

SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO URBANO EM ESPAÇOS CELULARES COM UMA MEDIDA DE ACESSIBILIDADE EM CIDADES PEQUENAS E MÉDIAS DO SUL DO RIO GRANDE DO SUL

M.V.P. Saraiva, M. C. Polidori, O. M. Peres e A. P. Santos

RESUMO

Medidas de acessibilidade têm se mostrado eficazes em estudos tanto do espaço urbano quanto da paisagem natural, apresentando semelhanças teóricas e metodológicas. Dessa forma, está proposta neste trabalho uma versão expandida da medida, chamada de acessibilidade ponderada, considerando as características do entorno da cidade, tanto naturais quanto modificadas pela ação humana. O modelo foi testado em cidades do sul do Rio Grande do Sul. Foram considerados dois tipos de condicionantes externos à cidade: a) fatores ambientais, representados pela hidrografia e topografia; b) fatores antrópicos, representados pelo sistema viário de acesso à cidade. Os melhores resultados foram obtidos nas simulações que consideraram a influência dos fatores ambientais isoladamente ou em conjunto com os fatores antrópicos. Assim, a presente investigação indica que a área do entorno da cidade exerce importante influência no processo de crescimento urbano e que essa influência pode ser identificada pela medida de acessibilidade.

1 INTRODUÇÃO

Uma das formas de entender o papel dos processos atuantes no crescimento urbano e suas relações com o surgimento de padrões morfológicos nas cidades é através da realização de simulações em ambiente computacional. Para isso, este trabalho se enquadra na vertente da modelagem urbana (Batty, 2009), buscando analisar e avançar na compreensão da produção do espaço urbano no campo disciplinar da morfologia urbana, ou seja, da forma da cidade (Lamas, 1993).

Modelos urbanos têm, tradicionalmente, abordado a cidade como um sistema apartado do ambiente natural, abstraindo-o sob a forma de um plano isotrópico (Nystuen, 1968). Esses modelos mantêm o foco nas relações socioespaciais presentes na cidade, considerando todos os lugares como igualmente propícios à urbanização, independente de suas características relacionadas ao ambiente natural. Estudos mais recentes têm avançado no sentido de considerar a influência de fatores ambientais no processo urbano.

Segundo Liu et al. (2007), existem complexas e constantes trocas de matéria e energia na interação entre a cidade e o ambiente natural que forma o plano de suporte à urbanização, de modo a criar um sistema integrado e com diversas interinfluências na evolução da cidade e da paisagem natural. Assim, o ambiente natural deixa de ser neutro e passa a exercer influência nos processos urbanos, atuando como um campo de irregularidades capaz de oferecer diferentes graus de oportunidades espaciais à conversão do solo. Estudos integrados entre os dois campos disciplinares têm sido desenvolvidos no sentido de buscar

a compreensão dessas interinfluências e das modificações na paisagem e na cidade causadas pelo processo (Alberti et al., 2003).

A partir dessas influências recíprocas entre a cidade e o ambiente natural, é possível supor que parte do crescimento urbano é determinado pelas características do entorno, pré-existent à cidade, além da atuação de mecanismos intra-urbanos. Uma forma de modelar e capturar relações complexas entre um grande número de entidades é através de medidas derivadas da teoria de grafos, comumente utilizadas na modelagem de características inerentes à estrutura interna das cidades. Algumas dessas medidas são a acessibilidade (Ingram, 1971), a centralidade (Krafta, 1994) e as medidas da teoria da Sintaxe Espacial (Hillier & Hanson, 1984).

Dentre essas medidas, a acessibilidade possui aplicações tanto em estudos urbanos, vinculados principalmente às áreas de planejamento urbano e de transportes (Geurs & Ritsema van Eck, 2001), quanto em estudos do ambiente natural (Bunn et al., 2000). Dessa forma, é possível utilizar suas características na descrição unificada da cidade e de seu entorno, possibilitando a construção de modelos integrados.

Modelos dedicados a simular o crescimento urbano devem incluir a dimensão temporal em sua concepção. Porém, modelos baseados em grafos e na medida de acessibilidade são mais comumente estáticos, visando capturar a estrutura interna do objeto de estudo em determinado ponto do tempo. Processos urbanos dinâmicos complexos são modelados, frequentemente, com a utilização de recursos de Autômatos Celulares (do inglês Cellular Automata, ou CA). CA são abstrações matemáticas espaciais e dinâmicas simples, onde a descrição do espaço é feita através de uma matriz de células iguais, sendo o estado de cada célula determinado a partir do estado das células vizinhas no tempo anterior e de um conjunto definido de regras de transição. Além disso, suas características iniciais podem ser expandidas com novos recursos, com o objetivo de melhor representar o sistema urbano (Torrens, 2000).

