

# Simulação de trânsitos intraurbanos a partir da modelagem baseada em agentes: inferências para o planejamento urbano sustentável da cidade de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

Simulation of urban traffic from agent-based modeling: inferences for sustainable urban planning in Uberlândia, Minas Gerais, Brazil

<sup>1</sup>Raphaela Ferreira, <sup>2</sup>Karen Santini Dias Passos, <sup>3</sup>André Luís de Araujo

## RESUMO

Os caóticos processos de urbanização no Brasil acarretaram em inúmeros problemas no espaço urbano atual, como o espraiamento das cidades. A partir desta problemática, emerge a necessidade de se aperfeiçoar métodos de planejamento urbano capazes de garantir o desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, entendendo que uma possível solução seja a densificação urbana, o presente trabalho com recorte no bairro Santa Maria em Uberlândia-MG, Brasil, simula com base em agentes a repercussão desta densificação, mais especificamente seus impactos diretos no trânsito local. Os resultados obtidos expressam que a infraestrutura urbana atual não seria capaz de comportar tal crescimento populacional, ocasionando novos problemas como conurbação e sobrecarregamento dos serviços. Portanto, apesar de assertivo, o adensamento deverá ocorrer em etapas e com distribuição uniforme pela cidade, garantindo que nenhuma região sobrecarregue outra para compensar.

### Palavras-chave

Planejamento urbano; Modelagem Baseada em Agentes; Cidades inteligentes; Densidade Urbana; Inteligência Artificial.

## ABSTRACT

Chaotic urbanization processes in Brazil have led to numerous problems in current urban spaces, such as the sprawling of cities. This problem points to the need to improve urban planning methods capable of guaranteeing sustainable development. In this sense, understanding that a possible solution is urban densification, the present case study of Santa Maria neighborhood in Uberlândia-MG, Brazil, uses an agent-based model to simulate the repercussion of this densification on local traffic. The results show current urban infrastructure would not be able to support estimated population growth, causing new problems such as conurbation and overloading of services. Therefore, despite being helpful, consolidation should take place in stages and with uniform distribution throughout the city, ensuring that no region is overwhelmed.

### Keywords

Urban planning; Agent-Based Modelling; Smart City; Urban Density; Artificial Intelligence.

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0003-3324-0601>

<sup>2</sup>Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0002-4593-2683>

<sup>3</sup>Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0003-4951-6860>

**Autor de correspondência:** André Luís de Araujo.  
**Dirección:** UFU BRAZIL, The Federal University of Uberlândia.  
João Naves de Ávila Avenue, 2121, Building 11, Room 105  
(Level 1) Santa Mônica Campus, Brasil.  
**E-mail:** andre.araujo@ufu.br

ISSN 2735-6078 Impresa  
ISSN 2735-606X on-line  
DOI: 10.29393/UR15-6STRA30006

## INTRODUÇÃO

Complexidade é um termo do latim que encerra significados diversos nas línguas de origem latina e saxônica. Em alguns contextos, a complexidade expressa a qualidade do que é complicado, de difícil apreensão. Em outros, pode estar relacionado à confusão, ao embaraço. Também é clara a proximidade entre esses significados, de modo que o que é confuso pode ser confuso por ser complicado, por não apresentar um ordenamento, ou ainda, por apresentar um ordenamento não identificável (Holland, 1999; Mitchell, 2009). No campo do planejamento urbano, autores consagrados buscaram explorar a complexidade das organizações geométricas do espaço urbano por meio de modelos discretos que reproduziam, ainda que com inúmeras restrições, fluxos intrincados a partir de formas complexas, como um tipo de morfogênese digital (Coates, Healy, Lamb, & Voon, 1996; Batty, 2005; Jencks, 1971). Dentre estes modelos, os Modelos Baseados em Agentes (ABM) podem ser entendidos como uma classe de modelos computacionais para simular as ações e interações de entidades autônomas, com o objetivo de avaliar seus efeitos no sistema como um todo (Gilbert, 2008).

Nos últimos anos, a computação abriu oportunidades aos planejadores urbanos a partir desse modelo holístico, virtual e dinâmico (Mohammadi & Taylor, 2018). Sob a perspectiva do planejamento urbano, desenvolver um sistema computacional autônomo de análise e simulação de cenários complexos pode promover uma otimização nas tomadas de decisão no ambiente real, ainda que não exista uma completa epistemologia sobre o assunto (Mohammadi, Vimal, & Taylor, 2020). Para tal, em essência, o modelo computacional não necessariamente deve representar fielmente a cidade real, mas sim, deve estar atrelado à performance e aos objetivos de sua representação (Dembski, Wössner, & Yamu, 2019). Embora modelos de simulação desse tipo sejam utilizados há anos por institutos de pesquisa como a NASA (Batty, 2018), sua aplicação no ambiente construído e urbano é ainda recente (United Nations, 2018) e tem como desafio antecipar e amenizar os impactos da urbanização mundial, que até o ano de 2050 terá 70% da população vivendo em cidades. No Brasil, uma perspectiva otimista incluiria também equacionar problemas advindos de processos de urbanização passados, que agravam os cenários urbanos atuais (Souza, 2021).

As estratégias mais utilizadas para a simulação de sistemas complexos como as cidades têm sido o desenvolvimento de entidades discretas, denominadas por agentes, que interagem entre si por meio de mecanismos de ação e reação a partir de uma condição inicial (Leach, 2009). Dentre as recentes divulgações científicas nesta linha, Bingöl e Çolakoğlu (2016) desenvolveram um modelo na linguagem Processing (PROCESSING SOFTWARE, 2021) buscando construir pressupostos sobre o crescimento da cidade de Istambul. Comparando os resultados com as expectativas previstas pelos planos diretores, estes autores concluíram que alguns vetores de crescimento coincidiram com determinadas aglomerações de agentes.

Nessa linha de raciocínio, cabe investigar a possibilidade de emprego da simulação com uso ABM aplicado ao planejamento urbano. Veloso e Pratschke explicam que esta metodologia se apropria dos elementos abstratos de mediação que possibilitam ao projetista assegurar a adaptação entre a forma e os diversos requerimentos (Veloso & Pratschke, 2013). Ainda que seus limites não estejam claramente mensurados, as iniciativas programáticas com modelos dinâmicos podem funcionar como alternativas à reunião simultânea dos conteúdos, concretos e abstratos, durante os processos criativos em planejamento urbano, resultando em uma interpretação qualitativa das simulações de mudanças propostas.

