ISSN: 1984-8781 - Anais XVIII ENANPUR 2019. Código verificador: **dwyXz73wNinL** verificar autenticidade em: http://anpur.org.br/xviiienanpur/anais

Simulando Cenários Urbanos Futuros: modelagem de dinâmicas do uso do solo como suporte ao planejamento urbano

Autores:
Guilherme Kruger Dalcin - Unisinos - gkdalcin@gmail.com
André de Souza Silva - Unisinos - silandre@unisinos.br

Resumo:

Há um conflito entre a dinâmica das cidades contemporâneas e os instrumentos de ordenamento de seu território que existe, principalmente, porque as abordagens tradicionais de planejamento urbano não compreendem as cidades como sistemas complexos e auto organizados construídos a partir das interações de agentes locais. Para integrar tais conceitos à prática de planejamento, uma das opções é o uso de técnicas de modelagem que buscam prever a configuração futura do ambiente das cidades. Este trabalho procurou verificar se a utilização dessas ferramentas pode produzir resultados úteis à elaboração de planos e projetos. Para tanto, foram realizados estudos de casos de modelos das dinâmicas do uso do solo existentes na literatura e de suas aplicações, sendo as conclusões destas análises utilizadas para fundamentar uma proposta de método de tais recursos na prática de planejamento. Para verificar a viabilidade técnica de tal proposta, foi criado um protótipo computacional de um ambiente de modelagem. Ao fim, se verificou a utilidade dos instrumentos estudados em aspectos específicos do planejamento urbano.

SIMULANDO CENÁRIOS URBANOS FUTUROS

Modelagem de dinâmicas do uso do solo como suporte ao planejamento urbano

INTRODUÇÃO

Nas últimas quatro décadas, a população mundial cresceu 1,8 vezes, a superfície urbanizada do planeta aumentou em 150% e os habitantes de áreas urbanas passaram a corresponder a 53% do total existente, com estimativas de aumento para 75% até o ano de 2050. Em outras palavras, há cada vez mais pessoas no planeta e a maioria delas está se aglomerando em centros urbanos. Somando a isso o fato de que três quartos das emissões mundiais de dióxido de carbono são geradas em cidades, é possível definir o crescimento urbano como um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável do planeta nas próximas décadas. (BURDETT; SUDJIC, 2011; PESARESI et al., 2016).

Entretanto, os métodos tradicionais de planejamento se mostram incapazes de regular de modo eficiente o funcionamento desses crescentes centros urbanos. Isso ocorre, em parte, porque eles focam na proposição de soluções gerais para grandes escalas, desconsiderando as relações existentes na escala local, e originam planos que se colocam como entidades de controle externas ao processo de desenvolvimento urbano, quando, na realidade, são elementos que interagem diretamente com os agentes constituintes das cidades (PORTUGALI, 2004, 2008; TODES, 2012). Além disso, as abordagens convencionais têm demonstrado dificuldades em prever os impactos gerados por elas mesmas nos locais sobre os quais incidem, em incluir formas de mensurar a eficiência de suas propostas e em incentivar a apropriação de conjuntos amplos de dados sobre áreas de intervenção e seus usuários. Tais aspectos condicionam o processo projetual, limitando as suas soluções possíveis e diminuindo as chances de os planos corresponderem à proposta mais adequada para o contexto de intervenção. Assim, contribui-se para que os planos finais acabem sendo baseados em preconcepções daqueles que os realizam, os quais passam a definir problemas e soluções conforme expectativas próprias e seu domínio cognitivo da situação. (ÇALIŞKAN, 2012; PHAM; YAMAGUCHI; BUI, 2011; STONOR, 2014).

Visando a estruturação de um conjunto de ferramentas teóricas e metodológicas para investigar as dinâmicas da urbanização com maior propriedade, foi desenvolvida nas últimas décadas a denominada Ciência das Cidades (BATTY, 2013a), área de pesquisa que busca analisar o crescimento urbano com o apoio de instrumentos computacionais, geotecnologias e métricas espaciais. Dentre as iniciativas relacionadas, há uma linha de estudo específica que relaciona teorias sobre sistema complexos auto organizados ao desenvolvimento do território

urbano, procurando explicar como a configuração da cidade emerge a partir das interações locais – aparentemente caóticas – de seus habitantes entre si e com o ambiente construído ao seu redor (MITCHELL, 2009; PORTUGALI, 2004; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015; ZELLNER; CAMPBELL, 2015).

Apesar de tais estudos terem surgido há mais de duas décadas (PORTUGALI, 1997), apenas com o recente aumento da capacidade de processamento computacional se tornou possível o desenvolvimento de modelos para servirem de suporte para a aplicação de seus conceitos e teorias. Tais instrumentos se baseiam, principalmente, na definição de regras para o comportamento dos agentes urbanos, que, quando simuladas para uma grande quantidade de indivíduos, permitem a observação dos padrões de organização que surgem no panorama geral da cidade a partir das interações simuladas (BATTY; TORRENS, 2005; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). Esse auxílio computacional possibilita a simulação de diversos fenômenos relativos às dinâmicas do ambiente urbano – fluxo de pessoas, mobilidade, dinâmicas de uso do solo, economia espacial – com o objetivo de entender seu funcionamento (KOOMEN et al., 2007).

Porém, apesar do desenvolvimento ocorrido nas últimas décadas, ainda há diversos questionamentos referentes à validação e à precisão dos resultados obtidos através de modelos e simulações de estudo do ambiente urbano, bem como à complexidade de utilização dessas ferramentas. Tais aspectos constituem os principais motivos pelos quais ainda pouco se utiliza esse tipo de análise fora do ambiente acadêmico e de pesquisa. (KOOMEN et al., 2007; LEVY; MARTENS; HEIJDEN, 2016). Por outro lado, também tem surgido estudos que entendem como vantajoso o uso de tais instrumentos em aplicações práticas de planejamento (STONOR, 2014; ZELLNER; CAMPBELL, 2015), bem como projetos pioneiros que testaram sua aplicação ao longo da elaboração de planos ou projetos urbanísticos (ABOLHASANI et al., 2016; ACHARYA et al., 2017; TODES, 2012).

De modo a contribuir com tal discussão, esta pesquisa se propõe a relacionar o uso das ferramentas de modelagem e simulação ao ato de planejamento do ambiente urbano, dando especial enfoque a sua utilização para análises relativas às dinâmicas do uso do solo. A questão central que se procura responder é se, a partir de tais instrumentos computacionais, é possível obter resultados úteis para a fundamentação da prática de planejamento. Para tanto, definiu-se como objetivos de pesquisa: *a)* analisar o conjunto de variáveis geralmente utilizadas para descrever o comportamento do território e dos agentes urbanos em métodos de modelagem e simulação; *b)* definir como tais ferramentas computacionais se inserem em cada etapa do processo projetual; *c)* propor método de integração da simulação das dinâmicas do uso do solo à prática de planejamento; e *d)* elaborar protótipo de ambiente computacional de modelagem e simulação para demonstrar a viabilidade técnica do método proposto no item anterior.

Metodologicamente, este trabalho partiu da realização de estudos de caso como forma de aprofundamento do entendimento de técnicas de modelagem através da análise individual de exemplos específicos existentes na literatura. Tal etapa é dividida em duas partes: inicialmente, o referido método de pesquisa foi aplicado com o fim de produzir uma análise de métodos de simulação propostos na literatura, verificando os dados de entrada e saída utilizados, bem como a sequência de procedimentos geradores dos modelos; como

segundo passo, foi realizado outro estudo de caso, desta vez com o objetivo de averiguar como as ferramentas de modelagem podem ser inseridas na prática de planejamento urbano, verificando em quais etapas foram utilizados modelos computacionais, qual a abrangência dos dados fornecidos pela equipe de projeto, quais as formas de representação gráfica utilizadas para a apresentação dos resultados e qual a influência estes tiveram sobre a proposta final do projeto.

A partir dos conhecimentos adquiridos durante tais análises, foi proposto um método de aplicação dos instrumentos de modelagem e simulação de dinâmicas do uso do solo no planejamento urbano. Em seguida, como forma de verificar a viabilidade técnica de tal proposição, foi realizada a prototipagem de um ambiente de simulação em interface simplificada. A elaboração desses elementos se baseou no método de pesquisa denominado *Design Science Research* que, conforme Dresch (2013), consiste na atividade de realizar mudanças em um determinado sistema em busca de sua melhoria, criando um novo artefato ou melhorando um existente de modo orientado à resolução de problemas específicos. O *Design Science Research* não busca necessariamente a solução ótima, mas uma solução satisfatória para o contexto proposto, sendo a principal razão para sua aplicação a diminuição da distância entre teoria e prática, produzindo conhecimentos que podem, posteriormente, servir de referência para o aprimoramento de teorias.

Este trabalho se justifica, primeiramente, porque instrumentos de modelagem espacial podem ser utilizados para a fundamentação do debate público em torno de possibilidades projetuais, de modo a satisfazer a demanda de políticas públicas de planejamento de apoiarem suas decisões em atributos da realidade e medidas objetivas, mensuráveis em seus efeitos, legitimadas pela participação direta da sociedade (BONETT NETO, 2015).

A aplicação de tais ferramentas também permite uma revisão metodológica das abordagens tradicionais de planejamento urbano, cujo processo generativo, conforme Caliskan (2012), ainda se baseia em procedimentos lineares que pouco incentivam a profunda compreensão das relações existentes entre fatores constituintes da área de intervenção. O autor argumenta que, devido à complexidade da cidade, o planejador apenas toma consciência de grande parte dos reais problemas de um local ao tentar criar uma solução projetual para a área. Por isso, torna-se lógico transformar a tradicional sequência de etapas do processo de planejamento – análise do local, diagnóstico, prognóstico e proposta – em um método iterativo, no qual a equipe de projeto pudesse retornar a etapas anteriores sempre que houvesse a necessidade de complementar o entendimento sobre o local para o embasamento de suas propostas. Nesse contexto, as ferramentas de modelagem e simulação se apresentam como recursos que incentivam essa nova lógica de projeto, uma vez que permitem a apropriação de amplos conjuntos de informação sobre o ambiente de estudo e a rápida adaptação de diagnósticos e prognósticos a diferentes cenários de projeto.