1.1 Autômatos Celulares

Diversas vantagens puderam ser observadas em relação ao uso de CA para a modelagem da dinâmica urbana. Autômatos celulares são, por definição, espaciais, o que os torna adequados a estudos urbanos e geográficos (White e Engelen, 1993). Além disso, a ênfase dos CA em interações de nível local com capacidade para gerar padrões globais, bem como na geração de padrões a partir da repetição de regras simples, torna-os mais parecidos com os fenômenos urbanos (Clarke e Leonard, 1998).

Outras vantagens ainda podem ser observadas, segundo Liu (2009): a) facilidade na construção dos modelos, uma vez que a descrição espacial e as regras são muito simples, característica que auxilia no entendimento do processo e na interpretação dos resultados, sem prejuízo da complexidade possível de ser atingida com o modelo; b) possibilidade de realizar experimentações, já que os CA são mais dirigidos ao estudo dos processos dinâmicos da cidade e não focam diretamente nos padrões espaciais do crescimento urbano, de modo que pequenas mudanças nas regras de transição geram grandes mudanças no comportamento do sistema e possibilitam a exploração de diferentes cenários possíveis; c) afinidade com os dados do tipo raster usados em SIG, possibilitando a fácil integração de CA em ambientes de SIG de modo a estender as capacidades do modelo em termos de acesso, organização e análise de dados espaciais.

Outra forma de estender as possibilidades de modelagem urbana com CA é a sua integração com técnicas provenientes da teoria de grafos. Essa abordagem conjunta possibilita extrair medidas típicas de grafos e utilizá-las como formas de diferenciação celular.

1.2 Medidas de Acessibilidade

Investigações sobre uma definição objetiva de acessibilidade e uma forma de mensurá-la datam dos anos 1960 e início da década de 1970 (Ingram, 1971). De forma simples, acessibilidade pode ser definida como a propriedade de determinado componente de uma rede de estar mais próximo de todos os demais elementos, considerando os caminhos mínimos (ou preferenciais) entre eles. Para efeitos de cálculo, a distância pode ser medida tanto em termos de tempo quanto de espaço, sendo que podem ser qualificadas por itens como declividades, qualidade da via de acesso e capacidade de fluxo, entre outros.

A medida de acessibilidade tem-se mostrado muito útil na análise tanto do espaço urbanizado quanto da paisagem natural. As análises podem ser feitas tanto do ponto de vista dos fluxos existentes quanto da própria estrutura do espaço. Exemplos dessas possibilidades são encontrados na área da morfologia e modelagem urbana, bem como de ecologia de paisagem.

Medidas de acessibilidade tem sido usada extensivamente em estudos de planejamento urbano e de transportes, por sua capacidade de medir a eficiência do sistema de mobilidade urbana (Geurs & Ritsema van Eck, 2001). Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são essenciais aos órgãos de planejamento, por aumentar a eficiência na obtenção, armazenamento, recuperação e análise de dados espaciais. Arentze et al. (1994) demonstram a possibilidade de integração de medidas de acessibilidade para sistemas de transporte em ambiente de SIG, aumentando as possibilidades de uso pelos gestores urbanos.

Estudos vinculando diferentes usos do solo e acessibilidade também são frequentes, tendo em vista a possibilidade de qualificar o cálculo da medida pela diferenciação entre locais que são predominantemente origem ou destino das viagens, baseado no uso do solo predominante. Bertolini et al. (2005) relacionam acessibilidade e usos do solo para auxiliar no planejamento do sistema de transporte e de ocupação do solo em cidades holandesas, de modo a melhorar a eficiência do sistema, diminuir custos de operação e buscar cidades mais sustentáveis. Woudsma et al. (2008) buscam o enfoque inverso: os autores identificam a capacidade da acessibilidade de condicionar a formação de padrões de ocupação do solo para usos muito dependentes do sistema de transportes, como é o caso do setor de logística.

A teoria da sintaxe espacial apresenta uma série de medidas quantitativas de avaliação da conformação urbana, baseadas apenas na posição relativa entre os elementos estruturantes do espaço (Hillier & Hanson, 1984). A principal medida da sintaxe espacial é a medida de integração, que é intimamente relacionada à acessibilidade, uma vez que se baseia na proximidade topológica entre os componentes do sistema. Dessa forma, as características da acessibilidade estão relacionadas às propriedades configuracionais inerentes aos sistemas urbanos, e a medida pode ser utilizada para descrever o padrão global da cidade.

Essa observação concorda com teorias que consideram o espaço como agente ativo no processo social, e não apenas um resultado do mesmo (Soja, 1985).

A acessibilidade em ecologia de paisagem está relacionada à conectividade entre diferentes manchas (áreas da paisagem relativamente homogêneas e diferentes das áreas vizinhas) presentes em um ecossistema, feita principalmente através dos corredores (áreas estreitas que servem de conexão ou barreira entre as manchas) e dependendo da configuração espacial do ambiente. Associada à conectividade, está o conceito de Resistência Mínima Acumulada ou RMA (do original em inglês *Minimal Cumulative Resistance*), que é a resistência imposta pelo ambiente ao deslocamento das espécies entre manchas ou à permanência delas em determinada mancha (Wu & Hoobs, 2007).

