

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

ANDRÉ DIAS BASTOS

**Simulação de Uso do Solo Urbano Utilizando  
uma Abordagem Baseada em Sistemas  
Multiagentes Reativos**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do grau de Mestre em Ciência  
da Computação

Prof. Dr. Antonio Carlos da Rocha Costa  
Orientador

Porto Alegre, abril de 2007.

## CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Bastos, André Dias

Simulação de Uso do Solo Urbano Utilizando uma Abordagem Baseada em Sistemas Multiagentes Reativos / André Dias Bastos – Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Computação, 2007.

77 f.:il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação. Porto Alegre, BR – RS, 2007. Orientador: Antonio Carlos da Rocha Costa.

1.Planejamento urbano. 2.Simulação 3.Sistemas Multiagentes.  
I. Costa, Antonio Carlos da Rocha. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. José Carlos Ferraz Hennemann

Vice-Reitor: Prof. Pedro Cezar Dutra Fonseca

Pró-Reitora de Pós-Graduação: Profa. Valquiria Linck Bassani

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Flávio Rech Wagner

Coordenadora do PPGC: Profa. Luciana Porcher Nedel

Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu pai Cléber e padrinho João pelo apoio e ajuda nos momentos mais difíceis.

Ao prof. Rocha Costa pelas sugestões e contribuições para a melhoria do trabalho.

A CAPES pelo apoio em forma de bolsa ao longo do período que estive no Mestrado.

Ao colega Alexandre Paim pela ajuda na implementação do protótipo e aos demais colegas que conviveram comigo durante esses anos diretamente, no laboratório ou dividindo apartamento.

Aos amigos que compreenderam minha ausência, meus problemas e ajudaram a superar barreiras que às vezes pareciam intransponíveis.

A todas pessoas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca pelas críticas e sugestões (prof. Álvaro Moreira, profa. Rejane Frozza e prof. Luis Lamb).

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>8</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>10</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 Objetivos e Justificativas.....	13
1.2 Estrutura.....	14
<b>2 SISTEMAS MULTIAGENTES.....</b>	<b>15</b>
2.1 Características.....	16
2.2 Agentes Inteligentes.....	17
2.3 Arquiteturas de SMA.....	21
2.4 Classificação dos agentes.....	22
2.4.1 Sistemas Multiagentes Reativos.....	22
2.4.2 Sistemas Multiagentes Cognitivos.....	25
2.5 Organização dos agentes.....	26
2.6 Coordenação dos agentes.....	27
2.7 Comunicação entre agentes.....	27
<b>3 PLANEJAMENTO URBANO.....</b>	<b>28</b>
3.1 Crescimento Urbano.....	29
3.2 Formas de Crescimento.....	30
3.3 Vazios Urbanos, Periferias Urbanas e Áreas de Preservação.....	30
3.4 Fatores que influenciam o crescimento.....	31
<b>4 MODELAGEM URBANA.....</b>	<b>34</b>
4.1 Modelos urbanos.....	35
4.2 Modelos baseados em Autômatos Celulares.....	36
4.2.1 Trabalhos relacionados.....	37
4.2.2 Limitações.....	42
4.3 Modelos baseados em Agentes.....	44
4.3.1 Trabalhos relacionados.....	46
4.4 Outros Simuladores e modelos urbanos.....	47

4.4.1	LUCAS .....	48
4.4.2	UPLAN Simulator .....	48
4.4.3	UrbanSim .....	48
<b>5</b>	<b>SIMULADOR .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelo .....</b>	<b>50</b>
5.1.1	Transições de uso do solo .....	52
5.1.2	Probabilidades de transição .....	53
<b>5.2</b>	<b>Descrição dos Agentes .....</b>	<b>54</b>
<b>5.3</b>	<b>Desenvolvimento .....</b>	<b>56</b>
<b>5.4</b>	<b>Comportamento dos Agentes.....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>61</b>
<b>6.1</b>	<b>Simulação do crescimento em Bauru.....</b>	<b>62</b>
6.1.1	Resultado das simulações .....	63
6.1.2	Considerações finais .....	67
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Autômatos Celulares
ACD	Autômatos Celulares Dissipativos
BDG	Banco de Dados Geográficos
BDI	Belief-Desire-Intention
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
IA	Inteligência Artificial
IAD	Inteligência Artificial Distribuída
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LUCAS	Land Use Change Analysis System
LUCC	Land Use and Cover Change
PACO	COordination Pattern
RS	Rio Grande do Sul
SBA	Simulação baseada em agentes
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SMA	Sistemas Multiagentes
SP	São Paulo
UGM	Modelo de Crescimento Urbano

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estrutura de um sistema multiagente .....	16
Figura 2.2: A abordagem de SMA .....	17
Figura 2.3: Modelo geral de agente .....	19
Figura 2.4: Interação de agentes .....	20
Figura 2.5: Arquitetura BDI .....	22
Figura 2.6: Arquitetura em camadas .....	22
Figura 2.7: Agente reativo .....	23
Figura 2.8: Agente cognitivo .....	25
Figura 2.9: Visão da organização de agentes .....	26
Figura 3.1: Formas de crescimento urbano .....	30
Figura 4.1: Tipos de vizinhança .....	36
Figura 4.2: Organização dos atributos naturais .....	38
Figura 4.3: Organização dos atributos urbanos .....	39
Figura 4.5: Integração entre o modelo Multi-escala e SIG.....	41
Figura 4.6: Vizinhança circular .....	42
Figura 4.7: regras do modelo.....	46
Figura 4.8: regras do modelo.....	47
Figura 5.1: Estrutura do simulador .....	49
Figura 5.2: Mapas de uso do solo de Bauru em 1979 (esq) e 1988 (dir).....	51
Figura 5.3: Centróides das áreas.....	55
Figura 5.5: Conversão de mapa vetorial para matricial.....	57
Figura 5.6: Mapa vetorial (a) e matricial (b) do uso do solo em 1988 .....	58
Figura 6.1: Cidade de Bauru.....	61
Figura 6.2: Mapa com somente os agentes posicionados.....	63
Figura 6.3: Resultado de uma Simulação (a) e Mapa Real do período (b).....	64
Figura 6.4: Mapa com simulação de residências.....	65
Figura 6.5: Mapa de residências 1988.....	65
Figura 6.6: Mapa com simulação de indústrias.....	66
Figura 6.7: Mapa de indústrias 1988.....	66
Figura 6.8: Mapa com simulação de comércio / serviço.....	67
Figura 6.9: Mapa de comércio / serviço 1988.....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Matriz de probabilidades de transição para Bauru (1967-1979) .....	53
Tabela 5.2: Matriz de probabilidades de transição para Bauru (1979-1988) .....	54
Tabela 5.3: Matriz de probabilidades de transição para Bauru (1988-2000) .....	54
Tabela 6.1: Taxas de acerto das simulações .....	63
Tabela 6.2: Comparação de resultados .....	68

## 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, uma vez que, o entendimento das dinâmicas desse fenômeno é um pré-requisito para modelar e prever tendências futuras de mudanças de uso do solo/cobertura da terra (LUCC) e seus impactos ecológicos.

Como as cidades são sistemas complexos, que envolvem vários atores com diferentes padrões de comportamento, uma das mais promissoras classes de modelos urbanos designados para simular e analisar mudanças de uso do solo são as baseadas em Sistemas Multiagentes (SMA).

Sendo assim, este trabalho descreve uma proposta de abordagem baseada em agentes reativos aplicados na tarefa de simulação de crescimento urbano para a cidade de Bauru/SP, utilizando dados geográficos, extraídos de imagens de satélite, da ocupação e utilização efetiva do uso do solo dessa cidade em um período de aproximadamente trinta e cinco anos, para calibrar e validar o simulador.

**Palavras-Chave:** Planejamento urbano, Simulação, Sistemas Multiagentes.

## **Land use simulation based in Multi-Agents Reactive Systems**

### **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. Understanding the dynamics of this phenomenon is a prerequisite for modelling and forecasting future trends of urban land use/cover change (LUCC) and its ecological impacts.

Cities being complex systems, which involve various actors with different patterns of behaviour, one of the most promising class of urban models designed to simulate and analyze LUCC are based in Multi-Agent System (MAS).

Hence, this work 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 city in a time span of approximately thirty five years, to calibrate and validate the simulator developed.

**Keywords:** Urban Planning, Simulation, Multi-Agent System.

# 1 INTRODUÇÃO

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). Com o crescimento acelerado e a expansão da ocupação sobre áreas não urbanizadas e de proteção, 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 a curto e médio prazo.

A rápida urbanização e crescimento das cidades requerem um entendimento científico de padrões e processos de crescimento urbano complexos. Esse conhecimento é crucial para o gerenciamento de uso sustentável e planejamento do desenvolvimento urbano (CHENG, 2003).

Toda ação de planejamento, ordenação ou monitoramento do espaço urbano deve incluir a análise dos diferentes componentes do ambiente e seu inter-relacionamento, devendo também ser precedidas de uma análise dos impactos causados (CAMARA, 2006). Conforme Almeida (2003), o planejamento estratégico local visa o melhor entendimento das dinâmicas que ocorrem na esfera física de áreas urbanas, além da conseqüente concepção de ferramentas e habilidades para antecipar prováveis eventos que terão lugar no ambiente urbano em um futuro próximo.

Os processos de planejamento urbano são usualmente expressos através de modelos, os quais permitem uma aproximação da realidade e fornecem uma representação mais estruturada dos fenômenos em estudo. A escolha de um determinado tipo deve ser feita com base na aplicação que se deseja e na disponibilidade de dados básicos (CAMARA, 2006; GOODCHILD, 1993).

Através desses modelos é possível simular operações e reações de processos do mundo real, auxiliando na exploração de hipóteses e análise do funcionamento de processos ambientais, assim como na investigação das respostas do sistema a possíveis mudanças (GOODCHILD, 1993). 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 (PORTUGALI, 2000).

A modelagem urbana representa uma cidade de modo simplificado, facilitando a compreensão de determinados aspectos e suas relações com o conjunto. Além disso, ela ajuda os planejadores, políticos e a comunidade em geral a prever, prescrever e inventar o futuro urbano (BATTY, 1976; POLIDORI, 2004). Cabe lembrar, porém, que

conforme justificado em Almeida (2003) é inadequado lidar com prognósticos de longo prazo em relação à modelagem de mudanças do uso do solo urbano.

O espaço de tempo sobre o qual uma predição é válida é uma função que depende da persistência do fenômeno observado, podendo-se considerar um intervalo de 10 a 15 anos como sendo consistente para a maioria das mudanças de uso do solo. Entretanto, mudanças políticas, institucionais e condições econômicas podem causar mudanças rápidas na taxa ou direção da mudança de uso do solo (PARKER, 2001).

O processo de crescimento urbano é de difícil apreensão pela elevada quantidade de fatores presentes na cidade e na paisagem que integra, pelas suas interinfluências e diferentes escalas, pelo tamanho da cidade e pela ocorrência de mudanças (ALLEN, 1997). Devido ainda ao grande número de atores que interagem uns com os outros em um nível microscópico e as regras espaciais, ou seja, o conjunto de todas possíveis regras, ser extremamente complexo, os sistemas urbanos são considerados sistemas também complexos (WU 2002).

Para enfrentar essas dificuldades, um caminho é o de reproduzir a cidade e a paisagem artificialmente, construindo um modelo e realizando simulações, de modo a auxiliar na construção de explicações morfológicas sobre a dinâmica urbana (POLIDORI, 2004). A complexidade presente no processo evolutivo das cidades justifica o uso desse tipo de simulação baseada em computador, uma vez que, a simulação é freqüentemente a única maneira prática de estudar um sistema dinâmico como o dos ambientes urbanos (WU 2002).

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

Ao tratar do crescimento urbano, interessa representar o processo de produção espacial convertendo solo não urbanizado em urbanizado e acrescentando (ou substituindo) edificações, capturando fisicamente o processo de evolução urbana. Uma vez capturado e reproduzido artificialmente esse processo, exercícios de simulação podem ser realizados (GRANERO, 2002).

As regras para sistemas urbanos são evolucionárias e podem ser redefinidas de acordo com a interação entre os componentes (ou agentes) (WU, 2002). Modelos como o de autômatos celulares (AC), microsimulação e sistemas multiagentes (SMA) são cada vez mais aplicados em sistemas urbanos, embora sejam diferentes na forma de caracterizar as dinâmicas urbanas.

A microsimulação enfatiza a desagregação de comportamentos de acordo com escolhas individuais e tomadas de decisão, apresentando vantagens de seu uso na modelagem de viagens em modelos urbanos (WU, 2002).

Os autômatos, por sua vez, enfatizam o chaveamento do estado de uma célula sob a influência da vizinhança da célula. Para construir modelos que representem problemas geográficos mais práticos, AC complexos são requeridos, uma vez que, os tradicionais precisam ser integrados com mais estados, ter uma vizinhança ampla e mais restrições, com regras de transição complexas. AC mais complexos podem ter a habilidade de modificar a forma como as células reagem a mudanças no ambiente (RODRIGUES, 1998; WU, 2002).

As transições nos AC ocorrem ainda única e simplesmente em função do que acontece na vizinhança imediata de uma dada célula. Nesse sentido, inexistente ação à distância, pois a dinâmica inerente aos autômatos e que produz fenômenos emergentes a nível global é inteiramente um produto de decisões locais, as quais desconsideram tudo o que se passa além da sua vizinhança reconhecidamente imediata (BATTY, 2000).

Por outro lado, a utilização da tecnologia de SMA na simulação de problemas sociais como o de crescimento urbano, contribui significativamente, 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 nos AC (como será mostrado na seção 4.3.1). Além disso, propicia a obtenção de resultados encorajadores, como pode ser comprovado por inúmeros trabalhos baseados em agentes em diversas áreas urbanas.

## 1.1 Objetivos e Justificativas

As cidades são sistemas complexos não lineares onde o processo de desenvolvimento exibe características de complexidade como dimensão fractal, auto-similaridade, auto-organização e emergência. Entretanto essas complexidades características são difíceis de serem modeladas usando métodos tradicionais, os quais são estáticos, lineares, agregados e baseados em teorias de sistemas simples top-down (CHENG, 2003-a). Assim sendo, para modelar sistemas urbanos a melhor maneira é a utilização de tecnologias como os SMA permitindo um desenvolvimento dinâmico, não-linear, desagregado e bottom-up.

Para a modelagem do comportamento dinâmico de mudanças de uso do solo e cobertura da terra (LUCC – Land Use and Cover Change) adota-se neste trabalho uma abordagem onde agentes reativos atuam sobre camadas representando a infraestrutura da cidade utilizada como estudo de caso.

Sendo assim, o objetivo principal do trabalho consiste em desenvolver um ambiente multiagente para simular essas mudanças para cidades de porte médio como Bauru/SP. Além disso, como objetivo secundário está o levantamento de características inerentes ao crescimento urbano de cidades semelhantes estudadas ao longo da pesquisa, os quais pudessem ser incorporados no desenvolvimento do simulador de modo a torná-lo o mais próximo possível da realidade encontrada.

Cabe salientar que o enfoque do trabalho está concentrado no caso das cidades médias, uma vez que, conforme explicado por Junior (1995), presume-se que as cidades grandes contam em geral, com um maior número de estudos e equipes preparadas para enfrentar os problemas de planejamento urbano, enquanto que as cidades pequenas ainda não sofrem problemas sérios de crescimento. As cidades médias, por outro lado, enfrentam problemas que não exigem soluções muito sofisticadas por estarem em processo inicial, sendo plenamente viáveis ações de caráter preventivo, para que seu crescimento ocorra de forma planejada e controlada.

Da mesma forma que o apresentado em Lima (1998), considera-se aqui que as cidades médias são aquelas cuja população esteja na faixa entre 100 e 500 mil habitantes, embora a classificação como sendo de porte médio varie de acordo com diversos autores.

## 1.2 Estrutura

A dissertação está organizada em 7 capítulos, incluindo esta introdução, da seguinte forma:

- No capítulo 2 é fornecida uma visão geral das características dos Sistemas Multiagentes, de modo a facilitar a compreensão do funcionamento do protótipo do simulador e do estudo de caso proposto no trabalho.
- No capítulo 3 mostra-se a importância de ações de planejamento urbano como forma de prever o futuro das cidades, auxiliando no desenvolvimento das mesmas e na avaliação dos impactos ambientais causados pelo crescimento urbano. São abordadas também características que influenciam no crescimento urbano das cidades e suas relações com a paisagem natural.
- No capítulo 4 são apresentados alguns simuladores disponíveis para o crescimento urbano e modelos de mudanças de uso e cobertura da terra.
- Na seqüência, o capítulo 5 apresenta o simulador proposto neste trabalho e as regras adotadas para a sua concepção.
- Para aproximar as simulações de crescimento do que de fato ocorre numa cidade real, o capítulo 6 apresenta um estudo de caso para o município de Bauru/SP.
- Por fim, as conclusões são apresentadas no capítulo 7, sendo seguidas pelas referências bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho.

## 2 SISTEMAS MULTIAGENTES

Os Sistemas Multiagentes (SMA) formam uma das áreas de pesquisa que compõe a Inteligência Artificial Distribuída (IAD). Na IAD a ênfase é no trabalho conjunto de uma sociedade de agentes para a resolução de problemas, os quais podem ser muito complexos ou grandes para serem solucionados por um processo único, podendo necessitar de conhecimentos de vários domínios e possuir dados fisicamente distribuídos (FROZZA, 1997).

Dessa forma, distribuir tarefas entre agentes de um SMA facilita e contribui para resolver os mesmos, uma vez que, eles podem ser usados para reduzir o processo de resolução do problema através da divisão do conhecimento necessário em sub-problemas, associando-se um agente inteligente para cada um destes e coordenando-se as ações desses agentes.

A área de SMA estuda modelos genéricos a partir dos quais pode-se conceber agentes, organizações e interações, de modo a poder instanciar tais conceitos quando se deseja resolver um problema particular (ALVARES, 1997). O enfoque principal é prover mecanismos para a criação de sistemas computacionais a partir de entidades de software autônomas (agentes), que interagem através de um ambiente compartilhado por todos os agentes de uma sociedade, e sobre o qual estes agentes atuam, alterando seu estado (BORDINI, 2001).

Cada SMA é composto por dois ou mais agentes que interagem ou trabalham em conjunto para realizarem uma determinada tarefa ou uma série de objetivos, cada qual com diferentes capacidades de percepção e ação no mundo. Com a capacidade dos agentes poderem ser projetados para resolverem qualquer tipo de problema, torna-se possível à reutilização de componentes para o projeto de aplicações similares.

Conforme Lesser (1999), são considerados sistemas computacionais centrados na resolução de problemas complexos, tendo sua investigação focada no desenvolvimento de princípios e modelos computacionais para construir, descrever, implementar e analisar as formas de interação e coordenação de agentes em sociedades de reduzida ou elevada dimensão.

Para o funcionamento de uma sociedade e o cumprimento do objetivo global requer-se que os objetivos, habilidades e planos individuais de cada agente sejam coordenados de forma que se atinja a resolução conjunta dos problemas. Não é suficiente, neste caso, que agentes compartilhem conhecimento, problemas e soluções, mas faz-se necessário que eles interajam e até mesmo revejam seus objetivos e planos em função do objetivo global (GARCIA, 1998).

Cada agente é basicamente um elemento capaz de resolução autônoma de problemas e opera assincronamente, com respeito aos outros agentes. Para que um agente possa

operar como parte do sistema, é necessária a existência de uma infra-estrutura que permita a comunicação e/ou interação entre os agentes que compõem o SMA, como mostrado na figura 2.1.

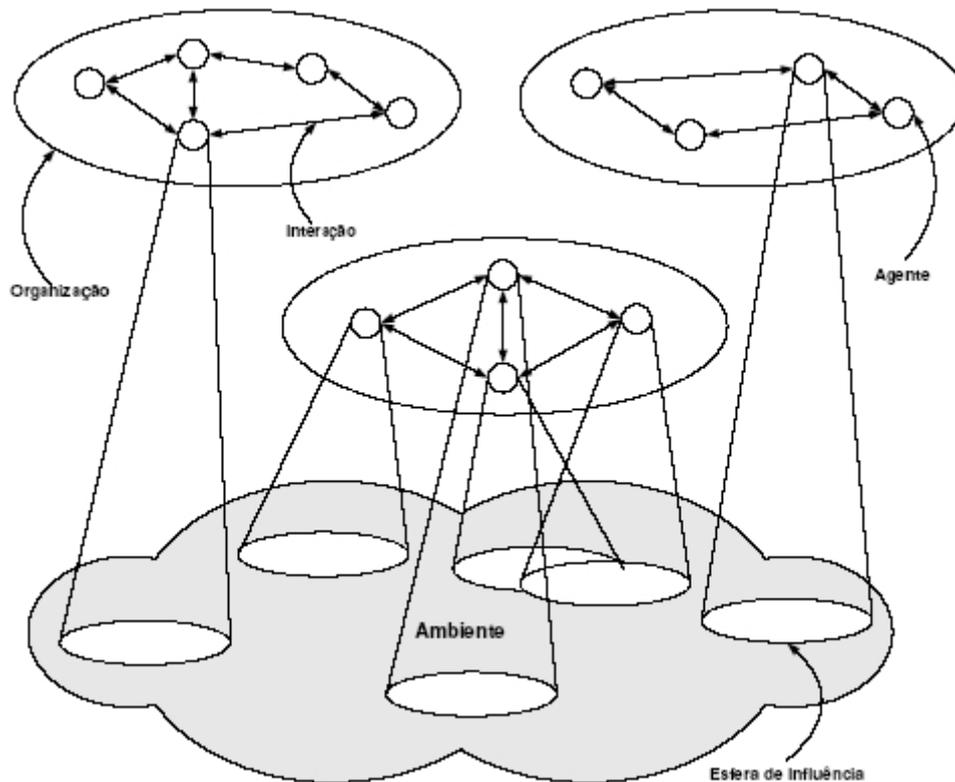


Figura 2.1: Estrutura de um sistema multiagente

## 2.1 Características

Uma abordagem baseada em SMA para a resolução de problemas é representada na figura 2.2, onde é possível perceber que o ciclo de vida passa por duas etapas: concepção e resolução.

Do ponto de vista da primeira fase, os agentes, suas interações e sua organização são concebidos independentemente de um problema particular a ser resolvido, tornando possível a reutilização de tais componentes quando se desejar projetar aplicações similares (ALVARES, 1997). Na etapa de resolução, por sua vez, um grupo de agentes adota então esses modelos para resolver os problemas que lhe são apresentados.

