

Modelagem da expansão urbana de São José dos Campos – SP entre 1991 e 2000

Paulo Roberto da Silva Ruiz ¹
Cláudia Maria de Almeida ¹
Camila Souza dos Anjos Lacerda ²
Madalena Niero Pereira ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
paulo.ruiz@inpe.br; almeida@dsr.inpe.br; mada030449@gmail.com

² Instituto de Estudos Avançados - IEAv
Rod. dos Tamoios, km 5,5 - 12228-001 – São José dos Campos - SP, Brasil
camilasanjos@gmail.com

Abstract. This work is committed to parameterize and calibrate an urban expansion simulation model for the city of São José dos Campos – SP, Brazil, in the time span ranging from 1991 to 2000. The input data were obtained from a digital database especially built in the scope of a FAPESP-funded research project entitled "Urban Sprawl and Changes in the Urban Tissue: a Case Study in São Paulo State". The methodological procedures comprise the data pre-processing, parameterization, calibration, simulation, and statistical validation of the simulation model, which were executed in the Dinamica EGO platform, with the exception of the first procedure. The simulation result showed to be satisfactory in face of the attained agreement indices and the Dinamica EGO platform demonstrated to be robust for carrying out this modeling experiment.

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

Nos últimos anos, observa-se uma intensificação do processo de urbanização, estimulado, sobretudo pelos significativos avanços tecnológicos e pela industrialização. No Brasil, este processo está atrelado à modernização da agricultura e ao processo de industrialização acelerada. Estes fatores proporcionaram uma concentração econômica em algumas cidades, por estas possuírem elementos de atração industrial como infraestrutura, localização, mão de obra e mercado consumidor. A grande consequência destas transformações foi o intenso adensamento populacional em poucas regiões do país, propiciando uma transformação na organização espacial das cidades, bem como novas estruturas sociais e econômicas (Reis, 2006).

A cidade de São José dos Campos insere-se neste contexto. Fundada em 1767, sua história pode ser dividida em três fases: (i) de aldeia a vila – os pioneiros de sua ocupação foram os padres jesuítas e, já no século XVIII, com sua emancipação, se estabelece como uma vila voltada às atividades agropecuárias, ocupando posição periférica no período áureo do café no Vale do Paraíba; (ii) fase sanatorial – no início do século XX, por conta de seu clima, inúmeros doentes tuberculosos procuravam a cidade em busca de cura. Em 1924, com a inauguração do sanatório Vicentina Aranha e investimentos em saneamento básico, a cidade reforça essa característica; (iii) indústrias e centros de compras – com a instalação do Centro Técnico Aeroespacial (CTA) em 1950 e no ano seguinte a inauguração da rodovia Presidente Dutra, seu processo de industrialização tomou grande impulso apresentando um rápido crescimento demográfico, passando de 44.804 habitantes em 1950 para 629.921 habitantes em 2010. Nos anos 1990 e início do século XXI, seu setor terciário passa por um forte incremento, caracterizando-se também como um importante centro regional de compras e serviços (São José dos Campos, 2016).

A rápida expansão urbana representa um grande desafio para os gestores locais, em termos de formulação de políticas públicas, redirecionamento do crescimento urbano visando à sua sustentabilidade frente a características do sítio físico, bem como de previsão e de atendimento a demandas por infraestrutura (transportes, rede de água e esgoto, telefonia fixa e móvel, fornecimento de energia etc.) e superestrutura (creches, escolas, hospitais, postos de saúde, equipamentos de comércio e serviços, lazer e áreas verdes, entre outros). Neste sentido, importantes tecnologias de modelagem podem ser utilizadas para desenvolver análises e simulações de mudanças do uso do solo urbano, bem como da expansão territorial das cidades. Assim, o presente trabalho propõe-se a parametrizar e calibrar um modelo de simulação da expansão urbana de São José dos Campos, no período compreendido entre 1991 e 2000.

2. Fundamentação Teórica

Modelos de mudanças do uso do solo foram amplamente desenvolvidos ao longo do século XX. Os primórdios de sua concepção estão atrelados ao desenvolvimento das ciências da computação, em que, em sua maioria acoplados a modelos econômicos teóricos, objetivavam simular diversas características presentes na evolução do uso do solo.

