

Modelagem de estrutura de gestão para efeito dos gases do efeito estufa e seus impactos no ciclo hidrológico das cidades

Modeling of management structure for the greenhouse gas effects and their impacts on the hydrological cycle in cities

Modelización de la estructura de gestión de los efectos de los gases de efecto invernadero y sus impactos en el ciclo hidrológico en las ciudades

Sidnei Pereira da Silva

Pós-doutorado, UFSCar, Brasil.
sidneips@ufscar.br

Frederico Yuri Hanai

Professor Doutor, UFSCar, Brasil.
fredyuri@ufscar.br

RESUMO

A complexidade das cidades e os desafios do planejamento e gestão sustentáveis exigem tratamento dos processos sob ótica sistêmica que, neste estudo, foram trabalhados usando conceito de metabolismo urbano e modelagem de dinâmica de sistemas. Assim, investigou-se e se propôs um modelo para avaliação dos efeitos dos Gases de Efeito Estufa (GEE) nas mudanças climáticas e de seus impactos no ciclo hidrológico em bacia hidrográfica, abordando questões econômicas, sociais e ambientais. O modelo estruturado viabiliza a visualização do efeito cascata dos processos, possibilitando observar quais são as respostas necessárias, a fim de avançar e contribuir ao entendimento de seus efeitos, de maneira sistêmica, flexível e transparente. A possibilidade de criar diferentes cenários por meio do modelo dinâmico viabiliza simulações do presente e do futuro que poderão ser testadas para facilitar intervenções físicas e ações estratégicas, auxiliando nos processos de tomada de decisão e na formulação de políticas públicas em cidades.

PALAVRAS-CHAVE: Metabolismo urbano; dinâmica de sistemas; mudanças climáticas; recursos hídricos.

SUMMARY

The complexity of cities and the challenges of sustainable planning and management require treatment of processes from a systemic perspective, which, in this study, were worked using the concept of urban metabolism and modeling of system dynamics. Thus, a model was investigated and proposed to evaluate the effects of Greenhouse Gases (GHG) on climate change and their impacts on the hydrological cycle in a hydrographic basin, addressing economic, social and environmental issues. The structured model makes it possible to visualize the cascade effect of the processes, making it possible to observe the necessary responses, in order to advance and contribute to the understanding of their effects, in a systemic, flexible and transparent way. The possibility of creating different scenarios through the dynamic model enables simulations of the present and the future that can be tested to facilitate physical interventions and strategic actions, helping in decision-making processes and in the formulation of public policies in cities.

KEYWORDS: Urban metabolism; system dynamics; climate change; water resources.

RESUMEN

La complejidad de las ciudades y los retos de la planificación y gestión sostenible requieren un tratamiento de los procesos desde una perspectiva sistémica que, en este estudio, se trabajaron utilizando el concepto de metabolismo urbano y modelado de dinámicas de sistemas. Así, se investigó y propuso un modelo para evaluar los efectos de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el cambio climático y sus impactos en el ciclo hidrológico de una cuenca, abordando aspectos económicos, sociales y ambientales. El modelo estructurado permite visualizar el efecto cascada de los procesos, possibilitando observar cuáles son las respuestas necesarias para avanzar y contribuir a la comprensión de sus efectos, de forma sistémica, flexible y transparente. La posibilidad de crear diferentes escenarios a través del modelo dinámico posibilita simulaciones del presente y del futuro que pueden ser ensayadas para facilitar intervenciones físicas y acciones estratégicas, auxiliando en los procesos de toma de decisiones y en la formulación de políticas públicas en las ciudades.

PALABRAS CLAVE: metabolismo urbano; dinámica de sistemas; cambios climáticos; recursos hídricos.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento e gestão do espaço urbano atual é dominado pelo pensamento cartesiano, linear e mecanicista, com sua estratégia de atuação fragmentada, principalmente observado nos processos de elaboração de políticas e na falta de comunicação entre os agentes públicos. Esse tipo de pensamento é contrário à realidade do fenômeno urbano, que é complexo e não linear (SANTOS e TONIOLO, 2010; PEREIRA, 2013). Na tentativa de mudança desse paradigma, surge o pensamento sistêmico, partindo do pressuposto de que a realidade não pode ser analisada de maneira fragmentada, mas deve ser tratada em suas completude, na busca de entender e explicar os fenômenos complexos de maneira sinérgica.

Dentro desse pensamento sistêmico, surge o conceito de metabolismo urbano como uma concepção de abordagem (ou modelagem) que visa facilitar a descrição e a análise dos fluxos de materiais e energia em cidades. Não se trata de um conceito novo, as primeiras ideias de que as atividades humanas alteram os processos biofísicos, por meio da análise das relações dinâmicas internas entre os seres humanos e a natureza foram de Karl Marx e Friedrich Engels no século XIX (PINCETL, BUNJE e HOLMES, 2012; FOSTER e CLARK, 2016). Mais tarde, em reação à industrialização e ao uso de combustíveis fósseis como o carvão, Sir Patrick Geddes, biólogo escocês, empreendeu uma crítica ecológica da urbanização em 1885, fazendo dele o primeiro cientista a tentar uma descrição empírica do metabolismo urbano (e social) em escala macroeconômica, por meio de estudos experimentais de urbanização, estabelecendo um orçamento físico para energia urbana e produção de material (MACDONALD e PETERSON, 2007).

Apenas em 1965 o termo metabolismo urbano foi utilizado por Abel Wolman em seu trabalho "*Metabolism of the Cities*" no qual, por meio de uma cidade hipotética com 1 milhão de habitantes, desenvolveu um modelo que lhe permitiu determinar as taxas de entrada de recursos e saída de resíduos (KENNEDY *et al.*, 2007). Este estudo ajudou a demonstrar que existem limitações físicas aos recursos naturais que usamos no dia a dia e com o seu uso frequente, a compilação de resíduos pode e criará problemas ao meio ambiente. Aliás, Kennedy *et al.* (2007) definiram o metabolismo urbano como "a soma total do processo técnico e socioeconômico que ocorre nas cidades, resultando em crescimento, produção de energia e eliminação de resíduos".

Muitos pesquisadores de metabolismo urbano utilizam o modelo sistêmico-dinâmico como base de uma estrutura contábil (FERRÃO e FERNANDEZ, 2013), mas também é possível criar modelos sistêmico-dinâmicos relacionando os processos dentro do metabolismo urbano. Utilizando a ferramenta adequada para dinâmica de sistemas é possível apresentar processos dentro de um metabolismo. Esses modelos podem ser utilizados para simular cenários futuros do metabolismo urbano como resultado de intervenções físicas e decisões políticas, auxiliando na tomada de decisão de ações em relação ao espaço urbano.

Uma das aplicações úteis das métricas do metabolismo urbano é sua capacidade de quantificar as emissões de gases do efeito estufa (GEE) (KENNEDY *et al.*, 2010). As emissões reais de dióxido de carbono, metano e outros GEE que são emitidos diretamente de uma cidade são componentes legítimos do metabolismo urbano em si mesmos e são uma das principais causas de mudanças climáticas. Dentre os impactos causados pelas mudanças climáticas, como consequência de emissões de GEE, incluem o aumento da escassez de água e do risco de inundações, associado ao declínio na qualidade da água.

De uma perspectiva sistêmica, usando o conceito de metabolismo urbano e a abordagem de sistemas dinâmicos, o objetivo deste trabalho foi investigar e propor a modelagem de uma estrutura de gestão para avaliação dos efeitos dos GEE e seus impactos no ciclo hidrológico, considerando as consequências causadas pelas variações hídricas extremas devido às mudanças climáticas.

1.2 Metabolismo urbano e o pensamento sistêmico

O planejamento urbano cartesiano é pautado pela funcionalidade e organização do espaço urbano racionalmente planejado gerando segregação espacial e desdobramentos político e socioespacial, tensões pela diferenciação social a partir da intervenção pública com objetivo de gerar um padrão de normalidade (VIZINI, 2017). Já o planejamento urbano sistêmico, para Morin (2005), atua no campo da diversidade, sob a ótica da visão sistêmica, e a dinâmica urbana percebe todas as conexões e inter-relações políticas, sociais, econômicas, culturais e tecnológicas envolvidas. Para Barcellos e Barcellos (2004), a complexidade e multiplicidade das conexões possui caráter complexo o que torna necessário identificar a causa do problema, o que abre campo para a modelagem com emprego de simulações computacionais. Sem essa visão do todo e a capacidade de gerar cenários futuros, muitas vezes as soluções executadas no curto prazo e sem levar em conta a complexidade de fatores envolvidos pode provocar o surgimento de novos problemas.