Outro fator que justifica a pesquisa é que métodos baseados em *Big Data* desenvolvidos na última década têm possibilitado análises aprofundadas das dinâmicas do território urbano através da coleta em grande escala de dados e de seu contínuo processamento em algoritmos de análise numérica e inteligência artificial. Tais ferramentas possibilitam a descoberta de relações entre fatores que tendem a não ser visualizadas na análise humana. Por isso, estima-se que tais tecnologias poderão se tornar a base do

monitoramento de cidades, diagnosticando em tempo real as necessidades e demandas dos agentes urbanos e, se integradas a ferramentas de simulação, podendo indicar tendências futuras para os locais analisados. Desse modo, se prevê a consolidação de um sistema de suporte para a constante proposição de alterações dos instrumentos de ordenamento territorial de modo a torna-los flexíveis às modificações do território e mais responsivos às demandas imediatas da população. (BATTY, 2013b; BETTENCOURT, 2013).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Portugali (2004) descreve a cidade como um conjunto de componentes humanos que transformam o espaço através das interações entre si e com seu ambiente construído. Esses agentes, movidos por processos internos (ideias, sentimentos, conhecimentos), não necessariamente baseiam suas decisões em critérios lógicos ou racionais, uma vez que elas dependem de suas possibilidades momentâneas, limitações cognitivas e do tempo disponível. Essa limitação da racionalidade faz com que o comportamento do indivíduo seja, do ponto de vista do planejamento urbano, imprevisível. Entretanto, são justamente as interações entre tais agentes aparentemente caóticos que geram o ambiente construído da cidade, o qual, ao mesmo tempo, também influencia o comportamento dos tais agentes, criando uma cadeia de causalidade circular responsável pela evolução da cidade ao longo do tempo.

A lógica tradicional esperaria que, a partir dessa situação duplamente complexa, surgisse o caos. Porém, na realidade, se observa que o aparente caos dos agentes constituintes do sistema resulta, em uma escala mais abrangente, na emergência de um ambiente urbano com padrões de organização, sendo que tal ordem não resulta exclusivamente da ação de uma força reguladora centralizada ou de forças externas. Na verdade, a forma da cidade depende principalmente das decisões individuais de cada agente urbano somadas às decisões dos diversos órgãos governamentais e institucionais. Essa grande quantidade e diversidade de agentes urbanos – e o fato de que toda a decisão tomada seja guiada ou limitada pelas situações momentâneas existentes e pelo resultado cumulativo de decisões anteriores – resulta no fato de que, mesmo que alguns elementos da cidade reflitam as intenções de indivíduos ou organizações, a estrutura da cidade surge sem que ninguém especificamente tenha decidido sobre como ela será. (DE ROO, 2012; WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015).

A cidade pode, portanto, ser considerada um sistema complexo, adaptável e robusto, pois consegue manter sua integridade e coerência por longos períodos, mesmo quando suas partes constituintes deixam de existir – pessoas deixando a cidade, edifícios sendo demolidos, novos funcionários sendo eleitos. (ZELLNER; CAMPBELL, 2015). Todavia, essa caracterização do ambiente urbano complexo e auto organizado entra em conflito com as teorias de planejamento clássico, as quais tratam as cidades como máquinas que sempre buscam um determinado estado de equilíbrio, os planejadores como observadores externos e os planos como elementos que exercem controle externo sem serem influenciados por seus controlados. Então, sendo a cidade um sistema complexo auto organizado, ela passa a exigir instrumentos e métodos de planejamento que partam do estudo do comportamento individual dos agentes constituintes da cidade, se adaptando constantemente ao seu

comportamento, as suas demandas e às forças externas de seu ambiente (PORTUGALI, 2004, 2008).

Um dos elementos de suporte que podem ser utilizados para a elaboração de abordagens de planejamento compatíveis são as ferramentas de modelagem e simulação computacional, as quais possibilitam, a partir do teste de um determinado cenário, o entendimento da relação entre agentes, instrumentos de ordenamento territorial e a emergência de fenômenos organizados e complexos em escalas mais abrangentes. (WHITE; ENGELEN; ULJEE, 2015). A categoria de modelos relacionada com esse tipo de estudos é a denominada Modelagem Baseada em Agentes (*Agent-Based Modelling* ou ABM), na qual os indivíduos são explicitamente representados como entidades concebidas com atributos próprios e comportamento específico que descreve suas ações, podendo-se também implementar mecanismos cognitivos mais sofisticados, como memória e motivações. Esses agentes interagem entre si e com seu ambiente, originando, para cada simulação, uma configuração espacial diferente da inicial, a qual, quando analisada, permite a descoberta de relações entre os parâmetros dos agentes, seus condicionantes externos e os padrões observados na configuração espacial simulada. (SCHANK, 2010; WILENSKY; RAND, 2015).

Há dois principais tipos de modelos de ABM utilizados em pesquisas de planejamento urbano. O primeiro deles, geralmente utilizado para a representação do território, são os Autômatos Celulares. Este tipo de modelo é dividido em três elementos constituintes: i) um conjunto de células com atributos próprios que se alteram com o passar do tempo; ii) a vizinhança imediata de cada uma dessas células; e iii) um conjunto de regras de transição que definem como qualquer o valor dos atributos de cada célula devem mudar dependendo da configuração de suas células vizinhas.

O processo de modelagem se inicia com a divisão do território em células e a definição de atributos para cada um desses módulos espaciais (valor do solo, centralidade, uso). A partir dessa representação do território, é possível simular como as células se alteram conforme o sistema inteiro se modifica, e vice-versa, replicando, assim, diferentes padrões de comportamento. (BATTY, 2013a; WILENSKY; RAND, 2015). Esse princípio de funcionamento é ilustrado pela Figura 1, que utiliza como exemplo a estrutura conhecida como “Jogo da Vida” (MITCHELL, 2009), cuja ideia é que, partindo de um estado inicial arbitrário, uma célula torne-se preenchido ou vazia dependendo da quantidade de células preenchidas adjacentes a ela.

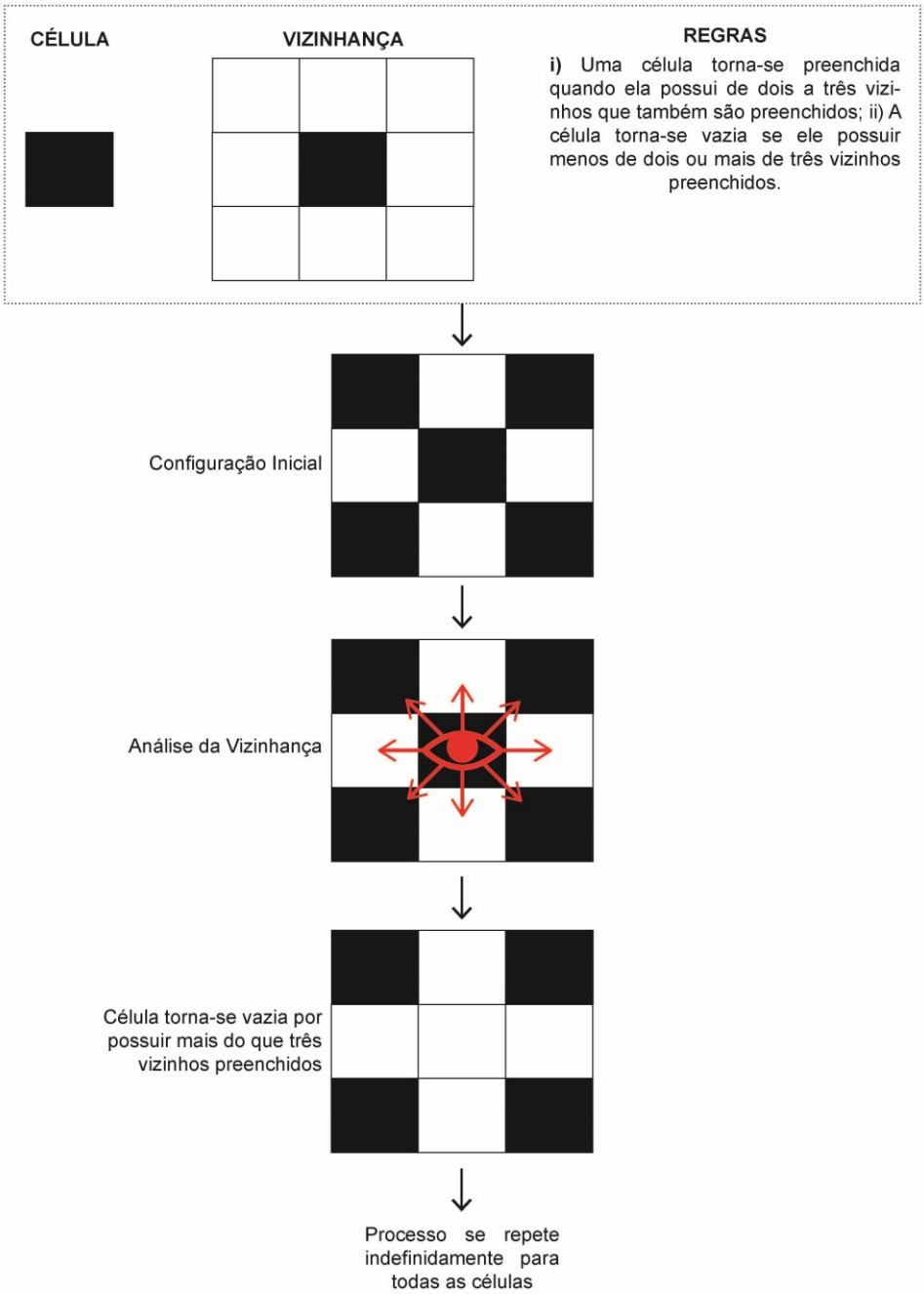

Figura 1- Funcionamento de um autômato celular. Fonte: elaboração dos autores a partir de dados de Mitchell (2009).

O segundo tipo de modelo relacionado com o planejamento urbano são os denominados Modelos Baseados em Agentes, a qual apresenta apenas dois elementos constituintes: células imóveis, representando o ambiente físico, e agentes móveis, representando qualquer tipo de entidade urbana autônoma (pessoas, famílias, empresas). Esse tipo de modelagem parte da definição de regras de comportamento desses agentes, os quais se tornam, então, livres para se movimentar no espaço de análise e se relacionar com outros agentes e com o ambiente. Ao longo da simulação, verifica-se como os agentes se distribuem espacialmente e como seus atributos e os do território mudam devido às interações ocorridas (LEVY; MARTENS; HEIJDEN, 2016; WILENSKY; RAND, 2015). Tal lógica de funcionamento é ilustrada na Figura 2.

