

SimCidade – Um simulador de crescimento urbano utilizando Sistemas Multiagentes Reativos

André Dias Bastos¹, Antônio Carlos da Rocha Costa²

¹Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Caixa Postal 15.064 – 91.501-970 – Porto Alegre – RS – Brasil

²Departamento de Informática – Universidade Católica de Pelotas (UCPel)
Pelotas – RS - Brasil.

adbastos@inf.ufrgs.br, rocha@atlas.ucpel.tche.br

Abstract. *Urban planning is a very important issue to guarantee the sustainable development of modern cities. For this, many aspects must be considered such as the urban growth. As the cities are complex systems, which involves various actors with different patterns of behavior, the use of Multi-Agent System (MAS) in urban modelling has been widely applied for the resolution of this type of problem. Hence, this paper describes a proposal based in reactive agents applied in the simulation of urban growth of the city of Bauru/SP, using geographic data, extracted from satellite images, of the occupation and land use in this to calibrate and validate the simulator developed.*

Resumo. *O planejamento urbano é muito importante para garantir o desenvolvimento sustentável das cidades modernas. Para isso, muitos aspectos devem ser considerados, tais como o crescimento urbano das mesmas. Como as cidades são sistemas complexos, que envolvem vários atores com diferentes padrões de comportamento, a modelagem urbana baseada em Sistemas Multiagentes tem sido cada vez mais aplicada para esse tipo de problema. Sendo assim, este artigo descreve uma proposta de abordagem baseada em agentes reativos aplicados na tarefa de simulação de crescimento urbano para Bauru/SP, utilizando dados geográficos, extraídos de imagens de satélite, da ocupação e utilização efetiva do uso do solo dessa cidade para calibrar e validar o protótipo do simulador.*

1. Introdução

Com o crescimento urbano acelerado e a expansão da ocupação sobre áreas não urbanizadas e de proteção ambiental, torna-se necessário o desenvolvimento de formas eficazes de avaliação do impacto causado e que ao mesmo tempo sejam capazes de subsidiar o processo de planejamento territorial das cidades a curto e médio prazo [Bastos, 2007]. Uma vez que, um dos problemas mais sérios enfrentados pelas cidades brasileiras, principalmente as de porte médio, é a expansão urbana desordenada, agravada pela falta de planejamento e de estratégias específicas para esse controle [Lima 1998].

O processo de crescimento urbano, no entanto, é de difícil apreensão devido a fatores como o grande número de atores presentes na cidade e na paisagem que integra, interinfluências e diferentes escalas, tamanho da cidade, ocorrência de mudanças e pelas

regras espaciais, ou seja, o conjunto de todas possíveis regras, ser extremamente complexo [Allen 1997] [Wu 2002].

Para simular operações e reações de processos do mundo real como esse crescimento das cidades são utilizados modelos urbanos, auxiliando dessa forma na exploração de hipóteses e análise do funcionamento de processos ambientais, assim como na investigação das respostas do sistema a possíveis mudanças [Goodchild 1993]. Conforme Portugali (2000), para trabalhar com essas mudanças é preciso aprender os processos que as provocam e capturar os fatores que as condicionam ou determinam, produzindo conhecimento sobre o modo como a cidade muda, as regras subjacentes às mudanças e os padrões que emergem de cada situação.

Como as cidades são sistemas complexos não lineares, cujas características são difíceis de serem modeladas usando métodos tradicionais (os quais são estáticos, lineares, agregados e baseados em teorias de sistemas simples top-down) aplicados a esse tipo de problema, a melhor maneira para modelar sistemas urbanos é a utilização de tecnologias como os Sistemas Multiagentes (SMA), que permitem um desenvolvimento dinâmico, não-linear, desagregado e bottom-up [Cheng 2003].

Sendo assim, para a modelagem de comportamento dinâmico de mudanças de uso do solo ou cobertura da terra adotou-se neste trabalho uma abordagem onde agentes reativos atuam sobre camadas representando a infraestrutura das cidades sendo simuladas.