Ainda sobre as diferenças entre a abordagem cartesiana e sistêmica, alguns trabalhos abordam diferentes aspectos dos problemas urbanos: riscos de inundação (WINSEMIUS *et al.*, 2016; ARNELL e GOSLING, 2016); gerenciamento de sistemas de água (QIAN *et al.*, 2020; XU *et al.*, 2019); impacto epidemiológico das inundações (ASHBOLT, 2018; VINET, 2017); mortalidade relacionada inundações (JONKMAN, 2005, ALDERMAN, *et al.*, 2012); ou qualidade da água (BEACH *et al.*, 2016; ALSAN e GOLDIN., 2019). Os riscos ambientais e a vulnerabilidade são frequentemente quantificados usando abordagens empíricas e estatísticas (BECCARI, 2016 e FUCHS *et al.*, 2007) em vez de modelos físicos (KUSAKA *et al.*, 2012, MASSON *et al.*, 2013). A maioria deles, no entanto, não se baseia em uma abordagem interdisciplinar (sistêmica) que explique os processos sociais, econômicos e físicos que interagem juntos na escala da cidade. Em vez disso, eles geralmente são limitados a um ou alguns campos científicos intimamente relacionados. As distinções das características da visão cartesiana e da visão sistêmica estão apresentadas resumidamente no Quadro 1.

Quadro 1 – Características da Visão Sistêmica e da Visão Cartesiana

	Visão Sistêmica	Visão Cartesiana
Visão	Holística	Fragmentada
Interligação	Eventos estão interligados	Eventos analisados isoladamente
Percepção	A estrutura influencia o comportamento	Reação a eventos
Pensamento	Circular	Linear
Complexidade	Dinâmica	Foco nos detalhes
Atuação	Nas causas e pontos de alavancagem	Nos Efeitos
Foco	Percepção da dinâmica resistente do sistema	Resultado
Relação	Se perceber como agente causador dos próprios problemas	Procurar culpados

Fonte: adaptado de GRATULIANO (2012).

Baseada na Teoria Geral dos Sistemas, elaborada por Bertalanffy em trabalhos publicados entre 1950 e 1968, o metabolismo urbano foi influenciado por esta teoria até os anos 1970 (SILVA, 2004) e, segundo Bertalanffy (1992), depois de ter seu auge na década de 1970, foi esquecido nos anos de 1980, por acreditar-se que as pesquisas de “mercado” criavam por si só um modelo completo e eficaz de gestão sob o aspecto econômico. Entretanto, esse processo, além de não conseguir dar respostas integrais à dinâmica do mercado, também excluía as questões sociais e ambientais.

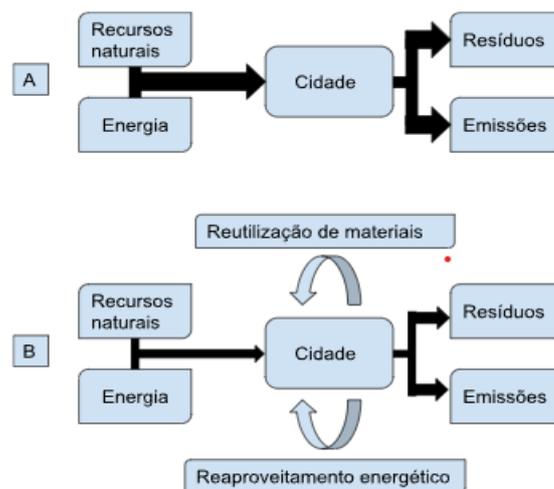
O planejamento sistêmico e integrado, segundo Rueda (1999), é um modelo de gestão na unidade sistema-entorno que relaciona o metabolismo urbano, a ordenação do território e o seu funcionamento. Para o autor, é necessário pensar os modelos de gestão das nossas cidades com a finalidade de manter o equilíbrio com o entorno que nos assegura o futuro. O planejamento urbano define os espaços e a densidade de ocupação que é refletida na demanda de água, na produção de esgoto, na geração de resíduos sólidos, e na impermeabilização do solo que afeta a gestão da drenagem urbana. Portanto, o uso da terra é o agente potencial que pode afetar os serviços se não houver uma integração com os outros componentes (TUCCI, 2013).

Com o tema da sustentabilidade cada vez mais presente (ROSEN, 2018), uma das principais funções do metabolismo urbano é avaliar e monitorar a sustentabilidade de cidades e regiões ao redor do planeta, coletando informações importantes sobre eficiência energética, ciclagem de materiais, gerenciamento de resíduos e infraestrutura em ambientes urbanos (PINCETL, BUNJE e HOLMES, 2012; DIJST *et al.*, 2018; MUÑOZ e NAVIA, 2018).

O trabalho de Abel Wolman, já citado anteriormente, considerou uma cidade como análoga a um ecossistema e descreveu como os materiais e a energia fluíam pelo sistema, da mesma forma que organismos dentro de um ecossistema consomem recursos como luz solar e alimentos. Como consequência desse fluxo de materiais dentro da cidade, produtos são criados e resíduos são gerados. Assim, as pesquisas sobre o metabolismo urbano enfocam as fontes e o consumo de recursos, seu ciclo dentro do sistema e a produção dos resíduos (NIZA, 2009).

Na década de 1990, Girardet lançou as bases da ecologia industrial, utilizando as informações de Wolman e seu metabolismo linear (Figura 1A), e propôs um modelo metabólico urbano cíclico (Figura 1B) pois percebeu que uma sequência linear da entrada de recursos ambientais de uma cidade para sua geração de produtos e resíduos não emulava com precisão como os organismos reais influenciam o sistema de suporte de vida da Terra (GIRARDET, 1990).

Figura 1. A. Metabolismo linear – em que grande quantidade de recursos e energia são consumidos nos processos urbanos e grande quantidade de rejeitos são gerados; B. Metabolismo circular – nesse processo há o reuso e reciclagem de materiais e reaproveitamento energético colaborando com a redução de extração de recursos e de produção de resíduos e emissões.



Fonte: Próprio autor

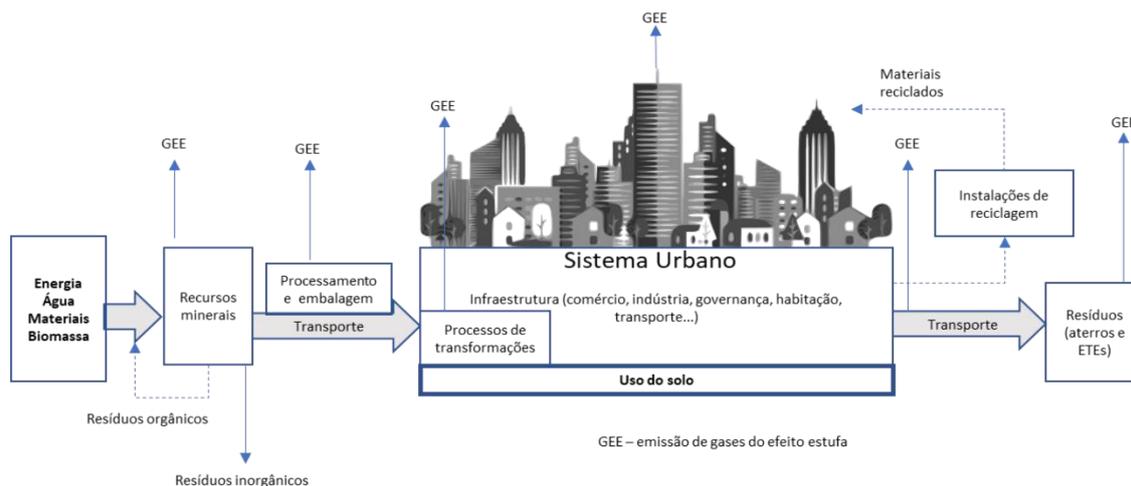
O uso do metabolismo urbano como estrutura fornece uma maneira eficaz de obter informações sobre eficiência energética, reciclagem de materiais, gerenciamento de recursos e resíduos (KENNEDY *et al.*, 2007) e, também, de conhecer as características da infraestrutura do sistema urbano.

Um dos principais métodos de contabilização e avaliação do metabolismo urbano é baseado na análise de fluxo de materiais e energia, rastreando os processos de entrada, armazenamento, transformação e saída (HENDRIKS *et al.*, 2000). Inicialmente, é necessário fazer um levantamento e a contabilização de todos os fluxos e a partir disso fazer um balanço de matéria e energia. Havendo uma quantidade satisfatória de dados estatísticos, o método permite monitorar o fluxo ao longo do tempo no sistema urbano (BRUNNER, 2004). Utilizando dados reais ou séries históricas de emissões de GEE, alterações climáticas e de recursos hídricos é possível gerar cenários e analisar as condições presentes e tendências dos dados analisados, gerando projeções futuras. Por exemplo, em relação à captação e ao consumo de água em uma metrópole, pode-se gerar comparabilidade ao longo do tempo e proporcionar, aos responsáveis pelas tomadas de decisões, informações para desenvolver planos de ações e diretrizes para melhorar o nível de sustentabilidade das cidades.