Diversos tipos de modelos genéricos de mudanças do uso do solo foram desenvolvidos. Conforme Briassoulis (2000), eles podem ser classificados em estatísticos ou econométricos, de interação espacial, de otimização, integrados e aqueles baseados em ciências naturais, em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e na cadeia de Markov. Portanto, há inúmeros estudos voltados à investigação dos mais variados modelos genéricos.

Um grande grupo de modelos de mudanças do uso do solo são aqueles que incorporam características espaciais não dinâmicas. Um dos mais tradicionais estudos que se insere neste paradigma é a teoria de anéis concêntricos de Von Thünen, de 1826. O trabalho contempla um modelo econômico de uma cidade e suas regiões circunvizinhas. Em sua abordagem, a partir de dada distância do centro, certa cultura iria se sobrepor às demais. Por sua vez, nas demais regiões, outras culturas ou atividades prevaleceriam. Neste contexto, o uso mais intenso da terra seria mais próximo ao centro, demonstrando a forte influência da proximidade ao mercado central na concepção do modelo. Foram desenvolvidos e utilizados diversos modelos com característica não espacial, mas inúmeros problemas foram evidenciados, tais como: o caráter arbitrário e mecanicista dos mesmos em detrimento de uma base teórica consolidada; o fato de se aterem apenas à descrição da estrutura urbana em um instante no tempo ou, quando muito, comparar essas estruturas de forma estática (Almeida, 2003).

Diversos esforços foram despendidos em prol de superar as limitações dos modelos não dinâmicos. Neste sentido, foram desenvolvidos modelos a partir de abordagens espaciais dinâmicas, ou seja, que possuíam uma dimensão temporal explícita, com suas entradas e saídas variando com o tempo e com estados dependentes dos estados anteriores, conforme a conceituação de Wegener (1986).

Com a utilização de autômatos celulares (CA), avanços na representação espacial dos modelos, sobretudo urbanos, ocorreram na década de 1980. Os modelos baseados em CA possuem diversas aplicações, desde a física teórica até mudanças de uso e cobertura do solo urbano. Os primeiros modelos urbanos de CA possuíam metodologias muito simples, como restrições de vizinhanças ou regras booleanas. Com o passar dos anos, importantes refinamentos foram acrescentados aos modelos, como regras de transição dinâmicas, que se alteram com mudanças no espaço modelado. Mais recentemente, concepções teóricas da inteligência artificial, como sistemas especialistas, redes neurais artificiais e computação evolucionária, foram incluídos nas modelagens urbanas de CA (Almeida, 2003).

3. Metodologia de Trabalho

Esta seção apresenta a área investigada neste estudo, os dados utilizados, bem como as etapas desenvolvidas para alcançar os objetivos do presente trabalho.

3.1 Área de Estudo

A área de estudo é o município de São José dos Campos, localizado na região do Vale do Paraíba paulista, latitude sul $23^{\circ}10'47''$ e longitude oeste $45^{\circ}53'14''$, localizado a uma altitude média de 600 m, com uma área de 1.099,6 km², sendo 359,3 km² constituída por área urbana (Figura 1).



Figura 1. Localização da área de estudo. Fonte: Wikipedia (2016).

O relevo do município de São José dos Campos apresenta predominância de colinas, sendo mais acentuadas no norte do município. Sua parte mais densamente urbanizada concentra-se no centro-sul do município, onde há a presença de terraços tabulares. Quanto à hidrografia, o principal curso d'água é o rio Paraíba do Sul. Ele corta transversalmente o território do município, possuindo afluentes com grande volume de água como o rio Jaguari e o rio Buquira (São José dos Campos, 2016).

3.2 Preparação dos Dados

Os dados utilizados foram obtidos do banco de dados digitais do projeto de pesquisa financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo (FAPESP) intitulado "Urbanização Dispersa e Mudanças no Tecido Urbano - Estudo de Caso: Estado de São Paulo" (Pereira et al., 2005a; Pereira et al., 2005b; Reis, 2006). Os dados foram selecionados e adaptados na plataforma computacional SPRING 4.3.3 (Câmara et al., 2006). Os mapas de uso do solo de São José dos Campos, referentes ao cenário inicial (1991) e final (2000), juntamente com os mapas de variáveis estáticas, foram gerados em formato tiff. Como o objetivo deste trabalho é simular a expansão urbana de São José dos Campos, foram definidas apenas duas classes de uso do solo: urbana e não urbana. Como variáveis estáticas, foram utilizadas as distâncias às rodovias e rios.