Visto os futuros desafios e presentes problemas do meio urbano brasileiro, o presente artigo visa entender as alterações e impactos destas transformações no mundo real ao testar a implementação de um protótipo em ABM com diretrizes de uma cidade média e compacta, explorando suas capacidades e limitações a partir de estratégias de simulação. Para tal, utilizaram-se os aplicativos Rhinoceros, a extensão de programação diagramática Grasshopper, além de scripts textuais em Python, no plug-in Quelea, visando a simulação da variável “potencialidade construtiva”, entendida como a relação entre a estrutura possível permitida pela legislação dentro da cidade e sua repercussão nos parâmetros de densidade populacional e trânsito local.

## MARCO TEÓRICO

O processo de urbanização no Brasil, por muitas décadas, marcado pelo aumento do êxodo rural desde 1940, acelerou o ritmo de crescimento das cidades em velocidades superiores às capacidades de planejamento municipal. Nesta dinâmica de ocupação, surgiram migrações nas habitações das classes de alto poder aquisitivo para condomínios fechados mais periféricos ao centro, deixando espaços e unidades habitacionais ociosos em áreas já urbanizadas, aumentando substancialmente o perímetro urbano (Santos, 1993). Os efeitos dessa expansão são substanciais no orçamento público municipal e na mobilidade urbana.

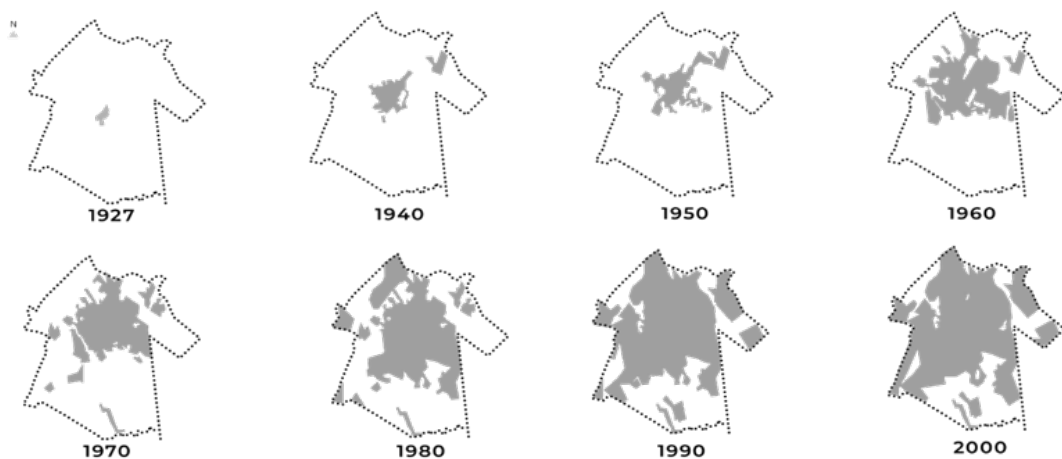
Neste contexto, a cidade de Uberlândia, Estado de Minas Gerais (18.9128° S, 48.2755° W), concretizou seu primeiro plano urbano entre 1907 e 1908,

denominado “plano das avenidas”. Naquele momento, ainda não havia claramente uma essência técnica, mas sim, o desejo do poder municipal em romper com morfologias urbanas do período colonial, por meio de largas avenidas. Somente a partir dos anos 1930 surgem decisões alicerçadas em planos estratégicos, destacando-se a criação de legislações federais e municipais e a articulação dos bairros a partir de sistemas de transporte, neste caso, com maior empenho em privilegiar o uso dos automóveis.

Dada a maior facilidade em percorrer grandes distâncias, Uberlândia elevou seu espraiamento urbano e forneceu uma base para o setor imobiliário explorar os vazios existentes, que se mantiveram ociosos em função da ausência de diretrizes urbanas para sua ocupação. Ademais, o poder público colaborou com a implantação de conjuntos habitacionais em periferias em setores leste e oeste, em detrimento da ocupação de áreas vazias mais centrais já equipadas com infraestrutura. Nas décadas de 1980 a 1990, a verticalização do centro culminou com a gentrificação da região, incrementando a população nas periferias, onde o valor da terra era reduzido. A partir dos anos 1990, com a criação de loteamentos e edifícios de custo elevado, a cidade se expande para as áreas periurbanas da região sul. Estes movimentos resultaram em condomínios fechados e habitações sociais em áreas periféricas, cujo acesso viabilizado pela abertura de grandes vias, leva infraestrutura para estas novas regiões, frente a subutilização de áreas anteriormente urbanizadas, como é o caso da amostra investigada na presente pesquisa, o Bairro Santa Maria (Figura 1).

**Figura 1.**

*Processo de expansão urbana de Uberlândia de 1927 a 2000, com a cidade ocupada em cinza e o perímetro traçado.*



Fonte: Adaptado de Fonseca (2007).

O presente artigo se baseia no termo cidade média sob a aferição da quantidade populacional. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a cidade média é aquela que possui população entre 100.000 e 500.000 habitantes. Conforme a Organização das Nações Unidas (ONU) as cidades médias são aquelas com aglomerações entre 100.000 e 1.000.000 de habitantes (França, 2007). Seguindo a classificação da ONU, por sua abrangência internacional, Uberlândia é classificada como Cidade Média, uma vez que os dados obtidos pelo IBGE (IBGE, 2021), apresentam a cidade de Uberlândia com 699.097 habitantes. Ademais, a definição do termo “cidade compacta” feita no presente estudo, é relativo a um sistema de planejamento urbano sustentável mais denso e menos espreado que o habitual (“mais compacto”) capaz de promover rápidos deslocamentos aos seus moradores para atividades cotidianas, não extrapolando grandes períodos de tempo (considera-se para este espectro tempos inferiores a 15 minutos) em deslocamento a pé para atividades corriqueiras como ir ao mercado, escola ou trabalho, por exemplo. Para isto, o sistema citado deverá garantir proximidade física entre os diferentes equipamentos, além da diversificação dos mesmos. De forma resumida, a cidade compacta reduz os tempos de deslocamento, e conseqüentemente, gera menor poluição e mais acessibilidade aos moradores (Glock & Gerlach, 2023).

### Outros desenvolvimentos recentes em ABM no contexto urbano

Modelos computacionais têm demonstrado alguma eficiência em examinar as relações complexas do comportamento humano, tanto de maneira individual quanto coletivamente. Recentemente, uma parcela significativa destes modelos tem sido dedicada a investigar o comportamento espacial em envoltórias urbanas, em ambientes sintéticos (Cheliotis, 2020). Conclusões significativas sobre o comportamento das pessoas em edifícios a partir de interações dos ocupantes com as aberturas foi validado em modelos computacionais, que utilizaram como suprimento as variáveis ambientais relacionadas ao comportamento térmico (Jia, 2019) e luminoso (Adirbas, 2019). Além disso, o delineamento de interações humanas com os layouts internos de um edifício foi validado a partir de experimentos empíricos (Uddin et al., 2021) que concluíram, juntamente com outros estudos computacionais (Fouladvand et al., 2022; Jia, 2019; Yu, 2022), sobre o impacto do uso de energia pelo comportamento dos usuários do edifício.

