



PPGECA

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Área: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LAÍS MARQUES DE OLIVEIRA

**Modelagem dinâmica e cenários urbanos de demanda de água:
simulações em Campina Grande - PB**

Campina Grande - PB
Fevereiro de 2019

LAÍS MARQUES DE OLIVEIRA

**Modelagem dinâmica e cenários urbanos de demanda de água:
simulações em Campina Grande - PB**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) como requisito parcial para a obtenção do título e Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientadora: Profa. Iana Alexandra Alves Rufino

Campina Grande - PB
Fevereiro de 2019

O48

Oliveira, Laís Marques de.

Modelagem dinâmica e cenários urbanos de demanda de água: simulações em Campina Grande - PB / Laís Marques de Oliveira. – Campina Grande, 2019.

98 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof.^a Dr.^a Iana Alexandra Alves Rufino."

Referências.

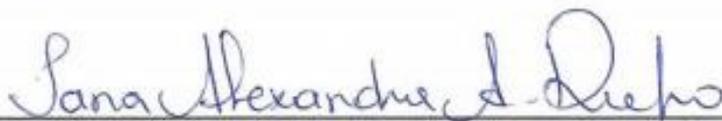
1. Gestão de Recursos Hídricos. 2. Modelagem Dinâmica. 3. Autômatos Celulares. 4. Uso e Ocupação do Solo. 5. Verticalização. 6. Demanda de Água. I. Rufino, Iana Alexandra Alves. II. Título.

CDU 556.18(043)

LAÍS MARQUES DE OLIVEIRA

**Modelagem dinâmica e cenários urbanos de demanda de água:
simulações em Campina Grande-PB**

Dissertação aprovada em 19 de fevereiro de 2019.



Prof.^a Iana Alexandra Alves Rufino
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil
Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora



Prof. Mauro Normando Macedo Barros Filho
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil
Universidade Federal de Campina Grande
Examinador Interno



Prof.^a Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal da Paraíba
Examinadora Externa

Campina Grande - PB
2019

Dedico este trabalho aos meus pais Rita e Leodécio por toda motivação e apoio em mais uma etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Paizinho (Deus). Agradecê-lo pelo dom da vida, por ter me sustentado nas horas mais difíceis, nas horas em que nem eu mesma acreditava que seria capaz, Ele acreditou, me honrou e me trouxe até onde estou hoje. Sem o agir dele em minha vida, nada disso seria possível. Agradecer pela saúde, pela inteligência, pela oportunidade que me foi dada de adquirir conhecimento, e acima de tudo pela paz sempre presente em todo esse processo, uma paz que excede todo entendimento. Toda honra e toda glória sejam dadas a Ele.

Ao esforço, apoio, zelo e todo incentivo que meus pais dedicaram a mim. Sem toda essa dedicação certamente eu não teria me tornado quem sou hoje e não teria chegado até aqui. Ao meu pai e à minha mãe devo tudo que sou, todo meu caráter e educação. Vocês, juntamente com minha irmã, me ensinaram a seguir firme diante das adversidades da vida, a ser uma pessoa sempre focada e determinada.

Ao meu namorado Pedro Almino, pelo incentivo e apoio sempre presentes em mais essa jornada, pelos conselhos e palavras de conforto nas horas difíceis. Pela serenidade e sabedoria cruciais que ajudaram a me manter sempre firme e dedicada em dar o meu melhor.

A minha querida orientadora Iana Alexandra pela disponibilidade, generosidade e humildade em me passar todo seu conhecimento, pelos ensinamentos e orientações. Pela paciência nos momentos de dúvidas e pela forma sempre amável e carinhosa com a qual me tratou. Grata por ter tido a senhora como orientadora.

Aos meus queridos amigos do Laboratório de Hidráulica II, meu querido BU. Vocês foram de extrema importância durante essa etapa da minha vida, obrigada pelo apoio, pela troca de conhecimento, pelos momentos dos cafezinhos. Como o professor Carlos Galvão diz, esses momentos sempre nos ajudam a descontrair e a voltar com a mente mais produtiva para desenvolver melhor nossos trabalhos. Considero vocês uma família.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental por todos os conhecimentos e ensinamentos transmitidos durante o curso.

A Ismael, técnico do Laboratório de Hidráulica I, pela disponibilidade de tempo em me ajudar e me acompanhar em todo o processo exaustivo da coleta de dados em campo.

A CAGEPA, mais precisamente na pessoa do subgerente Lucílio José dos Santos Vieira e na pessoa de José Augusto de Souza por todas as informações e dados disponibilizados.

A Prefeitura Municipal de Campina Grande, que por meio da Secretaria de Planejamento (SEPLAN) me forneceu informações e dados fundamentais para esta pesquisa.

A minha família que é um presente de Deus.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

Muito obrigada!

“Pois o Senhor é quem dá sabedoria; de sua boca procedem o conhecimento e o discernimento.” (Provérbios 2:6)

RESUMO

Modelos dinâmicos baseados em autômatos celulares são utilizados como uma alternativa viável para a análise do solo em áreas urbanas. Nesse sentido, este trabalho teve por objetivo estimar a demanda de água em cenários futuros de uso e ocupação do solo e de verticalização, através de análises espaciais e modelagem dinâmica com base em autômatos celulares. Foram utilizados como caso de estudo dois bairros de Campina Grande, Catolé e Sandra Cavalcante. Dados reais de uso e ocupação do solo e de verticalização dos anos de 2011 e 2018 foram utilizados para identificar o processo de mudança no uso do solo e na verticalização desses bairros. Um conjunto de variáveis estáticas e dinâmicas relacionadas à essas mudanças foram selecionadas para, juntamente com parâmetros internos do próprio modelo, produzirem uma simulação da mudança do uso e ocupação do solo, bem como mudanças na verticalização, para o ano de 2018. Após a calibração do modelo para o ano de 2018, a simulação gerou três cenários futuros de uso e ocupação do solo e de verticalização para os anos 2040, 2070 e 2100, esses cenários mostraram uma tendência de ocupação com algumas características específicas como a substituição de áreas residenciais de um ou dois pavimentos por novos empreendimentos verticais, seja residencial, empresarial, ou de serviços. Devido ao aumento de ocupação urbana, as demandas de abastecimento de água da população também aumentam, aumento este que se confirmou neste trabalho. Também é apresentada uma comparação de cenários futuros com uso da água de forma convencional e de modo racional (utilizando mecanismos poupadores de água), de forma a subsidiar ações de planejamento de infraestrutura urbana mais resiliente à escassez hídrica a que este município está submetido periodicamente.

Palavras-chave: Modelagem Dinâmica, Autômatos Celulares, Uso e Ocupação do Solo, Verticalização, Demanda de Água.

ABSTRACT

Dynamic models based on cellular automata are used as a viable alternative for land-use analysis in urban areas. In this sense, the objective of this work is to estimate the water demand in future scenarios of land use and occupation and high-building increase, using spatial analysis and dynamic modeling based on cellular automata, using as a case study two districts of Campina Grande, Catolé and Sandra Cavalcante. In situ data on land-use and high-building from 2011 and 2018 were used to identify the process of change in these neighborhoods. A set of static and dynamic variables related to the process were selected to produce a simulation of the change of land use and occupation, as well as changes in verticalization for the year 2018. The internal parameters of the model also supported this simulation. It is presented three scenarios of land use and occupation and verticalization for the years 2040, 2070 and 2100, identifying a tendency of occupation with some specific characteristics such as the replacement of residential areas new buildings with multiple floors (residential, business, or services). Due to the increase of urban occupation, the water demands for attending to the population also increase. A comparison of future scenarios considering conventional and rational water uses (using saving mechanisms) is also simulated in order to provide data for a more resilient urban infrastructure planning upon the water scarcity which is so common in this city.

Keywords: Dynamic Modeling, Cellular Automata, Land Use, Urban Growth, Water Demands.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da população urbana no Brasil.....	22
Figura 2 - Exemplo de regra de transição de autômato celular.....	36
Figura 3 - Localização do município de Campina Grande– PB.....	38
Figura 4 - A) Localização dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante no perímetro urbano de Campina Grande - PB com relação ao Estado da Paraíba. B) Imagens do grau de urbanização da área.....	39
Figura 5 - Evolução dos domicílios tipo apartamento em Campina Grande (Censos 2000 e 2010).....	40
Figura 6 - Crescimento populacional de Campina Grande - PB nas últimas décadas.	41
Figura 7 - Diagrama esquemático das etapas metodológicas.....	44
Figura 8 - Layout dos lotes utilizados na coleta de dados em campo.	45
Figura 9 - Síntese das etapas de modelagem dinâmica espacial no software de simulação DINAMICA EGO.....	49
Figura 10 - Representação esquemática da calibração do modelo.....	52
Figura 11 - Metodologia do cálculo do consumo de água para o uso residencial.	56
Figura 12 - Metodologia do cálculo do consumo para os usos comercial, industrial e serviço.....	57
Figura 13 - Metodologia do cálculo do consumo para os usos comercial, industrial e serviço.....	57
Figura 14 - Síntese das etapas realizadas para a estimativa da demanda de água futura	60
Figura 15 - Diagrama esquemático da etapa de validação dos dados de consumo de água.	62
Figura 16 - Representações do uso e ocupação do solo dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2011 e 2018).....	63
Figura 17 - Representação da verticalização dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2011 e 2018).....	64
Figura 18 - Variáveis utilizadas no modelo de simulação.....	66
Figura 19 - Cenário simulado de uso e ocupação do solo para os bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2040, 2070 e 2100).....	71

Figura 20 - Tendência de Uso e Ocupação do solo nos bairros Catolé e Sandra Cavalcante.	72
Figura 21 - Cenário simulado de verticalização para os bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2040, 2070 e 2100).	73
Figura 22 - Tendência de verticalização nos bairros Catolé e Sandra Cavalcante. ..	73
Figura 23 - Consumo normal estimado (l/dia) para os bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2018).	74
Figura 24 - Consumo racional estimado (l/dia) para os bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2018).	75
Figura 25 - Tendência de crescimento das demandas normais futuras de água.	76
Figura 26 - Tendência de crescimento das demandas racionais futuras de água.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxa de consumo por pixel.	59
Tabela 2 - Fator de verticalização.	59
Tabela 3 - Cálculo de áreas referentes aos mapas de uso e ocupação do solo no Catolé e Sandra Cavalcante.....	64
Tabela 4 - Cálculo de áreas referentes aos mapas de verticalização no Catolé e Sandra Cavalcante.....	64
Tabela 5 - Parâmetros utilizados no ajuste e execução do modelo de simulação de uso e ocupação do solo.	68
Tabela 6 - Parâmetros utilizados no ajuste e execução do modelo de simulação de verticalização.....	68
Tabela 7 - Validação por comparação da quantidade de pixels - Mapas de uso e ocupação do solo.	70
Tabela 8 - Validação por comparação da quantidade de pixels - Mapas de verticalização.....	70
Tabela 9 - Demanda total normal (estimada).	77
Tabela 10 - Demanda total racional (estimada).....	77
Tabela 11 - Dados utilizados na validação da estimativa do consumo de água.	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Variáveis utilizadas na modelagem.....	51
Quadro 2 - Diretrizes gerais.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Autômato Celular
AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
CAGEPA	Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
JIU	Incerteza de Informação Conjunta
PMCG	Prefeitura Municipal de Campina Grande
RAIS	Relação Anual de Informações Sociais
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SEPLAN	Secretaria de Planejamento
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2. OBJETIVOS.....	20
1.2.1. <i>Objetivo Geral</i>	20
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1. EXPANSÃO URBANA.....	21
2.2. VERTICALIZAÇÃO.....	23
2.3. CONSUMO DE ÁGUA NAS CIDADES	25
2.4. ESTIMATIVA DO CONSUMO DE ÁGUA	27
2.5. PLANEJAMENTO URBANO SENSÍVEL AOS RECURSOS HÍDRICOS	28
2.6. ANÁLISES ESPACIAIS.....	29
2.7. MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL.....	31
3. CASO DE ESTUDO	38
3.1. ÁREA DE ESTUDO	38
3.2. EXPANSÃO URBANA E VERTICALIZAÇÃO.....	39
3.3. SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	41
4. METODOLOGIA.....	44
4.1. AQUISIÇÃO DOS DADOS DA ÁREA DE ESTUDO	44
4.2. SISTEMATIZAÇÃO E ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS COLETADOS ...	46
4.3. ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E DE VERTICALIZAÇÃO	47
4.4. MODELO DE SIMULAÇÃO DINÂMICA	48
4.4.1. <i>Primeira fase: preparação dos dados de entrada</i>	50
4.4.2. <i>Segunda fase: calibração e validação do modelo</i>	51

4.4.3. Terceira fase: obtenção dos cenários de prognóstico.....	54
4.5. ESTIMATIVA DO CONSUMO E DEMANDA FUTURA DE ÁGUA.....	55
4.6. VALIDAÇÃO DA ESTIMATIVA DO CONSUMO DE ÁGUA ATUAL.....	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1. MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E DE VERTICALIZAÇÃO	63
5.2. VARIÁVEIS EXPLICATIVAS UTILIZADAS NO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	65
5.3. CALIBRAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO.....	68
5.4. VALIDAÇÃO DO MODELO	69
5.5. MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E DE VERTICALIZAÇÃO SIMULADOS PARA O FUTURO	70
5.6. ESTIMATIVA DO CONSUMO ATUAL E DEMANDA FUTURA DE ÁGUA.....	74
5.7. VALIDAÇÃO DA ESTIMATIVA DO CONSUMO DE ÁGUA ATUAL.....	78
5.8. DIRETRIZES GERAIS	78
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICES	97

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No Brasil, o acelerado desenvolvimento urbano teve início na segunda metade do século XX, com a concentração da população em espaço reduzido, produzindo grande competição pelos mesmos recursos naturais (solo e água), tornou-se motivo de estudos relacionados à sua gestão e seu ordenamento, dando origem a novas metodologias de análise que possam contribuir com ações de planejamento urbano. O meio urbano é um ser vivo e dinâmico que gera um conjunto de efeitos interligados, que sem controle pode levar a cidade ao caos (TUCCI, 2008).

Nesse contexto, Almeida et al. (2007) ressaltam a importante contribuição dos atuais recursos computacionais para o entendimento do meio urbano. Por meio desses recursos, tem-se a possibilidade de simular fenômenos dinâmicos espaciais diversos, desde expansão urbana, mudanças de uso do solo intra-urbano, processos de verticalização da ocupação, drenagem urbana e enchentes, deslizamento de terra, até tráfego de pedestres e veículos, entre outros.

O planejamento urbano, embora envolva fundamentos interdisciplinares, na prática é realizado dentro de um âmbito mais restrito do conhecimento. O planejamento da ocupação do espaço urbano no Brasil não tem considerado aspectos fundamentais, que trazem grandes transtornos e custos para a sociedade e para o ambiente (TUCCI, 1997).

Dentre estes aspectos, está o fato da pouca sensibilidade dos planejamentos urbanos aos recursos hídricos. O meio urbano deve ser bem planejado para conseguir atender às recentes demandas de água que são exigidas para suprir as necessidades da população, já que o uso da água para abastecimento humano é considerado o uso mais nobre.

Na opinião de Marinho (2018), todos os impactos decorrentes da inadequada gestão dos recursos hídricos relacionados às demandas do meio urbano reforçam a urgência de articulações com vistas a uma integração entre os sistemas de

planejamento urbano e de gestão de demanda de água, para que sejam capazes de promover sistemas urbanos dotados de maior resiliência¹.

Para obter um bom planejamento, é recomendável que haja uma avaliação das alterações que ocorrem em espaços urbanos e que sejam espacialmente explícitas e incluam o diagnóstico das transformações pretéritas, bem como o prognóstico das alterações futuras (MEYER; TURNER II, 1996).

A partir da detecção de mudanças ocorridas em um determinado período de tempo, o diagnóstico das transformações pretéritas pode ser realizado. Dentre as técnicas disponíveis para isso, a comparação temática direta entre duas datas é uma das mais utilizadas. Cada data requer um mapa para determinada análise, e a capacidade de detectar as mudanças depende do nível de qualidade deste mapa (MAS, 1999).

A busca pela avaliação das mudanças que se processam no espaço e no tempo conferiu maior importância à obtenção de possíveis previsões para tais mudanças, concretizando-se assim em ferramentas de auxílio ao planejamento e ordenamento territorial (TRENTIN e FREITAS, 2010). Neste intuito muitos modelos foram desenvolvidos, entre eles o modelo de Autômatos Celulares (AC).

De acordo com Araújo (2012), algumas dessas mudanças tem se tornado motivo de preocupação de vários pesquisadores do meio urbano. Uma destas mudanças é a expansão das médias e grandes cidades, tendo em vista que a falta ou até mesmo inexistência de planejamento nas cidades provoca inúmeros impactos nos serviços de infraestrutura, especialmente nos sistemas de distribuição de água, sendo esses sistemas diretamente associados à qualidade de vida das pessoas.

Em meio às inúmeras preocupações dos pesquisadores do meio urbano, as principais são em relação aos impactos provocados pelas inundações e ao atendimento às crescentes demandas de água.

O espaço urbano é um fenômeno vivo, onde as interações entre fatores econômicos, sociais e políticos geram permanentes transformações e mudanças (GODOY; SOARES-FILHO, 2007).

O uso e a cobertura da terra têm influência direta na configuração dos fenômenos ambientais, como os processos hidrológicos, os relacionados à erosão do

¹ Resiliência é compreendida, neste trabalho, como a capacidade que o espaço urbano possui de minimizar os impactos causados, por situações adversas, em seus recursos e preservá-los (MARINHO, 2018).

solo, à conservação dos recursos naturais, aos elementos climáticos, entre outros, sem considerar sua importância política, econômica e social.

De acordo com Zhang et al. (2009), a elaboração de cenários para mudanças no uso e cobertura do solo pode fornecer subsídios para um planejamento estratégico por parte de prefeituras e órgãos competentes, visando prevenir os possíveis fatores responsáveis, principalmente os relacionados a atividades de ordem antrópica.

Neste contexto, a análise temporal do uso e cobertura do solo e a simulação de cenários futuros são de fundamental importância nos estudos acadêmicos e aplicados, para fins de planejamento da ocupação do espaço urbano e rural e da mitigação dos impactos ambientais negativos.

Com propósito de estudar a problemática da expansão urbana e seus possíveis impactos no sistema de abastecimento de água, a cidade escolhida como área de estudo foi Campina Grande - PB. Esta é uma cidade de médio porte localizada no semiárido brasileiro que se configura como um centro urbano que vivenciou um acelerado processo de urbanização em decorrência do seu desenvolvimento econômico, implicando em inadequações em suas condições ambientais e de habitabilidade, como a maioria dos centros urbanos brasileiros. Devido a vários fatores, Campina Grande se apresenta como um interessante objeto de estudo para análises de adaptação a mudanças e de resiliência de cidades, dentre eles: alta vulnerabilidade ao desabastecimento diante da ocorrência de prolongados períodos de estiagem e ausência de planejamento mais sensível aos recursos hídricos. Ambos contribuíram para a ocorrência de alguns episódios de racionamento.

De acordo com Santos (2015), dentre as áreas da cidade que apresentam uma visível tendência à verticalização e adensamento por serem bem localizados e servidos de boa infraestrutura de equipamentos urbanos importantes estão os bairros Catolé e Sandra Cavalcante, localizados na zona Sul da cidade.

Nesse contexto, o presente estudo se propõe a analisar o crescimento urbano destes dois bairros, por meio de dados coletados em campo e com auxílio de ferramentas de análise e simulação das tendências de mudança de uso e ocupação do solo observadas e Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Adicionalmente esta pesquisa realiza uma estimativa da demanda de água com base nos cenários de crescimento e mudança de uso e ocupação do solo e de verticalização, com propósito de sinalizar aos gestores municipais e tomadores de decisão na área de

abastecimento de água urbano, possíveis caminhos de planejamento da ocupação em áreas urbanas de forma mais resiliente e sustentável.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estimar a demanda de abastecimento de água em cenários futuros de uso e ocupação do solo e de verticalização, através de análises espaciais e modelagem dinâmica com base em autômatos celulares. Foram utilizados como caso de estudo dois bairros de Campina Grande, Catolé e Sandra Cavalcante.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar e modelar as tendências de uso e ocupação do solo e de verticalização observadas nos dois bairros da área de estudo;
- Desenvolver uma metodologia de estimativa futura de demanda de água de forma a estabelecer cenários de análise quantitativa da demanda de água para diferentes períodos;
- Sugerir diretrizes gerais para uma regulação do uso e ocupação do solo que considerem aspectos relacionados ao abastecimento humano e a resiliência das cidades.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. EXPANSÃO URBANA

O conceito de urbanização dada por Monteiro e Oliveira (2013) refere-se a um processo contínuo e de longa duração de inserção de estruturas físicas e sociais na cidade, ou seja, é um processo contínuo de modificação do espaço urbano para a reprodução da sociedade, atendendo aos interesses diversos.

A intensificação do processo de urbanização e o rápido crescimento das cidades, em âmbito mundial, foram um dos fatos mais marcantes dos séculos XIX e XX. A urbanização no Brasil se intensificou com a modernização da agricultura e o advento da industrialização. A concentração das indústrias nas grandes cidades transformou-as em polos de desenvolvimento cultural, educacional e tecnológico e, enquanto provedoras de empregos, foram capazes de atrair significativo contingente populacional. Como consequência, o adensamento populacional e o desenvolvimento das atividades econômicas incorporaram uma nova organização na configuração espacial dessas cidades, bem como novas estruturas sociais e econômicas (ROSSETTI et al., 2013).

De acordo com dados da PNAD (Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios) 2015, a maior parte da população brasileira (84,72%), vive em áreas urbanas. Em decorrência desse processo urbano acelerado, começaram a surgir problemas socioeconômicos, ambientais e de infraestrutura, principalmente nos grandes centros urbanos e polos regionais.

Os dados de população urbana disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística mostram que cada vez mais a população irá residir em áreas urbanas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), e que no Censo 2010 a população urbana no Brasil já era de 84,35%.

Estima-se que até 2050, mais de 6 bilhões de pessoas (cerca de dois terços da população mundial) estarão vivendo em cidades ou em áreas urbanizadas (SIMPSON, 2013). Para um planejamento eficiente destas áreas, o conhecimento do tipo, extensão e natureza destas ocupações é fundamental, tanto para o entendimento dos problemas atuais causados por estes processos de urbanização quanto para a previsão de problemas futuros.

Na opinião de Martins et al. (2010), o progresso observado na migração de populações para os centros urbanos é uma realidade que se manterá no futuro e, com o que pode ser observado hoje, cada vez mais a maioria da população viverá em áreas urbanas e cada vez menos nas zonas rurais. Se este pressuposto se confirmar, é bem possível que a infraestrutura urbana existente não seja capaz de absorver tantas modificações, seja esta de demanda de água para consumo, capacidade de absorver as águas servidas e o aumento da quantidade de resíduos sólidos gerados ou ainda o aumento da capacidade de fluxo no sistema viário.

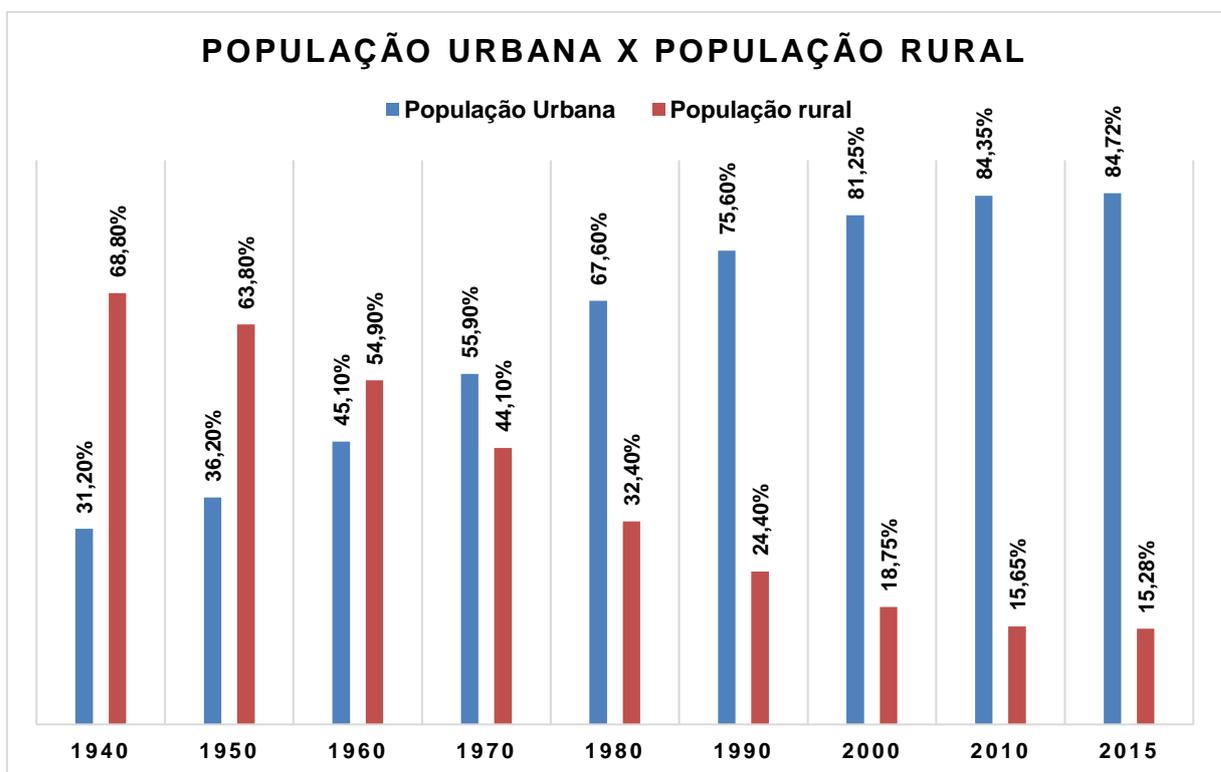


Figura 1 - Evolução da população urbana no Brasil.
Fonte: IBGE (2017).

