

## MODELOS DINÂMICOS APLICADOS NO PLANEJAMENTO URBANO PARA A CIDADE DE CAMPINAS, BRASIL

D. F. Scarassatti, D. C. Costa

### RESUMO

Os modelos dinâmicos têm sido utilizados recentemente para modelagens mais próximas da realidade das cidades. A estrutura espacial urbana é abordada a partir de um nível microscópico, dividindo-se o espaço urbano em células que podem estar vazias ou ocupadas por distintos tipos de atividades, como comércio, indústrias, habitação, parques etc. Diante deste contexto, sua aplicação como ferramenta nos estudos de planejamento urbano tem se mostrado um campo promissor na identificação de possíveis trajetórias de expansão urbana e de tendências de transformação, auxiliando o poder público no direcionamento de ações na gestão das cidades. A proposta deste artigo é demonstrar a aplicabilidade dos modelos dinâmicos nos estudos urbanos em duas regiões do município de Campinas, SP, Brasil, que retratam as distintas formas de ocupação e transformação no espaço urbano. Em seqüência foram identificadas as variáveis, tendo como fator preponderante a acessibilidade à rede viária na transformação e desenvolvimento urbano.

### 1. INTRODUÇÃO

Campo recente de investigação nos estudos de planejamento urbano, os modelos dinâmicos procuram realizar simulações e obter avaliações sobre mudanças e dinâmicas territoriais. Modelos dinâmicos perfazem um processo de evolução de um sistema ao longo do tempo e são denominados preditivos ou de simulação.

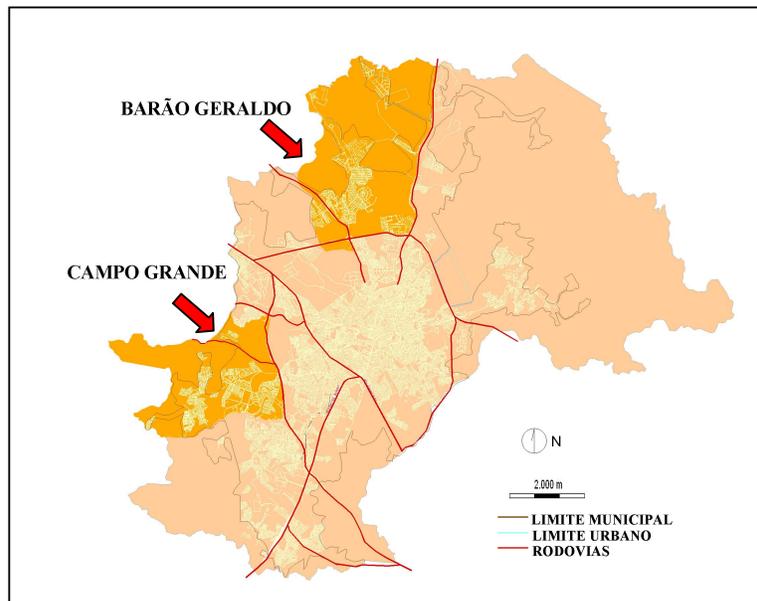
Se por um lado os SIGs se destacam em facilitar a aquisição, o tratamento de dados e sua espacialização, a combinação de análise multicritério, projeção estocástica, autômatos celulares em um ambiente SIG amplia as possibilidades para incorporar na modelagem fenômenos ao longo do tempo, reunindo espacialidade absoluta e relativa, elementos quantificáveis ou não, por meio de procedimentos que permitam explorar conhecimentos empíricos da realidade das cidades.

A proposta deste artigo é demonstrar a aplicabilidade dos modelos dinâmicos como ferramenta para os estudos da dinâmica urbana. Para este propósito foram escolhidas duas regiões do município de Campinas, SP, Brasil, que retratam as distintas formas de ocupação e transformação no espaço urbano. Em seguida foram identificadas e justificadas as variáveis, tendo como fator preponderante a acessibilidade à rede viária na transformação e desenvolvimento urbano. Foi utilizado o *software* Idrisi Kilimanjaro 6.02 que possui operações baseadas em: cadeia de *Markov*, para predição do uso do solo; análise multicritério das variáveis explicativas da mudança de estado e um elemento espacial de contigüidade baseado em autômato celular (AC).

## 2. APRESENTAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Campinas, localizada no estado de São Paulo, sede de Região Metropolitana de Campinas (RMC) é um importante pólo de desenvolvimento industrial. Apresenta a mais expressiva concentração do interior de São Paulo e tem observado evolução significativa nas últimas décadas (Caiado *et al*, 2002). Além da excelente infraestrutura de transportes, instituições de ensino e pesquisa, o município possui uma gama extensa de serviços de apoio à produção, como também um pólo terciário de alta tecnologia. Tem um papel de destaque nas atividades comerciais de grande porte, de abastecimento e serviços especializados.

Para a aplicação do modelo foram selecionadas duas regiões do município de Campinas, escolhidas por representarem distintas características de desenvolvimento e por produzirem diferenciadas formas de uso e ocupação do solo. Estas regiões estão destacadas na figura 1: o distrito de Barão Geraldo, localizado na porção norte e a região do Campo Grande, na porção oeste do município.



