

Dinâmica Espacial Urbana na Amazônia: Modelo de Autômatos Celulares na Simulação da Expansão Urbana no Município de Mocajuba - Pará

Renata Maciel Ribeiro¹; Leonardo R. Queiroz¹; Luigi M. Ribeiro²; Pedro R. Andrade¹; Silvana Amaral¹.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE¹
Caixa Postal 515, 12227-010, São José dos Campos, SP – Brasil

Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ²
R. São Francisco Xavier - 524, 20550-900, Rio de Janeiro, RJ - Brasil

{renata.ribeiro; leonardo.queiroz; pedro.andrade;
silvana.amaral}@inpe.br e luigimacielribeiro@gmail.com

Abstract: *Computational models that represent the process of genesis and evolution of cities are simplifications of reality. As the same time, they allow to understand the relationships of these complex systems and enable to make inferences about future dynamics. This work is an exploratory analysis that uses a methodological approach of cellular automata to analyze the dynamics of urban expansion. The results show that the theoretical-methodological approach is effective to model urban expansion, reproducing in a simplified way the patterns of territorial growth of an Amazonian city.*

Resumo: *Modelos computacionais que representam o processo de gênese e evolução das cidades são simplificações da realidade. Ao mesmo tempo, estes modelos permitem entender as relações desses sistemas complexos e possibilitam fazer inferências sobre dinâmicas futuras. Este trabalho é uma análise exploratória que utiliza uma abordagem metodológica de autômatos celulares para análise da dinâmica de expansão urbana. Os resultados mostram que a abordagem teórico-metodológica é eficaz para modelar a expansão urbana, reproduzindo de forma simplificada os padrões de crescimento territorial de uma cidade amazônica.*

1. Introdução

As cidades são organismos complexos, onde diversos agentes e fatores atuam em seu processo de evolução. Os modelos computacionais que representam o processo de gênese e evolução destes espaços são simplificações da realidade. No caso da expansão urbana, a simples decomposição estática de suas partes não permite a compreensão deste fenômeno multidimensional. Com isso, a utilização de modelagem para análise de fenômenos urbanos através das inter-relações de seus diferentes elementos, possibilita entender as relações em sistemas complexos, aportando ferramentas para explorar possibilidades relativas a mudanças futuras [Allen 1997, Batty e Torrens 2005].

Na Amazônia, a dinâmica de evolução das cidades responde à agentes e fatores muito particulares à história de ocupação do território e expressam o efeito da relação entre atores que interagem sobre o mesmo espaço, mas representam diferentes temporalidades. Propondo uma análise exploratória para testar parte da abordagem metodológica descrita por Barredo et al. (2003), no contexto amazônico, este trabalho tem o objetivo de explorar um modelo de autômatos celulares para estudar a dinâmica de expansão urbana da sede do município de Mocajuba, no estado do Pará. Tendo como referência a proposta de gradiente de urbano de Dal'Asta et al. (2016), a evolução urbana do município foi modelada, a partir de dados de mapeamentos de uso e cobertura da terra do TerraClass (ALMEIDA et al, 2016) reamostrados em uma grade celular de 200m², para período de 2004 a 2014, de modo a estabelecer um arcabouço teórico-conceitual para as regras de transição de estados celular.

2. Metodologia

Um modelo de autômatos celulares (AC) é caracterizado por algumas propriedades fundamentais [Weimar 1998]: (i) consistem em uma matriz, ou grade de células; (ii) a evolução do modelo se dá em passos discretos de tempo; (iii) cada célula possui um estado pertencente a um conjunto finito de estados; (iv) evolui de acordo com regras que dependem do estado em que a célula se encontra e do estado de seus vizinhos; e (v) a relação com a vizinhança é local e uniforme. Para além destas características gerais, deve-se ter um modelo teórico-metodológico subjacente que justifique as escolhas para o processo a ser estudado, neste caso, a evolução urbana de uma cidade amazônica.

No escopo metodológico desta pesquisa, adotam-se dois diferentes trabalhos como base teórico-metodológica. Para o norteamento metodológico, propõe-se a aplicação da metodologia de análise da dinâmica urbana a partir de autômatos celulares (AC) testada por Barredo et al. (2003). Para a fundamentação teórico-conceitual, adotou-se a representação espaço temporal do fenômeno urbano na Amazônia de Dal'Asta et al. (2016), que considera o urbano como resultado de um processo *continuum*.