De acordo com Araújo (2012), o processo de expansão de cidades de grande e médio porte é algo inevitável, e que na maioria das vezes, ocorre sem um planejamento adequado, fato que pode causar inúmeros problemas no futuro relacionados à infraestrutura urbana da cidade, como: racionamento de água, inundações e alagamento, trânsito congestionado nos horários de pico, entre outros.

O acelerado crescimento populacional urbano tornou-se um desafio para os estudiosos do meio urbano. E este desafio se torna ainda maior quando o crescimento das cidades está associado à verticalização, pois neste caso, os problemas de

infraestrutura são mais complexos (FERRARI e LAPOLLI, 2000), devido ao fato de o adensamento populacional ocasionar uma sobrecarga na infraestrutura já existente.

2.2. VERTICALIZAÇÃO

A verticalização é um fenômeno diretamente ligado ao crescimento da cidade e que promove o adensamento populacional. A verticalização mundial sempre esteve mais ligada aos serviços do que na questão habitacional, porém a partir do século XXI ocorreu um aumento considerável na produção de edificações para moradias, devido principalmente a diminuição de terrenos disponíveis nos centros urbanos (SANTOS et al., 2015).

Somekh (1997) conceitua a verticalização como “a multiplicação efetiva do solo urbano, facilitada pelo uso do elevador”, embora ela também tenha sido facilitada pelos avanços da construção civil: estruturas, concreto armado, estrutura metálica, entre outros. A essa ideia associam-se a característica da verticalidade, o aproveitamento intensivo do solo urbano (densidade) e o padrão de desenvolvimento tecnológico do século XX, demonstrando-se a relação verticalização/adensamento.

Na opinião de Lapa (2013), a verticalização é uma consequência natural por demanda de espaço para construção no meio urbano e assim tem sido desde a Antiguidade até os dias atuais com as grandes cidades modernas. Portanto, a partir do momento que se sobrepõe pisos, já se pode considerar que se trata de um processo de verticalização das edificações, de modo a viver no ambiente urbano (LAPA, 2013).

Com relação a verticalização no Brasil, Casaril e Fresca (2007) afirmam que os estudiosos só despertaram o interesse sobre esse assunto a partir da década de 1980, entretanto, os mesmos autores observaram que nas duas últimas décadas do século XX, a verticalização tem sido tema de estudos de vários profissionais. De modo geral, Casaril e Fresca (2007) afirmam que tais estudos no Brasil iniciaram em metrópoles e cidades grandes, e a partir dos anos 1990, foram direcionadas para algumas cidades pequenas e médias.

Ainda conforme Casaril e Fresca (2007), nas metrópoles e nas cidades grandes, a urbanização acelerada implicou diferentes impactos e alterações espaciais. Neste sentido, Camboim e Bonates (2010) afirmam que por conta dessas

alterações e impactos torna-se necessário um planejamento adequado e bem elaborado ao se criar um projeto de expansão urbana, para assim garantir que áreas com estímulos para adensamento possuam infraestrutura compatível com o grande volume de pessoas. Caso o projeto conte com áreas com potencial para verticalização, o cuidado na hora da sua criação deve ser maior, já que o volume de pessoas em uma área que poderá vir a se verticalizar será bem maior.

Para Nucci (1999), os impactos gerados no ambiente pela verticalização vão de aspectos facilmente identificados, como impermeabilização total do solo, aumento da densidade demográfica, entre outros, até as consequências mais difíceis de serem estudadas, como a alteração na dinâmica dos ventos e criação de microclimas alterando o conforto térmico da população. Como consequências desses primeiros impactos aparecem: uma sobrecarga das redes viária, de esgoto, de água, de eletricidade, coleta e deposição de lixo, etc.

Na opinião de França (2015), a verticalização urbana constitui-se da apropriação do solo urbano num estágio avançado, o qual representa mudanças sociais e econômicas, sendo assim um marco revolucionário para paisagem urbana e um símbolo de modernidade. E segundo o mesmo autor, há um aspecto importante a ser considerado no crescimento urbano na atualidade, sendo este uma diminuição dos espaços horizontais urbanos para a produção de moradias, comércios, negócios ou até mesmo para uso industrial ou misto.

A verticalização intensa foi adotada como uma das formas de ocupação e aproveitamento do solo urbano, que, sem um planejamento estrutural e global da cidade, a verticalização pode não ser a solução mais adequada, levando-se em consideração as consequências que dela podem emergir (SILVEIRA; SILVEIRA, 2014).

Uma dessas consequências, como citado acima, é o adensamento populacional em determinadas áreas urbanas da cidade, ou seja, alguns bairros das cidades ficam altamente adensados e com isso, para suprir as necessidades de abastecimento de água dessas áreas, ocorre também o aumento do consumo deste recurso.

2.3. CONSUMO DE ÁGUA NAS CIDADES

O processo de urbanização contribuiu bastante para um aumento expressivo do consumo de água nos centros urbanos e polos regionais nas últimas décadas, já que no processo de urbanização ocorre o deslocamento da população da zona rural para a zona urbana, como também ocorre o adensamento de áreas urbanas, devido ao processo de verticalização.

De acordo com o relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, da Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), o abastecimento urbano é responsável por 9% do consumo de água no país. O volume populacional cresceu, e conseqüentemente, a demanda de consumo e o desperdício de água também.

A água no meio urbano tem vários aspectos. Um dos primeiros aspectos a se pensar, é o do abastecimento da população. Em 1997, Tucci já afirmava que estudos previam que a crise do século XXI seria a da água, principalmente pelo aumento de consumo e deterioração dos mananciais existentes que têm capacidade finita. Isto se deve principalmente devido à contaminação dos mananciais urbanos através do despejo dos efluentes domésticos e industriais e dos esgotos pluviais.

O rápido crescimento da demanda urbana é uma consequência do aumento populacional e da alta taxa de urbanização verificada em todo o mundo. Por outro lado, a limitação dos recursos hídricos disponíveis faz aumentar a competição entre usos da água e reduz o acesso à água de boa qualidade, tornando o abastecimento urbano um grande desafio para a gestão de recursos hídricos (SHARMA e VAIRAVAMOORTHY, 2009).

Diante desta perspectiva, deve ser dada maior atenção para a necessidade urgente de estudos sobre o consumo de água em cidades de grande e médio porte, para então ter conhecimento de possíveis demandas de água futuras que atendam às necessidades da população residente nessas cidades. De forma especial em áreas que estejam sujeitas à expansão urbana.

O conhecimento dos dados de demanda de água nos centros urbanos é de fundamental importância para o planejamento e gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água. Na maioria dos casos, as companhias prestadoras de serviços de saneamento classificam os consumidores de água por categoria de

consumo a fim de estabelecer políticas tarifárias e cobranças diferenciadas para cada categoria (ARAÚJO, 2012).

Nesta perspectiva, Tsutyia (2006) classifica os consumidores de água dos centros urbanos de acordo com as seguintes classes de uso:

Uso doméstico (ou residencial): água consumida nas habitações, compreendendo as parcelas destinadas a fins higiênicos, potáveis e alimentares, e à lavagem em geral. Esta classe pode ser dividida como de uso interno e externo, dado que a água para o uso externo se destina à lavagem de calçadas, rega de jardins, lavagem de carros, etc., enquanto que a água para o uso interno destina-se ao consumo doméstico em geral;

Uso comercial: várias são as atividades comerciais que utilizam água, de modo que essa classe de uso abrange desde pequenos até grandes consumidores como, por exemplo: bares, restaurantes, hotéis, padarias, lanchonetes, lojas, shopping center, entre outros;

Uso industrial: água de uso industrial pode ser utilizada para uso humano, uso doméstico, água incorporada ao produto, água utilizada no processo de produção e água perdida ou para usos não rotineiros.

Uso público: parcela de água destinada à rega de jardins, lavagem de ruas e passeios, edifícios e sanitários de uso público, alimentação de fontes, esguichos e tanques fluxíveis de redes de esgoto;

A água está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento humano e tem sido essencial para os processos de crescimento urbano ao longo da história. Contudo, Domenech e Saurí (2011) apontam um drástico aumento na demanda de água em ambientes urbanos nos próximos anos, acompanhado por mudanças climáticas que afetarão o regime de chuvas, agravando os episódios de inundações e secas.

Libânio (2006) argumenta que a ideia de abundância da água, considerada por longo tempo um recurso renovável e inesgotável, desfaz-se diante da constatação do crescimento vertiginoso de sua demanda com relação a oferta, da variabilidade geográfica e sazonal da oferta hídrica e da degradação ambiental massiva e inconsequente. Nascimento e Heller (2005) também consideram que a expansão urbana nas regiões metropolitanas, frequentemente não planejada, muitas vezes ilegal, encontra-se na origem de sérios comprometimentos da qualidade da água de mananciais de abastecimento urbano.

Grant (2016) em seu livro intitulado “The Water Sensitive Cities” alerta que esta ideia que os consumidores de água assumem que o fornecimento de água potável é “de alta qualidade e de forma ininterrupta” faz com que sem considerar muitas consequências pessoas instalem diversos eletrodomésticos como máquinas de lavar-roupa, banheiros extras, chuveiros extras, sistemas de irrigação domésticos, etc, que aumentam significativamente o consumo. Este autor afirma que em países como Estados Unidos e Austrália, o consumo *per capita* excede os 500 litros por dia (Grant, 2016).

Tendo em vista o melhor atendimento da população abastecida, existe cada vez mais a necessidade de se planejar cidades mais sensíveis aos recursos hídricos. Um dos caminhos que podem contribuir para isso, é o estudo e compreensão do aumento das demandas de água para o abastecimento urbano, através do cálculo de estimativas do consumo de água atual. Desse modo, cenários prospectivos de demandas podem nortear o modo como as cidades serão planejadas.

2.4. ESTIMATIVA DO CONSUMO DE ÁGUA

Estimar o consumo de água é de suma importância para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, além de subsidiar a elaboração de projetos que necessitam desse dado para sua projeção e instalação de forma correta e eficiente, como as obras de saneamento básico (MATOS, 2007). Essa importância se dá ao fato de que a operação dos sistemas e suas respectivas ampliações ou melhorias são diretamente relacionadas com a demanda de água (TSUTYIA, 2006).

De acordo com Odan (2010), prever significa produzir informações em relação ao futuro, permitindo que a realização de um planejamento seja baseada em tais previsões. Neste sentido, a estimativa da demanda de água em sistemas de distribuição se transforma em uma ferramenta indispensável do ponto de vista do dimensionamento da capacidade do sistema como também no tocante a ampliações e melhorias no mesmo.

Na opinião de Herrera et al. (2010), a previsão da demanda de água é cada vez mais essencial para concepção, gestão e operação dos sistemas de abastecimento de água, como também em atividades tais como: planejamento de novos empreendimentos ou sistemas de expansão, dimensionamento da rede de

distribuição de água como também em questões relacionadas a gestão das águas urbanas.

Lins (2011) destaca que os modelos de gerenciamento e previsão da demanda de água podem ser muito úteis para avaliar quais medidas devem ser tomadas, quais as decisões mais apropriadas e que políticas e estratégias podem e devem ser implantadas, ou seja, são ferramentas para auxiliar os gestores na tomada de decisão.

Meneses (2011) ressalta que, para obtenção de bons resultados num plano operacional, é primordial que a previsão de demanda, tanto horária como diária, seja a mais próxima possível da realidade. Segundo o mesmo autor, em sistemas não automatizados e com uma macromedição deficiente, essa previsão torna-se um processo muito difícil. Vicente (2005) concorda que o conhecimento do total consumido é de grande importância para o desenvolvimento da operação do sistema de abastecimento de água.

Em um cenário de relativa escassez de água, torna-se necessária a implementação de políticas públicas relacionadas à gestão hídrica, focando a oferta e demanda de água, no sentido de manter os níveis adequados de abastecimento para os diversos fins. Sob a ótica da gestão integrada de águas urbanas, Sharma et al. (2008) indicam que um aspecto importante dos modelos de gestão é o WSUD - Water Sensitive Urban Design (planejamento urbano sensível à água) abrangendo o conceito de sustentabilidade, nas dimensões econômicas, sociais e ambientais.

2.5. PLANEJAMENTO URBANO SENSÍVEL AOS RECURSOS HÍDRICOS

O termo “planejamento urbano sensível aos recursos hídricos” foi usado pela primeira vez na Austrália em 1994 e no final da década de 1990 foi difundido para todo o mundo o conceito de “planejamento e gerenciamento do solo integrado aos recursos hídricos” (WYATT, 2011).

O planejamento urbano sensível aos recursos hídricos defende a ideia de que é extremamente necessário para o bom desenvolvimento do espaço urbano, que cada vez mais o planejamento urbano esteja atrelado ao gerenciamento dos recursos hídricos. Segundo Wong (2006), os princípios fundamentais do planejamento urbano sensível aos recursos hídricos são:

- Redução da demanda de água potável através da utilização de dispositivos poupadores e da busca de fontes alternativas como a água de chuva e a reutilização das águas residuais tratadas respeitando o princípio da qualidade de água - uso final;
- Diminuição da produção de efluentes e tratamento das águas residuais e reutilização das mesmas com o mesmo princípio do item anterior;
- Tratamento das águas pluviais urbanas com o objetivo de obter uma qualidade de reutilização e/ou para descargas em águas de superfície;
- Utilização de água pluvial na paisagem e recreação urbana.

O conceito de cidade sensível à água apresenta viabilidade para a promoção de análises atuais e futuras de crises que são apresentadas nos centros urbanos, oferecendo subsídios para a otimização do uso da água e resiliência de cidades. O planejamento destas cidades envolve o suprimento das demandas hídricas urbanas em sua multiplicidade de usos por meio de uma gestão integrada, garantindo segurança hídrica e proporcionando uma eficiência no uso dos recursos (MARINHO, 2018).

Meneses (2011) ressalta que a urbanização em elevados índices, traduzida no crescimento das cidades, com a construção civil atingindo altos níveis, principalmente na edificação vertical e de conjuntos habitacionais populares, vem exigindo respostas urgentes dos sistemas de abastecimento, numa época em que a escassez de água potável já é uma realidade, de tal modo que, em determinados locais, a realização do atendimento torna-se difícil.

Wong e Brown (2009) defendem que transformar cidades em cidades mais sustentáveis ou em Cidades “sensíveis à Água”, exige uma grande reformulação do paradigma hidro social que sustenta as abordagens convencionais.

2.6. ANÁLISES ESPACIAIS

Na opinião de Carneiro et al. (2011), a análise espacial faz a ligação entre o domínio essencialmente cartográfico e as áreas de análise aplicada, estatística e a modelagem, com isso, permite combinar variáveis georreferenciadas e, a partir delas, criar e analisar novas variáveis. Analisar significa decompor em partes ou

componentes buscando uma identificação da estrutura e compreensão de um sistema. A complexa realidade do espaço geográfico pode ser, em um contexto de análise espacial, fragmentada nas suas componentes ou derivadas obtidas a partir de uma base informativa geral. Assim, análise espacial significa também extrapolação e criação de nova informação susceptível de permitir uma melhor compreensão, numa perspectiva isolada ou integrada.

No Brasil, um país de dimensão continental, a necessidade de informações adequadas para a tomada de decisão é um fator muito importante, porém ainda existe uma carência dessas informações, o que se torna um grande desafio para resolver problemas urbanos e ambientais (MORAIS; SILVA; MEDEIROS, 2007). Nesse contexto, as geotecnologias permitem realizar diversas análises espaciais dos mais variados fenômenos ambientais, físicos, sociais, políticos, etc.

Geotecnologias são as tecnologias (técnicas) voltadas para coleta, processamento, análise e disponibilização de informações com referência geográfica. São compostas por soluções de *hardware*, *software* e *peopleware* que juntas constituem-se em poderosos instrumentos de suporte a tomada de decisão. Dentre as geotecnologias podemos destacar: a cartografia digital, o sensoriamento remoto, o sistema de posicionamento global, o SIG, e os aplicativos gráficos (visualizadores de mapas) disponíveis na WEB (Google Maps, o Google Earth, o Microsoft Virtual Earth, Google Street View, etc.) (ROSA, 2011).

Os SIG são sistemas que reúnem maior capacidade de processamento e análise de dados espaciais. Eles são destinados ao processamento de dados georreferenciados desde a sua coleta até a geração de produtos com mapas, relatórios e arquivos digitais, oferecendo recursos para armazenamento, gerenciamento, manipulação e análise de dados.

A utilização desses sistemas produz informações que permitem tomar decisões para colocar em prática ações relacionadas a qualquer situação, seja para planejamento ambiental ou urbano, com a capacidade de manipular dados ou informações vinculadas a um determinado lugar no espaço, e desde que seus elementos possam ser representados em um mapa.

SIG é um sistema que trata informações geográficas reais, modeladas através de elementos gráficos definidos de acordo com dois tipos de dados: o espacial e o alfanumérico (MIRANDA, 2005). É feito o tratamento computacional de dados

geográficos e a geometria e os atributos dos dados georreferenciados são armazenados em um banco de dados (CÂMARA, 2003).

O uso dos SIG vem sendo utilizado, como uma importante ferramenta de apoio à tomada de decisões baseadas em dados espaciais em muitas etapas do processo de planejamento urbano, tais como: no zoneamento da cidade, regulamentando o uso e ocupação do solo urbano, prevendo e caracterizando seu crescimento, por zonas, e resguardando áreas de interesse ambiental; na definição das áreas de risco, como os locais susceptíveis à alagamentos, deslizamentos de terra, bem como outros danos causados nos períodos de eventos extremos; em setores, como, segurança, transportes, educação, saúde, dentre outros, é cabível o uso do SIG em seus planejamentos; e otimização do emprego de cadastros, plantas de valores e divisão de bairros, bem como ao lançamento justo de tributos, através da precisão do armazenamento de dados cadastrais (SOUZA, 2009).

Estes sistemas também podem desempenhar funções de (i) organização de dados espaciais com extrema facilidade de visualização dos dados, por se apresentarem espacializados; (ii) relação espacial entre áreas; (iii) combinação de dados espaciais; (iv) compreensão do significado dos dados espaciais; e (v) utilização de álgebras de mapas na geração de modelos utilizados no prognóstico de problemas.

2.7. MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL

Na opinião de (Meirelles; Camara; Almeida, 2007), a modelagem dinâmica espacial se baseia na modelagem de ecossistemas com extensões para acomodar a heterogeneidade espacial e processos humanos de tomada de decisão.

A principal característica da modelagem dinâmica espacial é a facilidade com que é utilizada na descrição da dimensão espacial, assim como o fato de descrever quantitativamente um fenômeno e prever sua evolução, integrando suas escalas temporal e espacial.

No que se refere ao assunto do presente trabalho, modelagem dinâmica de processos urbanos, Almeida et al. (2008) defendem que, a elaboração e utilização de mapas estáticos de uso e cobertura da terra não atende mais à necessidade dos gestores locais. Faz-se necessário o fornecimento de simulações de diferentes cenários futuros.

Neste contexto, a modelagem dinâmica procura transcender as limitações apresentadas pelo Geoprocessamento, fortemente baseada em uma visão estática, bidimensional do mundo (Burrough, 1998). Para isso, inserem-se os modelos espaciais dinâmicos, que são utilizados principalmente para a modelagem espaço-temporal de processos, especialmente os físicos e os de planejamento urbano-regional, servindo para explicar a ocorrência de tal fenômeno, seu padrão espacial e sua evolução ao longo do tempo (ALMEIDA et al., 2008; SUAREZ & SOARES-FILHO, 2013; MEIRELLES et al., 2007).

Para Rossetti et al. (2011), a associação das tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento a modelos dinâmicos espaciais utilizados em análise urbana permitem avaliar de forma quantitativa a estruturação e a dinâmica do espaço urbano, proporcionando uma melhor visualização da realidade urbana e dos elementos responsáveis pelas suas transformações espaço-temporais.

A modelagem espacial dinâmica é usada, entre outras finalidades, para o entendimento das alterações do uso e cobertura da terra, possibilitando, ainda, a realização de simulações de mudanças na paisagem como potencial ferramenta para antecipar prováveis tendências passíveis de ocorrerem em uma região (ALMEIDA, 2003; DELANEZE, 2011; GONÇALVES et al., 2011; MAEDA et al., 2011; DIAS; WALDE, 2013).

Algumas abordagens de modelagem em “células” (como modelagem baseada em agentes) tornaram-se populares para fenômenos como propagação de doenças (JOHANSSON et al., 2012), crime (MALLESON et al., 2011) e do uso da terra (MATTHEWS et al., 2007). Mais recentemente, Jat et al. (2017) apresentam uma possibilidade de integração de ferramentas do sensoriamento remoto, SIG e de um modelo baseado em autômatos celulares, o SLEUTH (do inglês: *Slope, Land cover, Exclusion, Urbanization, Transportation, and Hillshade*) de uma área urbana de maior complexidade devido a sua grande heterogeneidade.

De acordo com Araújo (2012), uma das primeiras etapas na construção de um modelo de simulação de mudanças é a definição do modelo conceitual, no qual os elementos ou estados de uma paisagem e suas possíveis transições são definidos. As etapas de um modelo de simulação de mudanças de acordo com Soares Filho et al. (2007), são:

I - Definição de um modelo conceitual de mudanças e das variáveis próximas que afetam as mudanças;

II - Montagem de um banco de dados de imagens multitemporais e de dados cartográficos;

III - Análise multitemporal com o cálculo das matrizes de transição;

IV - Obtenção de mapas de probabilidade de transição;

V - Desenvolvimento da função de mudança;

VI - Calibração e validação do modelo;

VII - Simulação para vários cenários.

Segundo Mas et al. (2014), mudanças no uso e cobertura do solo é um tópico que tem chamado bastante atenção de cientistas e tomadores de decisões atualmente. Neste sentido, alguns estudos foram realizados com o intuito de analisar e modelar situações tanto em espaços rurais como em espaços urbanos, utilizando as ferramentas disponíveis na modelagem dinâmica espacial.

Com a intenção de realizar o monitoramento e predição das mudanças de uso e cobertura da terra na sub - bacia do rio Capivara, município de Botucatu – SP, Pisani et al. (2016) utilizaram a modelagem dinâmica espacial através da plataforma do Dinâmica EGO. Onde concluiu-se que o modelo Dinamica EGO pode auxiliar fortemente no monitoramento das mudanças do uso e cobertura da terra no contexto da sub - bacia.

Andrade et al. (2016) destinaram-se a entender as mudanças no uso e cobertura do solo, sobretudo em áreas de floresta, gerando uma projeção futura para a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, importante manancial para o abastecimento de água de municípios dos Estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais, utilizando também o software Dinâmica EGO.

Já com uma proposta de estudos em espaços urbanos, Oliveira (2015) realizou uma análise temporal da paisagem do município de Venâncio Aires/RS, mediante a calibração de um modelo dinâmico espacial utilizando o software Dinâmica EGO e projeção de um cenário futuro das classes de uso e cobertura da terra.

Em busca de desenvolver modelos dinâmicos da paisagem e investigar a relação entre as alterações no uso e cobertura da terra e a infraestrutura de transportes na região portuária da Baixada Santista - SP. Kawashima et al. (2016) realizaram simulações por meio da ferramenta livre Dinâmica EGO.

Maeda et al. (2011) utilizaram um modelo baseado em autômatos celulares (Dinâmica EGO) para analisar os processos de conversão florestal ocorridos no Parque Nacional do Xingu, obtendo bons resultados quanto à calibração e validação.

Para revelar como a tendência histórica do crescimento urbano de Karaj (capital da província de Alborz - Irã) pode afetar seu padrão espacial futuro, Sakieh et al. (2015) utilizaram o modelo baseado em autômatos celulares SLEUTH, onde a dinâmica da cidade de Karaj foi prevista sob a sua tendência histórica, bem como dois cenários diferentes, incluindo crescimento compacto e extenso até 2040.

Massabki et al. (2017) modelaram os padrões da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) por meio da modelagem espacial, baseando-se em autômatos celulares, utilizando dados do perímetro urbano referentes aos períodos de 1881, 1905, 1929, 1949, 1974 e 2005 para a construção de quatro modelos de expansão urbana.

Ao perceberem um rápido crescimento urbano com mudanças associadas no uso da terra e degradação do solo no Nordeste da China, Gong et al. (2015) utilizaram SIG e modelos baseados em autômatos celulares para estudar a dinâmica do uso da terra durante um período de 18 anos na cidade de Harbin, a décima maior cidade da China. Com isso, descobriram que houve perdas significativas nos usos da terra denominados “terras agrícolas”, “Pastagens”, “terras úmidas” e “várzea” em favor de “terrenos construídos” e menores transformações de “Várzea” para “área florestal” e “corpo de água” durante o período de 18 anos.

Os conceitos de autômatos celulares foram inicialmente apresentados por John Von Neumann (ROY; SNICKARS, 1996). Em 1982, John Conway deu grande popularidade a esses conceitos, quando apresentou o Jogo da Vida, do inglês *The Game of Life*, onde ele demonstrou que regras muito simples quando aplicadas repetidamente sobre estados aleatórios, produzem resultados semelhantes à forma como certos sistemas evoluem no mundo real.

No Jogo da Vida, o espaço é representado como uma grade de células, onde algumas delas são células vivas e outras são células mortas. A partir de um estado inicial aleatório, a cada geração, novas células nascem, e algumas morrem. O estado de uma célula é determinado por sua vizinhança que, no caso do Jogo da Vida, é definido por quatro células adjacentes. Então, uma célula viva morre se tiver duas ou

três células vizinhas mortas, por outro lado, uma célula morta renasce, se tiver três células vizinhas vivas.

Seguindo esse raciocínio, sobre cada célula de um autômato celular são aplicadas regras de transição. Regras de transição determinam quando e por qual motivo o estado de uma célula se altera e podem ser qualitativas ou quantitativas (ALMEIDA et al., 2008).

Um exemplo simples baseado em Câmara (1996) é bastante utilizado para ilustrar como se dá o mecanismo de aplicação das regras de transição. Nesse exemplo, uma célula pode assumir dois estados (branco e preto), e sua vizinhança é definida sobre duas células adjacentes. As regras de transição especificam que o estado de uma célula no instante $t+1$ é igual ao da sua vizinhança no instante t , se os vizinhos tiverem os estados iguais, caso contrário, o estado da célula permanece o mesmo. Assim, pode-se perceber que as mudanças geradas por autômatos celulares são estritamente locais, isto é, baseadas nas vizinhanças de cada célula.