**Figura 1 - Município de Campinas e regiões de estudo**  
**Fonte: Prefeitura Municipal de Campinas, 2006**

### 2.1 Campo Grande

É característica marcante na região do Campo Grande a ocupação por grandes adensamentos populacionais, voltados predominantemente a moradias de baixa renda, em condições precárias de urbanização, carência de infra-estrutura de empregos e de serviços. A baixa ocorrência de atividades econômicas acarreta para a região pequena oferta de empregos e o conseqüente movimento pendular de deslocamento da população residente na busca por emprego (Prefeitura Municipal de Campinas, 1996). A ocupação é recente e descontínua, alternando vazios urbanos e loteamentos antigos ainda não totalmente ocupados, com loteamentos populares com alta densidade populacional, favelas e várias áreas com habitações informais (PMC, 1996b).

A descontinuidade também é presente na estrutura viária, devido à presença de barreiras físicas na região como o Rio Capivari e Piçarrão e seus afluentes, a ferrovia (corredor de

exportação da FEPASA), a Rodovia dos Bandeirantes e gasoduto Brasil - Bolívia. Tais condicionantes dificultam a circulação viária e a comunicação entre os bairros e áreas vizinhas (Prefeitura Municipal de Campinas, 1996 a). Basicamente todos os deslocamentos se verificam por uma única avenida, denominada John Boyd Dunlop, praticamente única alternativa de acesso à região.

A legislação atual de uso e ocupação do solo também não incentiva a diversificação de atividades junto à moradia, e tampouco distribui a possibilidade de instalação de atividades produtivas. No que diz respeito às áreas a lotear, para uso habitacional, as regras não incentivam tipologias diferenciadas e mais adequadas a novos padrões de adensamento e de proteção ambiental (Prefeitura Municipal de Campinas, 1996 a).

## 2.2 Barão Geraldo

Esta região caracteriza-se pela fragmentação e descontinuidade física, mas ao mesmo tempo por empreendimentos de grande impacto em relação à demanda gerada, incluindo aí condomínios habitacionais de médio e alto padrão. A descontinuidade da ocupação tem consolidado diversas “ilhas físicas”, isto é, um conjunto de bairros isolados interligados pelo sistema viário, definindo um território que estimula o uso do automóvel como forma preferencial de mobilidade.

Além da marcante presença do sistema macro-viário como elemento estruturador da região, outros fatores foram determinantes para o processo de urbanização, como a tendência de localização de empreendimentos de abrangência regional e ainda concentração de pólos de atração de demanda como a Universidade Estadual de Campinas, a Pontifícia Universidade Católica de Campinas, grandes equipamentos comerciais e empreendimentos de ensino e pesquisa e alta tecnologia - Pólo de Alta Tecnologia da CIATEC. Os campi da UNICAMP e PUCCAMP, ao mesmo tempo em que foram preponderantes para o crescimento do distrito, tornaram-se indutores de viagens que sobrecarregam o viário existente. Ao redor da Unicamp implantaram-se loteamentos de alta e média renda ocasionando uma valorização imobiliária expressiva da região.

Outros aspectos críticos do sistema de transporte é o predomínio do transporte individual motorizado em relação ao transporte coletivo nos deslocamentos verificados (aproximadamente 70% auto e 30 % coletivo) (Prefeitura Municipal de Campinas, 1996 b).

