dos programas nela desenvolvidos, dados no formato raster e no formato texto, os quais ficam armazenados em arquivos. Os arquivos podem compreender os dados básicos (solos, MDT, uso da terra, entre outros), bem como podem ser utilizados para armazenar os resultados intermediários e finais de processamentos.

A LMA PCRaster oferece opções de operadores cartográficos que podem ser combinados da mesma forma que em computações matemáticas, além de possuir software de visualização que possibilita o acesso a resultados de pré ou pós-modelagem dos dados. As entidades dos dados utilizados são arquivos no formato raster aos quais podem ser inseridos atributos espaciais e temporais, séries temporais para dados temporais não espaciais e tabelas contendo atributos espaciais. A LMA PCRaster contém 125 funções genéricas que podem operar sobre os três tipos de entidades de dados (Karszenberg et al., 2001).

Uma vantagem da LMA PCRaster é que ela foi desenvolvida para modelagem ambiental, sendo desta forma mais fácil e rápida a sua utilização para esses fins (Karszenberg, 2002).

A LMA PCRaster é um ambiente ideal para a construção de modelos, pois: (1) apresenta um grande quantidade de algoritmos e funções padrão utilizadas em modelagem ambiental; (2) não é necessário ao

usuário conhecimento em programação de linguagem computacional tais como, FORTRAN ou C++, sendo necessário somente uma familiaridade com notações matemáticas; (3) sua interface é baseada em arquivo texto e suporta modelagem estática e dinâmica; (4) apresenta conexão embutida, evitando, desta forma, a necessidade de exportação entre arquivos gerados pelo modelo e o SIG; (5) é uma linguagem portátil e pode ser rodada em diferentes ambientes operacionais, sem a necessidade de computadores de grande performance.

O *script* de um programa escrito em PCRaster é estruturado em quatro seções: *binding*, *initial*, *timer* e *dynamic*. A seção *binding* apresenta a lista de variáveis do programa que estão ligadas a nomes de arquivos. Essa ligação possui dupla direção - tanto podem determinar quais variáveis serão gravadas nos arquivos especificados, quanto podem indicar quais variáveis receberão valores provenientes dos arquivos especificados. A seção *initial* determina o estado inicial do modelo (no tempo = 0) e os valores das variáveis constantes, usando os operadores do PCRaster. Essa seção é executada antes da primeira execução da seção *dynamic*. A seção *timer* determina o tempo inicial e final da execução do modelo, bem como o número de passos e seqüência em que o modelo deve ser executado. A seção *dynamic* é uma seção interativa e seqüencial, que

realiza “*loops*” baseados no número de intervalos de tempo definido na seção *timer*. Essa seção descreve as mudanças temporais das variáveis do modelo.

CONSTRUÇÃO DO CONVERSOR DE BORDAS BOLEANAS PARA BORDAS FUZZY

O programa computacional desenvolvido consiste na transformação dos mapas booleanos em um conjunto de números *fuzzy*. Nessa etapa, as bordas difusas nos mapas digitais de solo e de uso da terra, foram geradas pela atribuição de valores entre 0 e 1 aos dados de entrada, com base nas funções de pertinência. O programa incorpora duas funções de pertinência: a função linear e a função sino. Outras funções podem ser facilmente incorporadas ao programa pelo usuário.

Representação do Solo por Conjunto Fuzzy

A utilização da lógica *fuzzy* para determinação das bordas dos polígonos que representam as unidades pedológicas permite a incorporação de informações associadas à natureza dessas bordas, bem como o cálculo da medida de suas áreas (Burrough & McDonnell, 1998). Nesse trabalho, foi utilizada a proposta de unidade de mapa descrita em Burrough & McDonnell (1998), na qual é assumido que a espessura da borda difusa deve ser igual em cada unidade do mapa, ou seja, em cada polígono.

O procedimento computacional utilizado para a geração das bordas *fuzzy* segue as seguintes etapas: (i) separação de cada unidade pedológica (polígono) em mapas distintos; (ii) expansão das bordas de cada polígono (para a direita e para a esquerda); (iii) aplicação da função de pertinência na borda expandida, de forma que, conforme sua distância à borda (Figura 4): (a) os pontos dentro e mais afastados da borda original desenhada receberam valor de pertinência igual a 1; (b) os pontos dentro e mais próximos da borda original desenhada receberam valor de pertinência entre 0,5 e 1; (c) os pontos fora da borda original desenhada receberam valor de pertinência abaixo de 0,5 e até 0,0. Os parâmetros das funções de pertinência foram selecionados de forma que a locação correspondente à borda original desenhada estivesse localizada no ponto de cruzamento (*crossover*), ou seja, no ponto onde o grau de pertinência é igual a 0,5; (iv) o procedimento foi repetido para todas as unidades de solo, gerando um mapa *fuzzy* para cada unidade de solo. A espessura da borda difusa é definida pelo usuário antes de executar a rotina computacional com base em dados de campo ou, de forma mais simples, pela escala cartográfica do mapa analógico.

