Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica
International Review of Geographical Information Science and Technology

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

SIMULANDO CRESCIMENTO URBANO COM INTEGRAÇÃO DE FATORES NATURAIS, URBANOS E INSTITUCIONAIS

MAURÍCIO COUTO POLIDORI[1] e ROMULO KRAFTA[2]
Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil
[1] FAUrb: rua Benjamin Constant 1359, Pelotas, RS, Brasil – 96025-5600
mcp@ufpel.tche.br
[2] PROPUR: rua Sarmento Leite 320, Porto Alegre, RS, Brasil – 90050-170
krafta@ufrgs.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo para simulação de crescimento urbano, incluindo variáveis naturais, urbanas e institucionais, simulando conjuntamente expansão urbana e crescimento interno, através da integração de autômatos celulares, teoria de grafos e geotecnologias. O modelo denomina-se SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®, está implementado em ambiente de SIG e tem sido utilizado para representar crescimento urbano e para explorar questões de interface entre o ambiente natural e o processo urbano.

Palavras-chave: crescimento urbano, modelagem, autômato celular, grafos, geotecnologias.

ABSTRACT

This article presents a model for urban growth simulation that includes environmental, urban and institutional variables. It is able to simulate both urban expansion and inner growth throughout integration of Cellular Automata, Graph Theory with geotechnologies. The model, entitled SACI - Simulador do Ambiente da Cidade® (City Environment Simulator), has been implemented on a GIS environment and successfully used to represent urban growth and to explore the problematic interface between natural environment and urban process.

Keywords: urban growth, modeling, cellular automata, graphs, geotechnologies.

Recibido: 14 / 08 / 2005
Aceptada versión definitiva: 31/ 08 /.2005

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

1. Introdução

Estudos dedicados à dinâmica urbana consideram que a cidade está em permanente mudança (Batty, Xie e Sun, 1999), cuja compreensão exige observar não só um momento, mas sim um processo de transformação ao longo de um determinado intervalo de tempo (Torrens e O'Sullivan, 2001). Nessa mudança permanente, alteram-se conjuntamente a cidade e a paisagem, pois o processo de produção do espaço consome recursos, produz lugares novos e gera externalidades (Allen, 1997), provocando uma modificação no conjunto que integra, o que pode ser chamado de crescimento urbano. Uma dessas modificações ocorre na forma da cidade, que assume determinadas feições em função do processo de crescimento, impondo ao mesmo tempo um novo aspecto à paisagem (Houng, 1998), o que pode ser estudado nos domínios disciplinares da morfologia urbana e da ecologia de paisagem (Forman e Godrom, 1986). Todavia, se parece evidente reconhecer que ocorrem mudanças na morfologia urbana e na paisagem em função do crescimento urbano, não é evidente o modo como ocorrem, para o que interessam estudos exploratórios, o que pode ser feito com suporte em teoria de sistemas, modelagem, teorias de complexidade e de auto-organização, direcionadas para as questões da cidade (Schuschny, 1998; Torrens, 2000b; Portugali, 2000).

Estudos de ecologia de paisagem têm avançado na tentativa de incluir o sistema humano e a cidade na paisagem, realizando movimentos científicos e práticos em conjugação com trabalhos de larga abrangência (Palang, Mander e Naveh, 2000), mas com dificuldades para ingressar na problemática urbana. Avaliações de adequação multicritérios e análises difusas têm-se preocupado com a incorporação de novas áreas à dinâmica urbana e com o uso do solo decorrente, seguidamente com preocupações de preservação da natureza, porém sem facilidade em capturar os interesses imobiliários reinantes na cidade. Por seu turno, sistemas especialistas (como está em Kalogirou, 2002) podem reproduzir a ação dos produtores do espaço urbano, porém muitas vezes apresentando excessiva tendência de cima-para-baixo (ibidem), o que dificulta a representação de múltiplos produtores do espaço (O'Sullivan, 2000).

Modelos interessados em capturar aspectos dinâmicos da natureza vêm aplicando recursos de AC – autômatos celulares, como é o caso do alastramento de fogo, crescimento de vegetação, desenvolvimento de algas, vôo de pássaros e escoamento de águas superficiais (como respectivamente pode ser encontrado em Arcebispo, 2002; Fox, 2002; Hill e Coquillard, 1997; Wolff e Fishwick, 2003; van der Gaast e Kroes, 1999). Modelos dedicados à dinâmica urbana igualmente têm utilizado as possibilidades dos AC, procedendo adaptações para o caso das cidades (Batty, 1998; Torrens e O'Sullivan, 2001); esforços particularmente dedicados ao crescimento urbano têm sido realizados, como aparece nos trabalhos de White, Engelen e Uljee (1997), de Clarke, Hoppen e Gaydos (1997), de Wu (1996 e 1998), de Xie (1996), de Xie e Sun (2000), de Li e Yeh (2000) e Yeh e Li (2001).

Se por um lado esses trabalhos são precursores na modelagem de crescimento urbano, por outro revelam problemas ainda não resolvidos, a saber: a) os modelos têm dificuldade para explicitarem as teorias subjacentes à lógica de produção do espaço urbano, sendo predominantemente estocásticos; b) fatores naturais têm inclusão limitada nas representações dos modelos, com restrições às variáveis (normalmente só participam os atributos naturais previstos na estrutura do modelo) e ao papel que exercem no crescimento urbano (na maioria das vezes atuam

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

somente como restrições ao crescimento); c) fatores urbanos também têm inclusão limitada, pois precisam-se ajustar à pré-classificação dos modelos, dificultando a consideração das peculiaridades locais; d) fatores institucionais são raramente incluídos, o que traz dificuldades para a discussão de planos e políticas de crescimento; e) alguns modelos são inclusive restritos a um determinado local, não sendo aplicáveis em outras situações, quer reais, quer abstratas; f) a desagregação espacial e a quantidade de entidades são limitadas pelos modelos, o que dificulta os delineamentos experimentais; g) os modelos exigem plataformas computacionais sofisticadas, freqüentemente exigindo do usuário conhecimento em programação; h) normalmente os modelos são disponíveis apenas nos países e instituições de origem, acumulando com exclusividade suas vantagens tecnológicas e culturais.

Sendo deste modo, este trabalho quer fazer avançar o conhecimento no campo da configuração urbana e da ecologia de paisagem, para o que propõe um modelo de simulação de crescimento e pretende, resumidamente, o seguinte: a) aproveitar e desenvolver possibilidades dos modelos de centralidade e potencial (Krafta, 1994), capazes de representar a produção do espaço urbano, mediante integração de técnicas de grafos, autômato celular e geocomputação, construindo um modelo dinâmico de simulação de crescimento urbano; b) capacitar a modelagem para a trabalhar em função da teoria urbana, evitando simulações exclusivamente estocásticas; c) incluir num mesmo modelo aspectos das ciências sociais e das ciências ambientais, integrando fatores naturais, urbanos e institucionais, bem como crescimento urbano interno e externo simultâneos e interinfluentes; d) permitir a livre inclusão de variáveis, de modo a oferecer ao usuário a possibilidade de aproximação a diferentes lugares e de delinear os experimentos de simulação conforme seus objetivos e a disponibilidades de dados; e) possibilitar a classificação e a ponderação das variáveis conforme os objetivos da simulação, decidindo interativamente o papel e a importância dessas variáveis na simulação; f) permitir o uso em múltiplos locais ou casos reais, mediante a inclusão de parâmetros de regulagem e recursos de calibração, bem como através da livre inclusão de variáveis, como já mencionado; g) oferecer livre escolha da desagregação espacial, com o tamanho das células, dimensões e proporções da área da simulação decididos em função das características de cada local, dos objetivos de cada experimento, da disponibilidade e tipo das informações e da capacidade computacional disponível; h) facilitar a espacialização das simulações, implementando o modelo em ambiente de SIG – sistema de informações geográficas e disponibilizando seus recursos para representação, entrada de dados, análises espaciais, visualização e arquivamento; i) dar operacionalidade ao modelo em ambiente computacional convencional, permitindo o uso em computadores simples e com sistemas operacionais comumente utilizados.

2. Cidade, ambiente e crescimento urbano

A tradição do planejamento do espaço da cidade tem sido a de trabalhar com a separação entre a cidade e a natureza, entre o espaço urbanizado e o não urbanizado, pois enquanto que a maioria dos estudos de urbanismo limita-se às áreas construídas, as abordagens do planejamento ambiental têm dificuldade para incluir a realidade e a influência da cidade (Santos, 2004). Embora esforços para compreender a realidade urbana e a ambiental sejam realizados, poucos resultados são alcançados com relação a suas interinfluências; de mesmo modo, métodos de descrição e avaliação de impacto sobre o ambiente e modelos para abordar crescimento urbano têm sido desenvolvidos,

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

mas ambos são ainda primitivos na sua habilidade em representar mudanças e dinâmicas urbanas e naturais (Baylei, 1997).

