

## Aspectos Conceituais da Modelagem Dinâmica Espacial

Bianca Maria Pedrosa<sup>\*,1</sup>, Gilberto Câmara<sup>\*\*1</sup>

(1) Área de Geoprocessamento

Divisão de Processamento de Imagens

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

(\* Aluno de Doutorado, bpedrosa@unimep.br ; (\*\*) Orientador

### Resumo

Um significativo conjunto de fenômenos espaciais encontrados em aplicações de Hidrologia, Estudos Climáticos, Dinâmica Populacional e Impacto Ambiental, requer que os Sistemas de Informações Geográficas (GIS) tenham capacidade de representar adequadamente processos espaço-temporais. Entretanto, a atual geração de GIS configura uma tecnologia estabelecida sobre concepções fortemente baseadas em uma visão estática do mundo. Neste contexto, este trabalho aborda as funcionalidades mínimas necessárias a um GIS para suportar os princípios básicos de um modelo dinâmico, dentro de uma perspectiva de implementação computacional baseada em autômatos celulares e modelos multi-escala.

*Palavras-Chave: modelagem dinâmica espacial, sistemas de informações geográficas*

### 1. Introdução

Historicamente, a tecnologia de Geoprocessamento enfatizou a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática. Isto se deve ao fato de que a principal abstração utilizada em Sistemas de Informação Geográfica (GIS) é o mapa. No entanto, um significativo conjunto de fenômenos espaciais, tais como escoamento de água da chuva, planejamento urbano e dispersão de sementes, entre outros, são inerentemente dinâmicos e as representações estáticas comumente utilizadas em GIS não os capturam de forma adequada. Deste modo, um dos grandes desafios da Ciência da Informação Espacial é o desenvolvimento de técnicas e abstrações que sejam capazes de representar adequadamente fenômenos espaço-temporais.

O uso de modelos temporais em GIS vem sendo investigado com afinco na literatura recente [11]. Neste trabalho, estaremos dando ênfase a abordagem de representação da dinâmica espaço-temporal por autômatos celulares. Nesta abordagem o espaço é representado através de um *array* de células em que cada célula pode assumir diferentes estados ao longo do tempo. O tempo varia em intervalos discretos e o estado de todas as células muda simultaneamente em função do seu próprio estado, do estado das demais células em sua vizinhança e de acordo com um conjunto específico de regras de transição [8].

Neste trabalho, serão abordados os principais elementos de um modelo espacial dinâmico, que incluem: a representação do espaço (seção 2.1) e do tempo (seção 2.2), o modelo dinâmico a ser utilizado para a representação do fenômeno espacial (seção 2.3) e a solução computacional baseada em autômato celular para implementar estes princípios de forma integrada e consistente (seção 2.4).

### 2. Princípios Básicos

A atual geração de GIS configura uma tecnologia estabelecida para armazenar, organizar, recuperar e modificar informações sobre a distribuição espacial de recursos naturais, dados geo-demográficos, redes de utilidade pública e muitos outros tipos de dados localizados na superfície da terra. Nesta área, um dos principais desafios para os próximos anos é transformar estes sistemas, essencialmente estáticos, em ferramentas capazes de prover representações realistas de processos espaço-temporais. A modelagem de grande quantidade de processos físicos, em aplicações como Geomorfologia, Estudos Climáticos, Dinâmica Populacional e Impacto Ambiental, requer que os GIS tenham capacidade de representar os tipos de processos dinâmicos encontrados em estudos de sistemas físicos e de mudança no uso e cobertura do solo.

Neste contexto, a Modelagem Dinâmica [3] procura transcender as limitações atuais da tecnologia de Geoprocessamento, fortemente baseada numa visão estática, bidimensional do mundo. O objetivo dos modelos dinâmicos em GIS é realizar a simulação numérica de processos dependentes do tempo, como nos modelos hidrológicos, que simulam o fluxo e transporte de água. Na definição de Burrough, “um modelo espacial dinâmico é uma representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações em suas forças direcionadoras”.

Tipicamente, GIS são desenvolvidos a partir de suposições pré-estabelecidas quanto a homogeneidade, uniformidade e universalidade das propriedades de seus principais componentes, que incluem o espaço e as relações espaciais, o tempo e o modelo matemático que descreve o fenômeno. Entretanto, para modelar processos dinâmicos em GIS com o nível necessário de realismo, estas suposições rígidas têm que ser flexibilizadas de tal forma que o sistema seja capaz de representar [5]:

- O espaço como uma entidade não homogênea tanto nas suas propriedades quanto na sua estrutura.
- As vizinhanças como relações não estacionárias.

- As regras de transição como regras não universais.
- A variação do tempo como um processo regular ou irregular.
- O sistema como um ambiente aberto a influências externas.