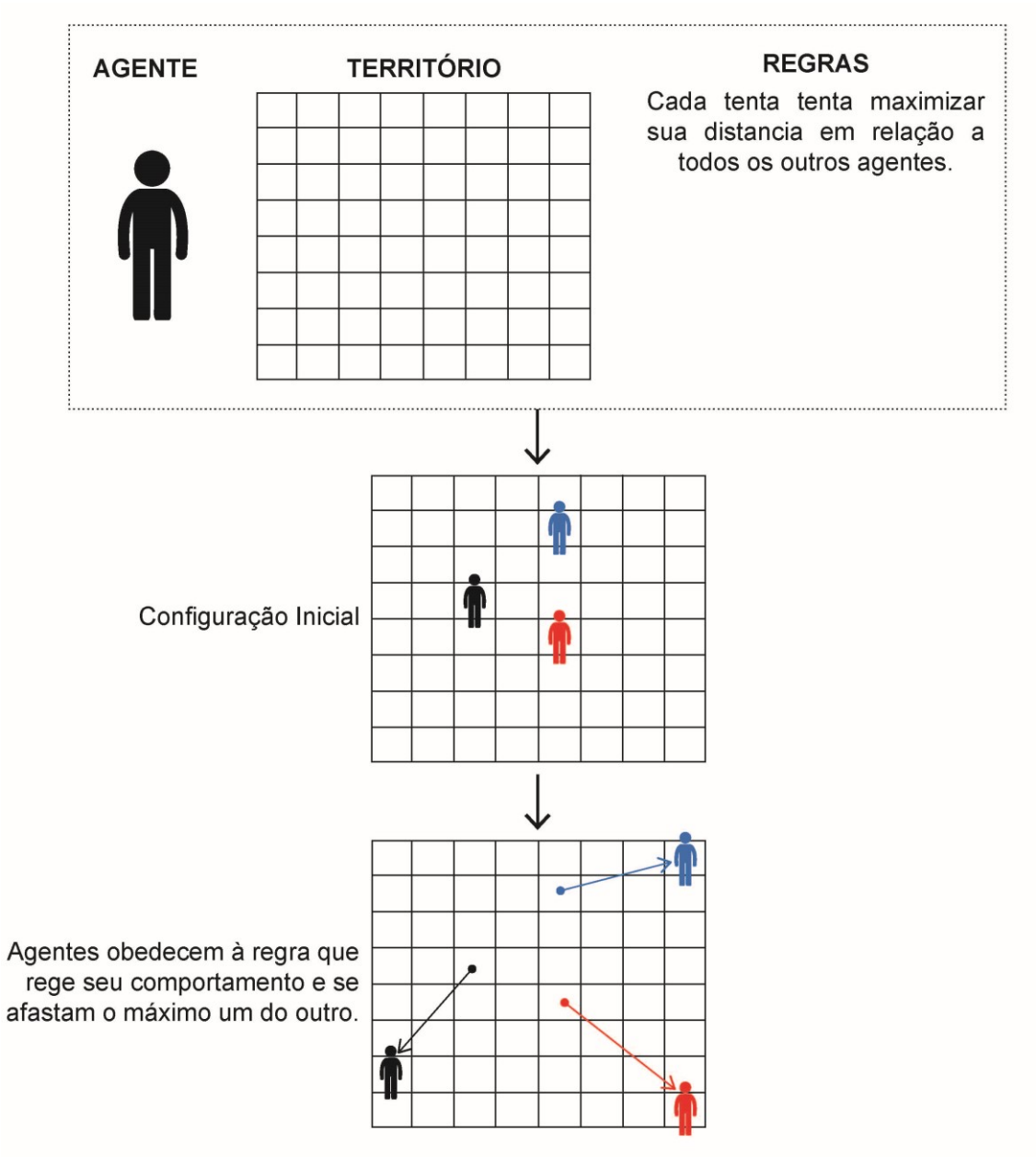

Figura 2- Funcionamento de um modelo baseado em agentes. Elaboração dos autores a partir de dados de Wilensky e Rand (2015).

Ambas essas técnicas de modelagem podem ser utilizadas para a simulação de dinâmicas do ambiente urbano a partir da interação entre agentes locais e território, sendo, inclusive, comum sua associação: os autômatos celulares sendo utilizados para representar o território, enquanto a população urbana é representada por agentes que se movem livremente sobre essas células. Devido à diversidade de fatores influentes na construção de cidades, essa elaboração de modelos é, em geral, realizada de acordo com o tema pesquisado e o fenômeno a ser observado. Portanto, para que aspectos mais profundos da utilização de modelos e simulação sejam analisados, tornou-se necessária a definição de um tópico específico de modelagem para o presente estudo, sendo escolhido o tema das dinâmicas de usos do solo.

As alterações dos usos do solo representam um processo complexo e dinâmico que depende da interação entre o ambiente natural, o construído e os agentes humanos. Devido a seus impactos diretos nas condições ambientais, este é um fenômeno bastante estudado pela literatura, o que também ocorre porque, em regiões densamente povoadas, as dinâmicas de uso do solo são uma expressão da pressão do contínuo processo de urbanização sobre os cada vez mais escassos espaços não-urbanizados ou subutilizados. (KOOMEN et al., 2007, 2015). O uso de simulações relacionadas a tal tema – além de apoiar políticas de planejamento na informação do debate ao redor de decisões projetuais (BRESSERS; EDELENBOS, 2014; ZELLNER; CAMPBELL, 2015) – pode contribuir para o entendimento dos fatores que, no passado, originaram a configuração atual de usos de um sistema urbano ou para a previsão sobre o desenvolvimento futuro de uma área sob diferentes condições. Esse tipo de análise é uma forma eficaz de antecipar mudanças ou identificar áreas que precisam de mais atenção para a intervenção política em tempo hábil. (AHMED; BRAMLEY, 2015).

ESTUDOS DE CASO

Os modelos de dinâmicas do uso do solo escolhidos foram produzidos recentemente e foram escolhidos por abordarem diferentes questões dentro do tema de dinâmicas do uso do solo: Ahmed e Bramley (2015) tentaram prever o crescimento da mancha urbana da cidade de Dhaka, em Bangladesh; Tsang e Leung (2011) procuraram prever alterações de uso do solo através de critérios econômicos; e Li e outros (2013) construíram um modelo que relaciona a movimentação populacional de uma região da China à localização de empresas com grande oferta de empregos. Essa diferença de abordagem dos objetos analisados permitiu que se observasse isoladamente como cada autor calcula, para a resolução de seu problema específico, a evolução ao longo do tempo de variáveis individuais (densidades populacionais, alteração do custo do solo, crescimento de áreas urbanas) de forma a contribuir para a sua inserção em uma abordagem integrada elaborada na proposta de método a ser apresentada no capítulo seguinte.

Adicionalmente, para verificar como ocorreu a aplicação de técnicas de modelagem em uma aplicação prática, foi analisada a elaboração do plano estrutural da cidade de Jeddah, na Arábia Saudita, conforme descrito por Acharya et al. (2017). Tal exemplo foi escolhido por ser a descrição mais completa encontrada na literatura e, apesar de não utilizar um modelo baseado em agentes ou autômatos celulares, o modelo elaborado com base em medidas de sintaxe espacial apresenta características similares à aplicação das referidas técnicas e também trata do tema das dinâmicas de usos do solo.

O primeiro modelo analisado (AHMED; BRAMLEY, 2015) se baseia em um autômato celular no qual cada célula é caracterizada como sendo urbanizada ou rural. Ele foi elaborado com o objetivo de prever o crescimento da área urbana da cidade de Dhaka, em Bangladesh, para o período entre os anos de 2015 e 2025. Para tanto, como regras da transformação das células, os autores utilizaram três camadas de informações consideradas relevantes para a transformação de uma área de rural para urbana: relevo, acessibilidade da malha viária e zoneamento do plano regulador municipal.

Os autores apresentam os resultados da simulação na forma de mapa gerado diretamente do estado final do autômato celular (Figura 3). Nele, as áreas urbanizadas são representadas na cor preta, áreas rurais na cor cinza e áreas onde a ocupação urbana é proibida pela legislação na cor branca. A partir dessas representações, é possível observar a necessidade que a cidade de Dhaka teria de ocupar as áreas restritas à urbanização caso as taxas de crescimento populacional se mantivessem constantes. No caso da diminuição de tais taxas, a situação é amenizada, visto que, nesse caso, a mancha urbana cresce de maneira linear.

