

# EFEITO DE CINTURÕES VERDES SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM CIDADES MONOCÊNTRICAS

Andressa Lemes Proque

Universidade Federal de São João del-Rei e Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento, Planejamento e Território – UFSJ, Email: [andressa.proque@ufsj.edu.br](mailto:andressa.proque@ufsj.edu.br)

Gervásio F. Santos

Departamento de Economia e Programa de Pós-Graduação em Economia da UFBA, Email: [gervasios@ufba.br](mailto:gervasios@ufba.br) – Bolsista Produtividade em Pesquisa do CNPQ Nível 2.

André Luís Mota dos Santos

Departamento de Economia e Programa de Pós-Graduação em Economia da UFBA, Email: [motaals@ufba.br](mailto:motaals@ufba.br).

## RESUMO

O objetivo do artigo é avaliar o efeito da regulação de uso do solo nas áreas urbanas, através da construção de cinturões verdes e do respectivo aumento da densidade urbana, sobre a eficiência energética, em áreas urbanas de cidades no Brasil. A partir de desenvolvimentos recentes na área de economia urbana, a modelagem de simulação urbana, combinado com procedimentos de calibragem de equações de energia, tem permitido a avaliação de impactos de políticas de uso do solo urbano sobre eficiência energética e emissões, fazendo a integração entre agendas das áreas de Economia Urbana e Economia de Energia. Desse modo, será parametrizado um modelo de simulação urbana a partir de dados sobre a estrutura econômica, social e de consumo de energia de 5 cidades brasileiras monocêntricas. O modelo permite, dentre outros, simular políticas de ocupação do solo e de zoneamento de áreas verdes, para compreender a relação entre uso do solo urbano e eficiência energética. Os resultados mostram que ao restringir a oferta de terras urbanas, o cinturão verde provoca uma redução no consumo de energia nos deslocamentos e nos usos domésticos na região central das cidades. No entanto, para os indivíduos mais distantes da região central os custos com transporte e tempo despendido serão maiores.

**Palavras-Chave:** Regulação de uso do solo; Eficiência energética; Áreas Urbanas; Cinturões Verdes.

## ABSTRACT

The objective of this article is to evaluate the effect of land use regulation in urban areas, through the construction of green belts and the corresponding increase in urban density, on energy efficiency in urban areas of Brazilian cities. Based on recent developments in urban economics, urban simulation modeling, combined with energy equation calibration procedures, has enabled the assessment of the impacts of urban land use policies on energy efficiency and emissions, integrating agendas from the fields of urban economics and energy economics. Thus, an urban simulation model will be parameterized using data on the economic, social, and energy consumption structures of five monocentric Brazilian cities. The model allows, among other things, to simulate land use and green space zoning policies, to understand the relationship between urban land use and energy efficiency. The results show that by restricting the supply of urban land, the green belt reduces energy consumption for commuting and domestic purposes in the city center. However, for individuals farther from the city center, transportation costs and time spent will be higher.

**Key words:** *Land use regulation; Energy efficiency; Urban Areas; Greenbelts.*

**Área 6 - Infra-estrutura, transporte, energia, mobilidade e comunicação**

**JEL Classification: R1; R14; Q4**

## 1. INTRODUÇÃO

As cidades brasileiras enfrentam graves problemas urbanos, especialmente relacionados com infraestrutura e mobilidade urbana. Com uma população de mais de 200 milhões de habitantes, o país apresenta três fenômenos importantes na relação entre economia urbana e uso de energia: (i) crescimento acelerado da frota de veículos automotores e, com isso, do padrão ineficiente de uso do transporte; (ii) crescimento do consumo de combustíveis; e (iii) expansão do consumo de energia elétrica. O crescimento acelerado da frota de veículos automotores e, conseqüentemente, do consumo de combustíveis também se constituem em um dos desafios urbanos. Ambos os processos vêm acontecendo no País sem o devido controle ou políticas apropriadas. No longo prazo, esses fatores, juntamente com a expansão do consumo de energia, terão papel crucial em relação ao volume das emissões de dióxido de carbono. Desse modo, é necessário buscar medidas e políticas que melhorem a eficiência energética e reduzam as emissões no setor de transportes.

Muitas cidades regulam o desenvolvimento urbano impondo uma série de restrições como, por exemplo, as políticas UGB (*Urban Growth Boundary*), a Política FAR (*Floor Area Ratio*) e o Zoneamento. A política UGB basicamente impõe um limite superior em X, proibindo o desenvolvimento além desse limite, enquanto a política FAR restringe a altura dos imóveis. Por sua vez, o zoneamento é uma política do tipo comando-e-controle que determina a área (seja urbana ou rural) em que as atividades econômicas são restringidas como aponta Biderman e Arvarte (2005). Segundo O’Sullivan (2011), os governos locais podem utilizar da política do zoneamento para restringir o uso de terras privadas, impedindo, por exemplo, que terras agrícolas sejam subdivididas em pequenas parcelas para desenvolvimento residencial ou comercial. Ademais, os governos fornecem terras públicas em parques e cinturões verdes.

Existe uma literatura crescente sobre o cinturão verde (em inglês, *greenbelt*) como uma resposta de política à falha em precificar as chamadas externalidades de congestionamento em rodovias urbanas. Koster (2023), por exemplo, estudou os cinturões verdes na Inglaterra, uma vez que estes circundam a maioria das grandes cidades de lá. Koster (2023) buscou mensurar os efeitos da política do cinturão verde na distribuição espacial da atividade econômica. Concluiu que a política aumentou o bem-estar, contudo diminuiu a acessibilidade à moradia ao limitar a oferta.

Conforme Brueckner (2011) uma falha de mercado relevante para a expansão urbana está relacionada ao congestionamento, e sua fonte é a “externalidade do congestionamento”. A Teoria do Congestionamento, conforme apresentada por Brueckner (2011), trata do congestionamento viário como uma externalidade negativa típica de mercados não regulados. De acordo com este autor, quanto mais veículos estiverem em uma estrada, mais lento será o fluxo do tráfego. Isso ocorre porque, quando a rodovia está congestionada, a adição de mais um veículo impacta negativamente a velocidade de todos os outros.

Dentre os tipos de regulação, o controle da densidade urbana, através de limites da altura dos edifícios, é um dos mais conhecidos. No entanto, políticas de formação de áreas verdes que restringem o espaço urbano para a construção de habitações também podem resultar no aumento da densidade urbana e respectivos efeitos sobre o uso de energia nas cidades. Este tipo de regulação pode ser imposto em qualquer local da área urbana de uma cidade, sendo mais comum nas grandes áreas urbanas para atingir objetivos relacionados ao microclima urbano, controle da poluição visual, preservação de patrimônios históricos, ambientais e outros. Esses efeitos podem ser mais visíveis sobre o raio da cidade, o consumo de habitação, os preços da habitação, o tempo de deslocamento e sobre o uso de energia em geral, seja para comutações ou para manutenção do bem-estar dentro das residências.

A direção dos efeitos sobre o uso de energia dependerá de uma série de fatores associados ao aumento ou redução do espalhamento urbano (*urban sprawl*), ao tipo de uso de energia, nível de renda das cidades, a forma urbana, dentro outros. Desse modo, é possível definir o seguinte problema de pesquisa: *Qual é o efeito da regulação de uso do solo nas áreas residenciais, através da construção de cinturões verdes e do respectivo aumento da densidade urbana, sobre a eficiência energética em áreas urbanas de cidades no Brasil?* A resposta ao problema de pesquisa implicará em estabelecer previamente o potencial efeito das políticas de construção de cinturões verdes sobre a eficiência energética nas áreas urbanas no Brasil. Além disso, a pesquisa também pretende especificar e parametrizar (calibrar) um modelo de microssimulação urbana híbrido, para análise dos efeitos de políticas de regulação de usos do solo urbano sobre a eficiência energética em áreas urbanas no Brasil.

Os elementos acima reforçam a importância de se estudar o desenvolvimento urbano e o uso de energia nas cidades. Desse modo, o presente estudo pressupõe o desenvolvimento e calibragem de um modelo numérico de simulação urbana para captar os efeitos de políticas de eficiência energética no uso da terra em áreas urbanas no Brasil. Esta modelagem pode ser fundamentada teoricamente na estrutura das cidades, através de avanços na área de economia urbana. Uma vertente importante destes avanços considera a organização das cidades de acordo com suas respectivas centralidades, sejam estas monocêntricas ou policêntricas. Desse modo, a literatura tem explorado a modelagem de simulação urbana, bem como os procedimentos de calibragem de equações de energia, para avaliar os impactos de políticas de uso do solo urbano sobre eficiência energética e emissões. Esta modelagem faz a conexão entre as áreas de Economia Urbana e Economia de Energia. Os fundamentos teóricos dessa modelagem podem ser encontrados em Larson *et al.* (2012), que são derivados dos modelos tradicionais de Alonso (1964), Mills (1967) e Muth (1969), que deu origem ao conhecido modelo AMM.