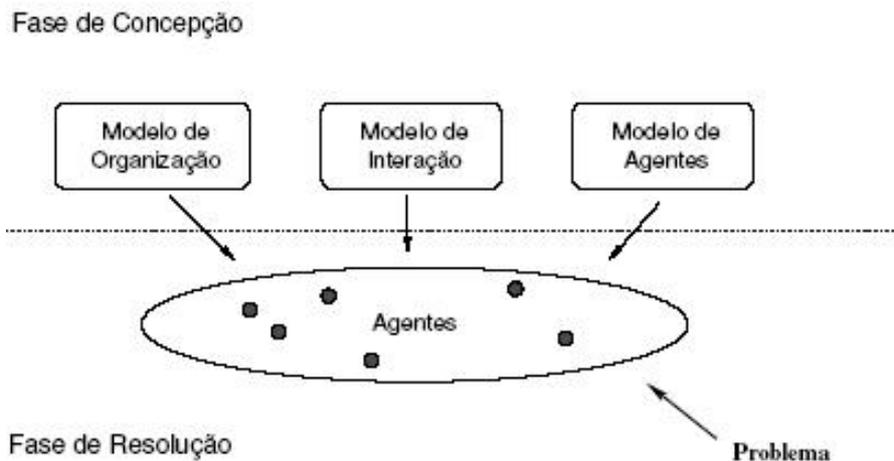


Figura 2.2: A abordagem de SMA (SICHTMAN, 1995)

A partir do descrito, decorrem algumas características dos SMA (ALVARES, 1997) como: o fato da interação entre os agentes não ser projetada anteriormente (busca-se definir protocolos que possam ser utilizados em situações genéricas), a decomposição de tarefas para solucionar um dado problema poder ser feita pelos próprios agentes (os quais são concebidos de forma independente) e não existir um controle centralizado da resolução do problema.

Dessas características, pode-se inferir algumas vantagens (HÜBNER, 2003):

- **Viabilizam sistemas adaptativos e evolutivos:** os SMA têm capacidade de adaptação a novas situações, tanto pela eliminação e/ou inclusão de novos agentes ao sistema quanto pela mudança da sua organização.
- **É uma metáfora natural para a modelagem de sistemas complexos e distribuídos:** em muitas situações tanto o conhecimento, quanto o controle e os recursos estão distribuídos. Quanto à modelagem do sistema, a decomposição de um problema e a atribuição dos sub-problemas a agentes permite um alto nível de abstração e independência entre as partes do sistema (JENNINGS, 1998).
- **Tira proveito de ambientes heterogêneos e distribuídos:** agentes com arquiteturas diferentes, que funcionam em plataformas diferentes, distribuídas em uma rede de computadores, podem cooperar na resolução de problemas. Isso permite o uso das potencialidades particulares de cada arquitetura e, pela distribuição, melhora o desempenho do sistema.
- **Permite conceber sistemas abertos:** os agentes podem migrar entre sociedades, isto é, agentes podem sair e entrar em sociedades, mesmo que desenvolvidos por projetistas diferentes e tendo objetivos distintos. Tal abertura permite a evolução e a adaptabilidade do sistema.

## 2.2 Agentes Inteligentes

Existem inúmeras definições para agentes, não havendo um consenso sobre o termo entre os pesquisadores. Para Ferber (1990), por exemplo, cada agente é uma entidade real ou virtual imersa num ambiente sobre o qual é capaz de agir, que dispõe de uma

capacidade de percepção e de representação parcial deste ambiente, que pode se comunicar com outros agentes e que possui um comportamento autônomo, consequência de suas observações, de seu conhecimento e das suas interações com outros agentes.

A autonomia significa que os agentes têm controle sobre suas ações e estados internos para alcançar suas metas. Wooldridge (1999) define os agentes inteligentes como sendo capazes de atuar com flexibilidade, o que implica que eles são dirigidos aos objetivos e capazes de interação com outros agentes e possuem um ambiente em comum.

Wooldridge (1995) agrupa as características dos agentes em duas noções denominadas fraca e forte. Na noção fraca o termo é empregado em sua forma mais geral para denotar uma entidade baseada em hardware ou (mais frequentemente) em software, com as seguintes propriedades:

- **Autonomia:** os agentes funcionam sem a intervenção direta de operadores de qualquer tipo e possuem algum tipo de controle sobre suas ações e seu estado interno.
- **Habilidade social:** por impossibilidade de resolução de certos problemas ou por outro tipo de conveniência, interagem com outros agentes (humanos ou computacionais) por meio de alguma linguagem de comunicação, para completarem a resolução de seus problemas, ou ainda para auxiliarem outros agentes.
- **Reatividade:** os agentes percebem seu ambiente (que pode ser o mundo físico, um usuário através de uma interface gráfica, uma coleção de outros agentes, a internet, entre outros) e respondem aos estímulos dele recebidos.
- **Iniciativa:** os agentes não somente reagem ao seu ambiente, mas também devem exibir comportamento orientado à satisfação de seus objetivos.
- **Continuidade temporal:** os agentes são processos em execução contínua, que tanto podem estar ativos (em foreground), quanto adormecidos (em background).
- **Orientação a objetivos:** um agente deve ser capaz de lidar com tarefas complexas em alto nível. A decisão de como a tarefa deve ser segmentada em sub-tarefas menores, a ordem ou de que forma estas sub-tarefas devem ser executadas deve ser tomada pelo próprio agente.

Na noção forte um agente é visto como uma entidade que, além das propriedades apresentadas, é implementada empregando conceitos mais usualmente aplicados a seres humanos e caracterizados por estados mentais ou emoções. Em geral os que se enquadram nessa noção possuem uma ou mais das seguintes propriedades:

- **Mobilidade:** é a habilidade que um agente possui de movimentar-se em uma rede, ocupando diferentes nodos e recursos ao longo do tempo.
- **Benevolência:** é a idéia de que não possui objetivos conflitantes e que cada agente irá sempre tentar fazer o que lhe for pedido.
- **Racionalidade:** é a hipótese de que os agentes irão agir de forma a atingir seus objetivos e não contra eles, pelo menos dentro do alcance de suas crenças.

- **Adaptabilidade:** um agente deve ser capaz de adaptar-se aos hábitos, métodos de trabalho e preferências de seus usuários.
- **Colaboração:** um agente não deve aceitar (e executar) instruções impensadamente. Deve levar em conta que seres humanos cometem erros (ao dar, por exemplo, uma ordem com objetivos conflitantes, ao omitir informação importante e ao fornecer informações ambíguas). Assim, deve também ser capaz de recusar ordens que possam produzir uma sobrecarga inaceitável na rede ou que ocasionem danos a outros usuários.

Dado um determinado sistema, os agentes seriam cada uma de suas entidades ativas, enquanto que as passivas são o ambiente, que é o espaço onde os agentes atuam, levando em conta tudo que não é agente e tem influência sobre o sistema.

O conjunto de agentes forma uma sociedade, sendo que cada agente desta raciocina sobre o ambiente, sobre os outros agentes e decide racionalmente quais objetivos deve perseguir, quais ações deve tomar (BAUJARD, 1992).

Na figura 2.3 é mostrado um modelo geral de agente apresentado por Wooldridge (1999), no qual o agente através da interação com o ambiente recebe percepções e executa ações.

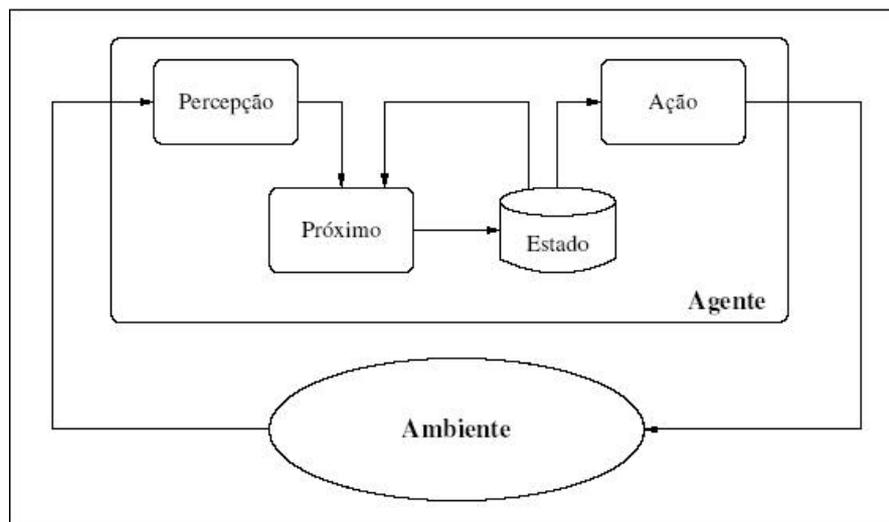


Figura 2.3: Modelo geral de agente (WOOLDRIDGE, 1999)

Um agente pode interagir com seres humanos, outros agentes, sistemas de software (que não são agentes) e elementos de hardware do mundo físico, como mostrado na figura 2.4 (onde a letra “A” representa agentes).

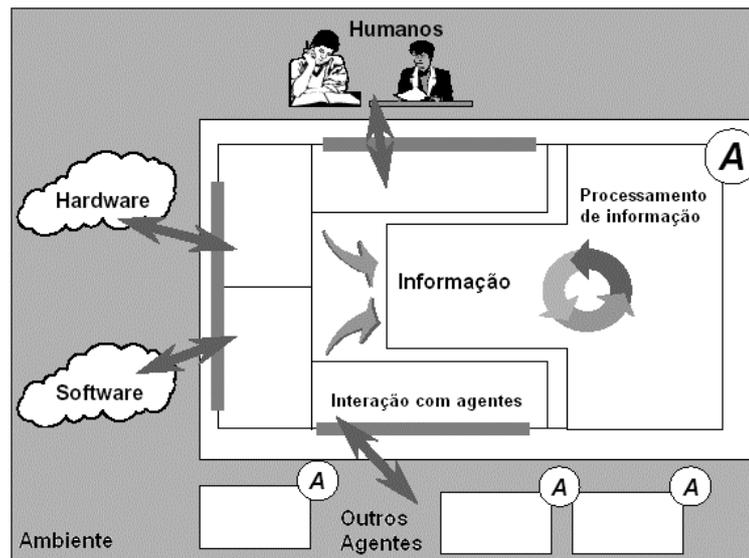


Figura 2.4: Interação de agentes

Bordini (2001) relaciona uma série de aspectos importantes para a compreensão do que é um agente no contexto de SMA com base em conceitos apresentados por vários autores. Assim, um agente seria um sistema computacional capaz de:

- **Percepção:** o agente é capaz de perceber alterações no ambiente.
- **Ação:** as alterações no ambiente são provenientes das ações que os agentes realizam constantemente no ambiente. Um agente age sempre com o intuito de atingir seus objetivos (motivação), ou seja, com o intuito de transformar o ambiente de seu estado atual em um outro estado desejado pelo agente.
- **Comunicação:** umas das ações possíveis de um agente é comunicar-se com outros agentes da sociedade. Como os agentes precisam coordenar suas ações a comunicação entre eles é essencial.
- **Representação:** o agente possui uma representação simbólica explícita daquilo que acredita ser verdade em relação ao ambiente e aos outros agentes que compartilham esse ambiente.
- **Motivação:** como em SMA as entidades são (ou podem ser) autônomas, é essencial que exista não só uma representação do conhecimento do agente, mas também uma representação dos desejos ou objetivos (isto é, aspectos motivacionais) dele; em termos práticos, isto significa ter uma representação de estados do ambiente que o agente almeja alcançar. Como consequência, o agente age sobre o ambiente por iniciativa própria para satisfazer esses objetivos.
- **Deliberação:** dada uma motivação e uma representação do estado atual do ambiente em que se encontra o agente, este tem que ser capaz de decidir, dentre os estados de ambiente possíveis de ocorrerem no futuro, quais de fato serão os objetivos a serem seguidos por ele.
- **Raciocínio e aprendizagem:** técnicas de IA (Inteligência Artificial) clássica para, por exemplo, raciocínio e aprendizagem podem ser estendidas para

múltiplos agentes, aumentando significativamente seu desempenho, como no aspecto de deliberação.

### 2.3 Arquiteturas de SMA

Uma arquitetura de software constitui a principal parte do projeto de uma aplicação, representando como as partes que compõe o sistema interagem, onde ocorrem essas interações e quais são as principais propriedades dessas partes. Através desse mecanismo obtém-se uma visão do funcionamento do sistema, incluindo aspectos como a performance, confiabilidade, portabilidade, escalabilidade e interoperabilidade.

No contexto de agentes, a arquitetura refere-se ao modo de organização e estruturação dos módulos dentro de um agente. Em Wooldridge (1999) as arquiteturas para agentes são separadas em quatro grupos:

- **Arquitetura baseada em lógica:** na qual a tomada de decisões pelos agentes é feita através de deduções lógicas. Um comportamento inteligente do sistema é gerado através de uma representação simbólica do ambiente, do comportamento desejado para o agente e da manipulação sintática dessa representação.
- **Arquitetura reativa:** a tomada de decisões é implementada na forma de um mapeamento de situações e ações. Nesse tipo de arquitetura não existe uma representação simbólica centrada de um modelo de mundo, nem se utiliza raciocínio simbólico complexo. Os agentes que a compõe serão apresentados com mais detalhes na subseção 2.4.1.
- **Arquitetura BDI (Belief-Desire-Intention):** a tomada de decisão depende da manipulação de estruturas de dados representando crenças, desejos e intenções, conforme mostrado na figura 2.5. Segundo Jennings (1998), as crenças seriam as informações que os agentes têm sobre o ambiente, os desejos seriam os mundos possíveis os quais o agente pode escolher e se comprometer a tornar realidade, enquanto as intenções representam estados que o agente pretende alcançar e que tem recursos comprometidos para este fim.

Através da função de revisão de crenças são captadas as informações do ambiente (percebidas pelos sensores), sendo estas analisadas com base nas crenças anteriores do agente, gerando-se um conjunto atualizado de crenças consistentes, as quais reflitam o novo estado do ambiente. Com base nas crenças atuais e intenções existentes a função de geração de opções determina então quais alternativas de estados de mundo atingíveis (seus desejos) estão disponíveis para o agente.

O processo de deliberação do agente é representado pelo filtro, o qual determina as intenções do agente com base em suas crenças e desejos atualizados e nas intenções já existentes. O seletor de ações, por sua vez, determina a ação a ser executada com base nas intenções correntes.

- **Arquitetura em camadas:** a tomada de decisões é feita em várias camadas de software, que analisam o ambiente em diferentes níveis de abstração, apresentando hierarquia entre a interação das camadas. Esse tipo de arquitetura pode ser horizontal ou vertical. Na vertical apenas uma camada tem acesso às informações sensoriais, sendo estas processadas e repassadas às camadas

superiores, até chegar à camada que tem controle sobre a saída de ações. Enquanto que na horizontal, todas as camadas têm acesso às entradas sensoriais e saídas de ações, como mostrado na figura 2.6.

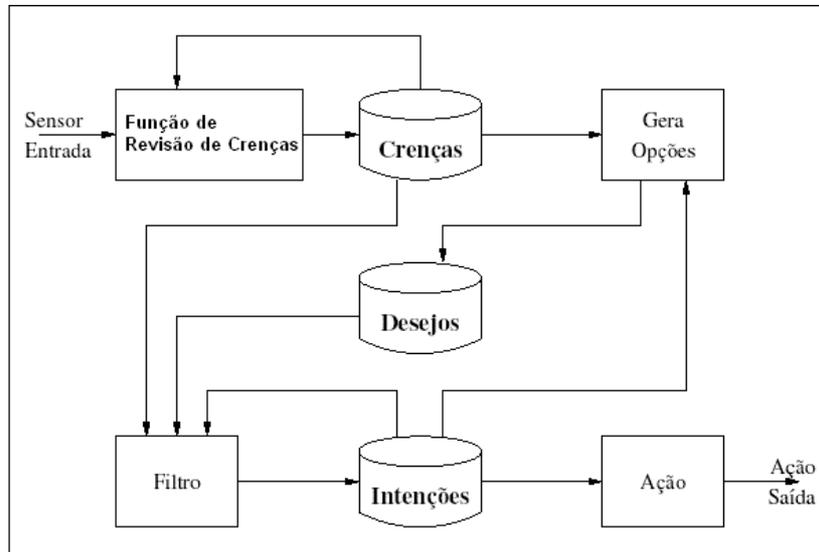


Figura 2.5: Arquitetura BDI (WOOLDRIDGE, 1999)

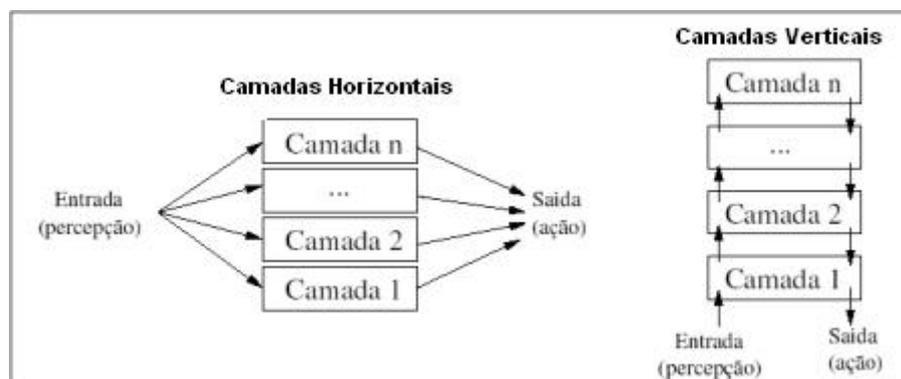


Figura 2.6: Arquitetura em camadas (JENNINGS, 1998)

## 2.4 Classificação dos agentes

Os SMA podem ser classificados didaticamente em duas classes, que serão apresentadas a seguir. A primeira é a dos agentes reativos, na qual trabalha-se com o desenvolvimento de sistemas que utilizam um grande número de agentes para a resolução de problemas. A segunda é a dos agentes cognitivos, que ao contrário da anterior, trabalha com poucos agentes responsáveis por realizar tarefas, que em geral, são mais complexas.

### 2.4.1 Sistemas Multiagentes Reativos

Os SMA reativos têm como influência a entomologia (ciência que estuda os insetos) e a etologia (ciência que estuda o comportamento dos animais) e segue o princípio de

que um comportamento inteligente em um sistema pode emergir da interação entre um grande número de agentes individualmente muito simples.

Seu modelo de funcionamento é formado por estímulo-resposta (ação-reação), sendo suas ações baseadas nas percepções que tem do ambiente e em um conjunto fixo de regras. Além disso, a concepção do problema tratado é feita pelos modelos reativos como sendo um conjunto de agentes em interação, cada um deles com os seus próprios objetivos (comportamentos) individuais (ALVARES, 1997).

As propriedades que caracterizam esse tipo de SMA são as seguintes, segundo Ferber (1990):

- Não há representação explícita de conhecimento: o conhecimento dos agentes é implícito e se manifesta através do seu comportamento.
- Não há representação do ambiente: o seu comportamento se baseia no que é percebido a cada instante do ambiente, mas sem uma representação explícita deste.
- Não há memória das ações: os agentes reativos não mantêm um histórico de suas ações, de forma que o resultado de uma ação passada não exerce influência sobre as suas ações futuras.
- Organização etológica: a forma de organização dos agentes reativos é similar a dos animais que vivem em grande comunidades (como por exemplo, cupins, abelhas e formigas), em oposição à organização social dos sistemas cognitivos.
- Grande número de membros: os SMA reativos têm, em geral, um grande número de agentes, da ordem de dezenas, centenas ou mesmo milhões de agentes.

Na figura 2.7 é apresentada uma arquitetura proposta por Russel (1995) para o modelo reativo, onde os sensores caracterizam as percepções que o agente obtém do ambiente e os atuadores refletem as ações a serem executadas.

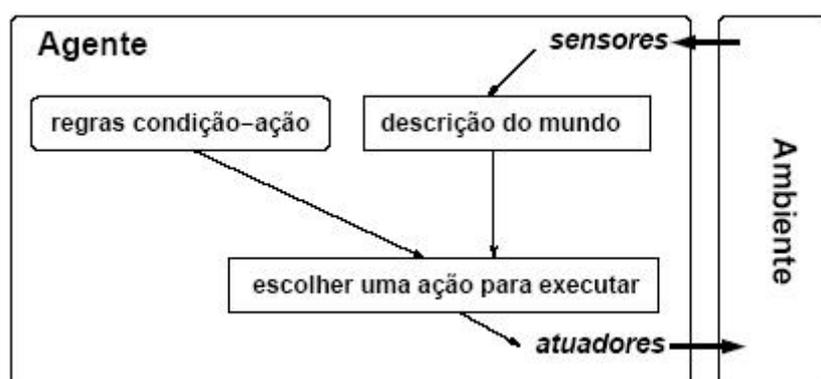


Figura 2.7: Agente reativo (RUSSEL, 1995)

O modelo de referência para arquiteturas reativas é a arquitetura de subsunção apresentada por Brooks (1986), que estabelece prioridades entre a execução dos comportamentos atribuídos aos agentes (ALVARES, 1997). Além desta, destacam-se ainda entre os modelos de SMA reativos o Modelo de Funcionalidade Emergente

(STEELS, 1990), o Eco-Resolução (FERBER, 1991) e o PACO (DEMAZEAU, 1990), os quais serão apresentados a seguir.

#### *2.4.1.1 Arquitetura de Subsunção*

Nessa arquitetura, a tomada de decisão do agente deve ser realizada através de um conjunto de comportamentos direcionados para a execução de tarefas, sendo que, vários comportamentos podem ser acionados em paralelo. Dessa forma, um mecanismo seleciona, entre as diferentes ações possíveis, aquela que é considerada a melhor em cada momento.

O controle é decomposto em camadas ou módulos que correspondem aos comportamentos elementares, existindo uma hierarquia de prioridade entre elas (ALVARES, 1997). Os níveis inferiores são prioritários em relação aos comportamentos dos níveis superiores, devido ao fato das ações das camadas mais altas representarem comportamentos mais abstratos e elaborados.

#### *2.4.1.2 Modelo de Funcionalidade Emergente*

Esse modelo toma como base idéias da arquitetura de subsunção (tais como a organização dos comportamentos em níveis, de acordo com prioridades de execução) e o princípio da funcionalidade emergente, no qual um sistema formado por componentes muito simples pode exibir um comportamento, como um todo, mais organizado do que o das suas partes individualmente, e onde novas funcionalidades não expressamente previstas podem emergir da interação entre os agentes participantes (ALVARES, 1997).

#### *2.4.1.3 Modelo da Eco-Resolução*

Um problema é definido como uma população de agentes cujo conjunto dos comportamentos tende a atingir um estado estável (solução do problema), sendo que, cada agente dispõe de um conjunto de comportamentos elementares predefinidos que o levam a procura de um estado de satisfação (ALVARES, 1997).

Durante a busca os agentes podem ser incomodados por outros agentes. Nesse caso, eles agridem os que os estão incomodando, os quais são obrigados a fugir. Nessa fuga, eles podem ser levados a agredir outros agentes que os estão atrapalhando, prosseguindo essa operação até que os agentes que estão incomodando se desloquem efetivamente.

#### *2.4.1.4 Modelo PACO*

No modelo PACO um problema é definido por um conjunto de agentes cujo comportamento é baseado em interações entre si e com o ambiente. Cada interação é modelada sob a forma de forças, obrigando os agentes a se deslocarem no ambiente até atingirem um estado de equilíbrio, correspondendo à posição estável de cada um deles no mesmo.

A detecção de que uma solução foi encontrada é feita por um observador externo e não pelos próprios agentes, uma vez que um agente isoladamente não sabe se os outros agentes estão em uma posição estável ou não (ALVARES, 1997).

Cada agente possui um campo de percepção (que guia as interações entre os agentes e o ambiente), um campo de comunicação (que guia as interações entre os agentes, influenciando na execução de uma ação) e um campo de ação (que guia as ações de deslocamento do agente no ambiente). Além disso, os agentes estão associados a

atributos responsáveis por indicar a importância do agente no sistema e de sua solução parcial sobre a global do problema, assim como a estabilidade dos mesmos no ambiente para atingirem a parcial.

