

Simulação de cenários urbanos por autômato celular para modelagem do crescimento de Campinas – SP, Brasil

Mara-Lúcia Marques. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, Brasil.
Vinícius Müller-Pessôa. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, Brasil.

Danilo Camargo. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, Brasil.
Camila Cecagno. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, Brasil.

RESUMO | A dinâmica urbana analisada por Sistema de Informação Geográfica contribui para identificação de especificidades locais da ocupação e transformação do espaço. O presente estudo analisou o crescimento espacial baseado em autômato celular para a proposição de cenários futuros da região norte-noroeste de Campinas–SP, Brasil. A modelagem foi realizada pelo *software* SLEUTH, que tem por princípio o Modelo de Crescimento Urbano de Clarke, e requer informações sobre uso do solo, declividade, malha viária, relevo sombreado, áreas de restrição e manchas urbanas para simular o crescimento até 2040. A área analisada apresentou tendência de crescimento com dinâmica constante de expansão e adensamento a partir dos núcleos urbanos existentes e no entorno da malha viária. Os fatores limitantes da expansão foram as grandes áreas institucionais não edificadas, as áreas de preservação e propriedades rurais. Portanto, o modelo de crescimento simulado pelo SLEUTH se apresentou adequado para a análise dos fatores físico-ambientais e de infraestrutura determinantes da dinâmica urbana.

PALAVRAS-CHAVE | expansão urbana, morfologia urbana, desenvolvimento urbano.

ABSTRACT | *The urban dynamics analysed by geographic information systems contributes to the identification of local specificities of space occupation and transformation. This study analyses the spatial growth based on cellular automata for the proposition of future scenarios of the expansion of north-northwest area of Campinas-SP, Brazil. The modelling was performed by SLEUTH software, which is based on the Clarke Urban Growth Model, and requires information on land use, slope, road network, hill shade, excluded areas and urban areas to simulate urban growth up to 2040. The studied area showed a growth trend with constant dynamics of expansion and densification from existing nucleus of buildings and along the road network. The limiting factors of the expansion were the large unbuilt institutional areas, preservation areas and rural properties. Therefore, the urban growth model simulated by SLEUTH was adequate for the analysis of physical-environmental and infrastructure factors that determine the urban dynamics.*

KEYWORDS | *urban sprawl, urban morphology, urban development.*

Recebido em 2 de agosto de 2019, aprovado em 9 de dezembro de 2019.

E-mails: M.L. Marques, mara.marques@puc-campinas.edu.br | V. Müller-Pessôa, vipesso73@gmail.com | D. Camargo, danilo.mangaba@gmail.com | C. Cecagno, camilacecagno@hotmail.com

Introdução

No processo de urbanização, as formas de implantação espacial são as expressões mais visíveis destas modificações, cuja evolução registra etapas da história do desenvolvimento urbano. É necessário se estudar a produção das formas espaciais estabelecendo critérios de periodização da forma de ocupação do espaço por uma população (Castells, 1976; Serra, 1987). Se a área urbanizada pode ser definida como toda área construída, o caráter físico depende da aplicação de critérios uniformes na determinação urbana e da inclusão ou exclusão de informações de população, estruturas, uso do solo, fluxos de tráfego e fenômenos sociais, culturais, políticos e econômicos (Mayer, 1976).

O crescimento urbano está associado aos processos que modelam a organização do espaço, como: centralização, descentralização, coesão, segregação, inversã-sucessão e inércia. A centralização é caracterizada pela existência de uma área onde ocorre a concentração das principais atividades comerciais e de serviços (área central), a concentração de atividades representa a maximização de acessibilidade e de aglomeração urbana. O processo de descentralização consiste em uma medida espontânea ou planejada, que visa diminuir a excessiva centralização, causadora do aumento constante do valor da terra, impostos e aluguéis, elevação do custo e congestionamento do sistema de transportes e comunicações, e outros. Esse processo espacial está associado à descentralização das atividades comerciais na área central, ao crescimento demográfico e espacial da cidade, repetindo o fenômeno da centralização e tornando a organização espacial da cidade mais complexa com surgimento de subcentros comerciais e áreas industriais não centrais (Corrêa, 2001; Serra, 1987). De acordo com Aguilera-Benavente, Botequilha-Leitão e Díaz-Varela (2014), o padrão de crescimento urbano pode ser caracterizado pelas alterações espaciais do uso do solo, permitindo distinguir os diferentes níveis de dispersão e adensamento do processo de expansão, sendo o potencial de análise dependente da escala da abordagem e da identificação de variáveis influentes no padrão de crescimento.

A rede urbana brasileira possui um processo complexo de criação e evolução dos centros urbanos, processo esse que tem sido marcado por uma desigual relação de espaço-temporalidade, caracterizado pela complexidade da herança econômica e cultural, pelos diversos padrões espaciais, pela crescente complexidade funcional de seus centros e pelos diversos tipos e intensidades de integração interna e externa (Corrêa, 2001). A partir desses processos de ocupação do território, pode-se destacar que o primeiro padrão espacial urbano brasileiro foi o padrão dendrítico, devido ao sítio urbano que, em geral, possui baixadas emolduras por serras e balizadas por rios. Com a industrialização, identifica-se um padrão espacial de áreas urbano-industriais caracterizadas pelos corredores urbanizados (Villaça, 1998).

O processo de urbanização, nas décadas de 70 e 80, não apenas foi marcado pela concentração da população nas regiões metropolitanas, mas também pela reorganização da rede urbana com o crescimento do número de cidades médias, que em 1970 era de 157 cidades e passou para 419 cidades em 1980 (Araújo & Pacheco, 1992). A urbanização de Campinas acompanhou a tendência de descentralização das atividades econômicas da região metropolitana de São Paulo, pela política

governamental de crescimento no interior, pela agroindústria e pela rede ferroviária, por ser Campinas um grande ponto de cruzamento das linhas férreas. O processo de ocupação se intensifica a partir da década de 70 do século xx e é caracterizado pela distribuição horizontal e descontínua da malha residencial, criando uma expansão fragmentada e oferta desigual de serviços públicos como coleta de esgoto, lixo e pavimentação das ruas (Hogan, Cunha, Carmo & Oliveira, 2001). Nessa época, a expansão da periferia também é marcada pela implantação de conjuntos habitacionais financiados pelo Sistema Financeiro da Habitação - SFH e por loteamentos populares de baixa renda, contendo pouca ou nenhuma infraestrutura básica. Essas tendências proporcionaram índices de crescimento anual que ultrapassavam 5%, sendo que a maior expansão da cidade ocorreu na região Oeste/Sudoeste, devido ao valor da terra. O município começa realizar investimentos nessa região, como a implantação do DIC- Distrito Industrial de Campinas. Na década de 80, as regiões Norte/Leste do município têm a ocupação intensificada pelo início de empreendimentos habitacionais de loteamentos fechados e condomínios, acompanhando a rota de grandes instituições e empresas de consumo regional e indústrias tecnológicas. Na área Norte, a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) foi a principal responsável pela expansão da cidade na região. Esse intenso crescimento desordenado para a periferia ocasionou os problemas de saneamento básico, moradia e transportes, com elevados custos sociais e ambientais, demandando intervenções políticas culminadas nas proposições do Plano Diretor de 1991, com vertente social direcionada à questão urbana, como proteção ao meio ambiente, a melhoria das condições de habitação e de saneamento básico, o combate às causas da pobreza e aos fatores de marginalização, e o Plano de 1996, que buscava o aprofundamento de aspectos físicos territoriais, com vistas à Lei de uso e ocupação do solo (CAMPINAS, 2018).

Todavia, a região norte-noroeste que compreende uma área urbana abastecida por três importantes eixos viários de comunicação com cidades do entorno Norte e Oeste de Campinas, com intensa vocação econômica (Paulínia, Sumaré, Americana e Jaguariúna), tem sido pouco explorada como zona de futuro interesse de crescimento urbano e atenção política. Essa área foi escolhida para análise com o intuito de fornecer um respaldo antecipado sobre a dinâmica de sua ocupação e futuras demandas sociais.