De modo a medir as características de conectividade e acessibilidade do ambiente natural, estudos de ecologia de paisagem têm incorporado técnicas da teoria de grafos e análise de redes (Bunn et al., 2000), demonstrando semelhança metodológica com estudos urbanos. Outra semelhança pode ser observada em estudos como o de Pinto e Keitt (2008), dedicado a identificar a presença de múltiplos caminhos mínimos nas conexões ambientais e sua influência na estrutura da paisagem, de forma semelhante aos modelos de acessibilidade com múltiplas paradas.

Além disso, estudos indicam que a paisagem natural possui características intrínsecas a sua configuração formal, sendo sua capacidade de sustentação influenciada diretamente pelos padrões espaciais da paisagem (Yu, 1995). Esses estudos também consideram a capacidade de movimentação das diferentes espécies como maior ou menor capacidade de vencer resistências ambientais, de modo semelhante a estudos de acessibilidade dedicados à mobilidade urbana.

Por fim, estudos integrados entre cidade e ambiente têm se tornado cada vez mais comuns na contemporaneidade, uma vez que são evidentes os impactos causados no ambiente natural pela urbanização crescente (Alberti et al., 2003). Por outro lado, o crescimento urbano não se dá de forma independente do plano natural de suporte (Liu, et al., 2007).

As semelhanças teóricas e metodológicas apresentadas aqui quanto à teoria de grafos e a medidas de acessibilidade encontram-se nesse contexto de integração entre os dois campos disciplinares. A partir destes conceitos, está descrito neste trabalho um modelo de simulação de crescimento urbano baseado em uma medida de acessibilidade concebida para considerar integralmente os ambientes urbano e natural.

3 CONSTRUÇÃO DO MODELO

3.1 A Medida de Acessibilidade Celular

O modelo descrito está implementado no software de simulação de crescimento urbano CityCell (Saraiva e Polidori, 2014), desenvolvido pela equipe do Laboratório de Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFPel.

Medidas de acessibilidade são tradicionalmente calculadas utilizando recursos de grafos. Para este trabalho, buscando aproveitar as características dinâmicas dos modelos baseados em CA, está proposta a definição de uma medida de acessibilidade celular, representada na forma de *grid*.

A interação entre as células para o cálculo da acessibilidade celular, no modelo, se dá da seguinte forma: a) são consideradas células de origem todas as células do *grid*; b) células de destino são todas as células com atributos que atraem a urbanização, podendo ser urbanos, naturais ou institucionais. A partir disso, a acessibilidade celular pode ser definida como a propriedade de cada célula do *grid* de estar mais próxima das áreas de maior atração à urbanização.

Matematicamente, a acessibilidade celular descrita anteriormente é definida conforme a equação 1, a seguir.

$$AC_i = \sum (1/d_{ij}) \quad (1)$$

Onde:

AC_i : acessibilidade celular da célula i .

d_{ij} : distância entre as células i e j .

Na sequência, resultados dessa medida, referentes a diferentes descrições ambientais, podem ser vistos na figura 1.

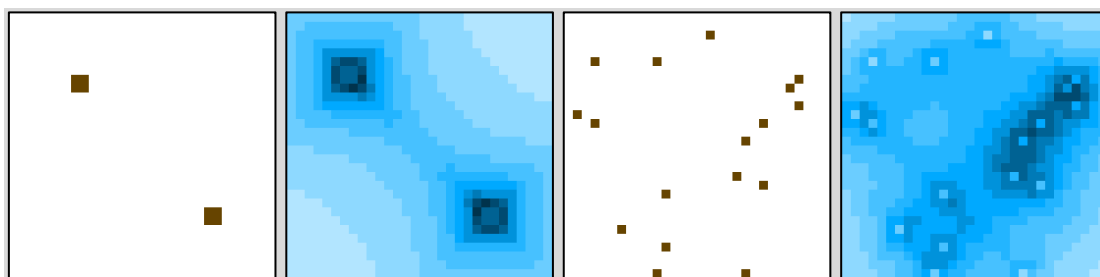


Figura 1 – Resultados da medida de acessibilidade celular em diferentes padrões: *grids* de entrada, com células com atributos de atração à urbanização em marrom; *grids* de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul.

Os resultados da medida de acessibilidade celular apresentam alta tendência à concentração em torno das áreas de maior presença de células capazes de atrair a urbanização, como esperado. A figura 1 demonstra a sensibilidade da medida ao responder a mudanças nos atributos de entrada, onde pequenas variações nesses atributos geram mudanças significativas no padrão de distribuição da acessibilidade pelo *grid*.