#### 2.4.2 Sistemas Multiagentes Cognitivos

Nos modelos cognitivos, normalmente os agentes possuem um estado mental e funcionam racionalmente, ou seja, raciocinam para construir um plano de ações que leva a um objetivo pretendido (HÜBNER, 2003).

As principais características desses agentes são as seguintes (FERBER, 1990):

- Mantêm uma representação explícita de seu ambiente e dos outros agentes da sociedade.
- Podem manter um histórico das interações e ações passadas, tendo assim memória do passado.
- A comunicação entre os agentes é feita de modo direto, através do envio e recebimento de mensagens.
- Seu mecanismo de controle é deliberativo, ou seja, tais agentes raciocinam e decidem sobre quais objetivos devem alcançar, que planos seguir e quais ações devem ser executadas num determinado momento.
- Seu modelo de organização é baseado em modelos sociológicos, como as organizações humanas.
- Uma sociedade contém tipicamente poucos agentes, na ordem de uma dezena.

Na figura 2.8 é apresentada uma arquitetura proposta por Demazeau (1990) para o modelo cognitivo de agentes, onde é possível perceber que o conhecimento que o agente possui é formado a partir da sua percepção do ambiente e da comunicação com outros agentes. A partir do conhecimento e uma meta o agente gera então um conjunto de possíveis planos e delibera sobre o melhor para atingir o objetivo.

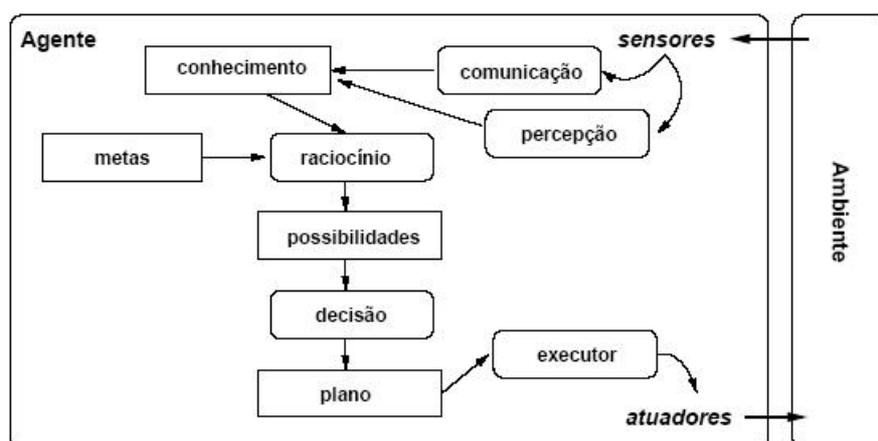


Figura 2.8: Agente cognitivo (DEMAZEAU, 1990)

## 2.5 Organização dos agentes

A organização exprime as restrições aplicadas aos agentes pertencentes a uma sociedade, isto é, os meios através dos quais o projetista de tais sistemas (ou os próprios agentes) pode garantir que cada agente desejará realizar e efetivamente realizará o que deve ser feito e no melhor momento (ALVARES, 1997).

Vários fatores determinam o desempenho da organização de um sistema: o tipo das tarefas sendo realizadas pelos agentes, suas capacidades cognitivas, seu treinamento, a constância do ambiente, restrições legais ou políticas e o tipo de resultado esperado (eficiência, eficácia, custo mínimo, precisão) (HÜBNER, 2003).

Lemaître (1998) classifica a organização de um grupo de agentes segundo dois pontos de vista, ilustrados na figura 2.9: visão centrada nos agentes e centrada na organização.

Na visão centrada nos agentes a organização existe (explícita ou implicitamente) somente dentro dos agentes, um observador do SMA não tem acesso a ela e somente pode criar uma visão subjetiva (chamada de organização observada) de tal organização a partir da observação do comportamento do sistema.

Na visão baseada na organização, além da organização observada, existe uma descrição explícita da organização e tal descrição encontra-se representada externamente. Um observador do sistema pode, portanto, conhecer a organização do sistema tanto consultando tal descrição quanto construindo uma descrição subjetiva por meio de observação.

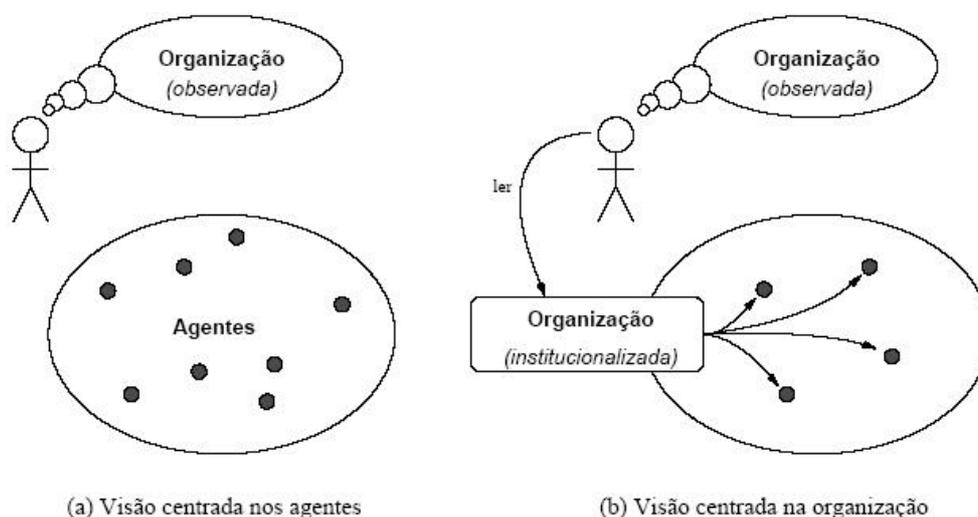


Figura 2.9: Visão da organização de agentes (HÜBNER, 2003)

Além das duas situações do ponto de vista de um observador externo, Hübner (2003) cita que do lado dos agentes que formam a sociedade também podem ser concebidas duas situações: uma onde os agentes são capazes de explicitamente representar uma organização e outra onde eles não são capazes de fazê-lo.

## 2.6 Coordenação dos agentes

Coordenação é o processo pelo qual um agente raciocina sobre suas ações locais e as ações de outros agentes tentando garantir que a comunidade funcione de maneira coerente (JENNINGS, 1996).

Segundo Lesser (1987), os objetivos do processo de coordenação são garantir que todas necessidades de um problema sejam incluídas nas atividades de pelo menos um agente, que os agentes interajam de uma maneira a qual permita que suas atividades sejam desenvolvidas e integradas na solução, que todos os agentes ajam de maneira consistente e que todos os objetivos sejam alcançados dentro dos limites computacionais e de recursos disponíveis.

Jennings (1996) destaca ainda que há três razões principais pelas quais as ações de múltiplos agentes precisam ser coordenadas:

- Quando há dependência entre ações dos agentes.
- Quando restrições globais existem, obrigando que a solução sendo desenvolvida por um grupo de agentes satisfaça certas condições para que seja julgada satisfatória.
- Quando há impossibilidade de resolução de um problema por um agente individualmente, seja pela insuficiência de recursos, informações ou capacidade dos agentes.

## 2.7 Comunicação entre agentes

Conforme Garcia (1998), em um SMA, vários agentes tentam satisfazer seus desejos simultaneamente. Dessa forma, faz-se necessário que o agente comunique as suas ações realizadas para os outros agentes, visando com isso verificar se os agentes estão agindo cooperativamente para atingir um objetivo comum ou se estão interferindo negativamente nos desejos uns dos outros.

Como a capacidade dos agentes normalmente é limitada, a comunicação também se faz necessária no sentido de que se possa realizar, através da colaboração entre os agentes, o desejo da sociedade.

Estruturas de interação variam desde interações físicas a atos de fala. Modelos de interações físicas como forças eletrostáticas, por exemplo, permitem expressar interações simples como atração e repulsão, sendo muito utilizados como base para modelagem de interações entre agentes reativos (DEMAZEAU, 1995).

Como explicado por Okuyama (2003), os protocolos de interação governam a troca de séries de mensagens entre agentes, especificando a seqüência de uma conversação. Como os agentes reativos não possuem controle deliberativo, nem raciocínio explícito, não é esperado destes que sejam capazes de realizar conversações estruturadas baseadas em atos de fala. Sendo assim, não serão apresentados maiores detalhes sobre a teoria dos atos de fala, ontologias aplicadas ao desenvolvimento de SMA ou ainda linguagens de comunicação entre agentes, por não se aplicarem dentro do escopo deste trabalho.

### 3 PLANEJAMENTO URBANO

O planejamento urbano é um ponto muito importante no desenvolvimento sustentável das cidades modernas. Nesse sentido, muitos aspectos devem ser considerados e um dos mais importantes é o crescimento da população, uma vez que, tendo-se um correto controle desse fenômeno é possível focar esforços, recursos e investimentos de forma correta (IOCHPE, 2004).

Uma cidade é um fenômeno vivo, no qual as fronteiras entre o econômico, o social e o político não param de se recompor, em permanente expansão e transformação. É obra de agentes ou atores sociais, que operam por impulsos sucessivos, formando, de maneira relativamente descontínua, partes do espaço (RABENO, 2006).

Ações de transformação no meio urbano causam impactos imediatos, de curto prazo, bem como impactos indiretos, com reflexo em longo prazo e que afetam outros aspectos da estrutura das cidades (SOUZA, 2002). Na implantação e/ou expansão das áreas urbanizadas são introduzidas alterações que modificam, rápida e intensamente, os fluxos materiais e energéticos anteriores às intervenções, levando à degradação ambiental com consideráveis perdas socioeconômicas e culturais (MONTEIRO, 1976).

A expansão do uso urbano é dependente da configuração do uso do solo da cidade, conforme citado por Wu (2002), o qual é específico para a cidade sendo modelada. A mesma política de uso do solo aplicada para um diferente contexto pode produzir um resultado totalmente diferente.

Com isso, embora sejam evidentes as mudanças que ocorrem na morfologia urbana e na paisagem em função do crescimento urbano de uma cidade, não é evidente o modo como elas ocorrem, sendo necessário observar não só um momento, mas sim um processo de transformação ao longo de um determinado intervalo de tempo (PORTUGALI, 2000).

Cheng (2003-b) afirma que da perspectiva de planejamento urbano e gerenciamento, o entendimento dos processos dinâmicos de crescimento urbano incluem a comparação temporal de vários períodos, permitindo aos planejadores modificarem ou atualizarem seus esquemas de planejamento para adaptar a mudanças no ambiente.

Através da mudança permanente, altera-se conjuntamente a paisagem da qual a cidade faz parte e ela própria, posto que seu processo de produção consome recursos, produz lugares novos e gera externalidades, provocando uma modificação no conjunto que integra, o que pode ser chamado de crescimento urbano (ALLEN, 1997).

### 3.1 Crescimento Urbano

Segundo Cheng (2003), o crescimento urbano surge como resultado da transição de uso do solo não urbano para urbano, ambos fisicamente e funcionalmente. Inclui aspectos físicos (relacionados à cobertura e uso do solo), socioeconômicos e ambientais, sendo considerado em essência um sistema complexo, pois envolve múltiplos atores com diferentes padrões de comportamento em escalas espacial e temporal. Além disso, ele é amplamente controlado ou impactado por escalas de desenvolvimento econômico e estratégias de proteção ambiental (CHENG, 2003-b).

Ao tratar do crescimento urbano, interessa representar o processo de produção espacial convertendo solo não urbanizado em urbanizado e acrescentando (ou substituindo) edificações, capturando fisicamente o processo de evolução urbana (GRANERO, 2002).

Contudo, a produção do espaço urbano dá-se, simultaneamente, de acordo com e à revelia das normas urbanísticas que tentam criar uma cidade ideal. O modo pelo qual as cidades crescem no Brasil tem sido marcado pela marginalização das populações mais pobres, historicamente excluídas dos bens e serviços produzidos pela sociedade. Uma parcela significativa da cidade é construída à margem da legislação, seja através da implantação e ocupação de loteamentos irregulares ou pela formação de vilas e favelas (RABENO, 2006).

Conforme Siebert (2001), a evolução urbana de uma cidade geralmente compreende a formação de duas cidades que coexistem no mesmo espaço-tempo: a cidade legal (na qual as normas e os regulamentos urbanísticos são seguidos) e a cidade ilegal (que ocupa os espaços urbanos menos valorizados, tais como áreas insalubres e/ou de risco, não beneficiadas por infra-estrutura e serviços urbanos, onde diversos graus de ilegalidade, irregularidade ou clandestinidade ocorrem à revelia dos padrões urbanísticos oficiais). Juntas estas duas formam a cidade real.

De um modo geral, o espalhamento urbano pode ocorrer como consequência de baixas densidades em zonas residenciais, resultantes de grandes lotes urbanos, e da descontinuidade na ocupação do solo urbano, ou seja, formação de manchas urbanas descontínuas, intermediadas por espaços vazios (SILVA, 2003).

O crescimento das cidades não é um processo universal com atributos similares em todas regiões do mundo, mas um conjunto de fenômenos complexos condicionados por várias culturas e forças históricas em diferentes lugares (LAURENCE, 1981). Não é mediado somente pelos condicionantes sociais, históricos, econômicos, tecnológicos e culturais, mas também pelos fatores naturais e suas transformações ao longo do tempo (POLIDORI, 2004).

As mudanças urbanas não ocorrem como se a cidade fosse um objeto isolado, havendo interinfluência permanente dos seus condicionantes. Não existe padrão universal de urbanização, de espacialização do território, de necessidades básicas para a qualidade de vida, quando se trata da integração de processos sociais, culturais, econômicos e naturais.

Embora simultâneos, os processos citados não são necessariamente integrados, necessitando para tanto serem contextualizados, adquirindo, assim, uma dimensão ambiental que deve ser avaliada na sua multiplicidade de conexões visando, em última análise, o estabelecimento de relações com os padrões de qualidade de vida das populações (LEITE, 1992).

A exata evolução de sistemas urbanos é imprevisível, uma vez que, são sensíveis a condições iniciais desconhecidas tais como guerras, desastres naturais e novas políticas dos centros governamentais. Essas condições não são frequentemente previsíveis, particularmente em termos quantitativos (CHENG, 2003-b).

As cidades têm uma dinâmica própria não planejada, que emerge de uma relação entre forças globais que estruturam o espaço urbano, influenciando a sua apropriação, e forças de caráter local, representadas pelas interações entre os múltiplos agentes produtores e consumidores do espaço (SAURIM, 2005).

Em virtude de suas características, os sistemas urbanos são ditos então sistemas complexos porque consistem de um grande número de atores que interagem uns com os outros em um nível microscópico, possuindo um conjunto de regras espaciais extremamente complexo (WU 2002). Entretanto, a interação entre esses atores é em essência não linear, dinâmica e auto-organizada.

A habilidade para realisticamente representar o comportamento dos atores chave depende do nível de agregação no qual os atores e seus comportamentos serão representados em um modelo de simulação (CHENG, 2003).

### 3.2 Formas de Crescimento

O espalhamento urbano consiste de três formas básicas: “low-density sprawl (radial)”, “ribbon” e “leapfrog development” apresentadas na figura 3.1 (BARNES, 2001). O Radial sprawl é o que ocorre ao longo de margens de áreas metropolitanas existentes, sendo suportado por extensões de infraestruturas urbanas básicas, como água, energia e estradas.

O Ribbon sprawl é o desenvolvimento que segue corredores principais de transporte para fora dos núcleos urbanos. Neste caso, as áreas junto aos corredores são desenvolvidas, permanecendo as demais para uso/cobertura rural.

O leapfrog development, por sua vez, é um padrão descontínuo de urbanização, que se torna mais custoso em relação ao fornecimento de serviços urbanos, devido à formação de áreas amplamente separadas umas das outras e dos limites urbanos pré-existent.

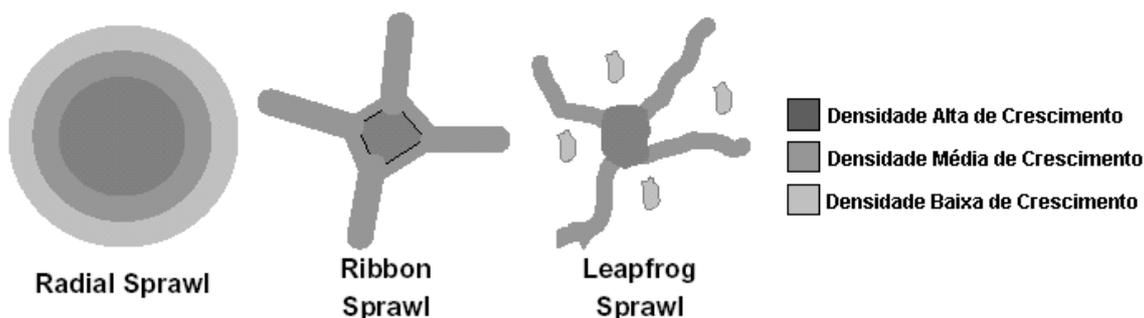


Figura 3.1: Formas de crescimento urbano (BARNES, 2001)

### 3.3 Vazios Urbanos, Periferias Urbanas e Áreas de Preservação

Devido à presença de vazios urbanos e de periferias nas cidades (como ocorre no caso do município de Bauru, utilizado no estudo de caso deste trabalho), os quais precisam ser considerados durante o processo de simulação urbana, esta subseção irá

apresentar algumas das características que definem essas áreas, como forma de possibilitar um melhor entendimento dos resultados obtidos nas simulações a serem apresentadas no capítulo 6.

#### *3.3.1.1 Vazios urbanos*

Os vazios urbanos, conforme Clichevsky (2001) e citado por Polidori (2004), são áreas contíguas às urbanizadas que resistem à urbanização, implicando em ocupação de áreas mais distantes. Normalmente esses vazios são áreas que apresentam condições adequadas para a finalidade urbana, mas que são retiradas e ficam fora do mercado de terras, no aguardo de expectativas de lucros maiores com sua comercialização.

Como esses lucros maiores são possíveis em função da urbanização de áreas remotas, pode ser assumido que as áreas de vazios urbanos apresentam potenciais de crescimento que não se realizam enquanto outros não se realizarem antes, somente sendo incorporados ao tecido urbanizado preexistente se houver aumento na expectativa de lucro, que pode ser representada pelo preço da terra urbana.

#### *3.3.1.2 Periferias Urbanas*

As periferias urbanas podem ser compreendidas pelos seus aspectos socioeconômicos e morfológicos, sendo predominantemente habitadas por população de baixa renda e tradicionalmente localizadas nos lugares mais distantes do centro da cidade, concentrando piores condições de infra-estrutura, de serviços, de equipamentos e de facilidades urbanas de um modo geral (FERNANDES, 1997).

Esse significado pode ainda ser ampliado ao considerar também como periferia urbana as ocupações remotas habitadas por população em qualquer classe de renda, tais como áreas sem continuidade com o tecido da cidade preexistente (POLIDORI, 2004), sujeitas ao crescimento do tipo “leapfrog development”.

#### *3.3.1.3 Áreas de preservação ambiental*

São zonas com menor capacidade de absorver impactos urbanos, sendo consideradas de fragilidade ambiental. Para essas regiões são necessários cuidados especiais no desenvolvimento e controle urbanos, na direção de minimizar danos ambientais e de oferecer condições para o desenvolvimento da cidade (GUAPYASSU, 1998).

### **3.4 Fatores que influenciam o crescimento**

À primeira vista, a observação do rápido crescimento das cidades aparenta uma dinâmica caótica, com uma vasta quantidade de eventos espaciais ocorrendo simultaneamente, sem aparente relação um com o outro. Contudo, uma observação mais atenta dos processos de ocupação e decadência dos espaços urbanos sugere que as formas construídas e suas posições relativas interajam de uma maneira não aleatória, e que resulte em um padrão de comportamento que pode ser observado e, de certa forma, ser aferido e utilizado para fins de estudos e representações urbanas (SAURIM, 2005).

O processo de desenvolvimento das cidades reflete um sistema complexo de interações constantes, que responde em parte, por sua aparente aleatoriedade. No entanto, na verdade representa ser aleatório porque escapa à compreensão imediata (SOUZA, 2002).

Existem inúmeros fatores que influenciam o crescimento urbano de uma cidade, sendo assim nesta seção relaciona-se alguns deles, os quais estão mais diretamente envolvidos com o trabalho proposto.

Algumas das causas do crescimento urbano incluem crescimento da população, economia, iniciativas em infraestrutura como a construção de estradas, encorajando assim o seu desenvolvimento (SUDHIRA, 2004).

O espaço que intermedeia tensões de crescimento urbano exerce papel de restritor ou facilitador, participando ativamente do sistema, pois uma cidade é composta integradamente por atributos urbanos e ambientais, que funcionam como atratores ou como resistências para o crescimento urbano (GRANERO, 2002).

Esse mecanismo de atração e repulsão ao crescimento urbano é simulado por Polidori (2004), considerando dois tipos principais de variáveis: de espaço e de atributo, como será mostrado mais detalhadamente na apresentação do simulador SACI (seção 4.2.1).

Conforme Dendrinis (1992), forças espaciais/temporais de atração e repulsão atuam entre localizações e atividades no contexto urbano. No processo de alocação das atividades sobre o território, existe uma força de repulsão, uma vez que os agentes produtores tendem a buscar as terras de menor custo, e por consequência, as mais distantes. Por outro lado, há uma força de atração, pois ao agirem da forma descrita anteriormente atraem competidores e elevam o custo da terra, progressivamente. Essas duas forças então, atuando juntas, determinam a configuração do espaço urbano em ilhas de crescimento diferenciado, emergindo constantemente sobre a cidade.

Krafta (1999) considera ainda a existência de uma terceira força referente à oportunidade espacial que seria a relação que uma localização residencial guarda em relação a um sistema de comércio ou serviço. Essas três forças atuariam então como um sistema de probabilidades, aumentando ou diminuindo o potencial de cada localização no sistema espacial ser alvo do processo de desenvolvimento, de acordo com as condições de mudança no espaço/tempo.

Com relação às mudanças de uso do solo urbano, Almeida (2003) aponta que aspectos sócio-econômicos e de infra-estrutura são variáveis forçantes das mesmas. Sendo que o uso pode ser identificado de diferentes formas, de acordo com os objetivos analíticos, como por exemplo, residencial, comercial, de serviços, industrial, institucional e outros. Essa classificação ocorre tanto pela diferenciação dada pelos próprios tipos de atividades, quanto pela distribuição dos espaços que possibilitam a alocação dessas atividades (SPINELLI, 2001).

O solo possui particularidades inerentes que tornam algumas de suas parcelas mais atrativas do que outras. Dentro de uma região, a disponibilidade de solo exigida por cada atividade é fortemente determinada não apenas por fatores locais, mas pelas exigências da economia regional e nacional (SAURIM, 2005).

Usos do solo fixos, tais como rios, parques e aeroportos podem afetar transições de uso. Como por exemplo, um parque pode afetar a transição de uso para residencial das células ou agentes que estejam em sua vizinhança (WHITE, 1997).