Investigações científicas com o ABM envolvendo o assunto específico do tráfego urbano foram exploradas como uma ferramenta capaz de auxiliar o planejamento das cidades (Gurram, Stuart, & Pinjari, 2019; González-Méndez et al., 2021). Análises envolvendo a interação dinâmica de ciclistas com o transporte rodoviário, levaram a conclusões sobre pequenos ajustes na malha viária capazes de reduzir consideravelmente potenciais colisões entre bicicletas e veículos motorizados (Thompson, et al., 2020; Thompson et al., 2019). Fluxos simulados sobre a caminhabilidade em ambientes urbanos usando instruções algorítmicas em ABM foram comparados com a atividade de pedestres no mundo real, obtendo indicadores mensuráveis sobre os graus de precisão da ferramenta (Lopez Baeza et al., 2021). Além disso, a calibração de sistemas desse tipo permite a análise em tempo real do resultado de

intervenções urbanas a partir de padrões de comportamento centrados nos pedestres (Yurrita et al., 2022; Xu, Huang, & Kimm, 2021).

O adensamento de veículos em regiões específicas da área urbana foi investigado pela perspectiva do ABM, cujos resultados puderam ser analisados sobre a ótica de diversas implicações: poluição do ar em áreas de tráfego intenso (Coates, Healy, Lamb, & Voon, 1996), volume de tráfego por hora (Yang et al., 2019) e agentes geradores de tráfego (Torrens, 2022). Estas ferramentas têm fornecido uma interface tangível de apoio à decisão de projeto a fim de informar positivamente os profissionais de planejamento urbano ao propor alternativas sustentáveis no futuro. Em última instância, este tipo de construção algorítmica em ABM poderá contribuir decisivamente para as investigações de riscos associados à introdução de veículos automatizados no sistema de transporte rodoviário (Read, Salmon, & Thompson, 2020).

## METODOLOGIA

Desde a publicação de Groat e Wang (2013) os métodos científicos de simulação passaram a ter um papel pragmático dentro da pesquisa em arquitetura, principalmente por possibilitar a construção de hipóteses sobre as condições reais a partir de cenários virtuais. Dentro desse contexto, esta pesquisa propôs uma redução científica qualitativa fundamentada em uma estratégia de simulação, com delineamento indutivo, na qual se estabelece como premissa dados de entrada (inputs) sobre caminhabilidade, densidade urbana e potencialidade construtiva. O critério de seleção destes indicadores se deu em virtude de suas características computáveis, possibilitando sua escrita algorítmica e análise em ambiente virtual.

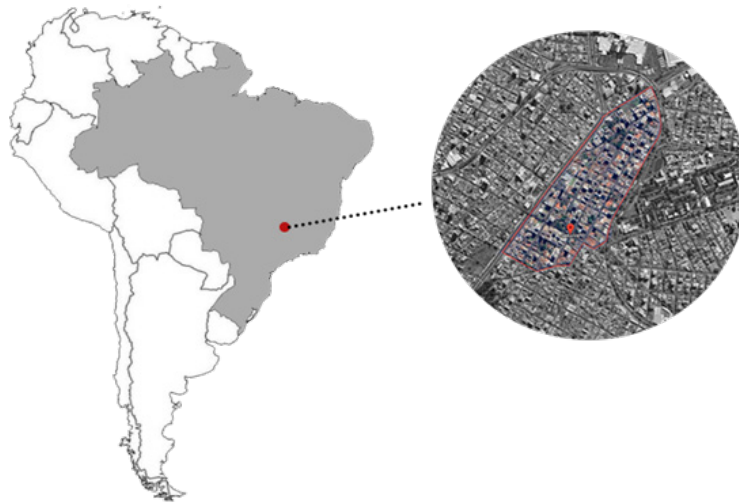
De maneira sistemática, seguindo a disposição clássica do Design Science Research (Dresch, Lacerda, & Antunes, 2014), por meio de procedimentos não necessariamente sequenciais e com sobreposições, organizou-se o método segundo três estratégias que trabalham de forma hierárquica para o marco conclusivo observacional. As etapas foram divididas em:

- 1) análise e design: desenvolvimento de um modelo paramétrico da amostra, região denominada Santa Maria, cuja seleção se deu em virtude dos quesitos 'zona urbana', 'período de existência' e 'consolidação do bairro'. Ademais, os inputs estabelecidos foram introduzidos de maneira numérica, condicionadas necessariamente à abstrações e interpretações;
- 2) implementação e desenvolvimento: construção de algoritmos atribuindo comportamento aos agentes (instâncias gráficas) por meio de vetores de força, a fim de executar interações responsivas, isto é, que permitam visualizar as repercussões destes comportamentos dinâmicos;
- 3) avaliações e inferências: deduzir os achados, classificando seu desempenho e vislumbrando aplicabilidades, por meio da construção de hipóteses mais amplas.

## Modelagem e categorização por uso da área selecionada

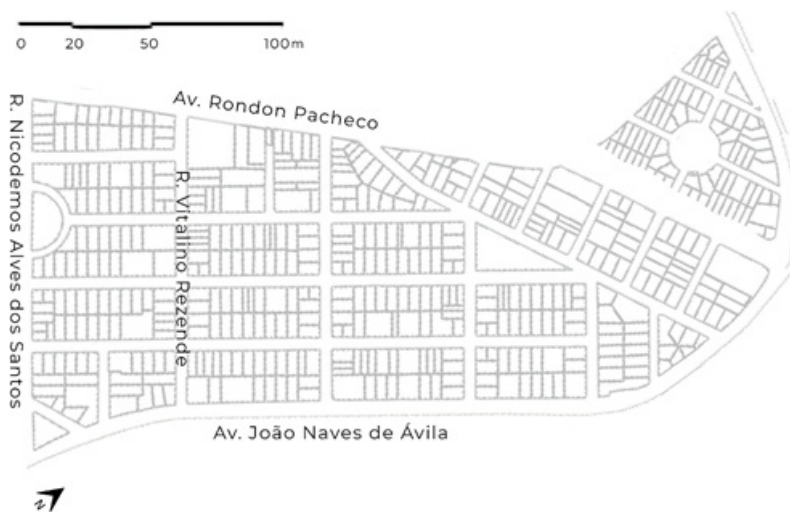
Localizado no setor sul de Uberlândia o delineamento estudado, Santa Maria, se encontra dentro de uma região maior, do bairro Saraiva. Por conta disto, a região não realiza censos demográficos específicos, estando estas informações contidas dentro da região do Saraiva. Esta região possui uma população contabilizada de 10.019 habitantes, com 53,10% do sexo feminino e 11,71% da população total dentro da faixa etária de 20 a 24 anos, sendo esta majoritária (IBGE, 2021). A região contém 4.446 domicílios, dentro de uma área de 1,15 km<sup>2</sup> (Figura 2).

