

Análise de mudanças no uso do solo urbano e rural com a aplicação de modelagem dinâmica espacial

Lucimari Aparecida Franco Garcia Rossetti¹

Cláudia Maria de Almeida²

Sergio dos Anjos Ferreira Pinto¹

¹ Universidade Estadual Paulista – UNESP/CEAPLA
Caixa Postal 178 – 13506-900 – Rio Claro - SP, Brasil
{lucimari, sanjos}@rc.unesp.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
almeida@dsr.inpe.br

Abstract. The objective of this research was to evaluate the changes in land use in the of city of Rio Claro (SP) and its immediate surroundings in the period from 1988 to 1995, with the support of Remote Sensing, Geographic Information Systems (GIS) and Cellular Automata (CA) models. Aerial photography from the selected dates and cartographic documentation were used for the collection and analysis of data (cadastral map at a 1:10,000 scale and topographic maps at a 1:50,000 scale, in digital format). The methodological procedures used to model the changes in land use were performed in the CA dynamic modeling platform named Dinamica EGO. The simulated maps showed a good approximation with the effectively observed land use data and were validated by a multi-resolution approach. According to the obtained results, the period from 1988 to 1995 showed no significant urban growth, a fact due to the densification of occupation in residential settlements already implemented in the previous period, as well as by economic stagnation resulting from a national crisis, which was reflected in the growth of São Paulo state, influencing the city of Rio Claro.

Palavras-chave: spatial dynamic modeling, cellular automata, urban and rural land use, modelagem dinâmica espacial, autômatos celulares, uso do solo urbano e rural.

1. Introdução

A intensificação do processo de urbanização e o rápido crescimento das cidades, em âmbito mundial, foram um dos fatos marcantes do século XX. A urbanização no Brasil se intensificou com a modernização da agricultura e o advento da industrialização. A concentração das indústrias nas grandes cidades transformou-as em polos de desenvolvimento cultural, educacional e tecnológico e, enquanto provedoras de empregos foram capazes de atrair um significativo contingente populacional. Como consequência, o adensamento populacional e o desenvolvimento das atividades econômicas incorporaram uma nova organização na configuração espacial dessas cidades, bem como novas estruturas sociais e econômicas.

Entretanto, com o processo de urbanização acelerado, começaram a surgir problemas socioeconômicos e ambientais, sobretudo nos grandes centros urbanos. Em relação à estrutura das cidades, o adensamento populacional ocasionou uma sobrecarga na infra-estrutura existente, intensificando a instalação de habitações precárias próximas às áreas centrais e, paralelamente, a expansão da malha urbana em direção a áreas periféricas.

Para o planejamento e gestão das cidades, é de vital importância a adoção de políticas públicas com ênfase no estabelecimento de diretrizes voltadas ao crescimento socioambiental sustentável. No que concerne ao planejamento, é importante a disponibilização de dados e informações confiáveis e atualizadas. Nesse aspecto, a utilização das tecnologias de Sensoriamento Remoto permite extrair dados de elementos do ambiente urbano em lapso de tempo compatível com a dinâmica das alterações que ocorrem nesse ambiente, bem como caracterizar a espacialização dessas alterações ocorridas. Ainda, disponibilização dos

Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permite armazenar dados espaciais e não-espaciais (alfanuméricos) e realizar análises ao integrar dados de diferentes fontes. No entanto, os SIGs limitam-se a representar os fenômenos geográficos de forma estática.

A utilização combinada dessas tecnologias aplicadas à análise urbana e a incorporação de modelagem ambiental para a simulação de cenários permitem avaliar de forma quantitativa a estruturação e a dinâmica do espaço urbano, proporcionando melhor visualização da realidade urbana e dos elementos responsáveis pelas transformações espaço-temporais. A aplicação de modelos para a avaliação da dinâmica do uso do solo em áreas urbanas possibilita fornecer prognósticos, visando a um melhor entendimento dos fenômenos causados por ocupações inadequadas. Ainda, esses modelos aplicados na análise de uso e ocupação do solo apresentam informações sobre a tendência do crescimento urbano e o padrão da ocupação, bem como as características ambientais e os diferentes fatores/agentes envolvidos.