Para entender o exemplo, torna-se necessário a identificação dos componentes básicos do autômato celular clássico, sendo eles:

- Espaço euclidiano, dividindo em um *array* de células;
- Uma vizinhança de tamanho e formato definidos (Figura 2.a);
- Um conjunto de estados discretos (Figura 2.b);
- Um conjunto de regras de transição (Figura 2.c);
- Um conjunto de intervalos de tempo, com atualização simultânea das células (Figura 2.d).

Os modelos baseados em AC, considerados como uma categoria de modelos dinâmico-espaciais correspondem a mecanismos compostos por conjuntos de células que imprimem determinados movimentos, assemelhando-se a seres animados (SOARES-FILHO et al., 2004). Os operadores responsáveis pela realização das tarefas são chamados de funtores. Cada functor é responsável pela execução de uma tarefa específica, incluindo operadores de álgebra cartográfica, tais como cálculo de mapa de custo, sorteio de pontos mais prováveis para a ocorrência de um determinado fenômeno, cálculo de caminho de menor custo e cálculo de mapas usando de expressões lógicas e aritméticas (SOARES-FILHO et al., 2009).

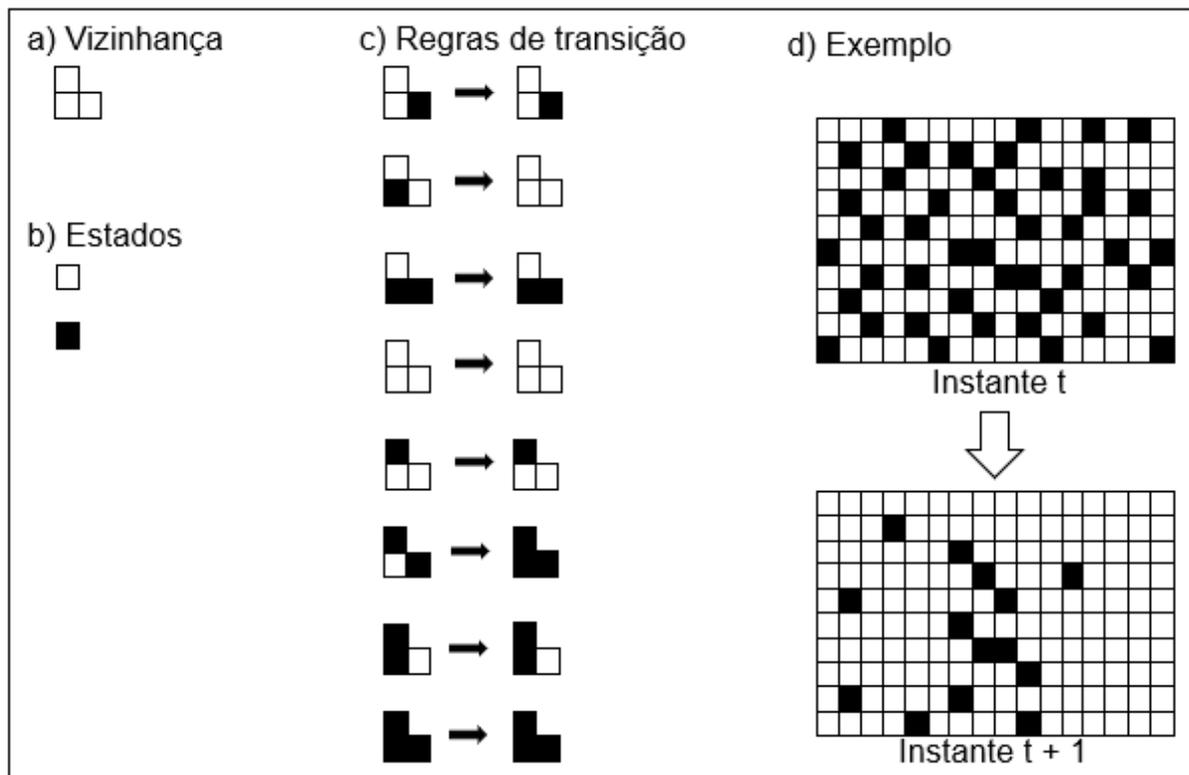


Figura 2 - Exemplo de regra de transição de autômato celular.
Fonte: Câmara (1996).

Segundo Weimar (1998) um autômato celular é caracterizado pelas seguintes propriedades fundamentais:

- I - Consiste em uma matriz ou grade de células;
- II - A evolução se dá em passos discretos de tempo;
- III - Cada célula é caracterizada por um estado pertencente a um conjunto finito de estados;
- IV - Cada célula evolui de acordo com as mesmas regras que dependem somente do estado em que a célula se encontra e de um número finito de vizinhos;
- V - A relação com a vizinhança é local e uniforme.

Um modelo de AC para uma cidade enfoca dinâmicas urbanas e pode ser usado para investigar processos de mudanças (ALMEIDA, 2003). Para melhor compreender como ocorre os processos de mudanças em programas baseados em autômatos celulares, na opinião de Batty et al. (1997), é necessário entender que os autômatos celulares são compostos por quatro elementos básicos, sendo eles: células; estados; vizinhança; e regras de transição.

- *Células*: são objetos do universo de modelagem que podem assumir diferentes formas e dimensões, os quais devem manifestar algum tipo de adjacência ou proximidade entre si;
- *Estados*: são atributos únicos (discretos) apresentados por cada célula em um intervalo de tempo considerado;
- *Vizinhança*: pode assumir diferentes formatos (cruz ou vizinhança de Von Neumann, janela 3x3 ou vizinhança de Moore, etc.) e é ela quem define se cada célula irá mudar ou permanecer no seu estado atual, sob a influência de seus estados e configurações;
- *Regras de transição*: são elas que determinam ou não as mudanças de estado das células a cada instante de tempo (passo ou interação). As regras são uniformes e aplicam-se indistintamente a toda célula, estado ou vizinhança. É importante salientar que toda mudança de estado é local, o que implica dizer, a princípio, que não há ação à distância.

Em alguns modelos baseados em AC, essas mudanças são computadas a partir de uma *matriz de Markov*², que por sua vez, é obtida por meio de uma sobreposição de dois mapas de datas diferentes. As matrizes indicam a área (número de pixels) para cada transição e podem ser transformadas em matrizes de probabilidades para o determinado período, servindo como base para a projeção de uma data futura.

Os mapas de probabilidade de transição são derivados das relações entre áreas que foram alteradas no passado e de variáveis explanatórias (inclinação, distância para estradas e assentamentos, posse da terra e tipos de solo). Estes mapas podem ser gerados por meio do método dos pesos de evidência, que podem ser ajustados usando o conhecimento especializado ou um algoritmo genético³.

² Matriz ou cadeia de Markov são modelos matemáticos utilizados para descrever processos estocásticos. Essas matrizes de transição representam a possibilidade de um determinado estado *i* permanecer o mesmo ou mudar para o estado *j* durante o intervalo de tempo $t \rightarrow t+1$ (PEDROSA; CAMARA, 2007).

³ Algoritmo Genético (AG) consiste em uma técnica de Inteligência Artificial (IA) que se fundamenta em teorias e conceitos da genética e da evolução de populações de seres vivos, objetivando solucionar problemas do mundo real de forma otimizada, sendo aplicável a diversas áreas (ROSA; LUZ, 2017).

3. CASO DE ESTUDO

3.1. ÁREA DE ESTUDO

Campina Grande está localizada no agreste do estado da Paraíba, a $7^{\circ}13'50''$ de latitude Sul e a $35^{\circ}52'52''$ de longitude Oeste (Figura 3). É a segunda maior cidade do Estado da Paraíba, tanto no aspecto demográfico quanto no econômico, e uma das maiores cidades do interior do Nordeste brasileiro. Possui população urbana de 407.472 habitantes (taxa de urbanização do município: 95,33%), ocupa área de 593,026 km², sendo aproximadamente 91 km² os limites da zona urbana. A cidade tem altitude média de 551 m, e dista cerca de 120 km da capital, João Pessoa (IBGE, 2018).

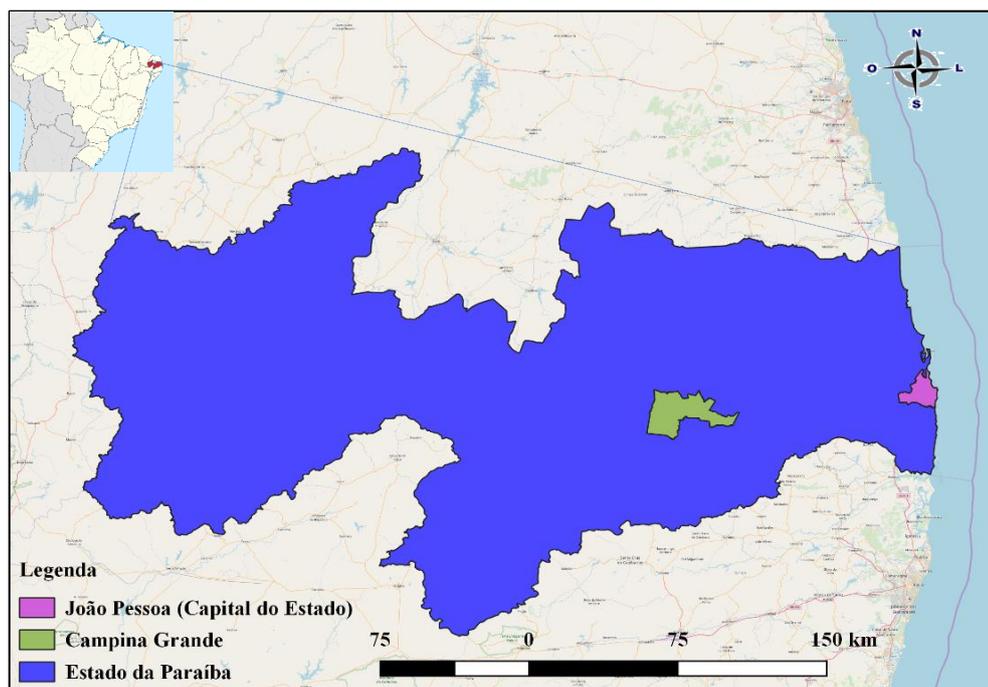


Figura 3 - Localização do município de Campina Grande– PB.
Fonte: Autor.

A cidade está inserida na unidade geoambiental do Planalto da Borborema, apresenta um relevo forte e ondulado (CORDÃO, 2009). A área de estudo escolhida compreende os bairros Catolé e Sandra Cavalcante, esses dois bairros representam uma fração da zona urbana de Campina Grande (Figura 4). De acordo com dados do IBGE (2011), os bairros Catolé e Sandra Cavalcante apresentam uma população de

19.554 e 6.517 habitantes, respectivamente, representando juntos 6,35 % da população do município.

Os dois bairros estão localizados na região Sul da cidade e segundo dados da PMCG possuem uma área de 4,30 km², aproximadamente. Onde o Catolé possui uma área de 2,96 km² e o Sandra Cavalcante possui uma área de 1,34 km², aproximadamente.

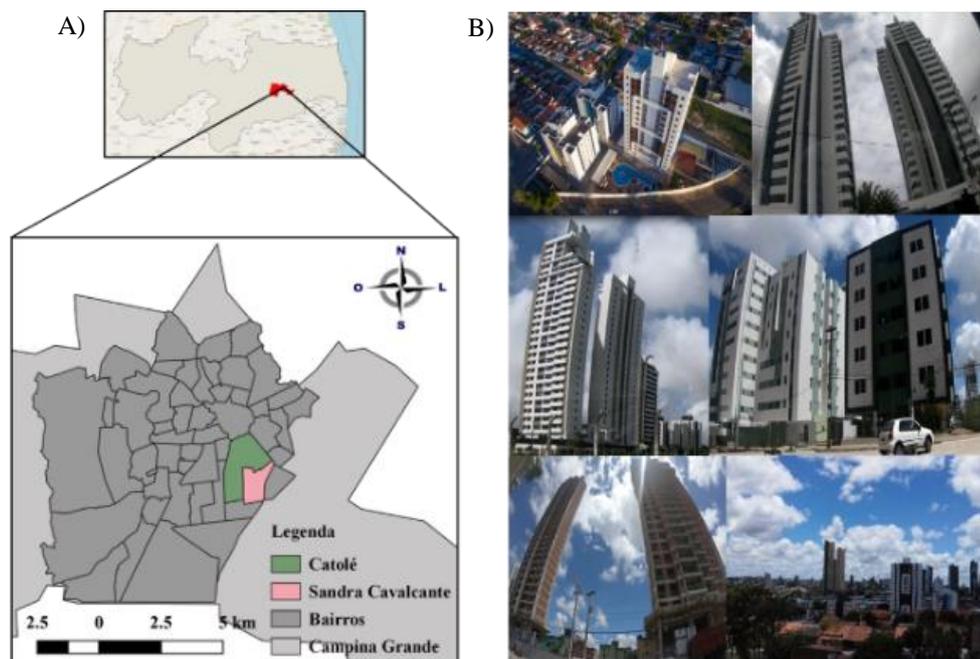


Figura 4 - A) Localização dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante no perímetro urbano de Campina Grande - PB com relação ao Estado da Paraíba. B) Imagens do grau de urbanização da área.
Fonte: Autor.

O aproveitamento do uso e ocupação do solo urbano desses dois bairros é bem diversificado, contando ainda com a presença de importantes equipamentos urbanos de grande porte, tais quais: terminal interurbano de passageiros (rodoviária), shopping center, grandes escolas, clubes, parque, dentre outros, tornando-os em duas regiões importantes da cidade.

3.2. EXPANSÃO URBANA E VERTICALIZAÇÃO

De acordo com Cordão (2009), nos tempos atuais, o crescimento urbano de Campina Grande tem sido marcado pela forte atratividade exercida pela sua função de pólo regional, em razão da posição geográfica estratégica de entreposto entre a

Região do Cariri, o Sertão e o Litoral da Paraíba e enquanto centro universitário e tecnológico de destaque.

Segundo Meneses (2011), na última década, o crescimento da cidade de Campina Grande e consequentemente da demanda de água, são refletidos nos altos índices da construção civil, principalmente na implantação de condomínios verticais e mais recentemente, os horizontais. O Catolé e o Sandra Cavalcante apresentam uma alta densidade populacional urbana, 6.606 hab/km² e 4.863 hab/km², respectivamente (baseado em dados do IBGE, 2011) e uma excessiva ocupação do solo urbano, com tendência à verticalização (Figura 5) da forma de moradias, com muitas superfícies impermeáveis.

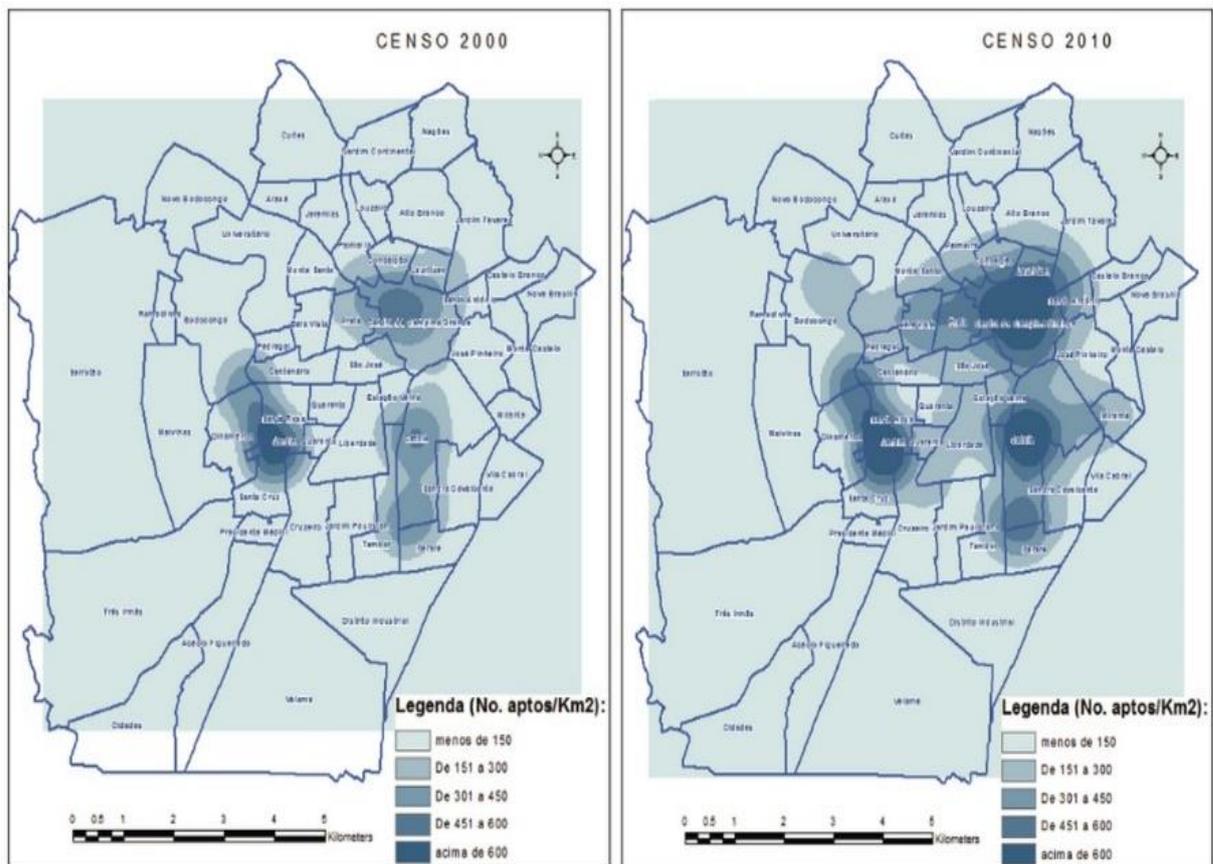


Figura 5 - Evolução dos domicílios tipo apartamento em Campina Grande (Censos 2000 e 2010).
Fonte: Barros et al. (2016).

Esse crescimento populacional (Figura 6) e urbano da cidade de Campina Grande provocou e ainda provoca mudanças na organização do espaço urbano, devido à falta de um planejamento adequado, que seja sensível à essas mudanças, aos recursos hídricos. Tucci (2008) afirma que o planejamento do crescimento das

idades é imprescindível para a garantia da qualidade de vida da população, sobretudo, no tocante aos recursos hídricos, uma vez que os impactos sobre as águas urbanas estão atrelados ao forte adensamento urbano.

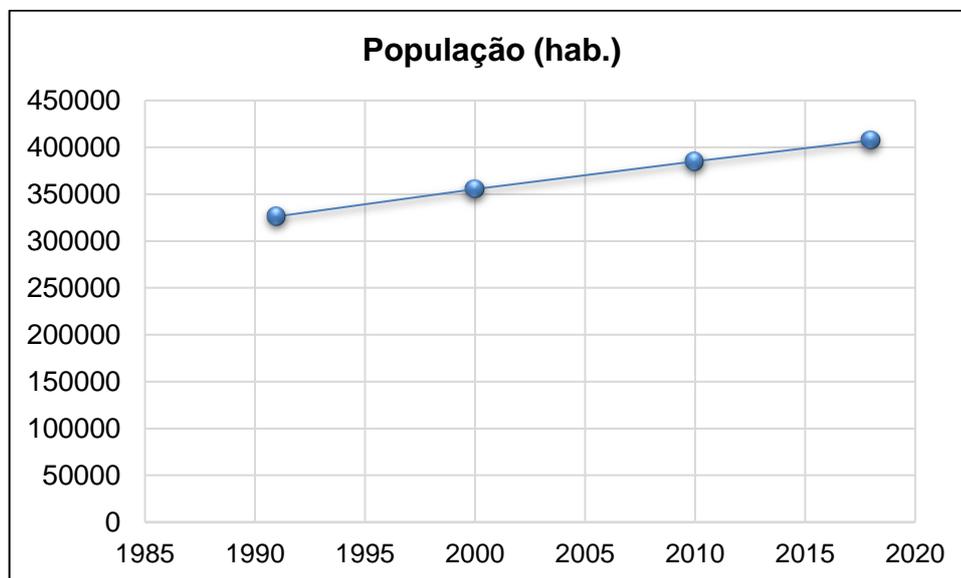


Figura 6 - Crescimento populacional de Campina Grande - PB nas últimas décadas.
Fonte: Elaborado com base em dados do IBGE.

Segundo Araújo e Rufino (2011), Campina Grande tem apresentado um rápido e não planejado crescimento ao longo das últimas décadas. E que, nos últimos anos, o crescimento da cidade tem apresentado um caráter misto, ou seja, expansão da mancha urbana, caracterizado pelo crescimento horizontal e grande número de novos edifícios residenciais em muitas áreas da cidade, reflexo do crescimento vertical.

3.3. SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A Companhia de Água e Esgoto do estado da Paraíba (CAGEPA) é a responsável pelo sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande. A CAGEPA é composta por uma presidência e quatro diretorias, as quais são divididas em gerências. A Gerência Regional da Borborema é a gerência responsável pela operação do Sistema de Abastecimento de Água de Campina Grande.

O sistema de abastecimento de água de Campina Grande abastece a zona urbana da cidade, seus distritos e também outras localidades, tais como: Galante, Alagoa Nova, Barra de Santana, Caturité, Lagoa Seca, Matinhas, Pocinhos, Queimadas, São Sebastião da Lagoa de Roça.

As crises hídricas, pelas quais vem passando a cidade de Campina Grande e demais municípios abastecidos pelo reservatório Epitácio Pessoa (Açude de Boqueirão), tem propiciado oportunidade para análise da gestão de recursos hídricos e das consequências de sua prática descuidada, equivocada ou deficitária, prejudicial à oferta segura ao abastecimento humano.

A gestão da demanda urbana de água se torna ainda mais necessária em centros urbanos de regiões áridas/semiáridas de países em desenvolvimento (caso de grande parte do Nordeste brasileiro), onde as condições climáticas, aliadas a sistemas de abastecimento obsoletos e à inadequação ou ausência de um planejamento urbano sensível aos recursos hídricos, determinam o surgimento de graves problemas de abastecimento de água, dificultando o atendimento das demandas quantitativas e qualitativas da população (FIGUERES, 2005; RÊGO et al., 2013).

Inserido nessa realidade, destaca-se o caso da cidade de Campina Grande, segunda maior cidade paraibana e importante polo educacional, industrial e tecnológico do Estado. Esta cidade tem aspectos peculiares para esta pesquisa pois tem enfrentado crises hídricas recorrentes ao longo de sua história (Guedes et al., 2014; Barros et al., 2016) com riscos elevados de um desabastecimento da água potável. A crise ocorrida entre os anos de 1997 e 2003 se deu quando prolongada seca afetou a região Nordeste do Brasil e o Açude Público Epitácio Pessoa, responsável pelo abastecimento de Campina Grande e outras cidades do Compartimento da Borborema, atingiu o mais baixo nível de sua história até então (15% da capacidade máxima de armazenamento), submetendo mais de 500.000 pessoas a severo racionamento de água, por um período superior a dois anos (RÊGO et al., 2000).

Nesse período foi possível constatar a ausência de efetiva gestão de recursos hídricos (RÊGO et al., 2000; GALVAO et al., 2001). A cidade continuou se expandindo e em 2012 deu-se início a um novo período de estiagem no semiárido brasileiro, provocando uma nova crise no sistema de abastecimento de água da cidade de Campina Grande (RÊGO et al., 2012; RÊGO et al., 2013).

Em 2017 o reservatório Epitácio Pessoa (Boqueirão) sofreu risco de colapso, chegando a ficar com apenas 2,9% da sua capacidade total (AESAs, 2017). Para evitar esse colapso e garantir o prolongamento do abastecimento de água da cidade foi

instaurado em dezembro de 2014 um severo racionamento de água que se perpetuou até a chegada do eixo leste da transposição do Rio São Francisco que tem garantido um pouco mais de segurança hídrica ao município.

O crescimento de Campina Grande sob estas condições climáticas específicas faz com que a população compreenda claramente o impacto ambiental causado pela urbanização crescente (escassez hídrica causando desabastecimento de água potável e submetendo a população e racionamentos frequentes). Estas situações de crise frequentes despertam um comportamento de resiliência e racionalidade que tem estimulado mudanças na construção civil como o uso de sistemas de captação de água de chuva (no microclima urbano há eventos concentrados de chuva que não contribuem para o reservatório em questão) e de mecanismos poupadores nos edifícios e residências de uma forma geral.

4. METODOLOGIA

Com o propósito de dar suporte aos estudos sobre crescimento da demanda de água na cidade de Campina Grande, principalmente no que diz respeito à verticalização, e avaliar seus impactos no sistema de abastecimento de água, a metodologia proposta (Figura 7) para este trabalho se baseou nas seguintes etapas:

- Aquisição dos dados da área de estudo;
- Sistematização dos dados coletados;
- Espacialização dos dados de uso e ocupação do solo e de verticalização;
- Simulação de cenários futuros de uso e ocupação do solo e de verticalização utilizando o Dinâmica EGO (modelo de simulação dinâmica);
- Estimativa do consumo de água atual (2018) e da demanda futura;
- Validação da estimativa do consumo de água.