Para implementar sistemas espaciais dinâmicos com as características mencionadas acima, alguns princípios básicos relativos aos principais elementos destes sistemas devem ser considerados. Entre estes elementos destacam-se a questão da representação do espaço e do tempo, o modelo dinâmico a ser utilizado para a representação do fenômeno espacial e a abordagem computacional para implementar estes princípios de forma integrada e consistente. Nas próximas seções, discutiremos cada um destes elementos.

## 2.1 O Espaço

O espaço é o conceito chave na geografia e, por extensão, na Ciência da Informação Espacial. Tradicionalmente, os geógrafos fazem uma distinção entre os conceitos de espaço absoluto e espaço relativo. “Espaço absoluto, também chamado Cartesiano ou Newtoniano, é um container de coisas e eventos, uma estrutura para localizar pontos, trajetórias e objetos. Espaço relativo, ou Leibnitziano, é o espaço constituído pelas relações espaciais entre coisas e eventos” [5]. Um caso típico de medida realizada no espaço absoluto são os índices de auto-correlação espacial. Neste caso, um dos instrumentos básicos é a matriz de proximidade espacial, cujo cálculo usualmente é feito em função de distância euclidiana entre objetos ou da existência de uma fronteira entre eles. Um exemplo de fenômeno em que a dimensão espacial requer o conceito de espaço relativo é o caso de fluxo de pessoas pela rede de transporte metroviário de uma cidade. Em fenômenos geográficos deste tipo, os objetos estabelecem relações entre si que independem das relações espaciais típicas como as relações topológicas, direcionais e de distância. Estes fenômenos geralmente incluem relações como fluxo de pessoas ou materiais, conexões funcionais de influência, comunicação e acessibilidade, entre outras [6].

## 2.2 O Tempo

Conceitualmente, pode-se representar o tempo através de diferentes estruturas, definidas, principalmente, com base em três aspectos da representação temporal: granularidade, variação e ordem no tempo.

A ordem temporal refere-se ao modo como o tempo flui. Neste caso, pode-se assumir que o tempo flui de forma linear, ramificada ou cíclica. No tempo linear considera-se que o tempo flui sequencialmente, ou seja, existe uma ordem de precedência entre os pontos no tempo, de tal forma que cada ponto tenha apenas um sucessor e um antecessor. No tempo ramificado múltiplos pontos podem ser os sucessores ou antecessores imediatos de um mesmo ponto. O tempo cíclico é utilizado para modelar eventos e processos recorrentes [7].

Com relação à variação temporal duas possibilidades podem ser consideradas: tempo contínuo e discreto. Uma variável temporal contínua é usada em processos que demandam medidas de tempo com níveis arbitrários de precisão. Por exemplo, a expansão da área de desmatamento de uma floresta entre dois instantes de tempo medidos pode ser interpolada. Uma variável temporal discreta é usada quando o tempo é medido em certos pontos ou intervalos e a variação é descontínua entre estes pontos. Uma delimitação de lotes de um cadastro imobiliário pode ocupar uma posição num instante  $t$  e outra num instante  $t'$ , mas não faz sentido dizer que a delimitação ocupou alguma posição intermediária entre  $t$  e  $t'$ .

Associado ao conceito de variação temporal discreta, existe o conceito de *Chronon*. Um *chronon* é a menor duração de tempo suportada por um sistema e pode variar em diferentes aplicações [7]. A granularidade temporal de um sistema está diretamente relacionada com a duração de um *chronon*. Um instante de tempo representa um ponto particular no tempo, um intervalo é o tempo decorrido entre dois instantes e um período consiste de uma seqüência de intervalos de tempo.

## 2.3 Modelos

Modelos espaciais dinâmicos descrevem a evolução espacial de um sistema ao longo do tempo. Um modelo é constituído de pelo menos três elementos: variáveis, relacionamentos e processos. Ao se construir um modelo, dependendo do objetivo, pode-se dar ênfase a um ou outro destes elementos. Nesta visão, os modelos podem ser classificados em empíricos e sistêmicos. Modelos empíricos focalizam os relacionamentos entre as variáveis do modelo, a partir da suposição de que os relacionamentos observados no passado continuarão no futuro. Modelos de sistemas são descrições matemáticas de processos complexos que interagem entre si, enfatizando as interações entre todos os componentes de um sistema [9].

### 2.3.1 Modelos Empíricos

Os modelos empíricos, em sua dimensão procedural, possuem três componentes chaves: uma configuração inicial, uma função de mudança e uma configuração de saída. A configuração inicial de um modelo dinâmico pode ser obtida através de dados históricos do fenômeno em estudo, chamados de séries temporais. Neste caso, o processo é classificado como determinístico. Quando variáveis aleatórias são utilizadas para explicar um sistema o processo é classificado como estocástico-probabilístico.