A presença de pólos de atração, economias de aglomeração, políticas de desenvolvimento urbano e o já citado menor custo da terra, também são alguns fatores que podem ocasionar transições de uso do solo e a formação de sub-centros dentro do

tecido urbano. Isso se justificaria, segundo Saurim (2005) por uma eventual saturação do crescimento e de vantagens do centro das cidades, ocasionando com isso um processo em que outras áreas desta passam a concentrar atividades antes restritas apenas à região central dela.

O surgimento de novas áreas residenciais, como destacado em Almeida (2005) e Barredo (2002) depende da existência prévia de áreas residenciais próximas ou nas adjacências, uma vez que isto implica a possibilidade de se estender rede de infraestrutura eventualmente existente nas imediações. Essa probabilidade também depende da maior proximidade dessas áreas aos agrupamentos de atividades comerciais, assim como na disponibilidade de acesso a essas áreas. No caso de haver uso de solo industrial nas proximidades, pode representar um fator repulsivo para o surgimento de novas residências.

As áreas exatas onde novos loteamentos residenciais são criados nem sempre são precisamente identificadas, devido ao fato de que esses novos investimentos dependem das decisões de proprietários e empreendedores imobiliários, que definem as áreas a serem investidas em detrimento de outras localizações igualmente vantajosas. Assim como devido a crescimentos irregulares, como destacado anteriormente.

No caso da transição de áreas não urbanizadas para uso industrial, há em geral dois grandes condicionantes: a proximidade ao uso industrial previamente existente e a facilidade de acesso rodoviário. Já em relação à conversão para o uso de serviços, dois grandes fatores são preponderantes: a proximidade à concentração de estabelecimentos comerciais e a proximidade à classe de uso residencial, como é o caso da cidade de Bauru, estudada neste trabalho.

Transições entre uso industrial para residencial supõem, por sua vez, boas condições de acessibilidade e uma localização dentro de uma distância razoável da zona comercial central, em virtude da necessidade dos moradores de se deslocarem até as áreas centrais por motivos de trabalho ou abastecimento (ALMEIDA, 2005).

Processos de mudança do uso do solo também podem ser influenciados pela rede de transporte (rios e rodovias) da região, como ocorre, por exemplo, na região Amazônica. Em casos assim um modelo realista para mudança de uso deve considerar definições flexíveis de proximidade para capturar ações à distância (PEDROSA, 2003).

Além disso, o crescimento urbano pode ser ainda influenciado pela presença de grandes pólos de atração, como por exemplo, um shopping center ou a presença de um novo distrito industrial, os quais podem estimular o crescimento da região envolta.

## 4 MODELAGEM URBANA

A modelagem urbana tem sido usada satisfatoriamente para representar a cidade de modo simplificado, facilitando a compreensão de determinados aspectos e suas relações com o conjunto. Mesmo assim, modelar mudança e crescimento urbano tem sido um desafio para a pesquisa contemporânea, reunindo esforços de diversos campos do conhecimento (POLIDORI, 2004).

Estudos de modelagem urbana começaram na década de 50, apresentando uma menor atividade nas décadas de 70 e 80, renascendo nos anos 90 devido à disponibilidade de dados espaciais, aos avanços computacionais e nos softwares para Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (WEGENER, 1994).

Modelos espaciais dinâmicos, como os aplicados à simulação urbana, descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo, possibilitando observar o fenômeno como um processo em andamento. Segundo Lambin (1994) o modelo de um fenômeno deve responder às seguintes questões:

- **Quais** variáveis ambientais e culturais contribuem para explicar o fenômeno, e quais são os processos ecológicos e sócio-econômicos existentes por trás do fenômeno?
- **Como** o processo evolui?
- **Onde** ocorrem os fenômenos?

Essas questões chave podem ser identificadas como as clássicas “Porquê”, “Quando” e “Onde”. Assim, um modelo capaz de respondê-las será capaz de descrever quantitativamente um fenômeno e prever sua evolução (PEDROSA, 2003).

Conforme Spinelli (2001), a modelagem urbana vem compreendendo um instrumento abrangente de profunda importância que auxilia na simplificação da realidade a ponto de torná-la descritível, simulável e compreensível. Assim, torna-se possível adaptar à modelagem questões referentes às características locais, às diferenciações morfológicas e ao valor do solo, uma vez que o fenômeno urbano encontra-se inserido em um complexo conjunto de elementos (ou fatores) que, inter-relacionados, afetam uns aos outros e configuram novos espaços.

O processo de (re)configuração, portanto, é algo dinâmico e o valor do solo, inserido no contexto urbano, também é influenciado por esses fatores.

O objetivo de uma modelagem é abstrair e representar a entidade sendo estudada. No domínio do planejamento urbano, a modelagem deve levar em consideração aspectos de dimensões espaciais e temporais dos sistemas urbanos, podendo ser

utilizada para analisar, avaliar, prever e suportar a tomada de decisões em tais sistemas de simulação urbana (CHENG, 2003).

Entre os objetivos de atividades de modelagem urbana para mudanças de uso e cobertura da terra (LUCC), segundo Câmara (2006-b) e Cheng (2003), estão:

- Explorar padrões e processos espaciais e temporais de transições de uso/cobertura do solo.
- Entender melhor as causas e mecanismos que governam as mudanças de uso/cobertura (o porquê).
- Testar hipóteses e analisar as importâncias relativas de diferentes fatores;
- Prever ou projetar “quanto”, “quando” e “onde” as mudanças deverão ocorrer no futuro (na verdade suposições lógicas sobre o que pode acontecer dadas certas premissas, incluindo os casos extremos).
- Auxiliar a elaboração de políticas públicas para prevenção, adaptação e mitigação de mudanças, através de simulações em diferentes cenários, através da análise da sensibilidade das mudanças de uso e cobertura a fatores ambientais, econômicos, sociais e institucionais.
- Analisar impactos das mudanças de uso nos sistemas naturais e sócio-econômicos, através do acoplamento de modelos com feedbacks nos dois sentidos.
- Prescrever cenários otimizados.

#### **4.1 Modelos urbanos**

O campo das simulações espaciais tem experimentado franca evolução nas últimas duas décadas, o que é notadamente representado pelos esforços de modelagem com diversas técnicas, apresentando modelos dinâmicos e multiescalares (BENENSON, 2005).

No entanto, modelos urbanos devem ser concebidos, manipulados, aplicados e interpretados de maneira sábia e crítica, de modo que os modeladores, planejadores, tomadores de decisão da esfera pública e privada, assim como a população de maneira geral possam extrair o melhor de seus resultados e sensatamente reconhecer os seus limites (ALMEIDA, 2003).

Visões conflitantes de sistemas urbanos têm permitido uma variedade de diferentes teorias de crescimento e modelos (WEGENER, 1994). Entre os modelos urbanos da nova geração estão os baseados em autômatos celulares e em sistemas multiagentes.

Esses modelos são espacialmente explícitos no sentido que as unidades básicas de simulação (chamadas de células em AC e agentes em SMA) têm um relacionamento explícito com as outras. Como o estado de uma célula ou de um agente é dependente do ambiente, o relacionamento espacial precisa ser mantido durante a simulação. Tais modelos são baseados em regras locais, sendo que o estado de cada componente muda em passos de tempo discreto (WU, 2002).

## 4.2 Modelos baseados em Autômatos Celulares

AC são representados por uma grade bidimensional de células, no qual cada célula tem seu valor sobre um conjunto de estados finitos (por exemplo, representando os diferentes usos do solo). As células mudam seus estados em passos de tempos discretos de acordo com regras de transição (responsáveis pela regulação das mudanças de uso do solo, no caso de aplicações como a deste trabalho), levando em conta os estados das suas células vizinhas (BASTOS, 2005).

Os principais tipos de vizinhança de autômatos celulares são apresentados na figura 4.1.

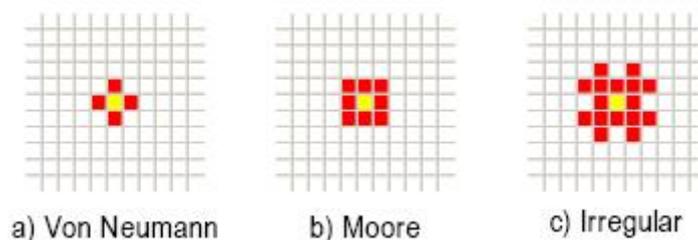


Figura 4.1: Tipos de vizinhança

Esse tipo de modelo é homogêneo no sentido que o conjunto de estados possíveis é o mesmo para cada célula e a mesma regra de transição é aplicada a cada célula (PARKER, 2003). As regras de transição determinam quando e porquê o estado de uma célula se altera, podendo ser qualitativas ou quantitativas. As dinâmicas de aplicação dessas regras em um AC são semelhantes à de um filtro espacial, onde todas as células são avaliadas e, quando for o caso, modificadas para um novo estado (CAMARA, 2006-b).

O uso de modelos para estudos urbanos baseados em AC torna-se interessante pela natural associação de seu mecanismo à natureza dos fenômenos urbanos: cidades reais são constituídas de células discretas (edificações, quarteirões, bairros), cujas propriedades são, em alguma medida, determinadas pelas suas vizinhanças (valor da terra, características sócio-espaciais). Modelos desse tipo podem gerar dois tipos de resultados: em primeiro lugar, podem simular padrões de conformação morfológica que mais se aproximam de situações reais; em segundo lugar, permitem investigar as propriedades de auto-organização inerentes às cidades (KRAFTA, 2000).

Especificamente em termos de modelos celulares voltados à simulação de mudanças de uso do solo urbano, há atualmente inúmeras variações no que tange ao ajuste entre seus mecanismos de simulação e os dados de entrada, podendo-se identificar três abordagens distintas, segundo Camara (2006-b).

A primeira delas diz respeito aos modelos mais tradicionais, onde os parâmetros de modelagem são dimensionados a partir de equações determinísticas envolvendo os dados existentes em cada caso. A segunda abordagem, de forma contrária, parametriza os modelos por meio de procedimentos heurísticos, através de análises comparativas entre diferentes resultados preliminares de simulação. Enquanto que a terceira abordagem utiliza procedimentos contemporâneos para ajuste de padrões, tais como redes neurais, aprendizado evolucionário ou algoritmos genéticos.

### 4.2.1 Trabalhos relacionados

Uma série de trabalhos empenham esforços ao tratamento do crescimento urbano, através de modelos incorporando autômatos celulares. A seguir serão apresentados alguns dos modelos e simuladores mais relevantes apresentados nesses trabalhos.

#### 4.2.1.1 *Modelo de White e Engelen (1993)*

Simula o desenvolvimento de uso do solo em uma cidade hipotética com as mesmas dimensões de cidades de porte médio dos Estados Unidos como Cincinnati. Esse modelo calcula um potencial de transição de transformação de cada célula, considerando seu próprio estado e o das células vizinhas. As células ativas são sujeitas à transição em função do uso do solo, topografia e acessibilidade.

Além disso, são calculadas a cada interação as probabilidades de transição, sendo convertidas as células com maior valor, até um limite de crescimento informado pelo usuário. O horizonte temporal das simulações fica entre 15 e 25 anos.

#### 4.2.1.2 *UGM (modelo de crescimento urbano)*

O UGM desenvolvido por Clarke (1997) aponta probabilisticamente as células não urbanas que serão convertidas para urbanas, considerando quatro variáveis na célula central e nas oito células vizinhas (vizinhança de Moore): a inclusão ou exclusão na simulação, o estado atual de cada célula, a declividade do solo e proximidade do sistema viário. Ele assume quatro tipos de crescimento urbano, regulados em função do crescimento histórico de cada local: por expansão orgânica (que ocorre com contigüidade das células urbanas preexistentes), por difusão (que ocorre por espalhamento), por modo espontâneo ou auto-geração (que ocorre em sítios remotos e distantes) e por influência do sistema viário (que atrai a urbanização). O horizonte temporal do modelo é de 100 anos.

#### 4.2.1.3 *SimLand*

O SimLand proposto por Wu (1996) integra simulação com AC, avaliação multicritérios e processos analíticos hierárquicos num ambiente de SIG. As células podem assumir os estados de urbano e não-urbano, considerando uma vizinhança de 8 células e três variáveis: áreas urbanizadas, áreas com distritos industriais e sistema viário.

O modelo funciona mediante três regras de transição, que são a adequação da célula assumir o estado urbano (por avaliação multicritérios), ponderação dos critérios utilizados (por análise hierárquica) e efeito de aglomeração. A taxa de crescimento e o grau de atratividade de cada variável são determinados pelo usuário.

#### 4.2.1.4 *TerraML (TerraLib Modeling Language)*

O TerraML (PEDROSA, 2003) é um ambiente para modelagem dinâmica espacial baseado num modelo celular de representação do espaço. Para capturar ações à distância (que é uma das limitações apontadas no uso de AC clássicos, como será apresentado com maiores detalhes na próxima subseção) ele adota o conceito de vizinhança generalizada, implementada como uma matriz de proximidade. O caso de uso apresentado para simular mudança no uso da cobertura do solo foi realizado para uma área do estado de Rondônia.

#### 4.2.1.5 SACI (Simulador do Ambiente da Cidade)

É um modelo de simulação de crescimento urbano implementado num ambiente de SIG, escrito em C++ e integrado com o software ArcView, acrescido da extensão Spatial Analyst, que se encarregam de implementar as demandas do modelo de simulação de crescimento e de construir a interface de comunicação com o usuário respectivamente (POLIDORI, 2004).

O SACI considera dois tipos principais de variáveis: de espaço e de atributo. Sendo que as variáveis de atributo podem ser do tipo natural, urbano ou institucional.

As variáveis de tipo natural representam os fatores do ambiente natural, modificados ou não pela ação antrópica, como é o caso das águas, das matas, dos campos e das áreas usadas para agricultura, podendo ser organizadas como mostrado no diagrama da figura 4.2.

Os carregamentos são os responsáveis pela formação de tensões que geram diferenciação espacial e posterior crescimento urbano, ou seja, oferecem atração à urbanização. Enquanto os atributos apresentados na figura 4.2 como resistências opõem-se ao crescimento urbano, consumindo tensões de crescimento ao se afastarem de seu estado natural e serem crescentemente modificados pela ação do homem.

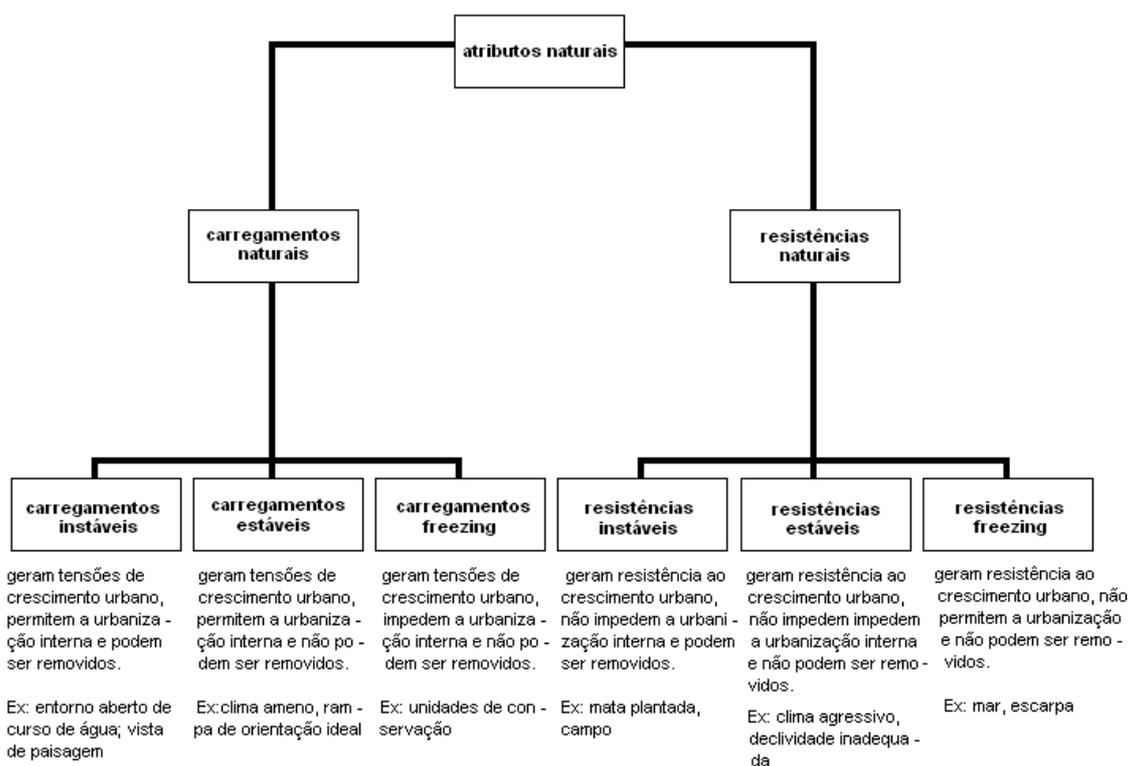


Figura 4.2: Organização dos atributos naturais (POLIDORI, 2004)

No caso dos atributos urbanos (os quais representam a cidade e seus espaços adaptados, como por exemplo, funções habitacionais, comerciais, industriais e equipamentos urbanos), os pesos das variáveis podem estar associados a diversos fatores, tais como:

- Fatores funcionais, sendo que usos comerciais, industriais, institucionais e habitacionais têm atratividade decrescente, de um modo geral (PRINS, 1984).

- Hierarquias viárias, considerando que vias principais, secundárias e locais normalmente têm atratividade decrescente (VASCONCELOS, 2000).
- Expectativas de geração de externalidades positivas ou negativas, as quais aumentam ou diminuem a atratividade, respectivamente.

Partindo também da capacidade de gerar atração ou resistência ao crescimento, os atributos urbanos podem ser organizados conforme representado na figura 4.3.

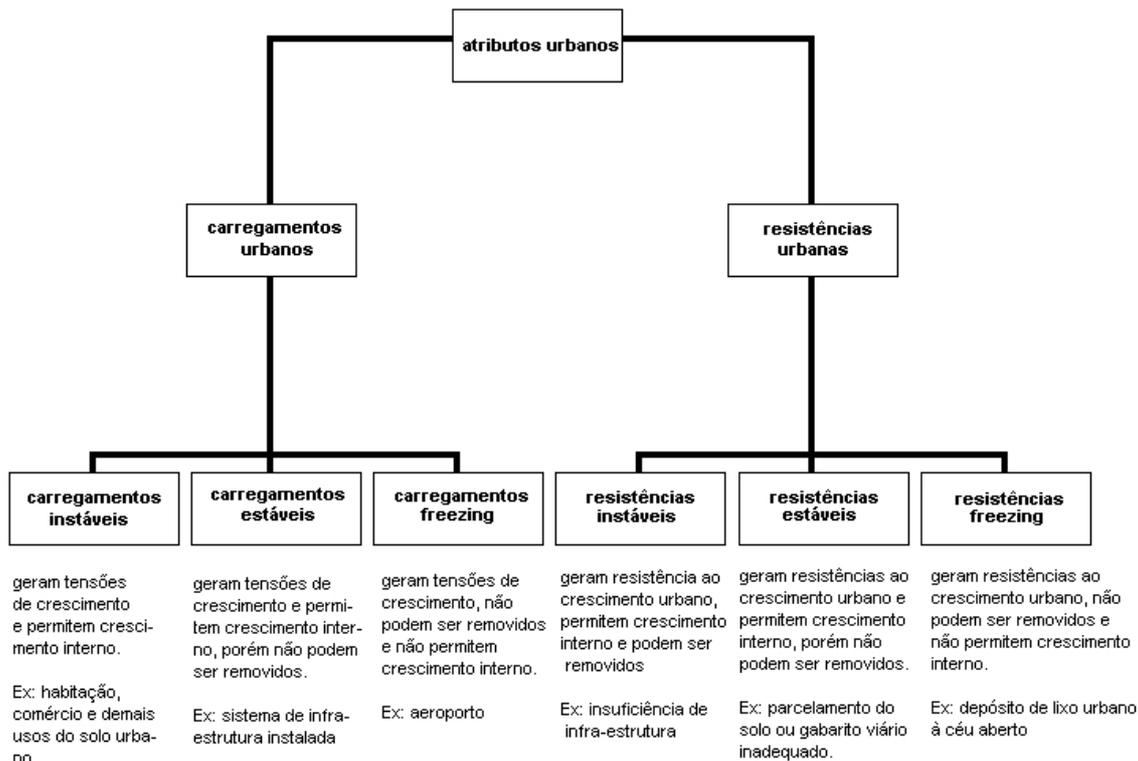


Figura 4.3: Organização dos atributos urbanos (POLIDORI, 2004)

Os fatores institucionais representam as práticas e recursos utilizados nas políticas de uso e ocupação do solo e no processo de planejamento, como por exemplo, o caso dos índices urbanos, do regime de usos e do zoneamento. Pode intervir no crescimento urbano de modo independente dos fatores naturais e urbanos, podendo operar do mesmo modo que os anteriores, mas diferenciando-se pelo fato de poder partir de políticas ou projetos institucionais, assim como, pelo fato de poder representar circunstâncias de interesse do operador do modelo nas simulações.

Na figura 4.4 é apresentado seu diagrama.

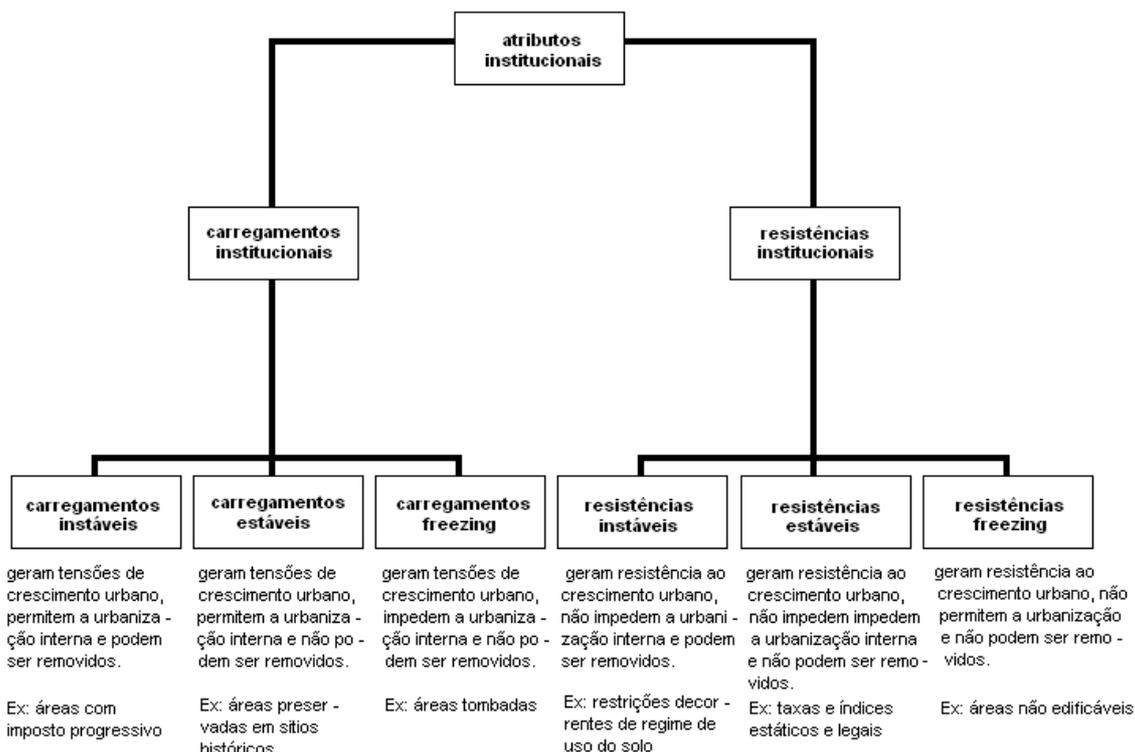


Figura 4.4: Organização dos atributos institucionais (POLIDORI, 2004)

Como estudo de caso esse simulador utilizou a cidade de Pelotas/RS, considerando para a calibração do modelo o crescimento do período entre 1965 e 2000. O horizonte temporal do modelo é de 45 anos.