Alberti (1999) oferece uma visão inovadora para abordar a cidade, a partir de conceitos gerais de sistemas, de ecologia e de urbanismo, representando uma alternativa à tradicional abordagem da cidade como ecossistema, iniciada por Odum e com diversos seguidores (Odum, 1963; Boyden et al, 1981; Douglas, 1983), a qual apontou a cidade como um ecossistema heterotrófico, dependente de grandes ingressos de matéria e energia, com enorme capacidade de realizar e emissões e de produzir resíduos, exclusivamente. As novas abordagens partem da complexidade entre as interações urbano-ecológicas, reconhecendo diversos subsistemas interligados e complexos em si próprios, reconhecendo o desenvolvimento urbano como determinante estrutural, afetando de modo decisivo os sistemas naturais.

2.1. Crescimento urbano e modelagem

Esforços importantes têm sido empreendidos para melhorar a compreensão sobre os mecanismos de produção e de reprodução da cidade, como é o caso das idéias vinculadas ao desenvolvimento desigual (como enunciado por Harvey, 1975 e 1989), à auto-organização (como os trabalhos desenvolvidos por Holland, 1998 e por Portugali, 1997 e 2000) e aos estudos sobre sistemas complexos (Allen, 1997; O'Sullivan, 2001b). Na mesma direção, estudos de morfologia urbana têm representado satisfatoriamente a cidade pelo espaço construído, através de métodos de diferenciação capazes de descrever e de medir o desempenho de um determinado estado da cidade num determinado tempo, considerando as formas construídas e suas conexões através dos espaços abertos ou públicos (Teklemberg, Timmermans e Borges, 1997). Nessa direção, a estrutura urbana pode ser representada por diferentes graus de centralidade, cujos valores estão correlacionados com vários indicadores de atividade do sistema urbano, como presença de pedestres, fluxo de veículos, concentração de atividades comerciais e dotação de infra-estrutura, podendo ser tomada como um indicador de qualificação locacional (Krafta, 1999).

Conforme a concepção de Krafta (1994), centralidade é uma medida da diferenciação espacial gerada por tensões entre unidades de forma construída alocadas em parcelas espaciais discretas e conectadas pelo tecido urbano. Central em relação a um par qualquer será a parcela que se situar no seu caminho mínimo e central em relação ao sistema espacial será a parcela que mais vezes participar dos caminhos mínimos de todos os pares desse sistema. Deste modo, o espaço urbano pode ser representado e diferenciado de maneira sintética e operacional, através das formas construídas, de suas conectividades e da medida de centralidade. Essa acepção pode ser alargada com a consideração de células como geradoras de tensões, as quais estão conectadas mediante um *grid* contínuo, possibilitando extrair a medida de centralidade de um território que inclui a cidade e a paisagem, rumando para a integração entre os sistemas urbano e natural.

A medida de centralidade pode ainda ser tomada como um indicador de desequilíbrio do sistema espacial, ou seja, um indicador de sua dinâmica. A distribuição de centralidade urbana constitui uma topografia em que os picos assinalam localizações de convergência de interesse, movimento e valor urbano, e os vales identificam regiões de baixo valor, interesse e atratividade. Essa topografia denota diferentes graus de agenciamento social do espaço e identifica justamente

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

nos vales as oportunidades de desenvolvimento de áreas urbanas ainda pouco agenciadas e portanto disponíveis. Dessa forma, a distribuição de centralidade configura uma paisagem de oportunidades de produção de renda imobiliária num cenário em que a produção do espaço é tomada como atividade econômica. Como sugere Harvey (1985), vantagens locacionais poderiam ser consideradas como inovações tecnológicas, transformando-se em possibilidade de lucro excedente; deste modo, os produtores urbanos procedem de modo semelhante aos demais produtores no mercado capitalista, buscando permanentemente inovações tecnológicas, dentre as quais estão as inovações ou invenções de localização. Como essas descobertas locacionais são prontamente seguidas pelos demais competidores, o processo torna-se iterativo, permanente e complexo, pois as vantagens iniciais tendem a mudar com a dinâmica urbana. Sendo assim, maiores potenciais de mudança se concentram onde houver maior diferença entre valores de centralidade entre um lugar e seu entorno, juntando vantagens de localização com menor custo do solo, de modo a reproduzir a referida invenção de localização e a conseqüente maximização de renda.

Estudos de ecologia de paisagem vêm absorvendo conceitos de acessibilidade e desenvolvendo modelos derivados das experiências com o espaço urbano, aplicando técnicas de resistência mínima acumulada (como está em Yu, 1996), utilizando operações semelhantes às usadas em modelos dedicados ao espaço urbanizado, o que pode ser resumido como resistência espacial. Em caminho semelhante estão trabalhos dedicados a avaliar paisagens para a conservação ambiental, indicando um gradiente de valor ecológico e de impacto de atividades para diferentes usos do solo (Spellerberg, 1994:213-216). Noutras palavras, o espaço que intermedeia tensões de crescimento urbano exerce papel de restritor ou facilitador, participando ativamente do sistema.

Modelagem urbana tem sido usada satisfatoriamente para representar a cidade de modo simplificado (Martin, March e Echenique, 1972), 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, como é o caso dos modelos de representação de sistemas ecológicos dinâmicos, como os propostos por Parton (1996) e por Waddell e Alberti (1998), dos modelos de conversão de território não urbanizado em urbanizado, como os propostos por Clarke, Hoppen e Gaydos (1997) e por Xie e Sun (2000) e dos modelos de alteração no uso do solo, como os propostos por Arai e Akiyama (2004) e por Liu e Andersson (2004).

Conceitos e técnicas de AC estendido às demandas da cidade e às intenções dos pesquisadores urbanos (Torrens e O'Sullivan, 2001) têm oferecido um ambiente com chances para operacionalizar essa convergência entre a possibilidade de modelar o ambiente urbanizado e o não urbanizado por diferenciação morfológica e por resistências espaciais, incluindo também 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 SIG, pela crescente disponibilidade de imagens de satélite e pela popularização de conhecimentos em geocomputação (Ehlen, Caldwell e Harding, 2002). Sendo assim, AC como os pretendidos aqui poderiam ser chamados de CS (*cell-space*, como está em Batty, Couclelis e Eichen, 1997) ou simplesmente de modelos celulares.

Modelos com técnicas de grafos e AC integrados têm conseguido superar a tradicional deficiência desses modelos de trabalharem em múltiplas escalas, quando usados separadamente

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

(O'Sullivan, 2001a). Enquanto grafos permitem apreensões da estrutura geral (ou na escala global) de um sistema, AC têm origem nas relações de vizinhança (ou na escala local), podendo implicar na emergência de padrões globais. O artifício de integração permite utilizar medidas de centralidade e potencial no ambiente celular, bem como dar operacionalidade às resistências naturais e antrópicas à urbanização, engendrando um modelo híbrido de produção espacial.

Em resumo, é possível então representar a cidade como um campo de oportunidades de obtenção de renda, mediadas pelo espaço, o qual é composto integradamente por atributos urbanos, naturais e institucionais, que funcionam como atração ou como resistências para o crescimento urbano. A configuração espacial e a distribuição desses atributos geram tensões que diferenciam o espaço qualitativa e quantitativamente – através da medida de centralidade (construída com o apoio de técnicas de grafos), vindo a provocar crescimento em lugares com maior potencial de desenvolvimento (determinado com a ajuda de técnicas de AC). Crescimentos acima de determinados limiares são considerados problemas ambientais, gerados e superados no mesmo processo de produção do espaço urbano. Iterações desse processo oferecem um comportamento dinâmico ao sistema, posto que a realização dos potenciais implica em novos valores de centralidade e assim sucessivamente.

2.2. Utilizando integradamente grafos, AC e geotecnologias

Segundo Sánchez (1998), a teoria de grafos provém da topologia, a qual se dedica a estudar relações entre pontos, linhas e superfícies, a partir de suas conexões. Um grafo pode ser considerado como um conjunto finito de elementos ou vértices, conectados por arestas ou arcos. Diversas medidas podem ser tomadas de um grafo (como conectividade, acessibilidade, sinuosidade ou centralidade), tendo-se tornado importante recurso para o estudo de redes, tanto antrópicas como naturais (ibidem). A possibilidade de representar a sociedade e o ambiente natural através de redes tem sido continuada, desde os trabalhos Euler, no Século XIX (Bogomolny, 2002) até os pioneiros enfoques para a estrutura social de Freeman (1979), depois Freeman, Borgatti e White (1991); Alexander sobre padrões espaciais e ordem (1964, 1988 e 1998), depois Capra e seus conceitos sobre os sistemas vivos (1986 e 2002). Propriedades dos grafos têm sido utilizadas para auxiliar na resolução de problemas urbanos com representação possível através de redes, como é o caso da montagem de árvores de caminhos mínimos (*minimal spaning tree* ou busca de caminhos, como está em Mariani, 2001), que são freqüentes em estudos de sintaxe espacial e de morfologia urbana (Hillier, 1998).