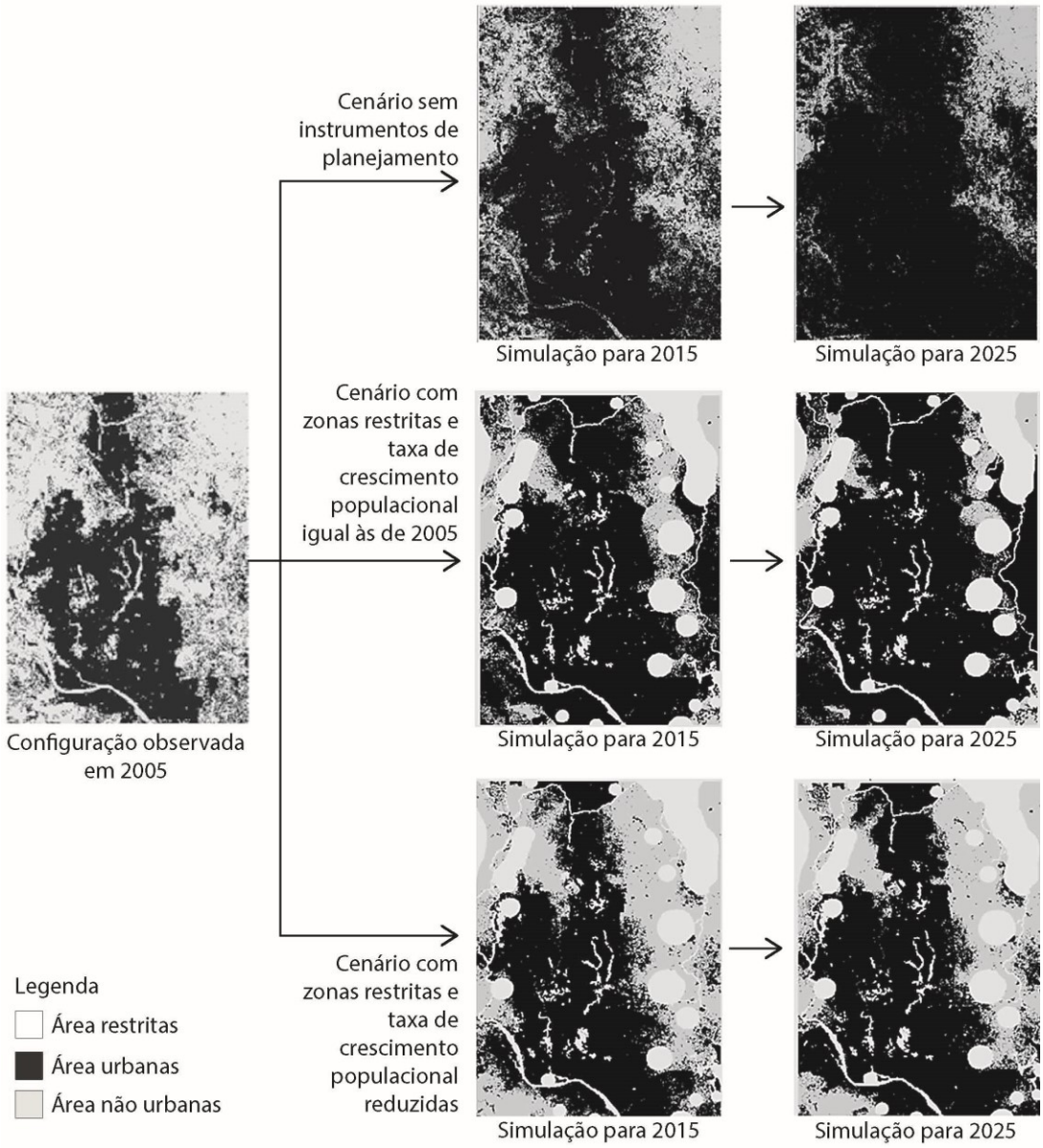

Figura 3- Resultados das simulações de Ahmed e Bramley (2015).

No segundo modelo analisado, Tsang e Leung (2011) propõem um autômato celular que visa prever prováveis alterações no uso do solo conforme as regras da teoria econômica do denominado "*gap* de aluguel". Para a aplicação dessa teoria, é calculada a diferença entre a quantia que poderia ser capitalizada no terreno por seu uso considerado mais adequado e

a renda de fato capitalizada pelo proprietário da terra com o atual uso do local. Se a diferença entre os dois valores for suficientemente grande, considera-se a conversão do uso do lote como atrativa economicamente e, portanto, provável de ocorrer.

Para elaborar as regras que descrevem a relação entre o "*gap* de aluguel" e os usos do solo, os autores utilizam parâmetros que descrevem efeitos de duas categorias (Tabela 1): os espaciais, compostos pela medida de acessibilidade e por características específicas de cada tipo de atividade, e os econômicos, compostos por medidas descritivas do estado geral da economia local.

PARÂMETROS ESPACIAIS (EFEITO LOCAL)
Acessibilidade: mede a facilidade de se alcançar o restante da malha a partir de cada um de seus pontos;
Aspectos demográficos: características específicas de cada grupo populacional, como, por exemplo, que famílias de renda dupla preferem estar próximas de seu local e trabalho, ao mesmo tempo que habitante mais jovens preferem um estilo de vida alternativo com fácil acesso a centros de compras;
Aspectos das áreas residenciais: edificações residenciais tendem a ser construídas de forma agrupada para reduzir os custos relativos à infraestrutura;
Aspectos das áreas comerciais: edificações comerciais tendem a se organizar em configurações policêntricas;
Aspectos populacionais: áreas mais populosas apresentam maior demanda por zonas residenciais.
PARÂMETROS ECONÔMICOS (EFEITO GLOBAL)
Velocidade da deriva da taxa de juros: indicador para prever o custo futuro do capital;
Taxa de juros de longo prazo esperada: pode ser entendida como a expectativa adaptativa dos investidores;
Volatilidade da taxa de juros: representa a incerteza futura;
Velocidade de mudanças do PIB per capita: reflete a taxa de crescimento da economia;
PIB esperado de longo prazo per capita: depende das condições econômicas e representa o nível de tecnologia e capital humano em uma cidade;
Volatilidade do PIB per capita: representa a incerteza e a flutuação em uma economia.

Tabela 1- Parâmetros das regras do autômato celular. Elaboração dos autores a partir de dados de Tsang e Leung (2011)

Através da simulação desse modelo, previsões para a evolução futura da configuração de usos do solo da área de estudo foram feitas para o período entre os anos de 2011 e 2016. Nos resultados (Figura 4), os autores identificam áreas de uso rural, industrial ou governamental que apresentam alta probabilidade de se tornam residenciais ou comerciais devido à crescente urbanização do país da área analisada, China, impulsionada pelo constante crescimento populacional local.

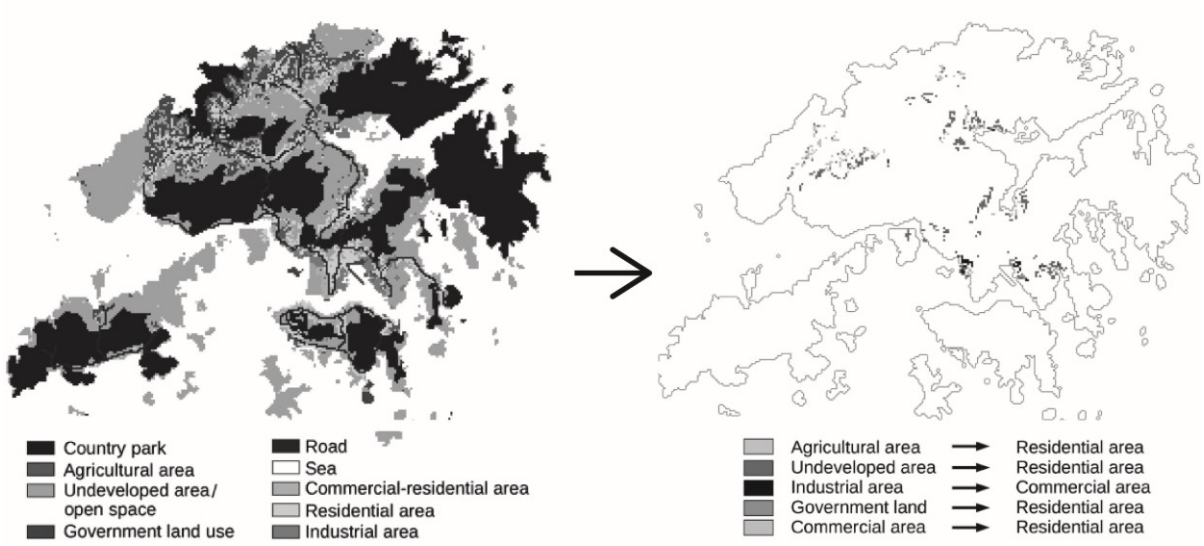

Figura 4- Resultados das simulações de Tsang e Leung (2011).

O terceiro modelo analisado (LI et al., 2013) utiliza um modelo baseado em agentes para abordar a relação entre a distribuição espacial da população e a localização dos grandes polos de emprego. O argumento dos autores é que setores da economia com grande demanda por mão de obra não especializada influenciam a migração populacional de indivíduos em busca de trabalho, fenômeno este que pode alterar significativamente o total de habitantes de cidades através da inauguração ou fechamento de indústrias.

O modelo recebe como dados de entrada a localização dos grandes empreendimentos e a distribuição espacial da população caracterizada como alvo para tais vagas de trabalho. Simula-se então como os grupos populacionais se movimentam no território sob diferentes cenários de distribuição das ofertas de emprego. Tal simulação se baseia no conjunto de regras descrito na Figura 5: os indivíduos que procuram trabalho migram para diferentes cidades e analisam se o conjunto de oportunidades existentes no local parece adequado; baseando-se na resposta para esta questão, é tomada a decisão de permanecer nessa cidade ou migrar para outra.

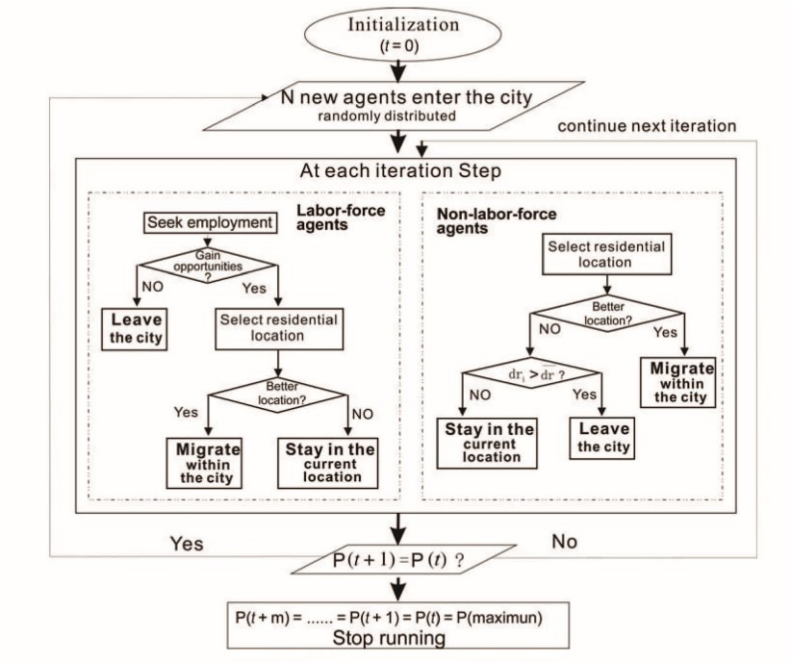

Figura 5- Regras descritivas do comportamento dos agentes do modelo de Li et al. (2013).

O modelo foi testado em um estudo de caso para *Dongguan*, metrópole industrial chinesa localizada no Delta do Rio das Pérolas. O resultado da simulação (Figura 6) indicou que o aumento das empresas do setor manufatureiro na região resultaria em um significante crescimento populacional. Entretanto, o desenvolvimento esperado para as indústrias locais, com o passar do tempo, elevaria o patamar desenvolvimento tecnológico e alteraria o perfil do trabalhador contratado, o que faria com que muitos dos indivíduos que migraram para o local devido às ofertas de trabalho tenham que se realocar espacialmente, gerando uma nova onda de movimentação populacional.