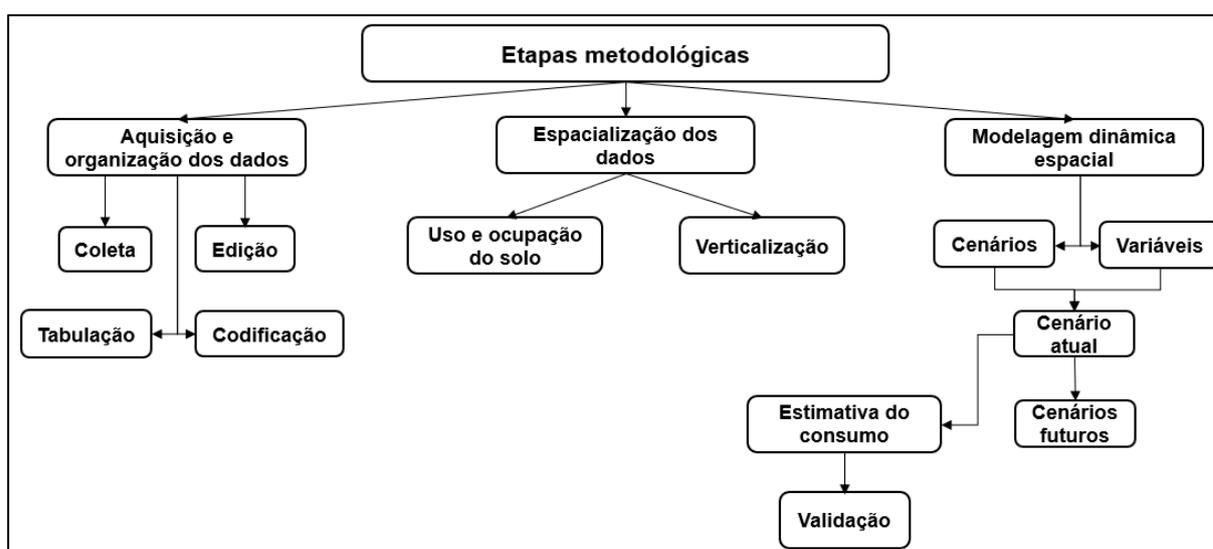


Figura 7 - Diagrama esquemático das etapas metodológicas.

Fonte: Autor.

4.1. AQUISIÇÃO DOS DADOS DA ÁREA DE ESTUDO

Na fase de aquisição (coleta) dos dados da área de estudo, foram coletados dados de campo (uso e ocupação do solo e verticalização) e dados institucionais. A aquisição e preparação dos dados é uma das etapas mais importantes no desenvolvimento de uma pesquisa, principalmente, quando se utiliza SIG para a

resolução dos problemas, pois a qualidade dos dados de entrada em um modelo ou SIG está diretamente relacionada com as respostas obtidas.

A definição das instituições que foram consultadas como fonte de informação sobre a cidade de Campina Grande e sobre a área de estudo foi muito importante. A Prefeitura Municipal de Campina Grande (PMCG), mais especificamente a Secretaria de Planejamento (SEPLAN); a Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba (CAGEPA); e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) foram as instituições consultadas para adquirir dados para este trabalho.

Após a coleta de dados institucionais, foi iniciada a coleta de dados em campo. Certamente, foi uma das etapas mais longas da pesquisa, pois foram percorridas todas as ruas o bairro do Catolé e do Sandra Cavalcante, para coletar dados de todos os lotes desses bairros. Tendo em vista a necessidade de otimizar tempo na identificação e anotação de dados e informações, foram levados para a coleta de campo todo o *layout* dos lotes já impressos (Figura 8) e uma planilha (Apêndice 1) com o código de identificação (ID) para cada lote. Além disso, para a coleta de dados de campo utilizou-se uma câmera digital de grande ângulo (*GoPro*), também com o intuito de otimizar o tempo, onde eram feitos vídeos por quadra, ou seja, cada vídeo iniciava e encerrava em uma única quadra.

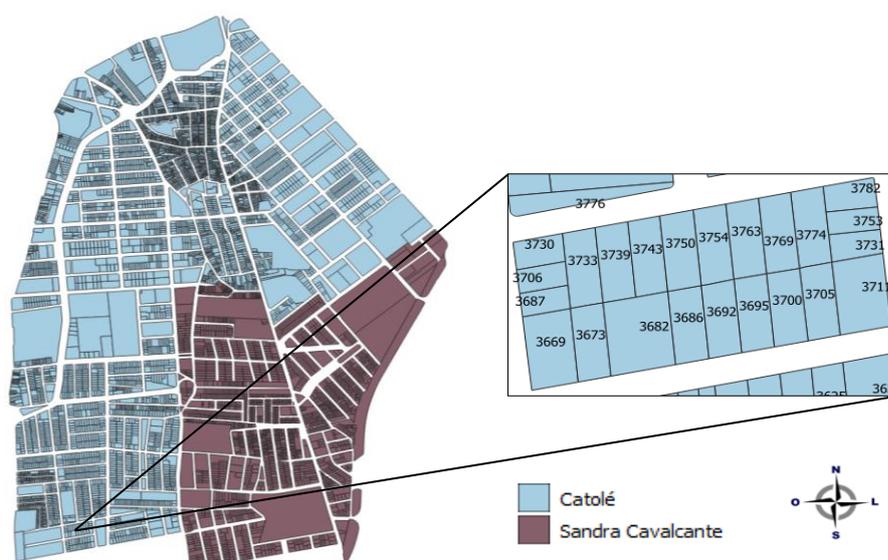


Figura 8 - Layout dos lotes utilizados na coleta de dados em campo.
Fonte: Autor.

Além dos dados coletados em campo e dos dados institucionais, foram adquiridos dados de uso e ocupação do solo e de verticalização de pesquisas

anteriores: Araújo (2012) e Silva (2016). Esses respectivos dados de uso e ocupação do solo e de verticalização foram utilizados para obtenção de dois cenários (2011 e 2018) de uso e verticalização dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante, servindo de subsídio para a geração dos cenários futuros, como também o cálculo da estimativa do consumo de água atual e da demanda de água futura.

4.2. SISTEMATIZAÇÃO E ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS COLETADOS

Primeiramente foi realizada a atualização dos dados de uso e ocupação do solo e de verticalização que foram adquiridos de pesquisas anteriores (ARAÚJO, 2012; SILVA, 2016). Foram observadas inicialmente incompletudes nas bases de dados levantadas por estes estudos e uma complementação com base nos dados observados em campo foi realizada. Para garantir uma consistência no banco de dados, esta pesquisa optou por utilizar a codificação imobiliária já adotada pela SEPLAN- CG. Neste sentido toda a codificação utilizada pelos estudos anteriores foi compatibilizada e convertida para os padrões utilizados na PMCG.

A complementação dos dados de Araújo (2012) e Silva (2016) foi realizada através de pesquisas e observação virtual pelas ferramentas *Google Street View* e *Google Earth Pro*. A codificação unificada de toda a base de dados torna-se necessária, principalmente para garantir a consistência entre os dados tabulares e os objetos especializados em mapa (lotes), configurando assim o arquivo básico de qualquer sistema de informação geográfica que trata de dados cadastrais, o formato “*shapfile*”⁴.

A partir desta base dados espacializada e compatibilizada com a PMCG, foi realizada a sistematização dos dados coletados em campo. Assim, os vídeos e todos os dados coletados e anotados em planilha foram analisados para a identificação do uso do solo (geral e específico) de cada lote e do grau de verticalização (número de pavimentos). Adicionalmente à análise e sistematização dos dados advindos dos vídeos, também foram consideradas e digitalizadas as informações que foram adquiridas por meio de perguntas realizadas na visita de campo. As perguntas

⁴ Shapefile é um formato para bases de dados geoespaciais e vetoriais em sistemas de informação geográfica (no inglês, GIS - Geographic Information System).

utilizadas na fase de coleta de dados podem ser observadas no Apêndice 2 deste trabalho.

A tabulação de todos os dados coletados em campo (Apêndice 3) foi realizada em planilhas eletrônicas. A tabulação dos dados consiste na digitalização dos dados provenientes da coleta de campo e armazenamento dessas informações em planilhas eletrônicas de forma otimizada (utilizando o software Excel⁵). Foram tabulados cerca de 6661 dados de uso do solo e de verticalização para todos os lotes dos dois bairros estudados.

Para tornar possível a junção de dados tabulares (não espaciais) com a base espacializada dos lotes (dados espaciais), a codificação unificada em ambas as bases (espacial e não espacial) torna-se necessária. A codificação de cada lote na base espacializada foi realizada utilizando o ambiente SIG do software a QGIS⁶ na sua versão 3.0.

4.3. ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E DE VERTICALIZAÇÃO

As etapas descritas anteriormente (tabulação, edição e codificação) foram realizadas manualmente, isto porque se trata da criação de um novo arquivo *shapefile* (ou *shape*). O *shapefile* é uma nova estrutura não topológica de dados que armazena a geometria e a informação de atributo para características geográficas em um conjunto de dados (TIBÚRCIO, 2006). Os dados disponíveis neste momento da pesquisa são originários de diversas fontes, por isso faz-se necessária a criação da *shapefile* com os dados espaciais e seus respectivos dados alfanuméricos a fim de modelar e analisar estes dados no SIG.

Os dados foram espacializados a partir do “join” (União) de dados tabulares e objetos gráficos no SIG. O código ID é o campo comum aos dados tabulados e à tabela de atributos da *shapefile*. Esta operação de “junção” só é possível por causa da codificação comum às duas bases de dados (espacial e não espacial). Apesar de uma etapa que demanda um tempo considerável no âmbito da pesquisa, estas

⁵ O Excel é um software que integra o pacote Office de aplicativos da Microsoft®

⁶ (QGIS Team developer, 2018)

operações facilitam o entendimento da dinâmica da área urbana em estudo pois permitem gerar mapas que serão a base dos cenários para a simulação dinâmica.

4.4. MODELO DE SIMULAÇÃO DINÂMICA

O modelo de simulação dinâmica urbana dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante foi realizado através do *software* Dinâmica EGO, organizado em três fases principais (Figura 9) para cada um dos três períodos de simulação que compreenderam a pesquisa (2018 - 2100).

- **Primeira fase:** Preparação dos cenários de entrada (diagnóstico);
- **Segunda fase:** Calibração e validação do modelo (definição dos parâmetros, testes de simulação e validação);
- **Terceira fase:** Obtenção dos cenários de prognóstico (cenários futuros).

O programa Dinâmica EGO é um *freeware* desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto - CSR da Universidade Federal de Minas Gerais, é um programa que utiliza um modelo com base no paradigma de autômatos celulares, implementado por meio de algoritmos empíricos de alocação do uso do solo, e a natureza de sua interface gráfica baseia-se na teoria de grafos direcionados (SOARES-FILHO et al., 2009).

A princípio, o Dinâmica EGO foi um *software* planejado para ser utilizado em modelagem dinâmica espacial, mas por ser uma plataforma versátil, o *software* tem sido utilizado em uma variedade de fenômenos espaciais, como por exemplo, mudança de uso do solo urbano (SOARES-FILHO; CERQUEIRA; PENNACHIN, 2002; TEIXEIRA et al., 2009; GODOY; SOARES FILHO, 2008; ALMEIDA, 2003).

O Dinâmica EGO apresenta mais flexibilidade na etapa de modelagem, já que seus modelos são construídos a partir de grande quantidade de ferramentas e operadores disponíveis nas interfaces gráficas do programa, que podem ser arrastados e conectados dinamicamente. Além disso, permite importar e exportar uma grande quantidade de dados *raster* e está disponível sem custos.

Tendo em vista todas as suas funcionalidades, o ambiente de modelagem do Dinâmica EGO ao mesmo passo que proporciona simplicidade, também proporciona flexibilidade e desempenho, otimizando velocidade e recursos computacionais, como

por exemplo, memória e uso de processamento em paralelo (RODRIGUES et al. 2007).

Segundo Soares-Filho et al. (2002), o Dinâmica EGO é uma ferramenta capaz de modelar qualquer tipo e qualquer número de transição, como também adotar qualquer extensão de tempo, dividido em qualquer número de passos de tempo e fases com taxas pré-definidas de transição.

Todos esses fatores descritos acerca do *software* Dinâmica EGO, foram determinantes na escolha desse *software* para a realização da modelagem dinâmica deste presente trabalho.

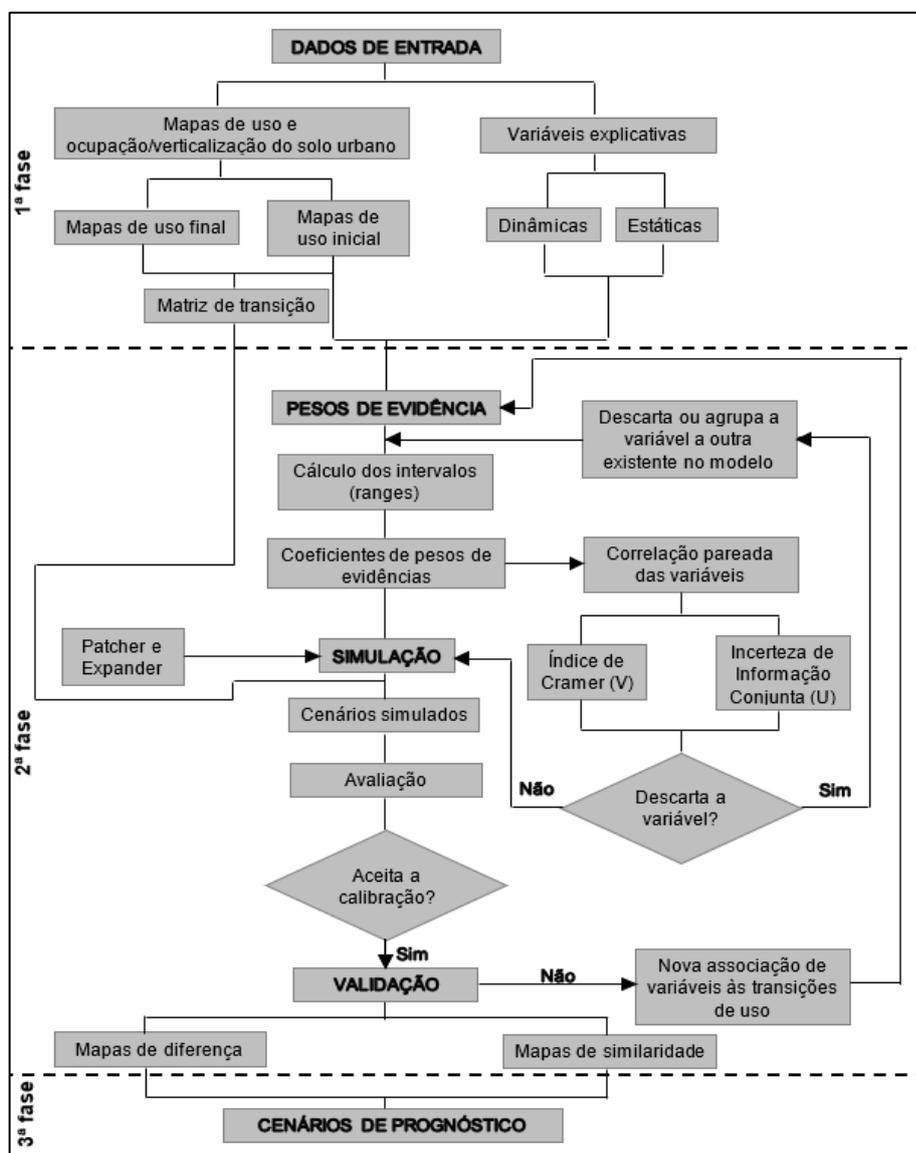


Figura 9 - Síntese das etapas de modelagem dinâmica espacial no software de simulação DINAMICA EGO.

Fonte: Adaptado de Trentin (2008).

4.4.1. Primeira fase: preparação dos dados de entrada

Os cenários de entrada foram elaborados a partir dos dados observados em campo e de análises de equipamentos urbanos atratores de movimento (mudanças). Neste sentido foram gerados:

- Dois cenários (mapas temáticos) de uso e ocupação do solo e de verticalização referentes aos anos de 2011 e 2018 a partir de (i) dados de Araújo (2012) que foram complementados e (ii) dados coletados em campo para o ano de 2018. Estes cenários foram utilizados para compreensão e identificação das mudanças ocorridas na área urbana em estudo. Foram consideradas seis classes de uso e ocupação do solo: Residencial, Comercial, Misto, Serviço, Industrial e Sem Uso e cinco classes de verticalização: desocupado (sem construção), 1 e 2 pavimentos, 3 e 4 pavimentos, 5 a 10 pavimentos e acima de 10 pavimentos.
- Representações espaciais de variáveis espaciais que fossem capazes de explicar as mudanças de uso e ocupação do solo e de verticalização ocorridas e que venham a ocorrer em cada período de simulação. Foram utilizadas seis variáveis estáticas (atratores de movimento) de distâncias em relação a: rodoviária, instituições de ensino particular, bancos, áreas de lazer, shoppings centers e principais vias de acesso. As variáveis dinâmicas utilizadas foram: distâncias às áreas de mudança de uso do solo e de verticalização.

A escolha adequada das variáveis é um fator determinante para o sucesso do uso de modelos dinâmicos. A partir da relação entre as variáveis escolhidas e as variáveis dependentes (uso do solo e verticalização), é que se definem as células com maior ou menor probabilidade de transição de uso do solo e de verticalização. Neste trabalho, as variáveis testadas e utilizadas foram baseadas em estudos anteriores (Araújo, 2012; Silva, 2016). Nestes estudos, alguns equipamentos urbanos já são considerados de grande influência nas mudanças de uso do solo destes bairros. O

Quadro 1 apresenta uma lista destas variáveis que mostra a influência das mesmas na dinâmica de uso e ocupação do espaço urbano da área de estudo.

Quadro 1 - Variáveis utilizadas na modelagem.

Variáveis estáticas	Variáveis Dinâmicas
Distância às instituições de ensino particular	Distância a áreas já utilizadas (1ª simulação)
Distância aos principais shoppings da cidade	
Distância às vias arteriais	Distância a áreas já verticalizadas (2ª simulação)
Distância aos bancos	
Distância às áreas de lazer	
Distância à rodoviária	

Fonte: Autor.

Os mapas temáticos de uso e ocupação do solo e de verticalização, bem como os de distâncias foram gerados pelo *software* QGIS 3.0. Os mapas de distância foram elaborados a partir do conceito de “Distância Euclidiana”⁷. Em uma representação espacializada (mapa) a partir de ferramentas de análise espacial em SIG, esse conceito se traduz como a menor distância de cada pixel ao objeto selecionado, ou ao grupo de pixels selecionado.

4.4.2. Segunda fase: calibração e validação do modelo

A calibração do modelo consiste em quatro etapas: cálculo das matrizes de transição, cálculo dos coeficientes dos pesos de evidência, análise da correlação dos mapas e ajuste e execução do modelo de simulação (Figura 10). A matriz de transição é responsável por fornecer percentual de mudanças de uma classe para a outra ao algoritmo de simulação. Essa informação é obtida por meio da tabulação cruzada do mapa de classes inicial e final, e permite a execução de simulações pretéritas e a geração de cenários prospectivos variados.

⁷ “Distância Euclidiana” é a menor distância entre dois pontos provada pela aplicação repetida do teorema de Pitágoras.

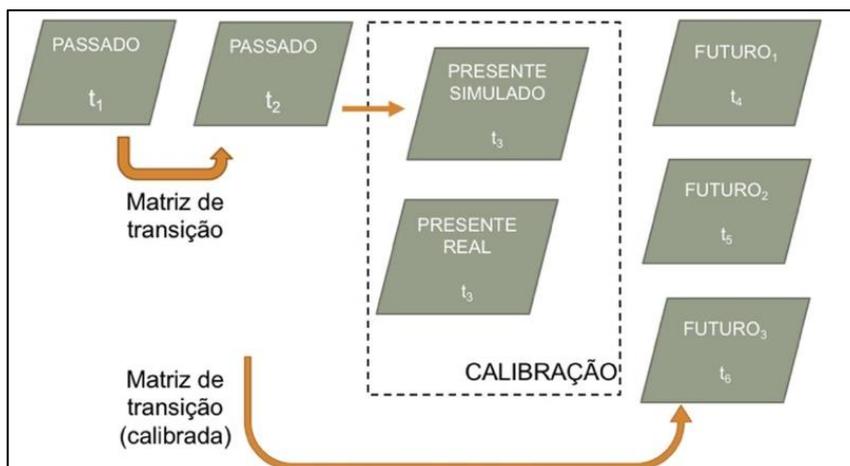


Figura 10 - Representação esquemática da calibração do modelo.
Fonte: Autor.

Com base nos mapas inicial e final, foram calculadas taxas de transição em um passo simples, ou seja, do período completo (7 anos entre 2011 e 2018) e em passos múltiplos (anuais), derivada de uma matriz ergódica⁸. Ximenes et al. (2008) salientam que a escolha adequada das variáveis explicativas é determinante para o sucesso do uso de modelos, pois com base nas suas relações com a variável dependente, são definidas as células com maior ou menor probabilidade de transição de cobertura da terra.

Todas as variáveis foram rasterizadas com pixels de 2m. Após a rasterização, foi padronizado o número de linhas e colunas de todos os insumos utilizados. As variáveis foram agrupadas em um único arquivo de variáveis estáticas, denominado de cubo raster pelo Dinâmica EGO.

O método dos Pesos de Evidência é aplicado no Dinâmica EGO para produzir um mapa de probabilidades de transição, que representa as áreas mais favoráveis para mudança. Segundo Gonçalves et al. (2007), tal fato tem papel fundamental no entendimento do processo de mudança. Para categorizar as variáveis contínuas, são calculados intervalos nos mapas de distâncias, de forma semelhante a um fatiamento.

A única suposição necessária ao método dos Pesos de Evidência é que os mapas de entrada devem ser espacialmente independentes. Para testar esta independência é feita uma análise da correlação de mapas. Na opinião de Bonham-Carter (1994), um grupo de medidas pode ser aplicado para estimar esta suposição, como o teste de Cramer (V) e o Joint Information Uncertainty (Incerteza de Informação

⁸ Matriz ergódica é uma matriz que possui auto-valores e auto-vetores reais (SOARES-FILHO et al., 2009)

Conjunta - JIU). Esses índices operam com valores reais e percentuais, respectivamente, e avaliam o grau de dependência espacial entre pares de variáveis. Conforme Bonham-Carter (1994) quanto mais próximos de 1, maior a dependência espacial entre os pares de variáveis consideradas. Variáveis com correlação acima de 0,5 (50%) devem ser desprezadas ou combinadas em uma terceira que substituirá o par correlacionado no modelo.

A parametrização do modelo também inclui o ajuste para a execução do modelo de simulação. O Dinâmica EGO usa como regra local de Autômato Celular um mecanismo de transição composto por dois *functores* complementares de transição, *Patcher* e *Expander*, especialmente desenvolvidos para reproduzir os padrões espaciais de mudança. A função *Patcher*, por sua vez, destina-se a gerar novas manchas, por meio de um mecanismo de constituição de sementes. A função *Expander* responde pela expansão de manchas previamente existentes de uma determinada classe (SOARES-FILHO et al., 2002).

Além da definição da proporção entre *Patcher* e *Expander*, é necessário definir o tamanho médio e a variância da área de mudança, além do índice de isometria. Variando estes parâmetros de entrada, estes *functores* possibilitam a formação de uma variedade de tamanhos e formas de manchas de mudanças. O tamanho médio, variância e isometria da área de mudança foram obtidos por meio do método de tentativa e erro. O índice de isometria varia de 0 a 2, as manchas assumem uma forma mais isométrica à medida que este número aumenta. O grau de fragmentação das manchas é inversamente proporcional ao valor do índice (ALMEIDA et al., 2008). Foi adotado 1,5 para o índice de isometria, pois para o caso de estudo desse trabalho, as manchas de uso do solo e de verticalização apresentaram um bom grau de isometria com esse valor.

Após a obtenção dos parâmetros satisfatórios (calibração), foram geradas simulações anuais a partir do mapa inicial, ou seja, de 2011 a 2018. Todo modelo de simulação precisa ser validado. A validação do modelo consiste na comparação entre o mapa simulado e o observado, na plataforma do Dinâmica EGO essa validação é feita por meio do índice de similaridade fuzzy, onde as coincidências não são restritas a sobreposição de células, mas também incluem as células que estão na vizinhança.

O desempenho do modelo foi validado a partir de similaridade *fuzzy*. O índice de similaridade *fuzzy* empregado neste trabalho foi criado pelo Centro de

Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR/UFMG) e representa uma adaptação do índice de similaridade *fuzzy* criado por Hagen (2003), sendo que este penaliza o ajuste em vista da distância da célula central, em análise, em relação à célula que contém a classe desejada na cena de comparação, utilizando uma função de decaimento, que pode ser constante ou exponencial (ALMEIDA et al., 2008). No caso particular deste trabalho, a comparação foi feita entre dois mapas-diferenças, resultantes, de um lado, da subtração entre o mapa final real e o mapa inicial, e de outro lado, entre o mapa final simulado e o mapa inicial, conforme implementado na plataforma Dinâmica EGO. Adotou-se uma função de decaimento exponencial com tamanho de janela 11×11 e uma função de decaimento constante, calculada com os seguintes tamanhos de janelas: 1×1 , 3×3 , 5×5 , 7×7 , 9×9 e 11×11 . Com o modelo validado, três cenários futuros de uso e ocupação do solo e de verticalização foram gerados, de acordo com o escopo da modelagem.

4.4.3. Terceira fase: obtenção dos cenários de prognóstico

A terceira fase da pesquisa compreendeu a simulação de cenários de prognósticos a partir do modelo calibrado e validado da etapa anterior, alterando-se somente o número de iterações do modelo. Nesta fase foram obtidos os cenários de tendência, que corresponderam à manutenção do mesmo padrão de crescimento urbano verificado na situação real. O intervalo de tempo definido para os cenários de prognóstico foi de mais longo prazo.

Assim, a partir de cenário real, o ano de 2018, adotou-se o intervalo de 22 anos para o prognóstico do ano de 2040, 52 anos para o prognóstico do ano de 2070 e 82 anos para o prognóstico do ano de 2100. Estes anos foram escolhidos devido a estudos elaborados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que projetam cenários de mudança climática para a América do Sul até o ano de 2100, baseados nos cenários climáticos futuros do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas). A ideia é que estes cenários simulados poderiam servir de dados de entrada para a realização de outras simulações que considerem estes dados do IPCC.

Ao escolher esses horizontes de tempo de longo prazo para os três cenários futuros simulados, têm-se a ciência de que existe uma imprecisão agregada ao

modelo de simulação. Durante esse longo prazo, mudanças sociais, econômicas e tecnológicas importantes ocorrerão e poderão modificar significativamente os tipos de uso do solo atuais. Entretanto, enquanto experiência metodológica, percebe-se que se os cenários de entrada apresentarem um intervalo maior (período mais longo), um maior número de tendências e mudanças poderá ser observado e, portanto, melhor simulados para cenários futuros de curto, médio e longo prazo.