Foram realizadas as correções das classes dos mapas e a tabulação cruzada entre os mapas de urbanização inicial e final na plataforma computacional Idrisi (Eastman, 2009). A partir daí, foi realizado o recorte dos mapas conforme a delimitação do município de São José dos Campos na plataforma computacional ArcGIS 10.1 (Esri, 2011).

Os mapas de distâncias das variáveis estáticas, juntamente com a montagem do cubo de dados das variáveis, foram criados no próprio pacote computacional Dinamica EGO (Rodrigues et al., 2007).

3.3 Modelagem do solo urbano na plataforma dinâmica EGO

De posse dos dados temáticos, estes foram inseridos na plataforma Dinamica EGO para a realização da modelagem da expansão urbana, correspondente ao período de simulação de 1991 a 2000. O desenvolvimento da modelagem compreendeu as etapas de parametrização, calibração, simulação e validação.

3.3.1 Parametrização do Modelo

Os procedimentos referentes a esta etapa abordaram a geração das matrizes de transição, cálculo das faixas para discretização das variáveis contínuas e cálculo dos pesos de evidência.

A matriz de passos simples (*single step matrix*), que considera uma única taxa de transição, foi obtida por tabulação cruzada entre os mapas inicial e final. Por meio de transformações algébricas nessa matriz, obteve-se a matriz de passos múltiplos (*multiple step matrix*), que apresenta as probabilidades anuais de transição, correspondendo a três passos de tempo. Os pesos das variáveis são estabelecidos pelo método de pesos de evidência, baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes. A discretização das variáveis contínuas (distâncias, no caso) se faz através do método proposto por Goodacre et al. (1993), baseado no algoritmo de generalização de linhas em SIG.

3.3.2 Calibração do Modelo

Verifica-se a associação ou dependência espacial entre pares de variáveis selecionadas para explicar uma mesma transição. Nesta etapa, foram utilizados os índices de Cramer (V) e o de Incerteza de Informação Conjunta (*Jointy Information Uncertainty – JIU*). Para evitar o enviesamento do modelo por redundância de informações, é necessária a eliminação de variáveis com valores acima de 0,50, o que indica associação espacial significativa.

Ainda neste passo, é preciso realizar a definição dos percentuais das funções de transição (*expander* e *patcher*) e dos parâmetros internos para a caracterização morfológica das manchas de paisagem na simulação. Para isso, os tamanhos das novas manchas geradas são definidos, em hectares, em função do tamanho médio e variância de cada tipo de mancha a ser gerada, por expansão ou difusão. Também deve-se estabelecer o índice de isometria para cada transição de classes. Quanto mais elevado esse índice, mais compactas serão as manchas produzidas pelas funções de transição.

Os valores de média e variância da mancha urbana foram obtidos no ArcGIS 10.1. Para a realização das simulações, os dados desses parâmetros estatísticos e de isometria foram inseridos na plataforma Dinamica EGO.

3.3.3 Simulação do Modelo

Para a execução das simulações anuais da expansão urbana, foram utilizados o mapa de uso inicial, referente a 1991, o conjunto de variáveis estáticas, a matriz de transição anual e os pesos de evidência. Foi informado ao modelo o número de nove passos de tempo, correspondente ao total de anos decorridos entre 1991 e 2000. Portanto, foram produzidos nove mapas de expansão urbana, bem como nove mapas de probabilidades referentes à transição da classe não urbana para urbana, mostrando as células com maior propensão a mudanças.

3.3.4 Validação do Modelo

Como os mapas de uso final real e simulado não podem ser comparados em nível de pixel, mas sim em termos de correspondência de padrões espaciais dentro de uma vizinhança de pixels, as saídas do modelo foram submetidas a uma avaliação de ajuste espacial dentro de

um contexto de vizinhança. No Dinamica EGO, a validação é baseada no método de similaridade *fuzzy* criado por Hagen (2003), incluindo o *Kfuzzy*, considerado equivalente ao Kappa, e na similaridade *fuzzy*, verificando-se a localização e a categoria das células dentro da janela de vizinhança considerada. Esse procedimento pode ser executado com base em um decaimento exponencial do ajuste, isto é, penalizam-se as células no mapa simulado que apresentam o estado da célula central da janela em função da sua distância à célula central, ou então, com base em um decaimento constante, onde se premiam integralmente acertos observados dentro da janela de vizinhança, independentemente da posição das células.