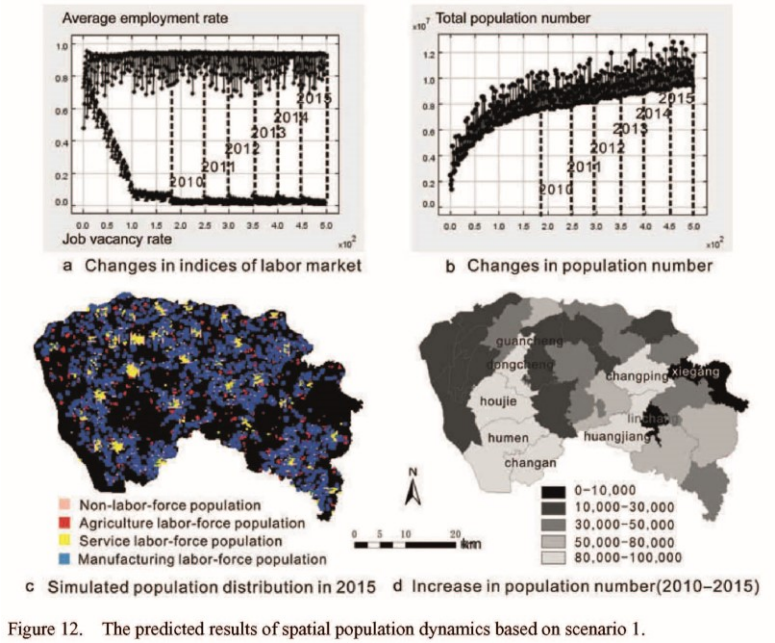

Figure 12. The predicted results of spatial population dynamics based on scenario 1.

Figura 6- Resultados das simulações realizadas por Li et al. (2013)

O último caso analisado foi o da elaboração do Plano Estrutural de Planejamento Urbano Integrado da cidade de Jeddah, na Arábia Saudita, conforme descrito por Acharya et al. (2017). O referido plano teve o objetivo de propor diretrizes para o desenvolvimento da estrutura urbana da cidade de modo que ela pudesse acomodar o crescimento populacional de três milhões de habitantes que se previa para os vinte anos seguintes. Tal planejamento deveria definir a localização de centros municipais que concentrariam maiores densidades populacionais, oportunidades de emprego e instalações comunitárias, juntamente com uma estratégia de transporte público para a cidade.

Para fundamentar as decisões projetuais desse processo, um Modelo Urbano Integrado foi construído, combinando dados relativos ao uso do solo, à população, ao emprego e ao transporte público. Ele se baseou em uma plataforma de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), utilizando uma representação da malha viária municipal para vincular espacialmente os dados obtidos das diversas camadas de dados. O resultado que ele fornece é o cálculo de medidas de configuração urbana – gerado a partir de processamento no *software Depthmap* – cuja análise permite a mensuração das alterações ocorridas em cada cenário projetual testado, verificando se as diretrizes projetuais estão de acordo com a realidade e com os objetivos estipulados pelo Plano Estrutural.

Tal instrumento foi utilizado em todas as etapas do processo projetual, começando pela etapa de levantamento dos dados, na qual a base cartográfica do modelo foi utilizada para a definição de módulos espaciais de compatibilização das diferentes camadas de informação. Em seguida, nas etapas de diagnóstico e prognóstico, os dados de densidade populacional e de oferta de empregos foram utilizados como parâmetros para o cálculo de medidas descritivas da adequação de cada trecho de via a usos específicos.

Desse processo computacional, foram extraídas duas medidas resultantes, denominadas pelos autores de índice de atividade urbana e índice de acessibilidade. A primeira relaciona a quantidade de atividades realizadas em um trecho de rua com o número de vezes que ele é usado para ligar outros pontos da malha viária, utilizando como ponderação o número de habitantes do local e suas vagas de emprego. Por sua vez, o Índice de Acessibilidade analisa as conexões dentro da rede viária para identificar áreas mais fáceis de se chegar a partir de todos os outros locais. Enquanto tal medida é utilizada para representar áreas mais adequadas para implantação de centros municipais com densidades de população e emprego acima da média, o incide de atividade urbana indica áreas com maior potencial para desenvolvimento de comércios.

Na etapa de proposição, a utilização dessas medidas para indicar locais compatíveis com os diferentes elementos cuja alocação deveria ser prevista pelo Plano Estrutural permitiu que a equipe projetual chega-se a uma proposta de configuração municipal tida como a mais adequada. Para apresentar tais resultados em termos claros e precisos, foram elaborados mapas explicativos do impacto das propostas em diferentes partes da cidade.

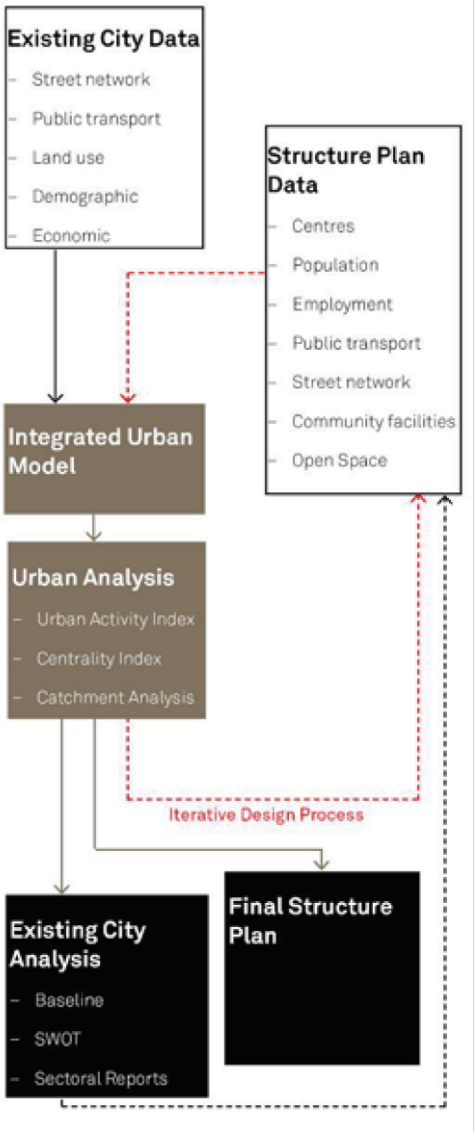

Figura 7- Sequência do processo projetual do Plano de Jeddah. Fonte: Acharya et al. (2017).

Analisando todo o processo de elaboração do Plano Estrutural de Jeddah (representado de modo diagramático na Figura 7), verifica-se que o Modelo Urbano Integrado possibilitou que o processo projetual se tornasse iterativo, de modo que a equipe de trabalho pudesse evoluir de maneira cíclica pelas etapas projetuais de manipulação do modelo, análise do cenário urbano e tentativa de solução até que alcançasse uma proposta entendida como a final, momento no qual se atingia a última do processo, que envolvia a finalização do plano e sua apresentação. Além disso, em suas conclusões, os autores argumentam que o Modelo Urbano Integrado permitiu que os componentes de diferentes departamentos dentro de uma administração pública testassem o impacto de propostas simultaneamente, compartilhando os resultados entre si. Isso possibilitou que alterações fossem avaliadas rapidamente e que a equipe de projeto se comunicasse com clareza com os gestores públicos e com a população sobre o porquê de um cenário projetual ter sido escolhido para ser desenvolvido.

O estudo dos casos apresentados nesta seção permitiu a inferência de algumas características referentes à elaboração e à utilização de modelos computacionais das

dinâmicas de uso do solo. O primeiro aspecto a ser observado é que os modelos em questão tendem a ser uma simplificação da realidade, orientada para levar em conta apenas fatores que possuem relevância para a resolução do problema em questão. Mesmo assim, para representar de forma qualificada o fenômeno estudado, é comum a consideração de um conjunto multidisciplinar de parâmetros que tem influência sobre o objeto estudado e definição de uma abrangência além de sua vizinhança imediata, muitas vezes podendo alcançar municípios vizinhos ou escalas até maiores.

Em segundo lugar, uma vez que a modelagem por agentes exige a diferenciação dos diferentes indivíduos representados e visto que é impossível realiza-la na escala individual, os modelos levam consideram tais especificidades através da agregação dos agentes em grupos populacionais. Dentre as diferentes medidas que poderiam ser utilizadas para caracterizar esses conjuntos, observa-se que aqueles referentes à faixa de renda a qual pertence o indivíduo é o parâmetro que descreve de forma mais recorrente o seu comportamento, pois o seu poder econômico acaba sendo fator determinante para a definição de seu local de residência na cidade.

Da mesma forma, para descrever o território urbano, os modelos estudados utilizam medidas que descrevem o custo do solo e suas vantagens locacionais. Entretanto, devido à dificuldade de se estimar a evolução de tais atributos ao longo do tempo para uma simulação, eles tendem a ser relacionados a medidas de configuração urbana, principalmente centralidade e acessibilidade, as quais podem ser recalculadas para cenários urbanos futuros e também servem como descrição das vantagens espaciais existentes em cada ponto do território conforme diferentes olhares (POLIDORI; KRAFTA, 2005; ZECHLINSKI, 2013).

Em relação à aplicação prática de instrumentos de modelagem, observa-se como tais instrumentos foram utilizados de maneiras diferentes em cada etapa do processo projetual:

- Na etapa de levantamento de dados, eles são utilizados como base cartográfica padrão para a inserção das diferentes camadas de informação;
- Na etapa de diagnóstico, ele contribui para a identificação do problema de projeto através;
- Na etapa de prognóstico, a função dos modelos é possibilitar a simulação de diferentes cenários, visando descobrir qual resolve de maneira mais eficiente o problema projetual anteriormente observado;
- Finalmente, na etapa de proposta, o modelo tem a função de validação da versão final do plano e de contribuir para sua representação gráfica em forma de mapa explicativo.

Visto essa pluralidade de usos que os instrumentos de modelagem apresentam ao longo do processo projetual, especula-se que a integração de todas essas funcionalidades em uma mesma interface permitiria uma maior integração dos diferentes estágios de desenvolvimento projetual entre si. Isso incentivaria a iteratividade do processo, uma vez que, ao manter o mesmo instrumento de projeto ao longo de todo a sua elaboração, se tornaria mais fácil o retorno a etapas anteriores de trabalho para depois avançar novamente a estágios posteriores.