O modelo a ser utilizado será o *Urban Energy Footprint Model* (UEFM), desenvolvido por Larson *et al.* (2012), Larson e Yezer (2015), Larson e Zhao (2017 e 2020) e Larson *et al.* (2018). Este modelo foi parametrizado para o Brasil por Proque (2014) e Proque *et al.* (2020). Neste estudo, o modelo será parametrizado a partir de dados de cidades brasileiras monocêntricas. Seguindo a indicação da literatura, foram selecionadas cinco cidades cujo padrão inicial é a existência de um único centro de negócios e localizado na sua região central. Desse modo, para evitar a presença de cidades com padrão policêntrico, foram selecionadas cinco cidades médias no Brasil. Além disso, com o objetivo de obter parâmetros estruturais para uma cidade monocêntrica representativa do Brasil, optou-se por selecionar uma cidade de cada grande região do País.

As cidades escolhidas são similares em termos de PIB *per capita*, mas são completamente diferentes em termos de regionalização. Estas cidades foram: Belém (PA) na região Norte; Feira de Santana (BA) na região Nordeste; Cuiabá (MT) na região Centro-Oeste; Juiz de Fora (MG) na região Sudeste; e Londrina (PR) na região Sul. O modelo é parametrizado tendo como ano base o ano de 2010, uma vez que variáveis importantes ainda não estão disponíveis no Censo Demográfico 2022. Embora exista uma defasagem temporal considerável, considera-se que a maioria dos parâmetros são estruturais e permitem uma avaliação de políticas no cenário de grandes cidades, que apresentam pouca alteração estrutural no curto e médio prazo.

Tomando como base Larson e Yezer (2015), será simulado no presente artigo a implantação de um cinturão verde, que pressupõe a proibição da expansão urbana para além de um determinado raio numa cidade monocêntrica média ou grande. Este cinturão estaria localizado em um raio de 10 quilômetros do CBD e permite a análise de intervenções urbanas que

favorecem tanto valorização de serviços ambientais quanto a maior eficiência energética urbana. A relação de causalidade a ser tomada como pressuposto será que as cidades estão sujeitas a congestionamentos, que aumentam de acordo com o tamanho destas cidades devido à maior quantidade e duração dos deslocamentos. Para tanto, toma-se o uso do solo como sendo fixo nas rodovias em qualquer raio. Ao se considerar a implantação de um pedágio, por exemplo, baseado no custo marginal de congestionamento, as densidades urbanas aumentam. Desse modo, a implantação de um cinturão verde numa cidade monocêntrica tenderia a aumentar as densidades residenciais, gerando assim efeitos positivos sobre a eficiência energética. De acordo com Larson e Yezer (2015), o aumento na densidade urbana seria derivado de reações às falhas de mercado causadas pela ausência de precificação de rodovias no modelo.

Os resultados mostraram que a implantação do cinturão verde tende a reduzir a renda da terra e a densidade estrutural (razão entre estrutura urbana e terra utilizada) em função da distância ao centro das cidades. Desse modo, provoca um aumento da verticalização das cidades. Quanto ao consumo de energia, este cai nos deslocamentos e nos usos domésticos para os residentes próximos à região central das cidades. No entanto, quanto mais distantes da região central, mais indivíduos incorrem em custos com transporte e tempo despendido maiores. Desse modo, a política de cinturão verde pode gerar custos adicionais para os indivíduos que moram distantes da região central.

O artigo contribui inicialmente para a literatura ao apresentar um modelo que permite a formulação de políticas de uso do solo associadas a políticas de eficiência energética. Além disso também permite que políticas ambientais, como a política de cinturão verde, possam ser confrontadas com seus impactos sobre o uso da renda de indivíduos que residem em diferentes localizações centrais de periféricas das grandes cidades. Em geral estas políticas são defendidas com maior ênfase nos serviços ambientais gerados. Para o caso brasileiro a presente pesquisa pode gerar uma nova agenda de problemas a serem investigados.

Além desta introdução, o artigo também é composto por mais 5 seções. A seção 2 apresenta a revisão de elementos contextuais da relação entre eficiência energética e estrutura urbana que configuram a importância se compreender melhor os efeitos de políticas de regulação do uso do solo ou de caráter ambiental como, por exemplo, a obrigação de construção de cinturões verdes nas cidades. A seção 3 apresenta o referencial teórico a ser tomado como ponto de partida para a modelos de simulação urbana e energia. A seção 4 apresenta a metodologia de modelagem de simulação urbana, os bancos de dados e os parâmetros de calibragem do modelo. A seção 5 apresenta os resultados das simulações. Por fim, a seção 6 apresenta as considerações finais.

## **2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ESTRUTURA URBANA**

Os estudos da literatura internacional têm ressaltado a importância da ocupação do solo urbano e de políticas de transporte sobre o consumo de energia. Glaeser e Kahn (2004) analisaram o fenômeno do espalhamento urbano para os Estados Unidos, indicando como causa o uso massivo do automóvel. Este padrão de cidades vem ocorrendo em várias partes do mundo e também no Brasil. Outras pesquisas, como Brownsstone e Golob (2009), mostram que a densidade habitacional é inversamente proporcional ao consumo de energia (combustível). Newman e Kenworthy (1989a e 1989b) enfatizaram que o padrão de cidades espalhadas com sistemas de transporte direcionados ao uso do automóvel, não pode ser visto como mais econômico em relação à energia, ou seja, o mais eficiente.

Naess (1995) percebeu que existe uma forte relação entre uso de energia *per capita* e área urbana *per capita* para os países da Noruega, Suécia, Dinamarca e Islândia. O autor constatou

que existe o consumo exacerbado de petróleo e a cidade espalhada não é a forma mais econômica do ponto de vista energético. Newman *et al.* (1995) mostraram que as cidades apresentam dois padrões de desenvolvimento. O primeiro envolve o espalhamento com baixa densidade populacional urbana. O segundo apresenta um movimento em direção aos subcentros com ênfase ao transporte público e alta concentração de residências e empregos em alguns locais. De acordo com os autores, a segunda forma é a mais importante para alcançar um consumo eficiente de energia. Logo, o desenvolvimento das cidades é visto de dois modos: cidade densa com maior uso do transporte público; cidade espalhada com maior uso do automóvel. Desse modo, a distribuição espacial de um tecido urbano pode influenciar diretamente no consumo eficiente de energia.

Glaeser e Kahn (2010) relataram que as cidades mais densas têm menores emissões de dióxido de carbono. Uma malha urbana densa não avança sobre o ambiente no seu entorno, preservando espaços naturais e os ecossistemas, e a menor impermeabilização dos solos. Os sistemas de transportes podem ter maior frequência e uma melhora no serviço prestado devido ao maior número de usuários por zona de transporte. Conforme Lima *et al.* (2003), as cidades europeias na busca por padrões de sustentabilidade são orientadas a esta forma urbana compacta e ao transporte público de massa. Os argumentos contra o modelo de cidade compacta giram em torno da necessidade de mais espaço nas residências. No entanto, caso a mobilidade urbana seja eficiente, estas tendem a gerar maiores externalidades ambientais e energéticas.

No estudo envolvendo os consumos de gasolina *per capita* nas cidades americanas, Newman e Kenworthy (1989a) mostraram que o processo de reurbanização e reorientação das prioridades pelo sistema de transporte são medidas que podem ser adotadas para diminuir a dependência do automóvel. O mesmo estudo enfatiza que a reurbanização intensificaria as atividades urbanas dentro da região já urbanizada. Gosling e Walking (1992) mostraram que a eficiência energética é um importante elemento de consideração do planejamento urbano. Em outra pesquisa, Kenworthy e Laube (1999) também salientaram que uma região pode reformular seus sistemas de transportes mais orientados aos modos não-motorizados. A redução no consumo de energia para o setor dos transportes carece de políticas de ordenamento do território juntamente com planejamento dos transportes e mobilidade, a fim de reduzir a dependência dos automóveis (Ribeiro *et al.*, 2007). Outro estudo, Woodcock *et al.* (2007) sugerem que, além de aumentar as fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, é necessário evitar os deslocamentos pendulares e diminuir a distância de deslocamento. Desse modo, a densidade urbana é um importante elemento no consumo de energia.