A interpretação dos movimentos futuros de uma cidade pode ser prognosticada a partir da relação entre áreas funcionais e estrutura interna urbana e representada sob duas formas: i) estática, quando o uso do solo e estruturas ocupam áreas definidas e juntos constituem a paisagem urbana; ii) cinética, quando é analisado o fluxo de tráfego ao longo de vias, entre áreas ou zonas de origem e destino, conhecida também como interação espacial (Batty & Longley, 1994; Bullock, Dickens & Steadman, 1972). A análise espacial urbana é considerada, segundo Garner (1975), uma ferramenta que possibilita caracterizar a distribuição espacial de atividades antrópicas, tais como: o deslocamento, custos de transportes e de diferentes tipos de superfície; o efeito do atrito entre as distâncias, como diminuição de custos entre as localizações; o grau de acessibilidade, para atribuição dos custos de transporte; a tendência de aglomeração da atividade humana; a concentração dos serviços públicos; a estrutura espacial da ocupação e as inter-relações entre as tendências de

aglomeração e acessibilidade; e como também identificar a hierarquia da organização espacial da população.

Os estudos do espaço urbano por modelos dinâmicos projetam uma perspectiva da realidade que pode, ou não, alinhar-se às forças políticas predominantes, uma vez que tem por função representar a materialização das ações antropogênicas no espaço, cuja interpretação das alterações espaciais vincula-se tanto à habilidade teórica de articular o social, econômico e ambiental, como também à melhor forma de observar, medir e classificar essas variáveis (Batty, 2009; Torrens, 2018). Em ambos pairam as incertezas operacionais de integração e hierarquização, as múltiplas conexões causais, a multiplicidade da organização do espaço e tempo, que podem afetar a articulação entre mudanças e desenvolvimento.

Portanto, o presente estudo propõe analisar a dinâmica espacial baseando-se no método autômato celular (CA), que modela cenários da expansão urbana a partir de indicadores físico-ambientais e da infraestrutura urbana. O *software* SLEUTH é um exemplo de uma modelagem que aplica a automação celular na simulação de cenários de uso e cobertura do solo, de acordo com os princípios do Modelo de Crescimento Urbano de Clarke. Esse método requer a entrada dados referentes aos componentes de sua sigla SLEUTH: *Slope* (declividade), *Land use* (uso do solo), *Exclusion* (áreas restrição à urbanização), *Urban growth* (evolução da mancha urbana), *Transportation* (malha viária) e *Hillshade* (relevo sombreado) (Mahiny & Clarke, 2012; Sakieh, Amiri, Danekar, Feghhi & Dezhkam, 2015; Silva & Clarke, 2002). A previsão do crescimento urbano é avaliada considerando-se as premissas: crescimento espontâneo; crescimento difusivo; crescimento orgânico e crescimento influenciado pela malha viária. Os coeficientes dispersão (*dispersion* – dispersão geral do crescimento), núcleos centrais (*breed* – probabilidade de geração de novos núcleos urbanos), propagação (*spread* – crescimento centrípeto ou centrífugo a partir das áreas de expansão existentes), declividade (*slope* – o terreno plano é preferido) e atração da malha viária (*road gravity* – atração e difusão da urbanização entorno das estradas) são responsáveis pela transformação numérica das premissas do crescimento e determinam as regras de transição (calibração e predição de cenários) do modelo SLEUTH (Clarke, Hoppen & Gaydos, 1997; Silva & Clarke, 2002).

Desta forma, o objetivo deste estudo consistiu na modelagem de cenários de expansão urbana do setor norte-noroeste do município de Campinas – SP, Brasil, a partir da análise espacial de indicadores físico-ambientais e da infraestrutura urbana, com vistas a identificação dos aspectos influentes no processo de transformação urbana, caracterização do tipo de desenvolvimento urbano e implicações espaciais dos cenários futuros.

Crescimento e modelagem urbana

O crescimento urbano é resultante da interação entre diversos agentes que atuam em diferentes graus de intensidade produzindo uma dinâmica urbana. Essa dinâmica indica que a cidade está em permanente mudança e, portanto, requer estudos que abordem a transformação ao longo do tempo para melhor compreender o processo de urbanização (Batty, Xie & Sun, 2010; Polidori, 2005; Torrens & O’Sullivan,

2001). A urbanização, por sua vez, caracteriza alterações de infraestrutura que valorizam a terra, a escolha da localização da habitação, o comportamento do tráfego, o sistema econômico e a tendência demográfica. Mas, as características desse processo de mudança apresentam regras e padrões que emergem, segundo Torrens, (2018), da migração da população, da conversão da terra rural em uso urbano e a transformação em grandes cidades. Por exemplo, verifica-se que o crescimento urbano desordenado provoca dispersão da forma urbana, com baixo desempenho em termos de eficiência, equidade e sustentabilidade, associando altos custos econômicos, sociais e ambientais a este tipo de ocupação territorial. Portanto, é necessário estudar previamente a localização de novas urbanizações, tendo em conta os impactos econômicos das infraestruturas, da evolução demográfica e econômica, como o intuito de melhorar a qualidade de vida da população. O uso de modelos dinâmicos permite simular diferentes cenários para auxiliar decisões sobre o planejamento do território e, assim, antecipar problemas, comparar e avaliar tomadas de decisões sobre planos atuais e futuros (Mestre, 2013). Contudo, a previsão de cenários futuros baseando-se em tendências do passado pode fornecer informações pouco robustas sobre a predisposição para transformações diante da insegurança relacionada aos processos políticos e administrativos de planejamento, sendo necessário explorar possibilidades de crescimento e identificar a frequência de alteração dos usos nos diferentes cenários simulados (Barreira-González, Aguilera-Benavente & Gómez-Delgado, 2015a). Porém, a compreensão das relações espaço-temporais do crescimento urbano é uma informação essencial sobre a sustentabilidade do desenvolvimento para gestão das cidades (Yao, Hao & Zhang, 2016).

De acordo com Liu (2008), a aplicação de modelos é importante para o desenvolvimento de abordagens que contribuem para formulação de teorias ou hipóteses, cuja análise e comprovação auxiliam na representação da estrutura ou função do sistema real e para entender, explicar ou prever o comportamento do sistema, como também podem ser usados para criar um ambiente artificial para experimentação. Para Haggett e Chorley (1967), um modelo representa o mundo real de maneira simplificada de forma válida e adequada. Para esses autores, existem diferentes tipos de modelos: a) os modelos teóricos, que são derivados diretamente de uma teoria, como forma de representação simbólica dessa teoria; b) os modelos para embasamento teórico, nos quais os fenômenos do mundo real são abstraídos para serem relacionados estruturalmente em um modelo, e a partir dos resultados cria-se nova teoria; c) os modelos descritivos, lidam com alguma descrição realidade, procuram analisar o que pode ocorrer sob condições estabelecidas; d) os modelos dinâmicos, que se concentram em processos e funções através do tempo; e) os modelos determinísticos, baseados na noção de previsão exata, que é produzido por leis naturais e físicas; f) os modelos estocásticos, também chamados de modelos probabilísticos, que envolvem o uso de probabilidades, produzindo uma gama de possíveis resultados, em vez de uma única previsão; g) os modelos analíticos, que envolvem procedimentos de solução analítica, não envolvendo qualquer forma de iteração; e h) os modelos de simulação, que analisam soluções de forma gradual, onde as soluções são alcançadas por estágios. Todavia, as abordagens que enfatizam modelos espaciais ainda são, atualmente, ferramentas que requerem aprimoramentos

técnicos relacionados à interpretação dos resultados, como a precisão do modelo, à interpretação estatística dos produtos, à dificuldade de seleção de variáveis comuns para diferentes localidades, à efetividade da integração das bases de dados físicos com dados socioeconômicos e à caracterização da influência das diferentes variáveis nas tendências de alterações futuras (Berberoğlu, Akin & Clarke, 2016). O estudo de Barreira-González, Gómez-Delgado e Aguilera-Benavente (2015b) avaliou a operacionalidade da representação vetorial do uso do solo combinada ao modelo baseado em CA para analisar o potencial dos produtos em refletir de forma mais aproximada às alternativas de crescimento futuro. Para os autores a abordagem empregada otimizou a identificação das tendências de tipo de uso do solo e o padrão de ocupação.