#### 4.2.1.6 Modelo Integrado Multi-Escala / RIKS

Nesse modelo, proposto por Engelen (1995), o espaço é modelado como um AC, onde os estados das células representam categorias de uso do solo e são divididos em dois tipos: funções e feições. As funções representam usos do solo ativos (como por exemplo, residências, comércio, indústrias), enquanto as feições são usos do solo fixos (tais como rios, parques e aeroportos) (CAMARA, 2006-b).

A arquitetura do modelo Multi-Escala é constituída de dois sub-sistemas denominados micro e macro-escalas, os quais respectivamente representam a dimensão espacial do modelo, e as variáveis ecológicas e sócio-econômicas que afetam o sistema como um todo (CAMARA, 2006-b). Essas escalas interagem intensamente entre si e com um Banco de Dados Geográfico (BDG), a partir do qual o modelo obtém os dados necessários para as simulações (figura 4.5).

A macro-escala possui três componentes representando os subsistemas natural (responsável por representar condições ambientais como temperatura, poluição e precipitações), econômico (que inclui dados demográficos como nascimentos, mortes e migrações) e social (que influenciado pelos outros subsistemas pode gerar demandas, como por exemplo, a necessidade de mais células residenciais quando a população aumenta). A micro-escala, por sua vez, consiste em um AC sobre o qual são aplicadas regras de transição para calcular as mudanças no uso do solo.

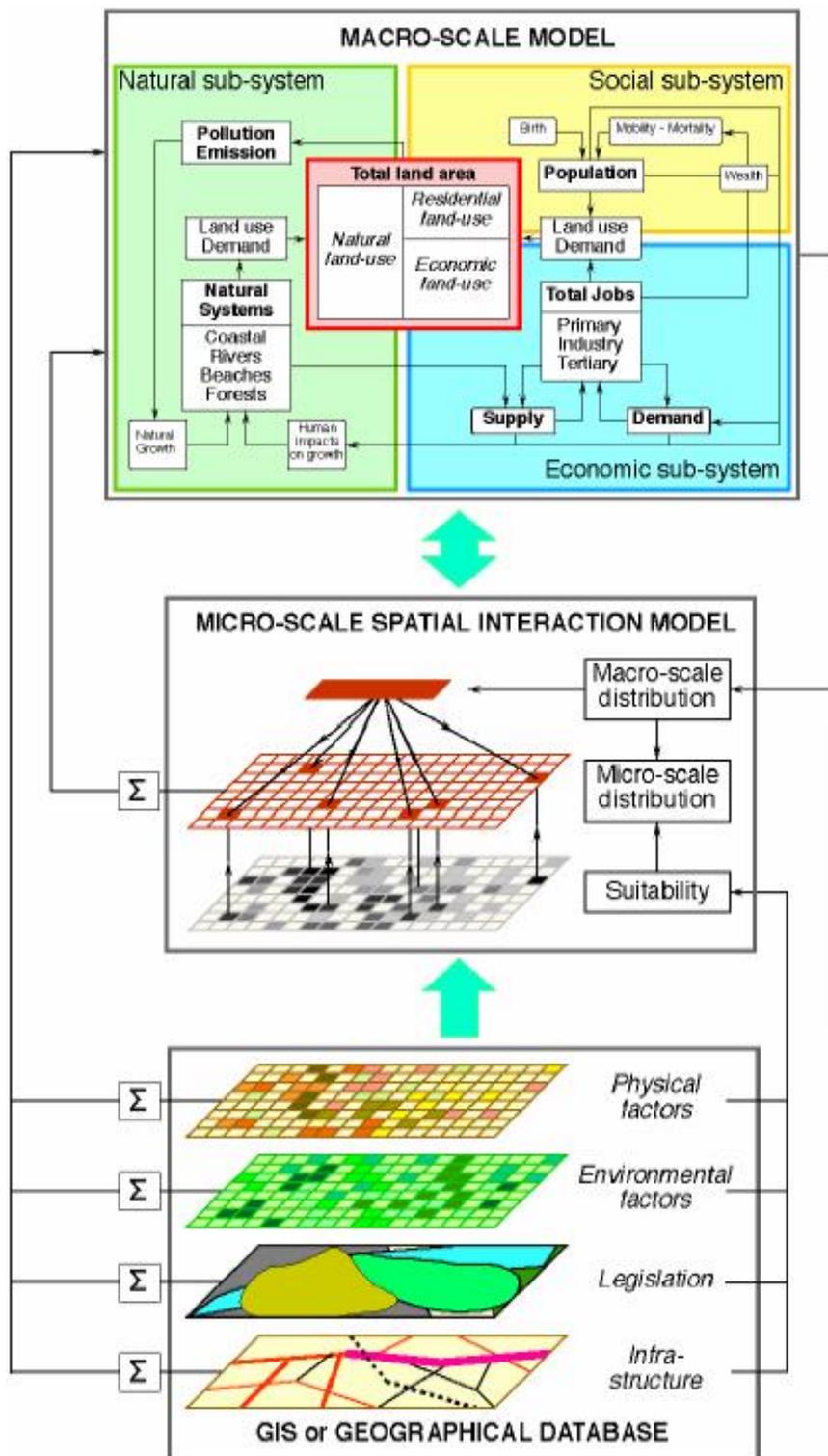


Figura 4.5: Integração entre o modelo Multi-escala e SIG (ENGELEN, 1995)

Outra característica interessante do modelo, a qual foi considerada no desenvolvimento do simulador apresentado no próximo capítulo, é o da vizinhança de uma célula ser uma região circular com um número variável de células, organizadas em zonas de distâncias. Essas zonas influenciam o efeito de atração/repulsão que as células vizinhas têm no potencial de transição de uma célula (CAMARA, 2006-b).

Por exemplo, na figura 4.6, está representada uma célula com vizinhança circular de diâmetro 8, que abrange uma área de 197 células, organizadas em 30 zonas de distâncias.

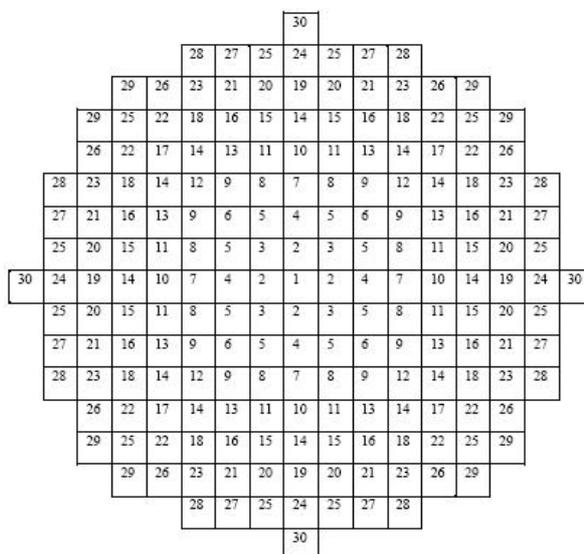


Figura 4.6: Vizinhança circular

#### 4.2.1.7 DINÂMICA

O DINÂMICA é um simulador de dinâmica de paisagens baseado em simulação discreta e autômatos celulares desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais, implementado através de algoritmos empíricos de alocação do uso do solo e utilizando a linguagem C++.

Ele trabalha com dois algoritmos de transição do uso do solo: as funções *expand* e *patcher*. A função *expand* responde pela expansão de manchas previamente existentes de uma certa classe de uso do solo. Enquanto a função *patcher*, por sua vez, destina-se a gerar novas manchas.

A configuração adotada para o programa utiliza como entrada um mapa de paisagem representado por uma matriz. O estado de cada célula desta matriz é deduzido através da classificação de imagens de sensoriamento remoto. Ainda, como dados de entrada, são utilizadas variáveis espaciais selecionadas, as quais se encontram estruturadas em dois conjuntos cartográficos, de acordo com a sua natureza estática ou dinâmica. O programa necessita também de uma série de parâmetros tais como taxas anuais de transição, tempo mínimo de permanência em cada estado, as porcentagens de transição alocadas por cada um dos algoritmos de transição desenvolvidos, entre outros (SOARES, 2002).

Ao final da execução é gerado um arquivo, de formato idêntico ao mapa de paisagem de entrada, contendo o resultado final da simulação.

#### 4.2.2 Limitações

AC aplicados às demandas da cidade e às intenções dos pesquisadores urbanos têm oferecido um ambiente com chances para operacionalizar a convergência entre a possibilidade de modelar o ambiente urbanizado e o não urbanizado por diferenciação morfológica, por resistência espacial e por análise de limiares. Essas chances são maximizadas pelas possibilidades dinâmicas dos AC, pela sua capacidade de capturar

processos derivados da vizinhança espacial, pela natural compatibilidade com os grids usados em SIGs, pela crescente disponibilidade de imagens de satélite e pela popularização de conhecimentos em geocomputação (EHLEN, 2002).

Contudo, para a modelagem de uso do solo e cobertura da terra (LUCC) usando AC, Parker (2003) aponta que é necessário técnicas que tenham regras de transição não-uniformes e possam dinamicamente mudar a força e configuração das conexões entre as células. Como essas características estão além das capacidades de AC definidos rigidamente, eles nem sempre seriam capazes de atender plenamente esse tipo de modelagem.

Modelos celulares têm sido úteis para modelagem de aspectos ecológicos de LUCC, mas encontram desafios quando é necessário incorporar tomadas de decisão humanas, sendo necessário um conjunto de regras hierárquicas complexas para diferenciar entre os tipos de tomada de decisão aplicados aos grupos de células (PARKER, 2003).

Em AC tradicionais, como o utilizado em trabalhos de modelagem dinâmica urbana como o Citylife (Roy (1996)), por exemplo, as células interagem ainda umas com as outras de forma síncrona, sendo considerados sistemas fechados, pois não levam em consideração as interações com o ambiente (GATTI, 2003).

Devido às mudanças geradas por AC serem estritamente locais, isto é, baseadas na vizinhança de cada célula, pode-se dizer que sua aplicação é eficiente em processos em que a ordem global emerge de ações locais e descentralizadas. Entretanto, em Sistemas de Informação Geográficas, por exemplo, a ordem global depende tanto de fatores endógenos (ações locais) como exógenos (ações à distância) (CAMARA, 2006-b; PEDROSA, 2003).

Mudanças globais no sistema não influenciam transições a nível celular. Dessa forma, tais modelos têm limitada habilidade para refletir feedbacks nos sistemas em estudo. As transições ocorrem apenas em função do que acontece na vizinhança imediata de uma dada célula, não existindo com isso ações à distância, pois a dinâmica inerente aos autômatos e que produz fenômenos emergentes a nível global é inteiramente um produto de decisões locais, as quais desconsideram o que acontece além da sua vizinhança imediata (PARKER, 2003; BATTY, 2000).

Sendo assim, a fim de superar as limitações apontadas, variações do modelo de AC clássico tornam-se necessárias, visando integrar fatores ambientais e sócio-econômicos, para representar a dinâmica espacial de fenômenos urbanos e acomodar ações à distância.

Entre essas variações estão os modelos de Autômatos Celulares Dissipativos (ACD), os quais são assíncronos e abertos, possibilitando a aparição de comportamentos emergentes, diferentemente dos AC tradicionais. Em síntese eles se diferenciam destes em duas características, tornando-se assim similares aos SMA (GATTI, 2003):

- As células atualizam seu status independente das outras, de maneira autônoma.
- O comportamento dinâmico do autômato pode ser influenciado pelo ambiente externo. Do ponto de vista operativo, isso implica que alguma célula do autômato possa ser forçada externamente a mudar seu estado, independentemente do seu estado ter sido avaliado e da função de transição.

### 4.3 Modelos baseados em Agentes

Conforme Gimblett (2002), modelos baseados em AC permitem simular fenômenos observáveis a um nível macro, mas emergentes de interações, leis ou regras localizadas (nível micro). Os autômatos têm sido utilizados para simular a dinâmica associada à transformação do espaço geográfico composto pelas células, contudo a simulação da ação direta do homem ou da fauna com mobilidade no espaço geográfico e comportamento inteligente (exemplo do tráfego nos meios urbanos, depósito de resíduos) fez emergir na última década a utilização do paradigma dos agentes inteligentes com SIG para modelar sistemas dinâmicos complexos com informação espacial.

Os SMA podem ser considerados como autômatos geográficos móveis. Eles têm todas as características de um AC, mas diferentemente destes, os agentes em um SMA podem ser programados com a liberdade para uma mobilidade espacial verdadeira dentro do ambiente que ele habita (TORRENS, 2003).

Assim como os AC, os SMA podem ser facilmente programados em programação orientada a objetos, oferecendo vantagens em termos de detalhes, flexibilidade, dinâmica, usabilidade e comportamento realista (BATTY, 2001).

White (2000) enumera algumas características que são atrativas dos SMA para simulação espacial, entre elas estão:

- Eles fornecem uma forma direta para representar entidades espaciais ou atores tendo propriedades ou comportamentos relativamente complexos.
- Representam hierarquicamente sistemas de forma natural.
- Capturam diretamente propriedades interativas de muitos sistemas naturais e humanos, assim como comportamentos de sistemas complexos que emergem dessa interação.

Uma simulação com SMA, de maneira geral, baseia-se no princípio de que é possível representar de maneira computadorizada o comportamento de entidades que são ativas no mundo, e através disso representar um fenômeno como o produto de interações de um conjunto de agentes que possuem autonomia operacional (FERBER, 1999).

Um modelo de simulação baseado em agentes consiste em um conjunto de entidades tomadoras de decisão (agentes) que encapsulam os comportamentos dos vários indivíduos que compõem o sistema, de um ambiente através do qual os agentes interagem, de regras que definem os relacionamentos entre os agentes e seu ambiente, e regras que determinam a seqüência de ações do modelo. Sendo que, por sua vez, a execução deste consiste na emulação dos comportamentos dos indivíduos que o compõe (GILBERT, 1999; PARKER, 2001).

Nesse tipo de modelagem deve-se levar em consideração os aspectos relevantes do ambiente à simulação, que podem ser características físicas perceptíveis dos agentes, objetos, forças eletrostáticas, feromônios e várias outras características, dependendo do enfoque desejado para a simulação (OKUYAMA, 2003).

Em Klügl (2001) são relacionadas propriedades que as simulações baseadas em agentes (SMA), de uma maneira geral, devem ter para que uma simulação possa acontecer de forma mais adequada:

- Identificar claramente os agentes, suas atividades e seus componentes dentro do ambiente. Para selecionar as atividades deve-se observar os objetivos específicos que o agente deve ter.
- Lembrar que os agentes possuem um comportamento não-trivial. Dessa forma, agentes mais simples são implementados de forma mais eficiente em uma linguagem orientada a agentes.
- Quanto mais simples a estrutura de cada agente melhor para o sistema, pois o foco da modelagem deve ser o comportamento e as interações dos agentes, e não suas habilidades internas.
- Deve haver uma descrição do sistema do agente e do ambiente em que o agente se posiciona, pois isso facilita a implementação e a solução de possíveis erros.

Do ponto de vista dos agentes espaciais, Rodrigues (1998) os classifica em três áreas específicas:

- Simulação espacial: onde a simulação está amplamente conectada ao uso de AC. Componentes simples, como um todo, produzem padrões complicados de comportamento, podendo ser comparado a um conjunto de agentes reativos interagindo.
- Tomada de decisões espacial: agentes são utilizados para resolver problemas complexos de otimização espacial.
- Agentes de interface em SIG: nessa categoria os agentes são sistemas semi-autônomos que auxiliam o usuário, colaborando no seu ambiente de trabalho e aumentando a usabilidade das aplicações.

SMA, assim como os AC, são usualmente sistemas fechados e não sujeitos à influência de eventos externos. Embora, muitos sistemas geográficos sejam abertos (TORRENS, 2003).

O campo das simulações sociais (como por exemplo, de crescimento urbano) são uma das áreas onde SMA se constituem na abordagem mais adequada para sua realização, por ser um problema de resolução descentralizada e os agentes envolvidos serem basicamente autônomos (OKUYAMA, 2003). A flexibilidade possível com modelos LUCC utilizando SMA os permite representar sistemas complexos de uso do solo e cobertura da terra.

Nos SMA os relacionamentos espaciais são extremamente explícitos, pois os agentes podem se mover de um lugar para outro. Assim, os agentes interagem com os demais e produzem constantemente mudanças no relacionamento espacial (WU, 2002). Em contraste com os modelos baseados puramente em AC, os quais como apontado por Benenson (2005) tem ainda uma evidente e principal limitação que é a imobilidade das células.

Modelos multiagentes para LUCC combinam dois componentes chave integrados através de interdependências e feedbacks entre os agentes e seu ambiente. O primeiro deles é um modelo celular que representa aspectos ecológicos e geofísicos do ambiente sobre o qual os atores tomam decisões, enquanto que o outro é um modelo baseado em agentes que descreve a tomada de decisões dos atores do sistema em estudo (PARKER, 2003).

O modelo celular pode incluir uma variedade de técnicas de modelagem espacial, (tais como os AC, modelos de difusão espacial e modelos de Markov), enquanto o modelo baseado em agentes fornece uma representação extremamente flexível de tomadores de decisão heterogêneos, que são potencialmente influenciados pelas interações com outros agentes e com seu ambiente natural (PARKER, 2001).

### 4.3.1 Trabalhos relacionados

O potencial dos SMA para modelar crescimento urbano tem sido demonstrado por vários autores. A seguir são brevemente apresentados alguns dos estudos que aplicam a tecnologia de agentes para a modelagem LUCC.

Benenson (1998) propôs uma abordagem utilizando modelos multiagentes e AC, onde componentes urbanos imóveis são descritos por AC e componentes móveis são modelados como agentes. Da mesma forma, Ligtenberg (2001), Batty (2001) e Sudhira (2004), também combinaram em suas propostas um modelo híbrido de AC e SMA para a simulação de mudanças do uso do solo.

No trabalho de Batty, os agentes interagem uns com os outros através de uma camada de células que representa localizações fixas da cidade. O modelo é designado para mostrar como uma área metropolitana com as dimensões de Chicago pode ter seu crescimento simulado.

As células têm cinco atributos diferentes: desenvolvidas ou não, desenvolvíveis ou não e uma medida de tamanho baseada no número de agentes localizados lá ao longo do tempo. São consideradas para cada agente um total de sete regras definidas para o modelo, conforme ilustrado graficamente nas figuras 4.7 e 4.8.

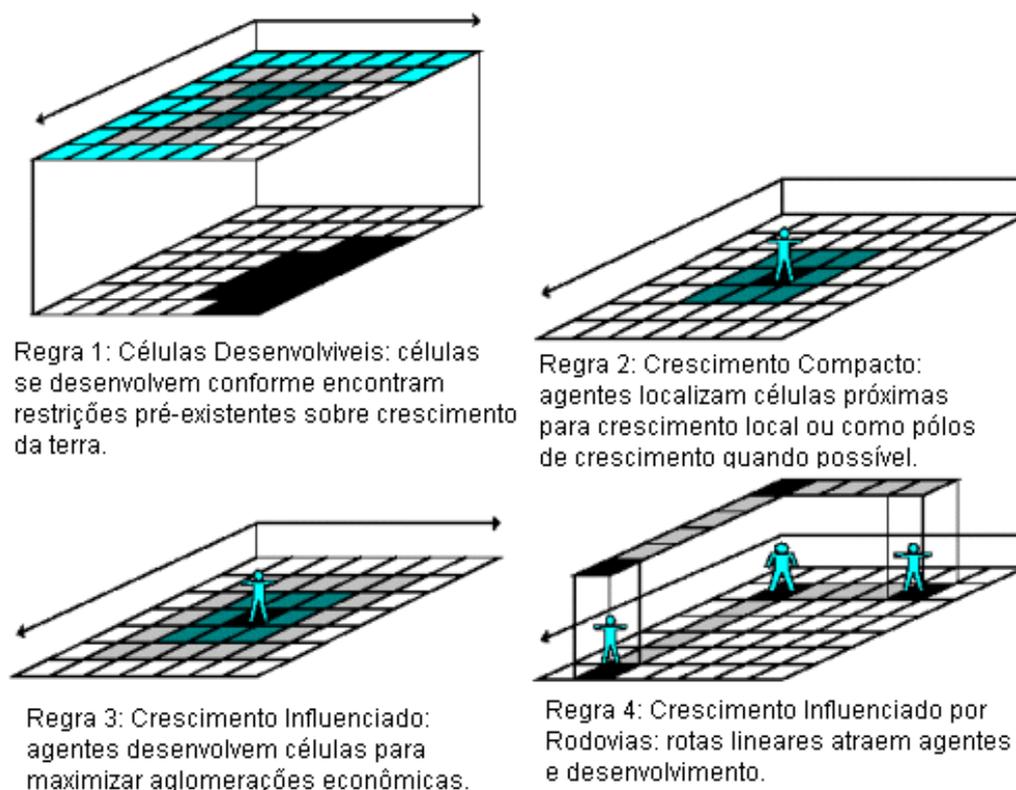


Figura 4.7: regras do modelo (BATTY, 2001)

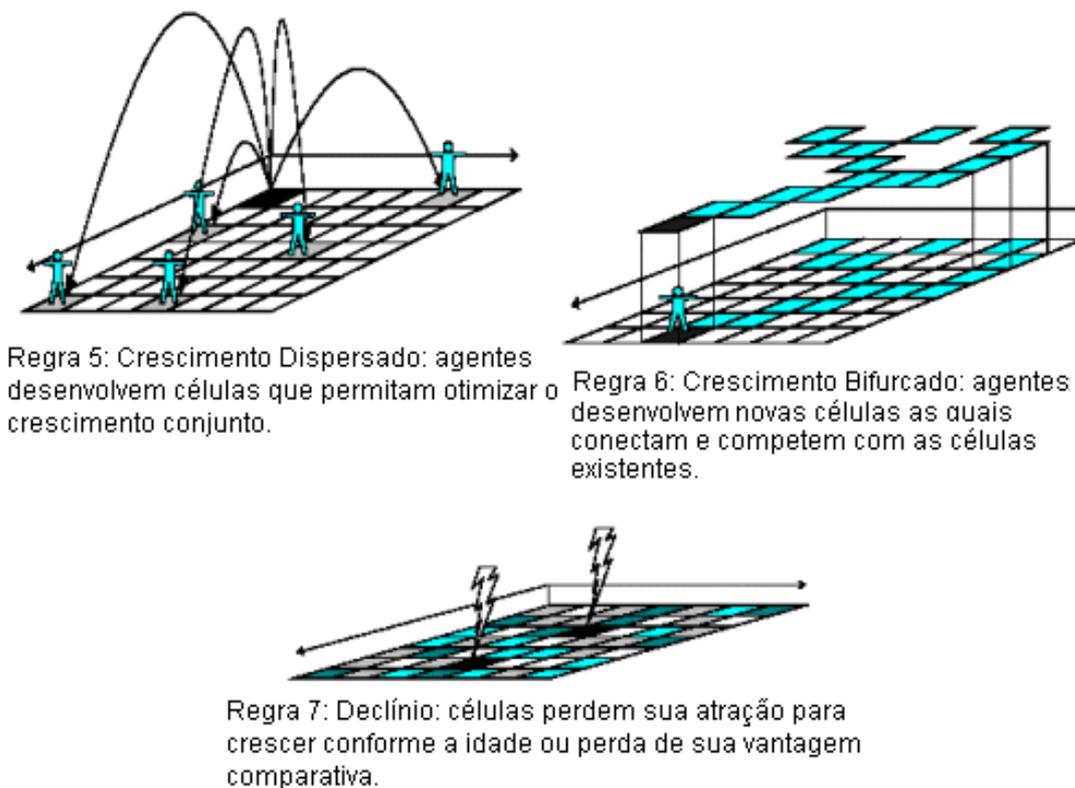


Figura 4.8: regras do modelo (BATTY, 2001)

Oliveira (2002) desenvolveu um SMA cognitivo que simula aspectos sociais do crescimento urbano. Na sua simulação os agentes interagem na cidade, dependendo do seu tipo (consumidores residenciais, consumidores comerciais ou produtores de espaço urbano) e das ações que podem realizar.