Modelos empíricos são caracterizados pela simplicidade dos modelos matemáticos empregados e pelo número reduzido de variáveis envolvidas. Estes modelos são eficientes em fazer previsões sobre processos estacionários, embora apresentem limitações em abordar a evolução espacial e identificar os aspectos causais do sistema, podem facilmente ser implementados em GIS, por serem compatíveis com o formato de dados oriundos de fontes de sensoriamento remoto. Cadeias de markov, modelos logísticos de difusão e modelos de regressão são exemplos de modelos empíricos.

### 2.3.2 Modelos Sistêmicos

Modelos sistêmicos procuram descrever o sistema como um todo, isto é, tentam representar as interações entre todos os seus componentes. Uma característica chave destes modelos é a eficiência com que abordam a dimensão espacial, implementando conceitos como as relações de vizinhança e suportando o uso combinado de múltiplas escalas. Modelos sistêmicos são classificados como modelos exploratórios, porque fornecem condições para que várias simulações possam ser investigadas a partir de diferentes cenários. Entretanto, estes modelos requerem um substancial conhecimento do fenômeno em estudo e acabam por se tornar sistemas altamente especializados, não podendo ser aplicados a diferentes classes de fenômenos. Dentre os modelos sistêmicos estão os modelos simulação de ecossistemas e os modelos de simulação dinâmica espacial.

### 2.4 Autômatos Celulares

Nos últimos anos, os conceitos de autômatos celulares têm sido utilizados para modelar fenômenos físicos e urbanos [1; 3; 10; 8; 4]. Nesta abordagem o espaço é representado por um mosaico de células, geralmente de tamanhos e formatos idênticos (*regular tessellations*). Sobre cada célula de um autômato celular são aplicadas regras de transição. Regras de transição determinam quando e porquê o estado de uma célula se altera e podem ser qualitativas ou quantitativas. O mecanismo de aplicação das regras de transição baseia-se na vizinhança de uma célula. Como consequência, as mudanças geradas por autômatos celulares são estritamente locais, isto é, baseadas nas vizinhanças de cada célula. Nesta perspectiva, pode-se dizer que o uso de autômatos celulares é eficiente em processos em que a ordem global emerge de ações locais e descentralizadas [2].

### 3 Considerações Finais

Este artigo teve por objetivo apresentar a dimensão conceitual dos principais elementos de sistemas de modelagem dinâmica espacial. Estes elementos foram estudados com o objetivo de definir as estruturas de dados e de controle, bem como a funcionalidade mínima necessária a um GIS para suportar modelagem dinâmica espacial. Os autores estão empenhados no desenvolvimento de um ambiente computacional, de propósito geral, para modelagem dinâmica de processos de mudanças no uso e cobertura do solo, que suporte o uso, isolado ou combinado, de diferentes modelos de simulação e que tenha integração plena com SGBDs e GIS de uso geral.

### 4. Referências Bibliográficas

- [1] Batty, M.. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. Computers, Environment and Urban Systems **23**: 205-233. 1999.
- [2] Batty, M. GeoComputation Using Cellular Automata. GeoComputation. S. Openshaw and R. J. Abraham, Taylor&Francis: 95-126. 2000.
- [3] Burrough, P. Dynamic Modelling And Geocomputation. Geocomputation: A Primer. P. Longley, M. Batty and R. McDonnel. London, John Wiley & Sons. 1998.
- [4] Câmara, A. S. Spatial Simulation Modelling. Spatial Analytical Perspectives on GIS. M. Fisher. London, Taylor & Francis: 213-218. 1996.
- [5] Couclelis, H. "From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation." Environment and Planning B: Planning and Design **24**: 165-174. 1997.
- [6] Couclelis, H. Space, Time, Geography. Geographical Information Systems. P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire and D. Rhind. New York, John Wiley: 29-38. 1999.
- [7] Edelweiss, N. and Oliveira, J. P. M. Modelagem de Aspectos Temporais de Sistemas de Informação. Recife, UFPE-DI. 1994.
- [8] Engelen, G. "Using Cellular Automata for Integrated Modelling of Socio-environmental Systems." Environmental Monitoring and Assessment **34**: 203-214. 1995.
- [9] Lambin, E. F. Modeling Deforestation Processes - A Review, Trees series B: Research Report . European Commission, Luxembourg. 1994.
- [10] Roy, G. G. and Snickars, F. Citylife: A study of cellular automata in urban dynamics. Spatial Analytical Perspectives on GIS. M. Fisher. London, Taylor & Francis: 213-218. 1996.
- [11] Worboys, M. F. GIS - A Computing Perspective. Bristol, PA, Taylor & Francis Inc. 1995