A medida de acessibilidade definida na equação 1 pode ser chamada de acessibilidade topológica, devido à forma de cálculo das distâncias entre as células. Em estudos urbanos baseados em grafos, incluindo estudos de acessibilidade, são comuns duas formas de cálculo das distâncias entre as entidades: topológica e geométrica. A distância topológica considera cada elemento com o mesmo tamanho ou peso dos demais, ou seja, cada elemento percorrido conta um passo topológico em direção ao destino. A distância geométrica considera as distâncias euclidianas entre dois pontos, o que pode gerar uma grande variação no resultado final.

Em um ambiente celular de células quadradas, como é o caso do *CityCell*, a distância geométrica não difere da topológica pois todas as células de um *grid* possuem o mesmo tamanho. Essa limitação pode ser superada através da propriedade das células de armazenar diferentes atributos simultaneamente, que podem representar a dificuldade em

transpor cada célula ou seu tamanho relativo: mesmo que todas as células tenham o mesmo tamanho físico, a distância de cálculo a ser percorrida na sua transposição pode ser diferenciada. Neste trabalho, esta característica será chamada de peso da célula.

A partir dessa propriedade, está proposta a definição de uma medida de acessibilidade ponderada. Neste trabalho, serão testadas duas formas de ponderação: a) pelos fatores ambientais; b) pelos fatores antrópicos.

A ponderação a partir dos fatores ambientais é feita a partir das características naturais das células do entorno urbano. Dessa forma, os valores referentes à intensidade da presença de fatores ambientais associados às células podem ser usados no cálculo da acessibilidade para aumentar ou diminuir as distâncias relativas ao percorrer cada célula. Assim, cada célula representa uma diferente dificuldade em ser transposta, caracterizada por seus condicionantes ambientais.

Esse método está associado ao conceito de Resistência Mínima Acumulada (*Minimal Cumulative Resistance*, no original), ou RMA (Wu e Hoobs, 2007), utilizada em estudos de ecologia de paisagem para representar resistências ao deslocamento entre diferentes áreas da paisagem. Nesse caso, o espaço intermediário às relações de interação entre as células do sistema funciona como um campo de irregularidades que têm de ser superadas antes de permitir o crescimento urbano. Os efeitos da ponderação pelos fatores ambientais na acessibilidade estão demonstrados na figura 2, a seguir.

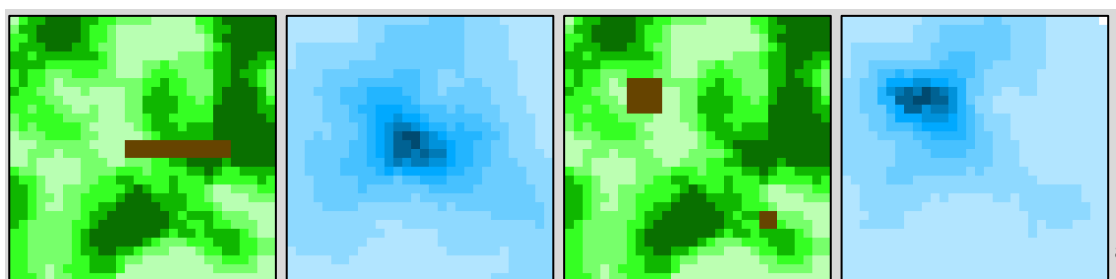


Figura 2 - Resultados da medida de acessibilidade celular ponderada pelos fatores ambientais: a) *grids* de entrada, com células urbanas em marrom e fundo em tons de verde representando diferentes intensidades de resistências naturais; b) *grids* de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul.

A ponderação a partir dos fatores antrópicos é feita a partir das características presentes no entorno urbano que são provenientes da ação humana. Esse tipo de ponderação consiste em reconhecer que a área do entorno da cidade apresenta indícios da presença humana desde antes da efetiva urbanização. Essas características podem influenciar a acessibilidade desses lugares e encontram-se em grupos distintos, como: a) sistema de transportes, em diferentes modais (rodoviário, hidroviário e ferroviário); b) presença de infraestrutura, além de sua qualidade; c) diferentes usos do solo, com áreas destinadas à atividades rurais ou industriais; d) aspectos culturais, como a percepção ambiental e os costumes e a memória locais. Esses atributos atuam como fatores de atração ou de resistência presentes nas células correspondentes. Neste trabalho, o parâmetro representado pelos fatores antrópicos será chamado de impedância.

A impedância pode ser regulada pelo usuário através de dois parâmetros: a impedância global (Ω) e a impedância local (ω). A impedância global age igualmente sobre todas as células pertencentes aos fatores antrópicos, enquanto a impedância local pode ser

configurada individualmente para cada célula desse conjunto. Assim, a impedância local pode ser usada para valorar a intensidade da presença dos fatores antrópicos em diferentes áreas do *grid*, diferenciando, por exemplo, uma rodovia asfaltada de uma pequena estrada rural de saibro.