Neste sentido, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de analisar as mudanças no uso do solo urbano da cidade de Rio Claro (SP), com o suporte das técnicas de sensoriamento remoto, SIG e modelos de autômatos celulares para o período de 1988 a 1995.

A cidade de Rio Claro (SP), com porte médio e de considerável importância agroindustrial no interior paulista, foi selecionada para análise por possuir importante acervo de documentos cartográficos e levantamentos aerofotogramétricos de diferentes períodos, indicando a possibilidade de realização desta proposta de trabalho, em conformidade com seus objetivos. O município de Rio Claro localiza-se na porção centro-leste do estado de São Paulo (Figura 1). Sua sede, estabelecida em sítio de relevo predominantemente plano, está situada a uma altitude média de 613 m e 499 km² e abriga uma população de 186.253 habitantes, segundo a estimativa do Censo 2010 do IBGE. A economia local está atualmente vinculada à agricultura da cana-de-açúcar e ao setor industrial de transformação, em que se sobressai a cerâmica de acabamento, fazendo de Rio Claro um importante pólo de produção nacional no setor.

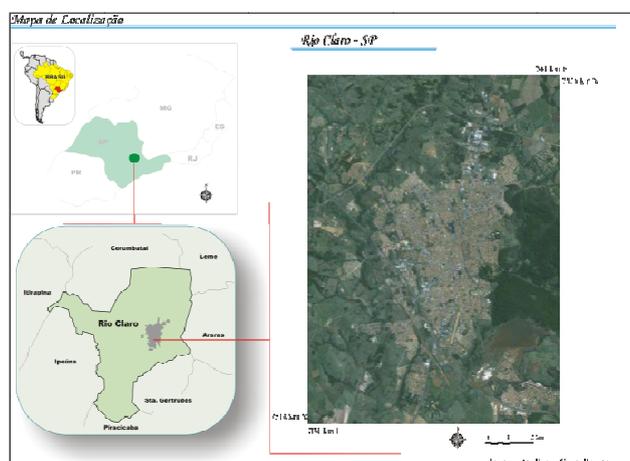


Figura 1. Localização da área de estudo.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Preparação dos Dados para Entrada na Plataforma *Dinamica EGO*

Inicialmente, foi realizada a edição da Planta Cadastral de Rio Claro com o aplicativo CAD *Autodesk Map*. A partir das imagens aerofotogramétricas de 1988 (1:40.000) e 1995 (1:25.000) a malha urbana foi atualizada com ajustes dos dados planimétricos relativos às quadras, sistemas viários e hidrografia.

Os mapas de uso do solo urbano, referentes aos cenários inicial (1988) e final (1995), foram elaborados a partir da análise interpretativa das imagens aerofotogramétricas com a utilização do software *Autodesk Map*. Para esse mapeamento foram definidas 12 classes que compreenderam a área intra-urbana e seu entorno, como segue: 1) industrial; 2) residencial; 3)

áreas verdes/lazer; 4) institucional; 5) comercial; 6) mista (corredores de comércios e serviços); 7) loteamentos de recreio; 8) mata; 9) campo; 10) reflorestamento; 11) cana e 12) mineração. Também, foram mapeados os dados referentes às variáveis que explicam a dinâmica das mudanças do uso do solo, sendo estas correspondentes ao cenário inicial (1988) para a simulação, que compreendeu 14 variáveis em termos de distâncias (proximidade) em relação a: 1) corredores de comércios/serviços, 2) condomínios, 3) conjuntos habitacionais, 4) alta concentração de escolas, 5) média concentração de escolas, 6) estradas não pavimentadas, 7) estradas pavimentadas, 8) ferrovia, 9) áreas institucionais, 10) sistema viário pista dupla, 11) sistema viário pista simples, 12) áreas de saúde (hospitais, pronto socorro, Unidades Básicas de Saúde - UBS / Unidades de Saúde Familiar - USF, 13) ensino superior e 14) áreas verdes.

Foram realizadas a estruturação e implementação de Banco de Dados, bem como a conversão de formatos. Para a elaboração dos mapas de uso do solo e dos mapas de distâncias foram utilizados os programas *Autodesk Map* e *SPRING*, além do *IDRISI* e *Ermapper* para a conversão dos formatos, em função da compatibilidade entre as plataformas.