2. Simulador

Para o simulador proposto utilizou-se uma abordagem baseada em SMA reativos, seguindo a premissa de que é possível realizar tarefas complexas, como a simulação de crescimento urbano, através do trabalho realizado por um grande número de entidades (agentes) atuando em conjunto, mas que isoladamente são consideradas bem simples (tal como a comparação clássica com uma colônia de formigas, onde apesar de ser formada por seres simples, pode-se dizer que o formigueiro é um sistema complexo cujo comportamento é mais inteligente do que das formigas que o formam).

Nesse tipo de agente o conhecimento é implícito e se manifesta através do seu comportamento, o qual se baseia no que é percebido a cada instante do ambiente, mas sem uma representação explícita deste [Alvares, 2007]. Como os agentes reativos não possuem controle deliberativo, nem raciocínio explícito, não é esperado que sejam capazes de realizar conversações estruturadas, sendo muito utilizados modelos de interações físicas (como forças eletrostáticas), como base para modelagem de interações entre eles (permitindo assim expressar interações simples como a atração e repulsão que é muito utilizada no simulador).

No caso do problema sendo tratado, ele é concebido nos SMA reativos como sendo um conjunto de agentes em interação, no qual cada um deles tem seus próprios objetivos (comportamentos) individuais e atuam sobre camadas representando características da cidade em estudo, como ferrovias, rodovias e rios, gerando assim o mapa de saída resultante da simulação, como mostrado na figura 1, que ilustra a estrutura do simulador.

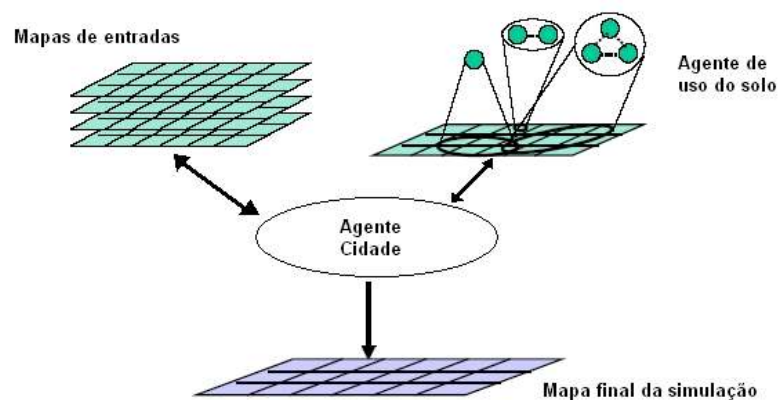


Figura 1. Estrutura do Simulador

Entre os modelos reativos existentes adotou-se no desenvolvimento do trabalho alguns conceitos inerentes ao modelo PACO, proposto por Demazeau (1990), que é utilizado principalmente em aplicações espacializadas como análise de imagens e cartografia.

Nesse tipo de modelo a solução global do problema é dada pela posição do conjunto de agentes e o comportamento destes é caracterizado por uma combinação definida a priori de um conjunto de interações elementares independentes. As interações entre os agentes são modeladas sob a forma de forças, obrigando assim que eles se desloquem no ambiente.

Devido ao fato de uma cidade ser composta por atributos urbanos e ambientais, que funcionam como atratores ou como resistências para o crescimento urbano, justifica-se a adoção de características do modelo PACO no trabalho, uma vez que elas permitem representar esse processo de atração/repulsão entre os diferentes tipos de uso do solo considerados na simulação de uma cidade.

2.1. Modelo

Para compreender as mudanças que ocorrem numa cidade é necessário observar não só um momento, mas sim um processo de transformação ao longo de um determinado intervalo de tempo [Portugali 2000].

Dessa forma, ao se trabalhar com modelagem de transições de uso do solo urbano é necessário um conhecimento dos condicionantes ou variáveis direcionadoras de mudança de uso no decorrer de uma série multitemporal suficientemente longa. Essas variáveis concernem aspectos de infra-estrutura e sócio-econômicos da cidade em análise.