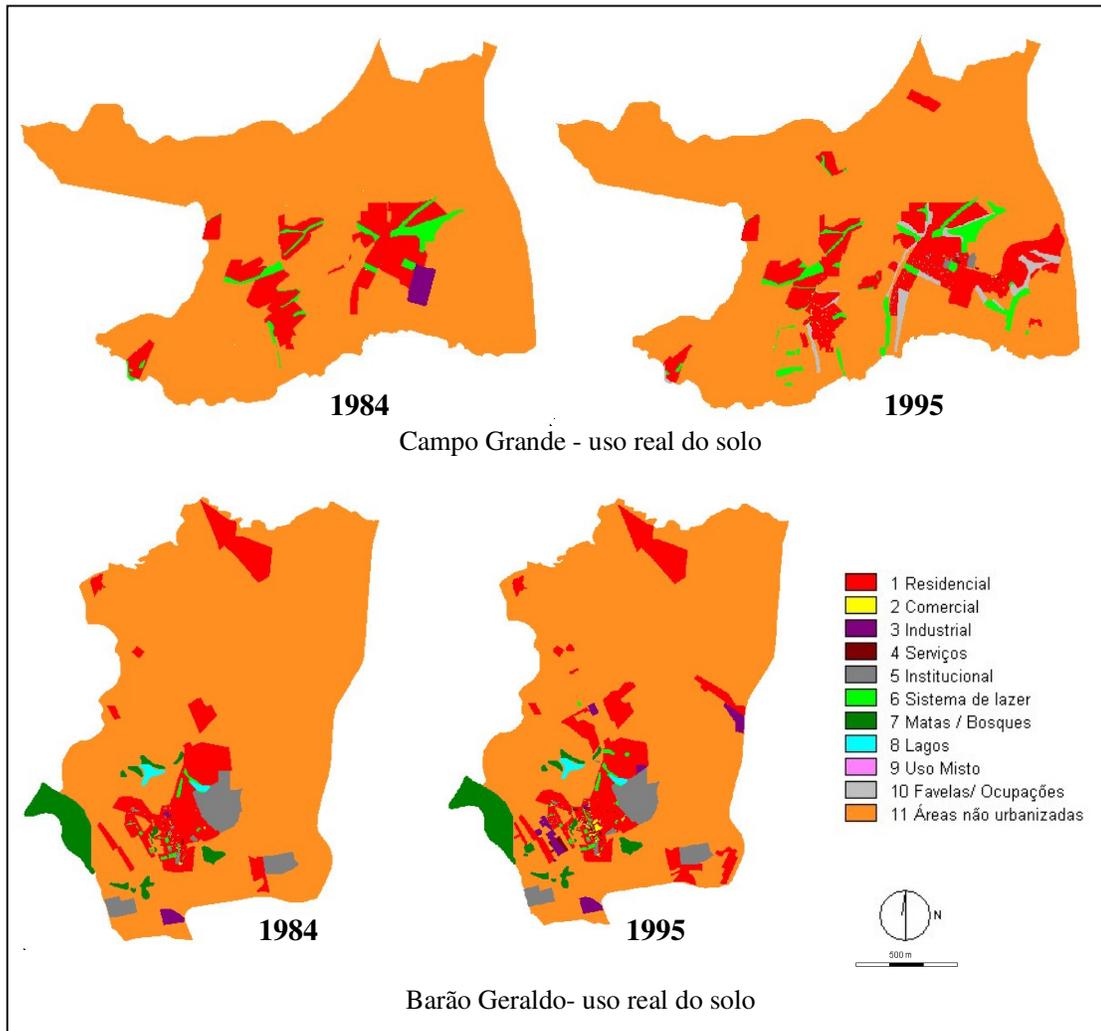
## 3. APLICAÇÃO DO MODELO

As rotinas *Markov*, Média Ponderada Ordenada (*Ordered Weighted Average - OWA*) e *ca\_markov* presentes no Idrisi 6.02 consistem em técnicas para análise preditiva de séries temporais de mudança de categoria de uso do solo, análise multicritério e em algoritmos de cadeia de *Markov* e Autômatos Celulares.

### 3.1 Módulo Markov

O módulo *Markov* simula a predição do estado de um sistema em um determinado tempo a partir dos estados precedentes. É um procedimento discreto em tempo discreto, isto é, o valor em tempo  $t_2$  depende dos valores dos tempos  $t_0$  e  $t_1$  (modelo *Markov* de segunda ordem). O módulo *Markov* foi aplicado a partir de dois mapas (figuras 2) em dois períodos

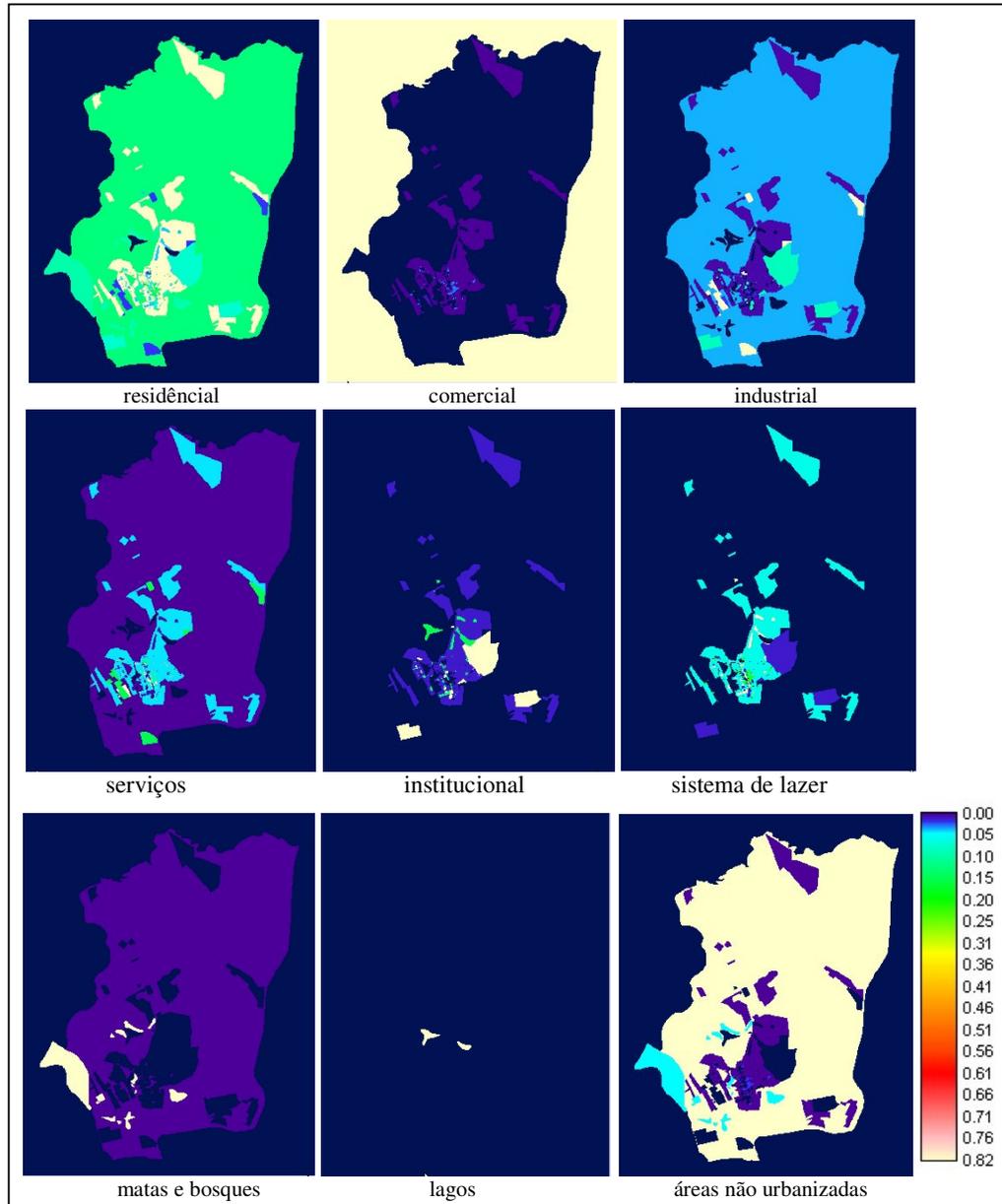
diferentes, 1984 e 1995 de uso real do solo para as duas regiões estudadas, com os mesmos grupos de categoria de uso do solo.