1.3 Emissões de gases do efeito estufa (GEE) e alterações climáticas

Quando se trata de emissões de gases do efeito estufa (GEE), o aumento da demanda por energia (combustível fóssil) continua sendo o fator mais importante que causa a sua emissão (ERICKSON e LAZZARUS, 2013; ALOLA, BEKUN e SARKODIE, 2019) e os GEE provenientes das atividades humanas são os fatores mais significativos para as mudanças climáticas observadas desde meados do século XX (IPCC, 2022). A partir do conceito de sustentabilidade, o metabolismo urbano é muito útil em avaliar as diversas condições de emissões de gases do efeito estufa em um sistema urbano (Figura 2).

Figura 2. Esquema de fluxo de materiais e etapas de emissões de GEE



Fonte: Próprio autor

A mensuração das emissões de GEE, seguindo as diretrizes do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), é calculada pela multiplicação de um nível de atividade por um fator de emissão. Por exemplo, as emissões de GEE para o fornecimento de eletricidade de uma comunidade são calculadas por meio da multiplicação do nível de consumo pela intensidade de GEE da oferta de eletricidade regional, estadual ou nacional. Os fatores de emissão de combustíveis usados no aquecimento, transporte ou combustão industrial estão bem estabelecidos no relatório nacional de inventário de GEE e são baseados nas propriedades de combustão de cada combustível. Embora os cálculos sejam mais complexos para alguns setores (por exemplo, resíduos), para os inventários de GEE urbanos, os parâmetros do metabolismo urbano fornecem essencialmente as medidas necessárias dos níveis de atividade (KENNEDY *et al.*, 2010).

Grande parte das emissões antropogênicas de CO₂, principal gás responsável pelo efeito estufa, provém da combustão de combustíveis fósseis principalmente carvão, petróleo e gás natural, e isso acontece porque o processo de queima de carvão ou óleo combina carbono com oxigênio no ar para produzir CO₂, com contribuições adicionais provenientes do desmatamento, alterações de uso da terra, erosão do solo e agropecuária intensiva. Globalmente, na última década (2009-2018), 42% das emissões fósseis de CO₂ eram de carvão, 34% de petróleo, 19% de gás natural e os 5% restantes de produção de cimento e outras fontes menores (PETERS *et al.*, 2019; RITCHIE e ROSER, 2019).

No Brasil, em 2021, as emissões brutas de toneladas de gás carbônico equivalente (GtCO₂ e GWP-AR5) foram de 2,4 bilhões de toneladas, participando com 3,2% das emissões produzidas mundialmente, (7º maior contribuidor do planeta), sendo os maiores contribuintes China, EUA, Rússia e Índia (SEEG, 2023). A Figura 3 apresenta os dados de emissões brasileiras de GEE por setor econômico nos anos de 2010 e 2020 (SEEG/BR, 2021), o crescimento global nacional foi de 9,5%, enquanto no mundo a redução foi de 7%.

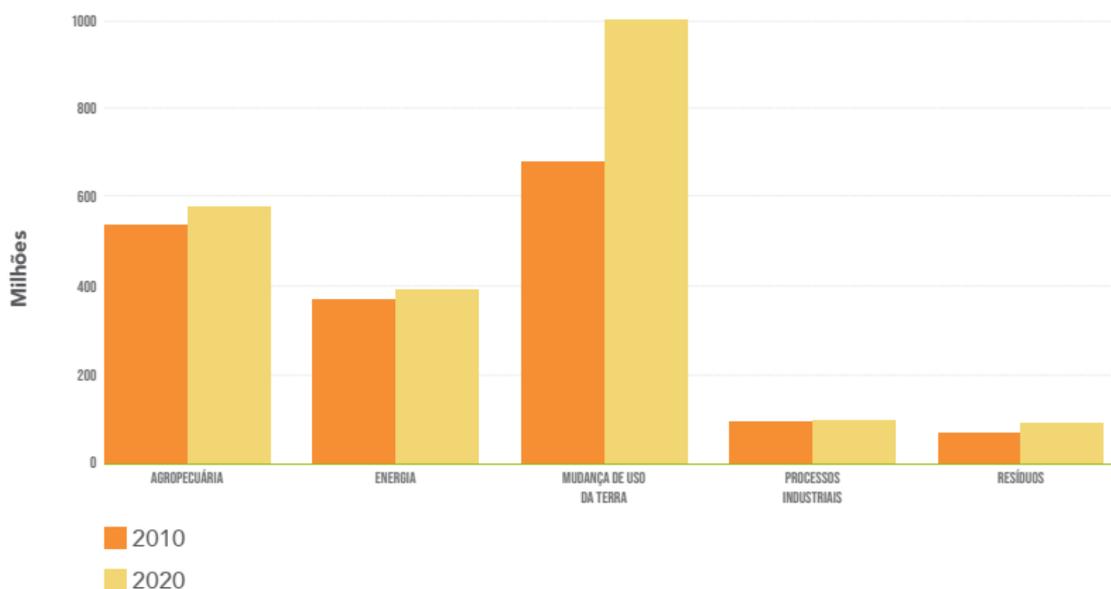
De acordo com o relatório da Potenza *et al.* (2023), o maior setor contribuinte em emissões foi o de mudanças de uso da terra, 49%, com 998 milhões de toneladas, isso se deve ao desmatamento e queimadas do Cerrado e da Amazônia, a destruição dos biomas brasileiros emitiu 1,19 bilhão de toneladas brutas no ano de 2019 — mais do que o Japão inteiro (POTENZA

et al., 2023). Em seguida, o setor produtivo de maior contribuição foi a agropecuária com 29%, principalmente devido ao aumento do rebanho bovino, com emissões brutas de 601 MtCO₂e, o setor de energia, com 435 MtCO₂e (18%) e os processos industriais, com total de 108 MtCO₂e, produção aproximada ao setor de resíduos, que detém 4% das emissões brutas (91 MtCO₂e). O setor de energia teve a maior alta em suas emissões desde 1973.

O Brasil detém, também, uma das maiores emissões *per capita* mundial, 10,2 toneladas brutas, enquanto a média mundial é de 6,7 t (SEEG, 2021). Outra observação é que a intensidade do carbono na economia cresceu, entretanto, apesar do aumento das emissões, a riqueza gerada é menor, pois as emissões provêm de setores majoritariamente ilegais, que geram pouca ou nenhuma renda *per capita*. Em 2020, a pandemia agravou esse cenário: em 2019 o país gerava US \$1.199 por tonelada de CO₂e emitida, e esse valor caiu para US \$1.050 em 2020. Entre 2003 e 2011 houve um aumento de US \$538 para US \$1.032 de PIB gerado para cada tonelada, mas, desde então, o país vem perdendo eficiência. No mundo o índice médio é de US \$1.583 de PIB gerado por tCO₂ emitida (SEEG, 2021).

Mundialmente, o setor industrial, como a produção de metais, produtos químicos e manufatura, abrangem 5,6% das emissões globais. O setor de transportes contribui com 15,9%, o da construção civil foi de 5,5%, agricultura 11,7%, alterações de uso do solo e silvicultura produziram 6,5%, resíduos 3,1% e a queima de outros combustíveis contribuiu com 2,9% (RITCHIE e ROSER, 2019).

Figura 3. Emissões Brasileiras de GEE's por atividade econômica nos períodos de 2010 e 2020.



Fonte: Adaptado de SEEG/Br-Sistema de Estimativa de Emissão de Gases (2021).

Os GEE são grandes causadores de problemas ambientais e de saúde, dentre eles o aquecimento global e as mudanças climáticas que continuam sendo a questão ambiental mais importante da comunidade internacional (ALOLA, 2019). Nesse contexto, as emissões de gases de efeito estufa continuam sendo uma grande ameaça ao meio ambiente e à humanidade, pois interferem diretamente nas condições climáticas e conseqüentemente provocam complexas influências nos sistemas de água, principalmente a urbana.

1.4 Alterações climática e a água

A relação entre água, energia e clima é tão importante quanto complexa (PARDOE *et al.*, 2018). As mudanças climáticas têm o potencial de desequilibrar o clima relativamente estável em que a civilização foi construída e comprometer a segurança dos sistemas de água, alimentos e energia (MISRA, 2014). Com o tempo, os efeitos do aquecimento global devido ao acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) gerados pelo homem na atmosfera se tornaram mais evidentes (THOMPSON, 2010; LEE e KIM, 2017). O reconhecimento de que os humanos influenciaram os padrões globais de seca no passado é uma parte importante da compreensão de como podemos influenciá-los no futuro.