As Figuras 5 e 6 apresentam, como exemplo, uma unidade do mapa de solo utilizando modelagem booleana (antes do processo de conversão em dados *fuzzy*) e modelagem *fuzzy*, respectivamente.

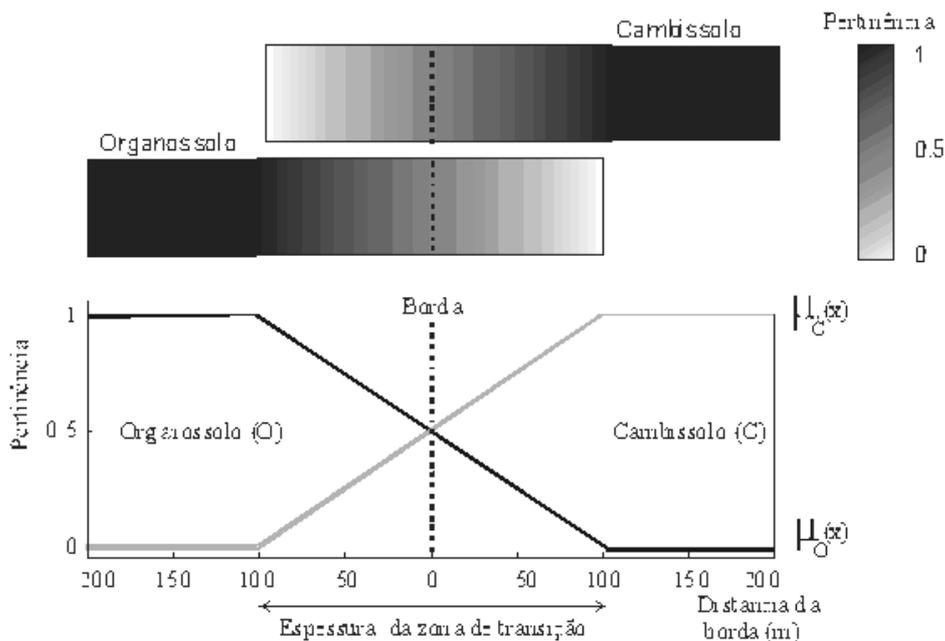


FIGURA 4. Metodologia utilizada na conversão dos dados de solo em conjuntos *fuzzy*, utilizando função de pertinência linear.

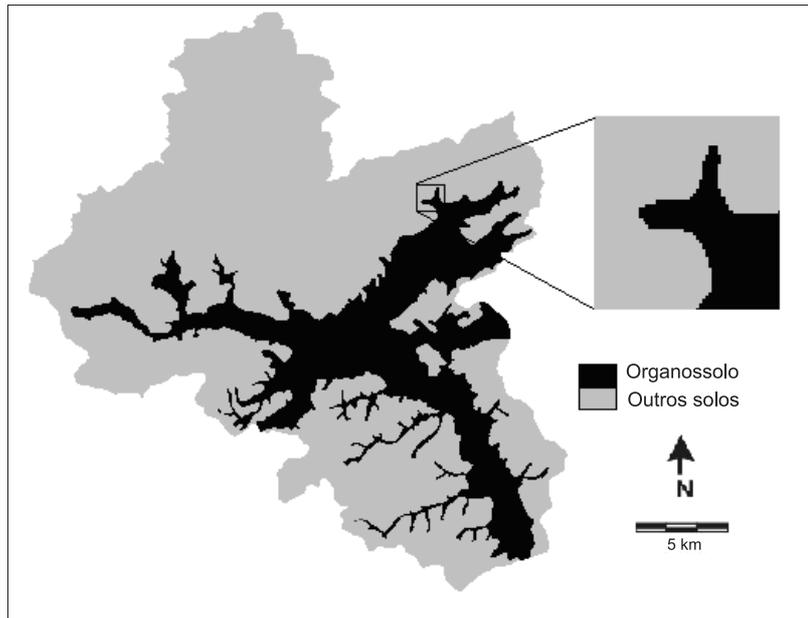


FIGURA 5. Representação de uma unidade do mapa de solos (Organossolo) utilizando a modelagem por lógica booleana.