Como o simulador se baseia em um caso de crescimento urbano real, foram utilizados mapas de uso do solo da cidade paulista de Bauru compreendendo três períodos, entre 1967 e 1979, 1979 e 1988 e 1988 a 2000.

Para a calibração do modelo foi adotado o período completo dos dados, no entanto, para a realização das simulações optou-se pelo período entre 1979 e 1988 por ser o que apresenta alterações mais relevantes na configuração da cidade, sendo com isso mais interessante para a realização de simulações e visualização dos resultados.

A implementação do protótipo baseou-se ainda nas probabilidades globais de transição para cada tipo de uso do solo da cidade de Bauru estimadas por Almeida (2003) para o período de trinta e três anos utilizado durante a calibração.

2.2 Descrição dos Agentes

O modelo da cidade proposto é populado por agentes autônomos que interagem entre si e mudam suas posições, buscando alcançar seu estado de equilíbrio. Para este trabalho foram considerados um total de 4 tipos de agentes.

Destes, três são usados para representar tipos de uso que sofreram alteração durante o período de 1979 a 1988: industrial, comercial/serviços e residencial. O outro tipo (chamado de agente Cidade) é usado para a representação da cidade (mundo), sendo ainda responsável por: ler os mapas, gerar os centróides, calcular as quantidades de agentes, calcular as probabilidades, gerar e posicionar cada agente, gerar o mapa final e calcular as estatísticas.

A parte de infra-estrutura (assim como rodovias e ferrovias) fazem parte do ambiente da simulação, sendo representada em diferentes camadas, assim como os rios que cruzam a cidade e os usos de solo que não sofreram alteração relevante durante o período, como é o caso do institucional e áreas de lazer/recreação (áreas verdes).

Além desses agentes citados, cada zona possui pelo menos um centróide (como mostrado na figura 2), o qual serve como um representante do grupo de agentes reativos em questão. Esses centróides têm um peso maior ou menor conforme o tamanho do grupo que ele representa. O peso de cada um deles, por sua vez, deve ser atualizado a cada novo agente filho gerado que encontrou sua respectiva posição de equilíbrio.

Os agentes de uso do solo são atraídos ou repelidos pelos centróides e pelas infra-estruturas que compõe o ambiente, havendo com isso, a formação de vetores de força que passam a agir sobre esses agentes reativos, de forma similar ao que ocorre no modelo PACO. Após a criação de um novo agente, o mesmo passa a se deslocar pelo ambiente procurando atingir seu estado de equilíbrio dentro da sociedade, com base em uma série de regras específicas para cada tipo de agente (que serão mostradas na seção 2.4.1).

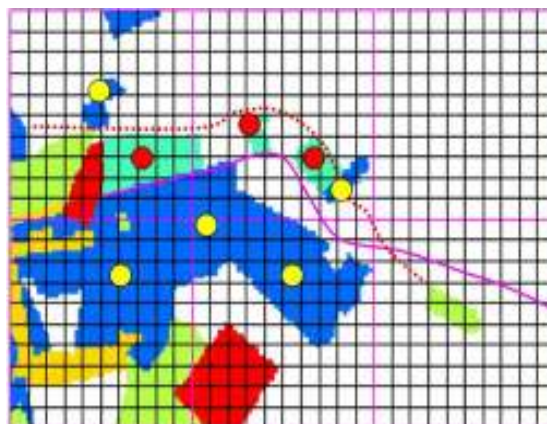


Figura 2. Centróides das áreas

2.3 Desenvolvimento

A simulação de crescimento de forma bottom-up possibilita maior realismo aos modelos e permite representar a emergência de padrões globais baseados no comportamento independente de suas partes [Torrens 2000]. Sendo assim, para o desenvolvimento do protótipo adotou-se essa abordagem para a definição dos agentes, tendo sido utilizada a linguagem orientada a objetos Java para a implementação, como forma de tornar o simulador portátil e independente de plataforma.