2.1. Fundamentação Teórico-Metodológica

O modelo de Barredo et al. (2003) descreve a dinâmica urbana de Dublin entre 1968 e 1998, considerando cinco vetores para composição celular: (i) *adequação*, definido pela soma linear de fatores físicos, ambientais e institucionais agrupados em um coeficiente entre 0 e 1 que caracterizam a capacidade de transição entre usos da terra; (ii) *acessibilidade*, que é um coeficiente estabelecido em função da distância das redes de transportes públicos; (iii) *status de zoneamento*, definido como o estado inicial da célula pré-definido no modelo; (iv) *influência da vizinhança*, que é a relação da célula central com seus vizinhos; e (v) *perturbações estocásticas*, que é o componente de randomização no modelo, o que faz com que as simulações possuam grande similaridade entre si, mas não sejam exatamente iguais.

O caminho de representação da mudança do paradigma urbano sugerido por Dal'Asta et al. (2016) apoia-se na ideia de sistemas de objetos e sistemas de valores [Lefebvre 1999], intermediados por um sistema de ações [Santos 2006]. Considerando ainda a urbanização como um fenômeno contínuo, que propaga sua lógica de produção, consumo e modo de vida por todo território, em diferentes intensidades. Essa matriz conceitual, se apoia na existência de lógicas produtivas associadas às classes de uso e cobertura que podem identificar diferentes intensidades de urbano.

2.2. Procedimentos Metodológicos

Ao assumir como base teórico-conceitual o gradiente de urbano de Dal'Asta et al. (2016), a classe “não observada” é desconsiderada, não sendo possível calcular a probabilidade de transição desta classe para “urbano”. Ainda, visto que, provavelmente devido à presença de nuvens nas imagens, a área não observada contígua à mancha urbana em 2004 é predominantemente classificada como “vegetação secundária” em 2014, a classe foi agrupada à “vegetação secundária”. Assim, define-se o sistema de objetos como: (i) Floresta, (ii) Vegetação Secundária, (iii) Pastagem, (iv) Mosaico de ocupações e (v) Urbano. Apesar de não se enquadrar no modelo de transformação urbana, a classe Rio também foi considerada nos estados celulares para composição do mapa final de uso e cobertura da terra.

Para a adaptação das classes de entrada (TerraClass) às classes do gradiente de Dal'Asta et al. (2016), quando as classes observadas correspondem a mais de uma classe no modelo de referência, o valor da classe modificada é obtido pela média das classes que a compõem (Figura 1), entendendo que a tendência de ação humana é menor quanto

menor for o coeficiente. Sendo assim, para: (i) Urbano – equivalente às três classes de maior intensidade: Unidade Espacial de Ocupação Humana (UEOH) (8), núcleo urbano (9) e cidade (10), a média igual a 9; (ii) Pastagem, definida pelas classes: pasto sujo (4) e pasto limpo (5), a média igual a 4,5; (iii) Floresta – corresponde ao valor da floresta: 1; (iv) Vegetação Secundária – corresponde ao valor da vegetação secundária: 2; e (v) Mosaico – como área de transição, que pode ser tanto entre floresta e pasto, quanto entre pasto e cidade, abrange diferentes níveis de tecnificação do território. Nesse sentido, definiu-se como mosaico todas as outras classes do gradiente proposto, ou seja, não floresta (3), agricultura de pequena escala (6) e agricultura anual (7), que computaram média igual a 5,3.

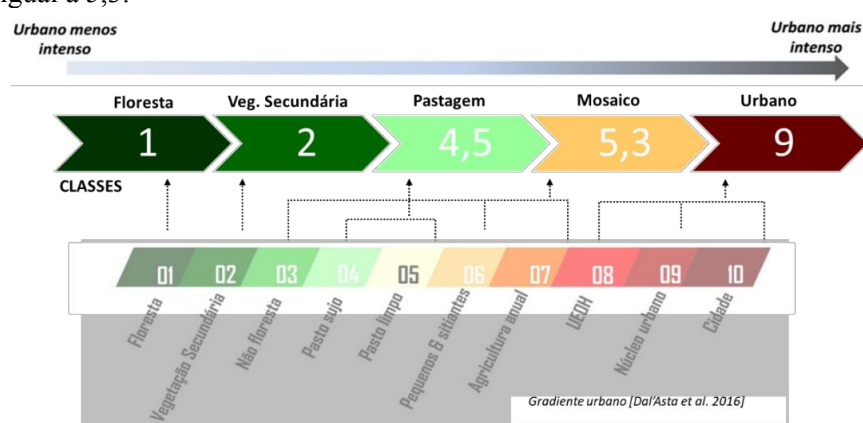


Figura 1 - Sistema de Objetos - Classes adaptadas a partir do gradiente urbano [Dal’Asta et al. 2016].