Como está em Torrens (2000a), o uso de AC está ligado ao desenvolvimento da computação, da inteligência e da vida artificiais, o que vem sendo divisado desde os primeiros trabalhos de John von Neumann (precursor da computação e da teoria de jogos) e Stanislaw Ulmam (um dos primeiros desenvolvedores das técnicas de Monte Carlo), na década de 1940, até os mais recentes argumentos de Stephen Wolfram (reconhecido teórico contemporâneo em computação, matemáticas e AC, como está em Greco, 2002). Antes disso, na década de 30, Alan Turing já pensava na "Máquina Universal de Turing", como mais tarde ficou conhecida; por ser um autômato hipotético, isso impulsionou o pensamento da década de 40, dando origem à criação dos computadores, que seguiram os mesmos princípios lógicos e conceituais. A idéia era de criar um "computador universal", que nunca precisaria ser reconstruído, só reprogramado; uma tarefa

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

imaginada para essa máquina seria "duplicar a si mesmo" ou replicar-se, (Maddox, 1983), o que interessa tanto ao domínio dos fenômenos ambientais quanto ao dos sociais e espaciais (Axelrod, 1997). As chamadas "Máquinas de Turing" indicariam um rol de regras para os AC, aplicáveis mediante ciclos determinados no tempo, em cujos intervalos (ou estados) e processos (ou dinâmicas) o mundo poderia ser examinado.

As possibilidades de espacialização e de representação de processos dinâmicos com AC têm sido usadas como auxiliares na resolução de inúmeros problemas ambientais e urbanos, como é o caso do crescimento espacial (Ward, Murray e Phinn, 2000). AC apresentam vantagens para sua utilização em simulações urbanas, especialmente quando comparados com modelos tradicionais (Batty e Xie, 1994), apresentando possibilidades de integrar requisitos de eficiência com equidade, de incorporar espacialidade absoluta (ou Cartesiana) e relativa (ou Leibnitziana), de promover abordagens descentralizadas, de permitir integração com SIG, de integrar forma e função, de trabalhar com atenção ao detalhe, de ser simples, de permitir o ingresso de outras teorias, de permitir adequada visualização e de, principalmente, representar processos dinâmicos (Torrens, 2000a:33-41).

Os SIG se destacam no campo técnico e operacional, facilitando a aquisição, o tratamento, as análises e o arquivamento das informações espaciais; operações de elevada complexidade são realizadas rotineiramente por *softwares* de SIG, compatibilizando informações e agilizando as análises espaciais. Atualmente podem ser diferenciados os SIG em SIGsys e SIGsci (SIG *systems* e SIG *science*, respectivamente), sendo os primeiros mais dedicados às rotinas técnicas e os segundos às demandas da investigação científica, em muito coincidindo com a idéia de geocomputação (Longley, Goodchild, Maguire e Rhind, 2001).

Geocomputação tem sido referida como o uso de diferentes tipos de dados espaciais e como o desenvolvimento de ferramentas geoespaciais, de modo a potencializar a solução de diversos tipos de problemas, assumindo efetiva importância para a investigação científica (Ehlen, Caldwell e Harding, 2002). Essas ferramentas enriquecem as abordagens espaciais com recursos de inteligência artificial, permitem a inclusão de teorias e a verificação de hipóteses, com intenso uso de recursos computacionais (ibidem).

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, destacadamente com AC, apresentando modelos dinâmicos e multiescalares, particularmente dedicados à ecologia, economia e ciências sociais (Benenson e Torrens, 2004). Trabalhos dedicados a capturar e interpretar a estrutura espacial através de modelos baseados em objetos oferecem crescentes possibilidades de compreender o mundo real através de simulações e do uso de inteligência artificial; nesse caminho, geosimulação pode ser compreendida como um emergente campo de modelagem dedicada a responder a demandas da investigação voltada para as ciências ligadas ao espaço, fundada na teoria de sistemas complexos, nas possibilidades de SIGsci e nos recursos de programação orientada a objetos (ibidem).

A figura 1, ao final, mostra em esquema a integração de grafos e AC num hipotético ambiente de SIG, mostrando células e pontos superpostos, depois pontos conectados por linhas, depois células, pontos e linhas superpostos.

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

3. Modelando crescimento urbano

O modelo proposto assume como base espacial um ambiente com células quadradas de qualquer tamanho, resolvida como um *grid* bidimensional de um SIG, com características operacionais de um AC, o que pode ser conseguido sobre fotos de aerofogrametria, imagens de satélite, cartas geográficas escaneadas ou mapas vetoriais. Como o tamanho das células implica no tamanho final do sistema e na visibilidade das informações, as células podem ser maiores ou menores por três motivos principais: a) pela capacidade de processamento computacional, pois os esforços aumentam exponencialmente em função do número de células do sistema, particularmente em decorrência dos procedimentos vinculados a grafos (Diestel, 2000); b) pela desagregação espacial necessária para modelar adequadamente cada caso, pois determinados fenômenos podem ser observáveis numa escala e não ser noutra (Enquist e Earsom, 1996; Rietkerk et al., 2002); c) pela disponibilidade de informações, cujo padrão de detalhamento e acuidade precisa manter correspondência com o tamanho das células. Como regra geral pode ser indicado utilizar o maior número possível de células (ou células com o menor tamanho possível), o que deve ser ajustado ao equipamento, ao tempo disponível para processamento e aos resultados esperados, bem como deve ser considerado que tamanhos diferentes de células podem ser derivados por pós-processamento.

Trabalhos de modelagem com AC, pela natureza discreta e finita de sistemas celulares necessitam ser delimitados física ou espacialmente, restando claro qual o tamanho do *grid* e das células que representam o sistema, o que é feito de modo exato e incontestável (Wolfran, 1985, 1994, 2002; Batty, Xie e Sun, 1999). Todavia, esses limites não são iguais ao de um sistema baseado nos chamamos AC puros, que operam como se as bordas estivessem conectadas, simulando um *grid* contínuo; no caso da cidade, concebendo um *grid* retangular representado em UTM – projeções transversas de Mercator, as células da aresta da esquerda não se conectam diretamente com as da aresta da direita, nem as de baixo com as de cima; sendo assim, os limites das áreas que integram as simulações se constituem em limites precisos dos sistemas.

Como vem sendo exposto, as células são as entidades espaciais fundamentais da modelagem com AC, podendo neste trabalho representar dois tipos básicos de espaços: a) o ambiente não urbanizado, dado pelo território natural, pelo ocupado pelas atividades rurais e pelo fracamente modificado pela urbanização; b) o ambiente urbanizado, representado pelas funções típicas da cidade. Esses tipos de espaços são determinados pelo estado de uma célula num tempo específico, podendo ser chamados de dimensões fenotípicas, sendo que os atributos que codificam as características de cada célula podem, por seu turno, ser chamados de dimensões genotípicas (Steadman, 1983; Hillier e Hanson, 1984); sendo assim, uma combinação de determinados atributos (ou um genótipo) implica numa determinada apresentação espacial (ou fenótipo), o que permite admitir que espaços urbanos contenham atributos não urbanos e vice-versa.

As variáveis utilizadas nas simulações são de dois tipos principais: a) de espaço; b) de atributo. As variáveis de espaço podem mudar em tamanho, quantidade e localização, sendo materializadas pelas células que compõem o *grid*, que constituem a base espacial da simulação. As variáveis de atributo podem ser do tipo natural, urbano ou institucional, do seguinte modo: b.1) 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, por exemplo; b.2) as de tipo urbano representam a cidade e seus espaços adaptados, como é o caso das

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

funções habitacionais, comerciais e industriais, dos equipamentos urbanos e do sistema viário, por exemplo; b.3) as de tipo institucional representam as práticas e instrumentos utilizados nas políticas de uso e ocupação do solo e no processo de planejamento, como é o caso dos índices urbanos, do regime de usos e do zoneamento, por exemplo.

O modelo assume os atributos como de dois tipos fundamentais: a) carregamentos; b) resistências. Os carregamentos são os responsáveis pela geração de tensões que promovem diferenciação espacial (através da medida de centralidade) e posterior crescimento urbano (pela medida de potencial). Os atributos que se caracterizam 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. Nesse processo de atração e resistência, tensões de crescimento são abstrações que representam esforços ou investimentos em modificação do território, aumentando o grau de urbanização; essas tensões podem estar associadas a fluxos de energia, de veículos, de pessoas ou de informações, representando mecanismos semelhantes aos utilizados em modelos de interação espacial e de acessibilidade (Torrens e Alberti, 2000; Waddell et al., 2001; Weber, 2003).

3.1. Descrição ambiental

O ambiente é descrito no modelo pelos seus atributos, que podem ser de tipo natural, urbano ou institucional, os quais se vinculam a cada célula sem restrição de tipo ou quantidade, com a possibilidade de apresentar duas características iniciais: a) oferecer atração à urbanização, possuindo assim a capacidade de gerar tensões espaciais, pelo que são denominados de carregamentos; b) oferecer oposição à urbanização, pelo que são chamados de resistências. Os atributos são complementarmente especificados mediante dois efeitos no crescimento urbano: c) possibilidade de serem removidos pelo processo de urbanização; d) capacidade de impedirem o crescimento urbano. Essas características e efeitos implicam em seis tipos finais de atributos:

1) atributos capazes de gerar tensões de crescimento e de permitir que as células mudem com o tempo, podendo tanto gerar desenvolvimento urbano como problemas ambientais; são chamados de carregamentos-instáveis; 2) atributos capazes de gerar tensões de crescimento e de mudarem com o tempo, porém sem poder ser removidos pelo processo de urbanização; são chamados de carregamentos-estáveis; 3) atributos capazes de gerar tensões de crescimento e de impedir a mudança de estado das células; são chamados de carregamentos-*freezing*; 4) atributos que oferecem alguma resistência à urbanização, porém sem impedi-la; uma vez modificados ou superados pela urbanização, são removidos do sistema; são chamados de resistências-instáveis; 5) atributos que oferecem resistência à urbanização sem impedi-la, porém não são removidos do sistema, exigindo esforços permanentes para sua superação, reeditados a cada transformação; são chamados de resistências-estáveis; 6) atributos que oferecem resistência suficiente para impedir a transformação das células pela urbanização, não dispondo de capacidade de gerar tensões espaciais; são chamados de resistências-*freezing*; a figura 2, ao final, mostra as possibilidades anteriores, em esquema.