Embora existam poucos estudos ligando a área de Economia Urbana e a área de Economia de Energia no Brasil, existem evidências empíricas da forte relação entre os padrões de desenvolvimento urbano e uso de energia. Pampolha (1999), em um estudo sobre as 27 capitais brasileiras, mostrou o relacionamento entre espalhamento urbano e consumo de energia com transportes. O autor concluiu que a população e as variáveis espaciais relacionadas às áreas urbanizadas explicam o consumo de energia por transporte em 92,0% da variação observada. Costa (2001) avaliou o consumo de energia com transportes para municípios acima de 50 mil habitantes no Estado de São Paulo e confirmou a influência da densidade populacional sobre o consumo de energia com transportes. Com base nesses estudos, a implementação de estratégias de conservação de energia à escala urbana seria fundamental para a economia brasileira e, ao mesmo tempo, um importante nicho de pesquisa.

O uso eficiente de energia tem implicações ambientais e sociais para as cidades para a manutenção da qualidade de vida nas cidades. As bases para as ações de eficiência energética

no Brasil tiveram início em 1984, com a adoção do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), voltado para a racionalização do uso da energia elétrica, informando aos consumidores sobre a eficiência energética de cada produto (INMETRO, 2014). Fizeram parte do PBE o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) de 1985 e o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) de 1991. Estes dois programas integraram o Grupo Técnico (GT) para composição do regulamento técnico para as proposições da efficientização de energia em edificações, resultado da Lei de Eficiência Energética<sup>1</sup>, que dispõe da Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Outras medidas governamentais com reflexos na eficiência energética em áreas urbanas são o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf)<sup>2</sup> e os Planos Decenais de Energia (PDEs), que estabelecem a conservação de energia elétrica. Desse modo, o Brasil tem se colocado por um longo período com referência internacional de temas de política de eficiência energética e gerenciamento da demanda.

Neste contexto, as grandes cidades brasileiras ainda apresentam condições urbanas deficitárias nos aspectos de infraestrutura e mobilidade urbana. O adensamento urbano e a intensificação do uso do automóvel apontam para a necessidade de pensar na problemática do nível da ocupação do solo e do consumo energético. A implementação de estratégias de conservação de energia em relação à escala urbana é importante para a economia brasileira. Uma cidade que possui população espalhada, vivendo em lugares periféricos longe do centro de empregos (centro comercial e empresarial), terá um maior consumo de energia no setor de transportes. No entanto, se a cidade for densa e tiver um bom planejamento urbano, de modo que a distância entre o local de trabalho e de habitação seja menor, a energia consumida no deslocamento também será menor.

Proque *et al.* (2020) mostrou que existe uma relação negativa e decrescente entre a densidade urbana e o consumo de energia nas unidades da federação brasileiras. Isso pode significar que nas UFs com cidades mais espalhadas, com menor número de habitantes por metro quadrado, haveria um maior consumo de energia *per capita*. Estados como Santa Catarina, São Paulo e Rio de Janeiro apresentam-se como os maiores consumidores de energia *per capita*. Já os Estados de Alagoas e Tocantins apresentaram menor consumo de energia *per capita* e também maior densidade populacional urbana. No entanto, os resultados também apontam que os padrões de consumo *per capita* e densidade populacional urbana ainda precisam ser mais bem investigados, uma vez que muitas cidades com elevada densidade populacional são da região Nordeste, que também apresenta menor renda.

Cinturões verdes são faixas contínuas de terras não urbanizadas (agrícolas, florestais, de recreação, mistas) ao redor do perímetro urbano. No caso de serem resultantes do planejamento urbano, são protegidos contra a ocupação edificada, por regulação. Sua função clássica é separar áreas urbanas de zonas rurais e salvaguardar paisagens, biodiversidade e espaços para recreação (Indu, 2015). No contexto do urbanismo moderno, cinturões verdes são instrumentos de contenção urbana usados para controlar a dispersão das cidades e preservar a qualidade ambiental (Amati, 2008).

Os serviços ecossistêmicos em geral e associados a cinturões verdes em particular são quantificáveis economicamente, incluindo sequestro de carbono, regulação de microclima e infiltração de águas pluviais. Os valores têm assumido um montante relevante para cinturões verdes (Xin-tin, 2013; Hu; Wang, 2025). Benefícios culturais e recreativos são igualmente significativos (Kirby *et al.*, 2023). Além disso, o impacto da arborização sobre os valores

---

<sup>1</sup> Lei 10.295/2001.

<sup>2</sup> Portaria 594/2011.

imobiliários é bastante documentado: propriedades próximas a áreas verdes sofrem valorização devido às amenidades ambientais (Aevermann; Schmude, 2015; Kazak *et al.*, 2016). Cinturões verdes podem causar o mesmo efeito, como no caso de Londres, cujo cinturão verde foi concebido para conter expansão urbana e melhorar a qualidade do ar, mas passou a agregar valor imobiliário ao entorno (Smith, 2025). Esse acréscimo no valor dos imóveis é uma medida do valor social do cinturão verde que o produz.

Contudo, em contraponto ao aumento dos preços de imóveis por conta da valorização de amenidades ambientais devido à proximidade, se cinturões verdes atuam limitando o tamanho de cidades, notadamente mononucleadas, provavelmente eles terão um efeito de aumentar preços de imóveis situados longe do perímetro urbano, no centro. Há também possibilidades de "efeitos de borda", em que há desenvolvimento urbano após o cinturão, criando cidades-satélites conectadas por deslocamentos que consomem muita energia.

### **3. MODELAGEM DE SIMULAÇÃO URBANA E ENERGIA: Urban Energy Footprint Model (UEFM)**

A presente pesquisa tem sua base teórica na área de Economia Urbana que tem o modelo de localização de Von Thünen (1826) como seu marco teórico inicial. O modelo partiu da determinação da localização de diferentes atividades produtivas agrícolas no espaço, ao redor de um centro econômico. Este forneceu as bases teóricas e metodológicas para o surgimento do modelo de Alonso (1964), posteriormente aprimorado no modelo Alonso-Mills-Muth (AMM). O conhecido modelo AMM inspirou decisivamente a Nova Economia Urbana. A Economia Urbana tradicional baseia-se em um modelo de cidade circular com um espaço no centro da cidade, *Central Business District* (CBD), responsável pelas atividades de comércio, indústria e serviços públicos, de modo a concentrar todo o emprego local. Os modelos de cidade monocêntrica contemplam o *trade-off* entre acessibilidade e escolha de residências pelas famílias, empregando, como variável relevante, o tempo de deslocamento diário da residência ao local de trabalho. Desse modo, a localização é importante para distância de deslocamento entre a residência e o local de trabalho. Na evolução desses modelos, diversos estudos em Economia Urbana passaram a considerar a cidade com mais de um centro.

Dentro do contexto teórico apresentado, a formalização de modelos numéricos de simulação urbana foi introduzida por Muth (1975). No modelo urbano padrão discutido anteriormente, normalmente, os custos de transporte são constantes. O congestionamento é incorporado ao modelo, tornando os custos de transporte em função do número de passageiros. Esta endogeneidade torna difícil a solução do modelo analiticamente, tornando adequados os procedimentos de microsimulação. A introdução do congestionamento no transporte pendular, por exemplo, provocou redução da velocidade de viagem dos trabalhadores e um acréscimo da densidade populacional nas localizações próximas ao CBD. Desse modo, os modelos numéricos de simulação urbana são relevantes para entender as questões ligadas ao uso da terra, aos deslocamentos diários e a habitação em cidades com congestionamento de tráfego. Estes têm sido, desde então, utilizados para projetar os efeitos do uso do solo e das políticas de transportes em padrões espaciais de habitação dentro das cidades (Muth, 1975; Larson *et al.*, 2012; Larson; Yezer, 2014; Larson; Zhao, 2017).

A aplicação computacional dos modelos de simulação urbana foi iniciada por trabalho de Muth (1975), que simulou cidades americanas caracterizadas por viagens pendulares de automóvel. Com esse trabalho, surgiram outros estudos para investigar os padrões de desenvolvimento urbano (Altmann; Desalvo, 1981; Sullivan, 1985; Bertaud; Brueckner, 2005). Estudos recentes têm ressaltado a importância da ligação entre as áreas urbanas e o uso de energia, por meio de modelos numéricos de simulação urbana. Larson *et al.* (2012) e

Larson e Yezer (2014) e Larson e Zhao (2017) mostraram que aumentos nos preços da gasolina resultam em redução de energia residencial, devido aos efeitos indiretos dos preços de habitação próximos ao CBD. Com este efeito, a cidade torna-se mais compacta e a densidade estrutural (prédios mais altos) aumenta, próximo ao centro de empregos. Desse modo, o modelo pode ser adaptado para avaliar o efeito de políticas de uso de solo como a restrição à altura de edifícios sobre a eficiência energética em áreas urbanas.