A impedância age como um fator multiplicador da peso da célula, portanto seu efeito é inverso: quanto menor o valor da impedância, menor a distância relativa a ser percorrida para transpor determinada célula e, portanto, maior sua acessibilidade. Áreas onde estão ausentes fatores antrópicos possuem valor de impedância global e local igual a 1, anulando seu efeito nessas regiões do *grid*. O efeito da ponderação pelos fatores antrópicos sobre a acessibilidade é demonstrado a seguir, na figura 3. No exemplo, a ação humana é representada pelo sistema viário, onde quatro configurações são testadas: a) ausência de sistema viário; b) presença de uma rodovia em sentido horizontal, de impedância média ($\omega = 0,5$); c) presença de duas rodovias, ambas de impedância média ($\omega = 0,5$); d) presença de duas rodovias, sendo a área em cinza claro representando impedância média ($\omega = 0,5$) e a área em cinza mais escuro representando impedância mais baixa ($\omega = 0,2$).

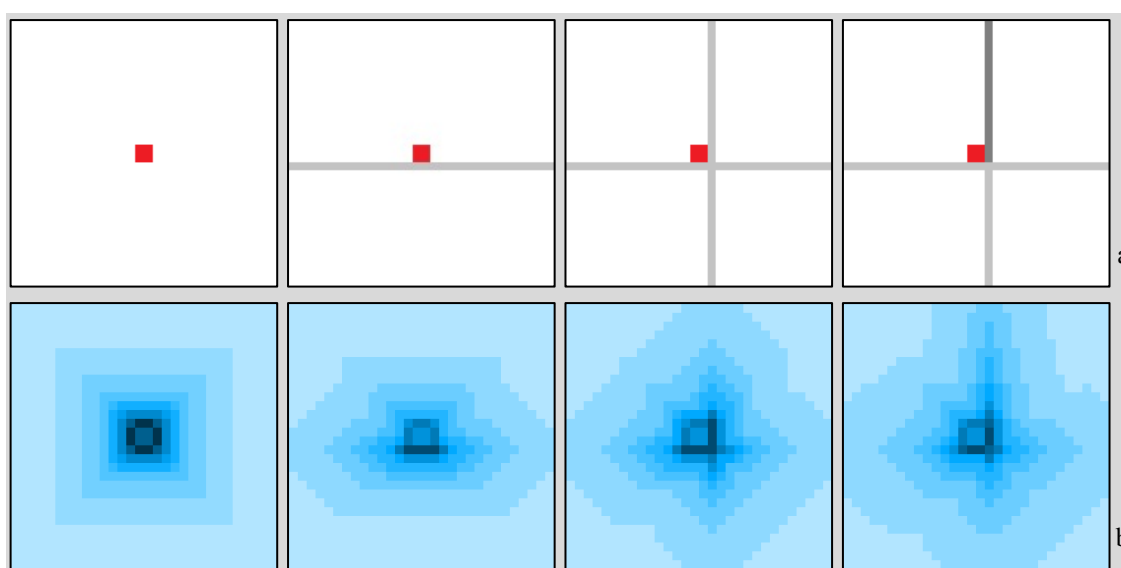


Figura 3 - Resultados da medida de acessibilidade celular ponderada por fatores antrópicos, representados pelo sistema viário: a) *grids* de entrada, com células urbanas em vermelho e diferentes configurações viárias em tons de cinza; b) *grids* de resultados, com a acessibilidade celular diferenciada em tons de azul.

A partir dos resultados ilustrados nas figuras 2 e 3, é possível observar que a medida de acessibilidade celular proposta neste trabalho é capaz de capturar a estrutura do sistema, apresentando visíveis variações em resposta a mudanças na descrição ambiental. A medida tem resultados derivados da relação entre a cidade e o ambiente em seu entorno, tanto natural quanto modificado pelo homem. Diferentes combinações entre atributos de entrada geraram mudanças visíveis no padrão de distribuição da acessibilidade, representando um avanço na capacidade de descrição ambiental do modelo e na possibilidade de representação de sistemas urbanos reais.

A partir da definição de acessibilidade ponderada apresentadas, é possível detalhar a equação da acessibilidade celular para incluir esses conceitos. A distância entre duas células do *grid* é dada pela equação 2, a seguir:

$$d_{ij} = \sum P_c \quad (2)$$

Onde:

d_{ij} : distância entre as células i e j .

P_c : peso da célula c .

O peso de cada célula depende da presença de fatores ambientais e antrópicos, conforme a equação 3, a seguir:

$$P_c = Env_c \times \Omega \times \omega_c \quad (3)$$

Onde:

P_c : peso da célula c .

Ω : impedância global.

ω_c : impedância local da célula c .

Env_c : intensidade dos fatores ambientais presentes na célula c .