No caso dos atributos naturais, são possíveis ponderações considerando: a) a relação do atributo com padrões de segurança em áreas de conservação, onde núcleos, corredores, e passagens

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

podem ser considerados (Yu, 1996); b) valores de transformidade associada, onde se beneficia o tema da energia (Ortega, 2001); c) adequabilidade geral para urbanização, onde podem ser mediados interesses de mudança e conservação (Spellerberg, 1994); d) escassez ou raridade na paisagem, como é freqüente em projetos de conservação ambiental (Santos, 2004). A implementação desses valores relativos permite diferentes graus de reconhecimento e valoração de unidades ambientais, cuja eficácia conservacionista e demais efeitos sobre o sistema urbano podem ser experimentados e testados.

No caso dos atributos urbanos, os pesos podem considerar: a) fatores funcionais, sendo que usos comerciais, industriais, institucionais e habitacionais têm atratividade decrescente, de um modo geral (Rigotti, 1955; Prins, 1984); b) hierarquias viárias, considerando que vias principais, secundárias e locais normalmente têm atratividade decrescente (Vasconcelos, 2000); c) expectativas de geração de externalidades positivas ou negativas, as quais aumentam ou diminuem a atratividade, respectivamente (Stover, 1994).

Fatores institucionais podem intervir no processo de crescimento urbano de modo independente dos fatores naturais e urbanos (Sampford, 2002), sendo particularmente importantes em simulações que pretendem testar os efeitos de planos urbanos e políticas em cenários de futuro (Chin, 2002). Os fatores institucionais operam do mesmo modo que os atributos urbanos e naturais enunciados anteriormente, diferenciando-se pelas suas origem e especificações, pois podem partir de políticas ou projetos institucionais, bem como podem representar circunstâncias sob as quais o operador do modelo tem interesse de realizar simulações; as especificações podem representar políticas fiscais e extra-fiscais, regimes urbanos, planos e programas em geral, podendo também replicar atributos naturais ou urbanos.

Os atributos podem ter qualquer valor positivo, recebendo na célula um valor absoluto (a intensidade com que ocorre) e no sistema um valor relativo (peso do atributo). Computando separadamente todos os seus atributos naturais, urbanos e institucionais, cada célula assume um valor quantitativo, operação que implica numa transcrição dos atributos em linguagem verbal para linguagem matemática, aumentando o nível de abstração da descrição da realidade. Dos valores parciais referidos como carregamentos ou como resistências derivam-se outros, chamados de carregamentos natural, urbano ou institucional, ou então de resistências natural, urbana ou institucional, que são normalizados de zero a 1,00 e elevados a um coeficiente exponencial, que pode maximizar ou minimizar o resultado.

3.2. Implementação dos modelos de centralidade e potencial – processamento

Uma vez conhecidos os atributos naturais, urbanos e institucionais iniciais, assumidas suas intensidades, seus pesos e os valores para os coeficientes de valorização, realiza-se uma etapa de processamento preliminar, encarregada de agregar os valores dos carregamentos e das resistências naturais, urbanas e institucionais. A partir desses valores e das demais condições do modelo são calculadas as tensões espaciais, a centralidade celular, o potencial de crescimento celular e o crescimento celular propriamente dito, como está nos subtítulos a seguir.

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

3.2.1. Tensões espaciais

É assumido então que entre cada par de células que possui algum carregamento desenvolve-se uma tensão, como nos modelos de Centralidade e Desempenho (Krafta, 1994; Polidori, Krafta e Granero, 2001); a tensão é calculada através do produto do carregamento total de cada célula pelo carregamento total de cada uma das outras que lhe são alcançáveis, de modo semelhante ao que ocorre em modelos de interação espacial (Wilson, 1985; Torrens, 2000a), porém sem limitações referentes a origem e destino. O enunciado matemático para o cálculo da tensão gerada por um par de células está na equação 1, a seguir.

Equação 1: tensão entre as células i e j

$$\mathbf{T_{ij} = (LoadE_i + LoadU_i + LoadI_i) \,.\, (LoadE_j + LoadU_j + LoadI_i)}$$

onde se lê:
a tensão entre as células i e j é igual ao produto da soma dos carregamentos natural, urbano e institucional da célula i pela soma dos carregamentos natural, urbano e institucional da célula j
sendo:
T_{ij} = tensão entre as células i e j, $LoadE_i$ = carregamento natural da célula i, $LoadU_i$ = carregamento urbano da célula i, $LoadI_i$ = carregamento institucional da célula i, $LoadE_j$ = carregamento natural da célula j, $LoadU_j$ = carregamento urbano da célula j, $LoadI_j$ = carregamento institucional da célula j.

Tensões podem ser geradas incluindo todas as células com todas as outras (que têm atributos naturais, urbanos ou institucionais que gerem tensões) ou mediante raios (que podem ser topológicos ou geométricos), limitando fisicamente as tensões a serem geradas. O resultado é um produto a ser distribuído para as células do sistema, por três modos: a) para aquelas células que estão no caminho preferencial entre o par de células que participam da interação; b) para aquelas células que estão na vizinhança de cada célula geradora da interação; c) para células dispersas no sistema, escolhidas por sorteio que considera suas características tipo-morfológicas. Esses modos ou tipos de distribuição são implementados pelo usuário do modelo, em percentagens que variam desde zero até 100% (inexistência ou exclusividade do tipo de distribuição de tensão, respectivamente), podendo ser resumidos nos seguintes: A) distribuição axial; B) distribuição polar e C) distribuição difusa. Como aparece adiante, aos tipos de distribuição de tensões correspondem tipos de crescimento, o que assume particular importância qualitativa nas simulações e no processo de calibração.

3.2.2. Distribuição de tensões axiais, polares e difusas

A distribuição axial é dedicada a capturar as rotas preferenciais de ligação entre as células do sistema, estando associada ao sistema de circulação urbana e sendo dividida em dois subgrupos: A1) referente às células do caminho preferencial propriamente dito; A2) referente às células encontradas na vizinhança do caminho preferencial (ou num *buffer* do caminho preferencial). No caso de A1, a rotina de caminhos preferenciais é resolvida considerando uma heurística de desvios mínimos associada à técnica de *minimal spaning tree*, considerando ainda atritos internos de cada célula. No caso de distribuição tipo A2, trata-se de aproveitar os resultados obtidos para o tipo A1 e

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

de computar um entorno às células escolhidas anteriormente, de modo a representar uma certa área de influência do caminho preferencial.

A distribuição polar evidencia diferenciações espaciais na escala mais local, no entorno imediato do atributo gerador de tensões; pode ser dividida em subgrupos, organizados por áreas de abrangência diferentes, decorrentes das diferentes capacidades de atração concedidas a cada célula, através de seu carregamento.

A distribuição difusa pretende capturar aspectos com maior imprevisibilidade locacional no tecido urbano, porém especificável segundo dois padrões: padrão C1) referente à promoção imobiliária formal; padrão C2) referente aos processos de autopromoção imobiliária e promoção imobiliária informal. O padrão C1 é típico dos espaços produzidos por agentes que reinterpretam as regras de mercado com criatividade (Batty, 1998) e consumidos por classes econômicas superiores e médias-superiores, sendo a probabilidade de ocorrência diretamente proporcional à localização privilegiada e às características da vizinhança (o que eleva o custo do solo); essa probabilidade maior de uma célula ser escolhida aleatoriamente é diretamente proporcional à centralidade celular máxima e à resistência mínima de cada célula, sendo que o fator qualidade de localização tem primazia em relação ao fator preço. O padrão C2 é típico dos espaços produzidos através do mercado informal e utilizados por classes econômicas inferiores e médias-inferiores, incluindo a formação das chamadas periferias urbanas, sendo a probabilidade de ocorrência diretamente proporcional ao baixo custo do solo; essa probabilidade é diretamente proporcional à centralidade celular mínima e à resistência máxima de cada célula, sendo o fator preço prioritário em relação ao fator localização.

3.2.3. Centralidade celular

Uma vez calculadas as tensões, seus resultados parciais são acumulados em cada célula e geram a medida de centralidade celular, ou simplesmente *CentCel*, cuja disponibilidade no banco de dados e visualização em ambiente celular se caracteriza como importante resultado intermediário do modelo. *CentCel* pode ser enunciada matematicamente, como está na equação 2, a seguir.