Em 2018, os principais GEE, como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, atingiram níveis recordes, com a concentração de dióxido de carbono do ano alcançando uma média global de 407,4 partes por milhão, a mais alta já registrada historicamente, correspondendo apenas aos dados do núcleo de gelo que remontam a 800.000 anos (LINDSAY, 2020).

A água é um dos meios pelo qual primeiro e mais fortemente a população deverá perceber os efeitos da mudança do clima, considerando as prováveis alterações nos padrões de precipitação e no escoamento dos rios (ANA, 2016). A água, além de extremamente necessária à manutenção da vida no planeta, é um agente causador de muitos impactos relacionados às mudanças climáticas (escassez hídrica e tempestades), para a sociedade e, também, para setores econômicos de energia, transporte e, principalmente, agricultura (JIMÉNEZ-CISNEROS *et al.*, 2014).

Com base nos estudos realizados pelo IPCC (2022), a projeção dos possíveis impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos indica que o Brasil deve sofrer efeitos diferentes de acordo com a região, com potencial intensificação das condições de aridez na região central do Nordeste, assim como no sul da Amazônia, que passaria de clima tropical úmido para um clima tropical subúmido. Ainda, há relativo consenso em torno de aumentos da precipitação e do escoamento superficial na região sul do país. Para as regiões Sudeste e Centro do país, os estudos não chegaram a tendências convergentes para precipitação. Além dos efeitos sobre as águas superficiais, as mudanças climáticas deverão afetar as taxas de recarga de águas subterrâneas, ou seja, os recursos de águas subterrâneas renováveis e os níveis dos aquíferos (ANA, 2016). Em algumas regiões, os períodos de seca estão mais intensos e prolongados, como por exemplo, na região Nordeste, onde a última seca durou de 2010 a 2017, sendo a mais prolongada de todos o período de monitoramento, iniciado em 1845 (MARTINS *et al.*, 2017).

As mudanças climáticas antropogênicas são um dos grandes estressores hídricos que, aliados aos componentes de forças motrizes não climáticas (como aumento da população, desenvolvimento econômico, urbanização e uso da terra ou mudanças geomórficas naturais), também desafiam a sustentabilidade dos recursos hídricos, diminuindo o suprimento de água ou aumentando a sua demanda (JIMÉNEZ-CISNEROS *et al.*, 2014; OKELLO *et al.*, 2015; PEREIRA; FREITAS, 2017). Mudanças no ciclo hidrológico, resultantes destas alterações climáticas podem levar a diversos impactos e riscos. Sendo a água um recurso localmente variável, as vulnerabilidades a riscos relacionados, como inundações e secas, diferem entre as regiões.

Estudos produzidos por Ghazal *et al.* (2014) mostram que os eventos de chuvas em Teerã (Irã) se tornaram mais esporádicos, isto é, a média diminuiu, mas a intensidade dessas chuvas aumentou em grande proporção. No Brasil, estudos realizados por Zilli *et al.* (2016)

apontam que as mudanças climáticas estão alterando o padrão de chuvas no Brasil, particularmente no Sudeste, com aumento médio tanto no volume de água quanto na média de dias de chuva no Estado de São Paulo, e apresentam estimativas de redução no volume médio da precipitação para os próximos anos no Rio de Janeiro e no Espírito Santo, com eventos concentrados em menos dias, mas com intensidades extremas.

A criação de modelos dinâmicos (que combinem fatores climáticos, balanços hídricos e informações socioeconômicas) é fundamental para monitorar o estresse hídrico e a demanda crescente de água (VÖRÖMASTY *et al.*, 2000). Ainda sobre modelos dinâmicos, Marvel *et al.* (2019) argumentam que eles são capazes de prever que as secas se tornarão mais frequentes e severas à medida que as temperaturas subirem, potencialmente causando escassez de alimentos e água, impactos na saúde humana, incêndios destrutivos e conflitos entre povos que competem por recursos.

Segundo relatório da Organização Meteorológica Mundial (OMM) em conjunto com as Organizações das Nações Unidas (ONU), para a redução dos riscos de desastres relacionados ao clima, 45% das mortes nos últimos 50 anos (1970-2019) foram causadas por desastres naturais e 74% de todas as perdas econômicas. Mais de 11 mil desastres reportados foram atribuídos a eventos climáticos, com pouco mais de 2 milhões de mortes e 3,47 trilhões de dólares em perdas. Mais de 91% das mortes ocorreram em países em desenvolvimento (DOURIS; KIM, 2021).

No Brasil, estudos do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden) em parceria com IBGE, a partir de dados do Censo de 2010, obtiveram uma projeção de que 9,5 milhões de brasileiros moram em áreas de risco (2018). Em 2010, mais de 8,2 milhões de pessoas viviam nesses locais, totalizando quase 2,5 milhões de residências sob risco de desastres climáticos. Os dados do Cemaden e do IBGE apontam que 75% das famílias que moram nessas regiões vivem em áreas sujeitas a deslizamentos de terra, e 25% delas residem em locais com risco de inundações, enxurradas e outros fenômenos. O Cemaden e o IBGE também apontam que dentre as pessoas que moram em áreas de risco no Brasil, 17,8% delas são idosos, crianças, e grupos etários mais vulneráveis (IBGE, 2018).

Um estudo técnico da Confederação Nacional dos Municípios (CNM) aponta que, entre 2013 e 2023, 27% (16.366) dos desastres ocorridos em municípios brasileiros estiveram relacionados às chuvas, enquanto que as secas afetam 41% (24.078) pessoas. A Tabela 1, apresenta os dados dos danos e prejuízos causados por desastres, exclusivamente chuvas e secas no Brasil entre 2013 e 2023, excluindo-se desastres relacionados a incêndios e doenças infecciosas e parasitárias.

Tabela 1. Danos e prejuízos causados por desastres no Brasil entre 2013 a 2023

Ano	Total de Pessoas afetadas	Desabrigadas	Desalojadas	Óbitos**	Prejuízo (R\$)
2013	14968534	133984	427044	155	1.532.530.400
2014	13024208	93744	320862	93	40.924.936
2015	17314279	91245	386251	85	22.338.291.787
2016	26219264	17377	109878	75	34.556.971.520
2017	58018712	42379	271491	64	34.555.663.836
2018	48677805	26800	93469	59	34.758.426.044
2019	32714231	75232	227233	356	25.348.202.372
2020	84856989	102122	309118	203	39.075.640.062
2021	48086097	93046	453391	277	52.217.519.664
2022	37428966	123849	820497	532	105.012.980.724
2023*	4777399	8382	64386	98	24.085.146.743
Total	386086484	808160	3483620	1997	372.005.092.991

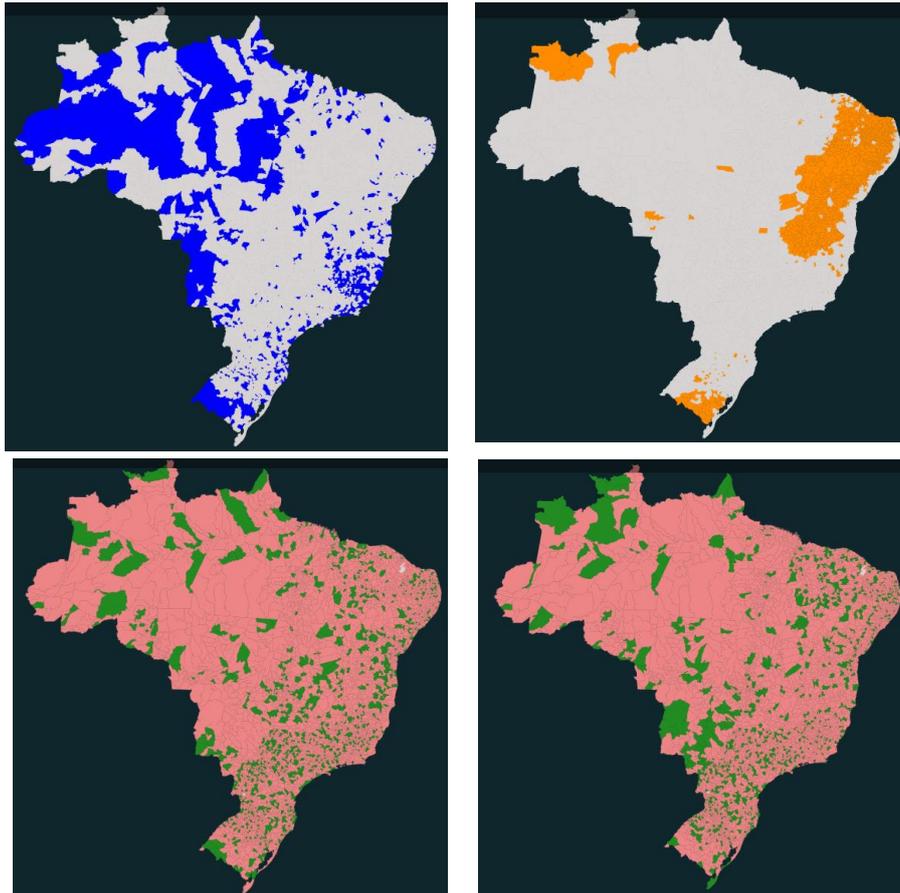
* Os dados de 2023 são referentes aos meses de janeiro e fevereiro.