PROPOSTA DE MÉTODO

A partir do referencial teórico e dos estudos de caso elaborados, foi estruturada uma proposta de método para a aplicação de ferramentas de modelagem e simulação de dinâmicas de uso do solo na prática de planejamento urbano. Ela foi baseada nos conceitos de complexidade e auto organização aplicados a sistemas urbanos e na tentativa de favorecer a iteratividade do processo projetual. Portanto, tentou-se integrar a utilização dos instrumentos de modelagem a todas as etapas do processo projetual, propondo maneiras específicas de aplicação em cada uma. A seguir, é apresentado o método proposto, com a descrição das diretrizes de aplicação elaboradas para cada etapa projetual.

Na etapa de levantamento de dados, além da obtenção da base de informações que será utilizada no restante das etapas de projeto, é realizada a identificação prévia das variáveis de interesse para o problema em questão. Neste trabalho, são considerados os parâmetros observados nas etapas de pesquisa anteriores como sendo aqueles com influência mais relevante para a análise das dinâmicas de uso do solo. Portanto, para a descrição das características do território, sugere-se considerar a utilização de medidas de configuração urbana, tais como centralidade e acessibilidade – conforme calculado por Zechlinski (2013) – para descrever as potencialidades e privilégios dos diferentes pontos de sua área de abrangência. Enquanto que, para a descrição dos grupos populacionais, se propõe a sua diferenciação através de suas características econômicas, utilizando para essa implementação os dados de habitantes por faixa de renda conforme (IBGE, 2011).

Entretanto, as regras que regem as interações entre grupos populacionais devem ser desenvolvidas caso a caso. Em situações práticas, deve-se realizar dinâmicas de participação popular onde seja possível evidenciar os desejos e motivações que estão por trás da tomada de decisões dos agentes que compõem cada grupo populacional participante do processo de desenvolvimento urbano, conforme é sugerido por Hewitt, Delden e Escobar (2014). Entretanto, pode-se definir como padrão inicial que tais regras provavelmente levarão em conta o quanto cada grupo populacional aceita estar próximo dos outros grupos ou tipos de atividade, característica esta que não aparece explicitamente nos exemplos citados anteriormente, mas que é analisada por Santos e Polidori (2017). Já em relação à interação entre agentes e território, pode-se considerar como padrão a consideração do valor do custo do solo máximo que cada grupo pode ou deseja ter (calculado indiretamente através das medidas de centralidade e acessibilidade), bem como características como distância mínima a determinadas atividades e níveis exigidos de centralidade. Outros dados que podem ser levantados para situações específicas são aqueles relacionadas com limitações ou incentivos previstos pela legislação de ordenamento territorial local, a taxa de crescimento populacional, o relevo e a proximidade a oportunidades de empregos. Um resumo dos parâmetros e medidas propostos para a elaboração de um modelo de dinâmicas do uso do solo é apresentado na Tabela 2.

Elemento descrito	Parâmetros de descrição
Território urbano	**Centralidade e Acessibilidade:** medidas de configuração urbana que podem representar a adequação do espaço para usos específicos e das quais pode-se inferir o custo do solo de um ponto da estrutura urbana;

(Autômato Celular)	**Políticas de planejamento urbano:** incentivo ou proibição à ocupação de determinada área;
	Proximidade ao Emprego e à Infraestrutura: variáveis de qualidade do espaço que podem incentivar o estabelecimento de determinados grupos da população no local;
	Relevo: dependendo do contexto da cidade, pode representar um incentivo à ocupação (áreas mais protegidas de inundações) ou um obstáculo à urbanização (áreas mais íngremes são mais custosas de serem ocupadas);
Grupos Populacionais (Agentes)	**Poder econômico:** descrição da capacidade do indivíduo de dar conta do valor do custo do solo onde ele reside;
	Uso do solo: tipo de atividade associada (residencial, comercial, industrial).

Tabela 2- Parâmetros propostos para a descrição dos elementos de modelos.

A etapa de levantamento de dados é terminado, com a espacialização das informações de interesse em uma base padronizada, com escalas de desagregação compatíveis entre os diferentes tipos de dados e configurações de projeção das coordenadas geográfica semelhantes, conforme observado em Acharya et al. (2017).

A etapa de diagnóstico, em geral, tem como objetivo a definição do problema de projeto a partir da visualização conjunta das camadas de informação disponíveis. Um método comumente associado a tal tipo de análise é o da Análise Multicritério, tipicamente realizado em Sistemas de Informação Geográfica através da técnica de Álgebra de Mapas (Figura 8). Tal processo atualmente é realizado em plataformas SIG; entretanto, seria conveniente que ele pudesse ser também realizado no mesmo ambiente de manipulação do modelo de usos do solo, de modo a cumprir com a diretriz anteriormente definida de incentivar a iteratividade do processo projetual. Além disso, a etapa de diagnóstico também pode ser utilizada para a calibração do modelo, realizada através da simulação da evolução da cidade de uma época a outra no passado. Uma vez que tal processo também envolve a sobreposição de dados sobre a área de intervenção, é possível utilizar tal reconstrução também como forma de entender os fatores de maior influência na evolução da cidade, inferindo a partir disso os seus problemas que são de ordem estrutural ou questões pontuais.

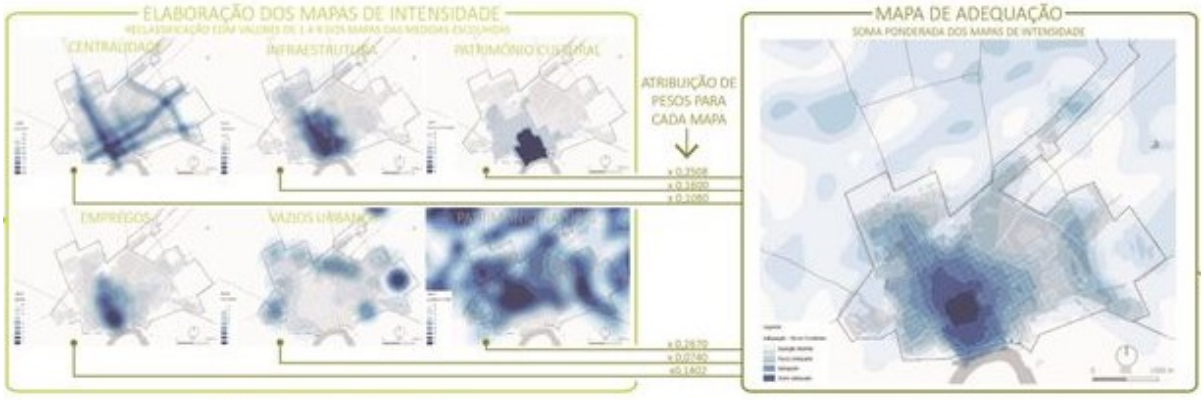

Figura 8- Elaboração de mapa de adequação. Fonte: DALCIN et al. (2017).

Na etapa de Prognóstico, os métodos de modelagem e simulação são utilizados para a criação e teste de cenários de projeto orientados à resolução dos problemas definidos na etapa de diagnóstico. Tal simulação é realizada a partir das camadas de dados que descrevem a situação atual da área de intervenção complementadas pelas modificações propostas para cada cenário.

Entretanto, antes da execução das simulações, é necessário criar, para cada elemento do modelo – território, representando através de autômatos celulares, e grupos populacionais, representados através de agentes – um conjunto de regras que descreverá sua transformação ao longo da simulação. Conforme visto anteriormente, tal elaboração de regras depende do objetivo que o modelo visa cumprir. Entretanto, de forma simplificada, é possível realizar um levantamento descrevendo, para cada atributo dos agentes urbanos ou do território, o efeito o aumento de cada um dos outros atributos gera nele: por exemplo, se o valor da Acessibilidade aumentar em determinado local e se considerar que isso torna ele mais atrativo para um determinado grupo populacional, então a regra de comportamento de ambos considerará tal correlação positiva.

Após a definição dessas regras de comportamento, é possível realizar um conjunto de simulações e observar as alterações ocorridas na configuração global da área de intervenção. Para cada cenário, analisando as variações das medidas numéricas gerais do modelo em conjunto com o posicionamento final dos agentes, é possível inferir os possíveis efeitos que cada proposta projetual terá sobre o local de estudo através de uma comparação objetiva. Conforme Hewitt, Delden e Escobar (2014), a equipe de projeto deve, então, levar os resultados dos cenários que melhor resolvem o problema de trabalho para discussão com os *stakeholders* interessados. Nessa dinâmica, seria possível observar a opinião da população e dos gestores públicos sobre a validade de cada proposta e entrar em consenso em relação aos elementos de cada cenário que deveriam ser levados adiante para a elaboração de uma proposta final. Em caso de verificação da incompatibilidade dos resultados com a realidade, a equipe de projeto deve retornar a etapas anteriores do processo.

Na etapa de proposta final, prevê-se que a equipe de projeto realize adequações ou complementações ao cenário simulado e considerado como mais eficiente, uma vez que os resultados obtidos a partir da modelagem computacional podem apresentar falhas devido à qualidade do banco de dados utilizado ou a fatores difíceis de serem traduzidos a partir de um resultado numérico. Portanto, esta etapa permite que os planejadores realizem modificações nos cenários projetuais a partir de seu conhecimento próprio.

Porém, para ser validada ante aos diversos *stakeholders* interessados, a proposta final deve ser apresentada de forma clara e objetiva para que mesmo indivíduos leigos possam ter condições de registrar suas impressões. Dessa forma, recomenda-se a apresentação de mapas contendo a síntese dos resultados obtidos na simulação – uma sobreposição geral do estado final de todos os parâmetros utilizados para as simulações em cada cenário – bem como mapas individuais representando individualmente as alterações observadas para cada parâmetro modelado, explicitando as mudanças realizadas pela equipe de projeto na fase posterior às simulações. Caso haja divergências entre o conteúdo dessa proposta final com a realidade ou com as diretrizes iniciais do projeto, há a possibilidade de retornar a etapas

anteriores de processo, seguindo os princípios de iteratividade propostos para o método aqui apresentado.

ELABORAÇÃO DE PROTÓTIPO

Com o objetivo de demonstrar a viabilidade do método proposto, foi elaborado um protótipo simplificado de interface de modelagem que permitisse: *a)* o carregamento de informações referentes a usos do solo a partir de arquivos de uma aplicação de SIG, *b)* a transformação de tais dados na situação inicial de um modelo, *c)* a execução da simulação desse modelo e *d)* a apresentação dos resultados obtidos em formato gráfico e numérico. Tais funcionalidades correspondem a uma parte dos itens propostos no capítulo anterior; sendo, entretanto, justamente aquelas de difícil realização em um *software* de SIG.