Nesta etapa, foram utilizados os mapas de uso reais inicial e final e o mapa de uso simulado. A equipe do Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR-UFMG) realizou uma adaptação no método de Hagen, considerando dois mapas-diferença resultantes, por um lado, da subtração entre os mapas de uso reais (final e inicial), e por outro, da subtração entre os mapas de uso (final simulado e o de uso inicial real). Cabe salientar que a definição da adequação do modelo para fins de simulação de prognósticos é pautada pelo processo de validação e índices de similaridade dele derivados (Rossetti, 2013).

4. Resultados e Discussões

A Figura 2 apresenta os mapas de uso do solo reais inicial (relativo a 1991) e final (relativo a 2000). Conforme dito anteriormente, a tabulação cruzada entre os mapas produziu as matrizes de passos simples e a de passos múltiplos. Em seguida, foi gerado um arquivo texto (*skeleton.dcf*), contendo os intervalos correspondentes às faixas de distâncias mais favoráveis para parametrizar as transições. De posse desse arquivo, foram calculados os pesos de evidência, o que resultou no arquivo-texto *weights.dcf*.

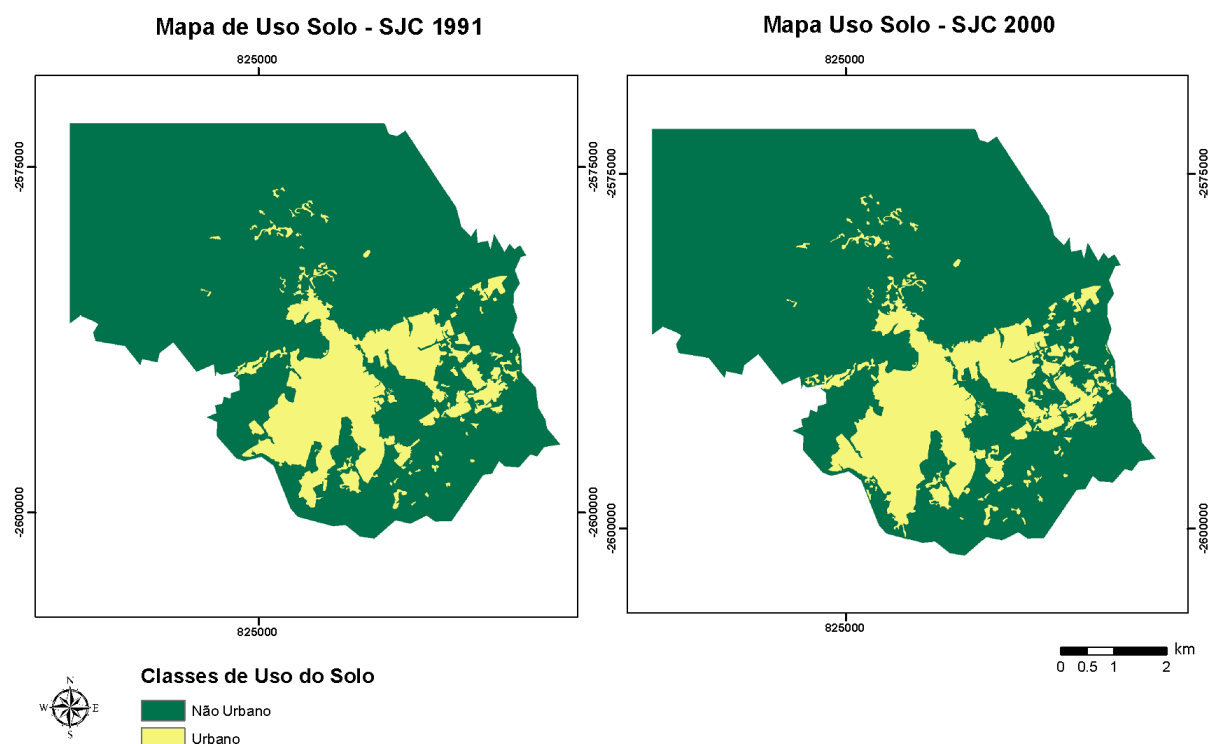


Figura 2. Mapas de uso do solo reais inicial (1991) e final (2000).