2.2 Modelagem de Mudanças no Uso do Solo Urbano na Plataforma *Dinamica EGO*

Os dados temáticos preparados foram inseridos no ambiente da plataforma *Dinamica EGO* para a aplicação da modelagem das mudanças do uso do solo urbano, correspondente ao período de simulação de 1988 a 1995.

O desenvolvimento da modelagem compreendeu as etapas de parametrização, calibração, simulação e validação. A parametrização consiste no conjunto de métodos ou rotinas para conferir pesos às variáveis de entrada; a calibração refere-se ao procedimento iterativo de ajuste de parâmetros através da contínua comparação entre a cena real (mapeada) e a simulada, visando à aproximação das duas cenas; a validação refere-se ao emprego de métodos estatísticos para avaliar o grau de conformidade entre a cena real e a cena simulada, comumente normalizado de 0 a 1 (Almeida et al., 2003).

2.2.1 Parametrização do Modelo

Na parametrização do modelo, foram realizados procedimentos para a geração das matrizes de transição, cálculo das faixas para discretização das variáveis contínuas e cálculo dos pesos de evidência.

A matriz de transição, responsável por fornecer ao algoritmo de simulação o percentual de mudanças de classe de uso para outra, é obtida por meio da tabulação cruzada dos mapas de uso do solo, referentes aos períodos selecionados (cenário inicial e final). A matriz de passos simples (*single step matrix*), a qual considera uma única taxa de transição para o período de tempo analisado, foi obtida por tabulação cruzada entre os mapas de uso - cenários inicial (1988) e final (1995). Essa mesma matriz foi submetida a transformações algébricas segundo o método proposto por Bell e Hinojosa (1977), que considera o produto entre o auto-vetor da matriz global, o auto-valor da mesma elevado a $1/n$ (em que n é o número de passos anuais) e a matriz inversa do auto-vetor. Como resultado, obteve-se a matriz de passos múltiplos (*multiple step matrix*), que apresenta as probabilidades anuais de transição de uso do solo, correspondentes a um único passo de tempo, considerando 7 passos de tempo, com a duração de um ano cada um.

Para o cálculo dos intervalos discretos (ranges) de distâncias para cada uma das variáveis contínuas, a plataforma *Dinamica EGO* utiliza o método de generalização de linhas proposto por Agterberg e Bonham-Carter (1990). Por sua vez, os pesos das variáveis são estabelecidos pelo método de pesos de evidência, baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes, o qual pressupõe independência espacial entre variáveis. Como resultados, são

apresentados os pesos de evidência para todos os intervalos de cada uma das variáveis contínuas discretizadas em formas de gráficos e tabelas.

2.2.2 Calibração do Modelo

Nos procedimentos de calibração do modelo, verificou-se a associação ou dependência espacial entre pares de variáveis selecionadas para explicar uma mesma transição. Para isto, foram utilizados os índices de Cramer (V) e o de Incerteza de Informação Conjunta (*Joint Information Uncertainty - JIU*). Conforme Bonham-Carter (1994), os valores de V ou *JIU* acima de 0,50 indicam associação espacial significativa, sendo necessária a eliminação de uma das variáveis ou ambas as variáveis devem ser combinadas em único plano de informação para evitar o enviesamento do modelo por redundância de informações.

Ainda, na calibração do modelo realizou-se a definição dos percentuais das funções de transição (*expander* e *patcher*) e dos parâmetros internos para a caracterização morfológica das manchas de paisagens nas simulações, por meio de ajustes iterativos. A função *expander* (expansão) é relativa à expansão das manchas pré-existentes de uma dada classe de uso do solo, e a função *patcher* (formador de manchas), destinada a gerar novas manchas (polígonos) de uma dada classe. Na caracterização morfológica da paisagem nas simulações, os tamanhos das novas manchas geradas pelo *patcher* e franjas de expansão produzida pelo *expander* são definidos de acordo com uma distribuição de probabilidade lognormal, determinada em função do tamanho médio e variância de cada tipo de mancha e franja de expansão a ser gerada (Soares-Filho et al., 2002). Ainda, para a definição das novas manchas a serem geradas deve-se estabelecer o índice de isometria para cada transição de classes, o qual representa um valor numérico, que é multiplicado pelo valor de probabilidade das oito células da janela de vizinhança 3 x 3, utilizada pelos algoritmos *expander* e *patcher*, antes da aplicação da regra de transição. Quanto mais elevado é o valor do índice, mais compactas serão as manchas produzidas pelas funções de transição, e quanto mais próximo de zero, mais fragmentadas serão as manchas (Almeida et al., 2008).