Com isso, foram criados agentes (implementados como classes Java) para representar cada uma das unidades de tipo de ocupação de solo consideradas para a cidade de Bauru (residencial, comercial/serviços e industrial). Além disso, também foi criada uma classe Cidade, responsável pela geração dos agentes de ocupação do solo no simulador.

Os mapas de ocupação de solo em Bauru com resolução de 100m que serviram como guia para o desenvolvimento foram os mesmos utilizados por Almeida (2003) e que nos foram fornecidos em um banco de dados geográfico. Através dos mapas originais em formato vetorial foram gerados mapas matriciais bidimensionais em formato de grade com 63 colunas por 50 linhas para uso no simulador.

Para converter os mapas de ocupação de solo para o formato matricial, as células que continham menos de 20% de uso urbano foram consideradas não urbanas através de reclassificação de imagem, tendo sido utilizado nesse processo o sistema de informações geográficas Spring [Spring 2007].

No mapa com as principais rodovias foi considerado ainda um gradiente de distâncias, onde cada célula abriga um valor que indica o número de passos necessários para atingir uma célula atravessada por rodovia. Como consequência o valor da célula onde passa a rodovia fica sendo zero. Para as ferrovias e rios da região foi realizado o mesmo procedimento.

2.4 Comportamento dos Agentes

Um dos fatores que influenciam em análises espaciais de mudança de uso do solo é a interação entre os tipos de uso do solo. Sendo que, no caso do simulador isso é representado pela interação entre os agentes.

No contexto de crescimento urbano as interações entre as vizinhanças são frequentemente baseadas na noção que o desenvolvimento urbano pode ser realizado como um sistema auto-organizado no qual restrições naturais e controles institucionais (políticas de uso do solo) regem a forma na qual processos de tomada de decisão locais produzem formas urbanas macroscópicas [Verburg 2004].

Essas restrições naturais e controles são replicados no simulador de forma simplificada, de modo a definir o comportamento dos agentes no sistema. Não sendo necessário um grande número de regras ou que elas sejam complexas para que se possa resolver problemas como os de crescimento urbano, pois conforme explica Torrens (2000), a idéia de complexidade é dependente da noção de emergência.

Em sistemas emergentes, um pequeno número de regras, aplicadas em um nível local e entre muitos objetos ou agentes, é capaz de gerar uma surpreendente complexidade na forma agregada.

2.4.1 Regras aplicadas aos agentes

Uma sociedade de agentes pode adotar ou ser submetida a diferentes formas de organização (restrições), as quais influenciam no comportamento do grupo e garantem que cada agente realize o que deve ser feito no momento correto. No entanto, para melhor se adequar a mudanças no ambiente, essa organização adotada pelos agentes pode sofrer mudanças, sendo aplicadas então outras regras definidas.

No caso do protótipo, para uma simulação de mudança de uso do solo urbano cada um dos agentes do sistema obedece às restrições apresentadas a seguir (que foram definidas levando em consideração uma série de fatores que influenciam no crescimento urbano relatadas em [Bastos 2007]).

a) Comércio e Serviços

Os agentes surgem nos centróides e começam a procurar por uma posição de equilíbrio, percorrendo a rodovia mais próxima da sua origem.

Com base no peso de cada centróide, o mesmo tem maior ou menor possibilidade de ser sorteado como ponto de partida de um agente (de forma semelhante ao método da roleta usado em algoritmos genéticos).

Ao percorrer uma rodovia os agentes desse tipo analisam então toda sua vizinhança direta (considerando as oito células da vizinhança de Moore) buscando por áreas não urbanizadas que estejam sob a mesma célula e possam representar uma posição de equilíbrio para o agente.

Caso na mesma vizinhança seja encontrado mais de uma célula não urbanizada, o agente escolhe aleatoriamente qual deve ocupar. Como este tipo de agente não é atraído por outros centróides, mas por rodovias e outras áreas comerciais/serviços, o próprio centróide de origem é que tem seu peso atualizado a cada interação do sistema. Ao contrário, por exemplo, do agente do tipo industrial onde o centróide do atrator é que tem o peso atualizado.

b) Indústrias

Os agentes desse tipo partem do centróide de origem em direção ao centróide atrator do mesmo. Para a escolha desse respectivo centróide de atração é levado em consideração o peso de cada um dos centróides do mesmo tipo e a distância deles em relação ao de origem.