Equação 2: centralidade celular da célula i na interação I

$$\mathbf{CentCel_{i\,I} = x.A1 + y\ A2 + z.\ B + w.C1 + q.C2}$$

onde se lê:
centralidade celular da célula i na interação I é igual à soma ponderada dos tipos de distribuição de tensões A1, A2, B, C1 e C2
sendo:
$CentCel_{Ii}$ = centralidade celular da célula i na interação I , A1, A2, B, C1 e C2 = distribuições de tensões tipo axial, axial de *buffer*, polar de *buffer*, difusa de tipo 1 e difusa de tipo 2, respectivamente , x, y, z, w, q = quantidades relativas de distribuições tipo axial, axial de *buffer*, polar de *buffer*, difusa de tipo 1 e difusa de tipo 2, respectivamente

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

3.2.4. Potencial e crescimento celular

Seqüencialmente, é assumida a premissa de que o crescimento urbano se dá prioritariamente em locais com maiores possibilidades de renda, como foi apresentado anteriormente; essa renda máxima é conseguida mediante a melhor localização, pelo menor custo de aquisição, com maior possibilidade de construção; o lugar onde se dá o crescimento urbano, bem como sua intensidade, são então calculados pelo seu potencial de crescimento celular, ou simplesmente *PoteCel*.

O *PoteCel* é a diferença entre a máxima *CentCel* da vizinhança e a *CentCel* de cada célula, o que pode implicar em crescimento interno ou externo às células urbanas preexistentes; sendo assim, apresentam maior potencial as células que apresentarem menor *CentCel* própria, combinada com maior *CentCel* na vizinhança. Deste modo, o cálculo do potencial celular em função de sua relação com a vizinhança (e não com todo o sistema) opera como uma inovação em relação ao modelo original proposto por Krafta (1994), aproximando a operação do funcionamento típico dos modelos baseados em AC; isso equivale a reconhecer: a) que os agentes urbanos envolvidos no processo de produção espacial tomam decisões com conhecimento parcial do sistema, ao invés de instruídos por uma leitura total e completa e/ou então que: b) a busca de locais para novos empreendimentos é influenciada de modo determinante pelo entorno, em cujos limites se realiza a busca por vantagens locacionais.

O *PoteCel* opera no sistema como uma espécie de "esforço de urbanização", podendo representar modificações tanto no espaço já urbanizado como no ainda não urbanizado, bem como incidir no espaço público ou privado, que estão agregados no modelo; ocasiona prioritariamente a diminuição das resistências (primeiro as naturais, depois as institucionais e depois as urbanas) e, uma vez superadas as resistências, causa o aumento do carregamento urbano, não sendo os carregamentos natural e institucional alterados pelo *PoteCel*; o resultado dessa operação implica no crescimento celular, ou simplesmente *GrowthCel*, gerando novos resultados a cada tempo (t), (t+1), (t+2), até (t+n). *PoteCel* e *GrowthCel* podem então ser enunciados matematicamente, como está na equação 3 e seguintes.

A equação de *GrowthCel* varia de acordo com o genótipo de cada célula, havendo cinco possibilidades, aplicadas seqüencialmente, na ordem mostrada pelas equações 4 a 8, adiante. No caso de *GrowthCel* resultar em valor negativo, esse resultado é convertido em *PoteCel* positivo e aplicado na seqüência das equações de crescimento; para o caso da superação de limiares, como aparece na equação 8, *GrowthCel* negativo é desprezado.

Equação 3: potencial de crescimento da célula i

$$\mathbf{PoteCel}_{i} = [(\mathbf{CentCel}_{\mathbf{Max\ \Delta buffer\ i}}) - (\mathbf{CentCel}_{i})]^{\lambda}$$

onde se lê:
potencial de crescimento celular da célula i é igual à centralidade celular máxima do *buffer* da célula i menos a centralidade celular da célula i, elevado ao coeficiente λ (lambda)
sendo:

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

$PoteCel_i$ = potencial de crescimento celular da célula i , $CentCel_{Max\ \Delta buffer\ i}$ = centralidade celular máxima do *buffer* da célula i , $CentCel_i$ = centralidade celular da célula i , λ (lambda) = coeficiente de descompressão de PoteCel

Equação 4: crescimento celular da célula i quando ResistE ≠ zero
$GrowthCel_i = ResistE_i - PoteCel_i$

Equação 5: crescimento celular da célula i quando ResistI ≠ zero
$GrowthCel_i = ResistI_i - PoteCel_i$

Equação 6: crescimento celular da célula i quando ResistU ≠ zero
$GrowthCel_i = ResistU_i - PoteCel_i$

Equação 7: crescimento celular da célula i quando ResistE + ResistI + ResistU = zero
$GrowthCel_i = LoadU_i + PoteCel_i$

Equação 8: crescimento celular da célula i quando LoadU > Limiar
$GrowthCel_i = LoadU_i - PoteCel_i$

onde se lê, na equação 4: crescimento celular da célula i é igual à resistência celular natural da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i
onde se lê, na equação 5: crescimento celular da célula i é igual à resistência celular institucional da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i
onde se lê, na equação 6: crescimento celular da célula i é igual à resistência urbana da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i
onde se lê, na equação 7: crescimento celular da célula i é igual ao carregamento urbano da célula i mais o potencial de crescimento celular da célula i
onde se lê, na equação 8: crescimento celular da célula i é igual ao carregamento urbano da célula i menos o potencial de crescimento celular da célula i
sendo:
$GrowthCel_i$ = crescimento celular da célula i
$ResistE_i$ = resistência natural da célula i
$ResistU_i$ = resistência urbana da célula i
$LoadU_i$ = carregamento urbano da célula i
$PoteCel_i$ = potencial de crescimento celular da célula i

3.2.5. Distribuição de tensões e diferentes tipos de crescimento urbano

Como foi enunciado anteriormente, diferentes tipos de distribuição de tensões geram diferentes tipos de crescimento urbano, os quais podem ser do tipo axial, axial de *buffer*, polar, difuso de tipo C1 e de tipo C2; a proposta do modelo é de trabalhar com composições desses tipos, de modo a especular sobre tecidos urbanos possíveis e a permitir a aproximação de casos reais, quando esse for o objetivo da simulação. Para demonstrar os efeitos desses diferentes tipos de distribuições de tensões, está realizado um experimento que utiliza com exclusividade cada um dos

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

cinco tipos, partindo de uma origem com carregamentos mínimos, representados por dois pontos de mesmo valor e de um *grid* com resistências aleatórias, de 26 por 36, com 936 células, como está mostrado na figura 3, onde constam 7 estados de 72 iterações.

3.2.6. Validação do modelo

A validação do modelo de crescimento pode ser alcançada por procedimentos diferentes, conforme os objetivos dos experimentos: a) quando os objetivos são de especulação teórica ou exploração em casos imaginários; b) quando os objetivos são de representar um determinado crescimento urbano real. No primeiro caso, quando o experimento pretende dar suporte a especulações teóricas, a validação é conseguida heuristicamente, experimentando e acumulando resultados, de modo a observar as reações do modelo, compará-las entre si e com alguma dimensão da realidade que está embutida no experimento. No segundo caso, quando o 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 implementado mediante a eleição de estados passados da área de estudo, em pelo menos dois tempos pregressos, usando como *input* os dados do tempo t e comparando os *outputs* com os dados do tempo t + n; obtendo sucesso na calibração, isto é, conseguindo uma aproximação suficiente entre simulação e realidade, estará alcançada a validação do modelo.

A calibração envolve dois procedimentos fundamentais: a) regulagem do tipo de crescimento, que é determinado pela percentagem de distribuição de tensões, a qual é considerada uma variação qualitativa; b) regulagem da intensidade de crescimento, a qual opera como uma variação quantitativa. Os demais parâmetros são deixados em suas posições padrão, de modo a neutralizar suas influências e a permitir a detecção do efeito daqueles que estão sendo modificados. O primeiro nível de aproximação de resultados entre simulação e realidade é visual, quando são eliminadas regulagens discrepantes e é estabelecido um conjunto de possibilidades de regulagens próximas do desejado; a partir daí um segundo nível de aproximação é implementado, utilizando cinco indicadores: a) indicador de quantidade de células de mesmo fenótipo; b) indicador de quantidade células de borda com mesmo fenótipo; c) indicador de localização de células com mesmo fenótipo; d) indicador de semelhança entre os carregamentos urbanos associados a cada célula; e) indicador de semelhança entre as centralidades associadas a cada célula. Os dois primeiros são indicadores de quantidade, o terceiro de quantidade e localização, sendo o quarto e o quinto de quantidade, localização e organização interna, assumido deste modo complexidade crescente. Para os indicadores de quantidade de células total e de borda são utilizadas relações entre número de células que ocorre na situação simulada com o que ocorre na situação real; para os indicadores que consideram localização é utilizada correlação espacial.

4. Considerações finais

O modelo de crescimento está denominado SACI – Simulador do Ambiente da Cidade® e está implementado como um *software* escrito em C++, funcionando integrado ao ArcView, com a extensão Spatial Analyst (marcas registradas da ESRI), conforme esquema, fluxograma, algoritmo e interface principal do *software*, nas figura 4, figura 5 e figura 6, adiante.