Partindo dos valores calculados para as classes modificadas, foi possível definir uma especificação matemática para cálculo da tendência de transição entre classes de acordo com a distância entre elas no gradiente (Figura 1). Para se enquadrar em um modelo normalizado de 0 a 1, os coeficientes são expressos pela Equação 1.

$$c = dl/n \tag{Equação 1}$$

Onde, c é o coeficiente que representa numericamente a tendência de transição entre as classes, dl é a classe numericamente menor e n o número de classes do modelo. Para calcular a tendência de mudança, usamos uma variante normalizada da lei do inverso do quadrado da distância, utilizada para calcular distâncias em modelos geoestatísticos por interpolação multivariada [Lukaszyk 2004]. Partindo desse conceito, definimos uma fórmula em que K é a probabilidade efetiva de mudança entre classes, c é o coeficiente de variação de cada classe, dl é a classe numericamente menor, denotando menor ação humana, e $d2$ é a classe numericamente superior (Equação 2).

$$K = c* \{1/[1+ (d2 - dl)^2]\} \tag{Equação 2}$$

Estabelecida a matriz de probabilidade que define a atuação dos vetores de *adequação* e *status de zoneamento*, os outros vetores são descritos diretamente no script (disponível em <https://www.lissinpe.com.br/códigos>), inserindo-se um efeito randômico para o vetor de *perturbações estocásticas* e a relação de vizinhança. O modelo foi implementado em linguagem Lua no ambiente de programação TerraME. A partir dos valores obtidos pela Equação 2, montou-se a matriz de probabilidade do modelo (Tabela 1), que descreve a probabilidade de transição entre as classes. Destacando que como o

interesse do trabalho é estudar a expansão urbana, apenas foram exploradas as transições para a classe Urbano.

A área de estudo localiza-se no município de Mocajuba (Figura 2), região do Baixo Tocantins no estado do Pará, cuja dinâmica de ocupação territorial e atividades econômicas são associadas ao rio Tocantins.

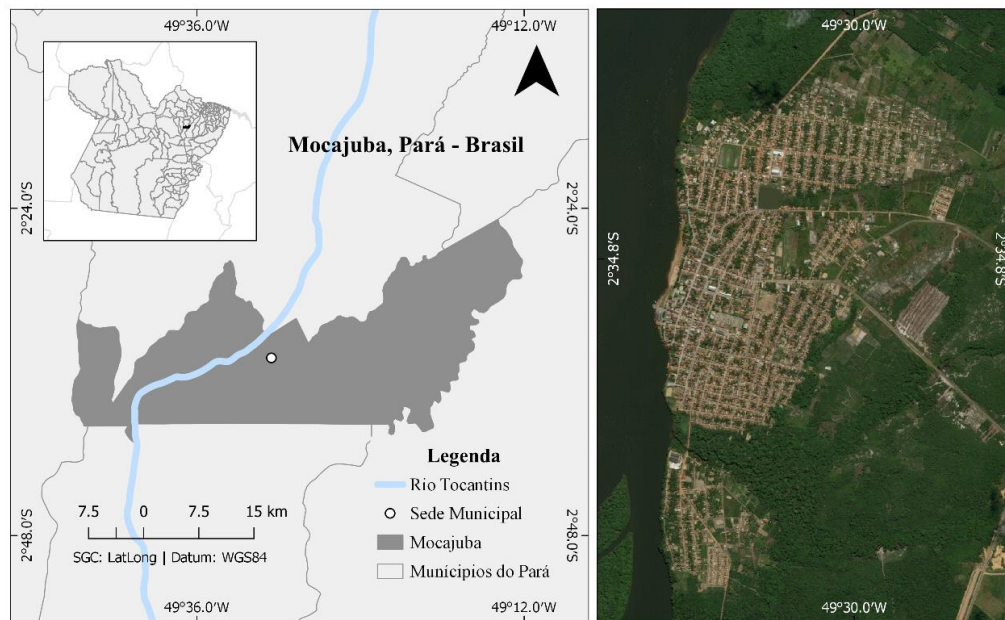


Figura 2 - Localização da Área de Estudo – Mocajuba, Pará.