O desenvolvimento de sistemas auto-organizados e teorias da complexidade tem proporcionado novas formas de compreender os padrões e processos do desenvolvimento urbano. Modelos urbanos baseados na técnica dos autômatos também surgiram sob o paradigma de um sistema auto-organizado. Um autômato é uma entidade que tem suas próprias características espaciais e não espaciais, mas também tem o mecanismo para processar informações com base em suas próprias características, regras e entradas externas. O CA é um tipo especial de autômato discreto, organizado em espaço regularmente tesselado, por exemplo, uma grade regular. As informações podem ser processadas e transmitidas entre células (ou autômatos), que se propagam através de autômatos vizinhos. Embora a técnica CA remonte ao início da computação digital, apenas ao final da década de 1980 essa técnica foi usada para explorar o comportamento de um sistema auto-organizado e modelar o processo de crescimento urbano (Liu, 2008).

O conceito base para a aplicação do CA preconiza que é possível extrair padrões regionais pelo comportamento local de um reduzido número de elementos (Batty, Couclelis & Eichen, 1997; Clarke et al., 1997). Pela observação desses comportamentos individuais são extraídos grupos que categorizam padrões, formas e intensidades no espaço e no tempo. Assim, é possível simular um cenário preditivo da realidade. O modelo CA se constitui por cinco características: geometria da rede, estado da célula, as relações de vizinhança, as regras de transição (determinísticas ou estocásticas) e períodos temporais discretos (Stevens & Dragicevic, 2007). O CA é uma estrutura flexível e intuitiva capaz de integrar as dimensões espaciais e temporais para simular e prever os padrões de crescimento e seus efeitos sobre as alterações futuras do uso do solo, mas as informações obtidas limitam-se à dinâmica do processo físico de expansão, que podem ser integrados com informações ambientais, econômicas e demográficas para obtenção de cenários mais realísticos (Aburas, Ho, Ramli & Ash'aari, 2016; Guan & Rowe, 2016).

Procedimentos metodológico

Em linhas gerais, a aplicação do Modelo de Crescimento Urbano de Clarke – SLEUTH requer a execução dos seguintes procedimentos: elaboração do banco de dados geográfico; conversão dos mapas para formato GIF (*Graphic Interchange Format*); testes de calibração, modelagem de cenários de crescimento urbano e validação do cenário

de predição para data atual (Clarke et al., 1997; Mahiny & Clarke, 2012; Silva & Clarke, 2002).

Inserção e contextualização da área de estudo

O município de Campinas se constitui em um polo industrial e tecnológico do estado de São Paulo (Figura 1), que nas últimas décadas se caracteriza pelo intenso processo de modernização dos setores industrial e agrícola, descritos para o cenário brasileiro (IBGE, 2011). Principalmente, a partir de 1930, devido à transferência de investimento do setor agrícola para o da construção civil, que proporcionou à reestruturação da infraestrutura de transporte. O parcelamento e melhorias de infraestrutura foram concentradas no núcleo urbano central, o que promoveu a valorização dessas áreas e, por consequência, o deslocamento da população para as áreas periféricas (Badaró, 1996). Campinas, em 2018, possuía população estimada de 1.194.094 habitantes. Todavia, as informações de densidade populacional e população urbana estão levantadas apenas pelo censo demográfico de 2010, que averiguou uma proporção de residentes em áreas urbanas de 98,3% e densidade demográfica de 2.520 hab/km² (IBGE, 2011).

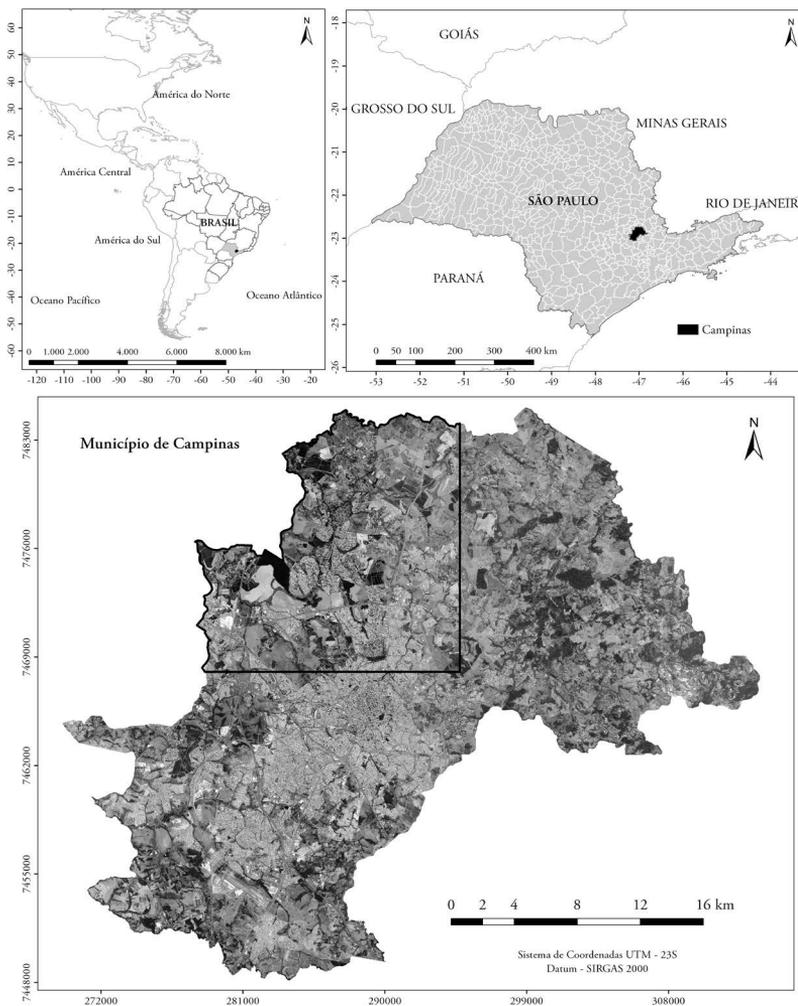
O município está inserido em uma área de contato entre duas unidades morfo-estruturais, sendo a área majoritária inserida na Depressão Periférica Paulista, onde o relevo é suave, composto por colinas, planícies e terraços fluviais, embasado por rochas de origem sedimentar com ocorrência de intrusões magmáticas; e o setor leste no Planalto Atlântico, com predomínio de relevo composto por morros e morrotes, com substrato formado por rochas magmáticas e metamórficas (Instituto de Pesquisas Tecnológicas & Serviço Geológico do Brasil – CPRM [IPT & CPRM], 2014). De acordo com a classificação de Koeppen, o tipo climático é Cwa – clima subtropical de inverno seco e verão quente, com precipitação média anual de 1.424,5mm (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura [CEPAGRI], 2017). O processo de ocupação do espaço urbano iniciou nos topos aplainados de colinas e morrotes e com a expansão urbana passou a ocupar as áreas de vertentes e várzeas fluviais (Hogan et al., 2001).

Mapeamento multitemporal do uso e cobertura do solo da área de estudo

Para o mapeamento da cobertura do solo e definição das manchas urbanas, no período analisado, foram empregadas imagens orbitais do sistema sensor LANDSAT (MSS–*Multispectral Scanner Sensor*, TM–*Thematic Map*, OLI–*Operational Land Imager*) nas datas 27/05/1975, 02/08/1981, 22/06/1993, 25/05/2003 e 08/08/2018. Essas imagens foram selecionadas no catálogo de imagens Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2018) por atender os critérios de disponibilidade para cada década do período analisado (acompanhando a divulgação do Censo Demográfico), apresentar nitidez espectral e pouca/nenhuma cobertura de nuvens, sendo a imagem de 27/05/1975 a primeira data disponível que satisfaz esses critérios. Nas imagens foram aplicados os processamentos de realce de imagem e georreferenciamento (SIRGAS2000/UTM-Fuso23S), assim como o coregistro espacial entre as diferentes datas. Em todas as datas empregou-se o método de classificação por região para o mapeamento das classes de cobertura do solo: água, área urbana, vegetação arbórea,

vegetação rasteira, solo exposto e outros. As rodovias interurbanas foram classificadas como feição de área urbanizada nas datas 1993, 2003 e 2018, devido à resolução espacial das imagens LANDSAT (900 m²). Essa resolução não permitiu a distinção, de forma precisa, dos diferentes tipos de cobertura do solo no entorno imediato dos eixos viários, tornando inviável a remoção das rodovias sem prejudicar a definição das áreas de urbana nesse entorno. Nas imagens de 1975 e 1981, as rodovias não foram identificadas como feições urbanas pela ausência de áreas construídas no entorno das rodovias.