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

Experimentos com simulações de crescimento nas área urbanas das cidades de Barra do Ribeiro e Pelotas, no Brasil, que aparecem resumidamente nas figura 7 e figura 8, ao final, têm permitido observar padrões referidos ao crescimento urbano externo e interno à cidade preexistente, à formação de centralidades e potenciais, à questão dos limites de crescimento e à influência dos fatores naturais, os quais podem ser resumidos nos seguintes:

a) falhas espaciais e vazios urbanos: o crescimento urbano através da conversão de solo não urbanizado em urbanizado demonstra que a cidade cresce através de forças centrífugas, porém experimenta falhas na conversão de território, o que ocasiona o aparecimento de vazios urbanos; esse resultado sugere reconhecer os vazios urbanos como componentes estruturais da cidade, ao invés de simplesmente distúrbios ou mal-formações;

b) instabilidades espaciais e velocidade de crescimento: no processo de crescimento urbano, os estoques construídos se distribuem mediante a combinação de forças centrípetas e centrífugas, com instabilidades permanentes, o que é típico dos sistemas fora do equilíbrio, como podem ser consideradas as cidades; enquanto que as forças centrípetas são reinantes quando o crescimento é lento, as centrífugas são quando o crescimento é rápido, particularmente na borda em expansão; esse comportamento indica manejar com os estoques construídos através de instrumentos não prescritivos, mais adequados para sua difícil predição;

c) centralidades flutuantes e auto-organizadas: a distribuição de centralidades, que está associada de modo diretamente proporcional ao valor do solo, alocação de infra-estrutura, dotação de equipamentos urbanos e disponibilidade de facilidades urbanas, mantém um comportamento flutuante em curto prazo, porém tende a diferenciar centros majoritários com o avançar da dinâmica urbana; esse modo de distribuição das centralidades permite seu entendimento como fruto de um processo de auto-organização, particularmente evidente no longo prazo;

d) potencial de crescimento e efeito de borda: o potencial de crescimento se concentra nas interfaces do urbano com o não-urbano e do mais urbanizado com o menos urbanizado; essa concentração tende a demarcar frentes de expansão em forma de linha, determinando uma borda com comportamento diferenciado do resto do sistema; o aparecimento desse efeito de borda no tecido urbano implica em acirramento do processo de crescimento, que pode ser assumido como uma semelhança morfológica ao que ocorre em alguns sistemas naturais dinâmicos;

e) *feedback* composto e limites de crescimento: os experimentos demonstram que ocorre no crescimento urbano um mecanismo de *feedback* positivo, através do qual se diferenciam crescentemente os espaços; todavia, encontrado um limiar urbano, natural ou institucional, entra em ação um mecanismo de *feedback* negativo, num ciclo de crescimento, aparecimento de problemas ambientais intra-urbanos e superação desses problemas, produzindo assim uma auto-regulação do sistema; sendo deste modo, esse comportamento indica que a dinâmica urbana não é plenamente explicada nem por *feedback* positivo nem negativo isoladamente, mas pela composição entre eles;

f) atributos naturais e campo de irregularidades: a paisagem natural e os seus atributos representam o ambiente antecessor da cidade, funcionando como um campo de irregularidades que influencia o crescimento urbano em curto e longo prazos, em função da intensidade com que resistem à urbanização; enquanto que no curto prazo as baixas resistências naturais atraem o

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

crescimento urbano, esse processo faz aumentar o potencial de crescimento das resistência maiores, aumentando a pressão de urbanização no longo prazo; isso implica em admitir que o crescimento urbano não é mediado somente pelos condicionantes sociais, históricos, econômicos, tecnológicos e culturais, mas também pelos fatores naturais e suas transformações ao longo do tempo.

Referencias bibliográficas

Alberti, M. (1999): "Modeling the urban ecosystem: a conceptual framework", *Environment and Planning B – Planning and Design*, 26, pp. 605-630.
Alexander, C. (1964): *Notes on the synthesis of form*. Cambridge, Massachusetts: Harvard, University Press.
Alexander, C. (1988): "A city is not a tree", in Thackara, J. (Ed.): *Design after modernism*. London, Thames and Hudson, pp. 67-84
Alexander, C. (1998): *The nature of order*. New York, Oxford University Press.
Allen, P. (1997): *Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity*. Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers.
Arai, T., Akiyama T. (2004): "Empirical analysis for estimating land use transition potential functions—case in the Tokyo metropolitan region", *Computers, Environment and Urban Systems*, 28. pp. 65-84.
Arcebispo, L. (2002): *Simulação de fogo florestal no parque do Rola Moça*. Dissertação em Geografia. Belo Horizonte, UFMG.
Axelrod, R. (1997): *Advancing the art of simulation in the social sciences*. International Conference on Computer Simulation and the Social Sciences. Cortona, Italy.
Batty, M., Xie, Y., Sun, Z. (1999): "Modeling Urban Dynamics Through GIS-Based Cellular Automata", *Computers, Environments, and Urban Systems*, 23. pp. 205-233.
Batty, M., Couclelis, Eichen, M. (1997): "Urban system as cellular automata", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(2), pp. 159-164.
Batty, M., Xie Y. (1994): "From cells to cities", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21, pp. s31-s48.
Batty, M. (1998): "Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata". *Environment and Planning A*, 30. pp. 1943-1967.
Batty, M., Xie, Y., Sun, Z. (1999): *The dynamics of urban sprawl*. London, Casa, UCL
Baylei, Peter D. (1997): "IEA: a new methodology for environmental policy?" *Environmental Impact Assessment Review*, 17, pp. 221-226.
Benenson, I., Torrens, P. (2004): "Geosimulation: object-based modeling of urban phenomena", *Computers, Environment and Urban Systems*, 28, pp. 1-8.
Bogomolny, A. (2002): *Graphs*. [disponível em 12 de janeiro de 2003 em http://www.cut-the-knot.org/do_you_know/graphs.shtml]
Boyden, S. et al. (1981): *The ecology of a city and his people: the case of Hong Kong*. Canberra, Australian National University Press.
Câmara, G. (2001): *Análise espacial de dados geográficos: uma visão introdutória*. São José dos Campos, Inpe.
Capra, F. (1986): *A teia da vida*. São Paulo, Cultrix.
Capra, F. (2002): *As conexões ocultas*. São Paulo, Ed. Pensamento – Cultrix Ltda.

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

Chin, N. (2002): *Unearthing the roots of urban sprawl: a critical analysis of form, function and methodology*. London: Casa, UCL.
Clarke, K. C., Hoppen, S., Gaydos, L. (1997): "A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in San Francisco Bay area", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, pp. 247-262.
Diestel, R. (2000): *Graph Theory*. Eletronic Ediction 2000. New York, Springer-Verlag.
Douglas, I. (1983): *The urban environment*. Baltimore, Edward Arnold.
Ehlen, J., Caldwell, D., Harding, S. (2002): "GeoComputation: what is it?", *Computers, Environment and Urban Systems*, 26, pp. 257-265.
Enquist, B., Earsom, S. (1996): *Scale/scaling in ecology*. Ecological Complexity Seminar: University of New Mexico.
Forman, R., Godrom M. (1986): *Landscape Ecology*. New York, John Wiley & Sons.
Fox, G. (2002): *Overview of Vegetation Dynamics Modeling*. CIRA - Colorado State University [disponível em 7 de setembro de 2004 em http://www.cira.colostate.edu/smoke/smokemodelshome.htm]
Freeman, L. (1979): "Centrality in social networks: conceptual clarification", *Social Networks*, 1, pp. 215–239.
Freeman, L., Borgatti, S. , White, D. (1991): "Centrality in valued graphs: a measure of betweeness based on network flow", *Social Networks*, 13, pp. 141–154.
Harvey, D. (1975): *Social justice and the city*. London, Edward Arnold.
Harvey, D. (1985): *The urbanization of capital*. Oxford, Blackwells.
Harvey, D. (1989): *Condição pós-moderna*. São Paulo, Loyola.
Hill, P., Coquillard, J. (1997): "Discrete event simulation of alga expansion", *Simulation*, 68(5), pp. 269-277.
Hillier, B. (1998): *The commom language of space: a way of looking al the social, economic and environmental functioning of cities on a common basis*. London, UCL/Bartlett School of Graduate Studies.
Hillier, B., Hanson, J. (1984): *The social logic of space*. Cambridge, Cambridge University Press.
Holland, J. (1998): *Emergence: from chaos to order*. Redwood City, California: Addison-Wesley.
Houng, M. (1998): *Naturaleza y ciudad: planificación urbana y procesos ecológicos*. Barcelona, GG.
Kalogirou, S. (2002): "Expert systems and GIS: an application of land suitability evaluation", *Computers, Environment and Urban Systems*, 26. pp. 89-112.
Krafta, R. (1994): "Modelling intraurban configurational development", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21, pp. 67-82.
Krafta, R. (1999): "Spatial self-organization and the production of the city", *Urbana*, 24, pp. 49-62.
Liu, X., Andersson, C. (2004): "Assessing the impact of temporal dynamics on land-use change modeling", *Computers, Environment and Urban Systems*, 28, pp. 107-124.
Longley, P., Goodchild, M. , Maguire, D. , Rhind, D. (2001): *Geographic information systems and science*. Chichester, John Wiley and Sons.
Maddox, J. (1983): "Simulating the replication of life", *Nature*, 305. [disponível em 17 de julho de 2002 www.StephemWolfram.com]
Mariani, A. (2001): *Teoria dos grafos*. UFSC/CTC/INE. [disponível em 15 dezembro de 2002 em www.inf.ufsc.br/ grafos/livro.html]
Maricato, E. (2001): *Brasil, cidades: alternativas para a crise urbana*. Petrópolis, Vozes.