Para cada período de simulação, os valores da média e variância foram adquiridos a partir das classes do mapa de transição, elaborado no *IDRISI*, através da tabulação cruzada dos mapas de classes de uso do solo, inicial e final de cada período. Na plataforma *TerraView*, foram extraídos os valores de áreas dos polígonos correspondentes a cada uma das classes de transição, e em ambiente *Excel*, foram calculadas as médias e as variâncias referentes aos polígonos resultantes de cada transição. Os dados desses parâmetros estatísticos e de isometria foram inseridos na plataforma *Dinamica EGO*, para simular as manchas de classes temáticas dos tipos *expander* e *patcher*. Salienta-se que para o parâmetro isometria foi adotado o valor 2,0 que implica na geração de manchas compactas.

2.2.3 Simulação do Modelo

Para a execução das simulações anuais de mudanças do uso do solo foram utilizados o mapa de uso – cenário inicial (1988), o conjunto ou cubo de variáveis estáticas (são aquelas que não sofrem alteração durante a execução das simulações), a matriz de transição anual e os pesos de evidência. Foi informado ao modelo o número de 7 passos, correspondentes aos 7 anos decorridos entre o tempo inicial (1988) e final (1995) do período de simulação. Como resultados, foram produzidos 7 mapas de paisagem ou de uso do solo, bem como mapas de probabilidades para cada uma das transições, indicando as células com maior propensão a mudanças.

Nas simulações, foram introduzidas as chamadas variáveis dinâmicas, representadas pelas distâncias às classes de uso da terra, nas quais ocorreram mudanças a cada iteração. Esse procedimento implica em continua atualização, influenciando no cálculo das probabilidades na seqüência das transições. As mudanças nas células (uso do solo) que ocorrem nas

sucessivas iterações influenciam na configuração espacial do mapa final. Caso a simulação gerada não seja satisfatória, procedem-se iterativamente ajustes dos parâmetros internos do modelo e novas execuções de simulação, até que se obtenha o resultado desejado.

2.2.4 Validação do Modelo

As saídas de modelos dinâmicos espaciais devem submeter-se a uma avaliação de ajuste espacial dentro de um contexto de vizinhança, uma vez que os mapas de uso final real e simulado não podem ser comparados em nível de pixel, mas devem ser analisados em termos de correspondência de padrões espaciais dentro de uma vizinhança de pixels. O procedimento de validação na plataforma *Dinamica EGO* é baseado no método de similaridade *fuzzy* criado por Hagen (2003), o qual inclui o *Kfuzzy*, considerado equivalente ao método estatístico *Kappa*, e a similaridade *fuzzy*, que verifica a localização e a categoria dentro da vizinhança da célula considerada. O método de Hagen (2003) baseia-se no conceito de “fuzziness of location” (dubiedade de localização), no qual a representação de uma célula é influenciada por ela mesma, e, em menor magnitude, pelas células na sua vizinhança. Sem levar em conta a dubiedade da categoria ou estado da célula, o vetor de vizinhança “fuzzy neighborhood” pode representar a dubiedade de localização.

Para a execução da validação espacial foram utilizados os mapas de uso - cenários inicial e final real, bem como o mapa de uso simulado. A similaridade é avaliada com base em uma adaptação do método de Hagen, desenvolvida pela equipe do Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR-UFMG), que considera dois mapas-diferença resultantes da: i) subtração do mapa de uso – cenários final real e inicial, e ii) subtração dos mapas de uso – cenários final simulado e uso inicial. Realizado o processo de validação e com base nos índices de similaridade gerados, pode-se definir se o modelo é adequado para a simulação de prognósticos.