**Figura 2.**  
*Bairro Saraiva em Uberlândia – Minas Gerais – Brasil.*



Fonte: Adaptado de Fonseca (2007).

**Figura 3.**  
*Região Santa Maria, delimitada por avenidas arteriais da cidade de Uberlândia: Rondon Pacheco, Nicodemos Alves dos Santos e João Naves.*



Fonte: Autores.

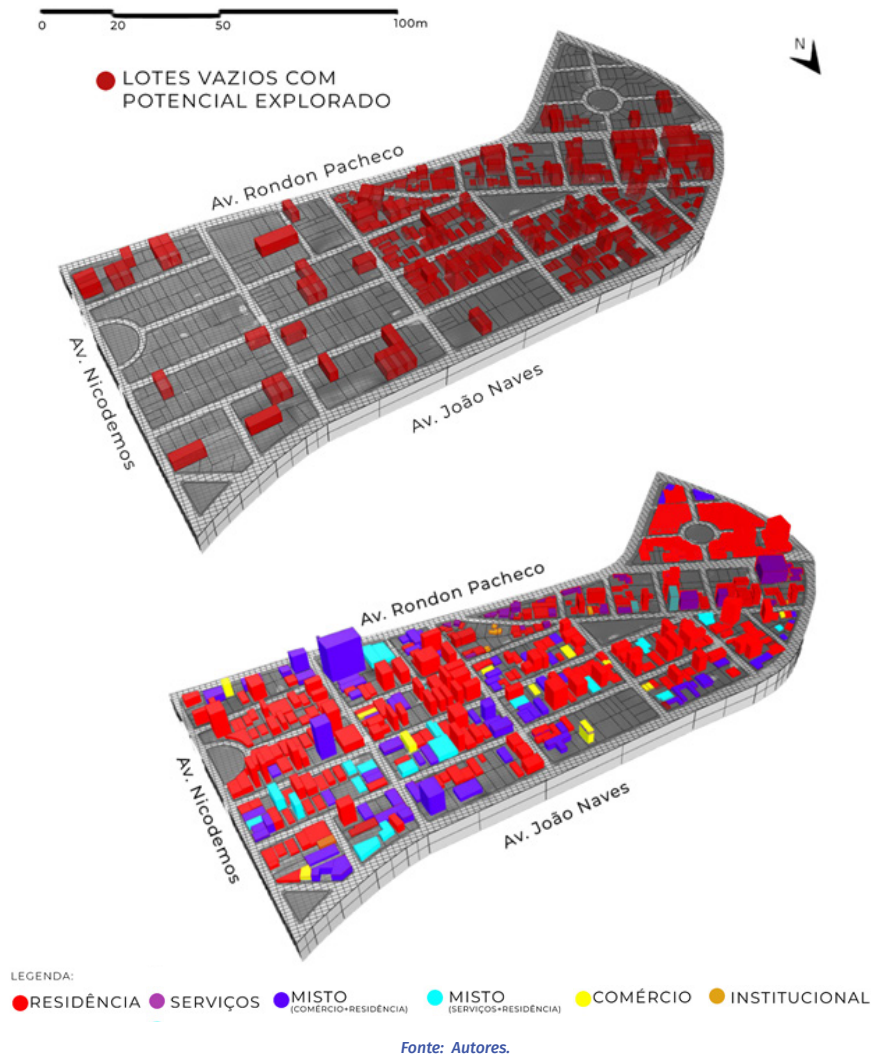
Na região específica do Santa Maria (Figura 3) tem-se uma área de aproximadamente 0,45 km<sup>2</sup>. A partir de uma proporção matemática com base nos dados supracitados, o delineamento abrigaria 3.921 habitantes e 1.740 domicílios, conforme mostra-se no comparativo da (Tabela 1).

**Tableau 1**  
*Proporcionalidade de municípios da área estudada.*

Região	População	Área	Domicílios
Saraíva	10.019	1,15 km <sup>2</sup>	4.446
Santa Maria	3.921	0,45 km <sup>2</sup>	1.740

Fonte: Autores.

**Figura 4.**  
*Uso e ocupação do solo dentro do recorte da pesquisa do bairro Santa Maria.*





Neste contexto, produziu-se a análise de uso e ocupação do solo e a demarcação dos lotes vagos com potencial construtivo a ser explorado por meio da simulação computacional. Nota-se a presença majoritária de uso residencial, com poucos usos mistos próximos a Av. Nicodemos. Além disso, a grande taxa de presença de pequenos cômodos comerciais, feitos geralmente na garagem das habitações presentes na categoria de “comércio e residência”. Destacase a presença de grandes empreendimentos, como hotel, agência bancária, museu do índio e escola de ensino fundamental (Figura 4). Com base na legislação, definiu-se potencial construtivo como um cenário hipotético no qual ocorre a ocupação máxima permitida, considerando os afastamentos dos lotes e a altura máxima dos edifícios nas áreas ainda não ocupadas.

### Entradas de dados (inputs)

Tendo em vista que o objetivo final consiste em estudar a potencialidade construtiva e as consequências da verticalização, foi desenvolvido, a partir de dados existentes e disponibilizados pela prefeitura da cidade (IBGE, 2021), um percentual da taxa de densificação do bairro por pavimento construído. Uma vez que os dados disponibilizados pela prefeitura correspondem à área completa do Santa Maria, foi necessária uma adaptação desses dados na área delimitada de estudo. Para isso, por meio da Equação (1), foi realizada uma estimativa da população da área estudada, considerando que o bairro possuía uma densidade habitacional uniforme. Posteriormente, foi realizado uma contagem manual da quantidade de pavimentos habitacionais (número de andares em prédios habitacionais) presentes na região, pelo qual se dividiu a população estimada no passo anterior, atingindo uma média de 3,25 habitantes por pavimento habitacional construído (2).