Diante deste contexto, os resultados da pesquisa serão atingidos a partir da especificação de calibragem do modelo *Urban Energy Footprint Model* (UEFM), desenvolvido por Larson *et al.* (2012), Larson e Yezer (2015) e Larson e Zhao (2017 e 2020) e Larson *et al.* (2018). O modelo permite a ligação entre as áreas de Economia Urbana e Economia de Energia, através da integração entre a modelagem de simulação urbana com equações de consumo de energia nas residências e nos deslocamentos intraurbanos. Uma adaptação deste modelo para a economia brasileira já foi feita por Proque (2014) e Proque *et al.* (2020).

O modelo está baseado nos supostos da teoria de cidades monocêntricas que implica na calibragem do modelo, a partir de um conjunto de grandes cidades monocêntricas brasileiras. A modelagem de cidade aberta também poderá ser apropriada para conduzir as simulações, uma vez que a livre circulação de indivíduos dentro e fora da cidade permite a melhor compreensão dos resultados. Dentre as principais características do modelo merecem destaque: o emprego é exógeno o CBD, o congestionamento é endógeno e a relação entre o consumo de combustível e a velocidade com sendo não-linear. O requisito de equilíbrio do modelo é a condição de iso-utilidade, segundo a qual cada família na cidade conseguirá a mesma utilidade, não importando a localização da residência. Isso garante a seguinte “equação de Muth”:

$$\frac{dr}{dk} = -\frac{dT}{dk} \frac{1}{h} \quad (1)$$

Nesta equação (1),  $r$  é o aluguel por unidade de terra;  $k$  é a distância ao centro;  $T$  é a soma do tempo despendido e custo de deslocamentos pendulares;  $h$  é o tamanho do lote das residências. A equação determina um padrão espacial dos preços de habitação, que reduz com a distância  $k$  do CBD a uma taxa suficiente para compensar o custo de deslocamento diário da residência para o local de trabalho, logo, o consumidor que reside mais distante do CBD tem maiores custos com transporte e é compensado com uma residência maior.

O emprego total é dado por:

$$E = E_{CBD} + E_{OCBD} = E_{CBD} + \int_{K_{CBD}}^{K_{E^*}} E_{dens}(0)e^{-gk} dk \quad (2)$$

Na equação (2) de emprego,  $k$  é a distância ao centro;  $k_{CBD}$  é o raio médio do CBD;  $E_{dens}(0)$  é a densidade de emprego no centro do CBD com parâmetro de decaimento, ou gradiente de densidade,  $g$ ;  $K_{E^*}$  representa os empregos locais preenchidos fora do CBD. O emprego  $E$  está dividido entre o CBD e o local fora do OCBD, de maneira que os indivíduos se deslocam diariamente para o CBD. Aqueles que trabalham localmente são chamados de *walkers*. Desse modo, a distribuição espacial dos locais de trabalho é determinada pelo gradiente da densidade de emprego, que segue uma exponencial negativa. A literatura empírica apresenta trabalhos estimam a função de densidade de emprego, como exemplo, McMillen (2004) e para o Brasil, Nadalin (2010).

O modelo calibrado deverá replicar o padrão espacial de habitação para 5 cidades brasileiras, com uma função de utilidade,  $U(y, h)$ , calibrada para produzir renda e elasticidades-preço da

demanda por habitação consistentes com a literatura, assumida ser uma *Constant Elasticity of Substitution* (CES):

$$U = [\beta_1 y^\eta + \beta_2 h^\eta]^{1/\eta} \quad (3)$$

A função utilidade (3), tem  $h$  como o consumo de habitação, representado pelo tamanho do lote de residência medido em metros quadrados;  $y$  é o consumo do bem composto, que inclui todos os bens de consumo com exceção do solo;  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os parâmetros estruturais da distribuição;  $1/(1-\eta)$  é a elasticidade de substituição constante, entre o tamanho do lote e o bem composto. A restrição orçamentária das famílias é dada por  $I = y + rh + T$ , em que  $I$  é a renda das famílias;  $T$  é a soma do tempo despendido e do custo de deslocamento;  $r$  é o aluguel por unidade de terra; o preço do bem composto é definido como o *numeraire* (numerário), ou seja, normalizado em um.

A função de produção da habitação é perfeitamente competitiva e com retornos constantes, com base numa especificação CES é dada por:

$$H = A[\alpha_1 S^\rho + \alpha_2 L^\rho]^{1/\rho} \quad (4)$$

A produção de habitações  $H$  representada em (4) tem  $S$  e  $L$  como os insumos estrutura e terra, respectivamente;  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são os parâmetros estruturais da distribuição;  $1/(1-\rho)$  é a elasticidade de substituição constante entre  $S$  e  $L$ . O insumo estrutura é a estrutura da habitação. Uma habitação é construída sobre a terra, de modo que a terra também está na função de produção. A terra e as estruturas são substituíveis até certo ponto, ou seja, é possível construir mais unidades habitacionais em um lote vazio ou em cima de outra estrutura, aumentando a densidade. O capital é a estrutura das edificações, representado por  $S$ . Este insumo estrutura está em unidades monetárias, isto é, o numerário na função de produção, enquanto o insumo terra é representado pelo tamanho do lote.

A velocidade de deslocamento se relaciona com o volume de tráfego. Para representar esta relação, é utilizada a abordagem de Muth (1975) e Sullivan (1985), onde a velocidade é uma função não-linear limitada. Sendo  $v(k_{CBD}) = v_{mínima}$  e  $v(k) = v_{máxima}$ , a velocidade de deslocamento diário num determinado local está inversamente associada com o volume de tráfego, conforme Larson *et al.* (2012) e Larson e Yezer (2014) e Larson e Zhao (2017):

$$v(k) = \frac{1}{a + bV(k)^c} \quad (5)$$

Em (5),  $v(k)$  representa a velocidade de deslocamento diário a uma distância  $k$  do CBD;  $V(k)$  é o volume de tráfego através da localização  $k$ ;  $a, b, c$  são os parâmetros da função de congestionamento. Cabe ressaltar que fatores como a condição de pavimento, a geometria da via e o comportamento do motorista, dentre outros, também podem influenciar a velocidade dos veículos e poderão ser incluídos na equação a depender da disponibilidade de dados.

Os trabalhadores incorrem em custos de transportes ou se deslocam sem custo e sem consumo de energia, para seus empregos locais. Os postos de trabalho locais oferecem um salário mais baixo do que os trabalhos localizados no CBD, ou seja,  $W_L = W - T(k)$ , onde  $W$  é a renda (salário) das famílias que se deslocam diariamente para o CBD, e  $T(k)$  é a soma de tempo despendido e do custo de deslocamento em função da distância ao centro. Com base na especificação do modelo, os custos de deslocamento para o CBD incluem os custos fixos anuais de possuir um automóvel  $m_0$ , a depreciação do automóvel por milha rodada  $m_1$  e o custo do combustível. Este último está associado com a velocidade do veículo de acordo com

uma função do processo de engenharia denotada por  $g = G(v(k))$  e o preço da gasolina  $p_g$ . O combustível usado como referência para a calibragem será a gasolina. O custo em termos de tempo despendido nos deslocamentos é tomado como uma fração constante da taxa real salarial  $\Gamma W$ . Esse custo será representado pelo percentual da renda das famílias gasto com transporte urbano. Logo, o custo de deslocamento é dado por:

$$T(k) = m_0 + m_1 k + p_g \int_0^k \frac{1}{G(v(k))} dk + \Gamma W \int_0^k \frac{1}{v(k)} dk \quad (6)$$

Tomando a equação (6) esta permite que mudanças nos custos marginais de transporte, devido a um aumento no preço da gasolina, por exemplo, tenha efeitos diretos sobre a estrutura das cidades. O estacionamento por dia de trabalho não foi considerado neste trabalho para facilitar as simulações e também para diminuir o grau de complexidade da modelagem. No entanto, o modelo não é oculto em relação ao preço de estacionamento, podendo ser incluso nas especificações.

A calibragem do modelo também implicará na estimação do consumo de energia das residências para obtenção das elasticidades das equações de consumo de energia a partir da literatura. Estes parâmetros permite o relacionamento entre o uso doméstico de energia e as características das habitações geradas no modelo de simulação urbana. A equação pode ser estimada econometricamente sob a forma funcional log-linear, do seguinte modo:

$$\ln C_i = \phi_1 + \phi_2 \ln A_i + \phi_3 \ln Y_i + \phi_4 \ln P_i + \phi_5 S'_i + \varepsilon_i \quad (7)$$

Na equação (7),  $C$  representa o consumo energético da família  $i$ ;  $A$  é área construída da residência (casas e apartamentos) *per capita*;  $Y$  como a renda domiciliar *per capita*;  $P$  como o preço de eletricidade, mensurado pela tarifa média de energia elétrica;  $S$  como um vetor de variáveis que descreve a tipologia habitacional no Brasil (casas e apartamentos); os coeficientes  $\phi_2, \phi_3$  e  $\phi_4$  representam, respectivamente, as elasticidades da demanda residencial de energia das famílias com relação à área construída da residência, as elasticidades-renda domiciliar e preço da eletricidade.