4.5. ESTIMATIVA DO CONSUMO E DEMANDA FUTURA DE ÁGUA

No presente trabalho, a estimativa do consumo de água para o ano de 2018 foi realizada através dos dados de uso do solo específico. Os usos do solo gerais utilizados foram: residencial, comercial, misto, serviço, industrial e sem uso. No uso residencial serão consideradas casas, condomínios residenciais horizontais e verticais, no uso comercial serão considerados, por exemplo: bares, restaurantes, *shoppings*, padarias, entre outros. No uso misto serão considerados lotes utilizados para dois usos, por exemplo: uma padaria no térreo e uma casa no primeiro andar, no uso serviço serão considerados, por exemplo: salões de beleza, postos de gasolina, no uso industrial serão consideradas as indústrias existentes e na classe sem uso serão considerados aqueles lotes desocupados ou aqueles que ainda estejam em construção no ano da coleta.

A estimativa do consumo de água foi realizada para cada lote, para o cenário de uso e ocupação do solo correspondente ao ano de 2018. Foi calculado dois cenários de estimativa do consumo de água, um cenário considerando o consumo normal de água nas residências e um cenário considerando o uso racional da água. No segundo cenário foi utilizada uma metodologia desenvolvida por Barros et al. 2016, onde foi constatada uma redução de 10,42% se nas residências fossem utilizados mecanismos poupadores, como: torneira (com arejador); chuveiro; bacia sanitária (de acionamento duplo); reúso de água (cinzas); e medidores individuais.

Para a realização dessa estimativa foram utilizados dados coletados em campo, dados coletados no *site* do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), dados coletados no *site* da RAIS (Relação Anual de Informações Sociais), de metodologias encontradas na literatura como a Norma da SABESP (2012) e Tsutyia (2006), dados da CAGEPA e dados do SNIS (Sistema Nacional de

Informações sobre Saneamento). A Figura 11 mostra um exemplo do cálculo do consumo para o uso residencial.

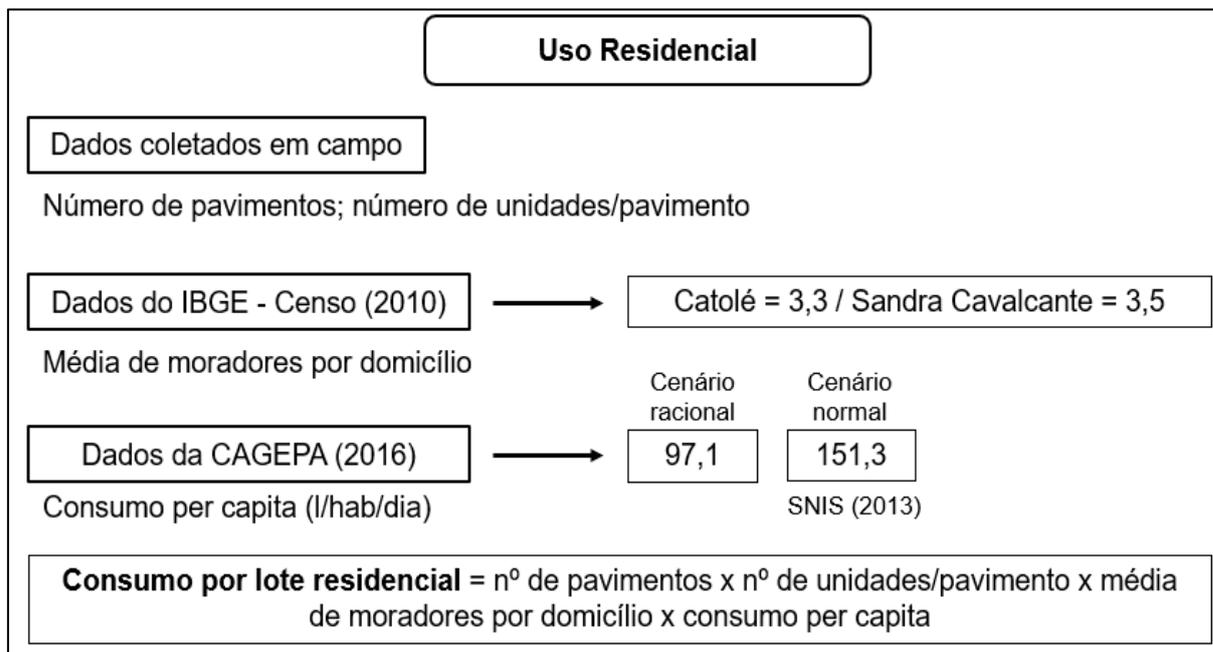


Figura 11 - Metodologia do cálculo do consumo de água para o uso residencial.
Fonte: Autor.

Para os lotes de usos comercial, industrial e serviço, foi preciso dados do número de funcionários, da taxa de ocupação, calculada através da área do estabelecimento. As Figuras 12 e 13 mostram exemplos desta formulação aplicada. Os dados de quantidade de funcionários para cada estabelecimento comercial ou de serviços foi obtido através do RAIS (2016).

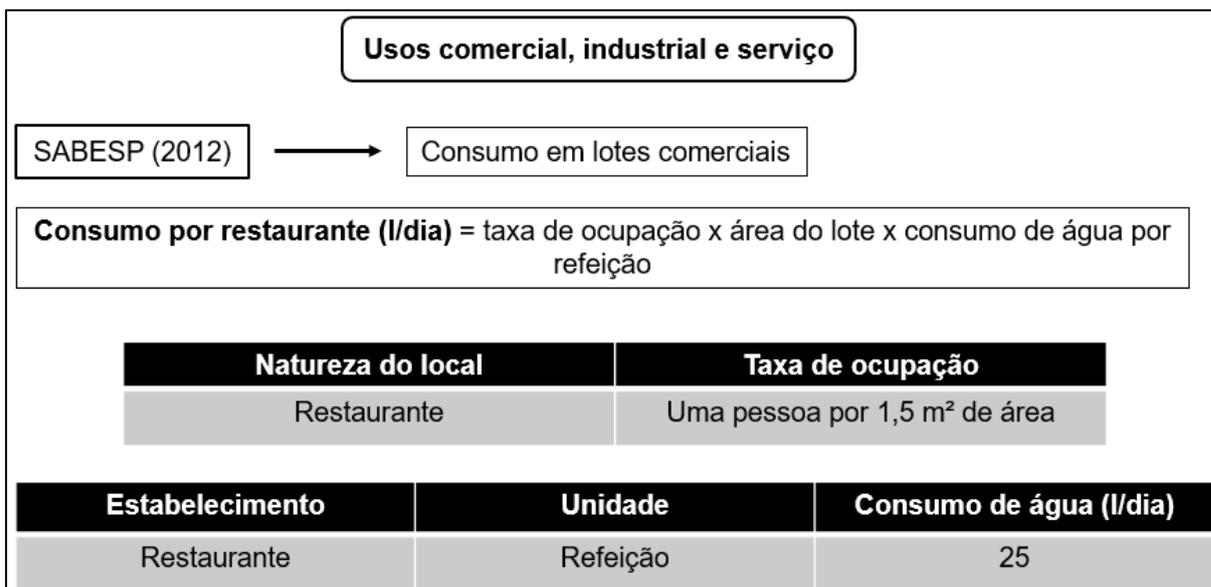


Figura 12 - Metodologia do cálculo do consumo para os usos comercial, industrial e serviço.
Fonte: Autor.

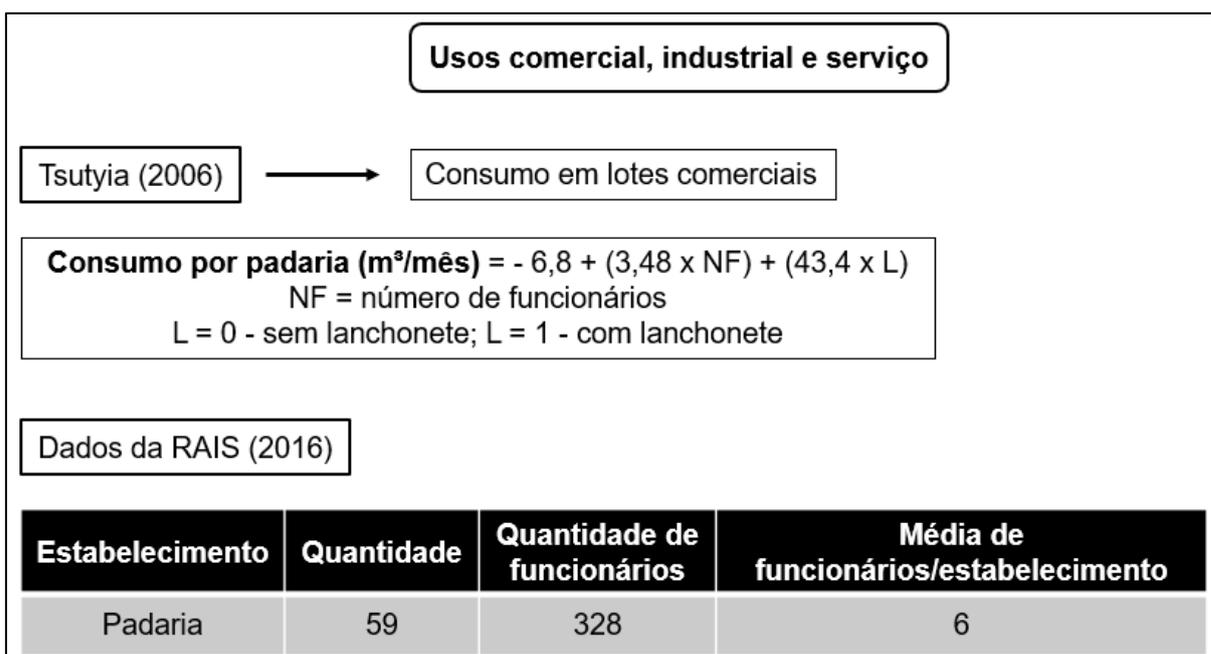


Figura 13 - Metodologia do cálculo do consumo para os usos comercial, industrial e serviço.
Fonte: Autor.

Os lotes com mais de um uso foram considerados de “uso misto”. Neste caso, o cálculo do consumo foi realizado através da soma dos consumos de casa uso envolvido. Por exemplo, se no mesmo lote foi observado o uso comercial e residencial, faz-se de forma separada o cálculo do consumo do uso residencial e do uso comercial e logo após a soma, para atingir o consumo de água total do lote.

Outro fator importante para estimar o consumo de água para o cenário de 2018, foi observar as especificidades de cada uso, atentando-se para os vários tipos de uso do solo específico de cada lote. Por exemplo, um salão de beleza pode consumir mais água que uma loja de cosméticos. Se for considerado o mesmo consumo para ambos os tipos de lotes de comércio, não seria uma estimativa de consumo de água eficiente, já que um pode consumir mais que o outro, embora ambos sejam lotes comerciais.

Para os demais cenários simulados (2040, 2070 e 2100), não foi possível realizar esse nível de detalhamento na estimativa da demanda de água, devido à natureza dos dados que após a simulação no Dinâmica EGO resultam em matrizes de pixels (tipo raster) que não permitem a identificação clara dos lotes. No entanto, para estes cenários, utilizou-se uma adaptação da metodologia elaborada por Araújo (2012), onde a demanda de água foi estimada através de uma agregação da quantidade de pixel para cada tipo de uso do solo, do consumo total de água para cada tipo de uso do solo, gerando assim uma taxa de consumo de água por pixel por uso, sendo tudo isso obtido através da estimativa do consumo de água da situação atual (2018). A adaptação da metodologia veio com a introdução do fator de verticalização, que foi determinado através de uma medida estatística, denominada *moda*.

Por exemplo, para a classe de verticalização 4 (5 a 10 pavimentos), observou-se que as verticalizações com 7 pavimentos eram as que mais se repetiam, sendo, portanto, mais comuns na área de estudo. Essa maneira de calcular o fator de verticalização foi utilizada com o intuito de não o superestimar. A última classe de verticalização, por exemplo, engloba edifícios de 11 a 33 pavimentos, caso fosse realizado a média desse número de pavimentos, o fator de verticalização iria ser superestimado para os demais números de pavimentos, que em sua maioria são na faixa de 11 pavimentos.

Com isso, para a estimativa da demanda de água nos cenários futuros simulados, realizou-se uma tabulação cruzada dos dados de uso do solo e de verticalização para cada ano (2040, 2070 e 2100), onde descobriu-se, por exemplo, quantos pixels eram de uso do solo residencial e estavam na classe de verticalização 2 (1 e 2 pavimentos). Assim, a estimativa da demanda de água futura foi realizada através do produto (multiplicação) de uma “taxa de consumo de água por pixel para cada tipo de uso do solo” (Tabela 1), determinada a partir do cenário de 2018 com o

número de pixels de cada tipo de uso do solo e do consumo total do uso, com o fator de verticalização de cada classe de verticalização (Tabela 2).

Nas classes de uso do solo Residencial e Misto, existem dois consumos e duas taxas de consumo/pixel, devido à aplicação do fator de redução de consumo elaborado por Barros et al. (2016), no valor de 10,42%.

Tabela 1 - Taxa de consumo por pixel.

Uso	Quantidade de pixel	Consumo total		Taxa consumo/pixel	
Residencial	345.676	5.572.639,57	3.576.360,23	16,12	10,35
Comercial	46.560	310.919,55		6,68	
Misto	58.622	663.289,50	532.954,70	11,31	9,09
Serviço	187.810	1.095.434,50		5,83	
Industrial	3.213	2.800,00		0,87	
Sem Uso	130.861	0,00		0,00	

Fonte: Autor.

Tabela 2 - Fator de verticalização.

Verticalização	Fator de verticalização
Classe 1 - desocupado	0
Classe 2 - 1 e 2 pavimentos	1
Classe 3 - 3 e 4 pavimentos	3
Classe 4 - 5 a 10 pavimentos	7
Classe 5 - acima de 10 pavimentos	11

Fonte: Autor.

O primeiro passo dessa etapa foi a obtenção do consumo estimado de água totalizado para cada tipo de uso do solo, a partir do cenário 2018. Por exemplo, para o uso do solo comercial foram somados os consumos de água de todos os lotes do tipo comercial do cenário 2018 e obteve-se o consumo de água total para o uso do solo comercial deste cenário. Em seguida determinou-se no ambiente SIG a quantidade de pixels de cada tipo de uso do solo para o cenário 2018. Esta operação permitiu a obtenção de uma taxa de consumo de água por pixel utilizando-se a Equação 1 (Eq.1).

<p><i>Taxa de consumo de água por pixel =</i> <i>consumo de água por tipo de uso do solo / número de pixel de cada tipo de uso do solo (l/dia)</i> (Eq.1)</p>

Com a taxa de consumo de água por *pixel* para cada tipo de uso do solo, determinando-se o número total de *pixels* de cada tipo de uso do solo para os cenários futuros simulados e o fator de verticalização para cada classe de verticalização, foi calculada a demanda de água para cada tipo de uso do solo dos cenários futuros através da Equação 2 (Eq.2).

$$\text{Demanda de água (cenários futuros simulados)} = \text{taxa de consumo de água por pixel} \times \text{número de pixel de cada tipo de uso do solo} \times \text{fator de verticalização (l/dia)} \quad (\text{Eq.2})$$

Com a demanda de água futura para cada tipo de uso do solo nos três cenários simulados, obtém-se a demanda total de água estimada para os anos 2040, 2070 e 2100. Na Figura 14 pode ser observado o diagrama esquemático da metodologia aplicada à estimativa da demanda de água para os três cenários futuros simulados. A metodologia utilizada foi uma metodologia adaptada de Araújo (2012).

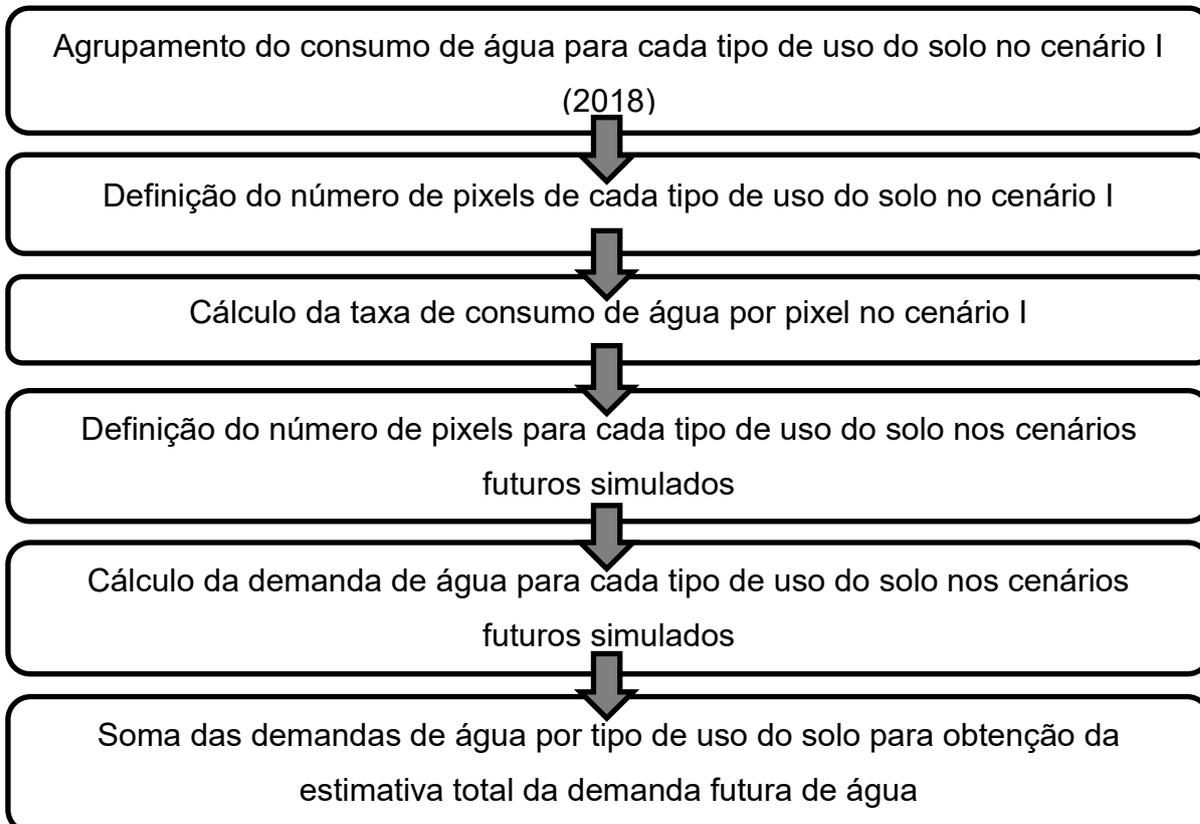


Figura 14 - Síntese das etapas realizadas para a estimativa da demanda de água futura para os cenários simulados.

Fonte: Autor.

4.6. VALIDAÇÃO DA ESTIMATIVA DO CONSUMO DE ÁGUA ATUAL

A validação foi necessária para uma aplicabilidade desses dados para os cenários futuros de demanda de água (2040, 2070 e 2100). Na opinião de Araújo (2012), a validação é uma etapa fundamental quando se aplica uma metodologia que deseja obter resultados medidos nas atividades práticas das companhias de abastecimento de água.

Os dados de consumo medidos, foram disponibilizados pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA). Foram disponibilizados os dados de consumo de água mensais para os dois bairros da área de estudo (Catolé e Sandra Cavalcante). A metodologia utilizada nesta etapa de validação foi a de comparação direta entre os consumos de água estimados calculados no presente trabalho e os consumos de água medidos disponibilizados pela CAGEPA. Tanto os dados de consumos estimados, quanto os dados de consumos medidos disponibilizados pela CAGEPA, são dados micromedidos. Com isso, após a comparação, foi possível observar se a metodologia utilizada apresentou resultados satisfatórios.

Foram disponibilizados dados de um período de doze meses, desde dezembro de 2017 a novembro de 2018. Para validar a estimativa realizada neste trabalho, foi escolhido o mês que apresentou o maior consumo medido, no caso, o mês de outubro de 2018. A escolha desse mês é justificada na possibilidade de consumo máximo que os dois bairros podem atingir.

Os dados de consumo estimado de água utilizados para ser realizada a comparação com os dados de consumo medido disponibilizados pela CAGEPA, foram os dados estimados de consumo normal. Já que no ano 2018, pode-se considerar que o sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande está fornecendo uma quantidade normal de água para consumo da população.

A comparação foi realizada para os dois cenários de consumo desta pesquisa, o cenário normal sem a utilização de mecanismos poupadores e com a utilização de mecanismos poupadores. Assim, foi aplicado o valor de redução no consumo obtido por Barros et al. (2016), correspondente a 10,42%, no dado do mês de maior consumo de água medido disponibilizado pela Companhia de água e Esgotos de Campina Grande (Eq. 3).

$$\text{Consumo medido racional} = \text{consumo medido} - (\text{consumo medido} \times 0,1042)$$

(Eq. 3)

Vale ressaltar que os dados obtidos se encontravam em m³/mês. Houve a necessidade de transformá-los em l/dia (Eq. 4), já que os dados de consumos estimados calculados neste trabalho estavam na unidade l/dia.

$$\text{Consumo medido (l/dia)} = \text{consumo medido (m}^3\text{/mês)} \times 1000 / 30$$
 (Eq. 4)

Na Figura 15, é possível observar o diagrama esquemático da etapa de validação da estimativa de consumo da área de estudo para o ano de 2018.

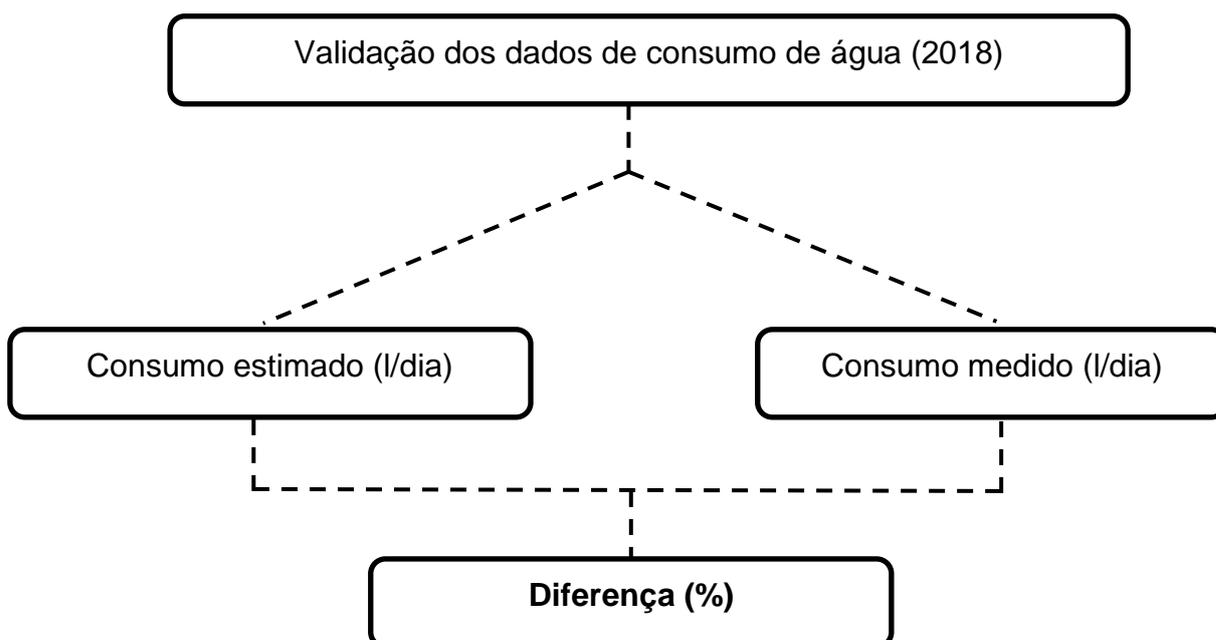


Figura 15 - Diagrama esquemático da etapa de validação dos dados de consumo de água.
Fonte: Autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E DE VERTICALIZAÇÃO

Os mapas de uso e ocupação do solo e de verticalização dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante - de 2011 e de 2018 - podem ser visualizados nas Figuras 16 e 17, respectivamente. Esses mapas foram gerados a fim de se analisar a dinâmica urbana da área de estudo. Por meio da espacialização dos dados pode-se verificar que se trata de uma área com uso do solo bem diversificado, onde é possível encontrar grandes escolas da cidade, shoppings, áreas de lazer, etc.