3. Resultados e Discussão

No processo de simulação para o cenário de 1995, a tabulação cruzada entre os mapas de uso do solo – cenários inicial e final (Figuras 2a e 2b) resultou na matriz de transição global (Tabela 1). Essa matriz foi submetida a manipulações algébricas com base nos seus autovalores e auto-vetores, resultando na matriz de transição anual, efetivamente usada na simulação do modelo.

Na seqüência, gerou-se como saída um arquivo texto (*skeleton.dcf*), contendo os intervalos (*ranges*), correspondentes às faixas de distâncias mais favoráveis para parametrizar as respectivas transições, o qual foi posteriormente utilizado para determinar os pesos de evidência. Em seguida, procedeu-se à etapa de cálculo dos pesos de evidência, que indicam a influência (a proximidade) exercida por uma variável de entrada na ocorrência de uma dada transição, resultando em arquivo texto (*weights.dcf*), que contém os pesos para todos os intervalos de cada uma das variáveis contínuas discretizadas e para cada transição de uso individualmente.

Por sua vez, para a calibração do modelo foram realizados ajustes de parâmetros através da comparação entre a cena real e simulada, visando à aproximação da cena simulada a real.

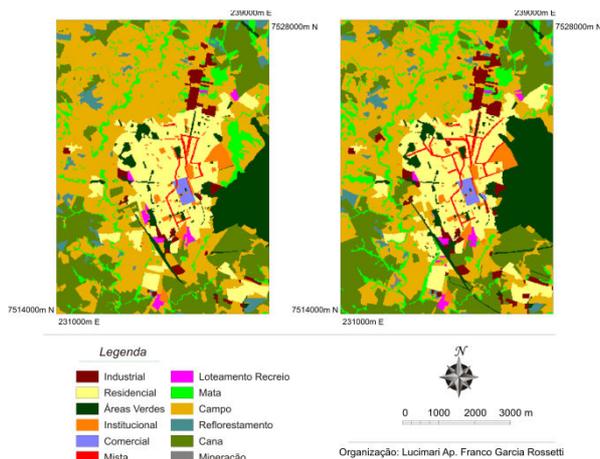


Figura 2. a) Mapa de uso do solo urbano (1988); b) Mapa de uso do solo urbano (1995).

Tabela 1. Matriz de probabilidade global de transições de classes de uso do solo - 1988 a 1995.

Transição de Uso do Solo	Probabilidade de Transição (%)
Residencial para Industrial	1,39
Residencial para Institucional	0,64
Residencial para Mista	3,83
Industrial para Comercial	5,92
Campo para Industrial	1,75
Campo para Residencial	2,51
Campo para Áreas Verdes	4,90
Campo para Recreio	0,22
Cana para Industrial	0,32
Cana para Áreas Verdes	1,21
Cana para Mineração	0,42

Após o cálculo das faixas de distâncias e dos pesos de evidência, foram verificadas a associação ou dependência espacial entre as variáveis pertencentes a uma mesma transição, sendo gerado um arquivo texto (log.txt), o qual contém para cada transição todas as combinações possíveis entre pares de variáveis e os respectivos valores de V e JIU . Com base nos valores do Joint Information Incerted (JIU) as variáveis com valores acima de 0,50 foram eliminadas, para evitar o enviesamento do modelo por redundância de informações.

Após a execução do modelo, foram produzidos mapas anuais de simulação do uso do solo urbano em Rio Claro. As Figuras 3a e 3b apresentam, respectivamente, o mapa de uso do solo real e o mapa de uso do solo simulado, ambos para o cenário de 1995.

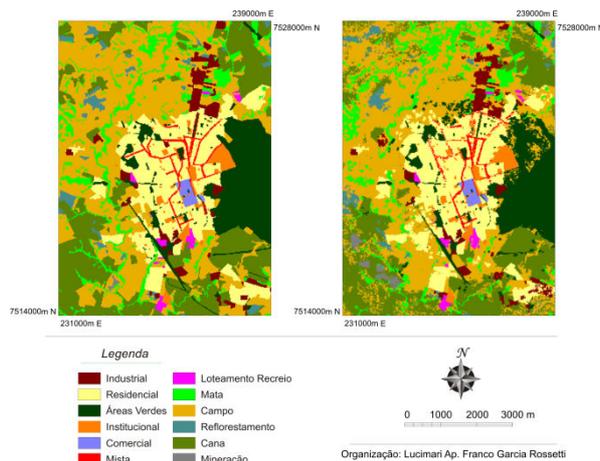


Figura 3. a) Mapa de uso do solo urbano - real (1995); b) Mapa de uso do solo urbano - simulado (1995).