** Dados referentes apenas por mortes devido às chuvas, não há informações de mortes devido às secas. R\$ - bilhões de reais.

Fonte: CNM, 2023.

A Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, define como pessoas desalojadas aquelas que tiveram que deixar suas moradias temporária ou definitivamente em função de evacuação preventiva, destruição ou avaria grave, decorrente do desastre, e que, não necessariamente, necessita de abrigo provido pelo sistema. E define-se pessoas desabrigadas como aquelas que, desalojadas, necessitam de provimento de abrigo fornecido pelo poder público. Muitos municípios brasileiros não possuem sistemas de prevenção de riscos, como o mapeamento de suas áreas críticas (Figura 4c) ou planos diretores para inundações (Figura 4d), assim as ações são executadas para reparação dos danos quando deveriam atuar de maneira preventiva. A Figura 4 mostra as regiões brasileiras que sofrem com eventos extremos de inundações (a) e seca (b).

Figura 4. a) regiões afetadas por enchentes e inundações; b) regiões afetadas pelas secas; c) municípios com mapeamento de áreas de risco e; d) municípios com planos diretores de prevenção a enchentes.



Fonte: CNM, 2023.

2 DINÂMICA DE SISTEMAS COMO ABORDAGEM METODOLÓGICA

Entender o metabolismo urbano (FORRESTER, 1969, 1989) requer investigar as inter-relações das variáveis socioeconômicas, políticas, tecnológicas e culturais envolvidas em cidades. A avaliação da vulnerabilidade urbana em relação às alterações climáticas é um tópico de pesquisa emergente, como mostra projetos como *ARCC Water (Adaptive and Resilient Water Systems, Climate Change)*, *Hydro-conflicts and Human Security (CLICO)* e *Modelling Analysis of Climate Change Mitigation (ADVANCE)* (Tyndal Centre, Reino Unido), *Assessing climate-led social-ecological impacts and opportunities for resilience pathways in the EU bioeconomy*, *Copernicus for Urban Resilience in Europe*, *Climate Change Impacts on Migration and Urbanization* e *Sustainable Integrated Management FOR the NEXUS of water-land-food-energy-climate for a resource-efficient Europe (Postdam Climate Change Institute, Alemanha)* e o *Impact of climate change on human health (CDC/Centers for Disease Control and Prevention, EUA)*.

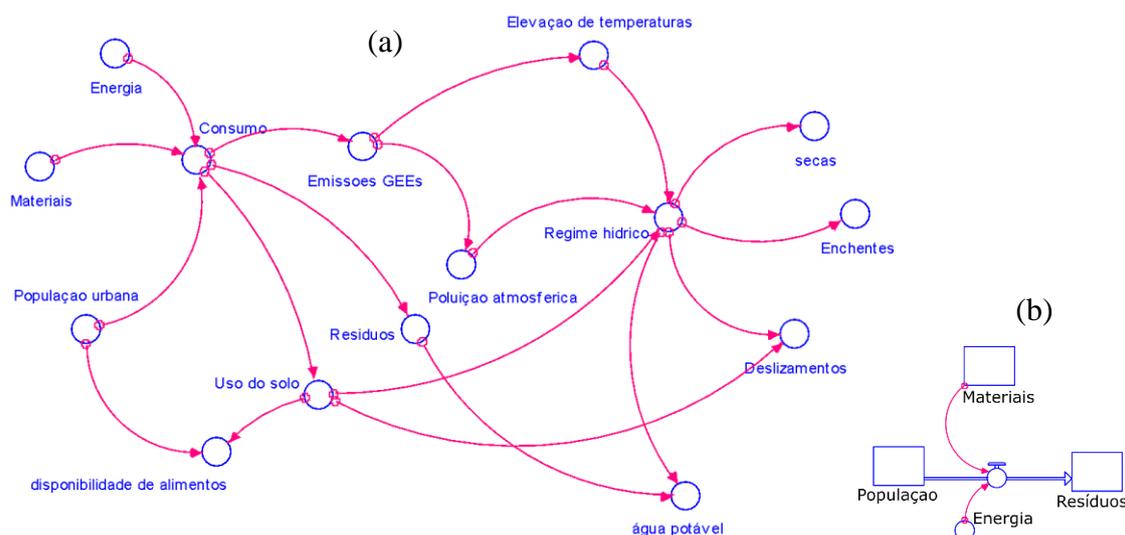
A dinâmica do sistema é uma abordagem para entender o comportamento não linear de sistemas complexos ao longo do tempo usando estoques, fluxos, *loops* de *feedback* interno, funções de tabela e atrasos de tempo (RAHIM *et al.*, 2017). A dinâmica do sistema (*System Dynamics – SD*) é uma metodologia e uma técnica de modelagem matemática para enquadrar, entender e discutir questões e problemas complexos. Originalmente desenvolvido na década de 1950, por Jay Forrester, para ajudar os gerentes corporativos a melhorar sua compreensão dos

processos industriais, o SD está sendo usado atualmente em todo o setor público e privado para análise e design de políticas (RADZICK e TAYLOR, 2008).

A dinâmica do sistema encontrou aplicação em uma ampla gama de áreas, por exemplo, população, agricultura (RAHIM *et al.*, 2017), sistemas ecológicos e econômicos, que geralmente interagem fortemente entre si. Um software de computador é usado para simular um modelo de dinâmica de sistema da situação em estudo. A execução de simulações do tipo "e...se" para testar determinadas políticas nesse modelo pode ajudar muito a entender como o sistema muda com o tempo. A dinâmica do sistema é muito semelhante ao pensamento sistêmico e constrói os mesmos diagramas de *loop* causal dos sistemas com *feedback*. No entanto, a dinâmica do sistema geralmente vai além e utiliza simulação para estudar o comportamento dos sistemas e o impacto de políticas públicas alternativas (STERMAN, 2000).

Os sistemas podem ser inicialmente representados por diagramas causais (Figura 5a) para facilitar a visualização do processo. Para a criação do modelo é necessário o uso de diagramas de processos (Figura 5b) com representações de estoques (indicadas por caixas), variáveis (círculos) e fluxos (setas).

Figura 5. Exemplo esquemático de sistema dinâmico de análise de processos urbanos. (a) diagrama causal para visualização dos processos e (b) esquemas de fluxos, estoques e variáveis de um modelo dinâmico.



Fonte: Próprio autor

O diagrama causal viabiliza a visualização do efeito cascata do crescimento urbano, com o aumento de consumo de materiais e energia, e conseqüentemente o aumento das emissões de GEE e outros poluentes, além do aumento na produção de resíduos. Nos modelos sistêmicos é possível identificar as relações entre forças motrizes, pressões, estados e impactos, possibilitando observar quais são as respostas necessárias para cada um dos processos envolvidos.

3 PROPOSTA E VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO MODELO

Infelizmente, os projetos de planejamento urbanos são propostos e muitas vezes colocados em prática sem a integração necessária, sem avaliar as conseqüências futuras desses

projetos e planos urbanísticos e sem observar, por exemplo, quais sistemas de transportes estão diretamente relacionados à emissão de poluentes causadores do efeito estufa. Decisões equivocadas em planejamento urbano podem gerar efeitos desastrosos (INNES; BOOHER, 2018).

Quando nos deparamos com a complexidade das cidades e observamos sob a ótica sistêmica, percebemos que muitas relações ambientais, sociais, econômicas, culturais e políticas estão conectadas. Decisões equivocadas em planejamento urbano podem gerar efeitos desastrosos (INNES; BOOHER, 2018).

Como uma cidade representa um sistema dinâmico complexo com um grande número de componentes e interligações complexas, a questão dos efeitos das mudanças climáticas (devido às emissões de GEE's e sua relação com os recursos hídricos) não pode ser adequadamente resolvida pelos modelos lineares, portanto, existe a necessidade da implementação do pensamento sistêmico nessa avaliação (KUZNEKOVA; ROMAGNOLI, 2014).