Por fim, o consumo veicular urbano de combustível poderá estimado por um modelo polinomial simplificado em função de sua velocidade, conforme West *et al.* (1999), conforme uma equação de consumo energético de veículos:

$$mpg_i = d + \sum_{j=1}^4 \sigma_j v_i^j + e_i \quad (8)$$

Na equação (8), seguindo a formulação original,  $mpg$  é o combustível em milhas por galão;  $v$  é a velocidade dada em milhas por hora;  $d$  é o valor da constante;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$  são os parâmetros comportamentais a serem estimados de acordo com os diferentes graus polinomiais. As estimativas dos parâmetros poderão ser utilizadas para simular o consumo de combustível em função da velocidade desenvolvida pelo veículo.

#### 4. SELEÇÃO DAS CIDADES MONOCÊNTRICAS, DADOS E PARÂMETROS

Conforme Larson *et al.* (2012), Larson e Yezer (2015), o processo de calibragem do modelo tem como objetivo encontrar os valores dos parâmetros da função utilidade (3) e da função de produção da habitação (4). Estes parâmetros estruturais se somam aos parâmetros comportamentais utilizados para calibrar o modelo e fazer a ligação entre as áreas de Economia Urbana e Economia da Energia através de equações comportamentais. Desse modo, o modelo também requer a estimação das equações de consumo energético doméstico e do consumo energético dos veículos. Devido à complexidade da modelagem dos custos de congestionamento, este é incorporado ao modelo sem solução explícita para o sistema de equações diferenciais não lineares. Desse modo, o problema é escrito como um sistema de

equações simultâneas, sendo resolvidas por métodos numéricos. A solução numérica é usada pelo fato de que a estrutura das equações impede o uso das técnicas matemáticas tradicionais. Os detalhes do método de solução numérica, bem como os detalhes da calibragem do modelo são apresentados em Proque (2014). A implementação computacional do modelo foi realizada utilizando o *software Matlab R2020a*.

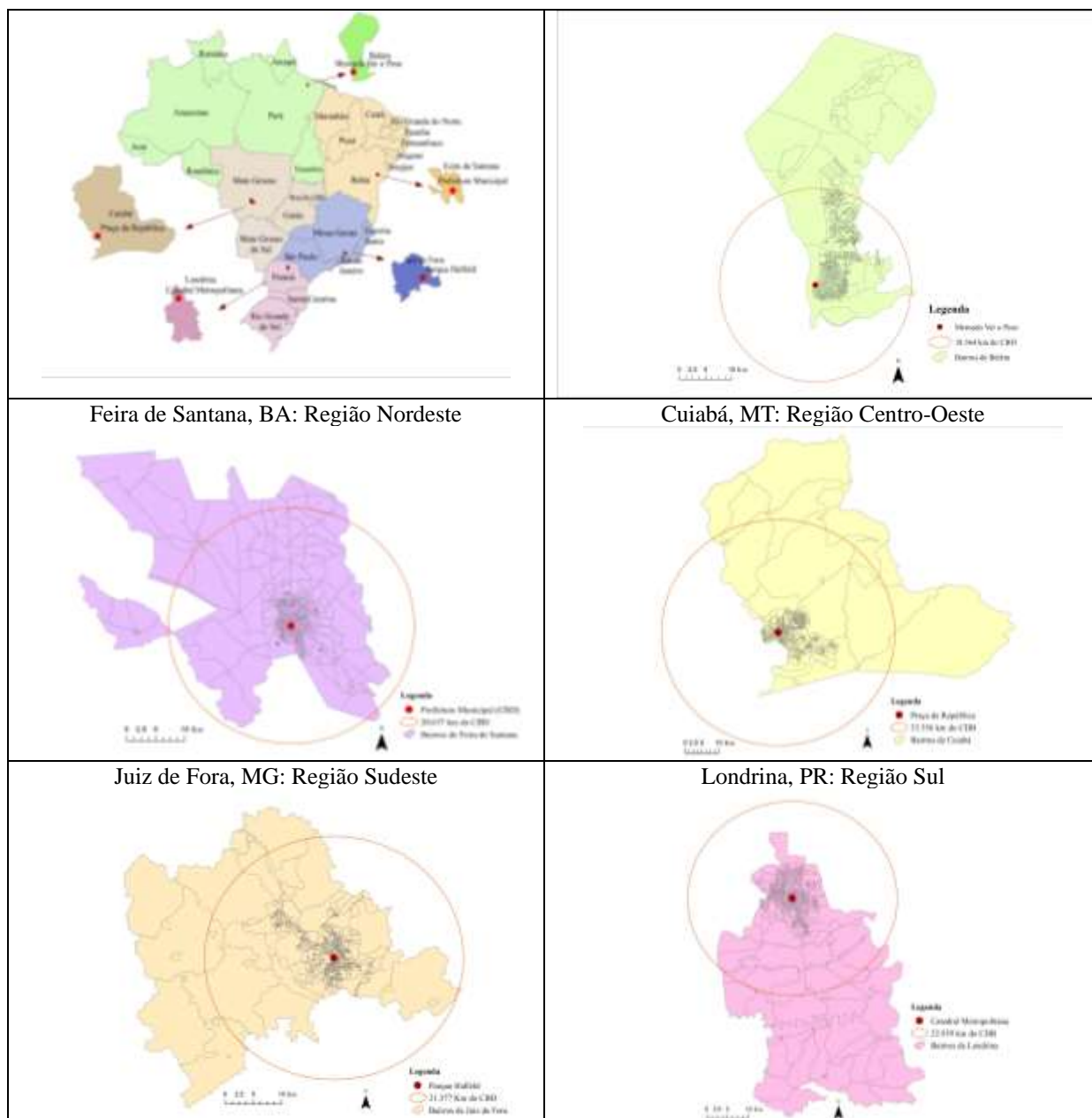
Tomando a indicação da literatura, em Larson *et al.* (2012), foram selecionadas cinco cidades no país (Figura 1), cujo padrão inicial é a existência de um único centro de negócios e localizado na sua região central. Desse modo, para evitar a presença de cidades com padrão policêntrico, foram selecionadas cinco cidades médias no Brasil. Para obter parâmetros estruturais para uma cidade monocêntrica representativa do Brasil, foram selecionadas cidades de cada grande região do país. Estas cidades foram: Belém (PA) na região Norte; Feira de Santana (BA) na região Nordeste; Cuiabá (MT) na região Centro-Oeste; Juiz de Fora (MG) na região Sudeste; e Londrina (PR) na região Sul. Os dados do Censo Demográfico do IBGE (2010) e do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2013) foram utilizados para ordenar as características das cidades médias de cada região. Para algumas variáveis como tempo de deslocamento, por exemplo, estas ainda não estão disponíveis para o Censo Demográfico (2022). Desse modo, ainda existem dificuldades para a calibragem do modelo utilizando esta base de dados para o ano base 2010.

As características das cidades consideram a demografia, PIB per capita, área total e demais indicadores socioeconômicos. Foram escolhidas as cinco cidades com maior semelhança, preservando a representatividade de uma para cada região do país. No entanto, as cidades selecionadas são distintas uma da outra, com culturas e climas muito diferentes, porém muito próximas em suas características socioeconômicas e um centro histórico bem definido. Este centro também constitui o centro de empregos de cada cidade, o CBD. A estrutura de dados sobre cada cidade são apresentadas em Proque (2014).

O processo de calibragem é baseado em uma média dos dados das cinco cidades brasileiras escolhidas para o estudo. O número total de residências, por exemplo, reportado na modelagem é o número médio de residências entre as cidades. Para a calibragem do modelo proposto serão utilizadas variáveis urbanas e também de energia que permitam avaliar o consumo eficiente de energia em relação ao espaço habitacional, os deslocamentos diários da residência para o local de trabalho dos indivíduos e a estrutura espacial das cidades. Para tanto, foi necessário levantar informações municipais para as cidades monocêntricas escolhidas para o estudo. Os valores das variáveis foram obtidos considerando o ano-base de 2010, seguindo a disponibilidade do Censo Demográfico 2010. O Quadro 1 apresenta em detalhes os dados necessários para a calibragem do modelo, com a descrição de cada variável, as unidades de medida e as respectivas fontes, para o ano-base 2010 empregado nas simulações.

Figura 1 – Localização das cidades para a calibragem do modelo e respectivos CBDs

Cidades monocêntricas e respectivos CBDs	Belém (PA): Região Norte
--	--------------------------



Fonte: Elaboração própria, com base no CENSO 2010/IBGE.