**Figura 2: Campo Grande e Barão Geraldo: uso real do solo**

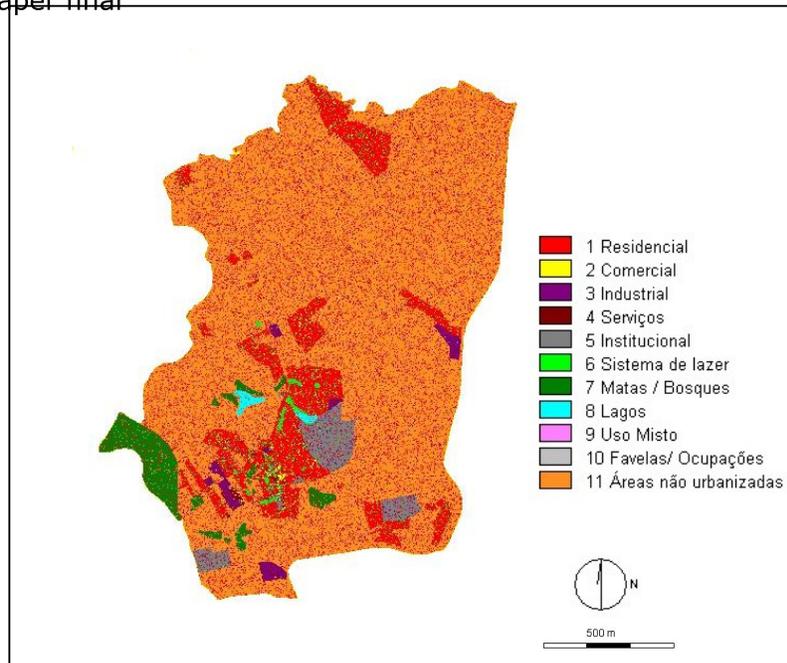
Os seguintes *outputs* foram gerados neste módulo (Eastman, 2003 a):

- matriz de probabilidade de transição que expressa a probabilidade que cada *pixel* de uma dada categoria de uso de uso do solo poderá mudar (ou não) para outra categoria no próximo período;
- matriz de áreas de transição que expressa a área total em células esperadas;
- grupo de imagens de probabilidades condicionais, dada categoria de uso do solo demonstra a probabilidade de cada *pixel* designado para a categoria no próximo período. A Figura 3 ilustra o resultado de probabilidade de cada tipo de uso do solo poderá ser encontrada para cada célula, na Região de Barão Geraldo, após especificado o número de unidades de tempo, que neste caso é a projeção de 11 anos.



**Figura 3 - Barão Geraldo - Probabilidade de transição das categorias de uso do solo obtidas através do módulo *Markov***

Após a aplicação do módulo *Markov* e uma vez gerados os mapas de probabilidade para cada categoria de uso real do solo para as duas regiões analisadas, utilizou-se o módulo de projeção estocástica (*st\_choice*), que avalia para cada *pixel* a probabilidade de pertencer à outra categoria. Este procedimento produz um único mapa e apresenta um resultado das incompatibilidades entre elas. A figura 4 ilustra o resultado da aplicação deste módulo para Barão Geraldo.



**Figura 4- Barão Geraldo – projeção estocástica para o ano de 2006**

Neste procedimento constatam-se visualmente um efeito serrilhado, não contínuo, como também algumas limitações do processo de *Markov*, pois os mapas de projeções estocásticas consideram um resultado intermediário dentre as probabilidades de transição entre os estados. As probabilidades são arbitradas e não levam em conta critérios que englobem variáveis explicativas da dinâmica de mudança (Paegelow *et al*, 2003). Significa que este procedimento não calcula as variáveis explicativas e descritivas, somente fundamenta-se na análise da dinâmica interna do sistema, ou seja, a evolução do comportamento de usos do solo.