Da forma como exposto neste item, a medida de acessibilidade celular resulta do relacionamento entre os ambientes urbano e natural, cumprindo o objetivo inicial de integrar os dois ambientes em uma única descrição espacial. Aqui, ela será usada como medida de diferenciação espacial, representando vantagens locais e funcionando como indutor do crescimento urbano.

3.2 O Modelo de Crescimento Urbano

Como forma de facilitar a concepção do modelo, bem como a análise dos resultados, o procedimento proposto busca ser o mais simples possível. Deste modo, é possível compreender melhor o funcionamento do modelo e o papel de cada elemento na dinâmica do conjunto (Miller e Page, 2007).

O processo de simulação está feito considerando a associação entre alta acessibilidade e presença de vantagens locais. Assim, a medida de acessibilidade representa a probabilidade de conversão do solo de cada célula, ou seja, áreas de maior acessibilidade indicam locais onde é mais provável que ocorra a urbanização. Juntamente com a acessibilidade, o cálculo do potencial de crescimento urbano no modelo inclui um componente aleatório, de modo a capturar parte das incertezas presentes no processo de crescimento urbano. A relação entre os componentes determinístico e aleatório, no modelo, é dada pela equação 4, seguir. Para efeito de cálculo, o valor da acessibilidade celular é normalizado entre zero e 1.

$$Potencial_i = (AC_i \times \alpha) + (Random \times \beta) \quad (4)$$

Onde:

$Potencial_i$: Potencial de mudança de estado da célula i .

AC_i : Acessibilidade celular relativa da célula i .

Random: Valor entre zero e 1, gerado aleatoriamente.

α (alfa): grau de influência do fator determinístico .

β (beta): grau de influência do fator aleatório.

Dessa equação resulta a medida de potencial de mudança de estado celular, a partir da qual ocorre o crescimento urbano. A equação concilia um fator determinístico, representado pela medida de acessibilidade, e um fator aleatório, caracterizando o modelo como semi-determinístico. A influência da acessibilidade e do fator aleatório é ajustada pelo operador do modelo através dos coeficientes α (*alfa*) e β (*beta*), respectivamente. Ambos coeficientes são definidos como números reais variando entre zero e 1. O valor zero para algum dos coeficientes anula o valor da sua variável de influência, enquanto o valor 1 mantém seu valor no máximo.

O último parâmetro definido pelo usuário do modelo é a taxa de crescimento. Essa taxa define o número de células que deverão passar do estado natural para o estado urbano ao fim de cada iteração, conformando o crescimento da cidade. Essas células são escolhidas conforme seu potencial de mudança de estado, definido na equação 4.

4 ESTUDO DE CASO

Para verificar o funcionamento do modelo, estudos de caso foram realizados em cidades pequenas e médias do sul do Rio Grande do Sul. Neste trabalho, será apresentado o caso da cidade de Bagé, com uma população de 116.794 habitantes, localizada na fronteira com o Uruguai. A área de estudo foi dividida em células quadradas de 200 m de lado, compondo um *grid* celular de 5625 células, sendo 75 células no sentido leste-oeste e 75 células no sentido norte-sul.

A figura 4, a seguir, mostra os estados inicial e final para a cidade de Bagé, referentes aos anos de 1974 e 2012 (respectivamente). Nesse período de 38 anos, a superfície ocupada pela cidade aumentou 326%, o que corresponde a uma taxa média de crescimento anual de 3,2%. Os atributos de entrada utilizados na simulação de melhor resultado são: a) núcleo urbano de 1974; b) sistema viário; c) vazios urbanos (áreas não urbanizáveis); d) hidrografia; e) grid randômico.

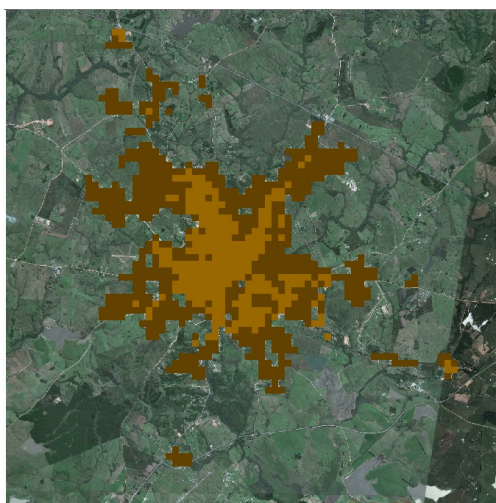


Figura 4 - Área efetivamente urbanizada de Bagé em 1974 (marrom claro, 262 células) e 2012 (marrom escuro, 855 células).

A seguir, são apresentados os outputs da Área Efetivamente Urbanizada e da Acessibilidade Celular em três estados parciais da simulação, referentes as iterações 1, 20 e 40 (figura 5).