FIGURA 1 | Mapa de inserção da área de estudo no município de Campinas – SP



FONTE: ADAPTADO IBGE (2015) E ORTOFOTO DO MUNICÍPIO DE CAMPINAS (CAMPINAS, 2014)

No procedimento de classificação, as imagens foram primeiramente segmentadas em áreas homogêneas que são definidas pelos limiares de área, textura, média e variância dos valores de reflectância espectral, a partir dos parâmetros: similaridade 20; área 2; tamanho 1. Para cada imagem segmentada foram identificadas amostras de treinamento para cada classe de cobertura e uso do solo. Em seguida realizaram-se as classificações em função dos atributos: espectral (tonalidade e média) e espacial (compactidade e forma) (Meneses & Almeida, 2012).

Os mapas produzidos pelas classificações foram validados por matriz de confusão e índice Kappa, a partir de 1.000 amostras de referência para cada mapa classificado, empregando o método aleatório estratificado (Congalton & Green, 2009). O índice de acerto geral e o coeficiente Kappa obtidos para cada data foram: 1975 acerto geral 94% e Kappa 0,92; 1981 acerto geral 96% e Kappa 0,95; 1993 acerto geral 90% e Kappa 0,89; 2003 acerto geral 89% e Kappa 0,88 e 2018 acerto geral 92% e Kappa 0,91.

Elaboração dos mapas da Rede Transporte

Os mapas de Redes de Transporte das datas 1974 e 2015 foram obtidos, respectivamente, pela importação das Cartas Topográficas Campinas e Cosmópolis, na escala 1:50.000, no formato vetorial (IBGE, 2015) e pela aquisição da base de dados disponível no site *OpenStreetView*. No banco de dados geográfico os dados foram integrados no mesmo sistema de referência espacial (SIRGAS2000/UTM-Fuso23S), como também foram realizadas as correções de topologia e em seguida os mapas foram convertidos para o formato matricial (raster).

Elaboração dos mapas de declividade e sombreamento do relevo

Para a elaboração dos mapas de declividade e sombreamento do relevo foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução de 30m. O mapa de declividade foi gerado pela classificação do MDE/SRTM em 05 classes: 0 a 3%, 3 a 8%; 8 a 20% e >20%. A apresentação do relevo sombreado foi gerada em um sistema de informação geográfica (SIG) pelos parâmetros de azimute de 135°, inclinação solar de 45° e sem exagero vertical.

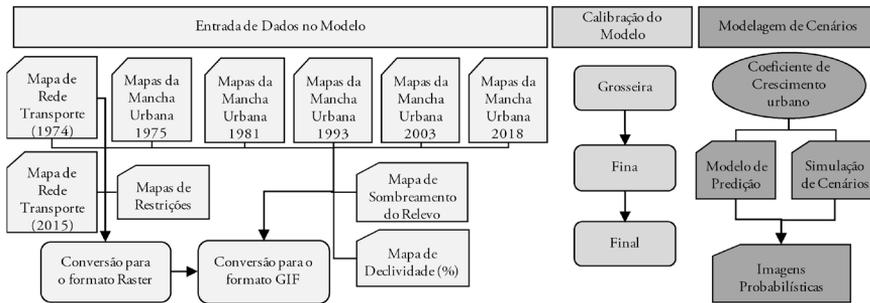
Mapa de restrição à urbanização

As áreas de restrição ao uso urbano foram definidas a partir do mapeamento de áreas verdes, parques e matas, de acordo com material cartográfico digital disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Campinas (CAMPINAS, 2017). Os arquivos vetoriais foram projetados para SIRGAS2000/UTM-Fuso23S, integrados em um único plano de informação e convertidos para o formato matricial.

Modelagem do crescimento urbano

Avaliação do crescimento urbano da área de estudo e simulação de cenários preditivos seguiram os protocolos do modelo SLEUTH (Figura 2), que consiste na execução das etapas: entrada dos dados; calibração do modelo e modelagem de cenários.

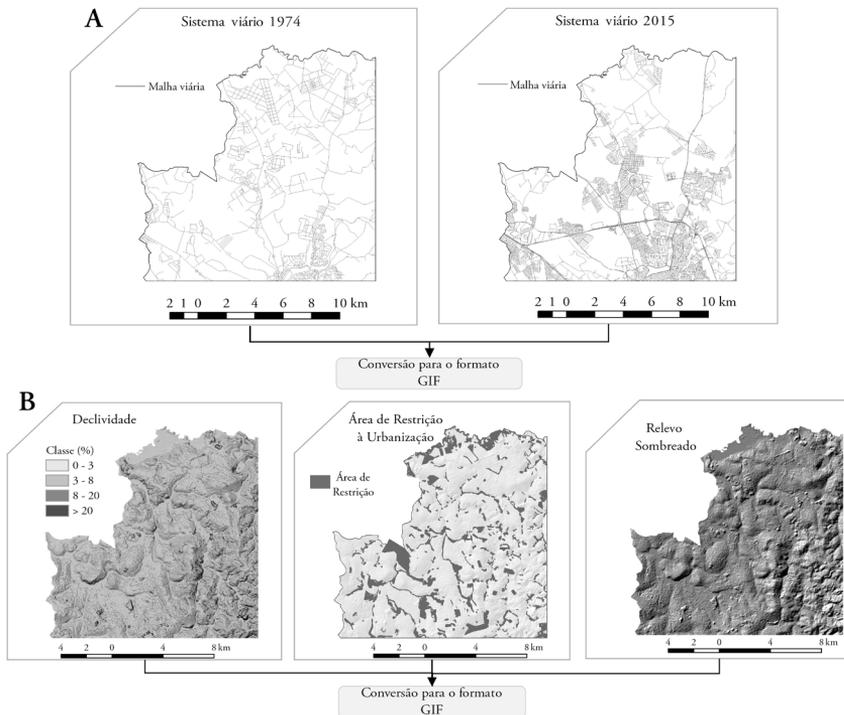
FIGURA 2 | Fluxograma de procedimentos no software SLEUTH



FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA

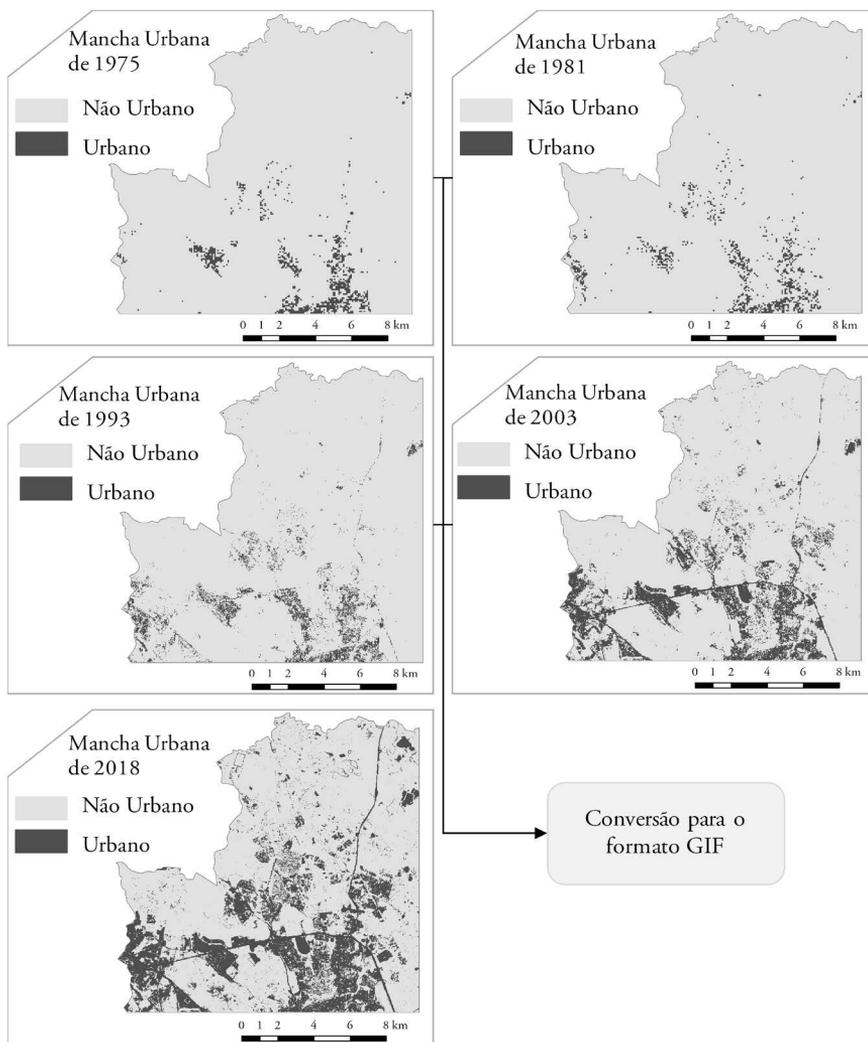
Na etapa de entrada de dados, os mapas da malha viária de 1974 e 2015 (Figura 3, painel A), mapas de declividade, relevo sombreado e áreas de restrição (Figura 3, painel B), além dos mapas das manchas urbanas em 1975, 1981, 1993, 2003 e 2018 (Figura 4) foram todos convertidos para GIF, com extensão (número de linhas e colunas) e resolução espacial (10m) iguais.

FIGURA 3 | Entrada de dados no software SLEUTH



FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA

FIGURA 4 | Entrada dos dados de manchas urbanas no período 1975 a 2018



FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA

A calibração do modelo é realizada pela derivação de valores entre 0 a 100 para cada coeficiente de crescimento durante as três fases de processamento denominadas: grosseira, fina e final. Em cada fase os valores são organizados em início – resolução – término (*start – step – stop*), ajustando a resolução para valores entre 1/4 a 1/6 do tamanho do intervalo entre os valores de início e término. Para executar cada fase de calibração, também é necessário definir o número de interações de Monte Carlo. Essas fases são sequenciais e com atribuição de novos valores para os coeficientes de

crescimento determinados pelos resultados da fase anterior. De acordo com Clarke et al. (1997) o modelo SLEUTH apresenta diferentes métricas de ponderação dos valores para os coeficientes de crescimento, a partir dos resultados da primeira fase (calibração grosseira), porém recomenda-se utilizar a métrica LeeSalee.

Portanto, os valores dos coeficientes empregados para a calibração do modelo de crescimento da área de estudo do município de Campinas utilizaram as referências apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 | Referências de valores dos coeficientes em cada fase de calibração

| FASE | COEFICIENTE DE CRESCIMENTO | INÍCIO | RESOLUÇÃO | TÉRMINO | INTERAÇÕES DE MONTE CARLO |
|-----------|----------------------------|--------|-----------|---------|---------------------------|
| Grosseira | Dispersão | 1 | 25 | 100 | 6 |
| | Núcleos Centrais | 1 | 25 | 100 | |
| | Propagação | 1 | 25 | 100 | |
| | Declividade | 1 | 25 | 100 | |
| | Atração da malha Viária | 1 | 25 | 100 | |
| Fina | Dispersão | 0 | 5 | 20 | 8 |
| | Núcleos Centrais | 0 | 5 | 20 | |
| | Propagação | 76 | 4 | 100 | |
| | Declividade | 0 | 5 | 30 | |
| | Atração da malha Viária | 0 | 9 | 54 | |
| Final | Dispersão | 1 | 1 | 5 | 10 |
| | Núcleos Centrais | 1 | 1 | 5 | |
| | Propagação | 75 | 5 | 100 | |
| | Declividade | 1 | 5 | 25 | |
| | Atração da malha Viária | 1 | 4 | 20 | |

FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA

A partir dos valores mais elevados de coeficientes obtidos na calibração final, organizados de forma decrescente pela análise da métrica de LeeSalee, foi executado o teste derivação de previsão, de acordo com as referências apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2 | Referências de valores dos coeficientes na derivação de previsão

| COEFICIENTE DE CRESCIMENTO | INÍCIO | RESOLUÇÃO | TÉRMINO | INTERAÇÕES DE MONTE CARLO |
|----------------------------|--------|-----------|---------|---------------------------|
| Dispersão | 1 | 1 | 1 | 100 |
| Núcleos Centrais | 3 | 1 | 3 | |
| Propagação | 90 | 1 | 90 | |
| Declividade | 6 | 1 | 6 | |
| Atração da malha Viária | 5 | 1 | 5 | |

FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA

A geração de cenários de previsão foi realizada com os valores de coeficientes obtidos para a data mais recente do mapa de uso e ocupação do solo, que no presente estudo se refere ao ano de 2018 e estão apresentados na Tabela 3. Foram produzidos cenários preditivos desde 2019 a 2040, anualmente.

TABELA 3 | Referências de valores dos coeficientes na geração de cenários preditivos

| COEFICIENTE DE CRESCIMENTO | MELHOR AJUSTE DE PREDIÇÃO | INTERAÇÕES DE MONTE CARLO |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Dispersão | 1 | 100 |
| Núcleos Centrais | 4 | |
| Propagação | 100 | |
| Declividade | 1 | |
| Atração da malha Viária | 7 | |

FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA

A validação do modelo foi realizada pela matriz de erros e análise de concordância entre o resultado de uso e ocupação do solo obtido para o cenário preditivo de 2019 e as amostras de referência desta mesma data. Foram adquiridas 500 amostras de referência a partir da interpretação visual de imagem de alta resolução disponível no recurso Mapa Base do programa ARCGIS-ESRI, empregando o método de amostragem estratificada aleatória, conforme proposto por Congalton e Green (2009).