Quadro 1 – Dados para a calibragem do modelo

Variável	Descrição	Unidade*	Fonte
Tamanho do Lote	Área total do terreno	Acre	Prefeituras municipais
Área da residência	Área construída	pé quadrado	Prefeituras municipais
Área da cidade	Área da unidade territorial	milhas quadradas	IBGE
Raio da cidade <sup>3</sup>	Raio da cidade	Milhas	Elaboração própria
Renda média domiciliar	Renda média domiciliar	Dólares	IBGE
Unidades de habitação	Número total de domicílios	Unidades	IBGE
Tempo de deslocamento casa-trabalho	Média ponderada	Minutos	IBGE
Percentual de casas	Percentual de casas	%	IBGE

<sup>3</sup> O raio da cidade parte do CBD até a extremidade da cidade. Assumindo um círculo, o raio é dado por  $k = \sqrt{A/\pi}$ , em que  $k$  é o raio,  $A$  é a área da cidade e  $\pi = 3.14$ .

Percentual de apartamentos	Percentual de apartamentos	%	IBGE
Energia consumida na residência, <i>per capita</i>	Energia consumida na residência <i>per capita</i>	mmBTUs/hab**	CELPA, COELBA, CEMAT, CEMIG, COPEL, ANP, IBGE
Energia consumida no deslocamento, <i>per capita</i>	Energia consumida no deslocamento, <i>per capita</i>	mmBTUs/hab	ANP, IBGE

Fonte: Elaboração própria.

Nota: \*Unidades de medida no padrão americano para facilitar as comparações com a literatura internacional;

\*\*\*Tep=Tonelada Equivalente de Petróleo.

Tabela 1 – Parâmetros a serem utilizados na calibragem do modelo de simulação urbana

Símbolo	Descrição	Parâmetro	Unidade	Fonte
Parâmetros da Função Utilidade				
$\beta_1$	Parâmetro do bem composto	1	----	<i>Numeraire</i>
$\beta_2$	Parâmetro do tamanho do lote	0.2030	----	Calibrado
$1/(1-\eta)$	Elasticidade de substituição	0.75	----	Altmann e DeSalvo (1981)
$\bar{U}$	Utilidade	6438	----	Calibrado
Parâmetros da Função de Produção de Habitação				
$\alpha_1$	Parâmetro do insumo estrutura	1.1	----	Muth (1975); Altmann e DeSalvo (1981)
$\alpha_2$	Parâmetro do insumo terra	0.9	----	Muth (1975); Altmann e DeSalvo (1981)
$1/(1-\rho)$	Elasticidade de substituição	0.75	----	Altmann e DeSalvo (1981)
$A$	Parâmetro da tecnologia	0.32	----	Calibrado
Parâmetros de Emprego				
$E_{dens}(0)$	Densidade de emprego no centro de negócios	11641	----	Calibrado
$g$	Gradiente da densidade de emprego	0.125	----	Nadalin (2010)
$E_{CBD}/E$	Percentual de trabalhadores que se deslocam diariamente para o CBD	64	%	Proporcional ao número de trabalhadores que se deslocam para o trabalho (CENSO 2010/IBGE)
$K_{CBD}$	Raio médio do CBD	1	----	Calibrado
Parâmetros da Velocidade de Deslocamento				
$v_{min}$	Velocidade pendular mínima	6.2	milhas por hora	Adaptado para o Brasil com base em Muth (1975)
$v_{max}$	Velocidade pendular máxima	37	milhas por hora	Código Brasileiro de Trânsito (1997)
$c$	Parâmetro de curvatura na função de velocidade de deslocamento	1.75	----	Muth (1975)
$t_L$	Tempo de deslocamento para os trabalhadores locais	10	minutos	CENSO 2010/IBGE
Parâmetros do Custo de Deslocamento				
$m_0$	Custo fixo anual de possuir um automóvel	4824.65	dólares	Elaboração própria (2014)
$m_1$	Custo anual da depreciação de um automóvel por milha rodado	0.137	dólares/milha rodada	Elaboração própria (2014)
$p_g$	Preço mínimo da gasolina	4.6396	dólares/galão	ANP (2014)
$\tau$	Custo de tempo de deslocamento (fração do salário)	0.5	%	Larson <i>et al.</i> (2012)
Parâmetros do Uso da Terra				
$p_L^a$	Preço de reserva da terra agrícola	209	dólares/	Gasques e Bastos (2008)

acre				
$\theta$	Percentual de terra usado para habitação	51	%	Elaboração própria (2014)
$\theta_R$	Percentual de terra usado para as rodovias	21	%	Litman (2012)
Parâmetros do Consumo Energético Doméstico				
$\phi_1$	Constante	6.02	----	Adaptado de Laron <i>et al.</i> (2012) a partir da relação entre o consumo de energia dos Estados Unidos e do Brasil
Continuação				
<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fonte</b>
Parâmetros do Consumo Energético Doméstico				
$\phi_2$	Elasticidade - área da residência	-0.07	----	Adaptado de Lenzen <i>et al.</i> (2006)
$\phi_3$	Elasticidade - renda domiciliar	0.202	----	Gomes (2010)
$\phi_4$	Elasticidade-preço da energia elétrica	-0.111	----	Gomes (2010)
$\phi_5$	Parâmetro da tipologia habitacional: Casas Apartamentos	-0.0746 -0.310	---	Larson <i>et al.</i> (2012)
Parâmetros do Consumo Energético dos Veículos				
$d$	Constante	0.23025849	----	Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), Código Brasileiro de Trânsito e INMETRO
$\sigma_1$	Parâmetro do consumo de combustível	1.933225	----	Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), Código Brasileiro de Trânsito e INMETRO
$\sigma_2$	Parâmetro do consumo de combustível	-0.0520949	----	Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), Código Brasileiro de Trânsito e INMETRO
$\sigma_3$	Parâmetro do consumo de combustível	0.0006357	----	Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), Código Brasileiro de Trânsito e INMETRO
$\sigma_4$	Parâmetro do consumo de combustível	-0.00000345	----	Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), Código Brasileiro de Trânsito e INMETRO

Fonte: Elaboração própria (2014).

Tomando os parâmetros estruturais das funções de utilidade e de produção de habitação, provenientes do procedimento de calibragem ( $\beta_2, \alpha_1, \alpha_2$ ), o próximo passo foi a obtenção dos parâmetros comportamentais destas funções ( $\eta, \rho$ ), derivados de estimações econométricas. Este conjunto de dados foi obtido da literatura a partir de Larson *et al.* (2012) e Larson e Yezer (2014). A falta de estimativas para os parâmetros de substituição nas funções de utilidade e produção de habitação no Brasil torna necessário recorrer a parâmetros da literatura internacional. Isso pode ser explicado pela ausência de pesquisas brasileiras na área e pela dificuldade de obtenção dos dados de algumas variáveis de escolha residencial. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros a serem utilizados na calibragem do modelo

numérico de simulação urbana para o Brasil. Os detalhes da obtenção dos parâmetros brasileiros se encontram em Proque (2014).

## 5. RESULTADOS

Em primeiro lugar, o cenário *baseline* encontrado tem a capacidade de gerar trajetórias compatíveis com a realidade, uma vez que este cenário é compatível ao observado no mundo real. Cabe ressaltar que o objetivo da calibragem é gerar uma cidade monocêntrica representativa, para testar hipóteses teóricas do campo de estudos da Economia Urbana. A modelagem adotada não necessariamente gera valores exatamente iguais aos valores médios das cinco cidades para o *baseline*, mas sim uma boa aproximação para uma cidade monocêntrica brasileira. Além disso, a modelagem de simulação urbana do presente trabalho não aborda o transporte público de massa no processo de calibragem. Isso pressupõe um determinado grau de abstração em relação as estruturas das cidades brasileiras, mas não interfere nos resultados. A área simulada da cidade é menor em relação ao valor real em 17,3%, o raio em 6% e o tempo de deslocamento em 22,3%, conforme Tabela 2.

O percentual de casas na amostra de cidades reais é ligeiramente menor do que o valor simulado em 1,27%. Já o percentual de apartamentos apresentou valores maiores que os dados reais das cidades. O aumento da área da residência entre as cidades reais e as simuladas foi de 24,5%, enquanto o aumento do tamanho do lote foi de 64,3% (Tabela 2).

Em diversos países, inclusive no Brasil, o crescimento urbano leva a uma pressão sobre terras urbanizáveis dentro e ao redor das cidades. Uma das críticas à expansão urbana desordenada refere-se à diminuição do incentivo para a reconstrução de áreas centrais, o que leva à decadência e à degradação (Brueckner, 2011).