Arentze (2003), por sua vez, leva em conta efeitos de aglomeração e forças em seu modelo de SMA, porém de maneira diferente da empregada no trabalho apresentado nesta pesquisa e sem considerar representantes para as sub-áreas. Na proposta dele os agentes podem indicar seus interesses e fazer ofertas por determinadas células.

Em Ferrand (1996) são apresentadas duas abordagens voltadas para o planejamento espacial. Na primeira delas são usados SMA reativos para resolver problemas de organização espacial complexos encontrados na busca por áreas para infraestrutura que sofram impactos ambientais mínimos. Enquanto que a segunda proposta usa SMA cognitivos para suportar e simular a troca e dinâmica de representações espaciais e políticas.

#### 4.4 Outros Simuladores e modelos urbanos

Existem inúmeras propostas de simuladores de crescimento urbano, além dos apresentados anteriormente ao longo deste trabalho. A seguir são apresentados alguns dos mais relevantes (IOCHPE, 2004; PROJECTING, 2000).

#### **4.4.1 LUCAS**

O LUCAS (Land Use Change Analysis System), desenvolvido por Berry (1996) et al, tem como proposta examinar o impacto de atividades humanas sobre o uso do solo e os subsequentes impactos sobre o ambiente e recursos naturais. O SIG usado pelo LUCAS é o GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), além disso, ele trabalha com categorias de uso do solo residencial e comercial, e categorias não urbanizadas de uso do solo como agricultura, florestas, água, preservação ambiental, entre outros.

Suas simulações geram novos mapas de cobertura representando a quantidade de mudança de uso do solo.

Esse sistema fornece um flexível e interativo ambiente computacional para estudo de gerenciamento do solo, no entanto, o modelo requer treinamento e experiência para calibrar.

#### **4.4.2 UPLAN Simulator**

O Uplan Simulator (JOHNSTON, 2002) é um simulador de crescimento urbano que roda na versão para Windows do ArcView. É confiável para uma quantidade mínima de dados, mas aloca o crescimento urbano em diversos tipos de uso do solo para pequenas células. Ele é um cenário de teste modelo que pode ser aplicado a qualquer país ou região metropolitana de forma transparente para o usuário e permitindo facilmente mudar as suposições para a alocação de uso do solo.

#### **4.4.3 UrbanSim**

O UrbanSim (TEERAROJANARAT, 2004) é um software desenvolvido pelo Departamento de Transporte de Oregon em Java, disponibilizado livremente e com código aberto. Seu objetivo é o de simular o desenvolvimento de áreas urbanas, incluindo uso do solo, transporte e impactos ambientais, ao longo de períodos de tempo. É capaz de criar resultados realísticos para simulações urbanas com diferentes cenários, através de dados de entrada sócio-econômicos compreensíveis, eventos e ações especificadas pelo usuário (como por exemplo, política de planejamento, restrições ambientais).

## 5 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 o das formigas que o formam).

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.

No caso do problema sendo tratado aqui, 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 5.1).

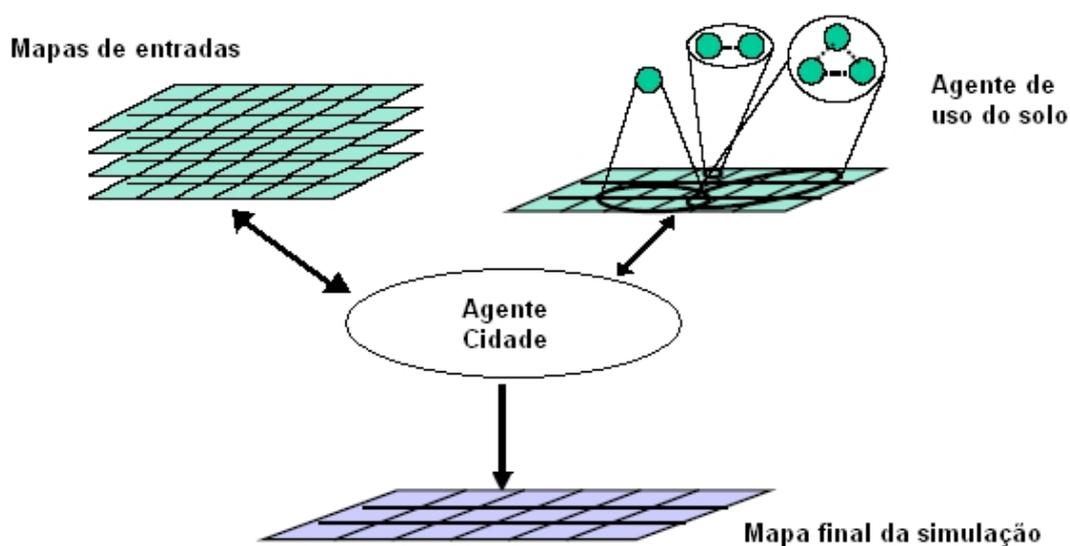


Figura 5.1: Estrutura do simulador

Entre os modelos reativos existentes (seção 2.4.1), 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.

## 5.1 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 (ALMEIDA, 2005).

A delimitação do período de simulação (tempo inicial e final) geralmente é confinada à edição de mapas de uso oficiais (como no caso deste trabalho), contudo, conforme explicado por Almeida (2003) podem ser definidos de acordo com circunstâncias homogêneas, tais como mandatos de governo com semelhantes plataformas, cenários macroeconômicos estáveis, etc.

Este procedimento de delimitação é funcional devido ao fato de que as variáveis forçantes determinando as mudanças de uso tendem a se alterar de tempos em tempos, como resultado de forças exógenas, a exemplo de contextos político-econômicos (ALMEIDA, 2003).

Com base nessa necessidade, para o desenvolvimento do simulador, os mapas digitais que alimentaram o modelo de simulação basearam-se em mapas de uso do solo urbano produzidos pela secretaria de planejamento da cidade utilizada como estudo de caso (Bauru/SP), compreendendo um período de trinta e três anos (entre 1967 e 2000). No próximo capítulo serão apresentados mais detalhes sobre a cidade.

Quando um experimento pretende representar um caso de crescimento urbano real, a validação é conseguida por calibração do modelo, de modo a aproximar os resultados da simulação ao caso real em estudo. Esse processo é então implementado mediante a eleição de estados passados da área de estudo, em pelo menos dois tempos pregressos, usando como entrada (input) os dados no tempo ( $t - n$ ) e comparando as saídas (outputs) com os dados do tempo ( $t$ ). Obtendo-se sucesso na calibração, ou seja, conseguindo uma

aproximação suficiente entre simulação e realidade, estará alcançada a validação do modelo (POLIDORI, 2004).

Como o simulador também 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.

Uma vez calibrado um modelo de simulação, é possível então testar possibilidades de crescimento com diferentes configurações, explorando cenários que recriam estados configuracionais passados e cenários de crescimento futuro (SAURIM, 2005).

Na figura 5.2 são apresentados os mapas de uso do solo em formato vetorial desse período considerado para as simulações.

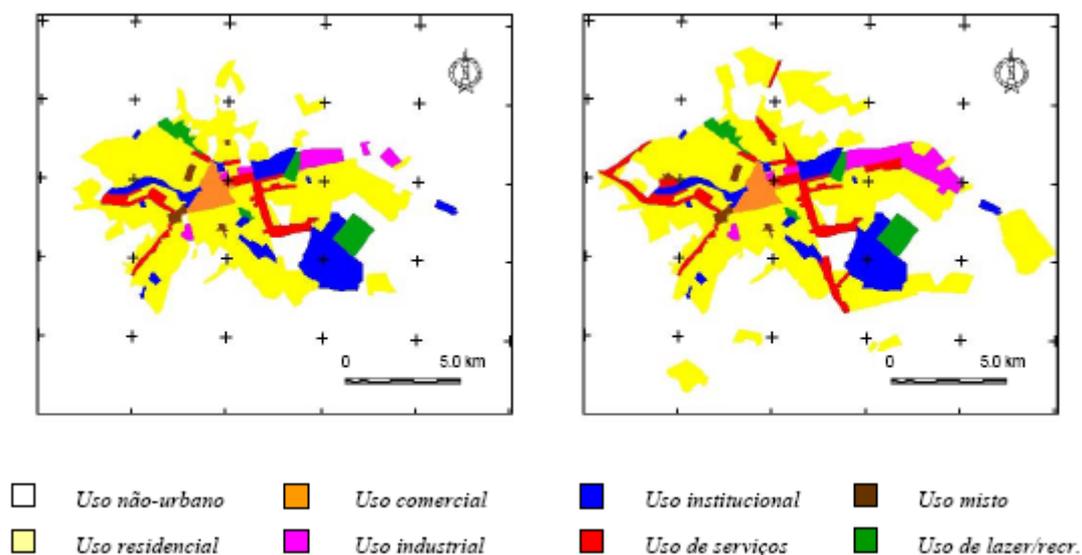


Figura 5.2: Mapas de uso do solo de Bauru em 1979 (esq) e 1988 (dir)

Os mapas da cidade disponíveis para a calibração do modelo forneciam informações sobre oito categorias de uso do solo: residencial, comercial, industrial, serviços, institucional, zona mista, lazer/recreação e uso não-urbano (como pode ser visto na figura 5.2). As zonas de uso misto compreendem basicamente aos usos residencial, comercial e de serviços.

As zonas de lazer/recreação incluem parques, zoológico e outras áreas verdes públicas. Enquanto que as zonas de uso institucional, por sua vez, referem-se às áreas abrigando grandes equipamentos públicos, tais como aeroportos, áreas de apoio a ferrovias, universidades, complexos hospitalares ou outras superestruturas.

Os dados empregados na construção do simulador são os mesmos apresentados na tese de Almeida (2003), os quais nos foram fornecidos através de um banco de dados geográfico contendo os dados georreferenciados, manipulados com o auxílio do SIG Spring (SPRING, 2006), desenvolvido pelo INPE.

Com base nesses dados e nos resultados obtidos pelo simulador, será mostrado um breve comparativo com os obtidos pelo trabalho de Almeida, no qual foram usados apenas AC para a modelagem.

### **5.1.1 Transições de uso do solo**

Considerando as categorias de uso do solo identificadas, observa-se que as transições existentes em Bauru no período de 1979 a 1988 são as seguintes: áreas não urbanizadas para residenciais, áreas não urbanizadas para uso industrial, áreas não urbanizadas para uso de comércio/serviços, áreas de uso residencial para comércio/serviços e áreas de uso industrial para residencial.

Na seção 5.4, onde são expressos os comportamentos dos agentes, essas transições encontradas no período e as razões que influenciaram nas suas respectivas presenças têm a sua contribuição para a definição das restrições aplicadas aos agentes do simulador apresentada.

#### *5.1.1.1 Áreas não urbanizadas para residenciais*

No período adotado, essa primeira transição foi influenciada pela existência prévia de residências nos loteamentos vizinhos as áreas não urbanizadas, da proximidade dessas áreas em relação a centros comerciais e da disponibilidade de acesso a eles, seguindo assim as tendências de transformação de áreas não urbanas em residenciais apresentadas anteriormente.

#### *5.1.1.2 Áreas não urbanizadas para uso industrial*

Além dos forçantes a esse tipo de transição como a existência de outras áreas industriais próximas (uma vez que lotes na vizinhança de áreas industriais em geral são desvalorizados para outros usos e tornam-se com isso atraentes para uso industrial) e facilidades de acesso tanto rodoviário quanto ferroviário, um novo setor industrial foi criado na porção noroeste da cidade, influenciando assim nessa transição de uso e requerendo proximidade aos centros de fornecimento de mão-de-obra (áreas residenciais).

Outros fatores que também contribuíram para essas mudanças no período foram provocados com base na distância da zona comercial da cidade, uma vez que áreas industriais dependem de atividades comerciais para suporte logístico, influenciando dessa maneira na transição de áreas não urbanizadas para uso industrial.

#### *5.1.1.3 Áreas não urbanizadas para uso de comércio/serviços*

Três fatores foram cruciais nesse tipo de transição, que são a proximidade dessas áreas a agrupamentos de atividades comerciais, a sua cercania ao uso residencial, e por fim, a sua localização estratégica em relação às principais vias de Bauru.

O primeiro fator responde pelo mercado de fornecedores (e em alguns casos, também mercado de consumidores) de serviços; o segundo fator representa o mercado de consumidores por excelência; e o terceiro e último fator corresponde à acessibilidade para ambos mercados afeitos ao uso de serviços (ALMEIDA, 2003).

No período essa transição ocorre basicamente como uma extensão de corredores de serviços previamente estabelecidos.

#### 5.1.1.4 Áreas de uso residencial para serviços

Supõe a inserção de serviços em áreas residenciais. Desta forma, uma vez que este tipo de transição já ocorre em meio a mercados fornecedores e consumidores, ele priorizará apenas uma localização estratégica em relação aos eixos de serviços N-S / E-O e irá ocorrer na ausência de rede de água (ALMEIDA, 2003).

Áreas próximas aos eixos de serviços, porém privadas de água no início da simulação referem-se àquelas áreas localizadas no limite imediato de áreas urbanas consolidadas, exatamente onde novas zonas de serviços são suscetíveis de ocorrerem.

#### 5.1.1.5 Áreas de uso industrial para residencial

Supõe boas condições de acessibilidade e uma localização dentro de uma distância razoável da zona comercial, em vista da necessidade dos moradores de se transportarem para as áreas centrais.

### 5.1.2 Probabilidades de transição

A implementação do protótipo baseou-se nas probabilidades globais de transição para cada tipo de uso do solo da cidade de Bauru estimadas por Almeida (2003) para o período completo de trinta e três anos utilizado durante a calibração. Sendo que para sua obtenção foram empregados dois métodos estatísticos empíricos (pesos de evidência e regressão logística) com base nas séries históricas disponíveis.

Nas tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 mostradas a seguir são apresentadas essas probabilidades globais de transição dos três períodos, ou seja, a quantidade total de mudanças de uso para Bauru nos respectivos períodos.

Tabela 5.1: Matriz de probabilidades de transição para Bauru (1967-1979)

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-urbano</i>	<i>Resid.</i>	<i>Comércio</i>	<i>Industria</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Misto</i>	<i>Lazer</i>
<i>Não-urbano</i>	0,9361	0,0315	0	0,0022	0,0199	0,0009	0	0,0094
<i>Resid.</i>	0	0,9498	0	0	0	0,0485	0,0016	0
<i>Comércio</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Industria</i>	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Lazer</i>	0	0	0	0	0	0	0	1

Fonte: ALMEIDA, 2003.

Tabela 5.2: Matriz de probabilidades de transição para Bauru (1979-1988)

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-urbano</i>	<i>Resid.</i>	<i>Comércio</i>	<i>Industria</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Misto</i>	<i>Lazer</i>
<i>Não-urbano</i>	0,9171	0,0698	0	0,0095	0	0,0036	0	0
<i>Resid.</i>	0	0,9380	0	0	0	0,0597	0,0023	0
<i>Comércio</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Industria</i>	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Lazer</i>	0	0	0	0	0	0	0	1

Fonte: ALMEIDA, 2003.

Tabela 5.3: Matriz de probabilidades de transição para Bauru (1988-2000)

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-urbano</i>	<i>Resid.</i>	<i>Comércio</i>	<i>Industria</i>	<i>Instituc.</i>	<i>Serviços</i>	<i>Misto</i>	<i>Lazer</i>
<i>Não-urbano</i>	0,9615	0,0333	0	0,0043	0	0,0009	0	0
<i>Resid.</i>	0	0,9997	0	0	0	0,0003	0	0
<i>Comércio</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Industria</i>	0	0,0438	0	1	0	0	0	0
<i>Instituc.</i>	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Serviços</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Misto</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Lazer</i>	0	0	0	0	0	0	0	1

Fonte: ALMEIDA, 2003.

## 5.2 Descrição dos Agentes

Agentes sociais, como os empregados na tarefa de simulação de aspectos do crescimento urbano, são concebidos para serem auto-suficientes e, assim que estejam em um contexto social sejam capazes de encontrar os meios de auto-realização, tendo o ambiente comum e os outros agentes como limitantes de sua autonomia e realizações. Tais agentes podem ser criados tendo-se somente aspectos específicos e relevantes em cada tipo de simulação, facilitando a avaliação mais precisa do sistema (GILBERT, 1995; OLIVEIRA, 2002).

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 é usado para a representação da cidade (mundo). A parte de infra-estrutura (rodovias e ferrovias) faz 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).

Optou-se por juntar como um único tipo de agente os usos comercial e de serviços, de modo a ter um maior número de agentes do tipo combinado deles.

Além desses agentes citados, cada zona possui pelo menos um centróide, 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.

Para exemplificar, na figura 5.3 são apresentados os centróides de algumas áreas, sendo que a linha tracejada representa a linha férrea da região e a linha constante (em roxo) uma das rodovias que atravessam a cidade e que aparece nessa imagem.

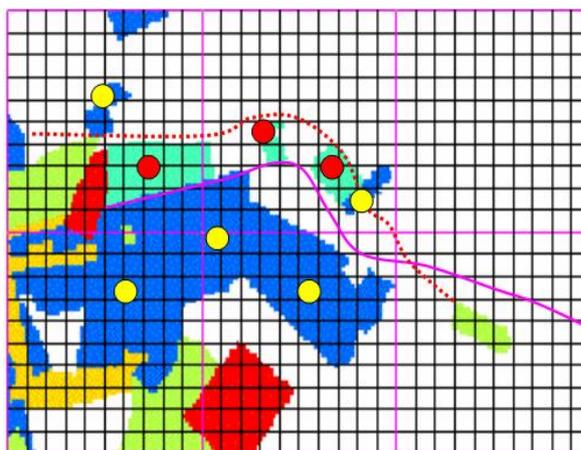


Figura 5.3: Centróides das áreas

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 5.4).

Para o **agente mundo**, por sua vez, cabe a responsabilidade de gerar novos agentes dos outros tipos, novos centróides e atualizar o peso destes.

### 5.3 Desenvolvimento

Conforme Hubner (2003) existem duas abordagens comuns no processo de desenvolvimento de um SMA, de modo a tentar conciliar autonomia e controle, que seriam:

- **Top-down:** inicia-se definindo os aspectos coletivos, como organização e comunicação que são refinados até a definição dos agentes. O projetista olha o sistema como um todo;
- **Bottom-up:** inicia-se definindo os aspectos individuais, relacionados aos agentes, de tal forma que ocorra a emergência dos aspectos coletivos. A interação e a organização são definidas do ponto de vista dos agentes. O projetista vê o sistema como se estivesse “dentro dos agentes”.

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 esta 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 (agente mundo), 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, como citado anteriormente.

Baseados nos mapas originais em formato vetorial foram gerados mapas matriciais bidimensionais em formato de grade com 63 colunas por 50 linhas para uso no simulador. Nestes todas as células são quadradas e de mesmo tamanho.

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.

Para esse processo de conversão foi utilizado o Spring, da maneira mostrada na figura 5.4 e figura 5.5, permitindo assim a geração dos mapas no novo formato. Na figura 5.6, por sua vez, é mostrado o resultado de uma dessas conversões, para o mapa de uso do solo de Bauru em 1988.