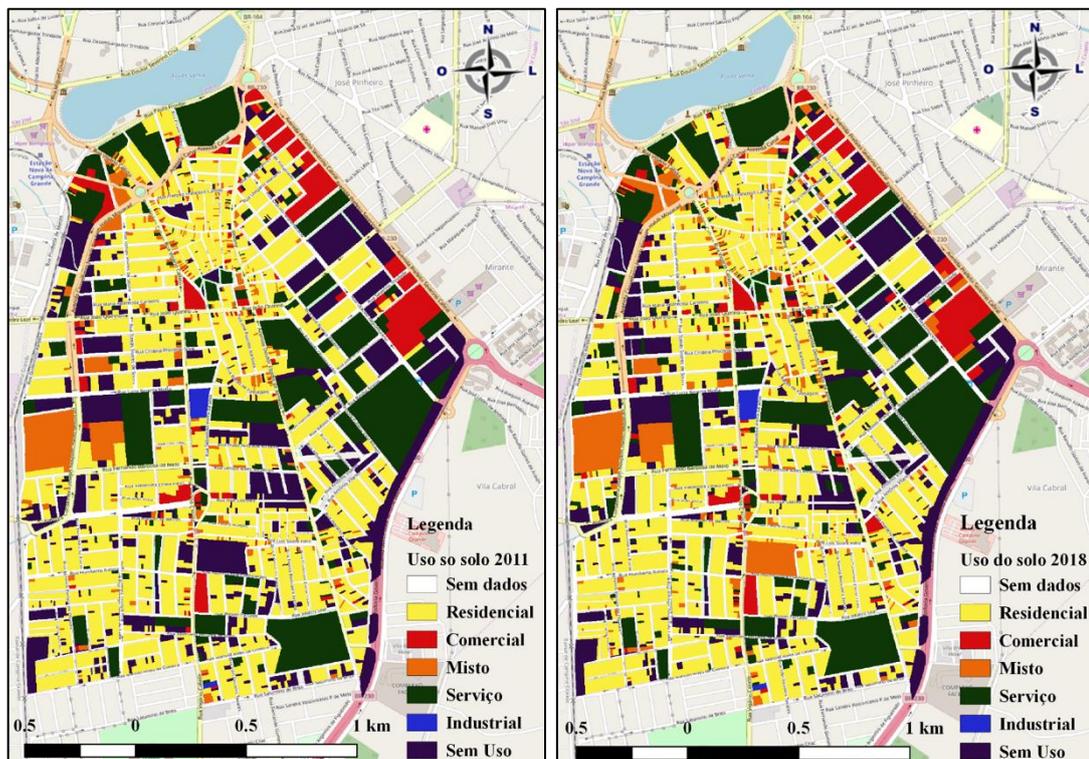


Figura 16 - Representações do uso e ocupação do solo dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2011 e 2018).

Fonte: Autor.

Nas Tabelas 3 e 4 apresentam-se os cálculos das áreas (em km² e em percentuais) das classes de uso e ocupação do solo e de verticalização, respectivamente.

Tabela 3 - Cálculo de áreas referentes aos mapas de uso e ocupação do solo no Catolé e Sandra Cavalcante.

Classes	2011		2018	
	Km ²	%	Km ²	%
Residencial	1,39	45,0	1,38	44,7
Comercial	0,19	6,2	0,19	6,0
Misto	0,17	5,6	0,23	7,6
Serviço	0,69	22,2	0,75	24,3
Industrial	0,01	0,4	0,01	0,4
Sem Uso	0,64	20,6	0,53	17,0
Total	3,09	100,0	3,09	100,0

Fonte: Autor.

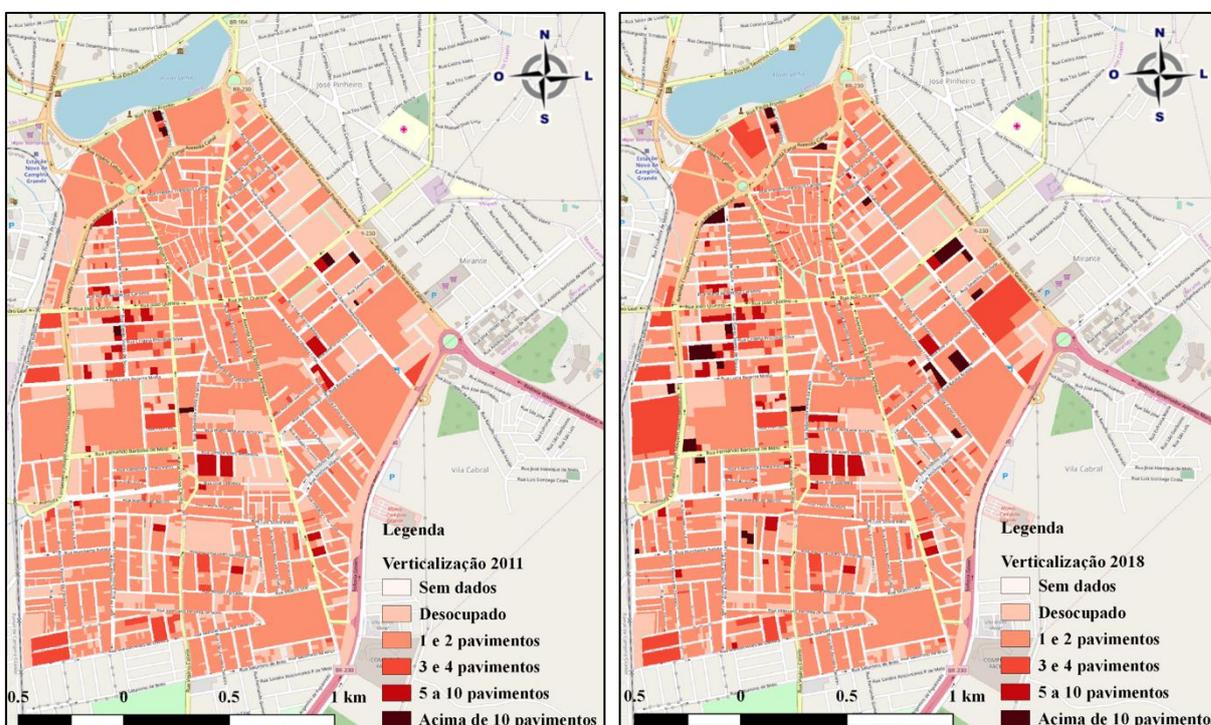


Figura 17 - Representação da verticalização dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2011 e 2018).

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Cálculo de áreas referentes aos mapas de verticalização no Catolé e Sandra Cavalcante.

Classes	2011		2018	
	Km ²	%	Km ²	%
Desocupado	0,74	24,0	0,54	17,4
1 e 2 pavimentos	2,14	69,4	2,15	69,5
3 e 4 pavimentos	0,13	4,2	0,27	8,7
5 a 10 pavimentos	0,06	2,1	0,08	2,6
Acima de 10 pavimentos	0,01	0,4	0,06	1,8
Total	3,09	100,0	3,09	100,0

Fonte: Autor.

Percebe-se uma tendência de diminuição dos usos Residencial, Comercial e Sem Uso, o que realmente é uma tendência que tem ocorrido nesses bairros, onde se encontram vários estabelecimentos prestadores de serviços e muitos lotes que estavam sem uso passaram a ser ocupados. A maioria desses lotes desocupados, se transformaram em lotes de natureza mista. Com relação à verticalização, percebe-se que os lotes desocupados estão passando a ser ocupados por verticalizações desde aquelas de 2 pavimentos, geralmente com uso misto predominante, até verticalizações acima de 10 pavimentos. Tendências essas que já eram esperadas, devido a supervalorização da área.

5.2. VARIÁVEIS EXPLICATIVAS UTILIZADAS NO MODELO DE SIMULAÇÃO

Na Figura 18, é possível observar a espacialização dos mapas matriciais de distância das variáveis estáticas utilizadas no modelo de simulação. Esses mapas serviram como dados de entrada no modelo, agrupadas no que o *Dinâmica EGO* chama de *cube raster*.

Essas variáveis serviram para explicar a dinâmica do solo urbano dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante, a partir dos seus poderes de influência dentro de determinadas faixas de distâncias.

Os bairros Catolé e Sandra Cavalcante se apresentam com sua importância delimitada pela presença de equipamentos urbanos importantes, ao mesmo tempo que as suas localizações em relação ao centro da cidade faz com que os bairros tenham seu espaço valorizado.

Atualmente, os bairros possuem sua urbanização próxima aos 100%, com a presença dos espaços livres públicos (parque, ruas, etc) e de alguns vazios urbanos que na realidade são constituídos de terrenos que esperam uma maior valorização em relação à já existente nos bairros, que culmina em grandes empreendimentos, tendo em vista que são grandes espaços. Com isso, dado tal processo de valorização, temos a partir do ano 2000 a intensificação do processo de verticalização (IBGE, 2000; IBGE, 2010) que atualmente faz desses bairros um dos bairros com maior concentração de condomínios verticais na cidade.

Mesmo na década de 1980, com Campina Grande sofrendo os reflexos da estagnação no setor industrial, setor este que promovia um importante papel no

desenvolvimento e crescimento da cidade. Os bairros Catolé e Sandra Cavalcante, começam a crescer ao receber em 1985 o seu primeiro e até então mais importante equipamento urbano, o Terminal Rodoviário Argemiro de Figueiredo, mais conhecido como Rodoviária Nova, que a partir de sua chegada traz consigo a especulação e valorização espacial da área.

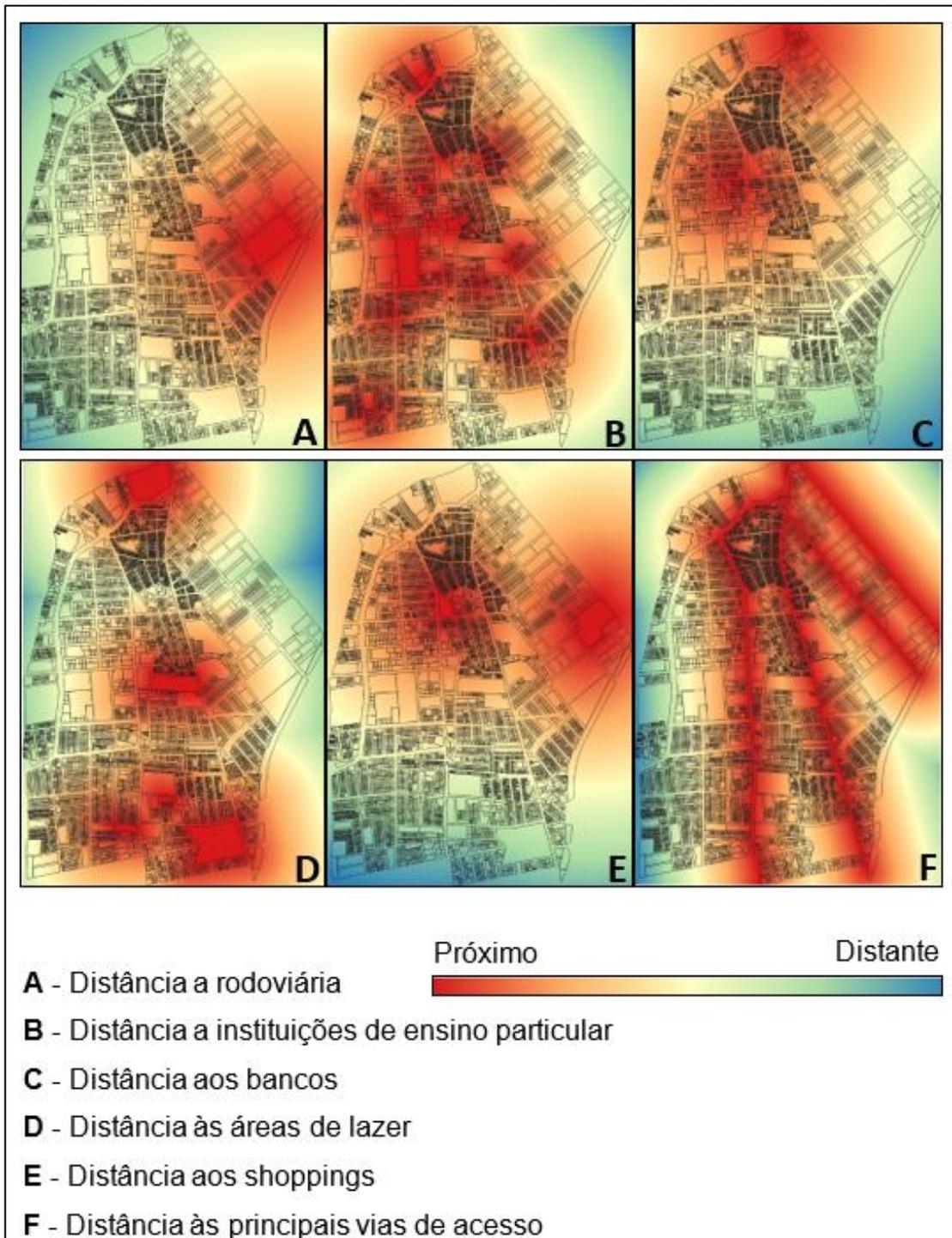


Figura 18 - Variáveis utilizadas no modelo de simulação.
Fonte: Autor.

A partir da inauguração desse terminal, a área em estudo deixa de ser uma área tipicamente marcada por atividades rurais, para se tornar um espaço de valorização e habitação. A criação da Rodoviária Nova consolida a Avenida Brasília como sendo uma das principais artérias que faz o contato da cidade de Campina Grande com a BR-230 em direção à capital do Estado da Paraíba, João Pessoa.

O terminal rodoviário se configura como um “ponta pé inicial” na nova dinâmica de crescimento dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante, intensificando-se vertiginosamente o processo de valorização das edificações já existentes. Bem como facilitou o surgimento de novas e grandiosas edificações “Públicas e Privadas” (casas de elevado padrão, escolas, bancos, Centro Regional de Saúde, Hemocentro de Campina Grande).

Os bairros também expandiram em função de suas proximidades com a área central da cidade. Nos últimos anos, sobretudo, a partir da década de 1990, os bairros receberam mais equipamentos urbanos importantes para o seu desenvolvimento. Onde ocorreu a implantação de modernos equipamentos comerciais no seu espaço, como a instalação em 1991 de um pequeno Shopping Center em 1999 de um outro Shopping Center e maior porte.

É possível constatarmos tal processo de crescimento em algumas áreas desses bairros, especialmente, ao longo das suas principais vias de acesso (Avenidas Elpídio de Almeida, Avenida Vigário Calixto, Avenida Otacílio Nepomuceno, Avenida Canal e Avenida Brasília) e em alguns pontos privilegiados dispersos pelos bairros como, nas áreas que se situam próximas a espaços públicos, como o Parque da Criança (inaugurado em 1993).

Visto tudo isso, pode-se afirmar que a valorização dos bairros foi, principalmente, devido à sua proximidade com os citados “atratores de movimento” como, rodoviária, *shoppings centers*, colégios, áreas públicas de lazer, etc. Estas variáveis explicativas foram escolhidas para serem os chamados “atratores de movimento” do modelo de simulação dinâmica de uso e ocupação do solo e de verticalização.

5.3. CALIBRAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO

Como explicado na metodologia, uma das etapas da calibração do modelo é o teste da independência espacial dos mapas de entrada. Esta análise de independência foi analisada pelos testes de *Cramer (V)* e o *Joint Information Uncertainty* (Incerteza de Informação Conjunta - JIU).

De acordo com os resultados dos índices *V* e *JIU* no teste de dependência espacial, nenhum par de variável apresentou correlação acima de 50% e, portanto, não precisou da exclusão dessas variáveis, e conseqüentemente não foi preciso recalcular os pesos de evidência.

Na etapa de ajuste e execução do modelo de simulação, alguns parâmetros devem ser especificados, como: o tamanho médio, a variância e a isometria da expansão e formação de novas manchas, assim como a relação *Patcher/Expander*. Os valores utilizados para a parametrização dos modelos de simulação de uso e ocupação do solo e de verticalização foram definidos por tentativa e erro, e se encontram nas Tabelas 5 e 6 respectivamente.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados no ajuste e execução do modelo de simulação de uso e ocupação do solo.

Uso do solo				
Tipo	Tamanho médio	Variância	Isometria	Patcher/Expander
Residencial (1)	1,64	2,40	1,5	0,6
Comercial (2)	0,80	3,00	1,5	0,6
Misto (3)	0,40	2,56	1,5	0,6
Serviço (4)	1,84	4,44	1,5	0,6
Industrial (5)	1,72	2,84	1,5	0,6
Sem Uso (6)	0,88	2,80	1,5	0,6

Fonte: Autor.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados no ajuste e execução do modelo de simulação de verticalização.

Verticalização				
Classes	Tamanho médio	Variância	Isometria	Patcher/Expander
Desocupado (1)	0,88	2,80	1,5	0,6
1 e 2 pavimentos (2)	2,72	4,12	1,5	0,6
2 e 3 pavimentos (3)	0,60	2,04	1,5	0,6
5 a 10 pavimentos (4)	1,00	1,80	1,5	0,6
Acima de 10 pavimentos (5)	0,64	0,96	1,5	0,6

Fonte: Autor.

5.4. VALIDAÇÃO DO MODELO

Na validação do modelo de simulação, o Dinâmica EGO utiliza-se de dois métodos: validação utilizando uma função de decaimento exponencial em janela 11×11 e validação utilizando janelas múltiplas (1×1 ; 3×3 ; 5×5 ; 7×7 ; 9×9 ; 11×11) e função de decaimento constante. É aconselhável sempre escolher o menor valor de similaridade, uma vez que mapas randômicos tendem a produzir um alto ajuste inicial quando comparados univocamente, porque eles dispersam as mudanças sobre todo o mapa.

Em ambos, o método de validação utilizado pelo Dinâmica EGO é uma modificação (adaptação) do método de similaridade *fuzzy* desenvolvido por Hagen (2003). Segundo Caixeta (2014), o índice de similaridade *fuzzy* adaptado não opera sobre o mapa final real e o mapa final simulado, como propôs inicialmente Hagen (2003), mas entre os mapas-diferença resultantes da subtração desses dois mapas do mapa inicial real.

O menor valor da similaridade fuzzy entre os mapas - diferença (2018 real - 2011 real; 2018 simulado - 2011 real) para os modelos de simulação de uso e ocupação do solo e de verticalização foram respectivamente, 0,49 e 0,57 para a validação utilizando função de decaimento exponencial em janela de tamanho 11×11 . Valores bons para validação, já que Novaes *et al.* (2011) sugerem que valores próximos a 0,4 indicam um bom nível de compatibilidade entre o cenário simulado e o real. Trentin e Freitas (2010) também ressaltam que tratando-se da dinâmica de áreas urbanas, mesmo valores de similaridade relativamente baixos na escala de 0 a 1, em torno de 0,4 por exemplo, podem ser considerados como aceitáveis.

Para a validação utilizando função de decaimento constante em janelas múltiplas, foram analisados os valores das janelas de 3×3 e 5×5 pixels. O modelo de simulação de uso e ocupação do solo e de verticalização obtiverem os seguintes valores, respectivamente: 0,48; 0,50 e 0,56; 0,58. De modo prático, índices de similaridade *fuzzy* adaptados com valores oscilando entre 0,45 e 0,50 para janelas com tamanhos de 3×3 a 5×5 têm denotado concordâncias aceitáveis entre os mapas de diferença, considerando-se que esse índice desconsidera as áreas de não-mudança, as quais são responsáveis por sobrestimar índices de ajuste em geral,

incluindo o índice de similaridade *fuzzy* propriamente dito (ALMEIDA et al., 2008; SOARES-FILHO et al., 2013).

Além da validação realizada pelo próprio Dinâmica EGO através do modelo de simulação, foi realizada uma validação através da comparação (diferença) entre a quantidade de *pixels* do mapa final real (2018 real) e o mapa final simulado (2018 simulado). Por meio desta comparação (Tabelas 7 e 8), pode-se observar através do cálculo dos erros absoluto e relativo, que a quantidade de pixel dos dois mapas é bastante similar, tanto para os mapas de uso e ocupação do solo, como para os mapas de verticalização.

Tabela 7 - Validação por comparação da quantidade de pixels - Mapas de uso e ocupação do solo.

Classes de usos do solo	2018 real	2018 simulado	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1 - Residencial	345.676	345.173	503	0,146
2 - Comercial	46.560	46.563	3	0,006
3 - Misto	58.622	58.626	4	0,007
4 - Serviço	187.810	187.810	0	0,000
5 - Industrial	3.213	3.217	4	0,124
6 - Sem Uso	130.861	131.353	492	0,376

Fonte: Autor.

Tabela 8 - Validação por comparação da quantidade de pixels - Mapas de verticalização.

Classes de verticalização	2018 real	2018 simulado	Erro absoluto	Erro relativo (%)
1 - Desocupado	134.386	134.388	2	0,001
2 - 1 e 2 pavimentos	536.797	536.843	46	0,009
3 - 3 e 4 pavimentos	67.060	66.954	106	0,158
4 - 5 a 10 pavimentos	20.257	20.277	20	0,099
5 - Acima de 10 pavimentos	14.242	14.280	38	0,267

Fonte: Autor.

5.5. MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E DE VERTICALIZAÇÃO SIMULADOS PARA O FUTURO

Após obter parâmetros satisfatórios, garantindo assim a validação do modelo de simulação dinâmica, os mesmos parâmetros de ajuste utilizados para calibrar o modelo e gerar o mapa simulado para o ano de 2018 foram utilizados para simular os cenários futuros de uso e ocupação do solo e de verticalização, mudando apenas o

número de interações do modelo. Na primeira simulação (2018) foram utilizadas 7 interações, cada interação corresponde a um ano. Então, para os mapas futuros simulados de uso e ocupação do solo e de verticalização dos anos 2040, 2070 e 2100 foram utilizadas 22, 52 e 82 interações, respectivamente.

Os cenários prospectivos (Figuras 19 e 21) obtidos através das simulações de mudanças de uso e ocupação do solo e de verticalização representam as tendências de futuras configurações espaciais dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante.

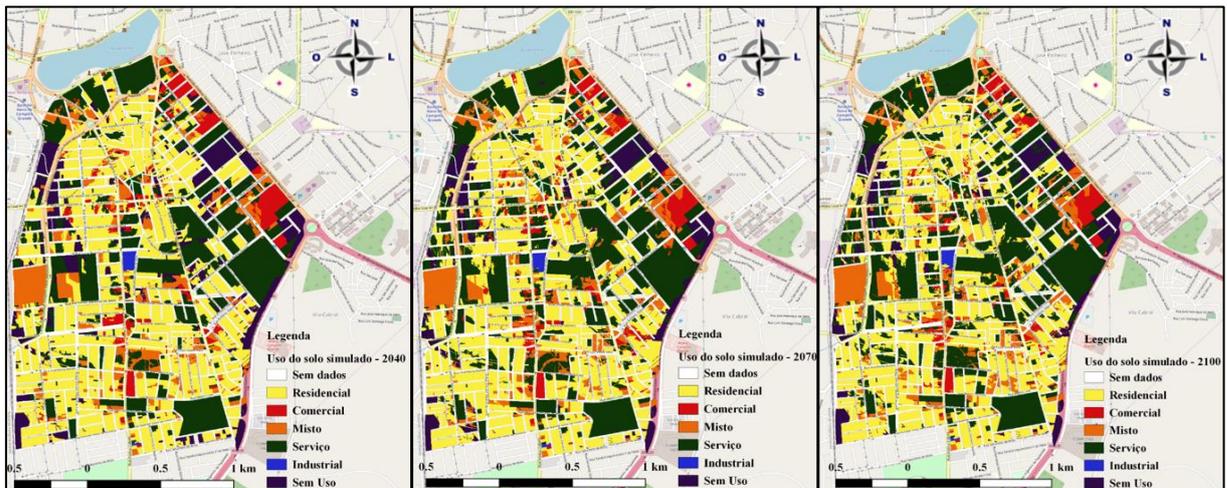


Figura 19 - Cenário simulado de uso e ocupação do solo para os bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2040, 2070 e 2100).

Fonte: Autor.

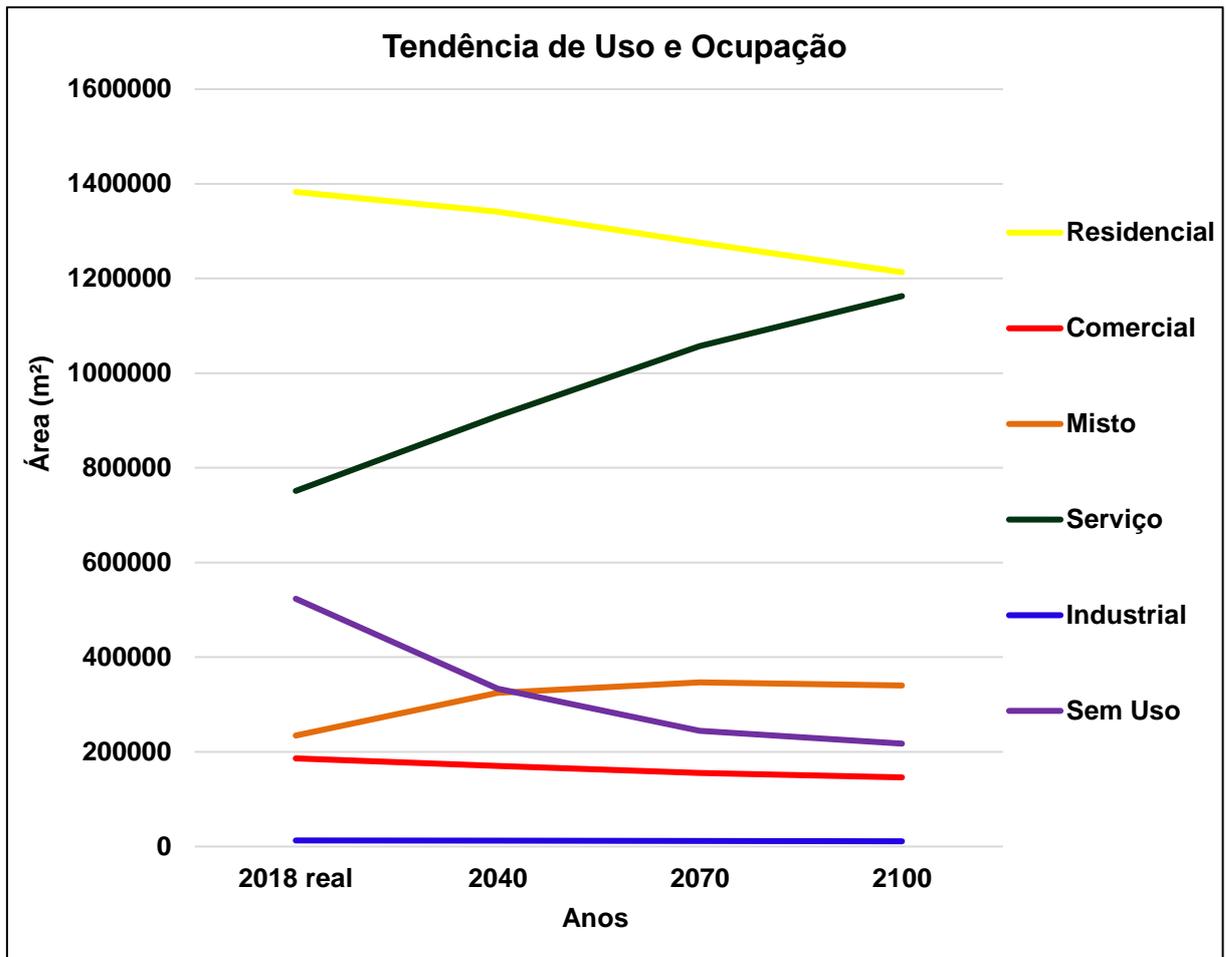


Figura 20 - Tendência de Uso e Ocupação do solo nos bairros Catolé e Sandra Cavalcante.
Fonte: Autor.