Como não existem núcleos urbanos afastados da sede de Mocajuba, o crescimento da mancha urbana foi considerado contíguo. Por isso, adotou-se a estratégia de vizinhança de “Moore”. Para a regra de transição de estado, estabeleceu-se que para cada célula que possua um vizinho “urbano”, quando a probabilidade randômica (p) for menor que a probabilidade de transição estabelecida na matriz de probabilidade (I), o estado da célula muda para “urbano”.

O mapeamento de uso e cobertura da terra qualifica o urbano em uma classe única, sendo, portanto, desnecessário um indicador sintético de *adequação*, sendo aqui representado pela capacidade de cada célula de transição para a classe “urbano”. Além disso, Mocajuba, como a maioria das cidades amazônicas, não tem rede de transporte público consolidada e, portanto, o vetor de *acessibilidade* foi desconsiderado no modelo adaptado. Com isso, baseado em Barredo et al. (2003), a especificação do modelo é descrita por:

$${}^t p_i K = f({}^t S_i K, {}^t Z_i K, {}^t N_i K, v) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde, (p) é a probabilidade de um lugar (i), em uma cidade, ser ocupado por um uso (K) em um determinado tempo (t). Essa função é definida pelos fatores *adequação* (S), *status de zoneamento* (Z), *influência da vizinhança* (N) e *perturbações estocásticas* (v). O modelo foi aplicado para o intervalo temporal de 10 anos (2004 a 2014), estabelecendo o passo de tempo mensal (120 meses).

Para a validação do modelo, foi calculada a acurácia e precisão média de 30 simulações. E para a simulação que obteve melhor acurácia, calculou-se a matriz de confusão, com análise de erros de omissão e inclusão da classificação de “urbano” (classe Urbano) e “não urbano” (demais classes).

3. Resultados e Discussões

Com base na especificação matemática descrita (Equação 2), estabeleceu-se as probabilidades de transição entre classes (Tabela 1). A Figura 3a mostra o resultado da simulação que apresentou melhor acurácia (91%) ao comparada ao dado real do mapeamento TerraClass (Figura 3b).

Tabela 1 - Probabilidade de transição entre classes de uso e cobertura, com destaque para Urbano, classe de interesse para análise da dinâmica de expansão urbana.

De/Para	Floresta	Veg. Sec.	Pastagem	Mosaico	Urbano
Floresta	-	0,0500	0,0049	0,0035	0,0012
Veg. Sec.	0,1000	-	0,0163	0,0106	0,0031
Pastagem	-	-	-	0,1339	0,0149
Mosaico	-	-	0,4379	-	0,0369
Urbano	-	-	-	-	-

A acurácia, dada pela porcentagem de células classificadas corretamente em relação ao total de células, foi de 89% para a média das 30 simulações; e a precisão, métrica que mostra a relação entre as células classificadas como urbanas que de fato são urbanas em relação ao total de células urbanas, foi de 0.93 para a média das 30 simulações. Desta avaliação pode-se afirmar que os valores de acurácia e precisão média das simulações indicam que o modelo é estatisticamente válido.

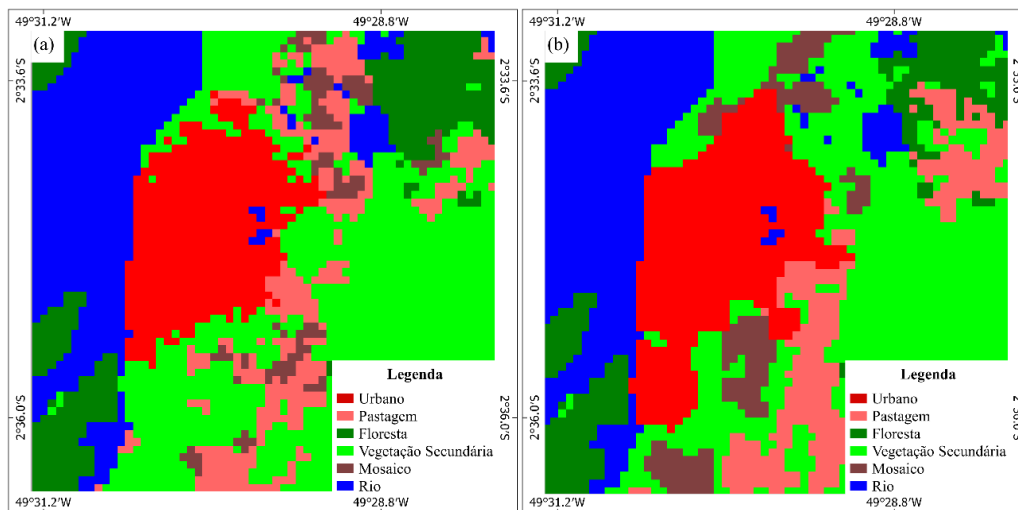


Figura 3 – Mapas de uso e cobertura da terra resultante da simulação (a) e o mapa TerraClass de referência (b) para o ano de 2014.