Após a etapa de cálculo de distâncias e dos pesos de evidência, foi verificada a dependência espacial entre as variáveis por meio do arquivo *correlation_report.csv*, que

contém para a transição considerada todas as combinações possíveis entre pares de variáveis e seus valores de V e JIU .

Com a execução do modelo, foram produzidos mapas anuais de simulação da expansão urbana de São José dos Campos. A Figura 3 apresenta, respectivamente, o mapa da expansão urbana real e o simulado, ambos para o ano 2000.

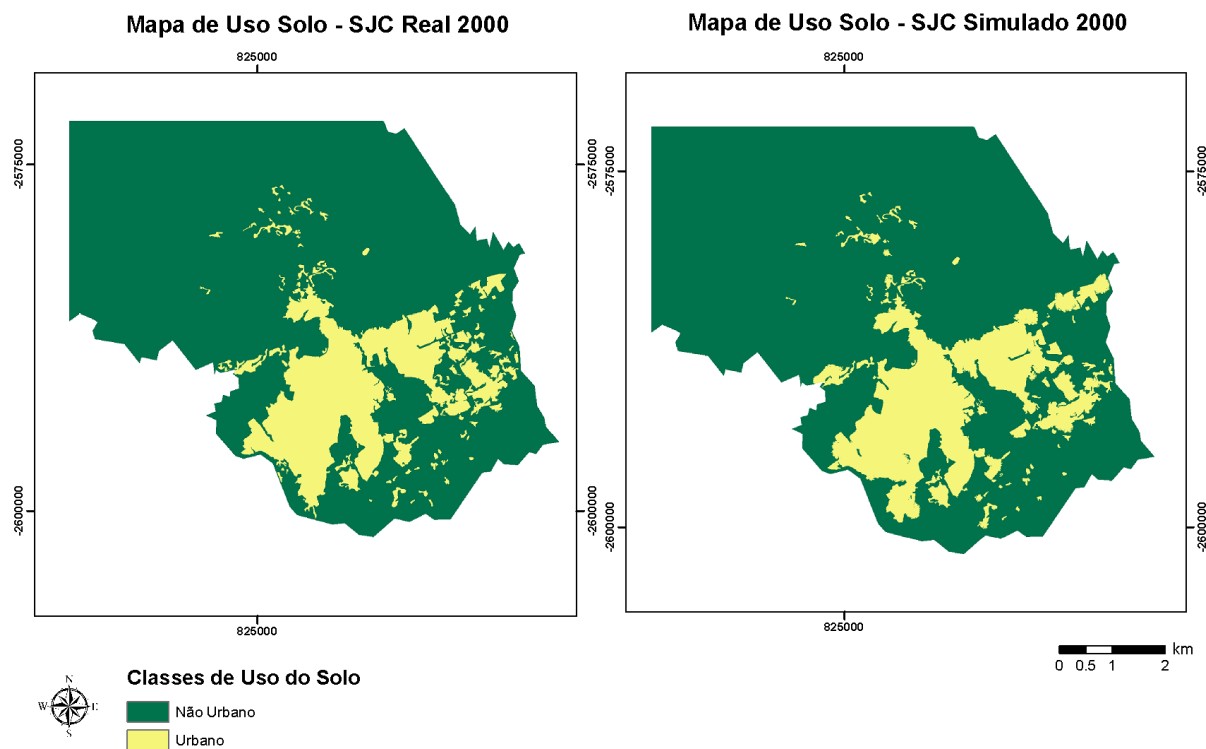


Figura 3. Mapa de uso do solo real em 2000 (esquerda) e mapa simulado em 2000 (direita).

Posteriormente, foi realizado o método de validação estatística na plataforma Dinamica EGO, com fins à determinação do grau de similaridade entre esses mapas, baseada no método de similaridade fuzzy criado por Hagen (2003) e operando com o conceito de mapas-diferença, tanto para decaimento exponencial quanto constante. Como o cálculo é realizado de forma recíproca entre os mapas-diferença, a Tabela 1 apresenta os resultados de índices de similaridade mínimos e máximos para ambos os decaimentos.

Tabela 1. Índices de similaridade fuzzy (mínimos e máximos), considerando decaimento exponencial e constante, para diferentes tamanhos de janelas de vizinhança.