### 3.2 Análise Multicritério

#### 3.2.1 Restrições e Fatores

A análise multicritério foi conduzida a partir de critérios (fatores e/ou restrições) que procuram amenizar ou realçar a aptidão (importância relativa) de uma alternativa específica para um propósito, no caso dos fatores, ou define um limite rígido para a atuação das variáveis identificadas como restrições (Weber *et al*, 1998).

As restrições mantêm um caráter *booleano* nas interações entre os dados espaciais. Ao se utilizar um operador algébrico de mapas tipo *booleano* são gerados mapas binários aptos (1) ou não aptos (0) que permitem realizar cruzamentos entre dois ou mais planos de informação. As zonas excluídas da análise podem corresponder ao fundo não útil da imagem, como as categorias de dados incompatíveis com a analisada ou também às classes ou intervalos daquelas variáveis significativas cuja ausência de uma categoria seja comprovada (Paegelow *et al*, 2003).

Os fatores são mapas que resultam de ponderações dos diferentes fatores de influência a um dado fenômeno. É dada uma lógica de importância em uma escala de 0 (inapta) a 255 (muito apta) *bytes*, indicando a maior ou menor aptidão do *pixel* (Paegelow *et al*, 2003). Enquanto que a operação *booleana* se baseia na lógica de identificação de resultados

extremos (apto/inapto), as técnicas de avaliação por critérios múltiplos permitem utilizar todo o potencial de fatores como superfícies contínuas de aptidão.

Um dos processos utilizados para a geração dos mapas de fatores é a lógica *fuzzy* (ou nebulosa ou incerteza). A lógica *fuzzy* é uma operação que está mais próxima do pensamento humano e da linguagem natural e faz parte da lógica matemática de análise dos princípios formais do raciocínio incerto ou aproximado (Silva, 1999). São quatro as funções *fuzzy* presentes no Idrisi e em cada função são estabelecidos pontos de controle (eixo x) que refletem a função de decréscimo/ acréscimo do escore de aptidão (eixo y).

A partir dos critérios identificados, as restrições e fatores, foram necessários limitá-los a uma mesma escala de valores para compará-los. As restrições mantiveram os valores absolutos – apto/ não apto. Os mapas dos fatores foram limitados e ponderados a um intervalo ente 0-255 (intervalo do *byte*), permitindo-se explorar a variedade de dados contínuos. Para os fatores foram gerados os seguintes mapas:

- i. distância das vias - através da rotina *distance* a distância das vias escolhidas foi escalonada ( 0-255), e utilizada a função *fuzzy* decrescente em forma de *j* (*shaped*). O primeiro ponto de controle é o valor de 100 m, distância considerada mais propícia às alterações de uso do solo ou desenvolvimento urbano. A partir deste ponto a aptidão começa a declinar do valor máximo até o valor de 300 m, ponto estimado intermediário de inflexão da curva;
- ii. área de influência dos Pólos Geradores de Tráfego - utilizou-se a rotina *distance*. O valor atribuído para as linhas isócotas<sup>1</sup> foi de 300 m (segundo ponto de controle), tendo os empreendimentos (PGTs) como centro e o valor de até 100 m como área mais apta às alterações de uso do solo.

### 3.2.2 Média Ponderada Ordenada (OWA)

Os métodos de agregação por critérios múltiplos presentes no Idrisi são: a: Combinação Linear Ponderada (*Weighted Linear Combination - WLC*) e Média Ponderada Ordenada (*Ordered Weighted Average - OWA*). Em ambas as técnicas os critérios são padronizados e ponderados do mesmo modo, no entanto, na *OWA* é possível a compensação dos fatores, criando a possibilidade de dar um peso e compensá-los, aceitando-se algum risco e assim exercer algum controle sobre o processo (Eastman, 1997). Esta medida permite que um fator favorável compense outro desfavorável durante a avaliação (Weber *et al* 1998).

Estes métodos são utilizados para entender problemas de decisão e para construir regras de avaliação de critérios e combinações. Uma das vantagens destas rotinas é de se trabalhar não somente com variáveis quantificáveis, mas também aproveitar na análise, conhecimentos empíricos. O conjunto de mapas de aptidões resultante destes procedimentos é empregado para alimentar o módulo *ca\_Markov*.

Depois de elegidos e padronizados, os fatores e restrições foram então inseridos na análise multicritério.

---

<sup>1</sup> As linhas isócotas são linhas de distâncias iguais, baseadas na variável distância tendo como centro o Pólo Gerador de Tráfego.