Como ponto de partida para a instauração de um sistema urbano sustentável, em relação aos impactos relacionados à água e aos efeitos das mudanças climáticas, é necessário identificar as principais características causadoras e as relações e *loops* que conectam todo o sistema, uma visão feita a partir de dados preexistentes para analisar o presente e projetar o futuro. A partir dessa identificação é possível apresentar propostas que aumentem a resiliência do sistema às adversidades relacionadas às águas urbanas.

Ações como conservar a água, melhorar a eficiência da água em paisagens, planos da cidade, infraestrutura hídrica, identificar fontes alternativas de água, planejar emergências para a seca e plantar culturas resistentes à seca ajudarão a se preparar para as estiagens futuras e as mudanças climáticas.

Os processos urbanos dinâmicos e a interconexão entre diferentes conceitos e abordagens devem ser estudados em conjunto. Esses conceitos e abordagens são metabolismo urbano, resiliência e vulnerabilidade urbana e modelagem de dinâmica de sistemas para resolver questões complexas de sistemas de mudança multidimensionais.

Enquanto os modelos lineares de previsão estatística dependem de equações desenvolvidas *ex-post*, ou seja, após observações, os sistemas dinâmicos visa primeiro determinar a estrutura do sistema que consiste em relações positivas e negativas entre variáveis, ciclos de *feedback*, arquétipos de sistemas e atrasos (STERMAN, 2000, WOLSTENHOLME, 2003), seguido de projeção *ex-ante*, em que os estados futuros do sistema são replicados a partir do modelo dinâmico (WINZ *et al.*, 2009).

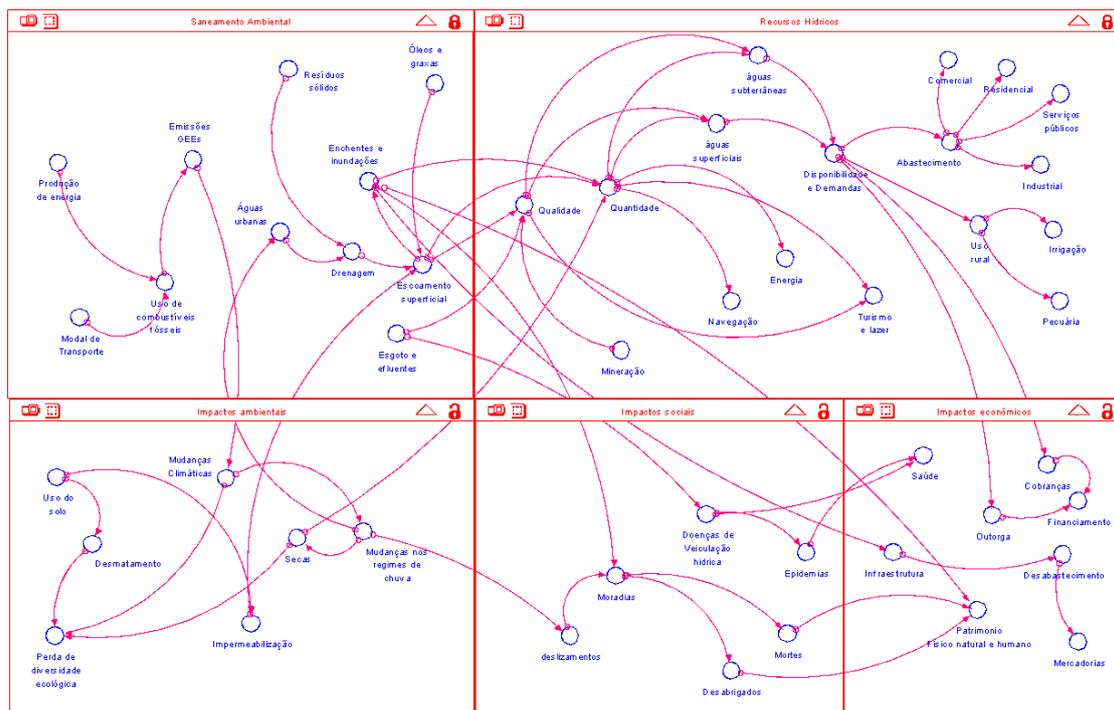
A Figura 6, apresenta um método sistêmico, que apesar de ter caixas compartimentadas, se relacionam entre si, o modelo foi estruturado em 5 subdivisões (quadros), a primeira focando em saneamento ambiental em que estão incluídos a cadeia produtora das emissões de GEE e as águas urbanas com suas contaminações e seus impactos na vida urbana (ambas foram colocadas no mesmo quadro por serem objetos principais do modelo). Na segunda subdivisão do quadro, os usos de recursos hídricos, casos de navegação e geração de energia. Na terceira estão os impactos ambientais decorrentes das emissões e alterações climáticas, secas e mudanças nos regimes de chuvas. No quarto quadro estão os impactos sociais e no quinto e último os impactos econômicos. Essas subdivisões são apenas visuais para organizar os processos, pois em um processo sistêmico, as interações acontecem sem limites de "fronteiras".

O modelo aborda questões econômicas, tanto em relação às perdas causadas, como busca apresentar fontes de financiamento para novos projetos e programas de preservação e recuperação das fontes de recursos hídricos existentes. Em relação à questão social, são considerados aspectos como crescimento populacional, responsável pelo aumento da demanda, e problemas sanitários envolvendo a qualidade da água e as enchentes decorrentes. Segundo Duran-Encalada *et al.* (2016), os modelos dinâmicos possuem a capacidade de reunir os aspectos comportamentais físicos e socioeconômicos de maneira sistêmica e flexível e possui transparência para tomadores de decisão e usuários. Quando se utiliza modelagem dinâmica é possível criar diferentes cenários que poderão ser testados para facilitar o envolvimento com o planejamento detalhado do gerenciamento da água.

Um dos aspectos abordados são as alterações nos regimes de chuva. Essas modificações são capazes de alterar a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos disponíveis para o abastecimento urbano (VOLSCHAN JUNIOR, 2011). Em relação às secas, além da redução da disponibilidade imediata com a redução de fluxo de águas superficiais, reduzem também a recarga dos aquíferos, comprometendo a capacidade de armazenamento dos reservatórios (ROSENZWEIG *et al.*, 2011). No extremo oposto, as chuvas intensas e concentradas num curto espaço de tempo, gera vazões súbitas, gerando inundações, enchentes e, ainda, perda da qualidade da água devido ao transporte de sedimentos e contaminantes para os corpos hídricos. O IPCC aponta que as mudanças climáticas poderão reduzir a qualidade da água devido a interações entre altas temperaturas e variações de precipitação (IPCC, 2022). Outro aspecto abordado no modelo são as emissões de GEE provenientes da produção de energia e transporte, responsáveis pelas alterações climáticas e pela mudança no regime de chuvas.

O foco da metodologia de sistemas dinâmicos é capturar a estrutura da situação complexa em termos das interações dos elementos entre eles. Ao utilizar os sistemas dinâmicos para modelar diferentes cenários, é possível testá-los para facilitar o envolvimento com o planejamento.

Figura 6. Esquema de modelo em formato de *loop* causal sistêmico para avaliação da gestão de águas em bacias hidrográficas, baseado no metabolismo urbano com a visualização dos processos envolvidos.



Fonte: Próprio autor

A partir das interações entre os elementos do modelo, é possível estabelecer indicadores para monitoramento e geração de cenários, sendo possível relacionar, por exemplo, o aumento das emissões com o aumento das tempestades (ou ações antrópicas) com aumento das inundações. Os gráficos são produzidos de acordo com interesse do usuário, para monitorar aquilo que é mais importante.

É evidente que a situação preocupante decorre principalmente dos efeitos do aumento das emissões de GEE e que isso continuará a suscitar preocupações crescentes pelas condições socioeconômicas (IPCC,2022; FIEDLER, 2018). Outras ações possíveis capazes de reduzir os impactos relacionados à água, como a implantação de infraestrutura verde para o gerenciamento de águas pluviais ou o aumento da eficiência energética em edifícios, podem melhorar a resiliência à seca. Essas etapas serão mais eficazes se forem combinadas com reduções de gases de efeito estufa que podem minimizar a magnitude final das mudanças climáticas.

Tomadores de decisão enfrentam múltiplos desafios ao tentar definir uma estratégia de adaptação às consequências das mudanças climáticas e necessitam avaliar as vulnerabilidades das diferentes comunidades e regiões e identificar as oportunidades e barreiras para a adaptação. Outro desafio é que precisam lidar com processos sociais e ecológicos complexos e as soluções propostas precisam ser planejadas para o longo prazo, lembrando que ainda existe uma profunda incerteza sobre o futuro. As soluções precisam ser previstas, mesmo que sejam executadas apenas em um dos muitos cenários possíveis e que talvez nunca sejam implementados. A produção de cenários a partir de modelos dinâmicos ajuda a lidar com essa complexidade, permitindo adaptação incremental e planejamento de longo prazo, viabilizando agendar e priorizar decisões futuras e proporcionando flexibilidade com a inclusão de várias opções possíveis de gestão e planejamento.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Segundo o IPCC (2022), os principais riscos para as cidades, no que tange às mudanças climáticas, são agravamentos de situações ou problemas já existentes, relacionados ao fornecimento de energia, produção e distribuição de alimentos, distribuição dos recursos hídricos, produção e remoção de resíduos e aumento da suscetibilidade a pandemias. Os eventos climáticos extremos também merecem destaque, nesse campo temos o aumento da frequência das tempestades e o aumento do nível do mar como situações de grande risco às populações urbanas, principalmente aquelas que já vivem em áreas de risco.