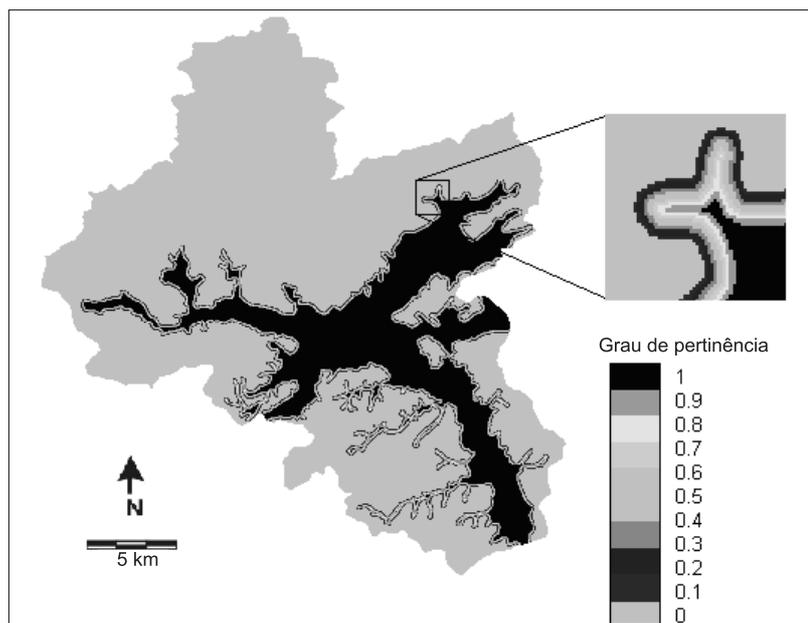


FIGURA 6. Representação de uma unidade do mapa de solos (Organossolo) utilizando a modelagem por lógica fuzzy.

Representação da Cobertura Vegetal por Conjunto Fuzzy

O programa desenvolvido aplica uma função de pertinência ao mapa gerado pelo LPI com o objetivo de determinar os limites da borda difusa entre os tipos de cobertura vegetal da área estudada.

Os limites entre floresta e pastagem são marcados por uma vegetação tipo capoeira, bem como uma mata degradada com ocorrências de vegetação rasteira,

conforme observações em campo. A identificação destas bordas difusas no mapa de LPI permitiu a definição dos parâmetros (valores da abscissa) da função de pertinência utilizada (Figura 7).

Esse procedimento gerou duas representações digitais fuzzy (duas para a cobertura floresta e duas para a cobertura pastagem) para cada função de pertinência utilizada (Figura 8).

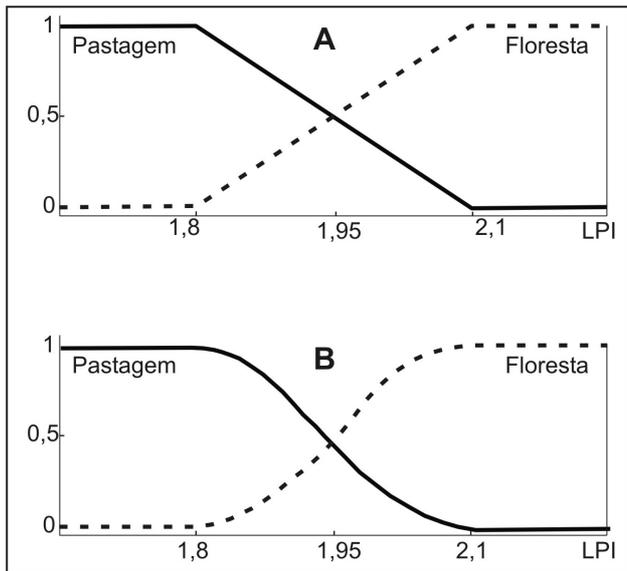


FIGURA 7. Funções de pertinência e suas respectivas equações matemáticas, utilizadas na representação digital do LPI: (A) função de pertinência linear e (B) função de pertinência sino.