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

Martin, L., March, L., Echenique, M. (1972): *La estructura del espacio urbano*. Barcelona, GG.
O'Sullivan, D. (2000): "Agent based models and individualism: is the world agent based?", *Environment and Planning A*, 32, pp. 1409-1425.
Martin, L., March, L., Echenique, M. (2001a): "Graph-cellular automata: a generalized discrete urban and regional model", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28, pp. 687-705.
Martin, L., March, L., Echenique, M. (2001b): "Complex spatial systems: the modelling foundations of urban and regional analysis", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28, pp. 475-478.
Odum, E. (1963): *Ecology*. New York, Rinehart and Winston.
Ortega, M. (2001): *Curso de H. T. Odum sobre ecossistemas e políticas públicas*. [disponível em 24 de julho de 2001 em http://www.unicamp.br/fea/ortega/homepage.htm]
Palang, H. , Mander, Ü., Naveh, Z. (2000): "Holistic landscape ecology in action", *Landscape and Urban Planning*, 50. pp. 1-6.
Parton, W. (1996): "The Century Model", in *Evaluation of the Soil Organic Matter Models using Existing Long-term Datasets*. Berlin, Springer. pp. 283-296.
Polidori, M., Krafta, R. e Granero, J. (2001): *Software Medidas Urbanas*®. Pelotas, Laboratório de Geoprocessamento da UFPel.
Portugali, J. (1997): "Self-organizing cities", *Futures*, 29, 4/5, pp. 353-380.
Portugali, J. (2000): *Self-organization and the city*. Berlin, Springer.
Prins, D. (1984): *Urbanismo II – Configuração urbana*. Lisboa, Editorial Presença Ltda.
Rapoport, A. (1977): *Aspectos humanos de la forma urbana*. Barcelona: GG.
Rietkerk, M. et al. (2002): "The ecology of scale", *Ecological Modelling*, 149, pp. 1-4.
Rigotti, G. (1955): *Urbanismo: la técnica*. Barcelona, Labor.
Sampford, C. (2002): "Environmental governance for biodiversity", *Environmental Science & Policy*, 5, pp. 79-90
Sánchez, D. (1998): "Teoría de grafos aplicada a redes naturales y antrópicas", in: Matteucci, S., Buzai, G. (Ed.): *Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial*. Buenos Aires, Editoral Universitaria de Buenos Aires, pp. 321-345.
Santos, R. (2004): *Planejamento ambiental: teoria e prática*. São Paulo, Oficina de Textos.
Schuschny, A. (1998): "Estudio del medio ambiente desde las ciencias de la complejidad", in: Matteucci, S., Buzai, G. (Ed.): *Sistemas ambientales complejos: herramientas de análisis espacial*. Buenos Aires, Editoral Universitaria de Buenos Aires, pp. 33-55.
Spellerberg, I. (1994): *Evaluation and assessment for conservation*. New York, Chapman and Hall Inc.
Steadman, J. (1983): *Architectural Morphology*. London, Pion.
Stover, M. et al. (1994): Overcoming *exclusion in rural communities: NIMBY studies case*. Housing Assistance Council [disponível em 18 de novembro de 2004 em http://www.ruralhome.org/pubs/development/nimby/contents.htm]
Teklemburg, J., Timmermans, H., Borges, A. (1997): "Design tools in a integrated CAD-GIS environment: space syntax as an example", in Timmermans, H. (Ed): *Decision support systems in urban planning*. London, E & FN Spon, pp. 261-276.
Torrens, P. (2000a): *How cellular models of urban systems work*. London, Casa, UCL.
Torrens, P. (2000b): *How should we model complex adaptive urban systems?* London: Casa, UCL.
Torrens, P., Alberti, M. (2000): *Measuring sprawl*. London: Casa, UCL.
Torrens, P., O'Sullivan, D. (2001): "Cellular automata and urban simulation: were do we go from here?", *Environment and Planning B: Planning and Design* , 28, pp. 163-168.

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

Van der Gaast, J., Kroes, J. (1999): *A spatial solution to calculate optimum surface water target levels using a water management decision support system*. Geocomputation 99 Conference. [disponível em 07 de setembro de 2004 em http://www.geovista.psu.edu/sites/geocomp99]
Vasconcelos, E. (2000): *Transporte urbano nos países em desenvolvimento*. São Paulo, Annablume.
Waddell, P., Alberti, M. (1998): "Integration of an urban simulation model and an urban ecosystems model", *Proceedings of International Conference on Modeling Geographical and Environmental Systems with GIS*.
Waddell, P. et al. (2001): *Review of the literature and operational models: final report to the puget sound*. Regional Council on Land Use and Travel Demand Forecasting Models. Seattle: Puget Sound Regional Council. [disponível em 12 de maio de 2003 em www.psrc.org/datapubs/pubs/model_review.pdf]
Ward, D., Murray, A., Phinn, S. (2000): "A stochastically constrained cellular model of urban growth", *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, pp. 539-558.
Weber, C. (2003): "Interaction model application for urban planning", *Landscape and Urban Planning*, 63, pp. 49–60.
White, R., Engelen, G, Uljee, I. (1997): "Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modeling", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, pp. 165-174.
Wilson. A. (1985): *Mathematical methods in human geography and planning*. Great Britain, John Wiley & Publishers.
Wolff, W., Fishwick, P. (2003): *Wading bird simulation modeling and integration into ATLSS landscape and fish models*. USGS, Center for Coastal Geology. [disponível em 10 de setembro de 2004 em http://sofia.usgs.gov/projects/atlss/wading_birds/wadingbirdab1.html]
Wolfran, S. (1985): *Two-dimensional cellular automata*. London, Stephem Wolfran Publications.
Wolfran, S. (1994): *Cellular automata and complexity: collected papers*. London, Stephem Wolfran Publications.
Wolfran, S. (2002): *A new kind of science*. London, Stephem Wolfran Publications.
Wu, F. (1996): "A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region", *Computers, Environment and Urban Systems*, 20(6), pp. 367-387.
Wu, F. (1998): "SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrate GIS and CA whit AHP – derived transitions rules", *International Journal of Geographical Information Science*, 12(1), pp. 63-82.
Xie, Y. (1996): "A generalized model for cellular urban dynamics", *Geographical Analysis*, 28, pp. 350-373.
Xie, Y., Sun, Z. (2000): *Dynamic urban evolution model based on cellular automata*. Ypsilanti, Igre. [disponível em 24 de janeiro de 2003 em http://ceita.emich.edu]
Yeh, A., Li, X. (2001): "A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28, pp. 733-753.
Yu, K. (1996): "Security patterns and surface model in landscape ecological planning", *Landscape and Urban Planning*, 36, pp. 1-17.

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

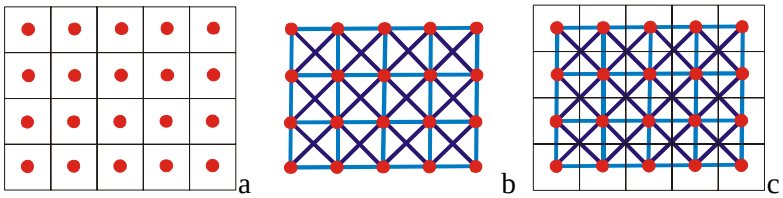


Figura 1. a) células e pontos superpostos espacialmente; b) grafo, representado por pontos e vetores; c) células, pontos e vetores, representando um sistema integrado de grafo com AC.

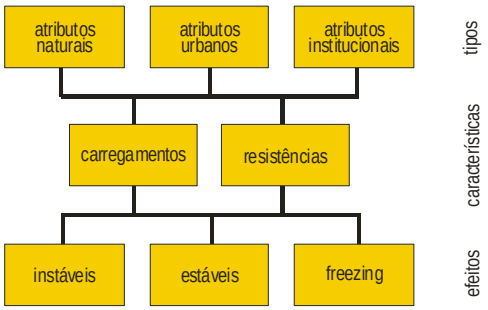


Figura 2. Esquema para a descrição de atributos, com tipos, características e efeitos.

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157



Figura 3. *Outputs* do experimento para demonstrar o efeitos dos diferentes tipos de distribuição de tensões, a partir da interação de um par inicial de células, sobre um *grid* de resistências aleatórias; a) distribuição de tensões exclusivamente axiais; b) distribuição de tensões exclusivamente axiais de *buffer*; c) distribuição de tensões exclusivamente polares; d) distribuição de tensões exclusivamente difusa de tipo C1; e) distribuição de tensões exclusivamente difusa de tipo C2.