O referido protótipo foi elaborado no ambiente de desenvolvimento denominado *NetLogo*, que permite a programação de modelos baseados em agentes ou autômatos celulares em uma estrutura de interface pré-programada. O modelo elaborado procura simular como se altera a distribuição da população no território tendo em vista os requisitos de cada grupo populacional, o custo do solo e também a distribuição das atividades geradoras de empregos. Todavia, o comportamento desses diferentes elementos não foi desenvolvido a ponto de ser validado como representativo da realidade, pois o objetivo do protótipo desenvolvido para este estudo era representar simplificadamente elementos da realidade de forma a avaliar a viabilidade técnica dos instrumentos de modelagem e simulação conforme os requisitos de cada etapa do processo projetual. Portanto, o modelo foi elaborado baseando-se em elementos concebidos por outros autores, como a relação entre localização das vagas de emprego e a movimentação da população vista em Li et al. (2013), a diferenciação dos agentes em classes sócio econômicas semelhante ao proposta por Santos e Polidori (2017) e a atribuição de valores de custos do solo para cada ponto do território conforme Tsang e Leung (2011).

Uma vez que não foi possível integrar todas as etapas do processo projetual ao ambiente prototipado, as etapas de levantamento de dados e diagnóstico seriam realizadas em *software* de SIG e as camadas de informação geradas seriam exportadas para o software *NetLogo* na etapa de simulação de cenários. Tais camadas exportadas correspondem à localização dos estabelecimentos comerciais, à distribuição da população no território conforme sua classificação por sua faixa de renda conforme (IBGE, 2011) e a indicação se aquele ponto do território pode ser urbanizado ou não.

Tanto as células de subdivisão do território, quanto os diferentes tipos de agentes possuem atributos e regras de comportamento pré-definidos. Para o território, computa-se apenas o valor do solo em cada local, calculado de forma indireta a partir da soma de indivíduos em sua proximidade. Enquanto que os agentes possuem como atributo a faixa de valor do solo que eles são capazes de pagar, a quantidade de agentes de outras classes com o qual ele está disposto a conviver e a quantidade de oportunidades de emprego mínima que eles desejam ter em suas proximidades. O cálculo de tais atributos para cada agente em cada iteração indica se é mais vantajoso para o agente permanecer onde ele está ou alterar sua posição. Entretanto, a cada iteração, um teste de aleatoriedade é realizado para verificar se o

ele irá agir de acordo com a situação mais vantajosa para si ou não. Após todos os agentes se moverem, é atualizado o valor de custo do solo de cada módulo do território e o processo todo se repete de forma iterativa até que o modelo alcance um estado de equilíbrio.

Toda a evolução da distribuição de agentes e mudanças do custo do solo pode ser acompanhado através da representação gráfica do modelo, no qual os agentes são representados por pontos coloridos e as divisões do território são representadas por módulos quadrados ao fundo da representação, cromatizados conforme o seu valor de solo correspondente. Do mesmo modo, a alteração dos valores numéricos de medidas do modelo pode ser acompanhada através dos gráficos disponibilizados na interface do ambiente *NetLogo* (Figuras 9 e 10).

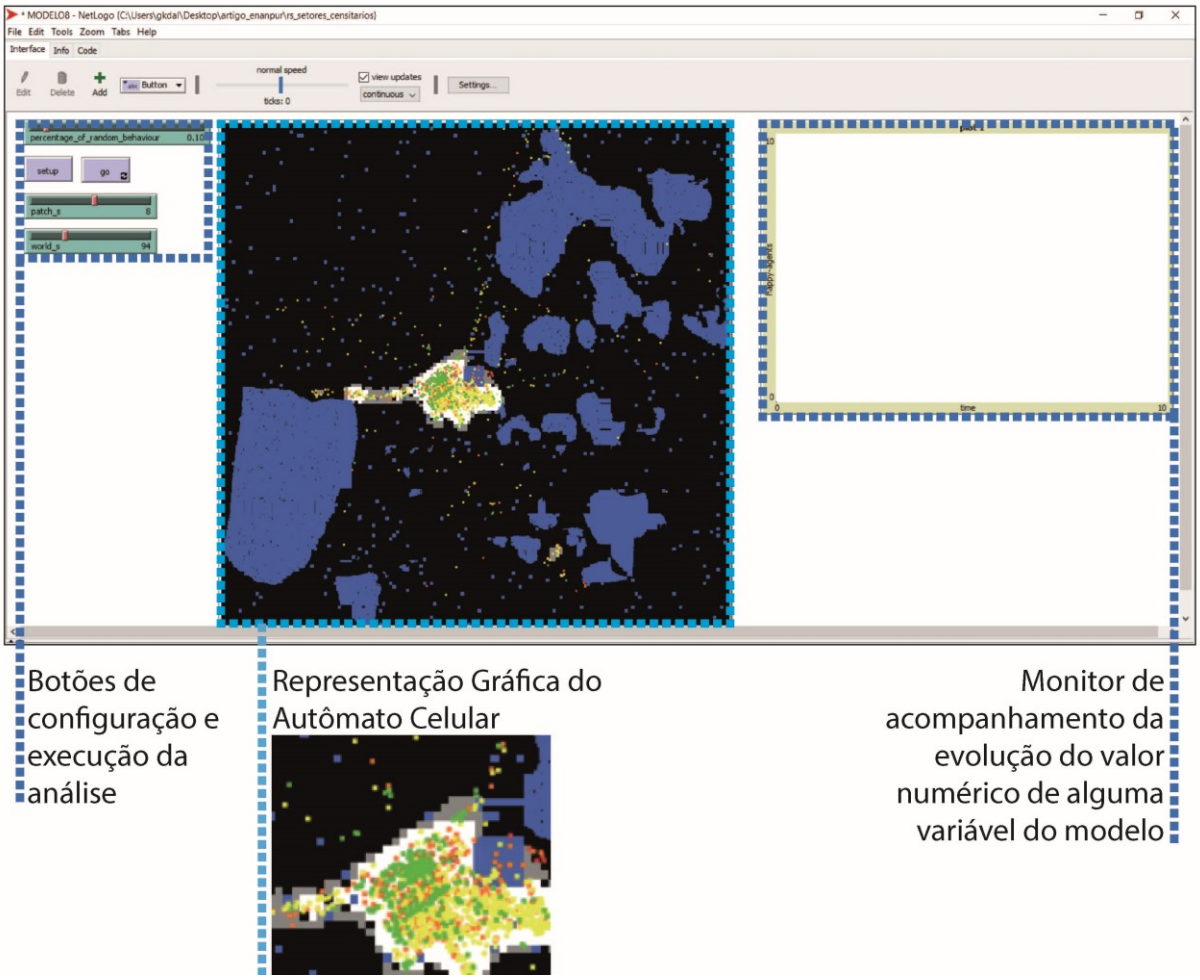

Figura 9- Interface do ambiente de modelagem programado.

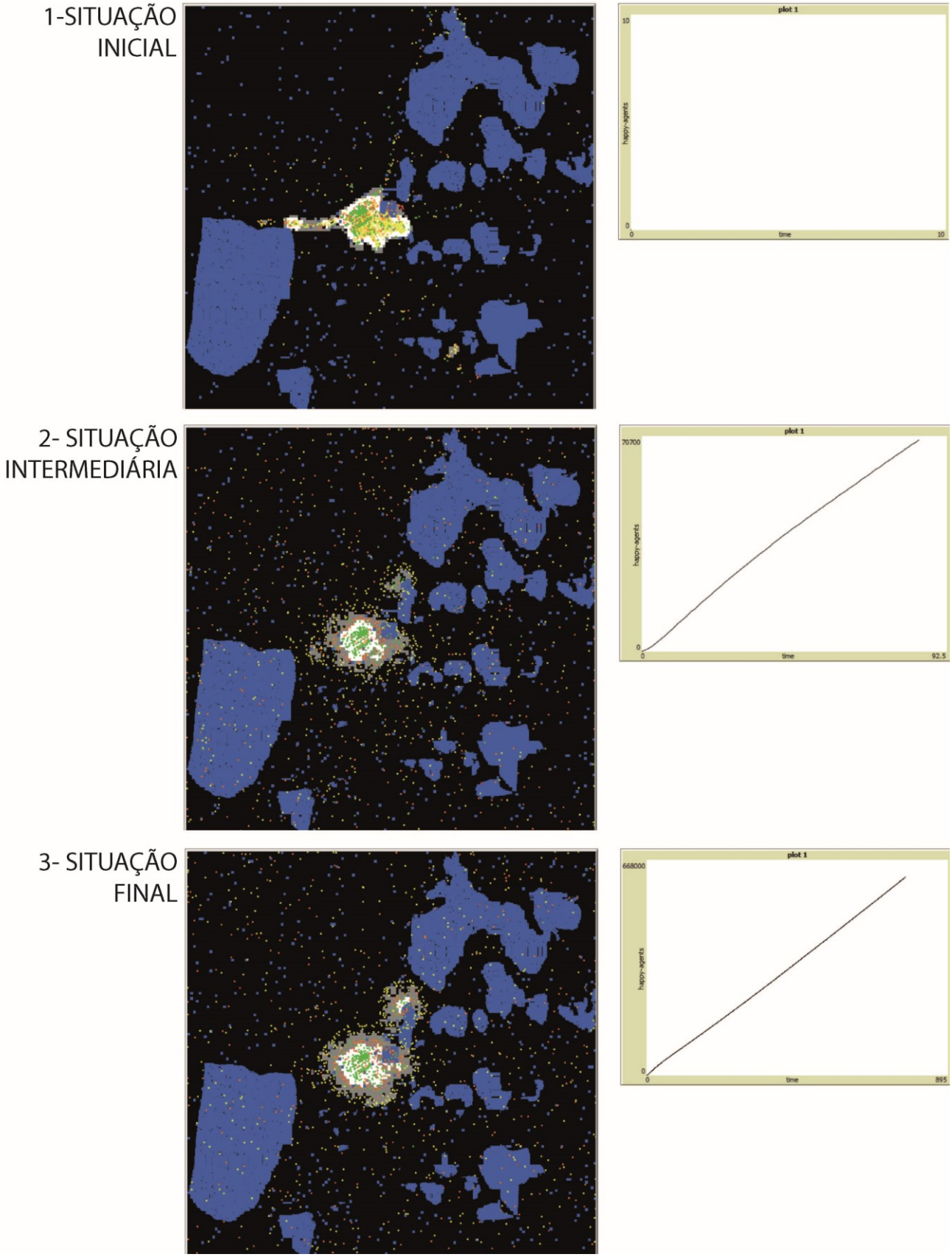

Figura 10- Ilustração da evolução da simulação de um autômato celular.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs um método de aplicação de técnicas de modelagem e simulação em situação práticas de planejamento urbano. A motivação por trás desse tema foi a identificação de uma incompatibilidade entre os instrumentos de planejamento existentes e a verdadeira dinâmica de funcionamento dos grandes centros urbanos. Verificou-se que a principal razão para tal incompatibilidade é a falta de reconhecimento da cidade como um sistema complexo que se constrói de baixo para cima através de interações entre os agentes urbanos em um processo de auto organização que se adapta às forças externas, sejam elas ambientais ou governamentais. Para aplicar tais conceitos em métodos analíticos que permitam o aprofundado entendimento do fenômeno da urbanização, são necessárias técnicas de modelagem que explicitem às alterações do território urbano resultantes dessas interações entre os agentes urbanos para diferentes cenários de uma cidade. Tais ferramentas, baseadas em agentes e em autômatos celulares, apesar de estarem desenvolvidas na literatura técnica, são pouco utilizadas em aplicações práticas do planejamento urbano, sendo tal panorama o incentivo para que o presente trabalho pesquisasse como modelos e simulações podem ser aplicados na prática e quais as vantagens que se advém dessa aplicação.