Na busca por sua posição de equilíbrio o agente procura por áreas não urbanizadas em sua vizinhança. No caso de encontrar mais de uma, o agente escolhe a que estiver mais próxima do centróide atrator.

Além disso, o agente tenta ainda se aproximar de rodovias e fica impedido de se posicionar em células cruzadas por ferrovias.

c) Residências

Os agentes do tipo residência partem do centróide de sua origem buscando localizar vazios urbanos (em regiões permitidas para ocupação) que fiquem próximas a outras residências.

Caso não ache nenhuma área que possa representar sua posição de equilíbrio após percorrer determinada distância, ele escolhe aleatoriamente uma posição no mapa para reiniciar a procura em sua vizinhança.

Se encontrar mais de uma área possível de ser tornada urbanizada para uso residencial, o agente então escolhe aquela com maior atratividade, sendo calculado pela fórmula:

$$\text{atratividade} = a + b \cdot \text{atratoSOLO} - c \cdot \text{atratoRES} - d \cdot \text{atratoIND} + e \cdot \text{atratoVERDE} - f \cdot \text{atratoCOMSERV} + g \cdot \text{atratoINST} + h \cdot \text{atratoMIST} + i \cdot \text{atratoRODO},$$

onde a, b, c, d, e, f, g, h e i são constantes utilizadas como parâmetros de entrada pelo simulador e que variam de acordo com características da cidade sendo simulada.

3. Estudo de Caso

No caso do sistema proposto, o experimento inicia com a leitura dos mapas matriciais. No exercício de simulação apresentado aqui são lidos dois mapas de ocupação de solo (inicial e final), correspondendo respectivamente aos anos de 1979 e 1988, sendo que esse mapa final serve como referência para calcular a eficácia da simulação.

A partir das diferenças entre os tipos de células dos mapas inicial e final é calculado o número de agentes a serem criados. Com esse número de agentes de cada tipo (residencial, industrial e comércio/serviços) a serem gerados durante a simulação e com os pesos (quantidade de agentes associados) dos centróides pode ser iniciado o processo de criação dos agentes.

O centróide de origem de cada agente é atribuído utilizando-se um processo semelhante ao método da Roleta de Algoritmos Genéticos, fazendo com que os centróides com pesos maiores ocupem fatias maiores da roleta e conseqüentemente tenham maiores probabilidades de serem sorteados como origem.

Uma vez criados todos os agentes e definidos seus centróides de origem inicia-se o posicionamento de cada agente. A seqüência com que são posicionados todos os agentes (independente do tipo) é totalmente aleatória, sendo a cada transição do simulador escolhido um tipo de agente para ser posicionado (industrial, residencial ou de comércio/serviços).

O agente sorteado segue então sua respectiva regra, conforme apresentado na seção 2.4.1, buscando assim uma posição vazia no grid, que represente uma posição de equilíbrio para este no ambiente.

3.1 Resultados das simulações

Na figura 3 é apresentado o resultado de uma das simulações realizadas para o período considerado. Para o melhor caso os agentes posicionados corretamente tiveram uma taxa de 91,09 %, sendo 91,96% para residências, 92,15% para indústrias e 89,18% para comércio/serviços.