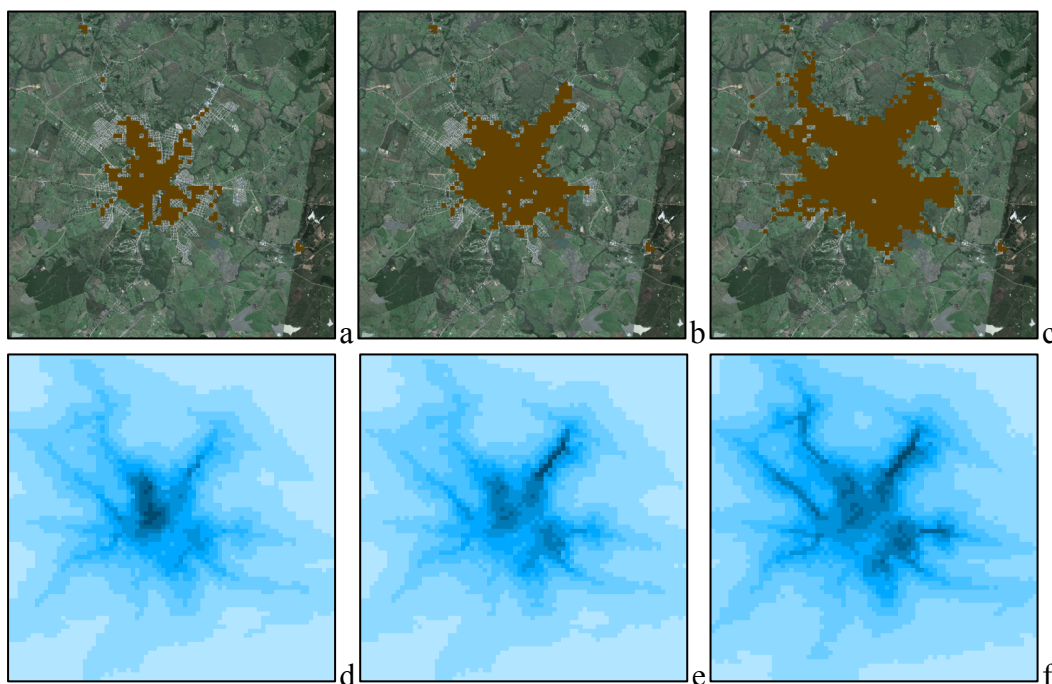


Figura 5 – Resultados da simulação para Bagé, com área efetivamente urbanizada em marrom e acessibilidade em tons de azul.

Os resultados deste cenário apresentam boas semelhanças morfológicas com a cidade real. Bagé apresenta uma forma urbana predominantemente compacta e irregular ao centro e axial nas periferias, características que puderam ser replicadas pela influência conjunta do ambiente natural e do sistema viário. A distribuição das maiores acessibilidades assume um padrão marcadamente axial neste cenário. A atuação do sistema viário eleva a acessibilidade relativa de pontos mais afastados da área urbana, facilitando a conversão do solo desses locais e a forma axial adquirida pela cidade.

A seguir, na figura 6, é apresentado o estado final da simulação juntamente com a comparação entre o resultado simulado e a cidade real. As semelhanças são visualmente perceptíveis. Os erros do modelo concentram-se principalmente nas bordas da cidade, como pode ser visto na figura 6a (em vermelho). Já a figura 6c indica que a estrutura formal da cidade foi adequadamente capturada, com muitas das células simuladas erroneamente localizadas diretamente adjacentes à posição correta (em verde claro).

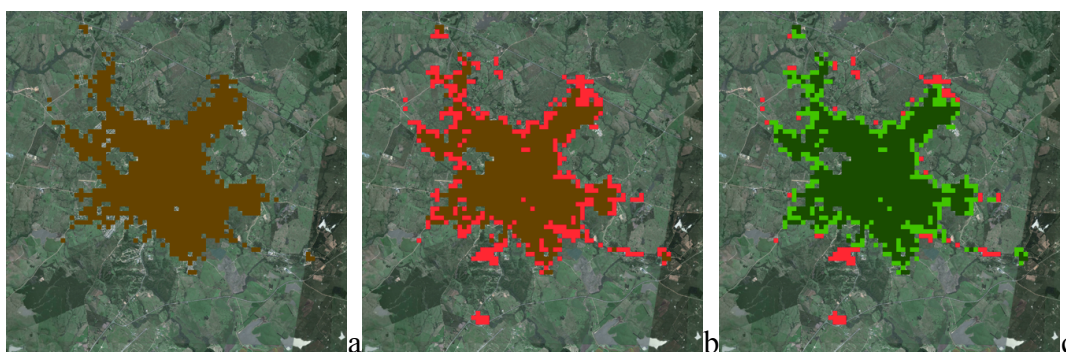


Figura 6 – *Outputs* tipo de célula, em marrom; mapa de concordância, com células coincidentes em marrom e discrepantes em vermelho; mapa de concordância difusa de raio 1, com células coincidentes em verde escuro, coincidência raio 1 em verde claro e discrepância em vermelho.