Foram estudados modelos construídos com o intuito de simular as dinâmicas de uso do solo, bem como uma aplicação prática de técnicas de modelagem na elaboração do plano de desenvolvimento de uma região. A partir de tais estudos e também da fundamentação teórica levantada, foi possível elaborar uma proposta de método de aplicação de técnicas de modelagem e simulação das dinâmicas de uso do solo em aplicações práticas do planejamento urbano. Tal método tenta ser o mais geral possível dentro do tema discutido para tornar possível a compatibilização com qualquer modelo referente a usos do solo; entretanto, ao mesmo tempo ele busca integrar os diferentes fatores que influenciam no desenvolvimento de uma cidade, considerando também uma ampla escala de influência. Sua viabilidade técnica foi demonstrada a partir de um protótipo de ambiente de modelagem e simulação desenvolvido em software especializado.

Esta pesquisa se propôs a responder se, tendo em vista a complexidade dos grandes centros urbanos atuais, seria possível obter de modelos e simulações de dinâmicas do uso do solo resultados úteis para a fundamentação da prática de planejamento urbano. Acredita-se que este trabalho demonstrou que a resposta para tal pergunta é afirmativa: técnicas de modelagem e simulação podem auxiliar o processo de planejamento urbano através da visualização de possíveis configurações futuras da forma urbana conforme a aplicação de diferentes cenários projetuais e mensuração da adequação de tais propostas através de medidas quantitativas. Tal aspecto permite que as decisões tomadas na elaboração de planos e projetos sejam baseadas em critérios objetivos e que a discussão em volta de tal processo seja mais inclusiva e transparente. A proposta de método apresentada por este trabalho se configura como um exemplo de como os conceitos analisados poderiam ser aplicados de maneira útil à prática de planejamento, de modo introduzir iteratividade ao processo projetual e de torna-lo capaz de fornecer as referidas medidas objetivas da realidade como argumentação técnica a favor de um determinado cenário.

Tais resultados poderiam ser discutidos com maior profundidade se o presente trabalho tivesse levado em consideração outros aspectos da utilização da modelagem e simulação em situações práticas, principalmente as questões de dificuldade de calibração, falta de instrumentos de validação dos resultados simulados e ausência de bancos de dados abrangentes no contexto brasileiro e sul americano. Entretanto, a discussão de tais aspectos de forma adequada exigiria um maior aprofundamento teórico ou a prototipagem de um modelo mais detalhado. Tais questões ficam, então, em aberto para serem melhor tratadas em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ABOLHASANI, S. et al. Simulating urban growth under planning policies through parcel-based cellular automata (ParCA) model. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 30, n. 11, p. 2276–2301, 2016.

ACHARYA, A. et al. City planning using integrated urban modelling: Jeddah Structure Plan. 11th Space Syntax Symposium Lisbon. *Anais...* Lisbon, Portugal: Instituto Superior Técnico, 2017

AHMED, S.; BRAMLEY, G. How will Dhaka grow spatially in future? Modelling its urban growth with a near-future planning scenario perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment*, v. 4, n. 2, p. 359–377, 2015.

BATTY, M. *The New Science of Cities.* Cambridge: The MIT Press, 2013a.

BATTY, M. Big data, smart cities and city planning. *Dialogues in Human Geography*, v. 3, n. 3, p. 274–279, 2013b.

BATTY, M.; TORRENS, P. M. Modelling and prediction in a complex world. *Futures*, v. 37, n. Complexity and the limits of knowledge, p. 745–766, 1 jan. 2005.

BETTENCOURT, L. M. A. *The Uses of Big Data in Cities*. Santa Fe, USA: [s.n.].

BONETT NETO, J. Panorama sobre métodos quantitativos de análise espacial, modelagem urbana e geotecnologias aplicados ao planejamento urbano no Brasil: evolução histórica e perspectivas contemporâneas. XVI ENANPUR: Espaço, Planejamento e Insurgências. *Anais...* Belo Horizonte: ANPUR, 2015.

BRESSERS, N.; EDELENBOS, J. Planning for adaptivity: facing complexity in innovative urban water squares. *Emergence: Complexity and Organization*, v. 16, n. 1, p. 77–99, 2014.

BURDETT, R.; SUDJIC, D. *Living in the Endless City.* London: Phaidon Press Ltd, 2011.

ÇALIŞKAN, O. Design thinking in urbanism: Learning from the designers. *URBAN DESIGN International*, v. 17, n. 4, p. 272–296, 2012.

DALCIN, G. et al. *Jaguarão: Horizonte Urbano no Pampa*. 6ª Conferência da Rede Lusófona de Morfologia Urbana. *Anais...* Vitória, Brasil: Universidade Federal do Espírito Santo, 2017

DE ROO, G. Spatial Planning, Complexity and a World 'Out of Equilibrium': Outline of a Non-linear Approach to Planning. In: *Complexity and Planning Systems: Assemblages and Simulations*. Farnham: Routledge, 2012. p. 141–175.

DRESCH, A. Design Science e Design Science Research como Artefatos Metodológicos para Engenharia de Produção. *Dissertação do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS*, v. 1, p. 184, 2013.

HEWITT, R.; DELDEN, H. VAN; ESCOBAR, F. Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. *Environmental Modelling and Software*, v. 52, p. 149–165, 2014.

IBGE. *Censo Demográfico de 2010*. Brasília: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2011.

KOOMEN, E. et al. *Modelling Land-Use Change: progress and applications*. Doordrecht, The Nederlands: Springer, 2007.

KOOMEN, E. et al. A utility-based suitability framework for integrated local-scale land-use modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 50, p. 1–14, 2015.

LEVY, S.; MARTENS, K.; HEIJDEN, R. VAN DER. Agent-based models and self-organisation: addressing common criticisms and the role of agent-based modelling in urban planning. *Town Planning Review - Liverpool University*, v. 87, n. 3, p. 321–338, 2016.

LI, S. et al. Simulation of spatial population dynamics based on labor economics and multi-agent systems : a case study on a rapidly developing manufacturing metropolis. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 27, n. 12, p. 2410–2435, 2013.

MITCHELL, M. *Complexity : A Guided Tour*. Oxford [England]: Oxford University Press, 2009.

PESARESI, M. et al. *Atlas of the Human Planet 2016. Mapping humam presence on Earth with the Global Human Settlement layer*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016.

PHAM, H. M.; YAMAGUCHI, Y.; BUI, T. Q. A case study on the relation between city planning and urban growth using remote sensing and spatial metrics. *Landscape and Urban Planning*, v. 100, n. 3, p. 223–230, 2011.

POLIDORI, M.; KRAFTA, R. Simulando Crescimento Urbano com integração de fatores naturais, urbanos e institucionais. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnologia de la Informacion Geofrafica*, n. 5, p. 156–179, 2005.

PORTUGALI, J. Self-Organizing Cities. *Futures*, v. 29, n. 4, p. 353–380, 1997.

PORTUGALI, J. *What makes cities complex?* Delft: [s.n.]. Disponível em: <http://www.bk.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/BK/Over_de_faculteit/Afdelingen/Urbanis

m/Onderzoek/Congress,_workshops_and_exhibitions/Congresses/CCUPD_conference/Short_paper_Portugali.pdf>. Acesso em 11 nov. 2018.

PORTUGALI, J. Learning from paradoxes about prediction and planning in self-organizing cities. *Planning Theory*, v. 7, n. 3, p. 248–262, 2008.

SANTOS, A. P.; POLIDORI, M. C. O Lugar dos Pobres na Cidade: contribuições sobre crescimento urbano da modelagem por agentes. *XVII ENANPUR: Desenvolvimento, Crise e Resistência: quais os caminhos do planejamento urbano e regional?*, n. 1982, p. 1–18, 2017.

SCHANK, J. *Agent-Based Modeling*. Disponível em: <http://www.agent-based-models.com/blog/2010/03/30/agent-based-modeling/>. Acesso em: 28 out. 2018.

STONOR, T. Essay: Space syntax: A SMART approach to urban planning, design and governance. *A + U-Architecture and Urbanism*, n. 530, p. 12–23, 2014.

TODES, A. Urban growth and strategic spatial planning in Johannesburg, South Africa. *Cities*, v. 29, n. 3, p. 158–165, 2012.

TSANG, S. W.; LEUNG, Y. A Theory-Based Cellular Automata for the Simulation of Land-Use Change. *Geographical Analysis*, v. 43, n. 2, p. 142–171, 2011.

WHITE, R.; ENGELEN, G.; ULJEE, I. *Modeling Cities and Regions as Complexs Systems.* Cambridge, Massachussettes: The MIT Press, 2015.

WILENSKY, U.; RAND, W. *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo*. Cambridge: The MIT Press, 2015.

ZECHLINSKI, A. P. P. *Configuração e Práticas no Espaço Urbano: uma análise da estrutura espacial urbana*. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

ZELLNER, M.; CAMPBELL, S. Planning for deep-rooted problems : What can we learn from aligning complex systems and wicked problems? *Planning Theory & Practice*, v. 16, n. 4, p. 457–478, 2015.