A Figura 20 mostra que a mesma tendência de uso e ocupação do solo que ocorreu entre os anos 2011 e 2018, continuou ocorrendo e se confirmou em longos períodos de tempo. Onde os usos residencial, comercial e sem uso diminuíram e os usos misto e serviço aumentaram.

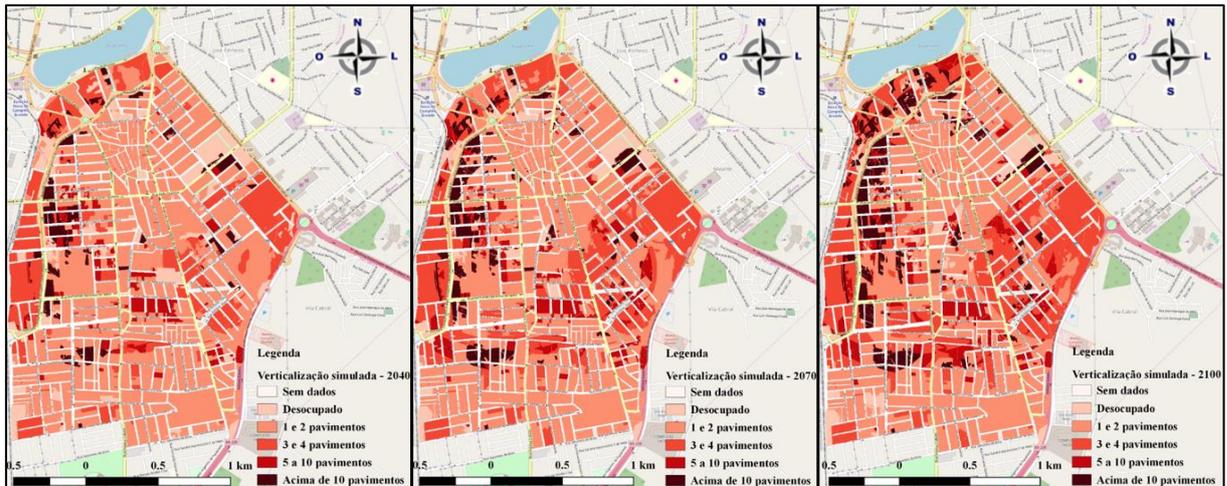


Figura 21 - Cenário simulado de verticalização para os bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2040, 2070 e 2100).
 Fonte: Autor.

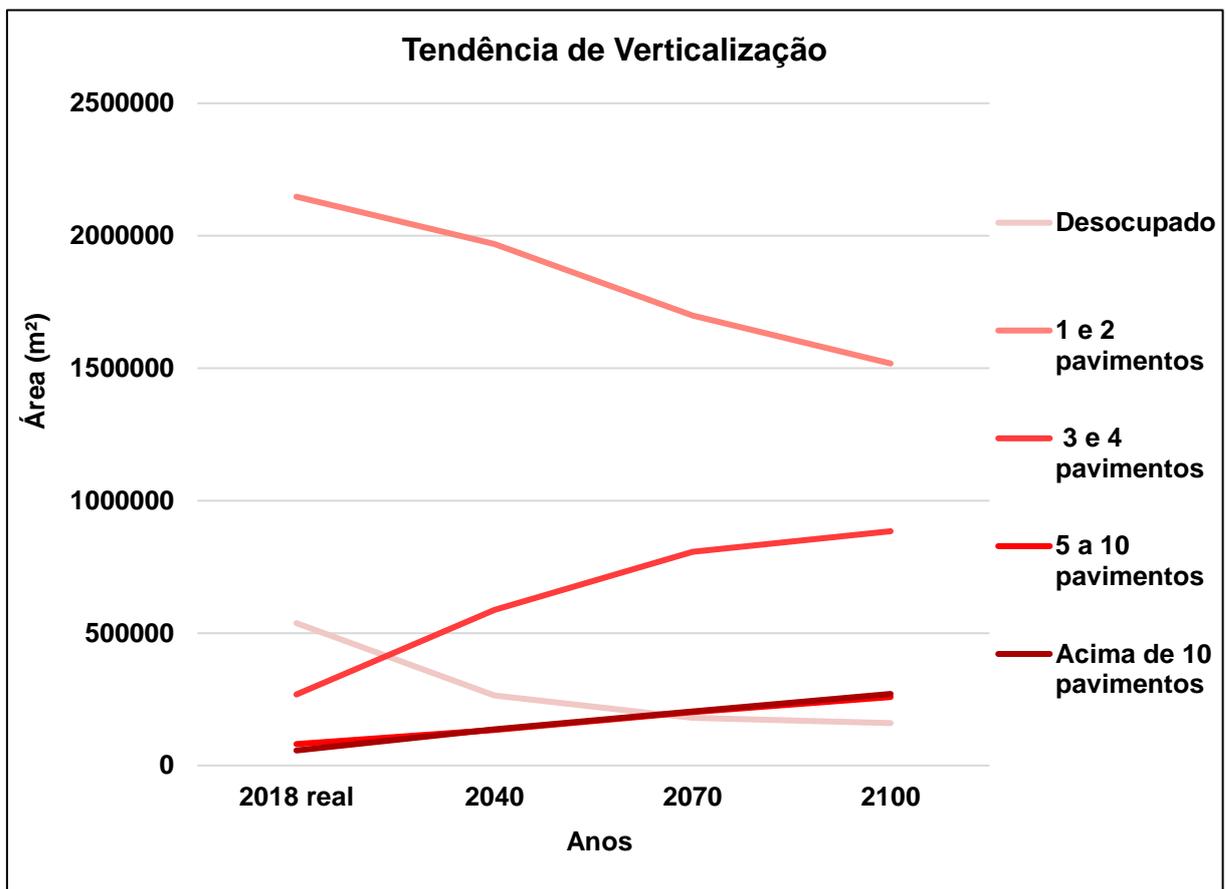


Figura 22 - Tendência de verticalização nos bairros Catolé e Sandra Cavalcante.
 Fonte: Autor.

Com relação à tendência de verticalização apresentada nos dois bairros, na Figura 22 percebe-se também que a tendência apresentada durante os sete anos entre os anos 2011 e 2018 se repetiu. As classes de verticalização 1 e 2 (desocupado; 1 e 2 pavimentos) tendem a diminuir, dando espaço a áreas mais verticalizadas, como

por exemplo: prédios de finalidades médicas (clínicas) e estéticas e novos empresariais de caráter misto (com serviços comerciais e residências).

5.6. ESTIMATIVA DO CONSUMO ATUAL E DEMANDA FUTURA DE ÁGUA

Os cenários de uso e ocupação do solo e de verticalização da situação atual (ano de 2018) forneceram dados para geração de cenários espacializados de consumo de água, com e sem a utilização de mecanismos poupadores (CMP e SMP, respectivamente) em lotes residenciais. A partir dos dados espacializados de consumo de água estimado para 2018 nos bairros da área de estudo (Figuras 23 e 24), pode-se visualizar melhor que as áreas residenciais onde foi empregado o uso de mecanismos poupadores, passaram a integrar classes de mais baixo consumo.

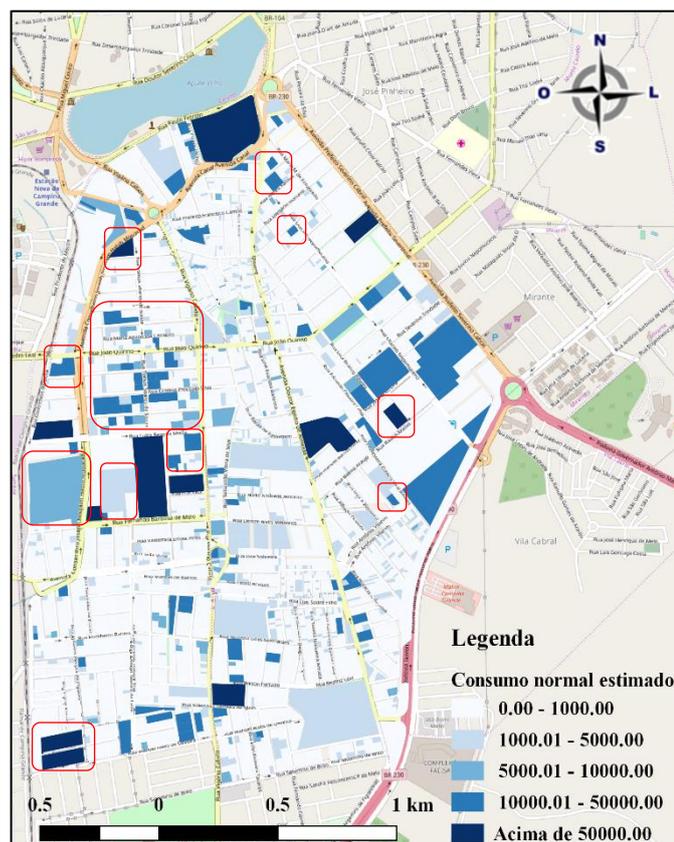


Figura 23 - Consumo normal estimado (l/dia) para os bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2018).
Fonte: Autor.

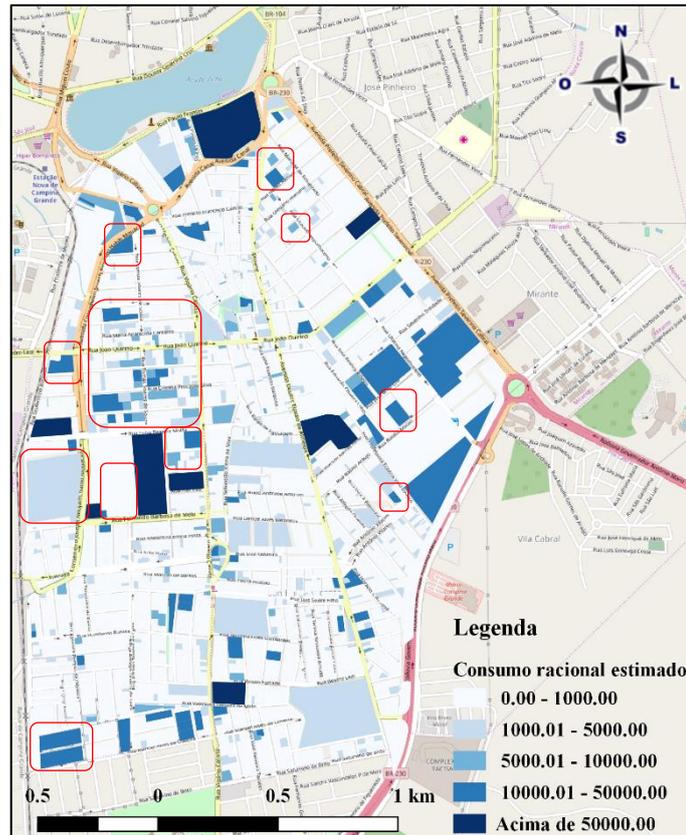


Figura 24 - Consumo racional estimado (l/dia) para os bairros Catolé e Sandra Cavalcante (2018).
Fonte: Autor.

Nos cenários futuros simulados, foi visto que os espaços antes não ocupados nos bairros em estudo passaram a ser ocupados com algum uso específico, edificados ou não. Outros lotes que anteriormente eram de residências de um pavimento deram espaço a edificações maiores para outros fins de uso. Essa tendência de crescimento horizontal e vertical apresentada pela área de estudo, se confirmou tanto na comparação temática direta e estatística entre os mapas dos anos de 2011 e 2018, bem como nas simulações de anos futuros.

Com o espaço urbano desses bairros sendo mais ocupado e apresentando uma tendência à verticalização, é de grande valia que se planeje como a infraestrutura urbana irão atender e suportar esse crescimento urbano, especialmente no que tange aos sistemas de distribuição de água, tendo em vista que esses sistemas estão diretamente associados a qualidade de vida das pessoas.

Nesse contexto, aliar o planejamento urbano à gestão de demanda de água é imprescindível para garantir a qualidade de vida da população, uma vez que os impactos sobre as águas urbanas estão atrelados ao forte adensamento urbano.

Devido a área de estudo estar localizada em Campina Grande, cidade que sofre com a seca enfrentada pelo Nordeste nos últimos anos e quase teve seu reservatório em colapso hídrico, tendo que passar por um período de racionamento, foi vista a necessidade de se observar a tendência do aumento da demanda de água em dois cenários: cenário de consumo racional e de consumo normal. Foi observado ainda em ambos os cenários quais seriam as diferenças entre essas demandas de água com e sem a utilização de mecanismos poupadores em edifícios residenciais, como: torneira (com arejador); chuveiro; bacia sanitária (de acionamento duplo); reuso de água (cinzas); e medidores individuais.

Segundo Barros et al. (2016), a utilização desses mecanismos poupadores em edifícios residenciais gera uma economia de 10,42% no consumo. Como pode ser visto nas Figuras 25 e 26 e nas Tabelas 9 e 10.

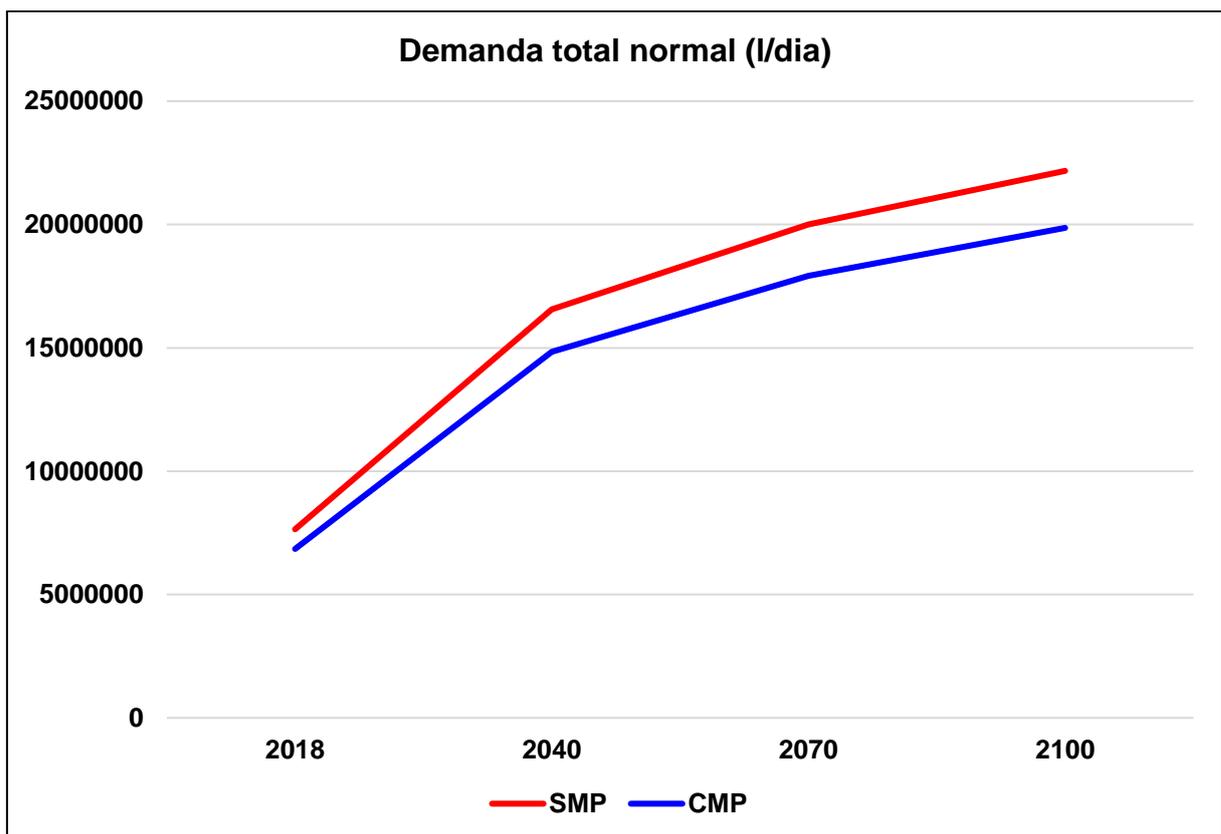


Figura 25 - Tendência de crescimento das demandas normais futuras de água.
Fonte: Autor.

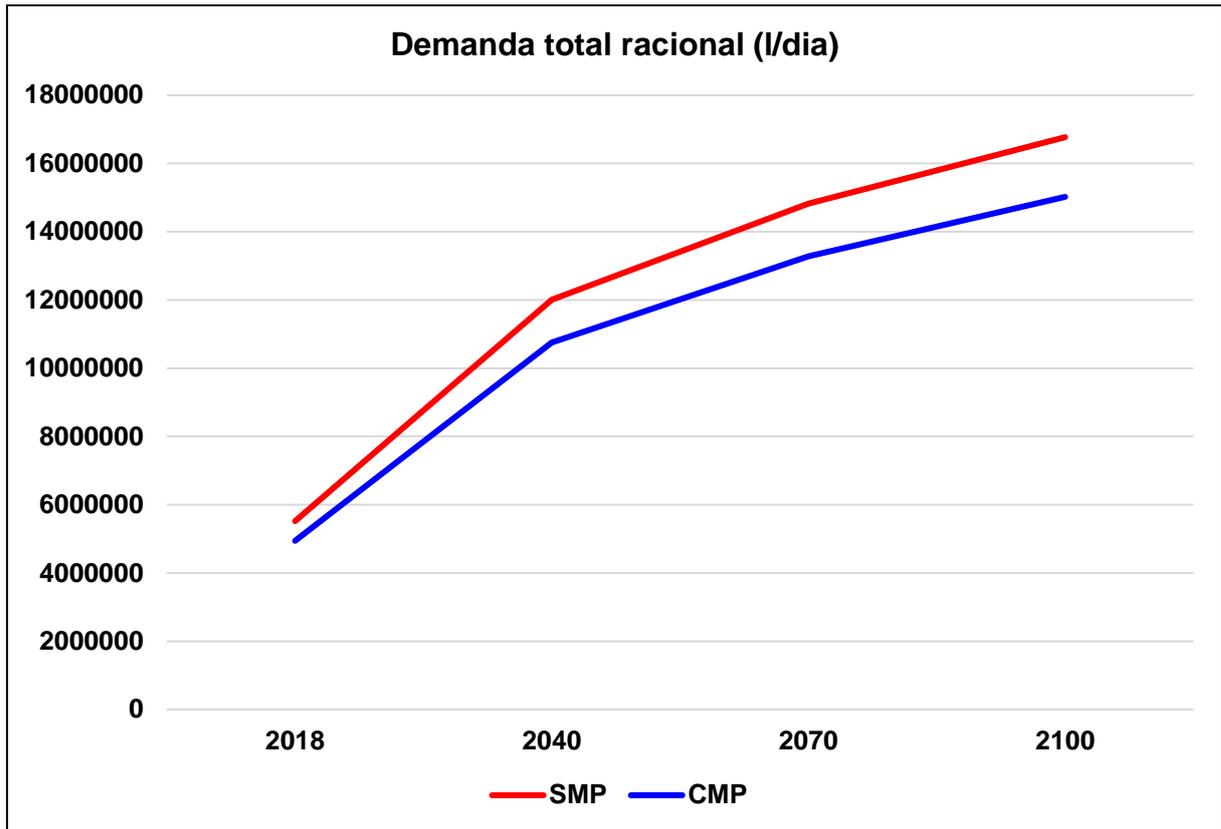


Figura 26 - Tendência de crescimento das demandas racionais futuras de água.
Fonte: Autor.

Tabela 9 - Demanda total normal (estimada).

Demanda total normal (l/dia)				
Anos	2018	2040	2070	2100
SMP	7.645.083,12	16.565.510,48	19.996.819,98	22.173.130,61
CMP	6.848.465,46	14.839.384,29	17.913.151,34	19.862.690,40
SMP - CMP	796.617,66	1.726.126,19	2.083.668,64	2.310.440,21

Fonte: Autor.

Tabela 10 - Demanda total racional (estimada).

Demanda total racional (l/dia)				
Anos	2018	2040	2070	2100
SMP	5.518.468,98	12.002.837,69	14.827.699,63	16.769.757,28
CMP	4.943.444,51	10.752.142,00	13.282.653,33	15.022.348,57
SMP - CMP	575.024,47	1.250.695,69	1.545.046,30	1.747.408,71

Fonte: Autor.

Diante dos cenários apresentados, onde percebe-se um aumento em torno de 300% na demanda de água entre os anos 2018 e 2100, surge a preocupação em torno do atendimento a estas crescentes demandas de água, pois, de acordo com Meneses (2011), a cada ano os problemas de atendimento no sistema de abastecimento de

Campina Grande vêm aumentando, haja vista o crescimento rápido das áreas abastecidas e, principalmente, porque o sistema de abastecimento não vem acompanhando o crescimento, tanto no aspecto da ampliação de suas unidades produtoras e distribuidoras como na melhoria dos processos operacionais e minimização de perdas.

5.7. VALIDAÇÃO DA ESTIMATIVA DO CONSUMO DE ÁGUA ATUAL

A validação dos dados de consumo de água foi uma etapa necessária no âmbito desta pesquisa, pois a partir dos dados obtidos pode-se avaliar quão eficiente, do ponto de vista prático, se encontra a metodologia aplicada.

Na Tabela 11 é possível visualizar os dados de consumo estimado e medido em l/dia para o mês de outubro de 2018, como também a diferença percentual entre eles. Apresentando os consumos sem e com a utilização de mecanismos poupadores.

Tabela 11 - Dados utilizados na validação da estimativa do consumo de água.

Cenários	Consumo estimado	Consumo medido	Diferença
SMP	7.645.083,12	8.454.900,00	10,59%
CMP	6.848.465,46	7.573.899,42	

Fonte: Autor.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 11, ocorreu uma diferença de 10,59% entre os valores de consumo de água estimado e medido. Esta diferença pode ser explicada devido a estimativa do consumo de uso normal para o ano de 2018 ter sido realizada com o dado de consumo *per capita* equivalente a 151,3 l/dia correspondente ao ano de 2013 e o dado de consumo normal medido disponibilizado pela concessionária ser referente ao consumo micromedido em 2018.

5.8. DIRETRIZES GERAIS

Tendo em vista a condição de uso e ocupação do solo nos bairros Catolé e Sandra Cavalcante, cuja expansão é de caráter misto, ou seja, expansão horizontal e vertical, algumas diretrizes (Quadro 2) de regulação de curto, médio e longo prazo foram propostas, visando melhor atender o abastecimento humano diante da

crescente demanda de água observada neste trabalho entre os anos 2018 e 2100, tendo como objetivo a resiliência das cidades.

Quadro 2 - Diretrizes gerais.

HORIZONTES		
Curto	Médio	Longo
<p>1.1 Regulamentar mapeamentos periódicos do uso do solo para diversas aplicações de gestão;</p> <hr/> <p>1.2 Iniciar estudos de tendência de ocupação, principalmente em bairros de grande densidade populacional;</p> <hr/> <p>1.3 Promover iniciativas (workshops, comissões) de aproximação dos diversos atores envolvidos na gestão do abastecimento humano e de gestão urbana;</p> <hr/> <p>1.4 Regulamentar o livre acesso aos dados micromedidos da concessionária;</p> <hr/> <p>1.5 Iniciar estudos sobre a utilização de mecanismos poupadores que poderiam se tornar obrigatórios em algum tipo de ocupação;</p> <hr/> <p>1.6 Ações/estudos de outras possibilidades de abastecimento (tratamento de águas residuárias; captação de água de chuva).</p>	<p>2.1 A partir das medidas já realizadas, estabelecer cenários de consumo a partir da metodologia proposta e dos dados de micromedição;</p> <hr/> <p>2.2 Revisão do Plano Diretor com base nas diretrizes anteriores, considerando o tipo de ocupação (adensamento x espraiamento);</p> <hr/> <p>2.3 Modificar o Código de Obras do município, de forma a obrigar e tentar viabilizar algum tipo de isenção fiscal.</p>	<p>3.1 Fiscalizar todas as medidas regulatórias, revisões e modificações tomadas e programadas em curto e médio prazo.</p>

Fonte: Autor.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um experimento de modelagem de dinâmica espacial baseado em autômatos celulares destinado a simular cenários futuros (2040, 2070 e 2100) de uso e ocupação do solo e de verticalização dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante da cidade de Campina Grande - PB, com o objetivo de produzir cenários prognósticos da demanda de água para os mesmos anos dos cenários simulados.

A modelagem dinâmica do uso e ocupação e da verticalização urbana dos bairros, espacializou as mudanças ocorridas nos períodos analisados em cenários futuros de forma semelhante aos padrões do passado, gerando os chamados mapas de tendências históricas.

Diante da problemática da expansão acelerada das cidades, estudos que realizem previsões do comportamento das mudanças de uso e ocupação do solo são indispensáveis para um adequado planejamento dos serviços de infraestrutura urbana. Aliado às previsões de mudanças de uso e ocupação do solo urbano, informações sobre a tendência de verticalização ou adensamento de uma área, são fatores importantíssimos em estudos dessa natureza.

Através dos mapas temáticos gerados pelo SIG foi possível identificar que a área de estudo possui um grande potencial para expansão, especialmente para verticalização. Fato que foi observado na quantidade de lotes que antes eram desocupados em 2011, que em 2018 já estavam sendo ocupados com empreendimentos verticais. Essa tendência também se confirmou nas simulações.

No tocante ao crescimento da demanda de água nos bairros da área de estudo, pode-se afirmar que os resultados obtidos apresentam, do ponto vista da capacidade de atendimento da demanda de água, indicadores preocupantes, já que diante dos cenários apresentados das demandas de água futuras se confirmou um aumento da demanda em torno de 300% entre os anos de 2018 e 2100. De acordo com especialistas da CAGEPA o sistema de distribuição de água de Campina Grande já trabalha no seu limite, visto que o projeto do sistema de abastecimento de água da cidade teve um alcance previsto para o ano de 2005.