5 CONCLUSÕES

O modelo foi capaz de replicar significativamente bem o crescimento da cidade de Bagé ao longo de 38 anos (de 1974 até 2012). A medida de acessibilidade ponderada concebida no trabalho demonstrou ter a capacidade de capturar a relação da cidade com a estrutura do espaço, integrando a cidade, fatores ambientais e fatores antrópicos do entorno em uma mesma descrição, aliada à capacidades de simulação dinâmica dos autômatos celulares. Porém, os resultados foram melhor alcançados em casos de crescimento concêntrico e axial. No caso em estudo, pequenos núcleos urbanos localizados de forma difusa não foram capturados pelo modelo.

Ainda assim, novas possibilidades podem ser adicionadas ao modelo em trabalhos futuros. A medida de acessibilidade pode ser usada em conjunto com outras medidas de diferenciação espacial e outras lógicas de crescimento urbano, alocação de recursos e produção do espaço. Esse modelo teve como proposta simular o crescimento urbano a partir de uma única lógica: a da interação da cidade com o ambiente de entorno, intermediada pela medida de acessibilidade. Porém, na realidade, nada indica que o crescimento urbano obedeça a uma única lógica espacial. Avanços em modelagem urbana ocorrem em várias frentes simultaneamente, porém este trabalho indica que a presença do ambiente do entorno, tanto natural quanto modificado pela ação humana, é um fator a ser considerado em trabalhos futuros.

6 REFERÊNCIAS

- ALBERTI, M. et al. Integrating humans into ecology: opportunities and challenges for studying urban ecosystems. *BioScience*, 53, n. 12, Dezembro 2003. 1169-1179.
- ARENTZE, T. A.; BORGERS, A. W. J.; TIMMERMANS, H. J. P. Geographical information systems and the measurement of accessibility in the context of multipurpose travel: a new approach. *Geographical Systems*, 1, 1994. 87-102.
- BATTY, M. Urban Modelling. *International Encyclopedia of Human Geography*, 2009.
- BERTOLINI, L.; CLERCQ, F. L.; KAPOEN, L. Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport Policy*, 12, 2005. 207-220.
- BUNN, A. G.; URBAN, D. L.; KEITT, T. H. Landscape connectivity: a conservation application of graph theory. *Journal of Environmental Management*, 59, 2000. 265-278.
- CLARKE, K.; LEONARD, G. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Sciences*, 12, 1998. 699-714.
- GEURS, K.; RITSEMA VAN ECK, J. Accessibility measures: review and applications. RIVM Report n. 408505 006. Bilthoven, Holanda. 2001.
- HILLIER, B.; HANSON, J. The social logic of space. Cambridge: Cambridge University Press, 1984. 367 p.

- INGRAM, D. R. The concept of accessibility: a search for an operational form. *Regional Studies*, 5, 1971. 101-107.
- KRAFTA, R. Modelling intra-urban configurational development. *Environment and Planning B: Planning and Design*, London, 21, 1994. 67-82.
- LAMAS, J. M. R. G. *Morfologia urbana e desenho da cidade*. Lisboa: Dinalivro, 1993.
- LIU, J. et al. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 317, 2007.
- LIU, Y. *Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata*. [S.l.]: Taylor and Francis Group, 2009. 204 p.
- MILLER, J. H.; PAGE, S. E. *Complex adaptive systems: an introduction to computational models of social life*. Princeton: Princeton University Press, 2007. 263 p.
- NYSTUEN, J. D. Identification of some fundamental spatial concepts. In: BERRY, B. J.; MARBLE, D. F. *Spatial Analysis: a reader in statistical geography*. New Jersey: Prentice Hall, 1968.
- PINTO, N.; KEITT, T. Beyond the least-cost path: evaluating corridor redundancy using a graph-theoretic approach. *Landscape Ecology*, 24, 2008. 253-266.
- SARAIVA, M. V. P.; POLIDORI, M. C. *CityCell – Urban Growth Simulator (software)*. LabUrb – Laboratório de Urbanismo da FAUrb. Pelotas: UFPel. 2014.
- SOJA, E. The spatiality of social life: towards a transformative retheorisation. In: GREGORY, D.; HURRY, J. *Social relation and spatial structures*. London: Mac-Millan, 1985. p. 90-127.
- TORRENS, P. How cellular models of urban systems work. *CASA Working Papers*, London, 2000. Disponível em: <http://casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm>. Acesso em: 6 dez. 2010.
- WHITE, R.; ENGELN, G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use. *Environment and Planning A*, 25, 1993. 1175-1199.
- WOUDSMA, C. et al. Logistics land use and the city: a spatial-temporal modelling approach. *Transportation Research part E*, 44, 2008. 277-297.
- WU, J.; HOOPS, R. *Key topics in Landscape Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 297 p.
- YU, K. Ecological security patterns in landscapes and GIS application. *CPGIS Journal*, 1, n. 2, 1995. 88-102.