Onde:

$$P_a = \frac{A_d \cdot P_t}{A_t}$$

Ad – Área delimitada

At – Área total

Pt – População total

Pa – População da área

$$D_p = \frac{P_a}{N_{tp}}$$

Onde:

Dp – Densidade por pavimento

Pa – População da área

Ntp – Número total de pavimentos na área

A partir destes inputs, o estudo se concentrou na legislação de uso e ocupação do solo de Uberlândia, na qual foram analisados o potencial de verticalização autorizado na região Santa Maria. Desse modo, obteve-se um potencial de verticalização máximo de 4 pavimentos, uma vez que este é o limite definido pela legislação municipal da área, conforme as equações subsequentes. Por meio da Equação (3) determinou-se a área edificável de cada lote, considerando as áreas de recuo exigidas. Na Equação (4) determinou-se o número de pavimentos possíveis, relacionando a área útil com o coeficiente de aproveitamento do solo determinado pela legislação.

$$A_u = A_t - A_r$$

Onde:

A<sub>u</sub> – Área útil

A<sub>t</sub> – Área total

A<sub>r</sub> – Área de recuo

$$N_p = \frac{A_t \cdot q_a}{A_u}$$

Onde:

N<sub>p</sub> – Número de pavimentos

A<sub>t</sub> – Área total

q<sub>a</sub> – Coeficiente de aproveitamento do solo

A<sub>r</sub> – Área de recuo

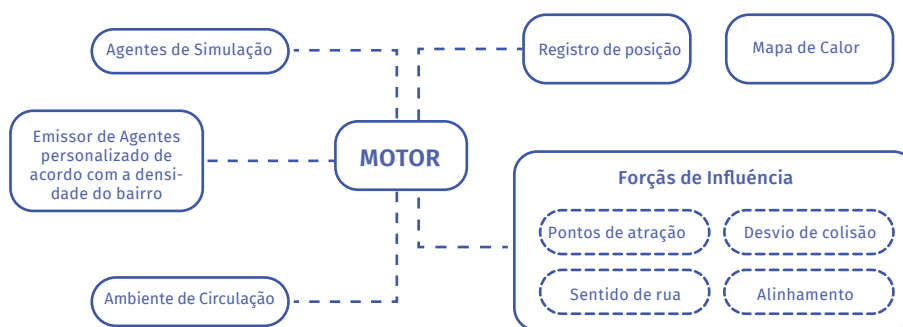
Após esta etapa, tendo como objetivo atingir a verticalização máxima possível, foi criado um modelo do Santa Maria em que todos os edifícios de uso exclusivamente residencial com gabarito menor ou igual a 3 pavimentos são substituídos por edifícios de 4 pavimentos, criando duas fontes de dados: uma com os parâmetros reais e outra com os parâmetros potencializados, a fim de estabelecer uma comparação entre eles.

### Aplicação do protótipo

Feito isso, utilizando o aplicativo Rhinoceros com auxílio do plug-in Grasshopper e Quelea, foi desenvolvido um artefato para simular por meio de um modelo baseado em agente (ABM) um comportamento análogo ao trânsito, a fim de entender os comportamentos dos agentes e adaptá-los de forma a alcançar a maior proximidade de um comportamento real de tendência de movimento, chegando à lógica representada pelo diagrama da (Figura 5).

**Figura 5.**

*Diagrama representativo da dinâmica de funcionamento do artefato.*



Fonte: Autores.

O add-on Quelea é uma biblioteca de design baseada em regras de componentes da linguagem de programação diagramática Grasshopper3D, um complemento gratuito para o aplicativo de modelagem 3D, Rhinoceros3D (v. 7, McNeel, Inc.), permitindo criar simulações, análises e formulários complexos por meio da combinação de regras simples. Com

base nisso, construiu-se um sistema gráfico para emitir agentes (pontos) representando os veículos automotivos individuais, cujas quantidades e frequências de emissão foram personalizadas para cada cenário proposto. Estes agentes, obedeceram às seguintes regras pré-definidas: limite físico da via, velocidade máxima, alinhamento em faixas, sentido de circulação, desvio de colisão, pontos de atração e tamanho dos agentes, almejando alcançar uma simulação mais próxima possível ao comportamento real dos veículos no trânsito.

Posteriormente, foi realizado um exercício de identificação das ruas mais impactadas pelo trânsito no local, por meio de critérios como conectividade e dimensão das vias, resultando em um conjunto de quatro vias, que se configuram como vias coletoras e estruturais na área delimitada. Feito isso, realizou-se a análise dos dados encontrados e efetuou-se uma estimativa do fluxo de trânsito no local, por meio da manipulação da quantidade de agentes emitidos em um tempo determinado. Esta estimativa de emissão de agentes foi realizada matematicamente seguindo a proporção de 100% dos habitantes que residem nessas vias + 30% dos moradores das ruas conectadas à via em questão, com os dados matemáticos equivalentes ao cenário atual da região (Cenário 01), comparando-o com um cenário hipotético que considera o potencial de verticalização (Cenário 02), obtendo-se assim a mensuração do impacto populacional nas vias, conforme apresenta-se na Tabela 2. Essa proporção foi utilizada para fins de estimativa e para viabilizar a análise da ferramenta, uma vez que o experimento foi realizado durante o período pandêmico, o que alteraria os resultados.

O modelo foi emulado nos dois cenários para fins comparativos, gerando um registro de posição dos agentes no ambiente 3D a cada 0,5 segundo, por meio das coordenadas do sistema cartesiano existente no Rhinoceros3D (McNeel, Inc). Estes dados foram exportados para um arquivo no formato numérico separado por vírgulas \*.csv (comma separated values) e interpretados pelo aplicativo Tableau<sup>1</sup>, no qual foram gerados mapas de calor para a visualização dos locais com mais registros de posição de agentes e, conseqüentemente, maior engarrafamento. Esses dados, para melhor visualização foram incorporados ao mapa representativo por meio de recursos gráficos do Photoshop (Adobe, Inc.), que é um aplicativo caracterizado como editor de imagens bidimensionais do tipo raster.

**Tableau 2.**  
*População influente nas vias adotadas em cenários diferentes.*

Descrição	Cenário 01	Cenário 02
Av. João Naves de Ávila	357	584
Av. Rondon Pacheco	330	553
R. Vitalino Rezende	543	850
Av. Nicodemos	575	940

Fonte: Autores.

<sup>1</sup> Tableau é um aplicativo para visualização e análise de dados focado em inteligência financeira (*business intelligence*).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atualmente, Uberlândia possui 135,3492 km em perímetro urbano, 4.115,116 km<sup>2</sup> em área e uma população de 604.013 habitantes (IBGE, 2021) resultando em uma densidade populacional equivalente a 259,65 habitantes/km<sup>2</sup>. Dados que traduzem a realidade de uma cidade dispersa e, apesar dos problemas envolvidos neste modelo urbano supracitados, é possível observar uma tendência de continuidade no movimento de espraiamento (Figura 6), apoiada pela influência da reprodução desigual do capital no solo e que, por consequência, vai de encontro com princípios de desenvolvimento sustentável urbano.