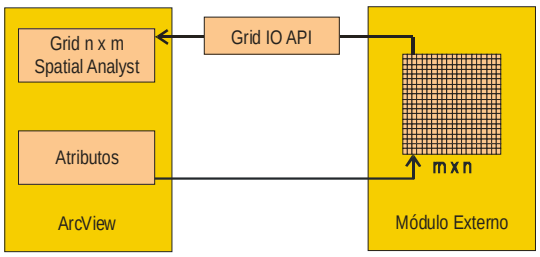
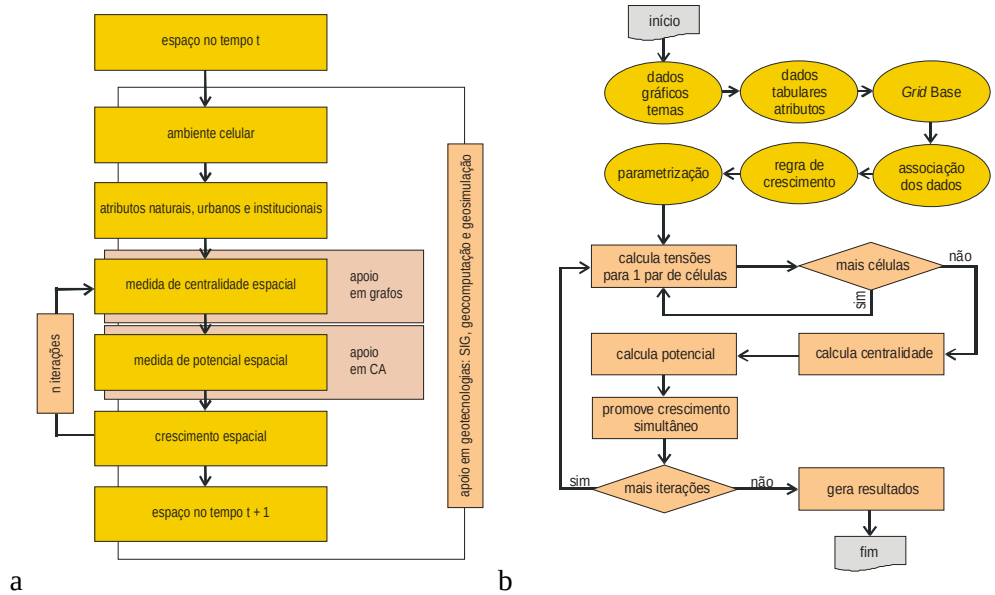


Figura 4. Esquema de integração do ArcView – Spatial Analyst (marcas registradas da ESRI) com o módulo externo em linguagem C++.

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157



a b

Figura 5. a) Fluxograma geral do modelo de crescimento urbano; b) algoritmo geral do SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®.

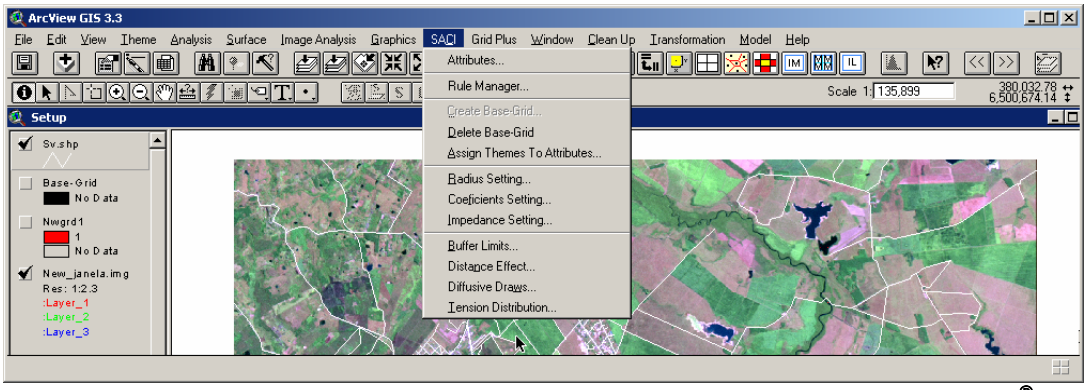


Figura 6. Interface principal do *software* SACI – Simulador do Ambiente da Cidade®, como um aplicativo integrado ao ArcView (marca registrada da ESRI).

© Los autores
www.geo-focus.org

Polidori, M. C. e Krafta, R. (2005): "Simulando crescimento urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais", GeoFocus (Artículos), nº 5 , p. 156-179. ISSN: 1578-5157

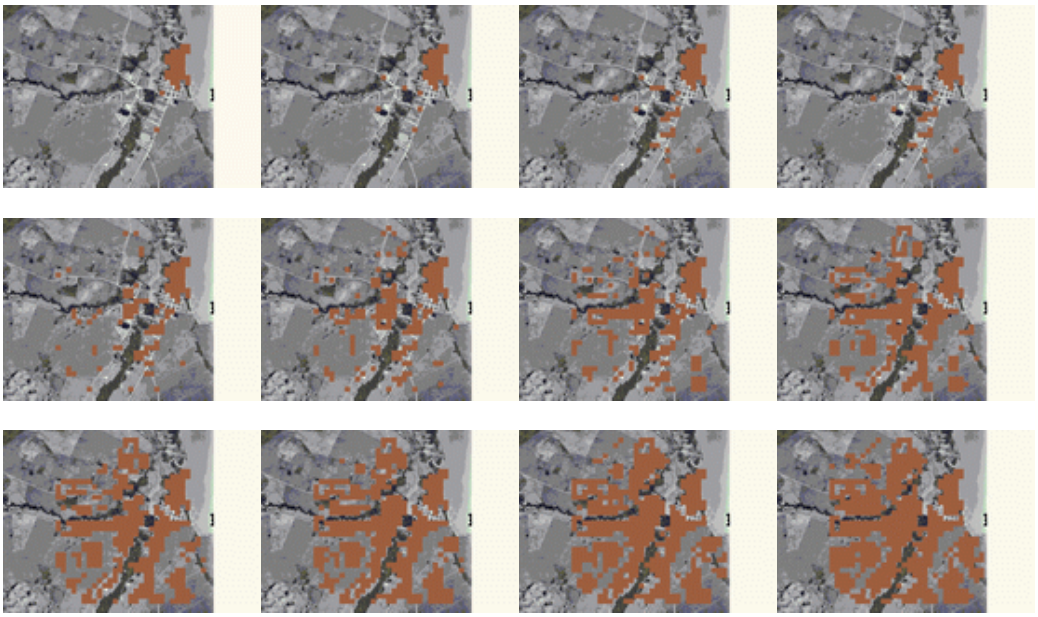


Figura 7: 12 estados da simulação de crescimento urbano em Barra do Ribeiro, Brasil, com a evolução da área urbanizada do ano 2000 ao ano 2060.

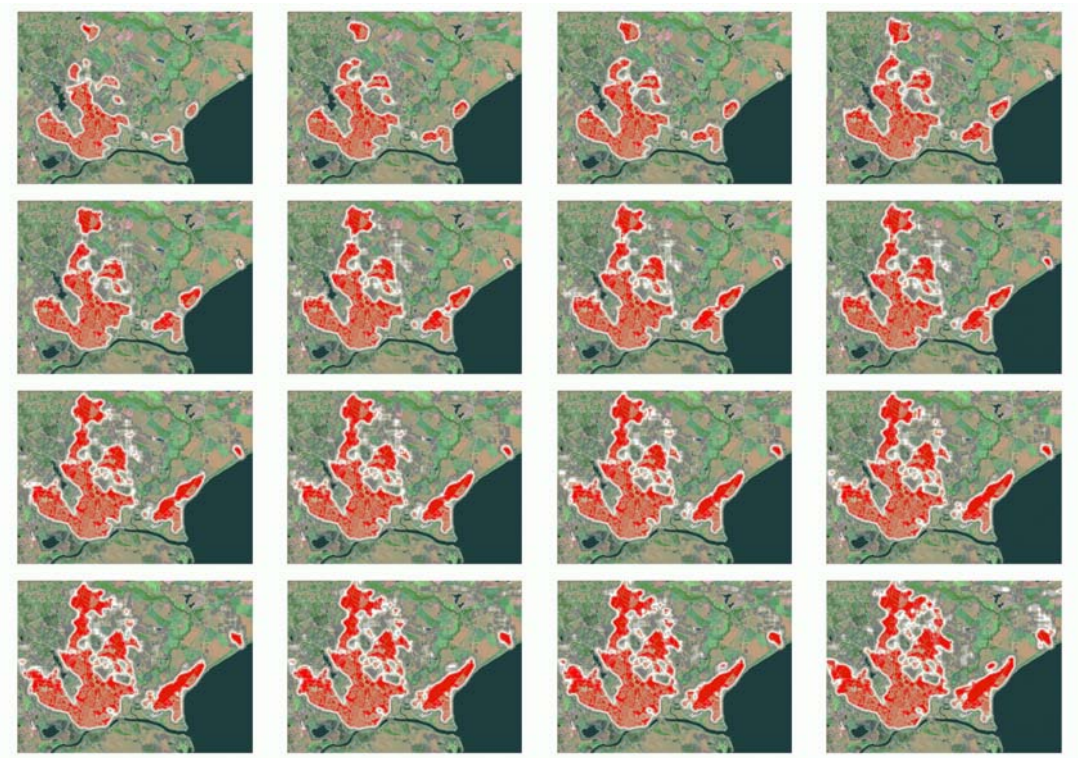


Figura 8: 16 estados da simulação de crescimento urbano em Pelotas, Brasil, com a evolução da área urbanizada do ano 2000 ao ano 2045.

© Los autores
www.geo-focus.org