Primeiramente foi necessário determinar o peso ponderado de cada de um deles, o que foi feito através do módulo *weight*, adotando-se o peso 3 para o fator Pólos Geradores de Tráfego e peso 5 para o fator Distância das Vias. Para esse julgamento foi utilizada uma escala de valores ilustrada na Figura 5:

<b>1/9</b>	<b>1/7</b>	<b>1/5</b>	<b>1/3</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>
extremo	muito forte	forte	moderado	igual	moderado	forte	muito forte	extremo
← menos importante				mais importante →				

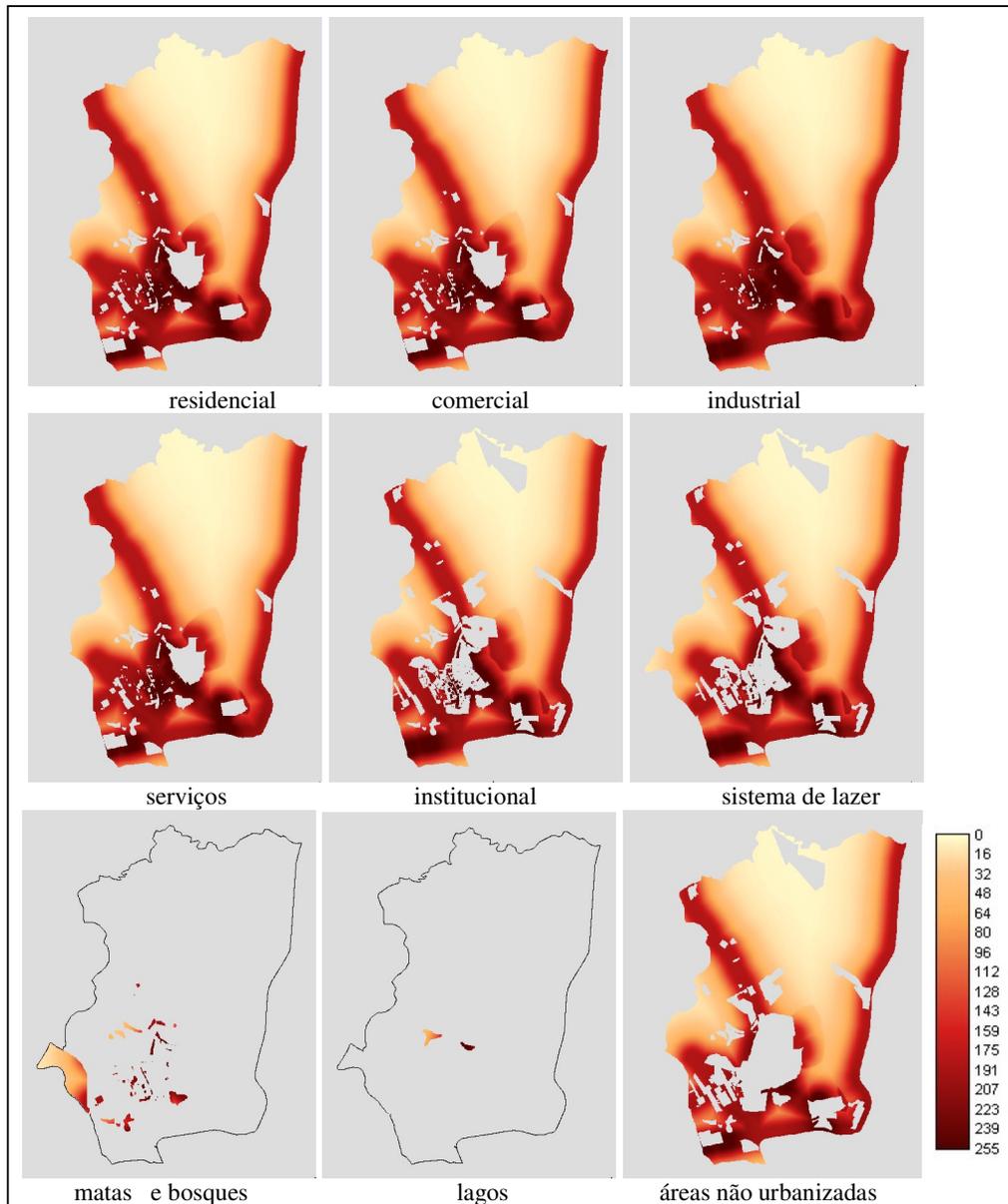
**Figura 5 - Escala de peso dos fatores**

O módulo *weight* verifica, no contexto da análise de decisão (método de derivação de pesos AHP - *Analytical Hierarchy Process*), a consistência da importância relativa dos critérios (fatores) por meio do autovetor principal da matriz de comparação pareada, a partir de um conjunto de peso de fatores.

Em seguida, os mapas de restrições e fatores foram então agregados, utilizando para isso o método de Média Ponderada Ordenada (*OWA*). Para cada categoria de uso do solo foi elaborada uma tabela de média ponderada englobando os fatores e restrições. Nesta técnica, as restrições atuam como máscaras *booleanas* e os fatores são ponderados e compensados de acordo com sua importância relativa (Eastman, 1997).

O produto obtido neste processo é uma imagem que contempla a mudança de tipos de uso do solo ou um processo de crescimento em áreas com maior aptidão próximas às áreas de um determinado uso já existente. A combinação ponderada possibilita, no processo de agregação, dar diferentes pesos relativos para cada um dos fatores. É dada a importância relativa de cada fator em relação aos demais, através de pesos que são atribuídos a cada fator. Os pesos dos fatores controlam o grau de compensação entre os fatores, assim fatores com baixa aptidão (em um determinado local serão compensados por um fator com alta aptidão, como por exemplo, uma maior proximidade das vias).