Sendo assim, por meio dos métodos utilizados, foi possível inferir alguns resultados numéricos com relação ao potencial de verticalização do bairro em questão. O principal deles se refere ao aumento da população total que seria de 9,68%, considerando o potencial de verticalização de apenas 35,52% da área total do bairro. Apesar da mudança na densidade urbana não causar grande impacto em números, é importante ressaltar que estes representam 972 pessoas, em uma área de 0,42 km<sup>2</sup>. Atualmente, é possível averiguar uma tendência ainda maior de espraiamento, aumentando, por consequência, a necessidade de criação de uma infraestrutura urbana e os custos ao poder público. Ademais, foram produzidas peças gráficas com representação a partir de mapas de calor acerca da estimativa de aumento do fluxo de tráfego viário.

### Figura 6.

Conjunto de imagens apresentando a análise de trânsito realizada na Av. João Naves de Ávila nos dois possíveis cenários de ocupação urbana: atual (à esquerda) e com o potencial de verticalização maximizado (à direita), e seus respectivos gráficos.



Fonte: Autores.

Na Av. João Naves de Ávila, foram emitidos 17.850 agentes no cenário atual e 29.200 agentes no cenário com o potencial de verticalização maximizado, buscando uma proporcionalidade por base da multiplicação dos habitantes pelo fator 50. Esse fator foi utilizado devido a necessidade de alcançar uma simulação mais próxima a realidade, uma vez que o Quelea não emite 100% dos agentes a depender das forças envolvidas no sistema. Portanto para que os agentes no sistema representassem,

em número, o mais próximo possível dos cenários propostos, em todas as vias foi necessário um multiplicador que foi obtido por meio de testes. Dessa forma, é possível perceber que a densificação do fluxo de trânsito é notável uma vez que, principalmente nas áreas próximas a conexão de vias adjacentes importantes, houve um aumento expressivo da quantidade de agentes passando por esses locais (Figura 6).

#### Figura 7.

Conjunto de imagens apresentando a análise de trânsito realizada na Av. Rondon Pacheco nos dois possíveis cenários de ocupação urbana: atual (à esquerda) e com o potencial de verticalização maximizado (à direita), e seus respectivos gráficos.

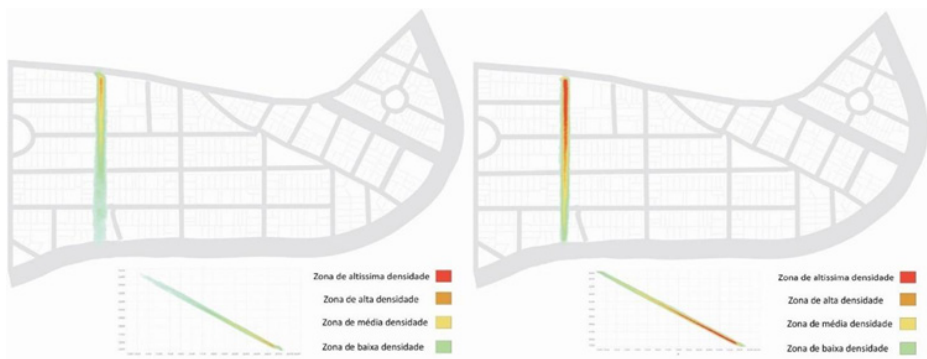


Fonte: Autores.

Na Av. Rondon Pacheco foram emitidos 16.500 agentes no cenário atual e 27.650 agentes no cenário com o potencial de verticalização maximizado. No caso dessa via, é possível perceber que a influência da verticalização foi mais expressiva, apesar da proporcionalidade dos agentes emitidos ser equivalente a Via Estrutural 01, o caminho percorrido pelos agentes no segundo cenário em zonas de alta densidade de trânsito foi bem maior que no Cenário 1, indicando possíveis gargalos de trânsito nesse local (Figura 7).

#### Figura 8.

Conjunto de imagens apresentando a análise de trânsito realizada na Rua Vitalino nos dois possíveis cenários de ocupação urbana: atual (à esquerda) e com o potencial de verticalização maximizado (à direita), e seus respectivos gráficos.



Fonte: Autores.

Na Rua Vitalino, foram emitidos 10.860 agentes no cenário atual e 17.000 agentes no cenário com o potencial de verticalização maximizado, buscando uma proporcionalidade por base da multiplicação dos habitantes pelo fator 20. O resultado da representação gráfica foi similar ao da Via Estrutural 02 (Figura 8), demonstrando um caminho maior em zonas de alta densidade de trânsito.

Já na Av. Nicodemos, foram emitidos 11.500 agentes no cenário atual e 18.800 agentes no cenário com o potencial de verticalização maximizado. O resultado dessa via foi similar ao da R. Vitalino (Figura 9), representando pouca diferença no caminho percorrido pelos agentes, mas alta taxa de densificação.

#### Figura 9.

*Conjunto de imagens apresentando a análise de trânsito realizada na Av. Nicodemos nos dois possíveis cenários de ocupação urbana: atual (à esquerda) e com o potencial de verticalização maximizado (à direita), e seus respectivos gráficos.*



Fonte: Autores.

Com isso, foi possível observar que os impactos no trânsito da cidade são expressivos, considerando a densificação da área, é importante questionar até que ponto a cidade está preparada e quais as estratégias necessárias para organizar uma possível densificação. Como dito na introdução, o processo de urbanização brasileira foi intenso e caótico, sem um planejamento racional, com modelos de infraestrutura na maioria das cidades dentro do padrão de atendimento à demanda atual. Entretanto, como mostram os resultados, os impactos, especialmente no tráfego das vias, seriam significativos a ponto de gerar longas filas de congestionamento, uma vez que a simulação leva em conta apenas a população do bairro, imagina-se que esta, somada a população municipal que transita pelas mesmas vias, possa causar enormes impactos para além da escala do bairro, tanto em tempo de deslocamento, como poluição ambiental e sonora.

Por outro lado, dentro dos contextos explicados anteriormente sobre o espraiamento da cidade de Uberlândia, é importante mensurar o custo-benefício das alterações necessárias para suportar a demanda de uma população maior dentro de um bairro com potencial construtivo inexplorado, frente ao aumento do perímetro urbano, dos serviços e

infraestrutura para desenvolvimento de uma infraestrutura urbana totalmente nova em uma área ainda não ocupada. A partir do modelo baseado em agentes é possível pensar em uma outra estratégia de ocupação que possa diluir a verticalização máxima suposta no presente trabalho, por meio de uma verticalização moderada, mas em áreas de município mais extensas, o que fornece indícios de que para estes problemas específicos, a ferramenta ABM poderia ser utilizada na previsibilidade de problemas urbanos no que tange ao adensamento.