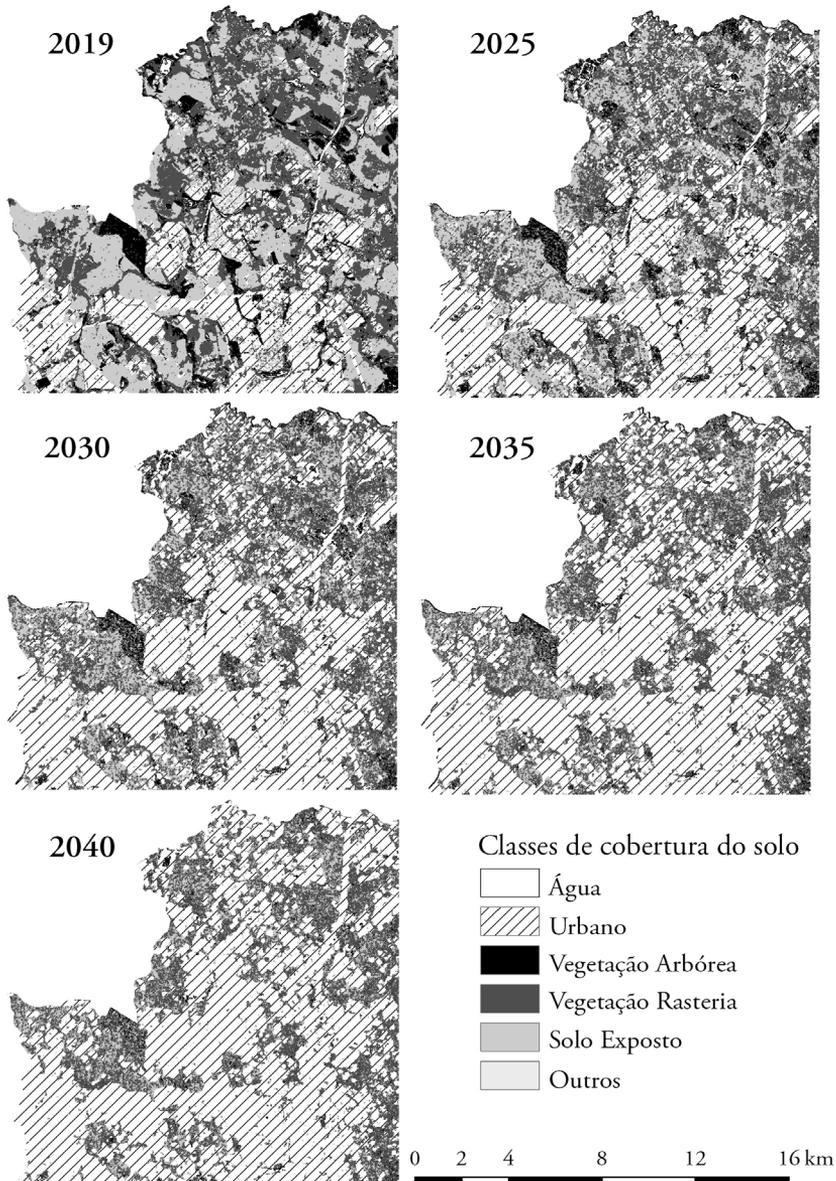
Resultados e discussão

A simulação do processo de crescimento urbano para a área estudo está apresentada na Figura 5, contendo cinco cenários preditivos entre 2019 e 2040. O primeiro cenário predito de crescimento, referente ao ano de 2019, apresentou acerto geral de 94% e Kappa de 0,91, que demonstra concordância satisfatória com as amostras de referência e que torna válido o resultado do modelo. No estudo de Berberoğlu et al. (2016), o cenário previsto por SLEUTH obteve índice Kappa de 0,74, que foi considerado satisfatório para a precisão da modelagem de áreas urbanas com acelerado crescimento, como é o caso da cidade de Adana na Turquia.

A tendência de crescimento simulada mostra um processo de adensamento da ocupação urbana a partir de núcleos urbanos existentes, ou seja, um tipo de crescimento orgânico como demonstrado pelo valor de coeficiente de propagação (*spread*). No entanto, pelos núcleos de urbanização situarem-se, predominantemente, próximos aos principais eixos viários da região norte-noroeste (Rodovias Anhanguera, Dom Pedro I, Prof. Zeferino Vaz e Governador Dr. Adhemar Pereira de Barros) há também uma tendência de crescimento influenciado pela malha viária, como observado pelo coeficiente de atração das vias (*road gravity*). No estudo Guan e Rowe (2016), os corredores de desenvolvimentos constituídos por ferrovias e rodovias também exerceram um papel importante na identificação de áreas de potencial de expansão e adensamento da rede urbana da região do delta

de Changjiang – China. Para os autores, o contínuo adensamento de novas áreas urbanizadas tende a ser desfavorável face a políticas de regulamentação do uso do solo e crescimento populacional.

FIGURA 5 | Cenários preditivos do crescimento urbano da área norte-noroeste de Campinas no período de 2019 a 2040



FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA

Essa tendência de expansão da zona norte-noroeste de Campinas acompanha modelos de crescimento urbano que incluem, em seus padrões, sistemas periurbanos de atividades comerciais e residenciais e novas formas de atividades, como fatores determinantes da expansão urbana. Nesses modelos, o valor da terra e a acessibilidade não são uniformes, mas variam conforme as alterações na relação entre a acessibilidade (melhorias e custos) e o uso do solo urbano (Kivell, 1993), materializando um processo de ocupação do espaço urbano imediato e aparente, pois acompanha a tendência econômica em evidência na perspectiva social e histórica da cidade (Carlos, 1994), além de estimular mudanças de localização das atividades para os subúrbios e áreas marginais às principais vias de circulação atendendo às necessidades sociais de demanda comercial emergente (Carlos, 1994; Hoyt, 1939; Torrens, 2001).

De fato, há registros que a expansão urbana de Campinas foi, inicialmente, impulsionada pela diversificação do mercado de trabalho e geração de empregos, bem como pelo baixo custo do preço da terra nas áreas periféricas, mas sem planejamento e, conseqüentemente, acompanhado de problemas de saneamento básico, moradia e transportes, gerando elevados custos sociais e ambientais (Badaró, 1996). Por sua vez, a expansão da região norte-noroeste foi impulsionada pela implantação de pólos tecnológicos e educacionais, próximas a importantes rodovias estaduais.

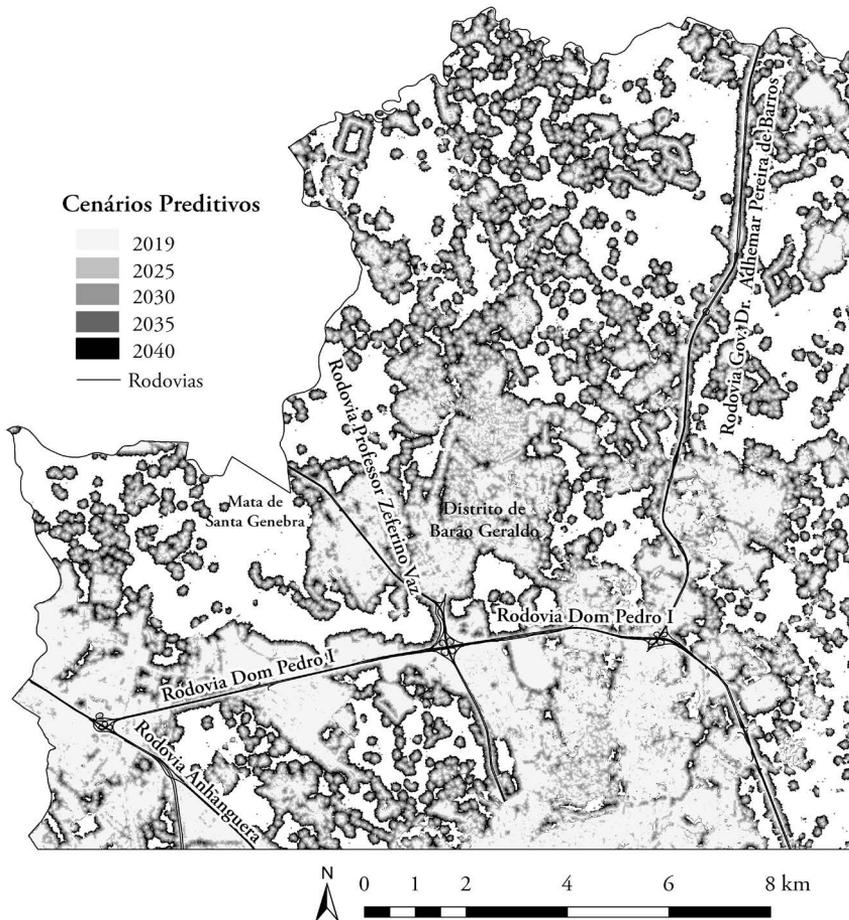
Os cenários preditivos do crescimento urbano, a partir de 2019, indicam que haverá um adensamento da mancha urbanizada entre 2025 e 2040, ocorrendo predominantemente nas áreas ao sul e norte do trecho da Rodovia Dom Pedro I, situada entre as Rodovias Professor Zeferino Vaz e Governador Doutor Adhemar Pereira de Barros. Ao sul da rodovia Dom Pedro I (Figura 6), localizam-se áreas urbanizadas não distantes (um raio de 5km) da área central do município e com uso e ocupação do solo predominantemente residencial e comercial.