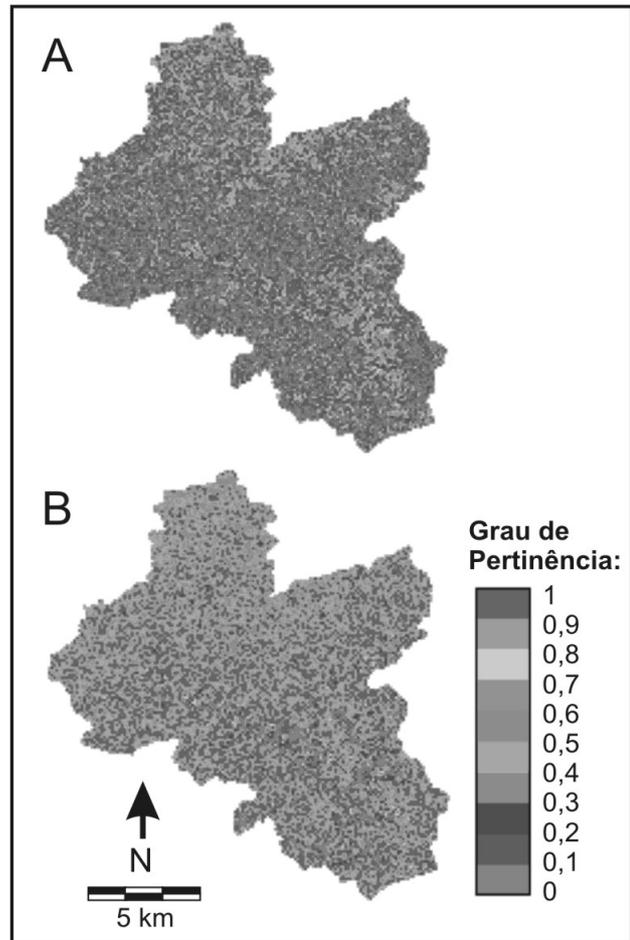


FIGURA 8. Representação *fuzzy* da cobertura pastagem (A) e floresta (B) para a função de pertinência linear.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na bacia hidrográfica do Rio Quilombo os solos não apresentam um limite fixo definido. O que se observa é uma variação gradual de uma unidade pedológica para outra. A mesma característica é observada na cobertura vegetal que apresenta variações na sua disposição. Existe uma transição entre a unidade de floresta e pastagem, no qual pode ser observado claramente no mapa de LPI (Figura 2), que mede o índice de pigmentos verdes da vegetação.

Os dados observados em campo apresentaram uma correlação muito mais forte com os mapas com bordas *fuzzy*, gerados com a rotina computacional desenvolvida, do que os mesmos mapas (solos e vegetação) na forma de bordas fixas (bordas booleanas). Esse procedimento proporcionou a geração de um banco de mapas *fuzzy* que estão aptos a servirem de base para a realização de modelagens cartográficas e ambientais.

CONCLUSÕES

O desenvolvimento de metodologias para a representação de fenômenos naturais é essencial para a simulação de processos ambientais. Neste trabalho, foi desenvolvida uma forma de melhor representar informações fisiográficas visando proporcionar uma avaliação mais acurada de bordas entre objetos espaciais. O uso da lógica *fuzzy* possibilitou uma análise mais completa nas bordas entre geo-objetos, diferente da lógica booleana, que considera tais bordas como abruptas e bem definidas (0 ou 1).

A incorporação de um sistema *fuzzy*, que leva em consideração as zonas de transição entre unidades de mapas, permite uma interpretação dos dados de forma mais condizente com a realidade dos fenômenos naturais. Como a técnica *fuzzy* reduz as perdas de informações por sua capacidade de obtenção de graus de pertinência para cada classe de geo-objetos, a modelagem das bordas utilizando a lógica *fuzzy* apresenta uma maior correlação com a realidade observada em campo do que a lógica booleana.

O método computacional desenvolvido permite a geração de representação digital *fuzzy* de forma simples para aplicação em trabalhos de modelagem utilizando SIG. A partir de pequenas alterações, o programa permite gerar bordas *fuzzy* de diferentes espessuras em distintas unidades de solo de um mesmo