Além disso, é de suma importância também levar em consideração, também as consequências que a transformação da cidade de Uberlândia em uma cidade compacta teria nos mais diversos fatores que definem um desenvolvimento urbano sustentável. Como por exemplo, a necessidade de investimento na remodelação do Sistema de Transporte Público Coletivo, devido a necessidade de diminuir a utilização de meios de transportes de uso individual, para assim melhorar a eficiência da malha viária na mobilidade urbana. Ademais, o aumento da densidade implicaria na percepção dos moradores sobre as áreas em questão, uma vez que, no contexto Latino-Americano, altas densidades são associadas a áreas de baixa renda e regiões de “disputa” de espaço, circulação e privacidade, o que demandaria investimentos em infraestruturas que mitiguem essa sensação na população para que o uso e a urbanidade das regiões sejam eficientemente fomentados. Em suma,

*A densidade urbana deve resultar de um processo de desenho urbano através do qual o planejador lida de forma dinâmica com standards, padrões de infraestrutura, tamanho de lotes e da habitação, tipologia habitacional, planejamento espacial e morfologia urbana, aceitação cultural e adequabilidade ambiental. Não deve ser de forma alguma o resultado apenas de um exercício analítico dos custos e impactos financeiros cujo objetivo único é de encontrar a solução que maximiza a terra disponível, as redes de infraestrutura e serviços urbanos. (Lopes, Antunes, & Janda, 2019).*

Por esse motivo, a utilização dos Modelos Baseados em Agentes auxilia na compreensão de apenas um dos diversos pontos relevantes para a criação de uma cidade compacta, que deve prever investimento em pesquisas a respeito da viabilidade de investimento/retorno dos órgãos públicos devido ao grande impacto urbano que a densificação pode representar. Sendo assim, o desenvolvimento urbano duradouro e sustentável depende também da eficácia e eficiência da configuração urbana e consequentemente da própria densidade urbana gerada.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho explorou a eficácia da utilização da inteligência artificial aplicada ao projeto urbano em conjunto ao modelo de cidade compacta. O protótipo desenvolvido analisou o parâmetro da potencialidade construtiva e seus efeitos no trânsito. Entretanto, ao

analisar o potencial de verticalização limitado pela legislação municipal (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2010) e simular os potenciais cenários, conforme descritos na seção resultados, questiona-se a escolha da gestão pública em expandir o perímetro urbano construído em comparação a existência dos lotes com potencial construtivo ainda inexplorados e a falta de estudos comparativos entre as duas situações descritas. Conclui-se como imprescindível que o adensamento da cidade deva seguir um sistema uniforme, não promovendo o processo em bairros específicos apenas, mas utilizando maior área municipal associada a uma vertical. Além disso, os resultados ilustram que o adensamento não necessariamente promove uma cidade compacta, pois esta deverá ser funcional, apesar de aumentar a população, os deslocamentos foram prejudicados uma vez que a infraestrutura urbana presente é insuficiente para a nova demanda. Portanto, sem uma uniformidade na cidade, o adensamento populacional não soluciona todos os problemas criados pelo espraiamento urbano, e acaba por causar novos obstáculos.

ABM é um paradigma para simular as ações e interações de agentes heterogêneos autônomos, que não precisam ser perfeitamente racionais ou perfeitamente informados, a fim de estudar os efeitos emergentes no nível do sistema do comportamento dos agentes coletivos dentro de um determinado ambiente, ao longo do tempo, com uma instrumentação simples que se baseia em dados, um computador com capacidade compatível com o banco de dados e um operador devidamente treinado para produzir e operar o ABM. Devido a essa simplicidade de interpretação dos dados, pode-se simular cenários complexos sem a necessidade de grande concentração de esforços. Ele se demonstra como uma ferramenta adequada para o planejamento de cidades Sul-americanas, uma vez que é possível utilizá-lo sem a necessidade de criação e investimento em sistemas de monitoramento por sensores complexos para entendimento das tendências de desenvolvimento da cidade. Se demonstra como uma ferramenta alternativa barata e eficiente, quando comparada às tendências de utilização de tecnologia no contexto urbano mais difundidas. Cita-se ainda, que o dilema a respeito da interpretação e representação de sistemas complexos no meio digital, implica em reconhecer as fronteiras da inteligência artificial no urbanismo.

Uma parcela significativa dos futuros desafios e os presentes obstáculos se concentram em quantificar as variáveis observáveis do espaço urbano, o que leva a crer que a migração dos métodos tradicionais para plataformas automatizadas e que combinem grande quantidade de variáveis possa conduzir a melhores tomadas de decisão projetual. A partir do trabalho aqui realizado e observando as limitações da redução científica proposta, existe um indício de que a capacidade de gerar e testar diferentes cenários rapidamente pode possibilitar a proposição de soluções de modo mais eficaz que os sistemas tradicionais. No entanto, por se tratar de uma tecnologia recentemente aplicada no planejamento urbano, existe uma lacuna do conhecimento a ser compreendida quanto às reais possibilidades e limitações da modelagem baseada em agentes, representando assim a próxima fronteira para a ciência urbana nacional.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Brasil) e ao Laboratório de Modelagem Baseada em Informação (<http://www.informa3d.xyz>) da Universidade Federal de Uberlândia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adirbas, A. (2019). Façade form-finding with swarm intelligence. *Automation in Construction*, 99, 140-151.

Batty, M. (2005). *Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Cambridge: The MIT Press.

Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B. Urban Analytics and City Science*, 45.

Bingöl, A., & Çolakoglu, B. (2016). *Agent-Based Urban Growth Simulation: A case study on Istanbul*. 34th Conference of Education and Research in Computer-Aided Architectural Design in Europe, 41-48, August 2016 Oulu: Ecaade.

Lopes, M., Antunes, C., & Janda, K. (2019). Energy and behaviour: Challenges of a low-carbon future. *Academic Press*, 321-351.

Cheliotis, K. (2020). An agent-based model of public space use. *Computers, Environment and Urban Systems*, 81, 101476.

Coates, P., Healy, N., Lamb, C., & Voon, W. (1996). *The use of cellular automata to explore bottom-up architectonic rules*. Eurographics UK Chapter 14th Annual Conference, 26-28 March 1996 London: Eurographics Association UK.

Dembski, F., Wössner, U., & Yamu, C. (2019, July). *Digital twin*. Em Virtual Reality and Space Syntax: Civic Engagement and Decision Support for Smart, Sustainable Cities: Proceedings of the 12th International Space Syntax Conference, Beijing, China (pp. 8-13).