Além disso, a matriz de erros (Tabela 2) mostrou que não houve significativa confusão entre as classes “urbano” e “não urbano”. O índice de exatidão global foi de 91,5%, o que, isoladamente, significa um excelente resultado da simulação. No entanto, para melhor conferir significado às inferências, os erros de omissão e inclusão também foram avaliados. Neste caso, a classe “urbano” apresentou 11,2% de erro de inclusão, significando que 7.473 células foram classificadas como “urbano”, mas não eram

“urbano”. Os erros de omissão foram de 17,1%, significando que 12.232 células que deveriam ser classificadas como “urbano”, não foram. A classe “não urbano” obteve resultados melhores do que a classe “urbano” por ser um compilado das outras 4 classes consideradas no modelo. De modo geral, conclui-se que a simulação da expansão urbana obteve bons resultados.

Tabela 2 – Matriz de erros (nº de células) entre o dado de referência e a simulação que obteve, sob o critério de acurácia, o melhor resultado no modelo.

		Simulação			
		NÃO URBANO	URBANO	TOTAL	Omissão (%)
Referência	NÃO URBANO	154070	7473	161543	4,6
	URBANO	12232	59514	71746	17,1
	TOTAL	166302	66987	Exatidão global: 91,5%	
	Inclusão (%)	7,3	11,2		

4. Considerações Finais

Apesar do caráter generalista e exploratório do modelo, os resultados observados demonstraram que os protótipos de AC para análise da dinâmica urbana ofereceram resultados satisfatórios. O arcabouço metodológico adotado [Barredo et al. 2003], com as devidas adaptações necessárias, foi capaz de mostrar os padrões de crescimento urbano no município de Mocajuba no Pará. Além disso, foi possível verificar que a proposta de Dal’Asta et. al. (2016) pode ser utilizada como base teórico-conceitual, especialmente no contexto amazônico, para calcular as variações de uso da terra partindo da ideia de gradiente de urbano.

Deste modo, conclui-se que a abordagem metodológica se mostrou uma ferramenta eficiente para reproduzir dinâmicas espaciais complexas, uma vez que permitiu fazer a análise a partir de limites geográficos reais e dados reais em um contexto de urbano diferente do modelo original [Barredo et al. 2003]. Destaca-se, porém, que o modelo necessita ainda de ajustes, pois sendo uma simplificação da realidade, não se adere automaticamente às especificidades locais, que demandariam incorporar as particularidades do processo de expansão urbana desta região Amazônica.

4. Referências Bibliográficas

- ALLEN, P. M. Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity. Amsterdam, Netherlands: Taylor & Francis, 1997 (**Environmental problems & social dynamics series**).
- ALMEIDA, C. A. et al. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. *Acta Amazonica*, v. 46, n. 3, p. 291–302, 2016.
- BARREDO et al. (2003) Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning* Volume 64(3)145-160.
- BATTY, M. Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models and fractals. Cambridge, MA: **The MIT Press**, 2005.
- BATTY, M; TORRENS, P. M. Modelling and prediction in a complex world. *Futures*, v. 37, n. 7, p. 745-766, 2005.
- DAL’ASTA, A. P.; AMARAL, S.; MONTEIRO, A. M. V. Um modelo para a representação espaço-temporal do fenômeno urbano na Amazônia Contemporânea. *Revista Políticas Públicas & Cidades*, v. 5, n. 2, p. 17 – 37, ago./dez. 2016.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico 2010**. 2010. Disponível em < <http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 02 set. 2019.
- LEFEBVRE, H., A revolução urbana. Belo Horizonte: UFMG, 1999, p.14-32
- ŁUKASZYK, Szymon. A new concept of probability metric and its applications in approximation of scattered data sets. *Computational Mechanics*, v. 33, n. 4, p. 299-304, 2004.
- SANTOS, M. **A Natureza do Espaço: Técnica e Tempo**. Razão e Emoção. 4. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2006.
- WEIMAR, J. R. **Simulation with Cellular Automata**. Berlin: Logos Verlag Berlin, 1998. 208p.