A Figura 6 mostra as imagens geradas e expressam o potencial de evolução de aptidão para cada categoria para a Região de Barão Geraldo. O intervalo de 0 a 255 identifica as regiões com menor à maior aptidão para cada categoria de uso do solo. O fundo não útil (0) de cada imagem é resultado da operação *booleana* das restrições específicas para cada categoria de uso do solo.



**Figura 6 - Barão Geraldo - potencial de aptidão das categorias**

### 3.3 Ca\_Markov

Para se obter uma modelagem mais adequada às reais transformações de uso do solo, são trabalhados no módulo ca\_Markov: a série cronológica de usos do solo (modelagem temporal que no presente estudo foi para um período de 11 anos projetando-se para o ano de 2006), lógica de avaliação multicritério (relaciona as categorias de usos do solo a um conjunto de variáveis que podem explicar e descrever sua dinâmica) e o elemento espacial de contigüidade baseado em autômatos celulares.

O filtro baseado em autômato celular consiste em um fator de ponderação espacialmente explícito para cada mapa de aptidão de cada categoria de uso do solo, ponderando mais intensamente em áreas com uso do solo existentes. Esse procedimento assegurará que a mudança ocorra próxima a classes de uso do solo e não casualmente, funcionando como

uma máscara, multiplicando esse resultado para um mapa de aptidão para derivar um novo mapa de adequação como *input*. Se mais de uma interação é especificada, por exemplo, 11 interações, cada período irá alocar 1/11 da área ideal desejada para solução e acrescentará 1/11 para cada período a suceder. No final de cada período, cada categoria de uso do solo é filtrada, e então multiplicada para cada mapa de adequação original para outro mapa de aptidão para um determinado período (Eastman, 2003 b).

As imagens resultantes da simulação foram comparadas com uma situação real de uso do solo para o ano de 2006. Embora uma comparação visual da projeção com a situação real apresente algumas distorções, os produtos obtidos podem ser considerados satisfatórios. A figura 7 apresenta os resultados da projeção para o ano de 2006 junto à situação de uso do solo real em 2006, este último elaborado baseado em levantamento da Empresa de Planejamento Metropolitano (2006), por meio de foto interpretação e trabalhos de campo.

Nas simulações realizadas nas regiões estudadas são constatadas a intensificação e concentração de usos comerciais e de serviços junto aos corredores viários e áreas de influência dos PGTs, regiões que detêm também um maior adensamento populacional. Esta dinâmica é maior em Barão Geraldo, justificada pela estrutura viária da região que propicia uma maior acessibilidade aos equipamentos urbanos da região.