Tabela 2 – Calibragem do modelo UEFM

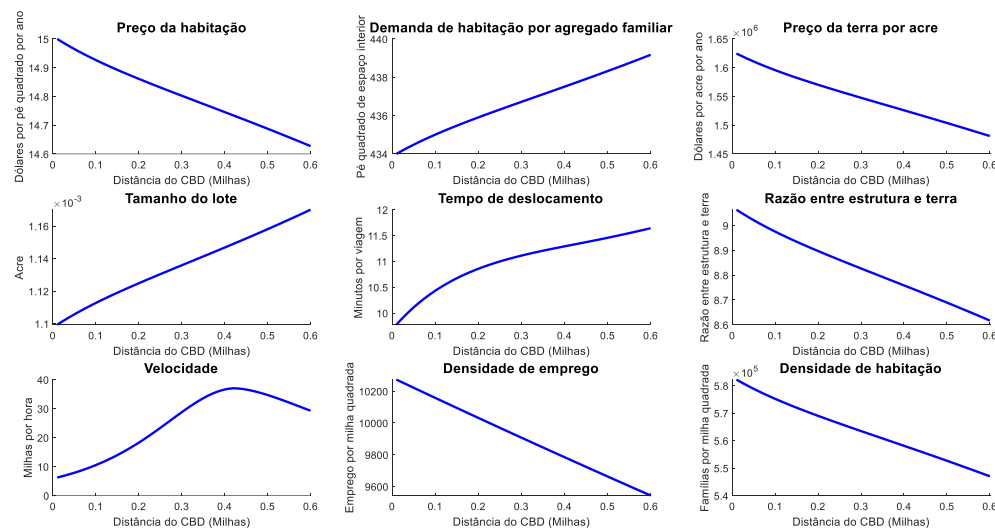
Variáveis	Valores atuais	Valores simulados
Tamanho do lote (acre)	0,14	0,23
Área da residência (pés quadrado)	1.218,58	1.516,59
Área da cidade (milhas quadradas)	701	580
Raio da cidade (assumindo círculo) (milhas)	14,45	13,59
Renda média domiciliar (dólares)	19,506	38,524
Número total de residências	201.686	201.686
Tempo de deslocamento (minutos)	30,5	23,7
Percentual de casas (%)	79	78
Percentual de apartamentos (%)	16	22
Energia consumida na residência, <i>per capita</i> (mmBTUs / habitantes)	4,19	4,82
Energia consumida no deslocamento, <i>per capita</i> (mmBTUs / habitantes)	6,85	5,55

Fonte: Proque (2014); Proque *et al.* (2020).

As simulações requerem inicialmente a definição da distância do cinturão verde em relação ao CBD da cidade média de referência, construída com base nas cinco cidades monocêntricas selecionadas. Para este experimento, considerou-se que o cinturão verde está localizado a 10 Km do CBD. Esta definição reduz o raio da cidade base e a sua respectiva área total. A proposta de cinturão verde considerada nesta pesquisa envolve a proibição do desenvolvimento urbano além de um raio determinado. Os efeitos sobre a cidade decorrem do conseqüente aumento nos preços da terra e da habitação, próximos ao CBD, o que que aumenta a densidade de habitação e a densidade de emprego no CBD.

A Figuras 2 e 3 sintetizam os resultados das simulações da política de cinturão verde, sobre as características urbanas das cidades e sobre o consumo de energia. O primeiro efeito direto é o de restringir a oferta de terras urbanas e o conseqüente aumento da densidade residencial. Conforme a Figura 2, os resultados são consistentes com o perfil espacial das cidades, principalmente, com a literatura de Economia Urbana Monocêntrica. A especificação do modelo tradicional monocêntrico permite concluir que a renda da terra (preço na terra por acre) e a densidade estrutural (razão entre estrutura e terra) decrescem em função da distância do CBD (milhas). Cabe destacar que a razão entre capital-terra ou densidade estrutural representa a verticalidade das habitações. Na modelagem apresentada, o capital é representado pela estrutura, ou seja, a estrutura da habitação. Quanto mais próximo do centro de empregos, maior é o preço da terra por acre e também maior é a medida da altura dos edifícios. Isso implica a terra se torna mais cara à medida que se aproxima do CBD. Nas localizações mais distantes, utiliza-se mais terra e menos capital.

Figura 2 - Simulações *baseline* para as características urbanas das cidades selecionadas com a política do cinturão verde



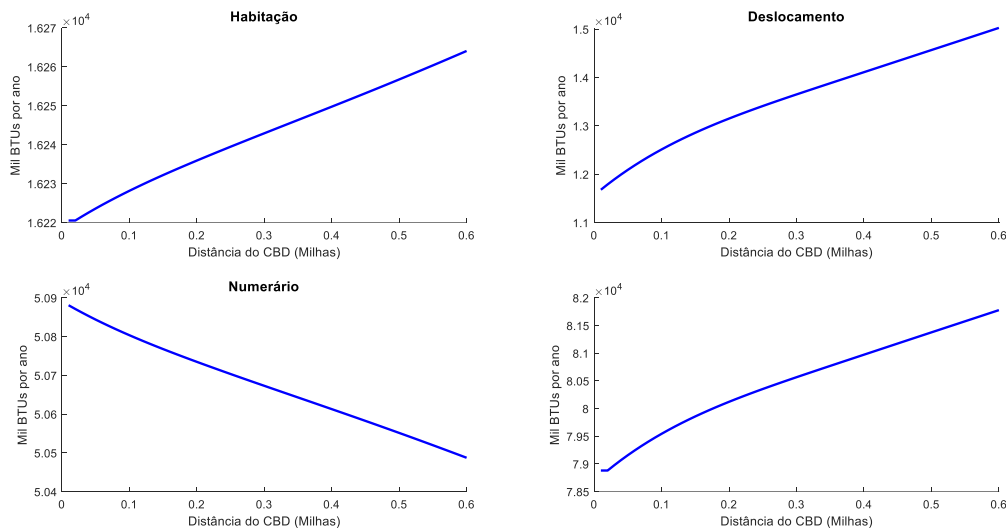
Fonte: Resultados da pesquisa (2025).

Conforme aponta Koster (2023) os limites de crescimento urbano, ou cinturões verdes, reduzem a terra disponível para desenvolvimento na periferia urbana. Na prática, muitas políticas de cinturão verde permitem algumas residências em terrenos muito grandes, sendo comum na Economia Americana. Em particular, as moradias em cinturões verdes com zoneamento de lotes amplos são geralmente ocupadas por famílias de renda mais alta, e a simulação realista em um modelo, como este, com um único tipo de domicílio seria desafiadora. Desse modo, presume-se que o cinturão verde seja suficientemente amplo para impedir o desenvolvimento "salto" (para além dos limites) fora da cidade.

O segundo conjunto de resultados mostra que o consumo de energia cai nos deslocamentos e nos usos domésticos no CBD, de acordo com a Figura 3. Como o consumo de energia doméstico é de aproximadamente quatro vezes maior que o uso nos deslocamentos, a economia absoluta de energia em cada setor é aproximadamente igual. No ponto mais distante do CBD, os indivíduos consomem uma maior quantidade de terras (lotes maiores). Entretanto, estes indivíduos incorrem em ambos os custos com transporte e tempo despendido maiores. Observa-se um aumento do consumo gasto em deslocamento, o que corrobora com Bengston e Youn (2006) que estudaram o cinturão verde de Seul (República da Coreia). Para

os autores, a política de cinturão verde gerou custos adicionais incorridos por passageiros que vivem fora do cinturão verde e trabalham em Seul, e aumento do congestionamento e impactos relacionados à qualidade de vida. Contudo, a implementação de um cinturão verde conjuntamente com a adoção do teletrabalho pode gerar benefícios, como tipos de estrutura mais densos e menor consumo de energia em relação a uma cidade não regulamentada (Larson; Zhao, 2017).

Figura 3 - Simulações *baseline* para o consumo de energia de cidades selecionadas com a política do cinturão verde



Fonte: Resultados da pesquisa (2025).

## 6. CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da regulação de uso do solo nas áreas urbanas, através da construção de cinturões verdes e do respectivo aumento da densidade urbana, sobre a eficiência energética, em áreas urbanas de cidades no Brasil. Para testar essa hipótese foi utilizado um modelo numérico de simulação urbana com a fundamentação teórica baseada no modelo padrão de Economia urbana, de cidades monocêntricas, descrito por Alonso (1964), Mills (1967) e Muth (1969).

A construção do modelo para o Brasil tomou como estratégia empírica a escolha de um grupo de cinco cidades brasileiras, para realizar o procedimento de calibragem, a fim de gerar uma cidade monocêntrica representativa de porte médio. Os resultados do baseline foram consistentes com o perfil espacial das cidades, principalmente, com a literatura de Economia Urbana Monocêntrica. Os resultados da cidade representativa simulada foram compatíveis com as evidências da literatura. A renda da terra e a densidade estrutural decrescem em função da distância ao CBD. Os resultados mostraram que quanto mais próximo do centro de empregos, maior é a medida da altura dos edifícios e também o nível de capital. Ao restringir a oferta de terras urbanas, o cinturão verde aumentou a densidade residencial e observou-se um aumento do consumo gasto em deslocamento.