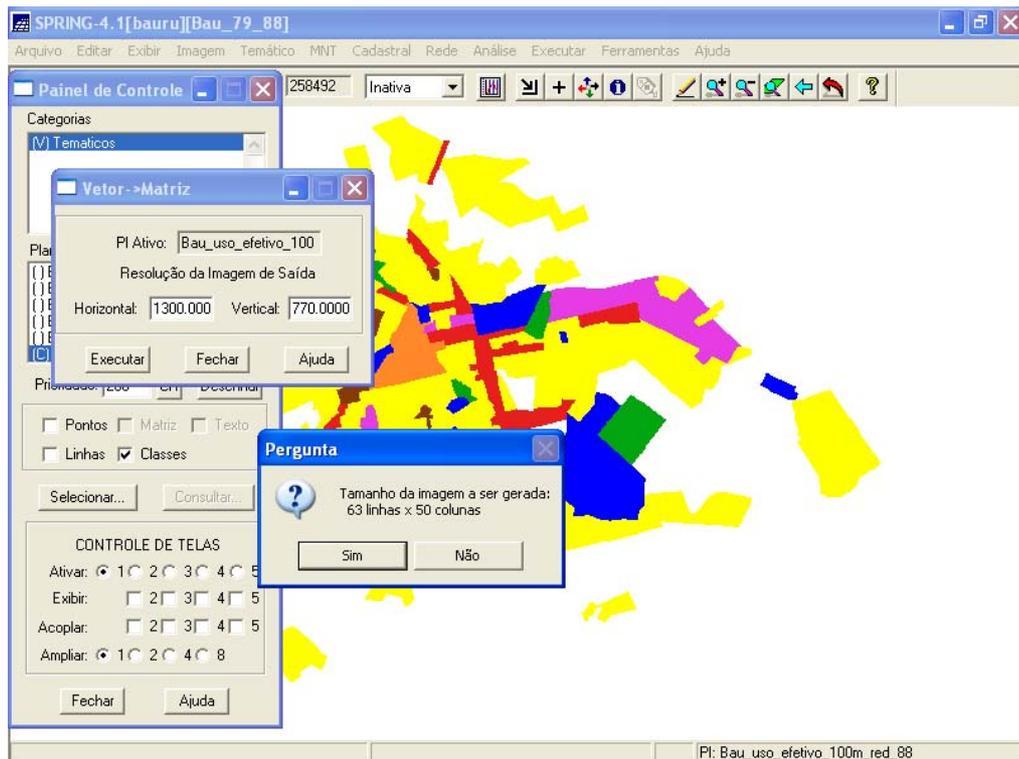


Figura 5.4: Procedimento de conversão no Spring

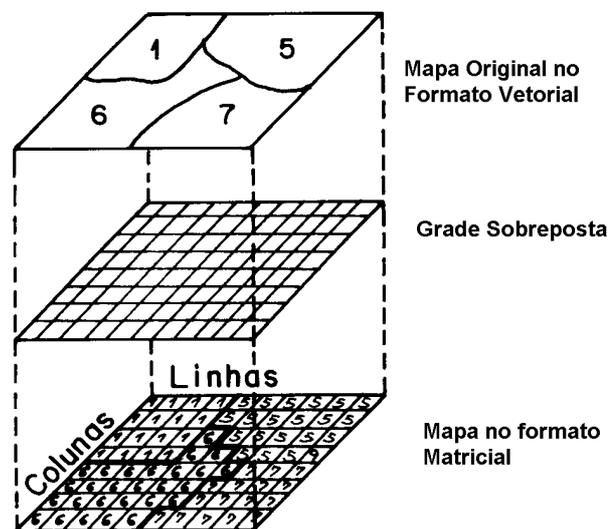


Figura 5.5: Conversão de mapa vetorial para matricial

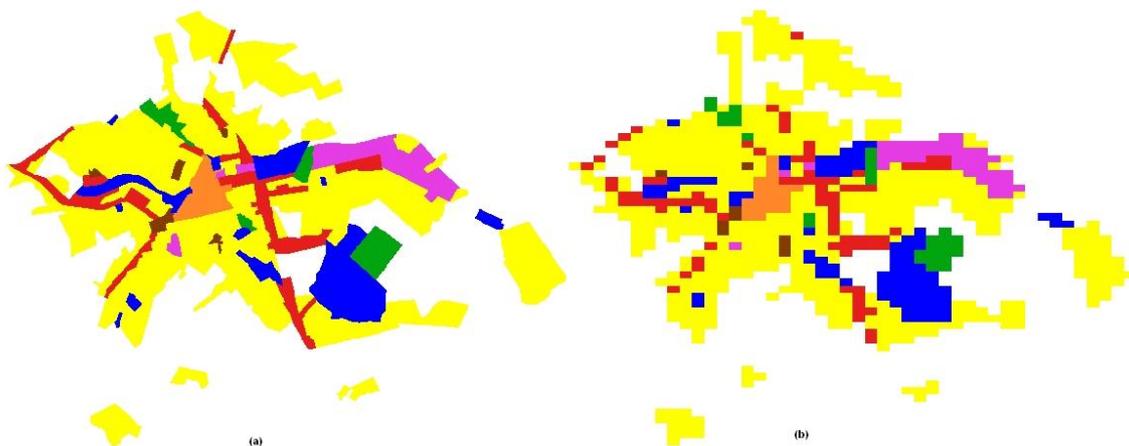


Figura 5.6: Mapa vetorial (a) e matricial (b) do uso do solo em 1988

No mapa com as principais rodovias foi considerado um gradiente de distâncias, similar ao apresentado na figura 4.6. 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.

#### 5.4 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. No caso do simulador representada pela interação entre os agentes.

No contexto de crescimento urbano as interações entre as vizinhanças são freqüentemente 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.

De maneira geral, 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.

Por sua vez, para uma simulação de mudança de uso do solo urbano, tendo como base o caso de cidades de porte médio, cada um dos agentes do sistema desenvolvido obedece às restrições apresentadas a seguir. Sendo que, levou-se em consideração para a modelagem do comportamento dos agentes, os aspectos que influenciam no crescimento urbano que foram apresentados na seção 3.3, assim como algumas regras próprias para a cidade em estudo (que no caso de utilização do simulador para outras cidades necessitam ser desativadas) e regras aplicadas em outros trabalhos como o de White e Engelen (1993).

#### 5.4.1.1 *Cidade*

Este agente é o 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;
- Calcular as estatísticas.

#### 5.4.1.2 *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 deste 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.

#### 5.4.1.3 *Indústrias*

Os agentes desse tipo partem do centróide de origem em direção ao centróide atrator do mesmo. Para a escolha deste 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.

#### 5.4.1.4 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:

$$\text{atratividade} = a + b*\text{atratSOLO} - c*\text{atratRES} - d*\text{atratIND} + e*\text{atratVERDE} - f*\text{atratCOMSERV} + g*\text{atratINST} + h*\text{atratMIST} + i*\text{atratRODO},$$

onde a, b, c, d, e, f, g, h e i são constantes.

## 6 ESTUDO DE CASO

A área de estudo adotada para a realização das simulações utilizando SMA foi à cidade de Bauru (figura 6.1), localizada no centro-oeste do estado de São Paulo, a 325 km da capital e organizada em torno de quatro rodovias inter-regionais e uma linha férrea que a cruza. Sua população atualmente está em torno de 316 mil habitantes.

Assim como quase todas as grandes cidades do interior paulista, o crescimento econômico de 50 a 70 e os efeitos menos problemáticos da crise dos anos 80 permitiram uma expansão física acentuada da mesma (ALMEIDA, 2003).

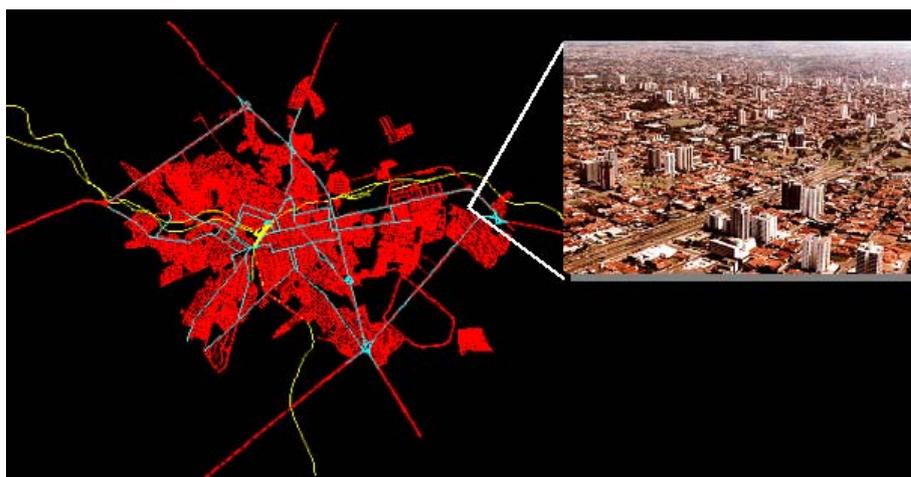


Figura 6.1: Cidade de Bauru.

O município é considerado como o maior ponto de entroncamento intermodal da América Latina, reunindo ferrovias, hidrovias e rodovias. A cidade em si nasceu como um ponto de cruzamento ferroviário durante a marcha de expansão da cultura cafeeira no século passado. Quatro rodovias inter-regionais atravessam a cidade, conectando-a a capital do Estado, ao extremo oeste de São Paulo, assim como aos Estados do Mato Grosso do Sul e Paraná (ALMEIDA, 2003).

Bauru foi uma das cidades que mais cresceram em termos comparativos no país nos anos 80, reproduzindo em menor escala o padrão de grandes cidades latino-americanas, com edifícios elevados em áreas centrais, vazios urbanos dispersos em meio à aglomeração principal como resultado de ações especulativas, e loteamentos periféricos de baixa renda (SEBRAE-SP, 2006).

Entre as principais fontes de renda do município estão o comércio (que é o mais significativo), os serviços e as indústrias (em menor escala). A distribuição das áreas verdes na cidade não é igualitária, apesar de haver praças públicas por toda malha urbana, na grande maioria representando sobras de terrenos sem paisagismo e equipamentos de infra-estrutura (JÚNIOR, 2000).

A escolha dessa cidade para o estudo de caso deve-se ao fato de possuímos séries históricas de dados fornecidos por imagens de satélite dessa região, o que nos permite rodar uma seqüência de simulações e comparar os resultados obtidos com imagens reais do seu crescimento urbano e as respectivas probabilidades de transição dos uso do solo da mesma.

Também colaborou para sua escolha como estudo de caso, a existência de resultados para simulações da dinâmica de uso do solo, apresentados em trabalhos como o de Almeida (2003), nos possibilitando assim traçar um comparativo da eficiência da proposta apresentada, com os resultados alcançados através da utilização de outras técnicas como os modelos de Autômatos Celulares (AC), que foram empregados no trabalho dela.

## **6.1 Simulação do crescimento em Bauru**

Conforme descrito por Frozza (1997), uma simulação pode ser dividida em três etapas:

- Etapa de Modelagem: onde é construído o modelo do fenômeno a ser estudado a partir da realidade e tendo-se como base à teoria;
- Etapa de Validação: onde os resultados das simulações são analisados, sendo comparados os dados experimentais obtidos pelo modelo com as observações da realidade.

Sendo assim, nesta seção serão apresentadas as duas últimas etapas do processo, uma vez que, no capítulo anterior (seção 5.7) já foi mostrada a etapa de modelagem do simulador proposto, sendo descrito o desenvolvimento do simulador.

No caso do sistema proposto, o experimento inicia com a leitura dos mapas matriciais. Neste exercício de simulação são lidos dois mapas de ocupação de solo (inicial e final), correspondendo respectivamente aos anos de 1979 e 1988. 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 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 5.4, buscando assim uma posição vazia no grid, que represente uma posição de equilíbrio para este no ambiente.

### 6.1.1 Resultado das simulações

Na figura 6.2 é apresentado o resultado de uma das simulações (no **melhor caso**) realizadas para o período considerado, sendo apresentados apenas os novos agentes posicionados. Enquanto que para termos de comparação visual, na figura 6.3 (a) e (b) são apresentados respectivamente o mapa da simulação e o mapa real das mudanças de uso do solo em 1988.

Na tabela 6.1, por sua vez, são apresentadas as taxas de acerto no melhor e pior caso obtidas pelo protótipo.

Tabela 6.1: Taxas de acerto das simulações.

Situação	Residências	Indústrias	Comércio	Corretamente
Melhor caso	91,96%	92,15%	89,18%	91,09%
Pior caso	88,74%	86,27%	81,08%	85,36%

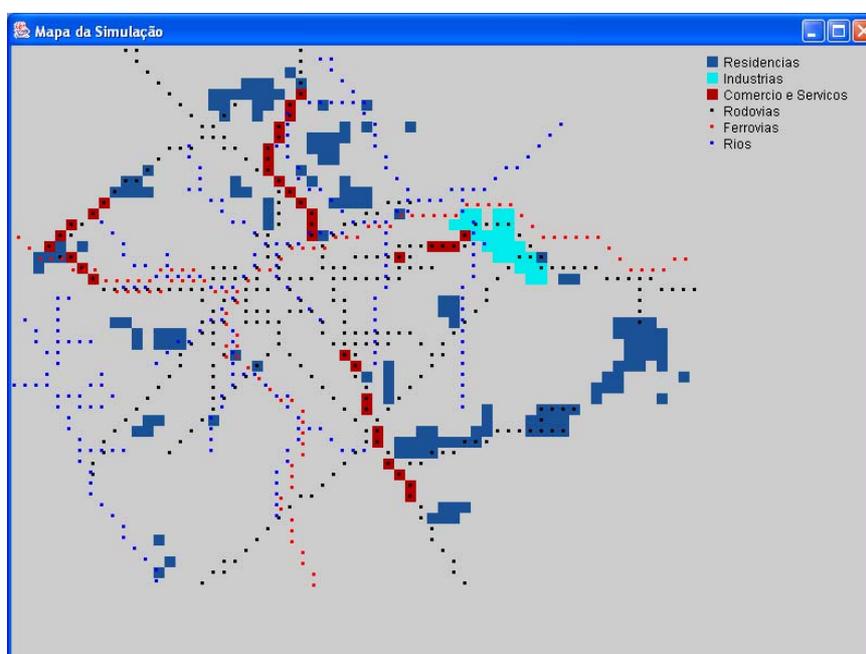


Figura 6.2: Mapa com somente os agentes posicionados.

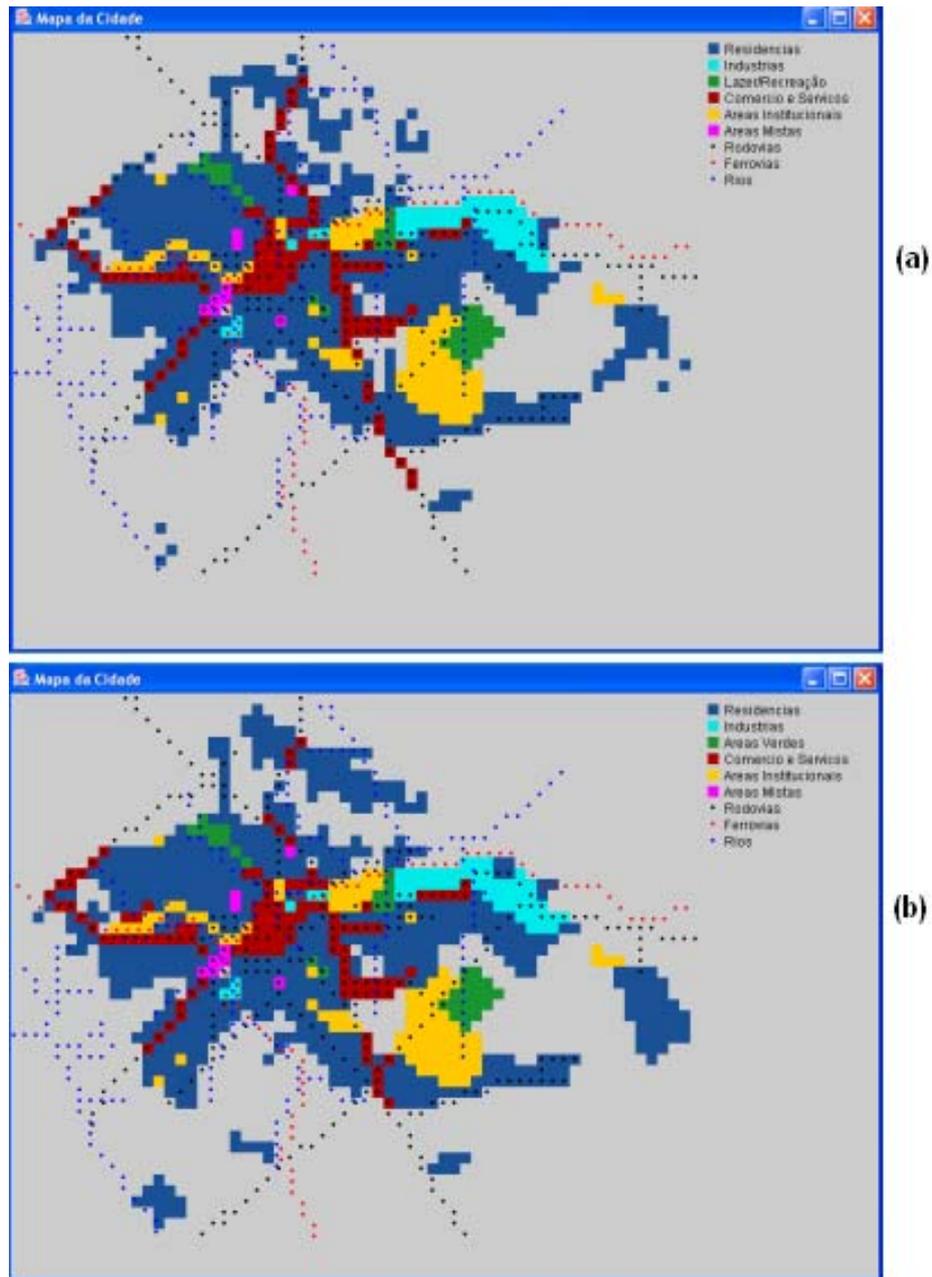


Figura 6.3: Resultado de uma Simulação (a) e Mapa Real do período (b).

Realizando a simulação por tipo de agente individualmente, pode-se observar o comportamento mostrado nas figuras 6.4, 6.6 e 6.8, representando os agentes do tipo residência, indústria e comércio/serviço respectivamente. Enquanto que, nas figuras 6.5, 6.7 e 6.9 são apresentados os mapas reais destes no período considerado.

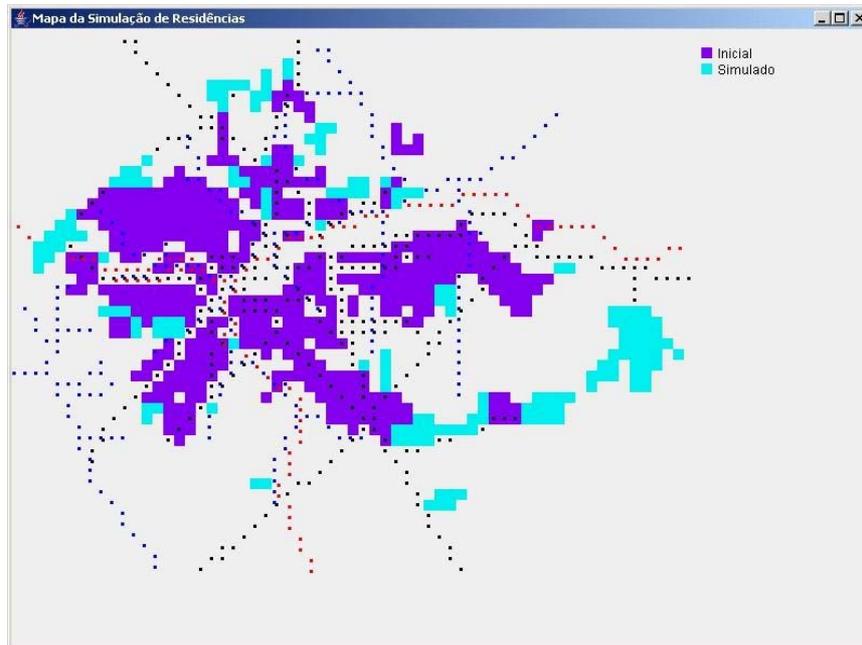


Figura 6.4: Mapa com simulação de residências.

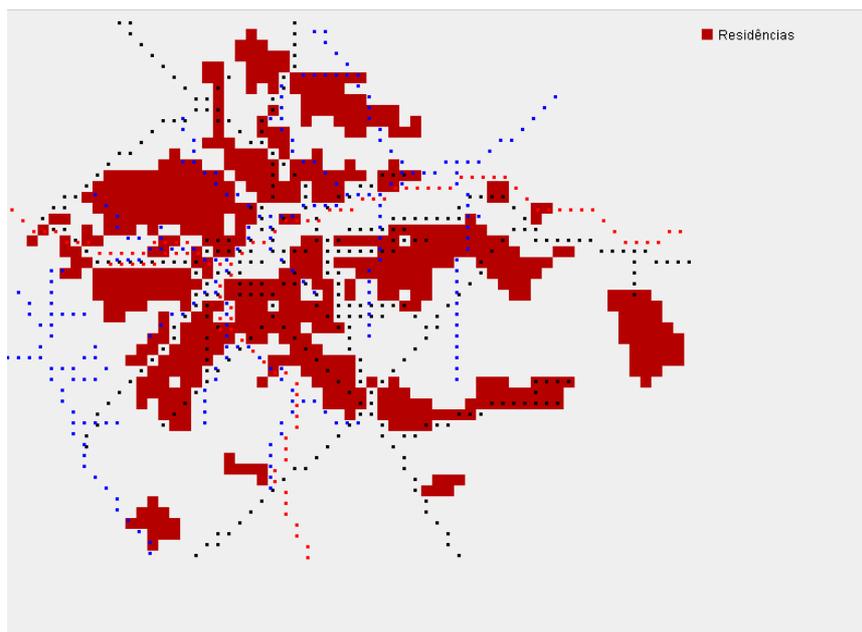


Figura 6.5: Mapa de residências 1988.

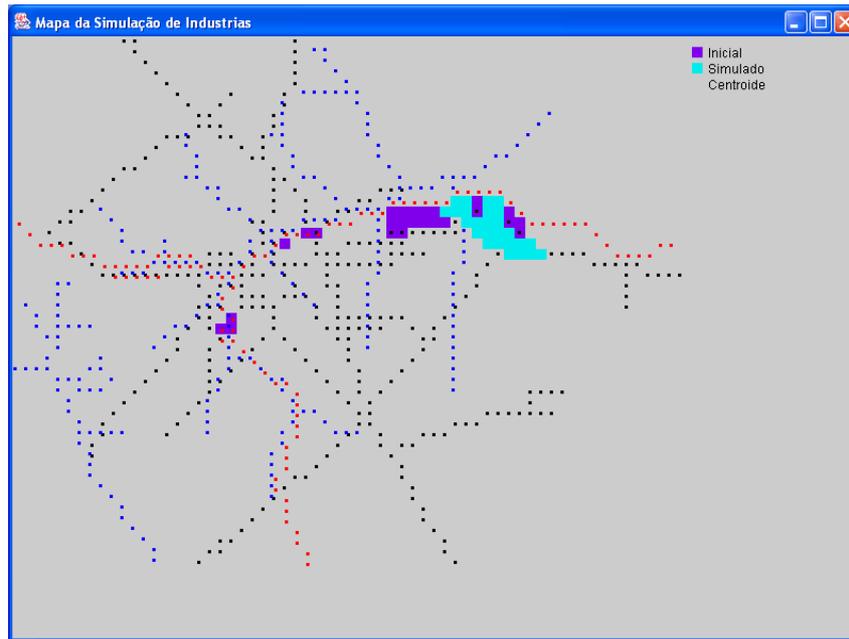


Figura 6.6: Mapa com simulação de indústrias.

A simulação do crescimento de indústrias de forma isolada dos outros tipos de agentes impede a possibilidade do surgimento de uma área residencial nesse distrito, como pode ser percebido na figura 6.7 (células em amarelo) que apresenta o uso real no final do período.

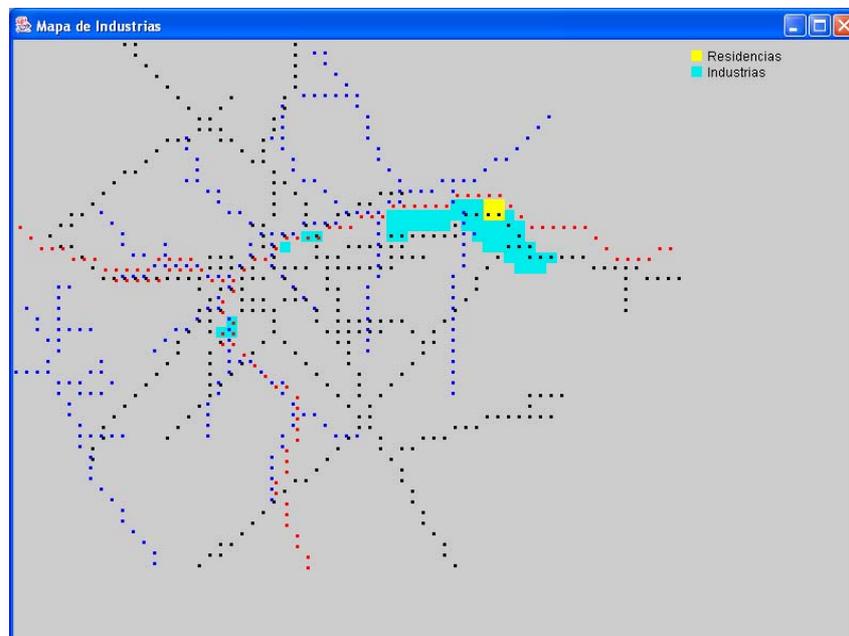


Figura 6.7: Mapa de indústrias 1988.