Em seguida, os resultados de modelos espaciais foram submetidos a uma avaliação de ajuste espacial dentro de um contexto de vizinhança, uma vez que os mapas de uso final real e simulado não podem ser comparados em nível de pixel, mas devem ser analisados em termos de correspondência de r padrões espaciais dentro de uma vizinhança de pixels.

O método de validação na plataforma Dinamica para a avaliação de similaridade entre mapas baseada na comparação por meio de janelas de vizinhança é baseado no método de similaridade fuzzy criado por Hagen (2003), o qual inclui o Kfuzzy, considerado equivalente ao método estatístico Kappa, e a similaridade fuzzy, que verifica a localização e a categoria dentro da vizinhança da célula considerada.

4. Conclusões

Conforme os objetivos, procedimentos metodológicos e resultados, e considerando as mudanças do uso do solo para o período selecionado, as são apresentadas as seguintes considerações finais.

O período de 1988 a 1995 não apresentou expressiva expansão na malha urbana, fato decorrente do adensamento de ocupações residenciais nos loteamentos já implantados no período anterior, bem como pela estagnação econômica decorrente da crise brasileira, que refletiu no crescimento do estado de São Paulo, influenciando o município de Rio Claro.

Os mapas de simulações relativos aos períodos selecionados apresentaram-se consistentes, com boa aproximação quando comparados com os dados mapeados. Deve-se enfatizar a importância na seleção e definição das variáveis que determinam as ocorrências das mudanças do uso do solo na expansão urbana.

Por sua vez, a utilização de geotecnologias para a extração de dados (imagens aerofotogramétricas) e na elaboração de mapas temáticos possibilitaram a estruturação e implementação de consistente banco de dados georelacional.

A aplicação de modelagem dinâmica ambiental em estudos urbanos permite a seleção de informações de interesse para análise estrutural de elementos, fenômenos e sistemas presentes numa determinada paisagem apesar de oferecer uma representação simplificada das relações do mundo real.

A aplicação combinada das geotecnologias e modelagem da paisagem permite subsidiar o poder público no planejamento da ordenação e reorganização do espaço geográfico, através das análises diagnósticas e prognósticas.

Referências Bibliográficas

Agterberg, F. P.; Bonham-Carter, G. F. Deriving weights of evidence from geoscience contour maps for the prediction of discrete events: Proceedings 22nd APCOM Symposium, Berlin, Germany, 1990, Technical University of Berlin, v. 2, p. 381-395.

Almeida, C. M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso do solo em áreas urbanas para as Cidades de Bauru e Piracicaba (SP)**. 2004. 351 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

Almeida, C. M.; Batty, M.; Monteiro, A. M. V.; Câmara, G.; Soares-Filho, B. S.; Cerqueira, G. C.; Pennachin, C. L. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 27, p.481-509, 2003.

Almeida, C. M.; Gleriani, J. M.; Castejon, E. F.; Soares-Filho, B. S. Using neural networks and cellular automata for modeling intra-urban land use dynamics. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 22, n. 9, p. 943-963, 2008.

Bell, E. J.; Hinojosa, R. C. Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes. **Socio-Economic Planning Science**, v. 11, n. 6, p. 13-17, 1977.

Bonham-Carter, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 305 p.

Hagen, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 17, n. 3, p. 235-249, 2003.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2010: **População do Brasil**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1766>. Acesso em: 25 ago. 2011.

Rossetti, L. A. F. G. **Modelagem dinâmica espacial de mudanças no uso do solo urbano: contribuição metodológica**. 2011. 131p. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

Soares-Filho, B. S.; 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**, v. 154, p. 217-235, 2002.

Soares-Filho, B. S.; Rodrigues, H. O.; Costa, W. L. S. **Dinamica EGO Tutorial**. Belo Horizonte, MG. (2009). Centro de Sensoriamento Remoto - Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>>. Acesso em: 12 set 2011.