Tamanho da janela (pixels)	Decaimento Exponencial		Decaimento Constante	
	Similaridade (mín.)	Similaridade (máx.)	Similaridade (mín.)	Similaridade (máx.)
3x3	0,2786	0,2871	0,3211	0,3658
5x5	0,2863	0,3031	0,3479	0,3889
7x7	0,2910	0,3138	0,3811	0,4232
9x9	0,2938	0,3211	0,3946	0,4388
11x11	0,2955	0,3260	0,4137	0,4511

5. Conclusões

O presente trabalho propôs-se a parametrizar e calibrar um modelo de simulação da expansão urbana para São José dos Campos, no período compreendido entre 1991 e 2000.

Considerando os resultados alcançados, as simulações são amplamente dependentes do processo de calibração e validação do modelo, pois há um limiar muito pequeno para o sucesso ou fracasso do resultado da simulação.

A plataforma Dinâmica EGO mostrou-se robusta na realização da modelagem. Mas, é preciso cautela na seleção dos dados de entrada, na elaboração de mapas iniciais e finais, bem como na manipulação espacial das variáveis. Enfim, é necessário um exaustivo trabalho de formatação dos dados, a fim de se executar a modelagem.

O resultado da simulação da urbanização referente ao ano de 2000 mostrou-se satisfatório, quando comparado com o mapa real. Foram verificados erros na expansão urbana, sobretudo nas regiões sul, oeste e leste da cidade. A utilização de mais variáveis estáticas, como ferrovias, principais avenidas e altimetria, seriam certamente capazes de melhorar a simulação.

Referências Bibliográficas

- Almeida, C.M. **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. 321 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.
- Briassoulis, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches.** 2000. Tese (Doutorado em Geografia) - University of Aegean, Lesvos, Greece. 2000.
- Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., Garrido, J., It, F.M. Spring: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-Oriented Data Modelling. **Computers & Graphics**, 20: (3) 395-403, May-Jun, 1996.
- Eastman, J.R. **IDRISI Taiga: Guide to GIS and Image Processing.** Worcester: ClarkLabs. 2009. 327 p.
- Esri. **ArcGIS Desktop: Release 10.** Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2011.
- Goodacre, C. M.; Bonham-Carter, G. F.; Agterbert, F. P.; Wright, D. F. A statistical analysis of spatial association of seismicity with drainage patterns and magnetic anomalies in western Quebec. **Tectonophysics**, v. 217, p. 205-305, 1993.
- 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.
- Pereira, M. N.; Gonçalves, C. D. A. B.; Souza, I. M. E.; Garcia, A. S.; Portela, A. G.; Almeida, C. M.; ROSEMBACK, R.; FLORENZANO, T. G. Uso de Imagens de Satélite como Subsídio ao Estudo do Processo de Urbanização - **Relatório técnico referente a Projeto Temático FAPESP** (Proc. n. 2002/07742-8). 2005. (Relatório de pesquisa).
- Pereira, M. N.; Gonçalves, C. D. A. B.; Souza, I. M. E.; Garcia, A. S.; Portela, A. G.; Almeida, C. M.; Florenzano, T. G. Uso de Imagens de Satélite como Subsídio ao Estudo do Processo de Urbanização. **Revista de Estudos sobre Urbanização, Arquitetura e Preservação**, São Paulo, SP, v. 46, p. 3-33, 2005.
- Reis, N.G. **Notas sobre urbanização dispersa e novas formas de tecido urbano.** São Paulo: Via das Artes, 2006. 201 p.
- Rodrigues, H.O.; Soares-Filho, B.S; Costa, W.L.S. Dinâmica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 3089- 3096. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: < <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.06.17.59>>. Acesso em: 01 Nov 2016.
- Rosseti, L.A.F.G.; Almeida, C.M.; Pinto, S.A.F. Análise de Mudanças no Uso do Solo Urbano e Rural com a Aplicação de Modelagem Dinâmica Espacial. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR) XVI, 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 2013.de. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0750.pdf>>. Acesso em: 01 Nov. 2016.



São José dos Campos. Disponível em < http://www.sjc.sp.gov.br/sao_jose.aspx>. Acesso em: 01 Nov 2016.

Wegener, M.; Gnad, F.; Vannahme, M. The time escala of urban change. In: Hutchinson, B.; Batty, M. (ed.) **Advances in urban systems modelling**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 175-197.

Wikipedia – The Free Encyclopedia. **São José dos Campos**. Disponível em:
<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Arealva>>. Acesso em 01 Nov 2016.