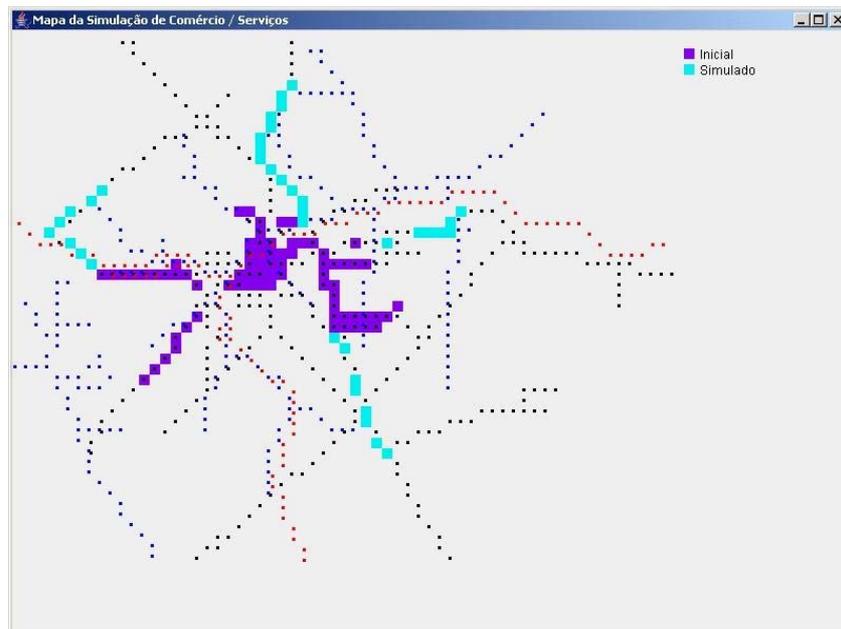


Figura 6.8: Mapa com simulação de comércio / serviço.

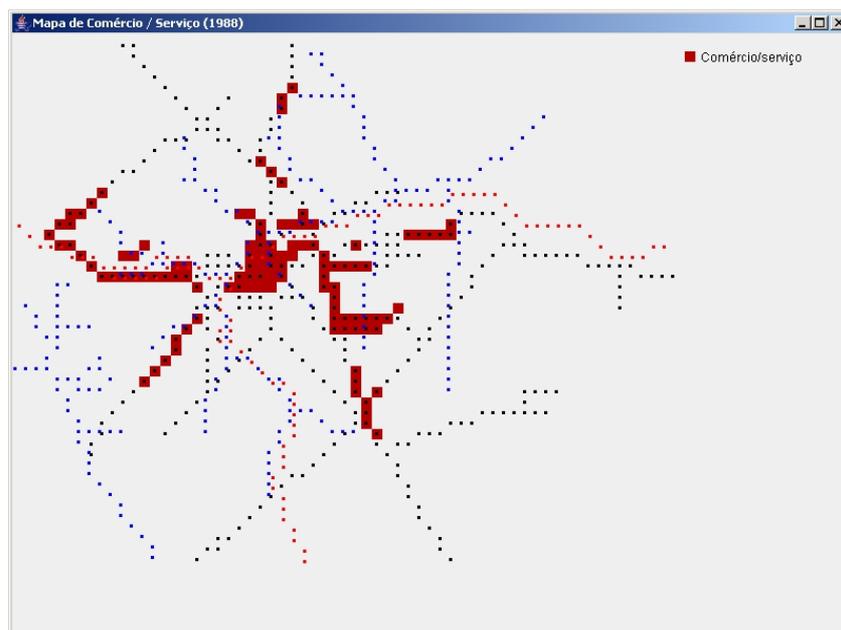


Figura 6.9: Mapa de comércio / serviço 1988.

### 6.1.2 Considerações finais

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 6.2, a qual também relaciona os resultados obtidos em média pelo trabalho de Almeida (2003).

Tabela 6.2: Comparação de resultados.

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

Nos SMA os relacionamentos espaciais são extremamente explícitos, pois os agentes podem se mover de um lugar para outro. Assim, os agentes interagem com os demais e produzem constantemente mudanças no relacionamento espacial (WU, 2002).

Em contraste com os modelos baseados em autômatos celulares (AC), como o do trabalho de Almeida (2003), os quais apresentam desvantagens tais como a imobilidade das células e as mudanças serem estritamente locais (ou seja, baseadas na vizinhança de cada célula). Essas desvantagens da aplicação de AC em modelagem urbana e o fato das regras aplicadas não serem exatamente as mesmas contribuíram para a diferença nos resultados das simulações para uma mesma área utilizada como estudo de caso (e no mesmo período).

## 7 CONCLUSÕES

A simulação do crescimento urbano auxilia os planejadores a escolherem as melhores opções para o desenvolvimento sustentável das cidades. Na proposta apresentada essa simulação ocorre através de uma abordagem que utiliza SMA reativos e baseada na influência que cada agente apresenta sob os demais, nas percepções que eles obtém 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 às de Bauru, havendo a necessidade apenas de informar as probabilidades de transição e os mapas de entrada da localidade a ser simulada.

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

Além disso, pretende-se melhorar a resolução do simulador e 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. **Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity**. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1997. 275 p.

ALMEIDA, C. M. de. **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. 2003. 326f. Tese ( Doutorado em Sensoriamento Remoto ) – Divisão de Processamento de Imagens, INPE, São José dos Campos.

ALMEIDA, C. M. de; MONTEIRO, A. M. V.; CAMARA, G. Modelos de simulação e prognósticos de mudanças de uso do solo urbano: instrumento para o subsídio de ações e políticas públicas urbanas. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, ANPUR, 11., 2005. **Anais...** Salvador: [s.n.], 2005.

ALVARES, L. O. C.; SICHMAN, J. S. Introdução aos Sistemas Multiagentes. In: JORNADA DE ATUALIZAÇÃO EM INFORMÁTICA, JAI, 16., 1997, Brasília. **Anais**. Brasília: UnB, 1997.

ARENTZE, T.; TIMMERMANS, H. Modeling agglomeration forces in urban dynamics: a multiagent system approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN URBAN PLANNING AND URBAN MANAGEMENT, 8., 2003. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2003.

BARNES, K. B. et al. **Sprawl development**: its patterns, consequences and measurement. Towson: Towson University, 2001.

BARREDO, J. I. et al. Modelling the future of cities using cellular automata: the MOLAND methodology. EUROPEAN AND GREEK EXPERIENCE IN G.I.S. EUROPEAN SEMINAR, 2002. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2002.

BASTOS, A. D. **Estudo de técnicas para identificação de limites entre áreas urbanizadas e não urbanizadas com base em dados geográficos de imagens de satélite**. 2005. 43f. Trabalho Individual ( Mestrado em Ciência da Computação ) – Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre.

BATTY, M. **Urban Modelling**: Algorithms, Calibrations, Predictions. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 381 p.

- BATTY, M. GeoComputation using cellular automata. In: OPENSHAW, S.; ABRAHART, R. J. (Ed.) **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000, p. 95-126.
- BATTY, M.; TORRENS, P. M. Modeling complexity: the limits to prediction. **CyberGeo European Journal of Geography**, [S.l.], Dec. 2001.
- BAUJARD, O. et al. Vers une taxinomie du vocabulaire pour les systèmes multi-agents. **Journée Systèmes Multi-Agents du PRC-GDR Intelligence Artificielle**. Nancy: [s.n.], 1992.
- BENENSON, I. Multi-Agent simulations of residential dynamics in the city. **Computers, Environment and Urban Systems**, [S.l.], v.22, n.1, p. 25-42, 1998.
- BENENSON, I.; ARONOVICH, S. NOAM, S. Let's talk objects: generic methodology for urban high-resolution simulation. **Computers, Environment and Urban Systems**, [S.l.], v.29, p. 425-453, 2005.
- BERRY, M. W. et al. Lucas: A System for Modeling Land-Use Change. **IEEE Computational Science & Engineering**, New York, v.3, n.1, p. 24-35, 1996.
- BORDINI, R. H.; VIEIRA, R.; MOREIRA, A. F. Fundamentos de Sistemas Multiagentes. In: JORNADA DE ATUALIZAÇÃO EM INFORMÁTICA, JAI, 20., 2001, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Computação, 2001. v.2, p.3-41.
- BROOKS, R. A robust layered control system for a mobile robot. **IEEE Robotics and Automation**, New York, v.2, n.1, p. 14-23, Mar. 1986.
- CAMARA, G. et al. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: abr. 2006.
- CAMARA, G. et al. **Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/>>. Acesso em: jun. 2006.
- CHENG, J. **Modelling Spatial and Temporal Urban Growth**. 2003. 214f. Doctoral Dissertation ( Doctoral in Geographical Science ) – International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Utrecht University, Enschede, The Netherlands.
- CHENG, J.; MASSER, I.; OTTENS, H. Understanding the urban growth systems: theory and methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER TECHNIQUES FOR URBAN PLANNING AND MANAGEMENT, CUPUM, 8., 2003. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2003.
- CLARKE, K. C.; HOPPEN, S.; GAYDOS, L. A self-modifying cellular automaton of historical urbanization in San Francisco Bay area. **Environment and Planning B: Planning & Design**, London, v.24, p. 247-262, 1997.
- CLICHEVSKY, N. Estado del arte sobre tierra vacante in América Latina. **Lincoln Institute Research Report**, [S.l.:s.n.], 2001, 70 p.

DEMAZEAU, Y.; MULLER, J. P. Decentralized artificial intelligence. In: DEMAZEAU, Y.; MÜLLER, J. P. (Ed.). **Decentralized A. I.** Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1990.

DEMAZEAU, Y. From Cognitive Interactions to Collective Behaviour in Agent-Based Systems. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COGNITIVE SCIENCE, 1995, Saint-Malo. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1995.

DENDRINOS, D. **The dynamics of cities.** London: Routledge. 1992. 389 p.

ENGELN, G. Using Cellular Automata for Integrated Modelling of Socioenvironmental Systems. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.l.], v.34, p. 203-214, 1995.

EHLN, J.; CALDWELL, D.; HARDING, S. Geocomputation: what is it ? **Computers, Environment and Urban Systems**, [S.l.], v.26, p.257-265, 2002.

FERBER, J.; JACOPIN, E. The Framework of Eco-Problem Solving. In: EUROPEAN WORKSHOP ON MODELIZING AUTONOMOUS AGENTS AND MULTI-AGENT WORLDS, 2., 1990. **Proceedings...** Amsterdam: [s.n.], 1990.

FERBER, J.; GASSER, L. Intelligence artificielle distribuée. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON EXPERT SYSTEMS & THEIR APPLICATIONS, 11., 1991. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 1991.

FERBER, J. **Multi-Agent Systems:** an introduction to distributed artificial intelligence. London: Addison-Wesley, 1999. 528 p.

FERNANDES, E. **Access to urban land and housing in Brazil:** three degrees of illegality. [S.l.]: Lincoln Institute of Land Policy, 1997. 33 p.

FERRAND, N. Modelling and supporting multi-actor spatial planning using multi-agents systems. In: CONFERENCE ON GIS AND ENVIRONMENTAL MODELLING, NCGIA, 3., 1996. **Proceedings...** Santa Fe, Santa Barbara : National Center for Geographical Information and Analysis, 1996.

FROZZA, R. **SIMULA – Ambiente para Desenvolvimento de Sistemas Multiagentes Reativos.** 1997. Dissertação ( Mestrado em Ciência da Computação ) – Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre.

GARCIA, L. S. **Aplicações de sistemas multi-agentes a sistemas de hipermídia adaptativa:** uma proposta de ampliação à ferramenta Gutemberg. 1998. 93f. Dissertação ( Mestrado em Informática ) – Instituto de Informática, PUC-RS, Porto Alegre.

GATTI, M. S. et al. What Can Cellular Automata Tell Us About the Behavior of Large Multi-Agent Systems? In: SOFTWARE ENGINEERING FOR LARGE SCALE AGENT SYSTEMS, 2003. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2003.

GILBERT, N.; KLAUS, G. T. **Simulation for the Social Scientist.** Buckingham: Open University Press, 1999.

GIMBLETT, H. R. **Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modelling Techniques**. New York: Oxford University Press, 2002.

GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. **Environmental Modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993.

GRANERO, J. C.; POLIDORI, M. Simulador da dinâmica espacial com representação em ambiente SIG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA, GEOINFO, 4., 2002, Caxambú. **Anais...** Belo Horizonte: SBC, 2002.

GUAPYASSU, M. S.; HARDT, L. Avaliação da fragilidade ambiental: uma nova abordagem metodológica para unidades de conservação de uso indireto em áreas urbanas. **Floresta e Ambiente**, [S.l.], v.5, n.1, p. 55-67, 1998.

HÜBNER, J. F. **Um modelo de reorganização de Sistemas Multiagentes**. 2003. 224f. Tese ( Doutorado em Engenharia Elétrica ) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo.

IOCHPE, C.; WAGNER, F. R.; BASTOS, A. D.; HESS, G. N.; ALMEIDA, M. A. Urban planning by simulation of population growth. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA, GEOINFO, 6., 2004, Campos do Jordão. **Proceedings...** São Paulo: INPE, 2004. p. 221-234.

LAMBIN, E. F. **Modeling Deforestation Processes - A Review**. Luxembourg: [s.n.], 1994.

LIGTENBERG, A.; BREGT, A. K.; VAN, R. L. Multi-actor-based land use modelling: spatial planning using agents. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v.56., n.1-2., p.21-33, 2001.

JENNINGS, N. R. Coordination techniques for distributed artificial intelligence. In: O'HARE, G. M. P.; JENNINGS, N. R. (Ed.). **Foundations of Distributed Artificial Intelligence**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

JENNINGS, N. R.; SYCARA, K. P.; WOOLDRIDGE, M. J. A Roadmap of Agent Research and Development. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, Hingham, MA, v.1, n.1, p.7-38, 1998.

JOHNSTON, R. A.; SHABAZIAN, D. R. Uplan: A Versatile Urban Growth Model for Transportation Planning. **TRANSPORTATION RESEARCH RECORD**, 2002. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2002. p. 202-209.

JUNIOR, A. A. R. **Uma avaliação do modelo META para cálculo de custos de transportes e seu uso na tributação de terrenos urbanos ociosos**. 1995. 144f. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Civil – Transportes ) – Departamento de Transportes, EESC, São Carlos.

JUNIOR, A. A. R. **Acessibilidade e mobilidade na estimativa de um índice de potencial de viagens utilizando Redes Neurais Artificiais e Sistemas de Informações Geográficas**. 2000. 212f. Tese ( Doutorado em Engenharia Civil – Transportes ) – Departamento de Transportes, EESC, São Carlos.

JUNIOR W. M. L. **Análise das áreas verdes da cidade de Bauru – SP.** 2000. Dissertação ( Mestrado em Geografia – Planejamento Ambiental e Desenvolvimento Regional ) – Instituto de Geografia, UNESP, Presidente Prudente.

KRAFTA, R.; CONSTANTINOU, E. Cidades brasileiras, seu controle e o caos. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. (Ed.). **Avaliação e Controle da drenagem urbana.** Porto Alegre: Ed. da UFRGS. 2000.

KRAFTA, R. Spatial self-organization and the production of the city. **Revista Urbana,** Caracas, v.24, p-49-62, 1999.

KLÜGL, F.; OECHSLEIN, C.; PUPPE, F. Developing Multi-Agent Simulations based on Explicit Model Representation. In: EUROPEAN SIMULATION SYMPOSIUM, ESS, 13., 2001. **Proceedings...**, [S.l.: s.n.], 2001.

LAURENCE, J. C. M.; EDWARD, W. H. **Urban Development in Modern China.** [S.l.]: Westview Press, 1981.

LEITE, M. A. F. P. **Novos Valores:** Destruição ou Desconstrução? Questões da Paisagem e tendências de regionalização. 1992. 122 p. Tese ( Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas ) – FAU-USP, São Paulo.

LEMAÎTRE, C.; EXCELENTE, C. B. Multi-agent organization approach. In: IBEROAMERICAN WORKSHOP ON DAI AND MAS, 2., 1998. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1998.

LESSER, V. R.; CORKILL, D. D. Distributed Problem Solving. In: SHAPIRO, S. C.; ECKROTH, D. (Ed.). **Encyclopedia of AI.** New York: Wiley, 1987. p. 245-251.

LESSER, V. R. Cooperative Multi-Agent Systems: A Personal View of the State of the Art. **IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering,** New York, v.11., n.1, p.133-142, Jan.1999.

LIMA, R. S. **Expansão urbana e acessibilidade:** o caso das cidades médias brasileiras. 1998. 91f. Dissertação ( Mestrado em Transportes ) – Departamento de Transportes, EESC, São Carlos.

MONTEIRO C. A. F. **Teoria e Clima Urbano.** São Paulo: USP/IG, 1976. 180 p. (Série Teses e Monografias, n.25).

OKUYAMA, F. Y. **Descrição e geração de ambientes para simulações com Sistemas Multiagentes.** 2003. 119f. Dissertação ( Mestrado em Ciência da Computação ) – Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre.

OLIVEIRA, D. de. **Simulação de aspectos sociais do crescimento urbano com Sistemas Multiagentes Cognitivos.** 2002. 64f. Projeto de Diplomação ( Bacharelado em Ciência da Computação ) – Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre.

PARKER, D. C.; BERGER, T.; MANSON, S. M. **Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change.** [S.l.:s.n.], 2001.

PARKER, D. C. et al. Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. **Annals Association of American Geographers**, Washington, v.93, n.2, p. 314-337, June 2003.

PEDROSA, B. M. **Ambiente Computacional para Modelagem Dinâmica Espacial**. 2003. 94f. Tese ( Doutorado em Computação Aplicada ) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos.

POLIDORI, M. C. **Crescimento Urbano e Ambiente**: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade. 2004. 353f. Tese ( Doutorado em Ecologia ) – Instituto de Biociências, UFRGS, Porto Alegre.

PORTUGALI, J. **Self-organization and the city**. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

PRINS, D. **Urbanismo II – Configuração urbana**. Lisboa: Editorial Presença, 1984. 149 p.

PROJECTING Land-Use Change: A Summary of Models for Assessing the Effects of Community Growth and Change on Land-Use Patterns. Cincinnati, U.S.: Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2000. (EPA/600/R-00/098).

RABENO, R. Planejamento da cidade: gestão urbana. Disponível em: <<http://www.metroplan.rs.gov.br>>. Acesso em: mar. 2006.

RODRIGUES, A.; GRUEAU, C.; RAPER, J.; NEVES, N. Environmental Planning using Spatial Agents. **Innovations in GIS**, [S.l.], v.5, 1998.

ROY, G. G.; SNICKARS, F. Citylife: A study of cellular automata in urban dynamics. In: FISCHER, M. M.; SCHOLTEN, H. J.; UNWIN, D. (Ed.). **Spatial Analytical Perspectives on GIS**. London: Taylor & Francis: 1996. p. 213-218.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence - A Modern Approach**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995. 1132 p.

SAURIM, E. **Crescimento urbano simulado para Santa Maria-RS**. 2005. 141f. Dissertação ( Mestrado em Planejamento Urbano e Regional ) – Faculdade de Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre.

SEBRAE-SP. **Bauru, a Cidade sem Limites e a Capital da Terra Branca**. Disponível em: <<http://www.sebraesp.com.br>>. Acesso em: abr. 2006.

SICHMAN, J. S. **Du raisonnement social chez les agents: une approche fondée sur la théorie de la dépendance**. 1995. Thèse de Doctorat ( Doctorat en Informatique ) – Institut National Polytechnique, INPG, Grenoble.

SIEBERT, C. A evolução urbana de Blumenau: O (des)controle urbanístico e a exclusão sócio-espacial. In: ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, ANPUR, 9., 2001. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], 2001.

SILVA, A. N. R. **O custo do solo urbano ocioso e uma nova sistemática de tributação de propriedade**. 2003. 137f. Tese ( Doutorado em Engenharia de Transportes ) – Departamento de Transportes, EESC, São Carlos.

SPRING. **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas**. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/spring/>>. Acesso em: nov. 2006.

SOARES, B. S. F.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, [S.l.], v.154, p. 217-235, 2002.

SOUZA, M. R. R de. **Produção espacial urbana: um exercício de simulação**. 2002. 195f. Dissertação ( Mestrado em Planejamento Urbano e Regional ) – Faculdade de Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre.

SPINELLI, J.; KRAFTA, R. Configuração espacial e distribuição do valor do solo urbano. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. (Ed.). **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2001. p. 421-441.

STEELS, L. Cooperation between distributed agents through self-organization. In: EUROPEAN WORKSHOP ON MODELIZING AUTONOMOUS AGENTS AND MULTI-AGENT WORLDS, 2., 1990. **Proceedings...** Amsterdam: [s.n.], 1990.

SUDHIRA, H. S. **Integration of agent-based and cellular automata models for simulating urban sprawl**. 2004. 78f. Dissertação ( Mestrado em Ciências em Geoinformática ) – International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Utrecht University, Enschede, The Netherlands.

TEERAROJANARAT, S.; FAIRBAIRN, D.; CHUNITHIPAIN, S. Urban Growth Simulation with UrbanSim. In: FREE/LIBRE AND OPEN SOURCE SOFTWARE FOR GEOINFORMATICS USERS CONFERENCE, FOSS/GRASS, 3., 2004. **Proceedings...** Bangkok: [s.n.], 2004.

TORRENS, P. M. How should we model complex adaptive urban systems? NEXSUS PROJECTS WORKSHOP, 1., Yorkshire. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2000.

TORRENS, P. M. Automata-based models of urban systems. In: Longley, P.; Batty, M. (Ed.). **Advanced Spatial Analysis**. Redlands, CA: ESRI Press, 2003.

VASCONCELOS, E. A. **Transporte urbano nos países em desenvolvimento: reflexões e propostas**. São Paulo: Annablume, 2000. 284 p.

VERBURG, P. H. et al. A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns. **Computers, Environment and Urban Systems**, New York, v.28. p.667-690, 2004.

WEGENER, M. Operational urban models: state of the art. **American Planning Association**, [S.l.], n.60, p. 17-29, 1994.

WHITE, R. W.; ENGELEN, G. Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land Use Patterns. **Environment and Planning A**, [S.l.], v.25, p.1175-1199, 1993.

WHITE, R.; ENGELEN, G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. **Environment and Planning B: Planning and Design**, [S.l.], v.24, p. 165- 174, 1997.

WHITE, R.; ENGELEN, G. High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, New York, v.24. p. 383-400, 2000.

WOOLDRIDGE, M. J.; JENNINGS, N. R. Intelligent Agents: Theory and Practice. **Knowledge Engineering Review**, [S.l.], v.10, n.2, p.115-152, 1995.

WOOLDRIDGE, M. Intelligent agents. **Multi-agent systems: A modern approach to distributed artificial intelligence**. Cambridge: MIT Press, 1999. p. 27-77.

WU, F. A linguist cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region. **Computers, Environment and Urban Systems**, New York, v.20, p. 367-387, 1996.

WU, F. Complexity and urban simulation: towards a computational laboratory. **Geography Research Forum**, [S.l.], v.22, p. 22-40, 2002.