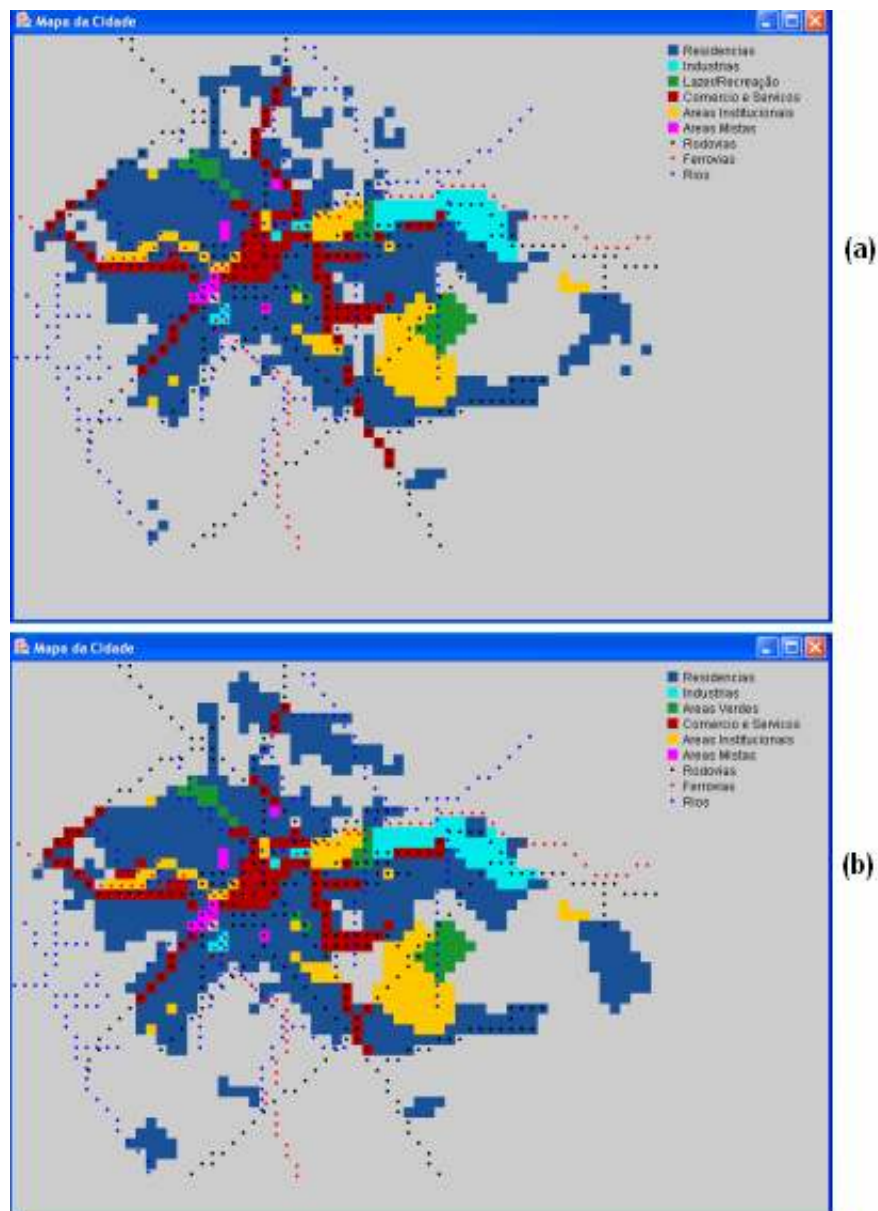


Figura 3. Resultado de uma Simulação (a) e Mapa Real do período (b)

Ao total foram realizadas 50 repetições das simulações com a mesma calibração para a cidade de Bauru, tendo-se nessa amostra uma média de acerto conforme mostrado na tabela 1, a qual também relaciona os resultados obtidos em média pelo trabalho de Almeida (2003), que serviu como base para o estudo.

Tabela 1. Comparação de resultados

Trabalho	Residências	Indústrias	Comércio/Serviços	Posicionados corretamente
Almeida (2003)	78,93%	90,90%	86,20%	85,34%
SimCidade	90,64%	91,09%	85,50%	89,07%

4. Conclusões

A simulação do crescimento urbano auxilia aos planejadores escolherem as melhores opções para o desenvolvimento sustentável das cidades. Na proposta apresentada essa simulação ocorre através de uma abordagem utilizando SMA reativos e baseada na influência que cada agente apresenta sob os demais, nas percepções que eles obtêm do ambiente e na formação de vetores de força que agem sobre os mesmos, simulando os efeitos de atração/repulsão que ocorre em cidades reais.