mapa. Outras funções de pertinência também podem ser incorporadas ao sistema, bem como a aplicação de parâmetros temporais na geração das bordas *fuzzy*, o que permite a realização de modelagem dinâmica entre bordas de geo-objetos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAMS, M. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, p. 847-859, 2000.
2. ALMEIDA, T.I.R.; SOUZA FILHO, C.R. Principal Component Analysis Applied to Feature-Oriented Band Ratios of Hyperspectral Data : A Tool for Vegetation Studies. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, p. 1-19, 2004.
3. BARDOSSY, A. & DUCKSTEIN, L. **Fuzzy Rule-Based Modeling with applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems**. USA, CRC Press, 232 p., 1995.
4. BARRETO-NETO, A.A. **Modelagem dinâmica de processos ambientais**. Campinas, 2004. 123 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Campinas (UNICAMP).
5. BARRETO-NETO, A.A. & SOUZA FILHO, C.R. Application of fuzzy logic to the evaluation of runoff in a tropical watershed. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 244-253, 2008.
6. BURROUGH, P.A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford: Oxford University Press, 194 p., 1986.
7. BURROUGH, P.A. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. **Journal of Soil Science**, v. 40, p. 477-492, 1989.
8. BURROUGH, P.A. Natural Objects with Indeterminate Boundaries. In: BURROUGH P.A. & FRANK, A.U. (Coordenadores), **Geographic Objects with Indeterminate Boundaries**. Taylor & Francis, p. 3-28, 1996.
9. BURROUGH, P.A. & MCDONNELL, R.A. **Principles of Geographical Information Systems**. England, Oxford University Press, 336 p. 1998.
10. BURROUGH, P.A.; MACMILLAN R.A.; Van DEURSEN W. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. **Journal of Soil Science**, v. 43, p. 193-210, 1992.
11. EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 412 p., 1999.
12. HADZILACOS, T. On Layer-based Systems for Undetermined Boundaries. In: BURROUGH P.A. & FRANK, A.U. (Coordenadores), **Geographic Objects with Indeterminate Boundaries**, Taylor & Francis, p. 237-256, 1996.
13. KANDEL, A. **Fuzzy Mathematical Techniques with Applications**. Reading, Addison-Wesley, 274 p., 1986.
14. KANDEL, A.; PACHECO, R.; MARTINS, A.; KHATOR, S. The Foundations of Rule-Based Computations in Fuzzy Models, In: W. PEDRYCZ & H.-J. ZIMMERMANN. (Org.). **The Foundations of Rule-based Computations in Fuzzy Models**. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1 ed., p. 231-263, 1996.
15. KARSENBERG, D. The value of environmental modelling languages for building distributed hydrological models. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 2751-2766, 2002.
16. KARSENBERG, D.; BURROUGH, P.A.; SLUITER, R.; DE JONG, K. The PCRaster software and Course Materials for Teaching Numerical Modelling in the Environmental Sciences. **Transactions in GIS**, v. 5, n. 2, p. 99-110, 2001.
17. LAGACHERIE, P.; ANDRIEUX, P.; BOUZIGUES, R. Fuzziness and Uncertainty of Soil Boundaries: From Reality to Coding in GIS. In: P.A. BURROUGH P.A. & A.U. FRANK (Org.), **Geographic Objects with Indeterminate Boundaries**, Bristol, Taylor & Francis Inc., p. 275-286, 1996.
18. McBRATNEY, A.B. & DE GRUIJTER, J.J. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy K-means with extragrades. **Journal of Soil Science**, v. 43, p. 159-175, 1992.
19. McBRATNEY, A.B.; DEGRUIJTER, J.J.; BRUS, D.J. Spatial prediction and mapping of continuous soil classes. **Geoderma**, v. 54, p. 39-64, 1992.
20. McBRATNEY, A.B. & ODEH, I.O. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. **Geoderma**, v. 77, p. 85-113, 1997.
21. ODEH, I.O.; McBRATNEY, A.B.; CHITTLEBOROUGH, D.J. Soil pattern recognition with fuzzy-c-mean: application to classification and soil-landform interrelationships. **Soil Science Society American Journal**, v. 56, p. 505-516, 1992.
22. PEDRYCZ, W. & GOMIDE, F. **An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design**. London, MIT Press, 465 p. 1998.
23. ROCK, B.N.; VOGELMANN, J.E.; WILLIAMS, D.L.; VOGLEMANN, A.F.; HOSHIZAKI, T. Remote Detection of Forest Damage. **BioScience**, v. 36, p. 439, 1986.
24. ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: THIRD EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 1974. **Proceeding...** Greenbelt: NASA SP-351, 1974, p. 310-317.
25. SAKAI, E.; LEPSCH, I.F.; AMARAL, A.Z. **Levantamento pedológico de reconhecimento semidetalhado da região de Ribeira do Iguape no Estado de São Paulo**. I. Carta de solos da folha 24° 15' - 24° 45' e 47° 30' - 40°W (Registro, Jiquiá, Pariquiera-Açú e Iguape). Campinas: Instituto Agrônomo, 1983.
26. SOUZA FILHO, C.R. "Aster à Vista". **Revista InfoGeo**, v. 29, p. 62-64, 2003.
27. WESSELING, C.G.; KARSENBERG D.; VAN DEURSEN, W.P.A.; BURROUGH, P.A. Integrating dynamic environmental models in GIS: The development of a Dynamic Modelling language. **Transactions in GIS**, v. 1, p. 40-48, 1996.
28. ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.
29. ZIMMERMANN, H.J. **Fuzzy Set Theory and its applications**. Boston: Kluwer-Nijhoff, 363 p., 1985.

Manuscrito Recebido em: 30 de julho de 2007
Revisado e Aceito em: 25 de fevereiro de 2008