De acordo com Douris e Kim (2021), apenas metade dos membros da OMM têm sistemas de alerta precoce de riscos, além de lacunas críticas nas redes de observação climática e hidrológica em diversos países. Muitas pessoas estão expostas a riscos de desastres pelo aumento do número de eventos extremos e pelo aumento das populações urbanas e pela ocupação de áreas vulneráveis. O planejamento e a gestão de cidades, sob a ótica preditiva e da sustentabilidade, devem estar fundamentados em perspectivas dinâmicas e sistêmicas, orientados com visões de futuro, no sentido de instrumentalizar as políticas públicas e a gestão urbana de acordo com as necessidades socioambientais e as constantes transformações das cidades.

Nesse sentido, para a abordagem dos diversos aspectos e para a consideração dos inúmeros fatores envolvidos nas relações complexas das cidades, são necessárias abordagens convergentes e concepções inovadoras para incorporar os contextos e os cenários dos desafios atuais e futuros da urbanização. A complexidade das cidades exige o tratamento de seus processos sob a ótica sistêmica, considerando as múltiplas relações ambientais, sociais, econômicas, culturais, políticas e institucionais, que estão interconectadas. Essas conexões requerem abordagens integradas que, no presente estudo, foram trabalhadas por meio do conceito de metabolismo urbano e da modelagem de sistemas dinâmicos para considerar as complexas questões envolvidas nos processos de transformações multidimensionais das cidades frente às emissões de GEE.

Este trabalho considerou que o pensamento sistêmico busca entender os fenômenos de maneira sinérgica enquanto o conceito de metabolismo urbano, como concepção de abordagem, viabiliza e facilita a descrição e a análise dos fluxos de materiais e energia, envolvendo as inter-relações das variáveis sociais, econômicas, políticas, tecnológicas e culturais envolvidas na escala da cidade.

A partir do conceito de sustentabilidade, uma das aplicações relevantes da abordagem pelo metabolismo urbano é sua capacidade de avaliar as diversas condições de emissões de gases do efeito estufa em um sistema urbano. Essas emissões são componentes legítimos do metabolismo urbano, que interferem diretamente nas condições climáticas, e consequentemente provocam complexas influências nos sistemas hídricos urbanos.

O estudo, a concepção e a definição de modelos de gestão ambiental que combinem fatores climáticos, balanços hídricos e informações socioeconômicas são fundamentais e relevantes para compreender as inúmeras interferências socioambientais ocasionadas pelas variações hídricas extremas (seca, inundações, escassez) e a relação da dinâmica entre o suprimento e a demanda de água pela sociedade, acompanhado do efeito do GEE nas mudanças climáticas. A partir da perspectiva sistêmica, adotando-se o conceito de metabolismo urbano e a abordagem de sistemas dinâmicos, concebeu-se o modelo de gestão para avaliação dos efeitos

dos GEE nas mudanças climáticas e seus impactos no ciclo hidrológico. O modelo, apoiado num método sistêmico, estrutura-se no gerenciamento do recurso hídrico, no saneamento ambiental e nos seus impactos relacionados (ambientais, sociais, econômicos), viabilizando análise complexa das interações dos elementos e dos aspectos comportamentais físicos e socioeconômicos de maneira sistêmica, dinâmica e flexível para adoção em processos de planejamento urbano e gestão ambiental.

A possibilidade de criar diferentes cenários do metabolismo urbano por meio do modelo dinâmico (concebido no presente trabalho) viabiliza simulações futuras e resultados que poderão ser testados para facilitar intervenções físicas e ações estratégicas, auxiliando nos processos de tomada de decisão e na formulação de políticas públicas em cidades. Outra vantagem da modelagem dinâmica é que ela pode ser facilmente adaptada às especificidades de determinadas regiões em que venha a ser aplicada, podendo ser aplicada regionalmente ou localmente.

Desta forma, ressalta-se a finalidade do trabalho em estudar, elaborar e disponibilizar a concepção do modelo de gestão baseado no conceito de metabolismo urbano (com a abordagem da dinâmica de sistemas para análise dos efeitos dos GEE's), visando à contribuição também para outras futuras pesquisas emergentes, no sentido de subsidiar o gerenciamento da água e o planejamento dos espaços urbanos de cidades.

Referências

- ALDERMAN, K.; TURNER, L. R.; TONG, S. Floods and human health: A systematic review. *Environment International*, Volume 47, Pages 37-47, 2012.
- ALOLA, A. A. The trilemma of trade, monetary and immigration policies in the United States: Accounting for environmental sustainability. *Science of The Total Environment*, Volume 658, Pages 260-267, 2019.
- ALOLA, A. A.; BEKUN, F. V.; SARKODIE, S. A. Dynamic impact of trade policy, economic growth, fertility rate, renewable and non-renewable energy consumption on ecological footprint in Europe. *Science of The Total Environment*, 685, pp.702-709. 2019.
- ALSAN, M.; GOLDIN, C. Watersheds in Child Mortality: The Role of Effective Water and Sewerage Infrastructure, 1880–1920. *Journal of Political Economy*, volume 127, number 2, pages 586-638, 2019.
- ARNELL, N.W., GOSLING, S.N. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change* 134, 387–401. 2016.
- ASHBOLT N.J. Flood and Infectious Disease Risk Assessment. In: Watanabe T., Watanabe C. (eds) *Health in Ecological Perspectives in the Anthropocene*. Springer, Singapore. 159pp. 2019.
- BARCELLOS, P F P; BARCELLOS, L F P. Planejamento urbano sobre a perspectiva sistêmica: considerações sobre a função da propriedade e a preocupação ambiental. Curitiba: Rev. FAE, v.7, n.1, p.129-144, jan./jun. 2004.
- BEACH, B., FERRIE, J., SAAVEDRA, M.; TROESKEN, W. Typhoid Fever, Water Quality, and Human Capital Formation. *The Journal of Economic History*, 76(1), 41-75. 2016.
- BECCARI, B. A Comparative Analysis of Disaster Risk, Vulnerability and Resilience Composite Indicators. *PLoS Currents*, vol.8, 2016.
- BERTALANFFY, L. Von. *Teoria Geral dos Sistemas*. Petrópolis: Editora Vozes, 1992.
- BRUNNER, P.H., 2004. Materials flow analysis and the ultimate sink. *Journal of Industrial Ecology*. 8, 4-7. 2004.
- CNM – Confederação Nacional dos Municípios. Danos e Prejuízos Causados por Desastres no Brasil entre 2013 A 2023. Defesa Civil/Estudos Técnicos – março de 2023.
- CNM – Confederação Nacional dos Municípios. Observatório dos Desastres. <https://desastres.cnm.org.br/>