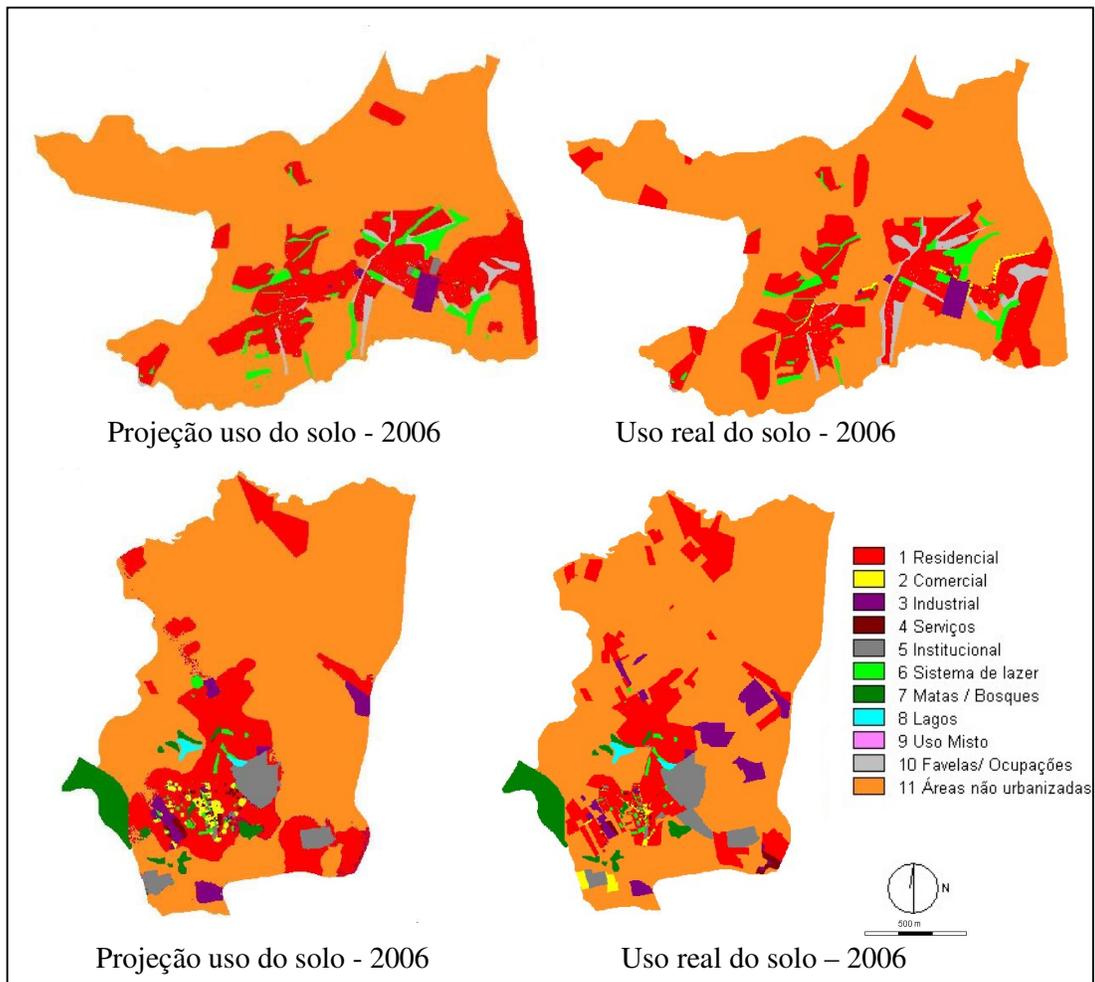


Figura 7 - Barão Geraldo - Projeção e uso real do solo - 2006

#### 4. CONCLUSÕES

Os avanços tecnológicos verificados nas últimas décadas asseguraram as tecnologias digitais como ferramentas necessárias para representar os elementos presentes na superfície terrestre. Os Sistemas de Informações Geográficas estão incluídos neste contexto e são baseados em hipóteses pré-estabelecidas para descrever um dado fenômeno quanto aos seus aspectos espaciais, mais de maneira estática.

Desta maneira, pode-se afirmar que a modelagem dinâmica, ao realizar a simulação de processos temporais dos fenômenos emergentes, procura suplantar as limitações dos SIGs por meio de análises integradas das transformações e dinâmicas das cidades junto aos fatores explicativos do desenvolvimento dependentes do tempo.

O *software* SIG Idrisi 6.02, mostrou-se uma ferramenta extremamente útil para a modelagem dinâmica urbana, através de módulos de projeção estocástica, de apoio à decisão (análise multicritério), e autômatos celulares. A projeção de cenários por meio de um modelo matemático de cadeia de *Markov* demonstra a probabilidade condicional de qualquer evento futuro com variáveis definidas em um espaço e tempo discretos. O método de análise multicritério possibilita um maior controle do processo de análise ao permitir que um fator favorável compense outro fator desfavorável, possui uma maior flexibilidade para alterar as variáveis a qualquer momento e assim reavaliar o processo ou repeti-lo com a inclusão ou retirada de novos critérios. Ao se aplicar um filtro de autômato celular nas projeções resultantes do processo estocástico, são incorporadas também variáveis explicativas de mudança e assim é produzido um resultado espacialmente mais próximo à realidade verificada. Estas rotinas utilizadas demonstram as possibilidades de desenvolvimento de modelagens e suas diversas aplicações para o ordenamento, direcionamento, provisão de infra-estrutura, enfim às atividades relacionadas ao planejamento urbano e territorial.

#### 5. REFERÊNCIAS

Caiado, A. S. C.; Pires, M. C. S.; Santos, S. M. M.; Miranda, A. L.(2002). In: A.C. Brandão e W. Cano (orgs), *Diagnóstico Socioeconômico da Região Metropolitana de Campinas*. Campinas: Fundação de Economia Campinas, 95p.

Eastman, J.R (2003a). *Guide to Gis and Image Processing*. Clark University, Worcester, MA, USA, 328p.

Eastman, J.R (2003b). *Idrisi Kilimanjaro Tutorial*. Clark University, Worcester, MA, USA,271p.

Eastman, J.R (1997) *Idrisi for Windows, User's Guide, version 2.0*. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis, Clark University, Worcester, MA, USA.

Empresa de Planejamento Metropolitano. *Por dentro da Região Metropolitana de Campinas*. Estado de São Paulo. 2006. (CD).



## Paper final

Paegelow, M.; Camacho Olmedo, M. T.; Menor Toribio, J. (2003). Cadenas de markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización del paisaje. In: *Geofocus (artículos)*, n. 3, p. 22-44.

Prefeitura Municipal de Campinas (2006). *Campinas, Plano Diretor*. Campinas, 303p.

Prefeitura Municipal de Campinas (2006b). *Plano Local de Gestão Urbana do Campo Grande*. Campinas, 266p.

Prefeitura Municipal de Campinas (2006a). *Plano Local de Gestão Urbana de Barão Geraldo*. Campinas, 117p.

Silva, A (1999). *Sistemas de Informação Georreferenciadas - conceitos e fundamentos*. Campinas, São Paulo: Editora Unicamp, 236p.

Weber, E. J.; Hasenack, H; Nodari, F. A.; Reichman, C (1998). Análise de alternativas de traçado de uma estrada utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG. In: *GIS Brasil 98 IV Congresso e Feira para usuários de geoprocessamento da América Latina*, 1998, Curitiba. *Anais do IV Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento*, Curitiba, Paraná.