A pesquisa sugere algumas possibilidades de estudos futuros. Recomendam-se avanços na atualização dos dados do modelo, sobretudo com o Censo Demográfico 2022, na calibragem dos parâmetros da função de produção de habitação, parâmetros de emprego e estimação econométrica do consumo energético dos veículos. Além disso, os parâmetros do uso da terra também podem ser aprimorados para se mostrarem mais condizentes com a realidade brasileira, já que pesquisas brasileiras não estudam, por exemplo, o percentual de todo o solo

destinado à habitação. Uma outra extensão que pode ser adotada seria a diversificação das classes de renda das famílias no modelo, de modo a gerar uma cidade representativa mais próxima da realidade empírica. Por fim, recomenda-se trabalhar com outro conjunto de cidades brasileiras para demonstrar esses efeitos mencionados.

## REFERÊNCIAS

- ALONSO, W. Location and Land Use. Cambridge: Harvard University Press, 1964.
- ALTMANN, J. L.; DESALVO, J. S. Tests and extensions of the Mills-Muth simulation model of urban residential land use. *Journal of Regional Science*, v. 21, n. 1, p. 1-21, 1981.
- BENGSTON, David N.; YOUN, Yeo-Chang. Urban containment policies and the protection of natural areas: the case of Seoul's greenbelt. *Ecology and society*, v. 11, n. 1, 2006.
- BERTAUD, A; BRUECKNER, J. K. Analyzing building-height restrictions: predicted impacts and welfare costs. *Regional Science and Urban Economics*, 35 (2): 109-125, 2005.
- BIDERMAN, C.; ARVATE, P. (organizadores). **Economia do Setor Público no Brasil**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 560p, 2005.
- BRASIL. Lei 10.295 de 17 de outubro de 2001. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2001.
- \_\_\_\_\_. Portaria 594 de 19 de outubro de 2011. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2011.
- BROWNSTONE, D.; GOLOB, T. F. The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption. *Journal of Urban Economics*, v. 65, n. 1, p. 91 – 98, 2009.
- BRUECKNER, J. The structure of urban equilibria: a unified treatment of the Muth-Mills Model. In: *Handbook of Regional and Urban Economics*, v. 2, capítulo 20, North-Holland, 1987.
- COSTA, G. C. F. Uma avaliação do consumo de energia com transportes em cidades do Estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- GLAESER, E. L; KAHN, M. E. Sprawl and urban growth. In: HENDERSON, H.; THISSE, J. (Ed.). *Handbook of Regional and Urban Economics*. Amsterdam: North Holland, vol. 4, cap. 56, 2004.
- GOSLING, M. C.; WALKER, A. J. Energy efficiency within the urban design process. *Cities*, v. 9, n. 2, p. 111-116, 1992.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em 6 mar. 2014.
- \_\_\_\_\_. Censo Demográfico 2010. Disponível em: <[www.censo2010.ibge.gov.br](http://www.censo2010.ibge.gov.br)>. Acesso em 6 mar. 2014.
- INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Programa Brasileiro de Etiquetagem. Disponível em: <[http://www2.inmetro.gov.br/pbe/conheca\\_o\\_programa.php](http://www2.inmetro.gov.br/pbe/conheca_o_programa.php)>. Acesso em 8 mar. 2014.
- KENWORTHY, J. R.; LAUBE, F. B. Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy. *Transportation Research Part A*, n. 33, p. 691-723, 1999.
- KOSTER, Hans RA. The welfare effects of greenbelt policy: Evidence from England. *The Economic Journal*, v. 134, n. 657, p. 363-401, 2024.
- LARSON, William; LIU, Feng; YEZER, Anthony. Energy footprint of the city: Effects of urban land use and transportation policies. *Journal of Urban Economics*, v. 72, n. 2-3, p. 147-159, 2012.
- LARSON, William; YEZER, Anthony. The energy implications of city size and density. *Journal of Urban Economics*, v. 90, p. 35-49, 2015.

LARSON, William; YEZER, Anthony; ZHAO, Weihua. An Examination of the Link between Urban Planning Policies and the High Cost of Housing and Labor. Working paper, 2018.

LARSON, William; ZHAO, Weihua. Self-driving cars and the city: Effects on sprawl, energy consumption, and housing affordability. *Regional Science and Urban Economics*, v. 81, p. 103484, 2020.

LARSON, William; ZHAO, Weihua. Telework: Urban form, energy consumption, and greenhouse gas implications. *Economic Inquiry*, v. 55, n. 2, p. 714-735, 2017.

MCMILLEN, D. P. Employment densities, spatial autocorrelation, and subcenters in large metropolitan areas. *Journal of Regional Science*, v. 44, n. 2, p. 225-244, 2004.

MUTH, R. F. **Cities and housing**. Chicago: University of Chicago Press, 1969.

MUTH, R. F. Numerical solution of urban residential land-use models. *Journal of Urban Economics*, v. 2, n. 4, p. 307-332, 1975.

NADALIN, V. G. **Três ensaios sobre economia urbana e mercado de habitação em São Paulo**. Tese (Doutorado em Economia) – Programa de Pós-Graduação em Economia, Faculdade de Economia Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NAESS, P. (1995). **Urban form and energy use for transport – a nordic experience**. Tese de doutorado, Norwegian Institute of Technology, 327p.

NEWMAN, P. *et al.* **Can we overcome automobile dependence? Physical planning in an age of urban cynicism**. *Cities*, v. 12, n. 1, p. 53-65, 1995.

NEWMAN, P. W. G.; KENWORTHY, J. R. (1989a). **Gasoline consumption and cities: a comparison of U.S. cities with a global survey**. *Journal of the American Planning Association*, v. 55, n. 1, p. 24-37.

NEWMAN, P. W. G.; KENWORTHY, J. R. (1989b). **Cities and automobile dependence: a source book**. Aldershot, England, Gower Technical, 388p.

O’SULLIVAN, A. **Urban Economics**. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2011

PAMPOLHA, V. M. P. **Espalhamento urbano e consumo de energia para transportes: o caso das capitais brasileiras**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

PROQUE, Andressa Lemes *et al.* Effects of land use and transportation policies on the spatial distribution of urban energy consumption in Brazil. *Energy Economics*, v. 90, p. 104864, 2020.

PROQUE, Andressa Lemes. O efeito da distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte sobre a eficiência energética em áreas urbanas. 2014.

RIBEIRO, S. K. *et al.* Transport and its infrastructure. *In: Climate Change 2007*. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2007.

SULLIVAN, A. M. The general-equilibrium effects of the residential property tax: Incidence and excess burden. *Journal of Urban Economics*, v. 18, n. 2, p. 235-250, 1985.

VON THÜNEN, J. H. *Der isolierte staat in beziehung auf landwirtschaft und nationalökonomie*. Hamburg: Perthes, 1826. English Translation: WANTENBERG, C. M. **The isolated state**. Oxford: Pergammon Press, 1966.

WOODCOCK, J. *et al.* Energy and transport. **Energy and Health**, 3, 2007: 1078-1088.

Aevermann, T., & Schmude, J. (2015). Quantification and monetary valuation of urban ecosystem services in Munich, Germany. *Zeitschrift für Wirtschaftsgeographie*, 59, 188–200.

Amati, M. (2008). Green belts: a twentieth-century planning experiment. In M. Amati (Ed.), *Urban Green Belts in the Twenty-First Century* (pp. 21–38). Routledge.

Hu, Z., & Wang, S. (2025). Multi-Scenario Simulation of Ecosystem Service Value in Beijing’s Green Belts Based on PLUS Model. *Land*.

- Indu, S. (2015). Importance of Green Belt Concept in Urban Planning. *Journal of Environmental Planning*, 1, 38–45.
- Kazak, J., Malczyk, J., Castro, D., & Szewrański, S. (2016). Carbon Sequestration in Forest Valuation. *Real Estate Management and Valuation*, 24, 76–86.
- Kirby, M. G., Scott, A. J., & Walsh, C. L. (2023). Translating policy to place: exploring cultural ecosystem services in areas of Green Belt through participatory mapping. *Ecosystems and People*, 19.
- Smith, D. A. (2025). Travel sustainability of new build housing in the London region: Can London's Green Belt be developed sustainably? *Cities*, 142, 105574. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105574>
- Xin-tin, F. (2013). Evaluation of Ecosystem Services on Green Belt Surround Shanghai City. *Urban Environment & Urban Ecology*.