- DIJST, M., WORRELL, E., BÖCKER, L., BRUNNER, P., DAVOUDI, S., GEERTMAN, S.; HARMSSEN, R., HELBICH, M., HOLTSLAG, A.A.M., KWAN, M., LENZ, B., LYONS, G., MOKHTARIAN, P. L., NEWMAN, P., PERRELS, A., RIBEIRO, A. P., CARREÓN, THOMSON, G., URGE-VORSATZ, D., ZEYRINGER, M. Exploring urban metabolism—Towards an interdisciplinary perspective, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 132, Pages 190-203. 2018.
- DOURIS, J.; KIM, G. WMO Atlas Of Mortality And Economic Losses From Weather, Climate And Water Extremes (1970–2019). World Meteorological Organization, 2021.
- DURAN-ENCALADA, J. A.; PAUCAR-CACERES, A., BANDALA, E. R.; WRIGHT, G. H. The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US–Mexican transborder region, *European Journal of Operational Research*, Volume 256 (2), Pag. 567-581. 2017.
- ERICKSON, P., e LAZARUS, M. Accounting for Greenhouse Gas Emissions Associated with the Supply of Fossil Fuels. Stockholm Environment Institute. 2013. acesso em maio/2020, www.jstor.org/stable/resrep00382
- FERRÃO, P. e FERNÁNDEZ, J. Sustainable Urban Metabolism. Massachusetts Institute of Technology. 259pp. 2013.
- FIEDLER, B. Translating National Policy to Improve Environmental Conditions Impacting Public Health Through Community Planning. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature. 2018.
- FOSTER, J. B.; CLARK, B. Marxism and the Dialectics of Ecology. *Monthly Review*. Outubro. Volume 68, nº 5. 2016.
- FUCHS, S. HEISS, K.; HÜBL, J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 495–506, 2007
- GIRARDET, H., The metabolism of cities. In: Cadman, D., Payne, G. (Eds.), *The Living City: Towards a Sustainable Future*. Routledge, London, pp. 170-180. 1990.
- GRATULIANO, J. Introdução ao Pensamento Sistêmico – Parte I. Disponível em <http://pensamentosistemico.wetpaint.com>. 2012.
- HENDRIKS, C., OBERNOSTERER, R., MULLER, D., KYTZIA, S., BACCINI, P., BRUNNER, P.H., Material flow analysis: a tool to support environmental policy decision making. Case-studies on the city of Vienna and the Swiss lowlands. *Local Environment: The International Journal of Justice and Sustainability* 5, 311-328. 2000.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. População em áreas de risco no Brasil / IBGE, Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.
- INNES, J. E.; BOOHER, D. E. *Planning with Complexity: An Introduction to Collaborative Rationality for Public Policy*. 2nd Edition. London. Routledge. 2018. 246pps.
- IPCC. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. 2022.
- JONKMAN, S.N. Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods. *Nat Hazards* 34, 151–175. 2005.
- KENNEDY, C., CUDDIHY, J.; ENGEL-YAN, J. The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2), 43-59. 2007.
- KENNEDY, C., STEINBERGER, J., GASSON, B., HANSEN, Y., HILLMAN, T., HAVRÁNEK, M., PATAKI, D., PHDUNGSILP, A., RAMASWAMI, A.; MENDEZ, G. V. Methodology for inventorying greenhouse gas emissions from global cities. *Energy Policy*, 38(9), 4828–4837. 2010.
- KUSAKA, H., HARA, M.,; TAKANE, Y.: Urban climate projection by the WRF model at 3-km horizontal grid increment: Dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolises, *J. Meteor. Soc. Japan*, 90B, 47–63, 2012.
- LEE, J.; KIM, K. Review on Recent Global Warming based on New Geophysical Evidence. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 8, 1-5. 2017.
- LINDSAY, R. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. *Understanding Climate*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2020. Acesso em maio/2020. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>.

MASSON, V., CHAMPEAUX, J.-L., CHAUVIN, F., MERIGUET, C.; LACAZE, R.: A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models, *J. Climate*, 16, 1261–1282, 2003.

MCDONALD, G. W.; PATTERSON, M. G. Bridging the divide in urban sustainability: From human exemptionalism to the new ecological paradigm. *Urban Ecosyst*, 10, 169-192. 2007.

MISRA, A. K. Climate change and challenges of water and food security, *International Journal of Sustainable Built Environment*, Volume 3, (1), Pags 153-165, 2014.

MORIN, E. Introdução ao Pensamento Complexo. Tradução do francês: Eliane Lisboa -. Porto Alegre: Ed. Sulina, 2005.

MUÑOZ, E.; NAVIA, R. (2018). Urban metabolism as a key method to assess sustainability of cities. *Waste Management & Research*, 36(8), 661–662. 2018.

NIZA, S., ROSADO, L.; FERRÃO, P. Urban Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*, 13: 384-405. 2009.

OKELLO, C.; TOMASELLO, B.; GREGGIO, N.; WAMBIJI, N.; ANTONELLINI, M. Impact of Population Growth and Climate Change on the Freshwater Resources of Lamu Island, Kenya. *Water*. 2015, 7, 1264-1290. 2015.

PARDOE J.; CONWAY, D.; NAMAGANDA, E.; VINCENT, K.; DOUGILL, A. J.; KASHAIGILI, J.J. Climate change and the water–energy–food nexus: insights from policy and practice in Tanzania. *Climate Policy*. Volume 18 (7); Pags 863-877. 2018.

PEREIRA, J C.; FREITAS, M R. Cities and Water Security in the Anthropocene: Research Challenges and Opportunities for International Relations. *Contexto Internacional*, 39(3), 521-544. 2017.

PEREIRA, R. C. Estado, território e reestruturação produtiva na metrópole fluminense. Espaço e Economia. *Revista Brasileira de Geografia Econômica*, ano II, n.3. 2013.

PETERS, G. P., ANDREW, R. M., CANADELL, J. G., FRIEDLINGSTEIN, P., JACKSON, R. B., KORSBAKKEN, J. I., ... PEREGON, A. Carbon dioxide emissions continue to grow amidst slowly emerging climate policies. *Nature Climate Change*. 10, pag 3–6. 2019.

PINCETL, S.; BUNJE, P. E HOLMES, T. An expanded urban metabolism method: Toward a systems approach for assessing urban energy processes and causes, *Landscape and Urban Planning*, Volume 107, Issue 3, Pag 193-202, 2012.

POTENZA, R. F.; QUINTANA, G. O.; CARDOSO, A. M.; TSAI, D. S.; CREMER, M. S; SILVA, F. B.; GRACES, I.; CARVALHO, K.; COLUNA, I.; SHIMBO, J; SILVA, C.; SOUZA, E.; ZIMBRES, B.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T. Análise das Emissões de e Suas Implicações para as Metas Climáticas do Brasil 1970-2021. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Observatório do Clima. 2023.

QIAN, L., WANG, Z., WANG, H. An improved method for predicting water shortage risk in the case of insufficient data and its application in Tianjin, China. *J Earth Syst Sci* 129, 48. 2020.

RAHIM, F. H. A.; HAWARI, N. N.; ABIDIN, N. Z. Supply and demand of rice in Malaysia: A system dynamics approach. *International Journal of Supply Chain and Management*, Vol.6, No.4, pp. 234-240, 2017.

RITCHIE, H.; ROSER, M. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>' [Online Resource] 2019. Acesso em junho/2020.

ROSEN, M. Issues, Concepts and Applications for Sustainability. *Glocalism: Journal of Culture, Politics and Innovation* 3, 2018.

ROSENZWEIG, C. SOLECKI, W. D.; HAMMER, S. A. E MEHROTRA. S. Urban Climate Change in Context. *Climate Change and Cities: First Assessment*. Report of the Urban Climate Change Research Network, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 3–11. 2011.

RUEDA, S. R. Modelos e Indicadores para ciudades más sostenibles. Taller sobre Indicadores de Huella y Calidad Ambiental Urbana. 40pp. 1999.

SANTOS, R. G.; TONIOLO, L. A Integração das Políticas Setoriais Públicas Nas Intervenções Urbanas dos Projetos de Habitação de Interesse Social: Um Compromisso com o Futuro. *Revista Gestão Pública em Curitiba*, v. I, p. 03-08, 2010.

SARKODIE, S. A.; ADAMS, S. Renewable energy, nuclear energy, and environmental pollution: Accounting for political institutional quality in South Africa, *Science of The Total Environment*, Volume 643, Pages 1590-1601.2018.

SILVA, A.S. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. In: Vitte, A. C.; Guerra, A. J. T. Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.153-192. 2004.

STERMAN, J. D. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. Boston. Irwin/McGraw-Hill. 982 p. 2000.

THOMPSON, L.G. Climate change: The evidence and our options. *Behav Analyst.* 33, 153–170. 2010.

TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 943 p. 2013.

VINET, F. Flood Impacts on Loss of Life and Human Health, Editor(s): Freddy Vinet, *Floods*, Elsevier, Pages 33-51. 2017.

VOLSCHAN JUNIOR, I. Vulnerabilidades socioeconômicas: o saneamento ambiental frente aos cenários das mudanças climáticas: a aplicação do estado do conhecimento sobre a realidade da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. In: INPE (Org.). Megacidades, Vulnerabilidades e Mudanças Climáticas: Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro): Inpe, Cap. 3. p. 147-169. 2011.

WINSEMIUS, H., AERTS, J., VAN BEEK, L.; BIERKENS, M.F.P.; BOUWMAN, A., JONGMAN, B.; KWADIJK, J.C.J.; LIGTVOET, W.; LUCAS, P.L.; VAN VUUREN, V.P. WARD, P.J. Global drivers of future river flood risk. *Nature Clim Change.* 6, 381–385. 2016.

WINZ, I., BRIERLEY, G., TROWSDALE, S. C. The Use of System Dynamics Simulation in Water Resources Management. *Water Resource Management.* 23, 1301-1323, 2009.

WOLSTENHOLME, E. F. 2003. Towards the definition and use of a core set of archetypal structures in system dynamics. *System Dynamics Review*, 19 (1), pp.7-26. 2003.