Dresch, A., Lacerda, D., & Antunes, J. (2014). *Design Science Research: A Method for Science and Technology Advancement*. Springer.

Fonseca, M. (2007). *Forma Urbana e Uso do Espaço Público*. As transformações no centro de Uberlândia. (Tese doutoral). Universidade Politécnica de Cataluña.

Fouladvand, J., Rojas, M. A., Hoppe, T., & Ghorbani, A. (2022). Simulating thermal energy community formation: Institutional enablers outplaying technological choice. *Applied Energy*, 306, 117897.

França, I. (2007). *A cidade média e suas centralidades: O exemplo de Montes Claros no norte de Minas Gerais*. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Uberlândia.

Gilbert, N. (2008). *Agent-Based Models*. (Quantitative Applications in the Social Sciences). SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781412983259>

Glock, J. & Gerlach, J. (2023). Berlin Pankow: a 15-min city for everyone? A case study combining accessibility, traffic noise, air pollution, and socio-structural data. *European Transport Research Review*, 15, 1. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00577-2>

González-Méndez, M., Olaya, C., Fasolino, I., Grimaldi, M., & Obregón, N. (2021). Agent-Based Modeling for Urban Development Planning based on Human Needs. Conceptual Basis and Model Formulation. *Land Use Policy*, 101, 105110. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105110>

Groat, L., & Wang, D. (2013). *Architecture Research Methods*. John Wiley & Sons.

Gurram, S., Stuart, A., & Pinjari, A. (2019). Agent-based modeling to estimate exposures to urban air pollution from transportation: exposure disparities and impacts of high-resolution data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 75, 22-34.

Holland, J. (1999). *Emergence: from chaos to order*. Basic Books.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2021). *Censo Brasileiro de 2020*. IBGE.

Jencks, C. (1971). *Architecture 2000: prediction and methods*. Praeger.

Jia, M. (2019). A systematic development and validation approach to a novel agent-based modeling of occupant behaviors in commercial buildings. *Energy and Buildings*, 199, 352–367.

Leach, N. (2009). *Swarm Urbanism*. Em *Architectural Design: Digital Cities*. Wiley, 56-63. <https://doi.org/10.1002/ad.918>

López Baeza, J., Carpio-Pinedo, J., Sievert, J., Landwehr, A., Preuner, P., Borgmann, K., Avakumović, M., Weissbach, A., Bruns-Berentelg, J. & Noennig, J.R. (2021). Modeling pedestrian flows: Agent-based simulations of pedestrian activity for land use distributions in urban developments. *Sustainability*, 13(16).

Mitchell, M. (2009). *Complexity: a guide tour*. Oxford University Press.

Francisco, A., Mohammadi, N., & Taylor, J. E. (2020). Smart city digital twin-enabled energy management: Toward real-time urban building energy benchmarking. *Journal of Management in Engineering*, 36(2), 04019045.

Mohammadi, N., Vimal, A., & Taylor, J. (2020). *Knowledge Discovery in Smart City Digital Twins*. Em *Proceedings of the 53<sup>rd</sup> Hawaii International Conference on System Sciences*, 1656-1664.

Prefeitura Municipal de Uberlândia. (2010). *Plano Diretor de Transporte e Mobilidade*. Uberlândia.

PROCESSING SOFTWARE. (2021). <https://processing.org/>

Read, G., Salmon, P., & Thompson, J. (2020). *Using Cognitive Work Analysis to Inform Agent-Based Modelling of Automated Driving*. Em *Advances in Social Simulation: Looking in the Mirror*, 385-390. Springer.

Santos, M. (1993). *A Urbanização Brasileira*. EDUSP.

Souza, A. (2021). *Recursos Hídricos e a Ecologia da Paisagem*. Sabesp. [http://Site.Sabesp.Com.Br/Uploads/File/Asabesp\\_doctos/Ecologia\\_paisagem\\_completo.Pdf](http://Site.Sabesp.Com.Br/Uploads/File/Asabesp_doctos/Ecologia_paisagem_completo.Pdf)

Thompson, J., Wijnands, J. S., Mavoa, S., Scully, K., & Stevenson, M. R. (2019). Evidence for the 'safety in density' effect for cyclists: Validation of agent-based modelling results. *Injury Prevention*, 25(5), 379-385.

Thompson, J., Read, G. J., Wijnands, J. S., & Salmon, P. M. (2020). The perils of perfect performance; considering the effects of introducing autonomous vehicles on rates of car vs cyclist conflict. *Ergonomics*, 63(8), 981-996.

Torrens, P. (2022). Agent models of customer journeys on retail high streets. *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 18(1), 87-128.

Uddin, M. N., Wei, H. H., Chi, H. L., & Ni, M. (2021). Influence of occupant behavior for building energy conservation: A systematic review study of diverse modeling and simulation approach. *Buildings*, 11(2), 41.

United Nations. (2018). *World Urbanization Prospects*. The 2018 Revision. Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

Veloso, P., & Pratschke, A. (2013). *Entre forma e performance: a teoria de projeto de Christopher Alexander*. Em D. Barros, M. Tosello & D. Sperling (Eds.), *Didáctica proyectual y entornos postdigitales: prácticas y reflexiones en escuelas latinoamericanas de arquitectura y diseño*, 223-237. SIGraDI.

Xu, W., Huang, X., & Kimm, G. (2021). "Tear down" the fences: developing ABM informed design strategies for ungating closed residential communities. Em *Proceedings of the 26th CAADRIA Conference, Hong Kong* (Vol. 29).

Yang, L., van Dam, K. H., Anvari, B., & de Nazelle, A. (2019). *Evaluating the impact of an integrated urban design of transport infrastructure and public space on human behavior and environmental quality: A case study in Beijing*. Em D. Payne, J. A. Elkind, N. Friel, T. U. Grund, T. Hochstrasser, P. Lucas & A. Ottewill. (Eds.). *Social Simulation for a Digital Society: Applications and Innovations in Computational Social Science* (pp. 121-133). Springer Nature.

Yu, S. (2022). Agent-based modelling using survey data to simulate occupancy patterns and occupant interactions for workplace design. *Building and Environment*, 224, 109519.

Yurrita, M., Grignard, A., Alonso, L., & Larson, K. (2022, janeiro). *Real-Time Inference of Urban Metrics Applying Machine Learning to an Agent-Based Model Coupling Mobility Mode and Housing Choice*. Em *Multi-Agent-Based Simulation XXII: 22nd International Workshop, MABS 2021, Virtual Event, May 3-7, 2021, Revised Selected Papers*. 125-138. Springer.