Devido à dificuldade de obter dados reais de outras cidades de porte médio, optou-se por realizar a simulação utilizando apenas uma cidade como estudo de caso. No entanto, isso não inviabiliza a utilização do simulador para outras cidades com características semelhantes à de Bauru.

Através de exercícios de simulação desse tipo é possível obter resultados satisfatórios, capazes de auxiliar no processo de tomada de decisões, ao mesmo tempo em que possibilitam reduzir custos e riscos aplicáveis em situações reais de planejamento urbano.

A utilização da tecnologia de SMA na simulação de problemas sociais como o de crescimento urbano, de uma maneira geral, contribui significativamente na resolução dos mesmos, permitindo que o fenômeno em estudo seja decomposto em um conjunto de elementos e interações, tornando a construção do modelo menos complexa e sem a presença de limitações encontradas, por exemplo, nos modelos urbanos envolvendo Automatos Celulares, os quais também são amplamente usados em simulação urbana.

No contexto deste trabalho o uso de SMA mostrou-se plenamente aplicável para a modelagem, permitindo a obtenção de resultados que encorajam o prosseguimento da pesquisa e o desenvolvimento de melhorias no protótipo em trabalhos futuros.

Entre esses trabalhos futuros encontra-se o objetivo de implementação do simulador utilizando Applets Java (no momento, apenas o mapa final da simulação está sendo mostrado em Applet), permitindo assim a disponibilização deste na Internet e possibilitando a realização de vários exercícios de simulação para cidades de perfil semelhante ao de Bauru. Para isso, é necessário que o usuário informe as probabilidades de transição de uso do solo do município e os mapas de entrada da localidade a ter seu crescimento urbano simulado.

Além disso, pretende-se incluir a possibilidade de simular a presença de grandes pólos de atração no ambiente sendo simulado, como por exemplo, a inclusão de um

shopping center pelo usuário, permitindo dessa forma a observação do impacto da ação realizada no crescimento urbano da região.

Referências

- Allen, P. M. (1997), *Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity*. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers.
- Almeida, C. M. de. (2003) “Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil”, Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Divisão de Processamento de Imagens, INPE, São José dos Campos.
- Alvares, L. O. C.; Sichman, J. S. (1997). *Introdução aos Sistemas Multiagentes*. In: *Jornada De Atualização em Informática*, Brasília.
- Bastos, A. D. (2007) “Simulação de crescimento urbano utilizando uma abordagem baseada em Sistemas Multiagentes Reativos”, Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre.
- Cheng, J. (2003) “Modelling Spatial and Temporal Urban Growth”, Doctoral Dissertation (Doctoral in Geographical Science) – International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Utrecht University, Enschede, The Netherlands.
- Demazeau, Y.; Muller, J. P. (1990) “Decentralized artificial intelligence”, In: *Decentralized A. I.*, Edited by Y. Demazeau and J. P. Müller, Elsevier, Netherlands.
- Goodchild, M. F.; Parks, B. O.; Steyaert, L. T. (1993), *Environmental Modeling with GIS*, Oxford University Press.
- Lima, R. S. (1998) “Expansão urbana e acessibilidade: o caso das cidades médias brasileiras”, Dissertação (Mestrado em Transportes) – Departamento de Transportes, EESC, São Carlos.
- Portugali, J. (2000), *Self-organization and the city*, Springer-Verlag.
- Spring (2007). *Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas*. <http://www.dpi.inpe.br/spring>.
- Torrens, P. M. (2000) “How should we model complex adaptive urban systems?”, In: *Nexus Projects Workshop*, Yorkshire.
- Verburg, P. H. et al. (2004). A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns. In: *Computers, Environment and Urban Systems*, pages 667-690.
- Wu, F. (2002). Complexity and urban simulation: towards a computational laboratory. In: *Geography Research Forum*, pages 22-40.