Neste contexto, percebe-se a necessidade de se aliar o planejamento urbano com a gestão de demanda de água, para garantir uma melhor qualidade de vida à população. Verifica-se que a falta de um planejamento urbano sensível aos recursos

hídricos ou até mesmo sua inexistência nas cidades provoca inúmeros impactos nos serviços de infraestrutura, especialmente nos sistemas de distribuição de água. Visto isso, pode-se concluir que as estimativas de consumo de água são essenciais para ajudar a planejar, gerenciar, operar e modificar os sistemas de abastecimento de água.

Nesta perspectiva, o uso de cenários de evolução de uso e ocupação do solo e de verticalização são ferramentas potenciais para auxiliar os tomadores de decisões no desenvolvimento de planos que possibilitem a indicação de diretrizes mais adequadas ao meio urbano. Os modelos de simulação da dinâmica espacial associados aos sistemas de informações geográficas mostram-se extremamente úteis para os casos de identificação dos principais vetores de expansão urbana e de suas tendências de uso, permitindo ao poder público local ordenar e redirecionar (se for o caso) o crescimento urbano, conforme a capacidade de suporte e a disponibilidade presente e futura de infraestrutura e superestrutura.

Os prognósticos de expansão urbana fornecidos por modelagens espaço-temporais também se prestam a auxiliar gestores locais, a estabelecer metas para investimentos em infraestrutura capaz de suportar todas as demandas da população, entre elas, demandas de água. Através desse trabalho foi possível notar quão crescentes estão essas demandas de água para o futuro, já que quanto maior o contingente populacional urbano, maiores são as demandas.

A validação da estimativa do consumo de água no cenário atual apresentou resultados satisfatórios, com uma diferença entre o valor estimado, de acordo com a metodologia aplicada, e o valor medido pela CAGEPA da ordem de 9,79%, tendo em vista que essa diferença, possivelmente, se deve ao fato da companhia de água computar como volume consumido todas as perdas do sistema.

Por fim, tendo em vista o exposto neste trabalho, onde foi abordado a importância dos Sistemas de Informação Geográfica e dos modelos de simulação dinâmica, como ferramentas com grande potencial para o desenvolvimento de estudo sobre o meio urbano, são apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Utilizar outras metodologias de cálculo de estimativa de consumo para possibilitar comparações e análises;
- Identificar alterações no uso e ocupação do solo que expliquem os padrões de variação de consumo;

- Aplicar a metodologia desenvolvida em outras áreas da cidade com comportamento semelhante aos bairros Catolé e Sandra Cavalcante;
- Calcular o consumo *per capita* para o futuro através dos consumos estimados e projeções de população para o futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA. **Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba**. 2017. Disponível em: [https://olhonagua.insa.gov.br/#!/?id=12172&reservatorio=epitacio_pessoa_\(boqueira o\)](https://olhonagua.insa.gov.br/#!/?id=12172&reservatorio=epitacio_pessoa_(boqueira_o)). Acesso em: 10/12/2018.

ALMEIDA, C. M. GLERIANI, J. M., CASTEJON E. F., SOARES-FILHO, B. S. **Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics**. International Journal of Geographical Information Science, v. 22, n. 9, p. 943 - 963, set. 2008.

ALMEIDA, C. M. **Modelagem Da Dinâmica Espacial Como Uma Ferramenta Auxiliar Ao Planejamento: Simulação De Mudanças De Uso Da Terra Em Áreas Urbanas Para As Cidades De Bauru E Piracicaba (SP), Brasil**. Tese de Doutorado. São José dos Campos - SP: Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.

ALMEIDA, C. M.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Geoinformação em Urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São Paulo - SP: Oficina de Textos, 2007.

ANA. **Agência Nacional de Águas**. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília - DF, 2013.

ANDRADE, M. P. DE.; RIBEIRO, C. B. M.; LIMA, R. N. **Modelagem dinâmica da mudança do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul a partir de imagens modis e um modelo de sub-regiões**. Revista Brasileira de Cartografia, n. 68/5, p. 965 - 978, 2016.

ARAÚJO, E. L.; RUFINO, I. A. A. **Estimativa do crescimento da demanda de água baseada em dados de uso e ocupação do solo urbano**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió - AL, 2011.

ARAÚJO, E. L. **Estimativa e análise do crescimento da demanda de água considerando cenários de uso e ocupação do solo**. Dissertação de Mestrado. Campina Grande - PB. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2012.

BARROS, M. B.; RUFINO, I. A. A.; MIRANDA, L. I. B. **Mecanismos poupadores de água como suporte ao planejamento urbano**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, p. 251 - 262, 2016.

BATISTA, M. E. M. **Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão para a Gestão Urbana Baseado em Indicadores Ambientais**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.

BATTY, M.; COUCLELIS, H.; EICHEN, M. **Urban systems as cellular automata**. Environment and Planning B, London, v. 24, n.2, p. 159 - 164, Mar. 1997.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. 1ª ed. Ontário - CAN: Pergamon, 1994. 398 p.

BURROUGH, P. **Dynamic modelling and geocomputation**. In: LONGLEY, P.; BATTY, M.; MCDONNELL, R. A. (Ed.) Geocomputation: a primer. London: John Wiley & Sons, 1998. Cap. 9, p. 165 - 192.

CAGEPA - **Companhia de Água e Esgotos da Paraíba**. Relatório de Informações Cadastrais. Campina Grande, 2018.

CAIXETA, P. R. C. **Modelagem Espacial Da Dinâmica Da Mancha Urbana De Viçosa - Mg**. Dissertação de Mestrado. Viçosa - MG: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, 2014.

CÂMARA, A. S. **Spatial simulation modelling**. In: Fisher, M. Spatial analytical perspectives on GIS. London: Taylor & Francis, 1996. p. 213 - 218.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A M.V.; CARVALHO, M. S.; DRUCK, S. **Análise Espacial de dados Geográficos**. 3ª edição (online), 2003.

CAMBOIM, I. L. M.; BONATES, M. F. **As dinâmicas do processo de verticalização: a reinvenção da paisagem urbana de Campina Grande - PB.** In: VII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

CARNEIRO, L., SOLANGE, S., LEDER, M., DE, F., GONÇALVES, A., SILVA, D., & ROBERTO DE OLIVEIRA ROSA, P. **Expansão urbana e variações mesoclimáticas em João Pessoa, PB.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 125 -138, 2011.

CASARIL, C. C.; FRESCA, T. M. **Verticalização urbana brasileira: histórico, pesquisadores e abordagens.** Revista Faz Ciência. Campus Francisco Beltrão, v. 49, n. 10, p. 169 - 190, 2007.

CORDÃO, M. J. de S. **Modelagem e otimização da disposição espacial de unidades de reservação em redes de distribuição de água utilizando geotecnologias.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009.

DELANEZE, M. E. **Modelagem dinâmica espacial aplicada na avaliação das mudanças da cobertura da terra no entorno de dutos utilizando autômatos celulares - estudo de caso duto orbel.** Dissertação de Mestrado. Rio Claro - SP: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2011.

DIAS, L. T.; WALDE, D. H. G. **Modelagem da dinâmica espacial do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá - DF.** Revista Brasileira de Cartografia, v. 65, n. 1, p. 77 - 94, 2013.

DOMENECH, L.; SAURÍ, D. **A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona: social experience, drinking water savings and economic costs.** J. Cleaner Prod., v. 19, n. 6 - 7, p. 598 - 608, 2011.

FERRARI, F. B.; LAPOLLI, E. M. **Uma proposta de avaliação da expansão urbana na ilha de Santa Catarina utilizando técnicas de sensoriamento remoto**. In: Anais IX Simposio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial - SELPER, 2000.

FIGUERES, C. **Urban water management in the Middle East and Central Asia**. In: Proceedings of the 12th World Water Congress of IWRA, New Delhi - India, 2005.

FRANÇA, I. S. **O processo de verticalização urbana em cidades médias e a produção do espaço em Montes Claros/MG**. Boletim Gaúcho e Geografia, Porto Alegre, v. 42, n. 2, p. 584 - 610, maio 2015.

GALVAO, C. O.; RÊGO, J. C.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. D. T. **Sustainability characterization and modelling of water supply management practices**. Regional Management of Water Resources, n. 268, p. 81 - 88, 2001.

GODOY, M. & SOARES FILHO, B.S. **Modelling intra-urban dynamics in the Savassi neighborhood, Belo Horizonte city, Brazil**. In: Paegelow, M. & Camacho, M.T.O. Modelling Environmental Dynamics - advances in geomatic solutions. Springer: Verlag Berlin Heidelberg, p. 319 - 337, 2008.

GONÇALVES, D. A.; SOUSA JUNIOR, W. C.; ALMEIDA, C. M. **Modelagem de alteração de uso e cobertura da terra em uma porção do município de mineiros-go utilizando o método de pesos de evidência**. Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, p. 13, 2007.

GONÇALVES, R. M.; CENTENO, T. M.; CANDEIAS, A. L. B. **Cellular Automata Applied to Tendency Models in Multi-Temporal Images**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 63, n. 02, p. 233 - 241, 2011.

GONG, W. et al. **Analysis and simulation of land use spatial pattern in Harbin prefecture based on trajectories and cellular automata-markov modelling**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 34, n. 1, p. 207 - 216, 2015.

GRANT, Gary. **The Water Sensitive City**. Oxford, UK: John Wiley & Sons, 2016.

GUEDES, M.J.F., RIBEIRO, M.M.R., VIEIRA, Z.M.C.L. **Alternativas de Gerenciamento da Demanda de Água na Escala de uma Cidade**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 3, p. 51 - 62, 2014.

HAGEN, A. **Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps**. International Journal of Geographical Information Science, v. 17, n. 3, p. 235 - 249, 2003.

HERRERA, M.; TORGO, L.; IZQUIERDO, J.; PÉREZ-GÁRCIA, R. **Predictive models for forecasting hourly urban water demand**. Journal of Hydrology, v. 387. p. 141 - 150. 2010.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 28/11/2017.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2011. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/registrocivil/2011/default.shtm>. Acesso em: 28/11/2017.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 28/11/2017.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/informacoes-por-cidade-e-estado.html?t=destaques&c=2504009>. Acesso em: 28/11/2018.

JAT, M. K.; CHOUDHARY, M.; SAXENA, A. **Urban Growth Assessment and Prediction Using RS, GIS and SLEUTH Model for a Heterogeneous Urban Fringe**. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, v. 20, n. 2, p. 223 - 241, 2017.

JOHANSSON, A., M. BATTY, K. HAYASHI, O. AL BAR, D. MARCOZZI, AND Z. MEMISH. **Crowd and environmental management during mass gatherings**. The Lancet Infectious Diseases, v. 12, n. 2, p.150 - 156, 2012.

KAWASHIMA, R. S.; GIANNOTTI, M. A.; ALMEIDA, C. M. DE.; QUINTANILHA, J. A. **Modelagem Dinâmica Espacial como ferramenta para simulação de cenários da paisagem na região portuária da Baixada Santista**. São José dos Campo/SP: INPE, 2016.

LAPA, T. A. **Verticalização urbana e especulação imobiliária face aos paradigmas da cidade compacta e da cidade espalhada**. 2013. 5 p.

LIBÂNIO, P. A. C. **Avaliação quantitativa do modelo de gestão da Política Nacional de Recursos Hídricos: interfaces com o sistema ambiental e com o setor de saneamento**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

LINS, G. M de L. **Análise de variáveis determinantes no consumo urbano de água de uso doméstico na cidade de Campina Grande - PB**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2011.

MAEDA, E. E., ALMEIDA, C. M.; XIMENES, A. C.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; PELLIKKA, P. **Dynamic modeling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 13, n. 3, p. 435 - 446, 2011.

MALLESON, N. AND M. BIRKIN. **Towards victim-oriented crime modelling in a social science e-infrastructure**. Philosophical Transactions of the Royal Society: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 369, n. 1949, p. 3353 - 3371, 2011.

MARINHO, S. D. A. M. **Planejamento urbano sensível aos recursos hídricos: análise a partir do metabolismo urbano e da produção do espaço em Campina Grande - PB**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

MARKUN, P. **Verticalização**. [S.l.: s.n], 2014.

MARTINS, C. M. T.; MENDES, M. G. T.; ABREU, J. M.; ALMEIDA, J. P. L. DE; LIMA, J. P. de; LIMA, I. P. de. **Hidrologia urbana (Conceitos básicos)**. 2010. 1 p.

MAS, J. F. **Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques**. Remote Sensing, v. 20, n. 1, p. 139 - 152, 1999.

MAS, J. F., KOLB, M.; HOUET, T.; PAEGELOW, M.; OLMEDO, M. T. C. **Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages**. Environmental Modelling and Software, v. 51, p. 94 - 111, 2014.

MASSABKI, J. A. R.; PEIXOTO, A. S. P.; KAISER, I. M.; MANZATO, G. G. **Modelagem dos padrões da expansão urbana da Região Metropolitana de São Paulo baseada em Autômatos Celulares**. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 9, n. 1, p. 361 - 371, 2017.

MATOS, J. C. C. T. **Proposição de método para a definição de cotas per capita mínimas de água para consumo humano**. Brasília: UnB, 2007. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2007.

MATTHEWS, R.; N. GILBERT, A. ROACH, J. POLHILL, AND N. GOTTS. **Agent-based land-use models: a review of applications**. Landscape Ecology, v. 22, n. 10, p. 1447 - 1459, 2007.

MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. 1ª ed. Brasília - DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2007.

MENESES, R. A. **Diagnóstico operacional de sistemas de abastecimento de água: o caso de Campina Grande**. Dissertação de Mestrado. Campina Grande - PB: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

MEYER, W. B.; TURNER II, B. L. **Land-use/land-cover change: challenges for geographers**. GeoJournal - Spatially Integrated Social Sciences and Humanities, v. 1996, n. 1990, p. 237 - 240, 1996.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília/DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 425 p.

MONTEIRO, K. C. R.; OLIVEIRA, R. P. S. **Reflexões sobre as consequências da verticalização para o clima urbano na cidade de Vitória da Conquista - BA, Brasil**. In: Encontro de Geógrafos da América Latina, Peru, 2013.

MORAIS, L. S.; SILVA, P. C. M.; MEDEIROS, W. D. A. **Análise do processo de verticalização na área urbana do município de Mossoró - RN: aspectos jurídicos e ambientais**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Mossoró, v. 2, n. 2, p. 171 - 182, 2007.

NASCIMENTO, N. O.; HELLER, L. **Ciência, Tecnologia e Inovação na Interface entre as Áreas de Recursos Hídricos e Saneamento**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 10, p. 36-48, Belo Horizonte, 2005.

NOVAES, M. R. DE et al. **Cenários prognósticos baseados em modelagem dinâmica espacial para o manejo da colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo**. In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, p. 407 - 414, 2011.

NUCCI, J. C. **Análise sistêmica do ambiente urbano, adensamento e qualidade ambiental**. Ciências Biológicas e do Ambiente, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 73 - 88, 1999.

ODAN, F. K. **Previsão de demanda para sistemas de abastecimento de água.** Dissertação de mestrado. São Carlos, 2010. 54p.

OLIVEIRA, M. A. DE. **Modelagem Dinâmica Espacial das classes de uso e cobertura da terra de Venâncio Aires/RS.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental, Centro Universitário UNIVATES. Lajeado/RS, 2015.

PEDROSA, B. M.; CAMARA, G. **Modelagem Dinâmica e Sistemas de Informações Geográficas.** In: Meirelles, M. S. P.; Camara, G.; Almeida, C. M. Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais. Brasília - DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 235 - 280, 2007.

PISANI, R. J.; DEMARCHI, J. C.; RIEDEL, P. S. **Simulação de cenário prospectivo de mudança no uso e cobertura da terra na sub-bacia do rio Capivara, Botucatu - SP, por meio de Modelagem Espacial Dinâmica.** Revista Cerrados. Montes Claros, v. 14, n.2, p. 03 - 29, jul/dez - 2016.

PNAD. **Pesquisa Nacional por Amostras de Domicílios.** 2015. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2015/default.shtm>. Acesso em: 05/01/2018.

RAIS. **Relação Anual de Informações Sociais.** 2017. Disponível em: <https://ces.ibge.gov.br>. Acesso em: 20/09/2018.

RÊGO, J. C. et al. **Atribuições e responsabilidades na gestão dos recursos hídricos - O caso do açude Epitácio Pessoa/ Boqueirão no Cariri Paraibano.** In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1 - 8, 2013.

RÊGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T.; RIBEIRO, M. M. R. **Uma análise da crise de 1998-2000 no abastecimento de água de Campina Grande.** In: Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal: ABRH, 2000.

RÊGO, J. C.; GALVÃO, C. O.; ALBUQUERQUE, J. P. T. **Considerações sobre a gestão dos recursos hídricos do açude Epitácio Pessoa- Boqueirão na bacia hidrográfica do rio Paraíba em cenário de vindouros anos secos.** In: Anais XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. João Pessoa: ABRH, 2012.

RODRIGUES, H. O.; SOARES FILHO, B. S.; COSTA, W. L. S. **DINAMICA EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais.** In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis - SC, p. 3089 - 3096, 2007.

ROSA, R. **Análise Espacial em Geografia.** Revista da ANPEGE, v.7, n.1, número especial, p. 275 - 289, out. 2011.

ROSA, T. O.; LUZ, H. S. **Conceitos Básicos de Algoritmos Genéticos: Teoria e Prática.** In: Anais do XI Encontro de Estudantes de Informática do Tocantins. Palmas: Centro Universitário Luterano de Palmas, p. 27 - 37, 2009.

ROSSETTI, L. A. F. G.; ALMEIDA, C. M.; PINTO, S. A. F. **Análise de mudanças no uso do solo urbano e rural com a aplicação de modelagem dinâmica espacial.** In: Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, p. 6316 - 6323, 2013.

ROSSETTI, L. A. F. G.; ALMEIDA, C. M.; PINTO, S. A. F. **Modelagem dinâmica espacial de mudanças no uso da terra da cidade de Rio Claro, SP.** In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Curitiba - PR, p. 6703 – 6710, 2011.

ROY, G. G.; SNICKARS, F. **Citylife: a study of cellular automata in urban dynamics.** In: Fisher, M. Spatial analytical perspectives on GIS. London - UK: Taylor & Francis, p. 213 - 218, 1996.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **NTS 181: Dimensionamento do ramal predial de água, cavalete e hidrômetro - Primeira ligação.** Norma Técnica. São Paulo - SP: Diretoria de Tecnologia, Empreendimentos e Meio Ambiente, 2012.

SAKIEH, Y.; AMIRI, B. J.; DANEKAR, A.; FEGHHI, J.; DEZHKAM, S. **Simulating urban expansion and scenario prediction using a cellular automata urban growth model, SLEUTH, through a case study of Karaj City, Iran.** Journal of Housing and the Built Environment, v. 30, n. 4, p. 591 - 611, 2015.

SANTOS, K. A. DOS. **Análise multitemporal integrada da permeabilidade do solo nos bairros do Catolé e Sandra Cavalcante em Campina Grande - PB.** Dissertação de Mestrado. Campina Grande: UFCG, 2015.

SANTOS, L. A. et al. **Impactos socioambientais resultados do processo de verticalização.** In: IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Porto Alegre, nov. 2015. 7p.

SHARMA, A.; GRAY, S.; DIAPER, C.; LISTON, P.; HOWE, C. **Assessing integrated Water Management Options for Urban Developments - Canberra Case Study.** Urban Water J., v. 5, n. 2, p. 147 - 159, 2008.

SHARMA, S. K.; VAIRAVAMOORTHY, K. **Urban water demand management: prospects and challenges for the developing countries.** Water and Environmental Journal, n. 23. p. 210 – 218, 2009.

SILVA, I. G. **Modelagem dinâmica de ambientes urbanos usando autômatos celulares: ocupação urbana e verticalização dos bairros Catolé e Sandra Cavalcante em Campina Grande/PB.** Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

SILVA, R. M. **Introdução ao Geoprocessamento: conceitos, técnicas e aplicações.** Novo Hamburgo/RS: Feevale, 2007.

SILVEIRA, F. A.; SILVEIRA, J. A. R. **Qualidade do espaço residencial: efeitos da verticalização no bairro de Tambaú, na cidade de João Pessoa (PB).** URBE. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 6, n. 10, p. 289 - 305, set./dez. 2014.

SIMPSON, R. **Introduction: A Green Economy for Green Cities**. In: Local Sustainability, v. 3, p. 13 - 16, 2013.

SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. 2013. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em: 15/09/2018.

SOARES FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L.; VOLL, E. **Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular**. Centro de Sensoriamento Remoto. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007. 5p.

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. **DINAMICA - A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier**. Ecological Modelling, v. 154, n. 3, p. 217 - 235, 2002.

SOARES-FILHO, B. S.; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G. C.; DIAZ, M. D. C. V.; RIVERO, S.; SOLÓRZANO, L.; VOLL, E. **Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém - Cuiabá corridor**. Global Change Biology, v. 10, n. 5, p. 745 - 764, 2004.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. **Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinâmica EGO**. Belo Horizonte - MG: Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H.; FOLLADOR, M. **A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models**. Environmental Modelling and Software, v. 43, p. 80 - 87, 2013.

SOMEKH, N. **A cidade vertical e o urbanismo modernizador**. São Paulo: Nobel, EDUSP, FAPESP, 1997, 173 p.

SOUZA, M. L. **Mudar a cidade: Uma introdução crítica ao planejamento e à gestão urbana**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 2009.

SUAREZ, A. F.; SOARES-FILHO, B. S. **Estudo da mudança de uso e cobertura do solo na bacia do Rio Formiga - MG**. Revista brasileira de cartografia, v. 65, n. 3, p. 417 - 429, 2013.

TEIXEIRA, A. M. G., SOARES FILHO, B. S., FREITAS, S., METZGER, J.P. **Modeling landscape dynamics in an Atlantic Rainforest region: Implications for conservation**. Forest Ecology and Management, v. 257, n. 4.p. 1219 - 1230, 2009.

TIBÚRCIO, E. C. **Desenvolvimento de uma interface em SIG para suporte ao dimensionamento hidráulico de sistemas de abastecimento de água**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006. 72 p.

TRENTIN, G. **A expansão urbano-industrial do Município de Americana - SP**. Dissertação de Mestrado. Rio Claro - SP: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2008.

TRENTIN, G.; FREITAS, M. I. C. **Modelagem dinâmica espacial urbana: modelo de autômato celular simulação de cenários para o município de Americana - SP**. Revista brasileira de cartografia, v. 62, n. 1, p. 291 - 305, 2010.

TSUTYIA, M. T. **Abastecimento de água**. 3ª ed. São Paulo - SP: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

TUCCI, C. E. M. **Água no meio urbano. Água Doce**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas. Estudos Avançados**. USP. Impresso. v. 22, p. 97 - 112, 2008.

VICENTE, R.V. **Modelo de Operação para centros de controle de abastecimento de água. Estudo de caso: sistema adutor metropolitano de São Paulo.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.139 p.

XIMENES, A. C.; ALMEIDA, C. M.; AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; AGUIAR, A. P. D. **Modelagem dinâmica do desmatamento na Amazônia.** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 14, n. 3, p. 370 - 391, 2008.

WEIMAR, J. R. **Simulation with cellular automata.** Berlin: Logos Verlag Berlin, 1998, 208 p.

WONG, T. H. F. **An Overview of Water Sensitive Urban Design Practices in Australia.** Water Practice & Technology, v. 1, n. 1, 2006.

Wong, T. H. F., & Brown, R. R. **The water sensitive city: principles for practice.** Water Science and Technology, v. 60, n. 3, p. 673 - 682, 2009.

WYATT, A. J. **Water Sensitive Urban Design.** In: Proceedings from the 21st Tennessee Water Resources Symposium, 2011.

ZHANG, Y.; DEGROOTE, J.; WOLTER, C.; SUGUMARAN, R. **Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk.** Land degradation and development, 2009.

APÊNDICES

Apêndice 1 - Planilha de coleta de dados de campo

ID	USO DO SOLO					Situação atual	Nº de pavimentos	Nº de unidades/pavimento	Nº da quadra	Nº do lote
	Residencial	Comercial	Serviço	Industrial	Sem uso					
3730										
3706										
3687										
3669										
3673										
3682										
3686										
3692										
3695										
3700										

Apêndice 2 - Perguntas realizadas em campo

As perguntas realizadas em campo foram dúvidas específicas que foram agregadas à análise dos lotes da área de estudo.

Qual o número de pavimentos?
Qual o número de unidades por pavimento?
De qual tipo de uso do solo se tratava*?

* Em alguns casos o uso era identificado, mas o uso específico não era. Por exemplo: era identificado que o uso do lote era serviço, mas às vezes não se tinha nada identificando se era um consultório ou uma clínica de estética. Então essa pergunta era necessária para a análise.

Apêndice 3 - Tabulação dos dados coletados em campo

LOTE ID	USO_SOLO	TIPO	USO_CODIGO	Nº_PAV	Nº_UN/PAV	TOTAL_DE_APARTAMENTOS	SITUAÇÃO
3177	residencial	casa	1	1			existente
3182	residencial	casa	1	1			existente
3193	residencial	casa	1	2			existente
3220	residencial	casa	1	1			existente
3229	residencial	casa	1	1			existente
3235	misto	Posto de Gasolina Catolé/Conveniência/Martins E Porto Construções/MOZART Construtora/Conservação de móveis H&F/JN Contabilidade/Acerte Imóveis/Martins & Andrade Advogados	3	1			existente
3250	residencial	casa	1	1			existente
3252	residencial	casa	1	1			existente
3261	residencial	casa	1	1			existente
3264	residencial	casa	1	1			existente
3269	residencial	casa	1	2			existente
3274	serviço	Colégio Santa Tereza	4	2			existente
3282	residencial	casa	1	1			existente
3287	residencial	casa	1	1			existente
3288	residencial	casa	1	2			existente
3296	residencial	casa	1	1			existente