Por outro lado, ao norte da rodovia Dom Pedro I, os cenários de crescimento indicam um processo de ocupação se expandindo e adensando, a partir do núcleo urbano do distrito de Barão Geraldo, sobre áreas verdes, principalmente a unidade de preservação Mata de Santa Genebra. Assim como se observa o avanço da urbanização nas áreas periurbanas, substituindo áreas com uso rural em 2019. Essa ocupação requer uma atenção dos gestores urbanos, devido a tendência de crescimento sobre áreas de preservação ambiental. Alguns fatores determinantes desta tendência, de acordo com os coeficientes de crescimento avaliados pelo modelo foram: relevo favorável à edificação, por predominar áreas com baixa declividade; atração econômica pela presença de pólos tecnológicos e educacionais e estrutura viária.

Na área oeste do entroncamento das rodovias Anhanguera e Dom Pedro, com predomínio de ocupação de conjuntos habitacionais e presença de algumas áreas de cultivo, há previsão de adensamento da área urbanizada concentrada ao longo do eixo viário, mas limitada a leste desse entroncamento por áreas institucionais não edificadas e propriedades rurais. Nota-se, portanto, uma tendência nesses cenários de expansão de ocorrer à conversão do solo agrícola em urbano, como alteração típica da urbanização que pode ser uma evidência suficiente de efeito negativo sobre a biodiversidade, ciclos biogeoquímicos e hidrológicos, indicando a necessidade de estratégias de controle e planejamento para a promoção de um desenvolvimento

sustentável. Uma vez que esse processo pode desencadear problemas ambientais resultantes da degradação de habitats e gerenciamento precários dos recursos naturais (Berberoğlu et al., 2016; Tian et al., 2016).

FIGURA 6 | Cenários preditivos do adensamento e crescimento urbano no entorno da malha viária na área norte-noroeste de Campinas (2019 a 2040)



FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA

Dessa forma, há uma dinâmica de espalhamento e adensamento para o padrão de crescimento da área de estudo, porém há também particularidades determinadas pelos tipos de uso e ocupação presentes no perímetro urbano de 2018, que se mantem inalteradas nos cenários preditivos. Em comum se caracteriza o crescimento orgânico, tendo por referência os núcleos urbanos existentes. No entanto, destaca-se como particularidade um adensamento mais homogêneo no entorno do

núcleo de Barão Geraldo, provavelmente devido a pouca restrição topográfica e legal ao uso do solo, bem como à presença da área de preservação da Mata de Santa Genebra que atua como uma limitação à expansão horizontal. Ao norte, as áreas periurbanas apresentam tendência de urbanização fragmentada em decorrência do tipo de ocupação (chácaras urbanas e condomínios residenciais) que se intensifica ao longo período simulado. Na região oeste, há tendência de adensamento homogêneo com a expansão horizontal limitada pelas grandes áreas institucionais não edificadas e propriedades rurais.

Para Scarassatti & Costa (2010), o município de Campinas pode ser retratado por especificidades locais e distintas na forma de ocupação e transformação no espaço urbano. Para esses autores a utilização do modelo matemático de cadeia de Markov, implementado no sistema de informação geográfica IDRISI, foi capaz de identificar cenários para o desenvolvimento urbano, tendo por fator principal de transformação a acessibilidade à rede viária de transporte. Assim, os resultados do presente estudo complementam a observação desses autores ao incluir a tendência de núcleos urbanos existentes em exercer um papel propulsor do crescimento, entando melhor alinhados as observações de Silva e Clarke (2002) para os aglomerados urbanos de Lisboa e Porto (Portugal), cuja previsão da expansão urbana destas metrópoles para o ano de 2025 é fortemente influenciada pelo processo histórico local, pelas redes de transportes e pelo modelo europeu baseado em núcleos centrais urbanos.

No estudo realizado por Sakieh et al. (2015), que aplicou este modelo SLEUTH na área urbana de Karaj (Iran), observando um crescimento ramificado e apresentando vazios urbanos para a tendência de expansão simulada para os anos de 2020, 2030 e 2040. Esses resultados permitiram, aos autores, concluir sobre as limitações no preenchimento do espaço urbano consequentes de áreas com restrição de uso e preservação, além das políticas públicas presentes nos planos de urbanização. Essa característica ramificada foi determinada por um crescimento ao longo da malha viária, consequentemente, gerando baixa eficiência na sustentabilidade do desenvolvimento futuro nessas áreas. De forma diferente, no presente estudo, apesar de apresentar tendência de crescimento ao longo da malha viária, houve o predomínio do adensamento dos núcleos urbanos existentes, evitando um crescimento ramificado na área de estudo de Campinas. No entanto, com a alteração recente do plano de Zoneamento do Uso e Ocupação do Solo Lei complementar nº 208 de 20/ Dez/2018) (CAMPINAS, 2018), que excluiu a delimitação das zonas ZEEL (zona especial de preservação ambiental do sistema de espaços livres) e ZEIS (zona especial de interesse social), há um retrocesso na política conservação ambiental, uma vez que essas zonas presentes no antigo plano de gestão tinham por objetivo a preservação dos espaços livres, do ambiente natural e dos usos ambientais e socioculturais.

Conclusões

A região norte-noroeste de Campinas apresentou uma tendência de crescimento com dinâmica constante de expansão e adensamento a partir dos núcleos urbanos existentes e no entorno da malha viária. Os fatores limitantes da expansão foram as grandes áreas institucionais não edificadas, as áreas de preservação e propriedades

rurais. Portanto, o modelo de crescimento urbano de Clarke – SLEUTH se apresentou adequado para o propósito de análise de cenários futuros da área analisada. Todavia, a alteração recente do plano de zoneamento urbano incorporou as zonas de preservação às zonas ZM (zona mista) e ZR (zona residencial), aumentando assim a pressão de urbanização sobre áreas de conservação ambiental, como demonstrado pelos cenários simulados para 2030, 2035 e 2040, com o aumento das áreas construídas sobre as áreas rurais e retração da área de preservação da Mata de Santa Genebra. Ressalta-se que essas alterações nas políticas de zoneamento, apesar de recentes, apresentam potencial para alterar a sustentabilidade face a pressão negativa sobre o ambiente nas próximas décadas. Para que essas evidências previstas nos cenários não se confirmem há necessidade de medidas de controle para o gerenciamento sustentável do desenvolvimento. Dessa mesma forma, também se evidencia a necessidade de reavaliação das políticas de regulamentação e planejamento urbano, tais como as leis de zoneamento e de uso e ocupação do solo.

Uma limitação do presente estudo foi a ausência da implementação de informações sobre o plano de urbanização no modelo de simulação. Recomenda-se que essas informações possam ser parâmetros de avaliação mais realísticas da adequabilidade do uso e ocupação do solo em futuros estudos, que pela integração ao modelo SLEUTH possibilite a análise da sustentabilidade do crescimento urbano nos cenários preditivos. No entanto, uma análise abrangente do desenvolvimento urbano demanda a identificação, mensuração e interpretação das alterações no espaço que são essencialmente oriundas do comportamento humano, sendo portanto, decisivo a inclusão de fatores que impulsionam as ações humanas como variáveis a serem implementadas/integradas para superar as limitações de descrição e interpretação da representação atual e projeções futuras das alterações espaciais urbanas, com destaque aos processos de custo de transporte, acessibilidade e valor da terra, oferta de trabalho, oferta e qualidade dos serviços urbanos, renda per capita, densidade populacional e qualidade de vida. Dessa forma, a simulação do crescimento urbano por cenários capazes de retratar com fidelidade aspectos socioeconomicos promoverá um avanço técnico dos métodos de modelagem.

Referências bibliográficas

- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F. & Ash'aari, Z. H. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 380-389. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.007>
- Aguilera-Benavente, F., Botequilha-Leitão, A. & Díaz-Varela, E. (2014). Detecting multi-scale urban growth patterns and processes in the Algarve region (Southern Portugal). *Applied Geography*, 53, 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.019>

- Araújo, M. F. I. & Pacheco, C. A. (1992). A trajetória econômica e demográfica da metrópole nas décadas de 70–80. Em W. Cano (Ed.), *Cenários da urbanização paulista: a região administrativa da Grande São Paulo* (pp. 53-92). São Paulo: Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados (SEADE).
- Badaró, R. S. C. (1996). *Campinas: o despontar da modernidade*. Campinas: Centro de Memória (CMU), Unicamp.
- Barreira-González, P. B., Aguilera-Benavente, F. & Gómez-Delgado, M. (2015a). Partial validation of cellular automata based model simulations of urban growth: An approach to assessing factor influence using spatial methods. *Environmental Modelling & Software*, 69, 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.03.008>
- Barreira-González, P. B., Gómez-Delgado, M. & Aguilera-Benavente, F. (2015b). From raster to vector cellular automata models: A new approach to simulate urban growth with the help of graph theory. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.07.004>
- Batty, M. (2009). Catastrophic cascades: extending our understanding of urban change and dynamics. *Planning and Design*, 36, 381-383. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1068/b3603ed>
- Batty, M., Couclelis, H. & Eichen, M. (1997). Urban systems as cellular automata. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, 159-164. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1068/b240159>
- Batty, M. & Longley, P. (1994). *Fractal cities*. San Diego, CA: Academic Press.
- Batty, M., Xie, Y. & Sun, Z. (1999). *The dynamics of urban sprawl*. Working Paper Series, Paper 15. London: Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London. <http://discovery.ucl.ac.uk/1360/1/paper15.pdf>
- Berberoglu, S., Akin, A. & Clarke, K. C. (2016). Cellular automata modeling approaches to forecast urban growth for adana, Turkey: A comparative approach. *Landscape and Urban Planning*, 153, 11-27. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.017>
- Bullock, N., Dickens, P. & Steadman, P. (1972). The use of models in planning and the architectural design process. Em L. Martin & L. March (Orgs.), *Urban Space and Structures* (pp. 97-112). London: Cambridge University.
- Campinas, Prefeitura Municipal. (2014). *Cobertura Aerofotogramétrica do Município de Campinas*. http://wms2.campinas.sp.gov.br/wmsmap/wms_ortofoto_2014.map
- Campinas, Prefeitura Municipal. (2017). *Plano Diretor Estratégico*. <https://planodiretor.campinas.sp.gov.br>
- Campinas, Prefeitura Municipal. (2018). *Projeto de Lei de Parcelamento, Ocupação e Uso do Solo do Município de Campinas*. <https://www.zoneamento.campinas.sp.gov.br>
- Carlos, A. F. A. (1994). *(Re)Produção do espaço urbano*. São Paulo: Edusp.
- Castells, M. (1976). *La question urbana*. México, DF: Siglo Veintiuno.
- Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI). (2017). *Clima dos Municípios Paulistas*. <https://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>
- Clarke, K. C., Hoppen, S. & Gaydos, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, 247-261. <https://doi.org/10.1068/b240247>

- Congalton, R. G & Green, K. (2009). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. New York: Lewis Publishers.
- Corrêa, R. L. (2001). *Trajetórias Geográficas*. Rio de Janeiro: Bestrand Brasil.
- Garner, B. J. (1975). Modelo de Geografia urbana e localização de povoações. Em R. J. Chorley & P. Haggett (Eds.), *Modelos integrados em Geografia* (pp. 124-174). Rio de Janeiro: Universidade de São Paulo (USP).
- Guan, C. & Rowe, P. G. (2016). Should big cities grow? Scenario-based cellular automata urban growth modeling and policy applications. *Journal of Urban Management*, 5(2), 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2017.01.002>
- Haggett, P. & Chorley, R. J. (1967). Models, paradigms and the new geography. Em R. J. Chorley & P. Haggett (Eds.), *Integrated Models in geography* (pp. 19-42). London: Methuen.
- Hogan, D. J., Cunha, J. M. P., Carmo, R. L. & Oliveira, A. A. B. (2001). Urbanização e vulnerabilidade sócio-ambiental: o caso de Campinas. Em D. J. Hogan, R. Baeninger, J. M. P. da Cunha & R. L. do Carmo (Orgs.), *Migração e ambiente nas aglomerações urbanas* (pp. 395-418). Campinas: Nucleo de Estudos de População 'Elza Berquó' (NEPO), Unicamp.
- Hoyt, H. (1939). *The structure and growth of residential neighbourhoods in American cities*. Chicago, IL: Housing Association.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2011). *Censo Demográfico 2010*. Resultados do universo por setores censitários. <https://www.censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2015). *Malhas Territoriais 2015*. Malhas Municipais. <https://www.geoftp.ibge.gov.br>
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). (2018). Divisão de Geração de Imagens. Coordenação-Geral de Observação da Terra. <http://www.dgi.inpe.br/>
- IPT & CPRM (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Serviço Geológico do Brasil – CPRM). (2014). *Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações município de Campinas, SP*. https://www.sidec.sp.gov.br/producao/map_risco/uploads/doc1447942602.pdf
- Kivell, P. (1993). *Land and the city: Patterns and processes of urban change*. London & New York: Routledge.
- Liu, Y. (2008). *Modelling urban development with Geographical Information Systems and cellular automata*. Boca Raton, CA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420059908>
- Mahiny, A. S. & Clarke, K. C. (2012). Guiding SLEUTH land-use/land-cover change modeling using multicriteria evaluation: Towards dynamic sustainable land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 39, 925-944. <https://doi.org/10.1068/b37092>
- Mayer, H. M. (1976). Perspectiva da Geografia urbana. Em P. Hauser & L. F. Schnore (Eds.), *Estudos de Urbanização* (pp. 75-104). São Paulo: Pioneira.
- Meneses, P. R. & Almeida, T. D. (2012). *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Brasília: Universidade de Brasília.
- Mestre, P. C. R. (2013). *Modelos de simulação de cenários de expansão urbana e alterações do uso do solo* (Dissertação de mestrado). Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.

- Polidori, M. (2005). *Crescimento urbano e ambiente: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Biociências. <https://www.repositorioeceme.ufrgs.br/handle/10183/6191>
- Sakieh, Y., Amiri, B. J., Danekar, A., Feghhi, J. & Dezhkam, S. (2015). Scenario-based evaluation of urban development sustainability: an integrative modeling approach to compromise between urbanization suitability index and landscape pattern. *Environment, Development and Sustainability: A Multidisciplinary Approach to the Theory and Practice of Sustainable Development*, 17(6), 1343-1365. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-014-9609-7>
- Scarassatti, D. F. & Costa, D. C. (2010). Modelos dinâmicos aplicados no planejamento urbano para a cidade de Campinas, Brasil. *PLURIS 2010*, 4º Congresso para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, Universidade do Algarve, Faro, Portugal. https://sapientia.ualg.pt/bitstream/10400.1/10293/1/pluris2010_Livro%20de%20Resumos.pdf
- Serra, G. O. (1987). *Espaço natural e a forma Urbana*. São Paulo: Nobel.
- Silva, E. A. & Clarke, K. C. (2002). Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6), 525-552. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00014-X)
- Stevens, D. & Dragicevic, S. A. (2007). GIS-based irregular cellular automata model of land-use change. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34, 708-724. <https://doi.org/10.1068/b32098>
- Tian, G., Ma, B., Xu, X., Liu, X., Xu, L., Liu, X., Xiao, L. & Kong, L. (2016). Simulation of urban expansion and encroachment using cellular automata and multi-agent system model – A case study of Tianjin metropolitan region, China. *Ecological indicators*, 70, 439-450. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.021>
- Torrens, P. M. (2018). A computational sandbox with human automata for exploring perceived egress safety in urban damage scenarios. *International Journal of Digital Earth*, 11(4), 369-396. <https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1320594>
- Torrens, P. M. (2001). *Can Geocomputation save urban simulation? Throw some agents into the mixture, simmer, and wait...* Working Paper Series, Paper 32. London: Center for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/263/1/paper32.pdf>
- Torrens, P. M. & O'Sullivan, D. (2001). Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28, 163-168. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1068/b2802ed>
- Villaça, F. (1998). *Espaço intra-urbano no Brasil*. São Paulo: Studio Nobel.
- Yao, F., Hao, C. & Zhang, J. (2016). Simulating urban growth processes by integrating cellular automata model and artificial optimization in Binhai New Area of Tianjin, China. *Geocarto International*, 31(6), 612-627. <http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2015.1073365>